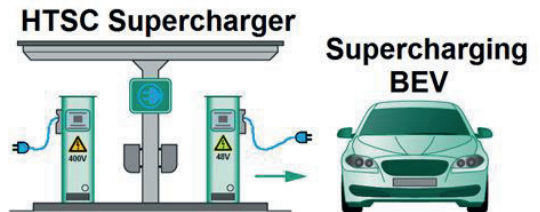
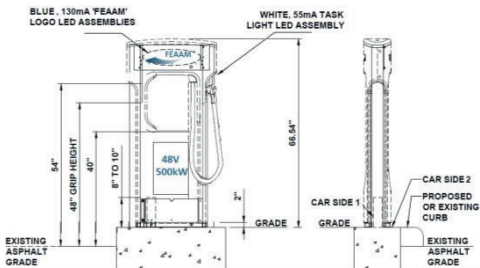
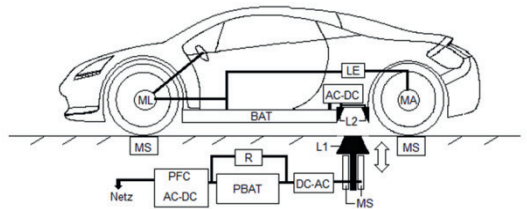
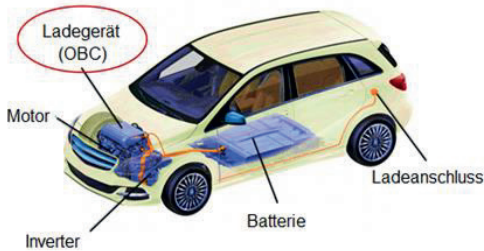


## Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

# Andreas Greifelt

## Elektrisches Laden von 48 V-Batteriefahrzeugen



# Universität der Bundeswehr München

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik (EIT)

Lehrstuhl für Elektrische Antriebe und Aktorik

## **Elektrisches Laden von 48 V-Batteriefahrzeugen** **Andreas Greifelt, M. Sc.**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

### **Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. (habil) Thomas Weyh

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

Die Dissertation wurde am 12.11.2018 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 15.11.2018 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 26.02.2019 statt.



Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 38

**Andreas Greifelt**

**Elektrisches Laden von 48 V-Batteriefahrzeugen**

Shaker Verlag  
Düren 2019

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6660-9

ISSN 1863-0707

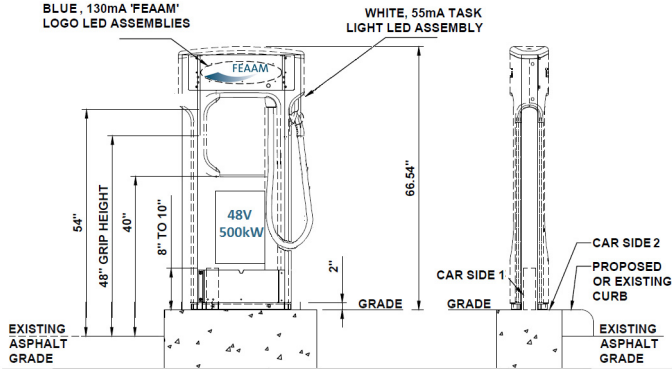
Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Elektrisches Laden von 48 V-Batteriefahrzeugen

Andreas Greifelt, M. Sc.



Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

## Doktor-Ingenieurs

(Dr.-Ing.)

eingereichte Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. (habil) Thomas Weyh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp









# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank nachstehenden Personen entgegenbringen, ohne deren Mithilfe die Anfertigung dieser Promotionsschrift niemals zustande gekommen wäre:

Mein Dank gilt zunächst Herr Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling, meinem Doktorvater, für die Betreuung dieser Arbeit, die stetige fachliche wie persönliche Unterstützung und Förderung sowie die Vielzahl an motivierenden Gesprächen und konstruktiven Beiträgen.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp für die hilfsbereite und wissenschaftliche Betreuung als Zweitgutachter.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen bedanken, welche mich stets auf fachlicher sowie persönlicher Ebene unterstützt haben. Besonderer Dank gilt dabei Herrn Georg Heiland für das tatkräftige Mentoring im Bereich des Leistungselektronikdesigns, Herrn Christian Franke für das resolute Unterstützen im Bereich der C-Programmierung, sowie alle nicht genannten Kollegen für die konstruktiven Beiträge im Rahmen aller Tätigkeiten

Mein außerordentlicher Dank gilt den Industriepartnern von EURO CPS im Rahmen des Horizon 2020 Projektes sowie der FEAAM GmbH, welche die volle Finanzierung meines Projektes im Rahmen der Dissertation gewährleisteten.

Tief verbunden und dankbar bin ich meiner Frau Charlotte für ihre Unterstützung und menschlichen Beistand, aber auch meiner großartigen Familie und Freunden, welche mich während der letzten Jahre trotz vieler notwendiger Entbehrungen stets motivierten und unterstützen.

Ich widme diese Arbeit allen Menschen, die mit stetiger Passion versuchen die Welt etwas besser, sicherer und lebenswerter zu machen.

Neubiberg, im November 2018

Andreas Greifelt



## **Kurzbeschreibung**

Das Kerninhalt der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit ist die Darstellungen von Ladetechniken für BEV mit Traktionsbatteriespannungen kleiner 60 V sowie deren situationsbezogene Anwendbarkeit.

Die Arbeit beginnt mit den theoretischen Grundlagen sowie dem Stand der Technik für die Ladeinfrastruktur von HV-Systemen und LV-Systemen. Im Anschluss folgt für Ladesysteme bis 50 kW, bis 250 kW sowie über 250 kW die Ausarbeitung der Herausforderungen und Machbarkeiten.

Es folgt, jeweils sortiert nach den Leistungsklassen innerhalb von drei Kapiteln, die mögliche Systemauslegung für ein geeignetes System anhand prinzipieller Überlegungen. Diese werden in jedem Kapitel auf Zweckmäßigkeit bezüglich der elektrischen, mechanischen, thermischen aber auch betriebswirtschaftlichen Parameter überprüft sowie mit dem Stand der Technik, insbesondere der Hochvolttechnik, verglichen.

Die Resultate werden kapitelweise diskutiert und im Kontext bewertet. Grundgerüst für die Bewertung sind die tiefgehenden Forschungsfragen in den Kernbereichen der Elektromobilität: Reichweite, Infrastruktur und Preis.

Im Anschluss der Evaluierung respektive Diskussion folgen Ansätze für Optimierungspotentiale sowie deren Durchführbarkeit.

Die wissenschaftliche Arbeit schließt mit der Zusammenfassung und Handlungsempfehlung.



## **Abstract**

The main content of the present scientific thesis is the presentation of charging techniques for BEV with traction battery voltages less than 60 V as well as their situation-related applicability.

The thesis begins with the theoretical basics and the state of the art for the charging infrastructure of HV-systems and LV-systems. This is followed by charging systems up to 50 kW, up to 250 kW and more than 250 kW to elaborate the challenges and feasibilities.

Following, sorted according to the charging power within three chapters, the possible system design for a suitable system is done based on fundamental considerations. These are examined in each chapter for expediency with regard to the electrical, mechanical, thermal but also economic parameters and compared with the state of the art, in particular high-voltage technology.

The results are discussed in chapters and evaluated in context. The basic framework for the evaluation are the in-depth research questions in the core areas of electro mobility: Range, Infrastructure and Price.

Following the evaluation and discussion, approaches for optimization potentials and their feasibility are shown.

The thesis concludes with the summary and recommended action.









# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Formelzeichen</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 <b>Motivation</b> .....	<b>1</b>
1.2 <b>Ziel der Arbeit</b> .....	<b>2</b>
1.3 <b>Aufbau der Arbeit</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Physikalische Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
2.1 <b>Energiewandlung</b> .....	<b>5</b>
2.2 <b>Energieübertragung</b> .....	<b>7</b>
2.3 <b>Energiespeicherung</b> .....	<b>15</b>
2.4 <b>Energienutzung</b> .....	<b>18</b>
<b>3 Grundlagen der Hardware</b> .....	<b>21</b>
3.1 <b>Elektrische Antriebe</b> .....	<b>22</b>
3.1.1 Topologien und Funktionen .....	22
3.1.2 Anwendungen für Hochvolt-Fahrzeuge .....	24
3.1.3 Anwendungen für Niedervolt-Fahrzeuge .....	25
3.2 <b>Umrichter</b> .....	<b>26</b>
3.2.1 Hochvoltumrichter .....	26
3.2.2 Niedervoltumrichter .....	26
3.3 <b>Bordnetze</b> .....	<b>27</b>
3.3.1 Hochvoltbordnetze .....	27
3.3.2 Niedervoltbordnetze .....	28
3.4 <b>Batterietechnik</b> .....	<b>28</b>
3.4.1 Hochvoltbatterie .....	28
3.4.2 Niedervoltbatterie .....	29
3.5 <b>Ladesystemtechnik</b> .....	<b>30</b>
3.5.1 Funktionsprinzipien .....	30
3.5.2 On-board-Ladesysteme .....	31
3.5.3 Externe Ladesysteme .....	33

3.5.4	Intelligente Netze - Smart Grid .....	34
<b>3.6</b>	<b>Netzbetrachtung .....</b>	<b>35</b>
3.6.1	Netzstabilität .....	35
3.6.2	Lastverarbeitung durch Pufferspeicher .....	36
<b>3.7</b>	<b>Ableitung der Forschungsfragen .....</b>	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>Stand der Technik in Systemen und Applikationen .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Ladesysteme bis 50 kW .....</b>	<b>40</b>
4.1.1	On-Board Ladegeräte bis 50 kW .....	40
4.1.2	Externe Ladegeräte bis 50 kW .....	41
<b>4.2</b>	<b>Ladesysteme über 50 kW .....</b>	<b>44</b>
4.2.1	Öffentliche Ladesysteme bis 250 kW .....	44
4.2.2	Öffentliche Ladesysteme ab 250 kW .....	45
<b>5</b>	<b>Adaption und Systemoptimierung von Ladetechniken für 48 V Fahrzeuge bis 50 kW ...</b>	<b>47</b>
<b>5.1</b>	<b>Übersicht .....</b>	<b>47</b>
<b>5.2</b>	<b>Anforderungskatalog .....</b>	<b>48</b>
<b>5.3</b>	<b>Systemauslegung und Simulation .....</b>	<b>49</b>
5.3.1	Power Factor Correction .....	49
5.3.2	Gleichspannungswandler .....	60
<b>5.4</b>	<b>Schaltplangestaltung .....</b>	<b>68</b>
5.4.1	Power Factor Correction .....	68
5.4.2	Gleichspannungswandler .....	72
<b>5.5</b>	<b>Layoutgestaltung .....</b>	<b>74</b>
5.5.1	Power Factor Correction .....	74
5.5.2	Gleichspannungswandler .....	76
<b>5.6</b>	<b>Thermische Auslegung .....</b>	<b>79</b>
5.6.1	Power Factor Correction .....	79
5.6.2	Gleichspannungswandler .....	81
<b>5.7</b>	<b>Hardwarefertigung .....</b>	<b>83</b>
5.7.1	Power Factor Correction .....	83
5.7.2	Gleichspannungswandler .....	84
<b>5.8</b>	<b>Software und Regelung .....</b>	<b>86</b>
5.8.1	Power Factor Correction .....	86
5.8.2	Gleichspannungswandler .....	90
5.8.3	Rückspeisungsfunktion (Vehicle-to-Grid Operation) .....	92
<b>5.9</b>	<b>Durchführbarkeits- und Kostenbewertung .....</b>	<b>94</b>

---

<b>5.10</b>	<b>Evaluierung</b> .....	<b>96</b>
<b>5.11</b>	<b>Technische Optimierungsmöglichkeiten</b> .....	<b>98</b>
<b>6</b>	<b>Adaption und Systemoptimierung von Ladetechniken für 48 V Fahrzeuge bis 250 kW</b> . 99	
<b>6.1</b>	<b>Überblick</b> .....	<b>99</b>
<b>6.2</b>	<b>Systemauslegung</b> .....	<b>103</b>
6.2.1	Gleichrichter und Power Factor Correction .....	104
6.2.2	Pufferspeicher .....	104
6.2.3	Wechselrichter .....	106
6.2.4	Übertrager.....	108
6.2.5	Gleichrichter.....	111
6.2.6	Fahrzeuginnennetz und Batterie.....	112
<b>6.3</b>	<b>Thermische Auslegung</b> .....	<b>113</b>
<b>6.4</b>	<b>Bauraumbetrachtung</b> .....	<b>114</b>
<b>6.5</b>	<b>Autonomisierung des Systems</b> .....	<b>116</b>
<b>6.6</b>	<b>Rückspeisefunktion (Vehicle-2-Grid Operation)</b> .....	<b>117</b>
<b>6.7</b>	<b>Durchführbarkeits- und Kostenbewertung</b> .....	<b>117</b>
<b>6.8</b>	<b>Evaluierung</b> .....	<b>119</b>
<b>6.9</b>	<b>Optimierungsmöglichkeiten</b> .....	<b>121</b>
<b>7</b>	<b>Adaption und Systemoptimierung von Ladetechniken für 48 V Fahrzeuge ab 250 kW</b> 123	
<b>7.1</b>	<b>Überblick</b> .....	<b>123</b>
<b>7.2</b>	<b>Systemauslegung</b> .....	<b>124</b>
7.2.1	Netzanschluss .....	124
7.2.2	Leistungselektronik.....	125
7.2.3	Übertragungskabel .....	126
7.2.4	Steckverbinder.....	130
7.2.5	BEV Innennetz .....	132
<b>7.3</b>	<b>Thermische Auslegung</b> .....	<b>132</b>
<b>7.4</b>	<b>Autonomisierung des Systems</b> .....	<b>134</b>
<b>7.5</b>	<b>Rückspeisefunktion (Vehicle-2-Grid Operation)</b> .....	<b>135</b>
<b>7.6</b>	<b>Durchführbarkeits- und Kostenbewertung</b> .....	<b>135</b>
<b>7.7</b>	<b>Evaluierung</b> .....	<b>136</b>
<b>7.8</b>	<b>Optimierungsmöglichkeiten</b> .....	<b>139</b>
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerung</b> .....	<b>141</b>
<b>8.1</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>141</b>
<b>8.2</b>	<b>Handlungsempfehlung</b> .....	<b>144</b>

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>cxlvi</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>cliil</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>clvii</b>
<b>Vorveröffentlichungsliste .....</b>	<b>clxvii</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>clxxi</b>

# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
A	Anode
AC	Alternating Current, Wechselstrom
AC/DC	Gleichrichter
AWE	Automatische Wiedereinschaltung
BAT	Batterie
BEV	Battery Electric Vehicle
CAD	Computer-Aided Design
CORT	Conductor on Round Cable
CP	Control Pilot
DC	Direct Current, Gleichstrom
DC/AC	Wechselrichter
DC/DC	Gleichspannungswandler
EFF	Effektivwert, Quadratischer Mittelwert einer zeitlich veränderlichen Größe, (auch RMS: Root Mean Square)
ET	Elektrolyt
FEM	Finite Elemente Methode
FOM	Figure of Merit, Gütezahl
FOR	Feldorientierte Regelung
GBKO	Gadolinium-Barium-Kupferoxid ( $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ ), Supraleiterverbindung
GuD	Gas und Dampf Kraftwerk
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
HEV	Hybrid Electric Vehilce
HTS	Hoch Temperatur Supraleiter
HTSC	High Temperature Super Conductor
HV	High Voltage, Hoch-Volt
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
ISCAD	Intelligent Stator Cage Drive
K	Kathode
L1	Primärspule
L2	Sekundärspule
LE	Leistungselektronik
LLC	Schaltung mit Induktivität – Induktivität – Kapazität – Konstellation
LV	Low Voltage, Niedervolt
MOSFET	Metall Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MA	Antriebsmotor
Max	Maximalwert
ML	Lenkmotor

MS	Stellmotor
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
OBC	On-Board Charger, Ladegerät an Bord einer mobilen Anwendung
OEM	Original Equipment Manufacturer, Hersteller fertiger Komponenten / Produkte
PBAT	Pufferbatterie
PE	Protective Eart
PFC	Power Factor Correction, Leistungsfaktorkorrektur
PP	Proximity Pilot
PP	Peak to Peak, Spitze-Tal-Wert einer zeitlich veränderlichen Größe
PWM	Pulsweitenmodulation
RIP	Rest In Peace, Ruhe in Frieden
R	Regelung
RMS	Siehe Eff
Smart Grid	Intelligente Energienetzregelung
TCO	Total Cost of Ownership
USA	United States of Amerika
V2G	Vehicle to Grid

# Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit (SI)	Beschreibung
$a$	m	Seitenlänge
$\alpha_{Ox}$	ohne	Reaktionsaktivität Oxidierend
$\alpha_{Red}$	ohne	Reaktionsaktivität Reduzierend
$A$	m	Fläche, Querschnittsfläche
$A_G$	m	Grundfläche
$b$	m	Seitenlänge
$B_a$	T	Außenfelddichte
$B_{Max}$	T	Maximalflussdichte
$c$	g/ml	Stoffkonzentration
$c_{H_2O}$	J/kgK	Spezifische Wärmekapazität von Wasser
$C$	F	Kapazität
$C$	J/K	Wärmekapazität
$C'$	F/m	Kapazitätsbelag
$C_{BEV}$	Wh	Batteriekapazität eines BEV
$C_{exc}$	Ohne	Exzesskonstante
$C_i$	Wh	Zellkapazität
$C_{Modul}$	Wh	Modulkapazität
$C_{Pufferbatterie}$	Wh	Pufferbatteriekapazität
$C_r$	F	Resonanzkapazität
$C_{System}$	Wh	Modulkapazität
$E$	J	Elektrische Energie
$E_f$	eV	Fermienergie
$E_g$	eV	Energielücke im Valenzband
$E_0$	V	Standardelektrodenpotential
$E_{Akzeptor}$	V	Akzeptorelektrodenpotential
$E_{Donator}$	V	Donatorelektrodenpotential



## 1 Einleitung

$E_{kin}$	J	Kinetische Energie
$f$	Hz	Frequenz
$f_r$	Hz	Resonanzfrequenz
$f_{SW}$	Hz	Schaltfrequenz
F	Asec/mol	Faraday-Konstante
$F_x$	Hz	Normierte Resonanzfrequenz
G	Ohne	Übertragungsfunktion
$G'$	S/m	Ableitungsbelag
h	m	Höhe
H	A/m	Feldstärke
$H_c$	A/m	Koerzitivfeldstärke
h	m	Höhe
h	Js	Planck'sches Wirkungsquantum
I	A	Strom
$I_c$	A	Kritischer Supraleiterstrom
$I_D$	A	Diodenstrom
$I_{Lr}$	m	Resonanzdrosselstrom
$I_{Max}$	A	Maximalstrom
$I_{Strang}$	A	Strangstrom
$I_{T,on}$	A	Transistordurchlassstrom
$I_{wb}$	A	Wirbelstrom
$J_m$	Kgm <sup>2</sup>	Massenträgheitsmoment
$k$	ohne	Verstärkung
$k_H$	ohne	Formfaktor
$k_{Lift}$	ohne	Liftfaktor
l	m	Länge
$l_0$	m	Länge einer Spulenwindung
L	H	Induktivität
$L_1$	H	Primärinduktivität
$L_{1,leer}$	H	Primäre Leerlaufinduktivität

$L_2$	H	Sekundärinduktivität
$L_h$	H	Hauptinduktivität
$L_r$	H	Resonanzinduktivität
$L_\sigma$	H	Streuinduktivität
$L_m$	H	Magnetisierungsinduktivität
m	ohne	Induktivitätenverhältnis
m	kg	Masse
$m_e$	kg	Elektronenmasse
n	ohne	Anzahl
$n_L$	ohne	Anzahl der Stänge eines Leitersystems
$n_{Lph}$	ohne	Anzahl der Ladungen pro Stunde
$n_{Modul}$	ohne	Modulanzahl
$n_{\mu_c}$	ohne	Skalierter Erwartungswert
N	ohne	Windungszahl
P	W	Leistung
$p_{SL}$	hPa	Druck am Supraleiter
$P_{ab}, P_{out}$	W	Abgegebene Leistung
$P_{auf}, P_{in},$	W	Aufgenommene Leistung
$P_{el}$	W	Elektrische Leistung
$P_{mech}$	W	Mechanische Leistung
$P_{wb}$	W	Wirbelstromleistung
$P_V$	W	Verlustleistung
$P_{VU}$	W	Spannungsabhängige Verlustleistung
$P_{FE}$	W	Eisenverlustleistung
$P_{Last=100\%}$	W	Vollastleistung
Q	ohne	Gütefaktor
Q	As	Ladung
$Q_{nsnp}$	Wh	Akkupackkapazität mit n parallelen und n seriellen Zellen
R	$\Omega$	Widerstand
R	$\frac{\text{Kgm}^2}{(\text{sec}^2 \text{ mol K})}$	Gaskonstante

## 1 Einleitung

$r$	m	Radius
$R_{-195^{\circ}C}$	$\Omega$	Widerstand bei $-195^{\circ}C$
$R_{AC}$	$\Omega$	Wechselstromwiderstand
$R_{DS_{on}}$	$\Omega$	Halbleiter Durchlasswiderstand
$R_m$	$\Omega$	Magnetischer Widerstand
S	ohne	Schalter
$t$	sec	Zeit
$t_{on}$	sec	Einschaltzeit
$t_{off}$	sec	Ausschaltzeit
$T, \vartheta$	K	Temperatur
$T_0$	K	Temperatur am absoluten Nullpunkt
U, V	V	Spannung
$U_{in}, U_1$	V	Eingangsspannung
$U_{out}, U_2$	V	Ausgangsspannung
$U_0$	V	Leerlaufspannung
$V_0$	$m^3$	Volumen eines Stoffes am absoluten Nullpunkt
W	J	Arbeit
$X_C$	$\Omega$	Kapazitätanz, Kapazitive Impedanz
$Z_0$	m	Windungshöhe in einer Wicklung
$\alpha$	1/K	Linearer Widerstandstemperaturkoeffizient
$\omega$	Rad/sec	Kreisfrequenz
$\cos \varphi$	ohne	Leistungsfaktor
$\tan \delta$	ohne	Verlustfaktor
$\varphi$	V	Elektrisches Potential
$\rho$	$Kg/m^3$	Dichte
$\rho_{20}$	$Kg/m^3$	Dichte bei $20^{\circ}C$ (Raumtemperatur)
$\rho$	$\Omega mm^2/m$	Spezifischer Widerstand
$\eta$	%	Wirkungsgrad
$\delta$	m	Eindringtiefe bedingt durch den Skin Effekt

---

$\mu_0$	N/A <sup>2</sup>	Magnetische Feldkonstante
$\mu_r, \mu_{Material}$	H/m	Magnetische Permeabilitätszahl

Hinweis: Zur Verbesserung der Lesbarkeit (aus Sicht des Autors) werden Einheiten in Tabellen und Grafiken entgegen der Notation aus DIN 461, DIN 1313 und EN ISO 80000-1 in eckigen Klammern dargestellt. Dies gilt nicht für den Fließtext. Nach DIN 1304 und DIN 1338 werden zudem gegebenenfalls ergänzende Einheitenhinweise wie beispielsweise „Eff“ für Effektivwert als Einheitenindizes angefügt.