



FAU Studien aus dem Maschinenbau 463

Sebastian Hörlin

Integration von Kurzzeitspeichern zur Erhöhung der Energieeffizienz von elektrischen Antriebssträngen

Sebastian Hörlin

Integration von Kurzzeitspeichern zur Erhöhung der Energieeffizienz
von elektrischen Antriebssträngen

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 463

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Sebastian Hörlin

Integration von Kurzzeitspeichern zur Erhöhung der Energieeffizienz von elektrischen Antriebssträngen

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS)


Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen

FAU University Press

2025

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.

Kontakt: Sebastian Hörlin, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, ( <https://ror.org/oof7hpc57>), ORCID: 0009-0004-5624-2516

Bitte zitieren als

Hörlin, Sebastian. 2025. *Integration von Kurzzeitspeichern zur Erhöhung der Energieeffizienz von elektrischen Antriebssträngen*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 463. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-825-5

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren. Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über OPEN FAU der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: <https://open.fau.de/home>

Coverbild: Sambeet D from Pixabay.

Verlag und Auslieferung:
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-824-8 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-825-5 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-825-5

Integration von Kurzzeitspeichern zur Erhöhung der Energieeffizienz von elektrischen Antriebssträngen

Der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ingenieur

vorgelegt von

Sebastian Hörlin, M.Sc.
aus Ochsenfurt

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 09.12.2024

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Franke
Prof. Dr.-Ing. N. Parspour, Universität Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. A. Dietz, TH Nürnberg

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut ELSYS der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm.

Ich möchte mich an dieser Stelle ganz herzlich beim Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Armin Dietz bedanken, der mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben hat und mich während der gesamten Zeit unterstützt hat.

Ein ebenso herzlicher Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke für die wissenschaftliche Begleitung des Forschungsthemas in vielen konstruktiven Gesprächen, sowie für die Ermöglichung der kooperativen Promotion und für die Übernahme des Erstgutachtens.

Weiterhin danke ich Frau Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour für die Übernahme des Zweitgutachtens und des mir damit gegenüberbrachten Vertrauens.

Vor allem die gute Arbeitsatmosphäre am Institut hat maßgeblich zum Erfolg der Arbeit beigetragen. Daher möchte ich mich an dieser Stelle beim Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Norbert Graß und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Kremser sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Germishuizen bedanken. Ein ganz besonderer Dank gilt daher meinen aktuellen und ehemaligen Kollegen am Institut, hierbei vor allem Herrn Dr.-Ing. Georg Möller, Dr.-Ing. Thomas Hubert, Dr.-Ing. Michael Reinlein, Dr.-Ing. Philipp Löhdefink, Andreas Gröger, Dr.-Ing. Sebastian Wendel, Dr.-Ing. Michael Gerstner, Richard Steckel, Martin Regnet, Michael Hörner, Tobias Schindler und Lukas Rabenstein. Genauso möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Lehrstuhls FAPS für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken.

Ferner möchte ich mich bei allen Studenten bedanken, die mich im Rahmen von Projekt- und Abschlussarbeiten unterstützt haben und so zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank meiner Frau Katharina, meinen Eltern und meiner Oma für die moralische Unterstützung über den Zeitraum der Promotion.

Gräfenberg, im Januar 2024
Sebastian Hörlin, M.Sc.

Formel- und Abkürzungsverzeichnis

C_W	parasitäre Kapazität einer Drosselwicklung
R_{Cu}	Kupferwiderstand (zur Berechnung der Stromwärmeverluste einer Drossel)
R_{Fe}	Eisenverlustwiderstand (zur Berechnung der Eisenverluste einer Drossel)
L	Induktivität
d	Skintiefe (äquivalente Leitschichtdicke)
ω	Kreisfrequenz
f	Frequenz
μ_o	magnetische Feldkonstante
μ_r	Permeabilitätszahl
κ_{Cu}	Leitfähigkeitskonstante Kupfer
ρ_{Cu}	spezifischer Widerstand Kupfer
l	Länge
A	Querschnittsfläche
R	Widerstand
d	Durchmesser
$k1_{choke}$	Auf die Bemessungsimpedanz des Umrichters bezogene Impedanz der Drosselspule
$k2_{choke}$	Bezogene Spannungsfall am Längswiderstand der Drosselspule
U_{mL1}	Strangspannung eines Stromversorgungssystems in der Phase L ₁
m	Modulationsindex
$\cos\varphi$	Phasenverschiebung der Grundschiwingung von Strom und Spannung
$\cos\varphi_r$	Phasenverschiebung der Grundschiwingung von Strom und Spannung auf der Ausgangsseite des Umrichters
λ	Leistungsfaktor von Geräteeingangstrom und -spannung

I_{out}	Ausgangsstrom des Umrichters
$I_{\text{r,out}}$	Bemessungsausgangsstrom des Umrichters
R_{Drossel}	Kupferwiderstand der Drossel
P_{N}	Nennleistung der Drossel
U_{DC}	Zwischenkreisspannung des Umrichters
$k_{1\text{DC_link}}$	lastunabhängiger Verlustparameter des Gleichspannungszwischenkreises des Umrichters
$k_{2\text{DC_link}}$	lastunabhängiger Verlustparameter des Gleichspannungszwischenkreises des Umrichters
u_{ac}	Wechselspannungsanteil der Kondensatorspannung
f_{o}	Frequenz der Grundschiwingung des Umrichters
$\tan\delta$	Verlustfaktor
I_{rms}	Effektivwert des Stromes
R_{s}	Innenwiderstand des Kondensators
C	Kapazität eines Kondensators
R_{CuW}	Widerstand der Kupferschienen
R_{EW}	Entladewiderstand
U_{ZK}	Zwischenkreisspannung
$P_{\text{L,on,T}}$	Durchlassverlustleistung eines Leistungshalbleiters
$U_{\text{T,th}}$	Schwellenspannung eines Leistungstransistors
$U_{\text{T,r}}$	Durchlassspannung eines Leistungshalbleiters bei Bemessungsstrom des Umrichters
$P_{\text{L,on,D}}$	Durchlassverlustleistung einer Leistungsdiode
$U_{\text{D,th}}$	Schwellenspannung einer Leistungsdiode
$U_{\text{D,r}}$	Durchlassspannung einer Leistungsdiode bei Bemessungsstrom des Umrichters
$P_{\text{L,sw,T}}$	Schaltverlustleistung eines Leistungstransistors
E_{T}	Schaltverlustenergie eines Leistungstransistors je Volt und je Ampere

$I_{\text{motor_cable}}$	Strom im Motorkabel an einem Leistungsanschluss des Umrichters, der für die Berechnung der Schaltverluste verwendet wird. $I_{\text{motor_cable}}$ repräsentiert einen kapazitiven Ableitstrom, der bei geschirmten Motorkabeln üblicherweise auftritt.
f_{sw}	Schaltfrequenz des Umrichters
$P_{\text{L,sw,D}}$	Schaltverlustleistung einer Leistungsdiode
E_{d}	Schaltverlustenergie einer Leistungsdiode je Volt und je Ampere
$P_{\text{L,inverter}}$	Verlustleistung eines Wechselrichters
\hat{I}_1	Amplitude des Umrichterausgangsstromes
U_{CEo}	Schwellspannung der Durchlasskennlinie des Leistungstransistors
r_{CE}	Bahnwiderstand des Leistungstransistors
U_{F}	Schwellspannung der Durchlasskennlinie der Leistungsdiode
r_{F}	Bahnwiderstand der Leistungsdiode
I_1	Umrichterausgangsstrom
E_{on}	Verlustenergie des Leistungstransistors während des Einschaltens
E_{off}	Verlustenergie des Leistungstransistors während des Ausschaltens
I_{ref}	Referenzstrom bezogen auf den Leistungstransistor
U_{ref}	Referenzspannung bezogen auf den Leistungstransistor
U_{CC}	Kollektor-Emitter-Versorgungsspannung des Leistungshalbleiters
K_{v}	Exponent für die Spannungsabhängigkeit der Schaltverluste
K_{i}	Exponent für die Stromabhängigkeit der Schaltverluste
TC_{Esw}	Temperaturkoeffizient der Schaltverluste $\sim 0,003$ 1/K

T_j	Sperrschichttemperatur des Leistungstransistors
T_{ref}	Referenztemperatur bezogen auf den Leistungs- transistor
E_{rr}	Verlustenergie während der Sperrverzögerungszeit der Leistungsdiode
TC_{Err}	Temperaturkoeffizient der Schaltverluste $\sim 0,006$ $1/K$
$P_{L,rectifier}$	Verluste im Eingangsgleichrichter
$U_{D,th,rectifier}$	Schwellspannung der Gleichrichter Leistungsdi- oden
$U_{D,r,rectifier}$	Durchlassspannung der Gleichrichter Leistungsdi- ode bei Bemessungseingangstrom des Umrichters
$P_{L,on,T,DC-DC}$	Durchlassverluste des Leistungstransistors bei einem DC-Wandler
$I_{out,DC-DC}$	Laststrommittelwert
TC_v	Temperaturkoeffizient der Durchlasskennlinie des Leistungstransistors
TC_r	Temperaturkoeffizient der Durchlasskennlinie des Leistungstransistors
$DC_{(T)}$	Tastverhältnis des Leistungstransistors
$P_{L,on,D,DC-DC}$	Durchlassverluste der Leistungsdiode bei einem DC-Wandler
$DC_{(D)}$	Tastverhältnis der Leistungsdiode
$P_{L,sw,T,DC-DC}$	Schaltverlustleistung des Leistungstransistors bei einem DC-Wandler
$f_{sw,DC-DC}$	Schaltfrequenz der Leistungshalbleiter bei einem DC-Wandler
$P_{L,sw,D,DC-DC}$	Schaltverlustleistung einer Leistungsdiode bei einem DC-Wandler
$P_{L,DC-DC}$	Verluste der Halbleiter bei einem DC-Wandler
$P_{V,Ansteuer,DC-DC}$	Ansteuerverluste eines DC-Wandlers
$P_{Ansteuer_o,DC-DC}$	lastunabhängiger Anteil der Ansteuerverluste eines DC-Wandlers
$P_{Nenn,DC-DC}$	Nennleistung des DC-Wandlers

$X_{\text{Ansteuer,DC-DC}}$	Faktor zur Berechnung der lastabhängigen Anteile der Ansteuerungsverluste eines DC-Wandlers
M	Drehmoment
n	Drehzahl
$P_{\text{V,Motor}}$	Verluste einer elektrischen Maschine
P_{el}	elektrische Leistung einer elektrischen Maschine
P_{mech}	mechanische Leistung einer elektrischen Maschine
$P_{\text{Cu,Strang}}$	Stromwärmeverluste in einem Strang einer elektrischen Maschine
R_{Strang}	Strangwiderstand einer elektrischen Maschine
I_{Strang}	Strangstrom einer elektrischen Maschine
$P_{\text{V,Z}}$	Verzahnungsverluste eines Getriebes
$P_{\text{V,L}}$	Lagerverluste eines Getriebes
$P_{\text{V,D}}$	Dichtungsverluste eines Getriebes
$P_{\text{V,X}}$	Verluste sonstiger Bauteile eines Getriebes
i_o	Standardgetriebeübersetzung
d_{Hohlrad}	Hohlraddurchmesser eines Planetengetriebes
$d_{\text{Sonnenrad}}$	Sonnenraddurchmesser eines Planetengetriebes
M_1	Drehmoment vor einem Getriebe
M_2	Drehmoment nach einem Getriebe
\ddot{u}	Übersetzungsverhältnis eines Getriebes
ω_1	Kreisfrequenz vor einem Getriebe
η_G	Getriebewirkungsgrad
P_{LT}	Verluste eines Motors
$P_{\text{r,M}}$	Bemessungsleistung eines Motors
n_N	Nenn Drehzahl eines Motors
C	Kapazität eines Kondensators
U_1	minimale Spannung an einem Kondensator
U_2	maximale Spannung an einem Kondensator
W	Energieinhalt eines Kondensators

$P_{\text{zweipolig}}$	Leistung einer zweipoligen elektrischen Maschine
$P_{\text{vierpolig}}$	Leistung einer vierpoligen elektrischen Maschine
$P_{\text{Differenz}}$	Differenzleistung von zwei elektrischen Maschinen
m_1	Leergewicht einer Aufzugskabine
m_2	Masse des Gegengewichts eines Aufzuges
$m_{\text{P_MAX}}$	maximal zulässige Beladung einer Aufzugskabine
g	Gewichtskraft
m	Masse
h	Höhe
J	Massenträgheitsmoment
ω	Winkelgeschwindigkeit
W_{hyst}	Verlustenergie der Hystereseverluste
H	magnetische Feldstärke
B	magnetische Flussdichte
P_{H}	massenspezifische Hystereseverlustleistung
η_{M}	Materialkonstante zur Berechnung der massenspezifischen Hystereseverlustleistung
α	Konstante zur Berechnung der massenspezifischen Hystereseverlustleistung
k_{H}	Faktor der Fertigungseinflüsse bei der Materialbearbeitung
P_{W}	Wirbelstromverluste
k_{W}	Zuschlagsfaktor für die Materialbearbeitung zur Berechnung der Wirbelstromverluste
σ_{W}	Materialkonstante zur Berechnung der Wirbelstromverluste
f_{N}	Referenzfrequenz
B_{N}	Referenzflussdichte
P_{excess}	Faktor nach Bertotti zur Berechnung der Eisenverluste
P_{Fe}	Eisenverluste

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Formel- und Abkürzungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis.....	xv
Abbildungsverzeichnis.....	xix
1 Einleitung.....	1
1.1 Aufgabenstellung.....	2
1.1.1 Zentrale These der Arbeit	2
1.1.2 Untergeordnete Forschungsfragen und methodische Ansätze ...	3
1.2 Aufbau der Arbeit – Lösungsansatz	5
2 Stand der Technik im Bereich Integration von Kurzzeitspeichern und Effizienzberechnung von Antriebsystemen	7
2.1 Speichertechnologien und elektrische Kurzzeitspeicher	7
2.2 Energiemanagement und Auslegung	8
2.3 Ansätze einzelner Komponenten	10
2.4 Eigene Vorarbeiten und Veröffentlichungen	11
3 Verlustmodellierung verschiedener Komponenten in mechatronischen Antriebssträngen	13
3.1 Grundbegriffe Wirkungsgrad, Energieeffizienz und Verluste.....	13
3.2 Verluste in Frequenzumrichtern	16
3.2.1 Ansteuer- und Kühlverluste in Frequenzumrichtern.....	17
3.2.2 Netzfilter (EMV-Filter)	19
3.2.3 Netz- und Motordrosseln.....	19
3.2.4 Gleichspannungszwischenkreis.....	24
3.2.5 Ausgangswechselrichter	28
3.2.6 Eingangsgleichrichter.....	37
3.2.7 DC-Wandler	40
3.3 Verluste in elektrischen Maschinen	44
3.3.1 Asynchronmaschinen.....	44
3.3.2 Permanentterregte Synchronmaschinen.....	51

3.4	Verluste in Getrieben	52
3.4.1	Stirnradgetriebe	52
3.4.2	Planetengetriebe	53
3.4.3	Verlustbetrachtung in Getrieben im Hinblick auf die Übersetzung.....	55
3.5	Verluste in elektrischen und elektrochemischen Energiespeichern.....	56
3.5.1	Kondensatoren.....	57
3.5.2	Akkumulatoren.....	57
4	Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten	61
4.1	Asynchronmotor.....	65
4.2	Permanenterregte Synchronmaschine	71
4.3	Frequenzumrichter.....	71
4.4	Doppelschichtkondensatoren.....	81
4.5	Akkumulatorsysteme	83
4.6	DC-Wandler	84
4.7	Vergleich gemessene und berechnete Verlustkennfelder	86
5	Berechnung der Energieeffizienz anhand von Fahrprofilen	97
5.1	Fahrprofilvorgaben	97
5.2	Berechnungsergebnisse anhand einer realen Materialförderanlage.....	101
5.3	Evaluierung der Berechnungen anhand von Messungen	106
6	Energieeinsparung durch Integration von Kurzzeitspeichern in Antriebssysteme	109
6.1	Potentialabschätzung der Speicherung im Antriebssystem.....	109
6.2	Vergleich von Energiespeichern, die im Antriebssystem zum Einsatz kommen können	114
6.3	Realisierung eines Speichersystems zur Integration in einen Antriebsstrang	118
6.4	Energetischer Vergleich eines Aufzuges mit und ohne Speichersystem	121
6.5	Energetischer Vergleich einer Materialförderanlage mit und ohne Speichersystem	124
6.6	Verifizierung der Berechnungen anhand von Messungen.....	126

7	CO₂- und Kosteneinsparung durch Integration von Kurzzeitspeichern in Antriebssysteme	129
7.1	Berechnungsbeispiel Materialförderanlage mit Speichereinheit	129
7.2	Berechnungsbeispiel Aufzug mit Speichereinheit	134
7.3	Kosteneinsparung durch den Einsatz von effizienteren Motoren	137
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	143
9	Summary and outlook	145
	Literaturverzeichnis	147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Messung und Berechnung von Ansteuerverlusten an Umrichtern verschiedener Leistungsklassen	18
Tabelle 2:	Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Verluste in der Netzdrossel	22
Tabelle 3:	Ergebnistabelle der Vermessung von Kupferwiderständen von Eingangsdrosseln für verschiedene Umrichterleistungsklassen	22
Tabelle 4:	Gemessene und berechnete Verluste in Eingangsdrosseln für verschiedene Umrichterleistungsklassen (genaue Beschreibung der Komponenten im Anhang)	23
Tabelle 5:	Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Verluste in den Zwischenkreiskondensatoren und entsprechenden Widerständen	25
Tabelle 6:	Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Verluste in den Stromschienen	26
Tabelle 7:	Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Durchlassverluste in IGBTs.....	30
Tabelle 8:	Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Durchlassverluste der Freilaufdioden.....	31
Tabelle 9:	Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Schaltverluste in IGBTs.....	32
Tabelle 10:	Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Schaltverluste der Freilaufdioden	32
Tabelle 11:	Leistungsfaktoren der Prüflast nach Norm EN 50598-2:2014, in Abhängigkeit von Nennleistung und tatsächlicher Auslastung des Ausgangswechselrichters	35
Tabelle 12:	Vergleich der Halbleiterverluste im Ausgangswechselrichter nach Norm und Berechnungsprogramm	36
Tabelle 13:	Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Verluste im Eingangsgleichrichter	39
Tabelle 14:	Vergleich der Halbleiterverluste im Eingangsgleichrichter nach Norm und Berechnungsprogramm	40
Tabelle 15:	Messwerte der Ansteuerverluste bei DC-Wandlern mit unterschiedlichen Nennleistungen.....	43

Tabelle 16: Referenzparameter zur Berechnung der Ansteuerungsverluste von DC-Wandlern	44
Tabelle 17: Verluste einer Asynchronmaschine nach Entstehungsort und -ursache [63]	50
Tabelle 18: Berechnungsdauer für Verlustkennfelder verschiedener Komponenten mit jeweils 10.000 Stützpunkten.....	64
Tabelle 19: Koeffizienten für 4polige IE2 Motoren als Funktion des relativen Drehmoments.....	67
Tabelle 20: Koeffizienten für 4polige IE2 Motoren als Funktion der relativen Drehzahl.....	68
Tabelle 21: Tabelle der Koeffizienten zur Verlustberechnung der Motoren	70
Tabelle 22: Zusammenfassende Darstellung der benötigten Energie des Beispiels Regalbediengerät	106
Tabelle 23: Vergleich der aufgenommenen Energie zwischen Messung und Berechnung (Simulation) des Regalbediengeräts	107
Tabelle 24: Aufzugsdaten für die Beispielberechnung	121
Tabelle 25: Zusammenfassung der bezogenen Netzenergien des Aufzuges und entsprechende Einsparungen.....	124
Tabelle 26: Zusammenfassung der bezogenen Netzenergien der Materialförderanlage und entsprechende Einsparungen.....	125
Tabelle 27: Vergleich der aufgenommenen Energie zwischen Messung und Berechnung am Beispiel Aufzug	126
Tabelle 28: Preisvergleich der Komponenten zweier Antriebssysteme der Materialförderanlage mit und ohne Rückspeisemöglichkeit der Bremsenergie ins Stromnetz.....	131
Tabelle 29: Vergleich der Investitionskosten der drei verschiedenen, beschriebenen Antriebssysteme für eine Materialförderanlage.....	132
Tabelle 30: Vergleich der Amortisationszeiten am hier dargestellten Beispiel einer Materialförderanlage.....	133
Tabelle 31: Vergleich der CO ₂ Einsparung pro Jahr am hier dargestellten Beispiel einer Materialförderanlage	134
Tabelle 32: Kostenvergleich der Komponenten zweier Antriebssysteme der Aufzugsanlage mit und ohne Rückspeisemöglichkeit der Bremsenergie ins Stromnetz.....	135

Tabelle 33: Vergleich der Investitionskosten der drei verschiedenen, beschriebenen Antriebssysteme	135
Tabelle 34: Vergleich der Amortisationszeiten am hier dargestellten Beispiel eines Aufzuges.....	136
Tabelle 35: Vergleich der CO ₂ Einsparung am hier dargestellten Beispiel eines Aufzuges.....	138
Tabelle 36: Vergleich Energie- und Kosteneinsparung durch Motoren höherer Effizienzklassen am Beispiel Materialförderanlage.....	140
Tabelle 37: Vergleich der Investitionskosten von 7,5 kW Motoren in verschiedenen Effizienzklassen.....	140
Tabelle 38: Amortisationszeit der Investition von Motoren mit höherer Effizienz am Beispiel Materialförderanlage	141

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Hauptkomponenten eines mechatronischen Antriebsstranges	13
Bild 2:	Vergleich Wirkungsgrad und Energieeffizienz Anhand eines Antriebsstranges.	15
Bild 3:	Verlustverursachende Komponenten eines Frequenzumrichters nach Norm DIN EN 50598-2:2014	16
Bild 4:	Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer realen Drossel mit Zeigerdiagramm	20
Bild 5:	Schaltbild eines dreiphasigen Ausgangswechselrichters mit Motor als Last	29
Bild 6:	Schaltbild eines aktiven Eingangsgleichrichters	38
Bild 7:	Schaltbild eines passiven Eingangsgleichrichters	38
Bild 8:	Schaltbild eines DC-Wandlers (Buck-Boost-Converters)	40
Bild 9:	Prinzipieller Verlauf der Hysteresekurve eines ferromagnetischen Materials zur Motorherstellung [57].....	46
Bild 10:	Aufbau eines Planetengetriebes [72]	54
Bild 11:	Prinzip Bild der Getriebeübersetzung mit Wirkungsgrad	55
Bild 12:	Darstellung Leistungsbetrachtung Getriebe	55
Bild 13:	Ersatzschaltbild eines Lithium Akkus in vier verschiedenen Detaillierungsgraden [75].....	58
Bild 14:	Verlauf des Innenwiderstandes einer Akkumulatorzelle Samsung INR18650-25R (Lade- /Entladerate 1C)	59
Bild 15:	Spannungsverlauf beim Laden und Entladen einer Akkuzelle des Typs Samsung INR18650-25R	60
Bild 16:	Verlustentstehung in leistungselektronischen Schaltern (Strom- und Spannungsverlauf am IGBT vereinfacht am Beispiel von ohmschen Verbrauchern)	62
Bild 17:	Gemessenes Verlustkennfeld einer 7,5 kW Asynchronmaschine mit 144 Messpunkten	65
Bild 18:	Berechnetes Verlustkennfeld einer 7,5 kW Asynchronmaschine mit 10.000 Stützpunkten.....	66
Bild 19:	Stationäre Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie einer 7,5 kW Asynchronmaschine	67
Bild 20:	Verlustkennfeld auf Basis der Koeffizienten aus den Tabellen F.1 und F.2 aus der Norm EN 50598-2:2014	69

Bild 21: Polynomische Regression des Verlustkennfeldes aus F.1 und F.2 aus der Norm EN 50598-2:2014 für einen 4poligen 7,5 kW Asynchronmotor	70
Bild 22: Komponenten eines Frequenzumrichters mit Abhängigkeiten der Verluste.....	72
Bild 23: Simulationsmodell in Matlab Simulink Simscape zur Berechnung der Wechselrichterverluste mit dem Teilmodell der Schaltzelle, bestehend jeweils aus IGBT- und Dioden-Modell.....	73
Bild 24: Verlustkennfeld des Wechselrichters eines 7,5 kW Frequenzumrichters bei einer Taktfrequenz von 8 kHz.....	74
Bild 25: Verlustkennfeld des Wechselrichters eines 7,5 kW Frequenzumrichters bei einer Taktfrequenz von 4 kHz.....	75
Bild 26: Verlustkennfeld des Wechselrichters eines 7,5 kW Frequenzumrichters bei einer Taktfrequenz von 20 kHz.....	76
Bild 27: Modell eines passiven Gleichrichters als Netzmodul eines Frequenzumrichters	76
Bild 28: Verlustkennfeld passiver Gleichrichter für einen 7,5 kW Frequenzumrichter	77
Bild 29: Verlustkennfeld aktiver Gleichrichter für einen 7,5 kW Frequenzumrichter (Taktfrequenz 8 kHz)	78
Bild 30: Verlustkennfeld gesamter Frequenzumrichter mit aktiver Gleichrichtung und 8 kHz Taktfrequenz	79
Bild 31: Verlustkennfeld gesamter Frequenzumrichter mit aktiver Gleichrichtung und 4 kHz Taktfrequenz	80
Bild 32: Verlustkennfeld gesamter Frequenzumrichter mit aktiver Gleichrichtung und 20 kHz Taktfrequenz	80
Bild 33: Erhöhung der Verluste des gesamten Wechselrichters von passiver Gleichrichtung mit 4 kHz Taktfrequenz zu aktiver Gleichrichtung mit 20 kHz Taktfrequenz.....	81
Bild 34: Verlustkennfeld des berechneten Supercap-Speichers.....	82
Bild 35: Verlustkennfeld eines Akkumulatorsystems	83
Bild 36: Foto der verwendeten Zelle des TypsSLPB98106100 der Firma Kokam [76]	84
Bild 37: Schaltbild DC-Wandler zur Anbindung eines Speichers an ein Antriebssystem	85

Bild 38: Verlustkennfeld eines DC-Wandlers in Buck-Boost Ausführung	86
Bild 39: Gemessenes Verlustkennfeld einer 7,5 kW Asynchronmaschine mit 144 Messpunkten	87
Bild 40: Berechnetes Verlustkennfeld einer 7,5 kW Asynchronmaschine mit 144 Stützpunkten	88
Bild 41: Absolute Abweichungen gemessenes und berechnetes Verlustkennfeld einer 7,5 kW Asynchronmaschine	88
Bild 42: Prozentuale Abweichungen gemessenes und berechnetes Verlustkennfeld einer 7,5 kW Asynchronmaschine	89
Bild 43: Gemessenes Verlustkennfeld eines 7,5 kW Frequenzumrichters mit 144 Messpunkten	90
Bild 44: Berechnetes Verlustkennfeld eines 7,5 kW Frequenzumrichters mit 144 Stützpunkten	90
Bild 45: Absolute Abweichungen gemessenes und berechnetes Verlustkennfeld eines 7,5 kW Frequenzumrichters	91
Bild 46: Prozentuale Abweichungen gemessenes und berechnetes Verlustkennfeld eines 7,5 kW Frequenzumrichters	91
Bild 47: Energievergleich der Simulation verschiedener Lade- und Entladezyklen eines Supercap-Speichers.....	92
Bild 48: Energievergleich der Messung verschiedener Lade- und Entladezyklen eines Supercap-Speichers.....	93
Bild 49: Vergleich zwischen Simulation und Messung der Verluste in einem Supercap-Speicher	93
Bild 50: Energievergleich der Simulation verschiedener Lade- und Entladezyklen eines Akkumulator-Speichers.....	94
Bild 51: Energievergleich der Messung verschiedener Lade- und Entladezyklen eines Akkumulator-Speichers.....	95
Bild 52: Vergleich zwischen Simulation und Messung der Verluste in einem Akkumulator-Speicher.....	95
Bild 53: Vorgabe eines Fahrprofils zur Verlustberechnung eines Antriebssystems	98
Bild 54: Aufbau eines mechatronischen Antriebsstrangs mit Drehzahl-/Drehmomentanforderung des Arbeitsprozesses	99
Bild 55: Beispiel der Berechnungskette der Leistung beziehungsweise des Energieflusses eines Antriebssystems an einem beispielhaften Arbeitspunkt	100

Bild 56: Fahrprofil einer Materialförderanlage über einen Zeitraum von 60 Minuten.....	101
Bild 57: Foto (links) und Skizze (rechts) eines Regalbediengerätes	102
Bild 58: Elektrische Leistung und Drehfrequenzauswertung für den zweipoligen Motor	102
Bild 59: Elektrische Leistung und Drehfrequenzauswertung für den vierpoligen Motor	103
Bild 60: Aufgenommene Netzleistung aus dem Netz bei zwei- und vierpoligem Motor	103
Bild 61: Vergleich der Netzleistung zwischen zweipoligem und vierpoligem Motor ($P_{\text{Differenz}} = P_{\text{vierpolig}} - P_{\text{zweipolig}}$).....	104
Bild 62: Vergleich der aus dem Netz bezogenen Energie mit und ohne Rückspeisung, sowie der mechanischen Energie einer Förderanlage.....	105
Bild 63: Übersichtsschaltbild des Energiespeichersystems in der Antriebseinheit	110
Bild 64: Prinzipdarstellung eines Aufzuges	111
Bild 65: Schaltbild eines Antriebsumrichters ohne Rückspeiseeinheit	112
Bild 66: Ragone-Diagramm zum Vergleich von Energie- und Leistungsdichte von Akkumulatoren und Kondensatoren [86].....	114
Bild 67: Darstellung des prinzipiellen Aufbaus eines Schwungradspeichersystems [88]	116
Bild 68: Foto des Aufbaus eines der entwickelten DC-Wandlers im Labor.....	119
Bild 69: Prinzipieller Aufbau eines Motorenprüfstandes	120
Bild 70: Schaltbild des DC-Wandlers um die Funktion eines Bremschoppers erweitert	120
Bild 71: Höhenprofil des Aufzuges in Kombination mit der Beladung der Aufzugskabine	122
Bild 72: Drehmoment- Drehzahlprofil des Aufzugsantriebs.....	123
Bild 73: Vergleich der bezogenen Netzenergie des Aufzugssystems anhand des definierten Fahrprofils	123
Bild 74: Vergleich der bezogenen Netzenergie der Materialförderanlage mit und ohne Speicher im Antriebssystem	125

Bild 75: Darstellung der Amortisation der Nachrüstung eines Speichersystems in ein bestehendes Antriebssystem am Beispiel einer Materialförderanlage bei einem Strompreis von 21,38 ct/kWh	133
Bild 76: Darstellung der Amortisation der Nachrüstung eines Speichersystems in ein bestehendes Antriebssystem am Beispiel eines Aufzuges bei einem Strompreis von 21,38 ct/kWh	137
Bild 77: Übersicht über die Wirkungsgradvorgaben von Asynchronmotoren der verschiedenen Effizienzklassen nach DIN EN 60034-30-1 [94]	138
Bild 78: Vergleich der bezogenen Netzenergie der Materialförderanlage beim Einsatz von verschiedenen Motoren	139

1 Einleitung

Angesichts steigender Strompreise, zunehmender Ressourcenknappheit an fossilen Brennstoffen und dem fortschreitenden Wandel der Energieversorgung hin zu regenerativen Erzeugungsformen, tritt der bewusste Umgang mit Energie im industriellen Bereich zunehmend in den Vordergrund. Für mittelspannungsversorgte Industrieunternehmen (Jahresverbrauch 160 bis 20.000 MWh) ist der durchschnittliche Strompreis vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2020 um 193 % gestiegen. Im Jahr 2000 lag der durchschnittliche Preis bei 6,05 €/kWh bis zum Jahr 2020 stieg dieser auf 17,75 €/kWh an [1]. Aufgrund der globalen Verwerfungen im Energiesektor des letzten Jahres stieg der Strompreis bis Dezember 2022 auf 54,9 €/kWh was einer Steigerung von 209 % gegenüber 2020 und einer Steigerung 807 % gegenüber 2000 entspricht [2].

Aufgrund dieser Entwicklungen wird gezielt nach Energieeinsparpotentialen gesucht, um Anlagen und Systeme effizienter und kostengünstiger betreiben zu können. Hierbei bietet auch die elektrische Antriebstechnik ein enormes Einsparpotential. In Deutschland entfallen etwa 47 % des gesamten Stromumsatzes auf die Industrie, davon werden etwa 70 % in elektrischen Antrieben umgesetzt [3].

Mit einem Anteil von 22 % stellen Pumpenanlagen den größten Bereich unter den elektrischen Antrieben dar. Bei Pumpenanlagen hängt der Wirkungsgrad des Gesamtsystems sehr stark vom Arbeitspunkt ab. Die allermeisten Pumpenanlagen werden heute noch mit starr ans Netz gekoppelten Motoren betrieben. Eine Regelung findet, wenn überhaupt, mittels Drosselklappen oder Schieber statt. Allein durch eine Umstellung auf Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter kann eine Energieeinsparung von 26 TWh pro Jahr alleine in Deutschland erreicht werden [3]. Zudem besteht durch Einsatz von Motoren höherer Effizienzklassen ein zusätzliches Einsparpotential von 7 TWh pro Jahr [3]. Dies entspricht immerhin circa 6 Prozent des gesamten deutschen Stromverbrauchs und 13 Prozent des Stromverbrauchs der deutschen Industrie [4]. Aber auch bei anderen Anwendungsfeldern der elektrischen Antriebstechnik besteht erhebliches Energieeinsparpotential. So ist es zum Beispiel extrem wichtig, die Antriebskomponenten richtig auf den Anwendungsfall auszuliegen. Gerade bei kleinen Unternehmen, hier vor allem im Handwerk, werden Antriebskomponenten überdimensioniert. Dies hat zur Folge, dass das ganze System ausschließlich im Teillastbetrieb arbeitet und somit die Ener-

gieeffizienz deutlich schlechter ist als bei richtig ausgelegten Komponenten.

Aber auch bei Komponenten gleicher Leistung gibt es erhebliche Unterschiede in Bezug auf die Energieeffizienz. So sind zum Beispiel bei der Neubeschaffung elektrischer Maschinen aktuell die Effizienzklassen IE₂ bis IE₄ verfügbar. Hierzu ist zu sagen, dass eine elektrische Maschine mit steigender Effizienzkategorie weniger Energie umsetzt [5]. Allerdings sind Maschinen mit höherer Effizienzkategorie teurer in der Beschaffung. Ähnliches gilt für Frequenzumrichter, auch hier gibt es Unterschiede im Preis und der Energieeffizienz. Aus volkswirtschaftlicher und unternehmerischer Sicht wäre es wünschenswert, wenn eine Methodik und ein zugehöriges Rechenverfahren die effizienteste und kostengünstigste Variante bei einem gegebenen Fahrprofil aus verfügbaren Antriebskomponenten zusammenstellt.

1.1 Aufgabenstellung

Während die Möglichkeit der Energierückspeisung ins Netz heute schon bei vielen industriellen Antriebssystemen zur Effizienzsteigerung eingesetzt wird, spielt die Energiespeicherung direkt im Antriebssystem heute noch keine Rolle. Diese könnte aber gerade bei bestehenden Systemen für eine deutliche Verbesserung der Energieeffizienz sorgen. Dadurch entsteht die zentrale Fragestellung dieser Arbeit.

1.1.1 Zentrale These der Arbeit

„Durch den Einsatz von Kurzzeitspeichern unmittelbar im Gleichspannungszwischenkreis wird die Energieeffizienz in industriellen Antriebssystemen gegenüber den bisherigen rückspeisefähigen, netzgekoppelten Antrieben erheblich gesteigert.“

Der Kern der Arbeit geht den Fragen nach, wieso und unter welchen Voraussetzungen mit der Integration von Kurzzeitspeichern eine Verbesserung der Energieeffizienz herbeigeführt wird.

1.1.2 Untergeordnete Forschungsfragen und methodische Ansätze

Zur Untermauerung der zentralen These wurden verschiedene untergeordnete Fragestellungen abgeleitet und zugehörige Methoden entwickelt, die quantitative und verifizierbare Antworten für den Energieumsatz und die Energieeffizienz bei unterschiedlichen Antriebsstrangtopologien ermöglichen. Insbesondere die Abbildung von Antriebsstrukturen mit Integration von elektrischen Kurzzeitspeichern und der Vergleich mit konventionell aufgebauten Antriebssträngen wurde vorrangig adressiert.

Es wurden sowohl modellbasierte Simulationsläufe als auch experimentelle Überprüfungen an realen Antriebssträngen durchgeführt, um die These zu verifizieren.

Die Basis für eine hinreichend genaue Vorausberechnung der Energieumsätze für vorgebbare Fahrprofile bilden modellbasierte und parametrierbare Verlustansätze. Weiterhin ist es sinnvoll gemessene Verlustkennfelder als Basis für die energetische Berechnung von Fahrprofilen einzusetzen.

Die für die Betrachtung herangezogenen Fahrprofile wurden aus konkreten Anwendungsfällen, wie Materialförderung und Aufzug abgeleitet.

Für die modellbasierte Beschreibung der Energieumsätze in den Subkomponenten wurden verschiedene Verlustmodelle herangezogen und in ein für diese Arbeit entwickeltes Berechnungsprogramm überführt, das die oben genannten Simulationsläufe und die Bewertung der Energieeffizienz für vorgebbare Fahrprofile erlaubt. Das Berechnungsprogramm bietet die nach Norm basierte Verlustmodellierung (EN 50598-2:2014) als auch die Berechnung gemäß gängiger Ansätze und die Modellierung der Verluste, die auf eigene Untersuchungen und Verifikationen aufbauen.

In anwendungstypischen Fahrprofilen wurden die Leistungsflüsse unter Berücksichtigung der verschiedenen Verlustmodelle zeitlich integriert als Energieumsätze und als Gütefaktoren „Energieeffizienz“ berechnet.

Ausgangspunkt der energetischen Betrachtungen ist ein typischer mechanischer Antriebsstrang in der industriellen Anwendung. Dieser Antrieb wurde als strukturelle Referenz definiert und in seine, für die Energieumsätze maßgeblichen, Subkomponenten zerlegt und analysiert.

Die Integration des Kurzzeitspeichers in den Gleichspannungszwischenkreis kann auf zweierlei Weise erfolgen: entweder als direkte Anbindung von Doppelschichtkondensatoren an den Zwischenkreis oder als Ankopplung über einen DC/DC-Wandler. Beide Varianten wurden hinsichtlich ihrer Energie- und Kosteneffizienz untersucht.

Eine untergeordnete Fragestellung ist, welche wesentlichen Verlustmechanismen bei der Energieeffizienzbeurteilung in mechatronischen Antriebssystemen eine Rolle spielen? Hierfür wurden die verschiedenen Verlustmechanismen in Bezug auf Fahrprofil und äußeren Gegebenheiten näher untersucht.

Als kritischer Punkt hat sich die Frage herausgestellt, wie und wie genau die Verluste in den einzelnen Komponenten eines mechatronischen Antriebsstranges bestimmt werden können. Hinterfragt wurde insbesondere die Verlustberechnungen gemäß Norm und die daraus erzielbare Genauigkeit für die Bewertung der Energieeffizienz. Dieser Aspekt führt auf die untergeordnete Fragestellung, ob die Verlustberechnungen der einzelnen Komponenten eines mechatronischen Antriebsstranges nach Norm genau genug sind, um diese für eine energetische Bewertung sinnvoll einsetzen zu können?

Eine weitere untergeordnete Fragestellung ergab sich bei der Abbildung der Schaltverluste in den Leistungshalbleitern. Heutige Simulationsprogramme können diese Verlustmechanismen hinreichend genau abbilden, wenn sehr hohe zeitliche Auflösungen bis in den Nanosekunden-Bereich eingestellt werden. Diese sehr kleine zeitliche Granularität führt zu aufwändigen Berechnungen und damit sind aber die Berechnungen von Fahrprofilen, die sich im Minuten- oder Stundenbereich abspielen, aufgrund von zu langer Simulationsdauer nicht mehr handhabbar. Daraus ergab sich die Fragestellung, wie es möglich ist die hohe zeitliche Diskrepanz zwischen Fahrprofilen von mehreren Stunden und Verlustentstehungsmechanismen im Bereich von Nanosekunden gerade bei den Frequenzumrichtern aufzulösen?

Simulationsprogramme sind in der Regel auf eine bestimmte Anwendung zugeschnitten und daher nur für einen begrenzten Anwendungsbereich optimal nutzbar. Im Falle der energetischen Abbildung der Verluste bei Fahrprofilen führt dies zur untergeordneten Frage, mit welcher Methodik ein Berechnungsprogramm den Energieumsatz von Fahrprofilen für verschiedene Antriebstopologien und Applikationen hinreichend gut abbildet?

1.2 Aufbau der Arbeit – Lösungsansatz

Die vorliegende Arbeit beinhaltet acht Kapitel, deren Inhalt ist nachfolgend kurz dargestellt.

Kapitel 1: Darstellung der Problemstellung, sowie Formulierung der zentralen und der untergeordneten Forschungsfragen, deren Beantwortung den Inhalt dieser Arbeit darstellt.

Kapitel 2: Darstellung des Standes der Technik im Bereich Integration von Kurzzeitspeichern zur Erhöhung der Energieeffizienz in elektrischen Antriebssträngen.

Kapitel 3: Darstellung und Berechnung der Verluste in den einzelnen Komponenten eines mechatronischen Antriebsstranges. Dabei wird auf den Stand der Technik beziehungsweise auf die Normung genauso eingegangen, wie auf die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Berechnungsmethoden für einzelne Komponenten oder Teilkomponenten. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Berechnungen der Modelle mit den Werten in den Normen verglichen.

Kapitel 4: In diesem Kapitel wird die Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten eines mechatronischen Antriebsstranges dargestellt. Zur Berechnung der Verlustkennfelder für die elektrischen Maschinen werden die Daten und Werte aus den Normen herangezogen. Hier zeigt sich beim Vergleich mit realen Messwerten, dass die Übereinstimmung sehr gut ist. Zur Berechnung der Verlustkennfelder für Frequenzumrichter werden, neben den genannten Berechnungsvorschriften, Datenblattwerte der Hersteller verwendet. Diese Berechnungen wurden im Anschluss ebenso mit Messwerten verglichen. Zur Verdeutlichung der Diskrepanz der Verlustberechnung nach Norm wurden auch hier Vergleiche angestellt. Die Berechnung der Verlustkennfelder der übrigen Komponenten wurden teilweise nach Norm und teilweise nach eigenen Berechnungsansätzen durchgeführt und jeweils Vergleiche mit Messungen angestellt.

Kapitel 5: Im Rahmen dieses Kapitels wird die Energieeffizienz von mechatronischen Antriebssträngen über Fahrzyklen berechnet. Dazu werden zu Beginn auf Grundlage des eingegebenen Fahrprofils die entsprechenden Komponenten zur Erfüllung der Vorgaben ausgewählt und anschließend mit Hilfe der Verlustkennfelder aus dem vorangegangenen Kapitel die Verluste beziehungsweise die notwendige zugeführte Energie berechnet. Als konkrete Berechnungsbeispiel, dient eine mit typischen Fahrprofilen.

Dabei können verschiedene Varianten von Fahrprofilen ebenso berechnet werden wie unterschiedliche Konfigurationen der Antriebssysteme wie zum Beispiel die Ausführung des Frequenzumrichters mit und ohne Rückspeisemöglichkeit.

Kapitel 6: Dieses Kapitel bezieht sich auf die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Untersuchung zur Weiterentwicklung von mechatronischen Antriebssträngen mit integrierten Speicherelementen. Die Speicher können sowohl elektrische als auch elektrochemische Elemente sein. Zum einen werden die Funktionsweise und die im Rahmen der Arbeit entwickelten Komponenten dargestellt, zum anderen werden energetische Vergleiche zwischen Antriebssträngen mit und ohne Speichereinheit angestellt. Beispielhaft wird dies wieder an den Anwendungen Materialförderanlage und Aufzug aufgezeigt.

Kapitel 7: Aufbauend auf dem vorangegangenen Kapitel werden hier die Kosteneffizienz und die Effekte hinsichtlich möglicher CO₂-Einsparung der verschiedenen Antriebskonfigurationen betrachtet. Als Basis dient das gleiche Fahrprofil wie für die Berechnung der Energieeffizienz. Neben den Kosten für die Energie werden auch die Investitionskosten für die Komponenten eingerechnet. Somit können neben den energetischen Aspekten auch wirtschaftliche und ökologische Aspekte betrachtet werden.

Kapitel 8: Darstellung der Zusammenfassung und der Beantwortung der zentralen und untergeordneten Forschungsfragen aus Kapitel 1, sowie ein Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten.

2 Stand der Technik im Bereich Integration von Kurzzeitspeichern und Effizienzberechnung von Antriebssystemen

Im industriellen Bereich werden heute noch keine elektrischen Kurzzeitspeicher zur Effizienzsteigerung in Antriebssysteme integriert. In mobilen Anwendungen werden bereits Kurzzeitspeicher zur Erhöhung der Dynamik oder zur Entlastung der Hauptspeicher eingesetzt. Ebenso gibt es erste Forschungsansätze und Umsetzungen in kleinem Maßstab zum Einsatz von Hybridspeichern in Stromnetzen beziehungsweise Mikrogrids. Hierbei wurde sowohl das Zusammenspiel der verschiedenen Speicher als auch das Energiemanagement und teilweise auch die Energieeffizienz der Speicher und weiterer notwendiger Komponenten untersucht.

2.1 Speichertechnologien und elektrische Kurzzeitspeicher

Im Folgenden wird auf den Stand der Technik im Bereich Speichertechnologien und Kurzzeitspeicher eingegangen. In [6] wird sehr ausführlich die allgemeine Anwendung von Doppelschichtkondensatoren (sogenannte „Supercaps“) als Kurzzeitspeicher in Elektro- und Hybridfahrzeugen beleuchtet. Hier wird auch das Zusammenspiel von Langzeitspeicher (Akkumulatoren) und Kurzzeitspeicher (Supercaps) dargestellt. Sterner und Stadler geben mit ihrem Buch [7] einen guten Überblick über aktuell vorhandenen Energiespeichertechnologien. Hier werden sowohl Kurz- als auch Langzeitenergiespeicher ausführlich beschrieben und analysiert. Es wird aber nicht auf das Thema Integration von Kurzzeitspeichern in Antriebssystemen eingegangen. In [8] wird sehr intensiv auf das Thema Supercaps eingegangen. Zudem werden Definitionen und Erklärungen zur Funktionsweise von Supercaps geliefert. In [9] hingegen wird mehr auf die fahrdynamische Auslegung von energieeffizienten Antriebssystemen für Fahrzeuge eingegangen. Hier wird der Fokus allerdings auf die Anwendung Schienenfahrzeuge gelegt. Ein Vergleich verschiedener Energiespeichertechniken wird in [10] dargestellt. Hier wird ein Leistungsindex zum Vergleich der verschiedenen Systeme eingeführt anhand dessen eine Bewertung erfolgt. Die Veröffentlichung [11] zeigt neben einem Energiemanagementsystem für Supercaps auch Effizienzberechnungen für Speichersysteme mit Supercaps auf. Allerdings wird hier durchgehend für alle Betriebspunkte mit festen Wirkungsgraden gerechnet, was gerade im

Schwachlastbereich sicher zu deutlichen Abweichungen führt. In [12] wird ein Energiemanagementsystem für hybride Energiespeicher in Fahrzeugen auf Basis von diskreter Wavelet-Transformation vorgestellt. Mit diesem Energiemanagementsystem kann die benötigte Energie im Fahrzeug so gelenkt werden, dass schnelle dynamische Energiebedarfe aus dem Supercap und langsame aus der Batterie gedeckt werden. Diese Regelung ist auch für die Integration von Kurzzeitspeichern in industrielle Antriebssysteme interessant, da hier schnelle Energiebedarfe aus dem Kurzzeitspeicher und langsame aus dem Netz gedeckt werden sollen. Die Dissertation [13] befasst sich ebenfalls mit einem Energiemanagementsystem, allerdings wird hier zur Leistungssteuerung zwischen dem Verbraucher und den Speichern ein neuartiger Quasi-Z-Source Wandler verwendet. In der Arbeit [14] wird eine Emulationsplattform für die Forschung und Entwicklung im Bereich Mikronetze mit Integration von Hybridspeichern dargestellt. Hier wird auch auf die Verluste in einzelnen Komponenten und auf Lebensdauereinflüsse eingegangen. In [15] wird ein Energiemanagementsystem für Hybridspeicher, basierend auf Model Predictive Control, vorgestellt, welches auf Verlustmodellierung von einzelnen Komponenten angewiesen ist. Die Verlustmodellierung ist hier allerdings noch sehr einfach realisiert, was zu nicht unerheblichen Ungenauigkeiten führt.

2.2 Energiemanagement und Auslegung

Der erste und gleichzeitig einer der wichtigsten Schritte zur Effizienzsteigerung in industriellen Antriebssystemen ist die Auslegung der Systeme, sowohl mit als auch ohne Kurzzeitspeicher. Hier ist der Stand der Technik im industriellen Bereich, dass Antriebe und Antriebssysteme hauptsächlich nach dem Punkt der maximalen Leistung ausgelegt werden. Dabei spielt die Betrachtung der Energieeffizienz über einen Fahrzyklus nur eine sehr untergeordnete Rolle. Dies liegt vor allem auch daran, dass viele Antriebssysteme von kleinen Unternehmen und Handwerksbetrieben ausgelegt werden. Hier liegt der Fokus darauf, dass das System robust und zuverlässig funktioniert und in der Beschaffung günstig sein muss. Die Energieeffizienz spielt dabei meist nur eine untergeordnete Rolle, da die laufenden Kosten in der Regel einer anderen Kostenstelle zugeordnet werden als die Investitionskosten.

Eine Betrachtung beziehungsweise eine Berechnung des Energieumsatzes und damit auch der Energieeffizienz ist heute vor allem in der Automobilbranche üblich. Hier wurden mit dem WLTP (Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure) ein einheitlicher Standard geschaffen, mit

Hilfe dessen der Energieumsatz von Fahrzeugen verglichen werden kann. In der öffentlichen Diskussion darüber, wie realitätsnah diese Vergleiche sind, oder eben nicht sind, lässt sich ablesen, dass auch standardisierte Verfahren nicht immer zu realitätsnahen und verlässlichen Ergebnissen führen. In [16] sind zahlreiche Definitionen und Bewertungssätze zum Verbrauch und zur Fahrleistung von Kraftfahrzeugen zu finden.

Bei der Auslegung von Antriebssystem wird oftmals auf die von den Komponentenherstellern zur Verfügung gestellten Auslegungswerkzeugen, gemeinhin als „Tools“ bezeichnet, zurückgegriffen [17], [18], [19]. Bei diesen Tools ist als Eingabe in der Regel die Drehzahl und das Drehmoment im Maximalpunkt gefordert. Zudem wird bei manchen noch eine Betriebsdauer abgefragt. Auf Grund der Eingaben wird dann im besten Fall eine Motor- Umrichter Kombination vorgeschlagen. Bei manchen Herstellern muss zu einem Motor aber auch noch ein passender Umrichter manuell ausgewählt werden. Anhand der Betriebsdauer werden gelegentlich noch Empfehlungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit bei der Auswahl einer IE₂, IE₃ oder IE₄ Maschine vorgeschlagen.

Wenn die Drehzahl der betrachteten Anwendung jedoch sehr niedrig ist, muss der Kunde beziehungsweise der Ausleger erst noch selbst ein Getriebe auswählen und anschließend die benötigten Drehzahlen und Drehmomente der Anwendung mit der Getriebeübersetzung umrechnen, um eine Auswahl für Motor und Umrichter treffen zu können.

Zahlreiche Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit den einzelnen Aspekten der Auslegung von Antriebssystemen, sowohl im industriellen Umfeld aber auch in Fahrzeugen.

In [20] wird die Auslegung von Fahrzeugantriebssystemen hinsichtlich der Energieeffizienz dargestellt und verschiedene Systeme miteinander verglichen. Ähnliches wird auch in [21] präsentiert. Hier wurde der Fokus der Anwendung auf elektrische Busse gelegt und die verschiedenen Komponenten simulationstechnisch abgebildet. Ebenfalls mit der energetischen Modellierung des Antriebssystems von Fahrzeugen beschäftigt sich die Arbeit [22], hier wird vor allem die Echtzeitsimulation in den Vordergrund gestellt. Daher bilden die Simulationsmodelle die Systeme weniger tief ab. Die Modellierung von Antriebssträngen für Fahrzeuge auf Basis der einzelnen verwendeten Komponenten und die daraus abgeleitete Energieeffizienz der Fahrzeuge wird in [23] und [24] dargestellt. Mit der Steigerung der Energieeffizienz von Servoantriebssystemen am Beispiel von Punkt-zu-Punkt Bewegungsaufgaben befasst sich die Arbeit [25]. Hier werden die

Verluste an verschiedenen Arbeitspunkten betrachtet und das Antriebssystem entsprechend simulationstechnisch abgebildet. Zudem gibt es auch noch einige Arbeiten, welche sich mit der Auswirkung von Fahrprofilen auf die Energieeffizienz von Antriebssystemen beschäftigen. Als Beispiel sei hier das Paper [26] genannt, hier wird die Auswirkung von S-Kurven Geschwindigkeitsprofilen auf die Energieeffizienz sehr anschaulich dargestellt.

Neben dieser, von der elektrotechnischen Seite vorangetriebenen Forschung, wurden auch Effizienzoptimierungen von Antriebssträngen von maschinenbautechnischen Forschungseinrichtungen behandelt und auch im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung angegangen [27], [28], [29]. Erstmals wurde von Eidam [27] der Einfluss der Bewegungsgesetze auf den Energiebedarf für eine Antriebsaufgabe untersucht. Alle diese Ansätze basieren allerdings auf sehr einfachen Verlustbeschreibungen der elektrischen Systemkomponente Motor und sind deshalb nur eingeschränkt nutzbar beziehungsweise die Vorhersagegenauigkeit ist zu gering. Ein wesentlicher Kritikpunkt ist die Vernachlässigung der Systemkomponente Umrichter.

Die Grundlage für die Auslegung der Antriebssysteme stellt die Energieeffizienz beziehungsweise der Energieverbrauch für die gewählten Fahrprofile dar. Um die Energieeffizienz berechnen zu können, wird die Kenntnis über die Verluste und Verlustentstehungen in den einzelnen Komponenten benötigt. Hierfür existieren ebenfalls zahlreiche wissenschaftliche Publikationen, welche die Basis für die vorliegende Arbeit bilden.

2.3 Ansätze einzelner Komponenten

In der Veröffentlichung [30] wird der Effekt auf die Energieeffizienz von mobilen Antriebssystemen beim Einsatz von permanenterregten Synchronmaschinen beschrieben. Die Arbeit [31] beschäftigt sich mit der Verlustanalyse von elektrischen Maschinen für Elektro- Hybridfahrzeuge. Hier werden unter anderem die Grundlagen der Verlustentstehung in elektrischen Maschinen aufgezeigt. Mit der Berechnung von Wirkungsgradkennfeldern für Synchronmaschinen beschäftigt sich die Arbeit [32] sehr ausführlich. Auch die Einflüsse von Fertigungsverfahren auf die Effizienz vor allem von elektrischen Maschinen ist Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Arbeiten. In [33] werden die Einflüsse der Fertigungsverfahren auf die Effizienz von Asynchronmaschinen im allgemeinen untersucht und in [34] auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahlblechpaketen. Auf

die Wirkungsgradberechnung von Getrieben in Fahrzeugen wird in [35] eingegangen. Zudem werden hier Optimierungsmöglichkeiten vorgestellt.

Bei den Motorverlusten lassen sich allerdings die Komponenten „Eisen- und Zusatzverluste“ [33] sowie „Oberschwingungsverluste“ nicht in Allgemeinheit befriedigend genau vorhersagen [36]. Für praktische Belange bietet es sich an, diese Verluste über Messungen in Kennfeldern (Verlustkennfelder) zu erfassen und mit den analytischen Modellen zu kombinieren und zum Beispiel die übliche Aufteilung in last- und lastunabhängige Verluste anzuwenden [37]. Die analytischen Modelle erlauben auch Abschätzungen oberhalb bedingter Verluste in der Maschine und somit den Einfluss des Umrichterbetriebs. In der Leistungselektronik können die Verluste in den Leistungshalbleitern durch Schalt- und Durchlassverluste analytisch nachgebildet werden [38].

2.4 Eigene Vorarbeiten und Veröffentlichungen

In zahlreichen eigenen Veröffentlichungen und betreuten studentischen Arbeiten wurde Teile des Forschungsgebietes publiziert. Auf die energetische Simulation von komplexen Antriebssträngen über Fahrzyklen wurde in [39] eingegangen. Die Forschungsergebnisse für die Komponente Speicher und die dazu gehörigen DC-Wandler zur Anbindung wurden in [40], [41] und [42] vorgestellt.

Die betreuten studentischen Arbeiten befassten sich ebenfalls sowohl mit einzelnen Komponenten von Antriebssträngen als auch mit der Berechnung, Auslegung und Optimierung von gesamten Antriebssträngen. Auf der Komponentenebene zum Beispiel die Entwicklung von verschiedenen DC-Wandlern zur Anbindung von Speichern, aber auch die Auslegung und Entwicklung von Wechselrichtern sowohl für den stationären als auch den mobilen Einsatz. Hier stand neben der Funktion auch immer die Energieeffizienzbetrachtung und Modellierung im Fokus der Arbeiten. Zudem wurde in einigen Abschlussarbeiten auch die Modellierung von bestimmten Antriebssystemen wie zum Beispiel einer Förderanlage und eines Aufzuges realisiert.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die überwiegenden Arbeiten auf die Verbesserung einzelner Komponenten zielen. In Arbeiten, die die ganzheitliche energetische Optimierung des Antriebsstrangs von der elektrischen Einspeisung bis hin zum Wirkprozess zum Ziel hatten, wird in sehr einfacher Weise der Antriebsstrang abgebildet. Diese Arbeiten sind

daher nur sehr eingeschränkt allgemein nutzbar. Während einzelne Komponenten eines Antriebssystems, wie zum Beispiel Getriebe [43] oder elektrische Maschinen, in großer Detailtiefe erforscht werden, liegt eine vergleichbare Forschungsqualität im Bereich der energetischen Optimierung kompletter elektrischer Antriebsstränge und deren Betriebsarten nicht vor. Diese Lücke wird mit der vorliegenden Arbeit geschlossen.

3 Verlustmodellierung verschiedener Komponenten in mechatronischen Antriebssträngen

Ein mechatronisches Antriebssystem besteht in den meisten Fällen aus einer Vielzahl von Komponenten, die alle eine verlustbehaftete Energieumwandlung aufweisen. Wobei nicht für jeden Anwendungsfall alle Komponenten benötigt werden und somit auch nicht immer alle Komponenten enthalten sind. Aufgrund der Komplexität und der Vielzahl der verlustverursachenden Komponenten werden im Nachfolgenden die Hauptkomponenten einzeln betrachtet. In Bild 1 sind die Hauptkomponenten eines mechatronischen Antriebsstranges dargestellt. Nach diesen Hauptkomponenten sind die Verlustdarstellungen in den folgenden Unterkapiteln gegliedert.

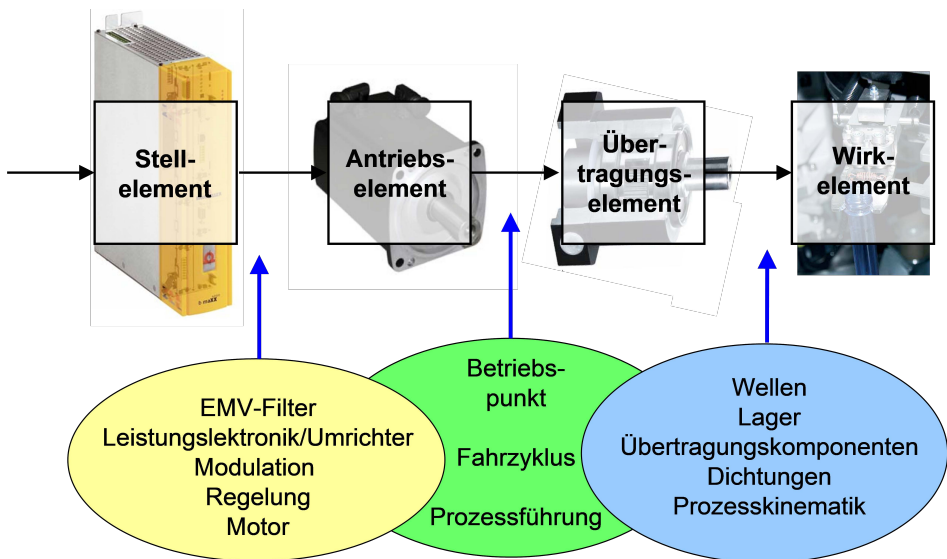


Bild 1: Hauptkomponenten eines mechatronischen Antriebsstranges

3.1 Grundbegriffe Wirkungsgrad, Energieeffizienz und Verluste

Die in der Literatur zu findenden Darlegungen zum Begriff der Energieumwandlung in technischen Prozessen und Speichern erscheinen bezüglich der Verwendung des Begriffes von Wirkungsgrad und Energieeffizienz lei-

der nicht einheitlich und werden auch im weitest gehenden Wortsinne verwendet, wie zum Beispiel die Titel und die Inhalte der deutschsprachigen Bücher zeigen, die „Energieeffizienz“ bereits im Titel aufweisen [44], [45], [46], [47]. In der englischsprachigen Literatur wird diese Weitschweifigkeit und der daraus entstehenden Unklarheit der Begriffe Wirkungsgrad und Energieeffizienz leider auch nicht präzisiert, sondern sogar noch die Unterscheidung erschwert. Im Englischen werden beide Begriffe mit „efficiency“ bezeichnet, obwohl wie im Folgenden gezeigt wird, beide Begrifflichkeiten im physikalischen und technischen Sinne sehr wohl zu unterscheiden sind.

Da diese Begriffe aber für die vorliegende Arbeit von zentraler Bedeutung sind, sei der Definition dieser Begrifflichkeiten hier etwas Raum gewidmet, bevor die einzelnen Wirkungsgrad- und Verlustbetrachtungen zu den Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs folgen.

Jeder energiewandelnde Prozess und auch die Speicherung von Energie beziehungsweise das Laden und Entladen eines Energiespeichers ist von Verlusten begleitet, so dass zur Bewertung dieser Prozesse und Speichervorgänge Gütefaktoren definiert wurden. Wichtig bei der Definition dieser Gütefaktoren sind die Festlegungen von sogenannten Bilanzgrenzen, über die die Zu- und Abflüsse von Energie erfasst werden, zum Beispiel auch solche Energieflüsse, die zur Aufrechterhaltung der Mess- und Steuereinrichtung eines technischen Prozesses benötigt werden, und nicht direkt an der eigentlichen Energiewandlung beteiligt sind.

Unter dem Begriff Wirkungsgrad eines energiewandelnden Prozesses, sei der Quotient aus abgeführter Leistung P_2 zu zugeführter Leistung P_1 in einem (stationären) Arbeitspunkt des Prozesses verstanden.

$$\eta_{AP} = \frac{P_2}{P_1} \tag{1}$$

Weiterhin wichtig ist, in der zugeführten Leistung auch die für den Prozess etwaige Leistungsflüsse für Hilfseinrichtungen, wie zum Beispiel Mess-, Regel- oder Kühleinrichtungen, zu erfassen oder gesondert auszuweisen. In der Regel werden aus Gründen der Vereinfachung die Angaben zum Arbeitspunkt oder auch zur Versorgung der Hilfseinrichtungen weggelassen. Für eine genaue Aussage zur Bewertung des Wirkungsgrades ist dies aber unerlässlich.

Energieumwandlungen bei technischen Prozessen laufen an verschiedenen Arbeitspunkten und daher ist es unumgänglich sogenannte Wirkungsgradkennfelder zu berechnen oder zu erfassen, um eine umfassendere Bewertung des Wirkungsgrades der Energiewandlung vorzunehmen.

Über die zeitliche Integration der Leistungsflüsse gelangt man zum Gütefaktor der Energiewandlung, der als Energieeffizienz definiert ist und die abgeführte Energie ins Verhältnis zur zugeführten Energie über einen definierten Arbeitszyklus setzt.

$$\varepsilon_{\text{Zyklus}} = \frac{W_2}{W_1} \quad (2)$$

Die Energien erhält man, in dem die Leistungen der Bilanzgrenzen zeitlich über den Arbeitszyklus integriert werden:

$$W_1 = \int_{\text{Zyklus}} p_1(t) dt \quad (3)$$

$$W_2 = \int_{\text{Zyklus}} p_2(t) dt$$

Das folgende Bild 2 zeigt einen Vergleich von Wirkungsgrad und Energieeffizienz Anhand eines Antriebsstranges.

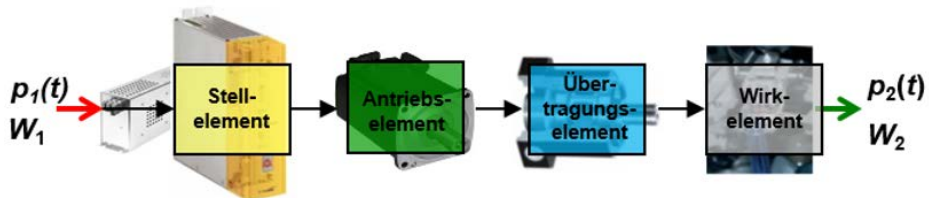


Bild 2: Vergleich Wirkungsgrad und Energieeffizienz Anhand eines Antriebsstranges.

Hier ist wichtig, dass die Leistungsflüsse zeitlich integriert werden und damit alle Arbeitspunkte des Prozesses erfasst werden. Weiterhin ist wichtig, dass der Arbeitszyklus eindeutig definiert ist, um einen Vergleich von verschiedenen Realisierungen der Energiewandlungen durchzuführen. In der Automobilindustrie hat zum Beispiel der sogenannte WLTC (worldwide harmonized light vehicle test cycle) eine hohe Bedeutung, da er weltweit harmonisiert und anerkannt ist [16]. Für industrielle Antriebsstränge existiert bislang kein standardisierter Arbeitszyklus, der einen ein-

heitlichen Vergleich von elektrischen Antrieben erlaubt. Für Antriebssysteme wurden in der Norm EN 50598-2 lediglich acht Arbeitspunkte für die Wirkungsgradbetrachtung definiert, an welchen die Hersteller Angaben machen müssen.

Anzumerken ist auch noch, dass für obige Definition der Energieeffizienz häufig auch die Begriffe „Energienutzungsgrad“, „Nutzungsgrad“ oder auch „mittlerer Wirkungsgrad“ zu finden sind.

Seit vielen Jahren ist bekannt, dass die Verbesserung der Energieeffizienz der entscheidende Faktor ist, um den Primärenergiebedarf zu senken [48]. Die vorliegende Arbeit greift den Aspekt Verbesserung der Energieeffizienz bei elektrischen Antriebssystemen auf und zeigt Wege zur Steigerung der Energieeffizienz sowie zur Vorausberechnung des Energieverbrauches auf.

3.2 Verluste in Frequenzumrichtern

Ein Frequenzumrichter in einem Antriebssystem besteht aus mehreren Komponenten. In all diesen Komponenten entstehen Verluste die berücksichtigt werden müssen. Bild 3 zeigt die verlustverursachenden Komponenten nach Norm DIN EN 50598-2:2014 eines Frequenzumrichters.



Bild 3: Verlustverursachende Komponenten eines Frequenzumrichters nach Norm DIN EN 50598-2:2014

Die dunkel markierten Komponenten sind bei einem industriellen Frequenzumrichter immer enthalten, die hell markierten Komponenten können je nach Anwendungsfall hinzugefügt werden. In den jeweiligen Komponenten ist wiederum eine Vielzahl von Bauelementen vorhanden, welche Verluste verursachen. Diese werden in den nachfolgenden Unterkapiteln genauer beschrieben. Bei komplexeren Antriebssystemen mit mehreren Motoren kann zum Beispiel die „Netzeinheit“ für mehrere

Motoren als ein System zusammengefasst werden. In diesem Fall werden die zur Motorsteuerung benötigten Wechselrichter am Zwischenkreis verbunden. Auch ist es möglich, dass ein in der Ansteuereinheit enthaltener Mikrocontroller mehrere Motoren ansteuert. Durch diese Maßnahme können nicht nur Bauteile eingespart werden, es kann auch die Energieeffizienz gesteigert werden.

3.2.1 Ansteuer- und Kühlverluste in Frequenzumrichtern

Die Verluste die durch die Ansteuerung der Leistungshalbleiter, sowohl in der notwendigen Mikrocontroller Einheit als auch in den Treibern der Leistungshalbleiter entstehen, werden nach Norm EN 50598-2:2014 pauschal berechnet.

Die Verluste für die Ansteuerung werden nach Norm pauschal mit 50 W angesetzt. Dieser Wert deckt sich mit den ermittelten Messwerten für Frequenzumrichter mit einer Leistung größer 100 kW. Die Norm ist allerdings für alle Antriebssysteme mit einer Leistungsklasse von 0,12 kW bis 1000 kW gültig. Messungen an kleineren Umrichtern zeigten, dass hier die Ansteuerverluste deutlich geringer sind. Daher wird für das Berechnungsmodell für Umrichter bis zu einer Nennleistung von 100 kW eine pauschale Verlustleistung von 10 W plus 0,04 Prozent der Nennleistung für die Ansteuerung angesetzt. Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt Messwerte der Ansteuerverluste von Umrichtern, sowie die berechneten Ansteuerverluste nach oben beschriebener Methode von Umrichtern verschiedener Leistungsklassen.

Dieses Vorgehen wurde gewählt, da sich die Ansteuerverluste in Frequenzumrichtern aus lastabhängigen und lastunabhängigen Anteilen zusammensetzen. Als lastunabhängig kann die Versorgungsleistung für den eingesetzten Mikrocontroller und die Versorgung der Strom und Spannungsmessung angesehen werden. Lastabhängig hingegen sind die Leistungen für die Versorgung der Treiber und die Leistung welche zum Schalten der Leistungshalbleiter selbst benötigt wird. Die Leistung, welche zum Schalten der Leistungshalbleiter benötigt wird, hängt maßgeblich von der zuzuführenden Gateladung der eingesetzten Halbleiter ab. Diese nimmt mit der Nennleistung der Halbleiter und somit mit der Nennleistung des Frequenzumrichters zu. Darüber hinaus ist dieser Anteil von der Halbleitertopologie abhängig und in geringem Maße auch vom Herstellungsprozess und damit vom Halbleiterhersteller.

Tabelle 1: Messung und Berechnung von Ansteuerverlusten an Umrichtern verschiedener Leistungsklassen

Leistungsklasse Umrichter	Messwert der Ansteuerverluste	Berechnete Ansteuerverluste	Abweichung gegenüber Messung
10 kW	14 W	14 W	0 %
25 kW	19 W	20 W	5,2 %
50 kW	32 W	30 W	6,3 %
80 kW	41 W	42 W	2,4 %
150 kW	49 W	50 W	2,0 %
250 kW	52 W	50 W	3,8 %

Die Kühlverluste werden nach Norm EN 50598-2:2014 mit 20 % der im Nennpunkt auftretenden Gesamtverluste des Frequenzumrichters veranschlagt. Diese Annahme wird unabhängig von der Kühlungsart getroffen. Das bedeutet, dass die Norm nicht unterscheidet ob der Umrichter luft- oder wassergekühlt ist. Bei Messungen zeigte sich, dass diese Pauschale für die realitätsnahe Betrachtung deutlich zu groß ist. Zudem muss unterschieden werden, ob das System luft- oder wassergekühlt ausgeführt ist und ob die Kühlung in Abhängigkeit von der tatsächlichen Temperatur gesteuert oder geregelt wird oder ob die Kühlung beim Betrieb des Frequenzumrichters immer mit voller Leistung aktiv ist.

Im Rahmen von Messungen zeigte sich, dass Kühlverluste, bei Luftkühlung, von 10 Prozent der im Nennpunkt auftretenden Gesamtverluste als realistische Werte angenommen werden können. Bei Umrichtern mit Wasserkühlung liegt der Wert ähnlich, wenn die elektrische Leistung, welche zum wieder Abkühlen des Kühlwassers benötigt wird, mit in Betracht gezogen wird. In den seltenen Fällen, in denen das Kühlwasser durch natürliche Kühlung zum Beispiel durch Gewässer oder ähnliches wieder abgekühlt wird, liegt die elektrische Leistung für die Kühlung um circa den Faktor fünf niedriger. Dies liegt daran, dass in diesem Fall nur die Kühlwasserpumpe mit Strom versorgt werden muss.

Wasserkühlung wird im industriellen Bereich erst bei größeren Leistungen angewendet, typischerweise ab 100 kW aufwärts. Der Anwendungsfall, dass das Kühlwasser über eine natürliche Ressource abgekühlt wird, tritt noch seltener und wenn dann bei Leistungen im Megawatt Bereich auf. Luftkühlung hingegen wird bei Kleinst-Umrichtern bis hin zu Umrichtern in der Megawatt-Leistungsklasse eingesetzt.

3.2.2 Netzfilter (EMV-Filter)

Die Verluste in EMV-Filtern hängen sehr stark von der jeweiligen Filtertopologie ab. Oftmals werden als EMV-Filter LCL-Filter eingesetzt. In diesen Filtern entstehen hauptsächlich ohmsche Verluste durch die Wicklungswiderstände in den Induktivitäten. Die Kondensatoren sind in EMV-Filtern in der Regel als Y-Kondensatoren ausgeführt und haben daher eine sehr kleine Kapazität. In diesen Kondensatoren entstehen kaum Verluste. Allgemein lässt sich sagen, dass die Verluste in EMV-Filtern im Verhältnis zu den anderen Verlusten sehr gering sind. In der Norm EN 50598-2:2014 werden die Verluste in den EMV-Filtern daher auch vernachlässigt. Auch in dem, im Rahmen dieser Arbeit, entstandenen Berechnungsprogramm werden diese Verluste vernachlässigt.

3.2.3 Netz- und Motordrosseln

Die Verluste in Netz- und Motordrosseln werden in dem Simulationstool separat betrachtet, da diese in der Regel unterschiedlich dimensioniert werden. Motordrosseln werden nicht bei allen Anwendungen von Frequenzumrichtern eingesetzt. Die Dimensionierung der Motordrosseln hängt sehr stark vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Hier spielen zum Beispiel die Leitungslängen zwischen Motor und Umrichter oder auch die Wicklungsisolation der Motoren eine Rolle. Die Dimensionierung der Netzdrossel hängt davon ab, ob das Umrichtersystem über einen aktiven oder passiven Eingangsgleichrichter verfügt. Bei passiven Eingangsgleichrichtern stützt sich die Dimensionierung vor allem auf die Einhaltung der Norm für die Begrenzung der Oberschwingungen (IEC 61000-3-2 für Systeme bis 16 A Stromaufnahme und IEC 61000-3-12 für Systeme mit höherer Stromaufnahme). Bei aktiven Eingangsgleichrichtern müssen neben der Einhaltung der Norm, wie bei passiver Gleichrichtung, auch noch die Anforderungen für die Funktion selbst berücksichtigt werden. Hier gibt es Unterschiede je nach Modulationsart der aktiven Gleichrichtung und nachdem mit welcher Zwischenkreisspannung gearbeitet werden soll.

Die Verluste in Drosseln lassen sich Mithilfe des Ersatzschaltbildes einer realen Drossel, welches in Bild 4 dargestellt ist, berechnen.

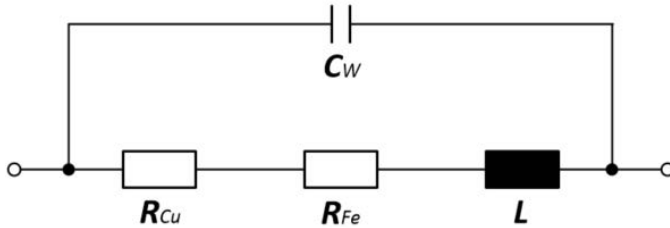


Bild 4: Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer realen Drossel mit Zeigerdiagramm

Der Widerstand R_{Cu} repräsentiert die Kupferverluste. Diese nehmen bei hohen Frequenzen aufgrund des Skin效ektes deutlich zu [49].

Das Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters hat Wirbelströme zur Folge, welche sich entgegen der Stromrichtung ausbreiten. Daraus resultiert eine Stromverdrängung in Richtung der Leiteroberfläche. Dadurch reduziert sich die Wirkfläche des Leiters, wodurch sich der Widerstand folglich vergrößert. Die äquivalente Leitschichtdicke oder auch Skintiefe d kann über die Maxwell-Gleichung hergeleitet werden [49]. Wobei die Kreisfrequenz $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ mit f als Frequenz angesetzt wird, die Permeabilitätszahl μ_r wird aufgrund des Kupferleiters zu eins gesetzt und die Konstante für die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer κ_{Cu} beträgt $56 \text{ m} / \Omega \text{ mm}^2$.

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \kappa_{Cu}}} \quad (4)$$

Mit Hilfe der Formel 3.4 und der Berechnung der Querschnittsfläche als $A = d^2 / 4 \cdot \pi$ mit d als mittleren Durchmesser der Spule, sowie l als Leiterlänge der Spule und ρ_{Cu} als spezifischer Widerstand eines Kupferleiters berechnet durch $1 / \kappa_{Cu}$, ergibt sich demnach für den Widerstand der Spule:

$$R = \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{A} \quad (5)$$

Die Norm EN 50598-2:2014 behandelt die Verluste in den Motordrosseln nicht. Da im Antriebssystem nach Norm keine Motordrossel eingesetzt wird. In realen Antriebssystemen wird die Motordrossel aber häufig verwendet, weshalb im Rahmen dieser Arbeit auch darauf eingegangen wird.

Die Netzdrossel, die auch oft als Eingangsdrossel bezeichnet wird, wird für alle Antriebssysteme mit Frequenzumrichter benötigt, da ansonsten ein normkonformer Betrieb nicht möglich ist. Die Netzdrossel wird für die Begrenzung der Eingangsströme und damit für die Begrenzung der Oberschwingungsströme benötigt. Dies muss gewährleistet sein um die Anforderungen der Norm IEC 61000-3-2 und IEC 31000-3-12 zu erfüllen.

Für die Berechnung der Netzdrossel nach Norm EN 50598-2:2014 wird von folgenden Bedingungen ausgegangen.

- Mit steigender Eingangsleistung wird die Induktivität der Drosselspule verringert.
- Die Impedanz der Netzdrossel wird so gewählt, dass diese einen bestimmten Teil $k1_{choke}$ der Bemessungsimpedanz des Wechselrichters U_{mL1} / I_{equ} hat.
- Der Spannungsfall am ohmschen Teil der Netzdrossel hat einen bestimmten Teil $k2_{choke}$ des Gesamtspannungsfalls an der Eingangsdrossel.

Unter Annahme dieser Bedingungen werden die Verluste in der Netzdrossel nachfolgender Formel berechnet:

$$P_{L,choke} = k1_{choke} \cdot k2_{choke} \cdot 3 \frac{\left(\frac{m \cdot \cos\varphi \cdot I_{out}}{\lambda} \right)^2}{\cos\varphi_r \cdot I_{r,out}} \cdot U_{mL1} \quad (6)$$

Nach Norm werden die in Tabelle 2 dargestellten Referenzparameter zur Berechnung der Verluste in der Netzdrossel eingesetzt. Der Modulationsindex wird mit m beschrieben, $\cos\varphi$ bezeichnet die Phasenverschiebung zwischen der Grundschiwingung von Strom und Spannung auf der Eingangsseite des Umrichters, λ beschreibt den Leistungsfaktor von Geräteeingangsstrom und -spannung, I_{out} den Ausgangsstrom des Umrichters, $\cos\varphi_r$ die Phasenverschiebung zwischen der Grundschiwingung von Strom und Spannung auf der Ausgangsseite des Umrichters und $I_{r,out}$ den Bemessungsausgangsstrom des Umrichters.

Tabelle 2: Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Verluste in der Netzdrossel

Variablen	Beschreibung	Parameterwert	Einheit
$k1_{choke}$	Impedanz der Drossel, bezogen auf die Bemessungsimpedanz des CDM	0,02	
$k2_{choke}$	bezogener Spannungsfall am ohmschen Teil der Drossel	0,25	
U_{mLi}	Leiter-Erde-Spannung des Versorgungsnetzes	230	V

Die nach Norm berechneten Verluste für die Eingangsdrossel liegen deutlich über den Verlusten, welche in realen Messungen ermittelt wurden. Daher wurde für das Berechnungsprogramm eine Formel für die Verlustberechnung in Eingangsdrosseln entwickelt. Als Basis dient der Kupferwiderstand von verschiedenen untersuchten Drosseln. Hierfür wurden Drosseln in vier Leistungsklassen vermessen. Zum einen für einen 3 kW Umrichter, für einen 7,5 kW Umrichter, einen 30 kW Umrichter und für einen 50 kW Umrichter. Die Messwerte sind in der nachfolgenden Tabelle 3 dargestellt. Die Kupferwiderstände wurden sowohl mit einem Vierleiter-Messgerät als auch mit der Strom-Spannungs-Messmethode ermittelt. Die Ergebnisse waren nahezu identisch, so dass hier nur ein Ergebnis aufgeführt wird.

Tabelle 3: Ergebnistabelle der Vermessung von Kupferwiderständen von Eingangsdrosseln für verschiedene Umrichterleistungsklassen

Leistungsklasse Umrichter	Auslegungsstrom der Drossel	Induktivität der Drossel	Kupferwiderstand
3,0 kW	5 A	3,0 mH	155 mΩ
7,5 kW	12 A	2,0 mH	58 mΩ
30,0 kW	45 A	1,0 mH	16 mΩ
50,0 kW	80 A	0,7 mH	9 mΩ

Aus den Messwerten wurde für das Berechnungsprogramm eine Abschätzung abgeleitet, wobei $R_{Drossel}$ für den Kupferwiderstand der Drossel und P_N für die Nennleistung der Drossel steht.

$$R_{Drossel} = \frac{50 \text{ kW}}{P_N} \cdot 9 \text{ m}\Omega \quad (7)$$

Mit Hilfe dieser Formel kann der Kupferwiderstand der Drossel hinreichend genau abgeschätzt werden. Zusammen mit dem aus der Simulation bekannten Eingangsstrom des Umrichters können die Kupferverluste ermittelt werden. Da die Verluste in einer Drossel jedoch aus Kupfer- und Eisenverlusten bestehen, muss noch eine Berechnungsvorschrift für die Eisenverluste erarbeitet werden.

Hierfür wurden die Gesamtverluste in den Eingangsdrosseln mittels eines Leistungsmessgerätes ermittelt. Die Kupferverluste wurden anhand der Formel (3.4) berechnet, die Eisenverluste ergeben sich dann aus der Subtraktion der Kupferverluste von den Gesamtverlusten. Die Ergebnisse der Messungen und Rechnungen sind in der Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Gemessene und berechnete Verluste in Eingangsdrosseln für verschiedene Umrichterleistungsklassen (genaue Beschreibung der Komponenten im Anhang)

Leistungsklasse Umrichter	Gesamtverluste der Eingangsdrossel	Errechnete Kupferverluste	Errechnete Eisenverluste
3,0 kW	17,3 W	8,4 W	8,9 W
7,5 kW	44,5 W	21,1 W	23,4 W
30,0 kW	170,5 W	84,4 W	86,1 W
50,0 kW	280,2 W	140,6 W	139,6 W

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen und Messungen werden im Berechnungsprogramm die Eisenverluste gleich den Kupferverlusten gesetzt. Die Kupferverluste können für verschiedenste Drosseln relativ einfach ermittelt werden, wobei sich die Messung der Eisenverluste deutlich komplizierter gestaltet. Durch dieses Vorgehen können auf einfache Art eine Vielzahl von Drosseln dem Berechnungsprogramm zugefügt werden.

3.2.4 Gleichspannungszwischenkreis

Die Verluste im Zwischenkreis werden durch die Kondensatoren selbst aber auch durch Widerstände, die zur Symmetrierung der Spannung und zum Entladen der Kondensatoren eingesetzt werden und durch die Kupferschienen die zur Verbindung der Kondensatoren und zum Anschluss an die Leistungshalbleiter dienen, verursacht. In den Kondensatoren sind hauptsächlich die parasitären Widerstände für die entstehenden Verluste verantwortlich. In den Datenblättern der Kondensatoren sind in der Regel entsprechende Werte für die Verluste zu finden.

Bei der Verwendung von Folienkondensatoren entfallen bei Standard-Umrichtern für das 400 V Versorgungsnetz die Symmetriewiderstände, somit können die Verluste im Zwischenkreis erheblich reduziert werden. Diese werden bei Elektrolytkondensatoren benötigt, da die Spannungsfestigkeit in der Regel bei 400 V – 450 V liegt, allerdings der Zwischenkreis für industrielle Frequenzumrichter bei 400 V Netzspannung eine Spannungsfestigkeit von ca. 800 V aufweisen muss. Folienkondensatoren hingegen verfügen über die entsprechende Spannungsfestigkeit, diese liegt meist bei ca. 1000 V – 1100 V.

In erster Näherung wird die Kapazität des Gleichspannungszwischenkreises eines Frequenzumrichters proportional zur Ausgangsleistung dimensioniert. Daher sind die lastunabhängigen Verluste in den Widerständen, die zur Symmetrierung dienen, auch proportional zur Bemessungsausgangsleistung des Umrichtersystems. Zudem ist eine proportionale Abhängigkeit zur Zwischenkreisspannung gegeben. Außerdem besteht eine quadratische Abhängigkeit der Verluste in den äquivalenten Reihenwiderständen zum Wechselstromanteil im Gleichrichterausgangsstrom.

Nach Norm EN 50598-2:2014 werden die Verluste, welche durch die Kondensatoren und die entsprechenden Widerstände verursacht werden, folgendermaßen berechnet.

$$P_{L,dc_link} = k1_{DC_link} \cdot I_{r,out} \cdot U_{DC}^2 + k2_{DC_link} \cdot 3 \frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{1,35} \cdot \frac{m \cdot \cos\varphi \cdot I_{out}}{1+50 \cdot k1_{choke}} \right)^2}{I_{r,out}} \quad (8)$$

Nach Norm werden die in Tabelle 5 dargestellten Referenzparameter zur Berechnung der Verluste in den Zwischenkreiskondensatoren und entsprechenden Widerständen eingesetzt. Mit $I_{r,out}$ wird der Bemessungsaus-

gangsstrom des Umrichters beschrieben, U_{DC} gibt den Wert der Zwischenkreisspannung an, m den Modulationsindex, I_{out} den Ausgangsstrom des Umrichters und k_{choke} die Bemessungsimpedanz des Umrichters bezogen auf die Impedanz der Drosselspule.

Tabelle 5: Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Verluste in den Zwischenkreiskondensatoren und entsprechenden Widerständen

Variablen	Beschreibung	Parameterwert	Einheit
k_{1DC_link}	Lastunabhängiger Verlustparameter des Gleichspannungszwischenkreises	$8 \cdot 10^{-7}$	$\frac{1}{\Omega \cdot A}$
k_{2DC_link}	Lastabhängiger Verlustparameter des Gleichspannungszwischenkreises	0,5	$\Omega \cdot A$

Bei den Verlusten an den Stromschienen, welche zur Verbindung der Zwischenkreiskondensatoren mit den Leistungshalbleitern eingesetzt werden, handelt es sich um rein ohmsche Verluste durch den Widerstand in den Stromschienen. Somit hängen diese Verluste vom Quadrat des Ausgangsstromes ab. Der Widerstand der Stromschienen verringert sich mit steigender Bemessungsleistung des Umrichter Systems, da in Umrichtern mit höheren Leistungen Stromschienen mit einer größeren Querschnittsfläche eingesetzt werden.

Nach Norm EN 50598-2:2014 wird davon ausgegangen, dass sich der ohmsche Widerstand der Stromschienen linear mit steigender Bemessungsleistung ändert. Daher wird von einem konstanten Spannungsfall an den ohmschen Leiterelementen ausgegangen. Die Verluste an den Stromschienen berechnen sich wie folgt.

$$P_{L,rails} = \frac{U_{rails}}{I_{r,out}} \cdot I_{out}^2 \quad (9)$$

Nach Norm werden die in Tabelle 6 dargestellten Referenzparameter zur Berechnung der Verluste in den Stromschienen eingesetzt. Mit $I_{r,out}$ wird der Bemessungsausgangsstrom des Umrichters beschrieben und mit I_{out} der Ausgangsstrom des Umrichters.

Tabelle 6: Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Verluste in den Stromschienen

Variablen	Beschreibung	Parameterwert	Einheit
U_{rails}	Spannungsfall an den ohmschen Leiterelementen bei Bemessungsstrom	0,7	V

Die nach Norm berechneten Verluste im Zwischenkreis sind deutlich größer als bei realen Umrichtern gemessen. Daher wird für das Berechnungsprogramm auf die auftretenden physikalischen Effekte zur Berechnung zurückgegriffen.

Die Verluste im Zwischenkreis werden im Berechnungsprogramm in drei Teile aufgeteilt. Dies sind zum einen die Kondensatorverluste selbst, zum anderen die Verluste in den Widerständen zur Symmetrierung und zur Entladung und die Verluste in den Kupferschienen und Verbindungen.

Die Verluste in Kondensatoren lassen sich wie bereits erwähnt in lastabhängige und lastunabhängige Verlustanteile aufteilen. Die lastabhängigen Verluste werden durch den ohmschen Anteil am Serieneratzwiderstand bestimmt. Die lastunabhängigen Anteile werden hauptsächlich durch den Verlustfaktor im Dielektrikum geprägt. Somit können die Verluste in einem Kondensator wie nachfolgend dargestellt berechnet werden [50].

$$P = u_{ac}^2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C \cdot \tan\delta + I_{rms}^2 \cdot R_s \quad (10)$$

Dabei wird mit u_{ac} der Wechselspannungsanteil beschrieben, mit f_0 die Frequenz der Grundschwingung des Umrichters, mit C die Kapazität des Kondensators, mit $\tan\delta$ der Verlustfaktor, mit I_{rms} der Effektivwert des Stromes und mit R_s der Innenwiderstand des Kondensators.

In den Datenblättern der Kondensatorhersteller wird als Parameter zur Verlustberechnung üblicherweise der Serieneratzwiderstand ESR („Equivalent Series Resistance“) angegeben. Dieser stellt folgende Zusammenhänge zur Verlustentstehung in einem Kondensator dar, wobei mit ω die Kreisfrequenz, berechnet aus $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, dargestellt wird.

$$ESR = R_s + \frac{\tan \delta_0}{\omega \cdot C} \quad (11)$$

Im Berechnungsprogramm wird auf den im Datenblatt angegebenen ESR zurückgegriffen. Der ESR wird mit dem Quadrat des aktuellen Stromes multipliziert.

Die Verluste am Widerstand der Kupferschienen werden ebenfalls mit dem Widerstandswert R_{CuW} multipliziert mit dem Stromquadrat I berechnet. Die Verluste am Entladewiderstand dagegen hängen vom Widerstandswert des Entladewiderstandes R_{EW} und der Zwischenkreisspannung U_{ZK} ab und sind somit lastunabhängig.

Folglich werden die Verluste im Gleichspannungszwischenkreis folgendermaßen berechnet.

$$P_V = (ESR + R_{CuW}) \cdot I^2 + \frac{U_{ZK}^2}{R_{EW}} \quad (12)$$

Die Werte für den ESR und die Widerstände können im Berechnungsmodell eingegeben werden oder es kann mit vorgegebenen Standardwerten gerechnet werden. Die Kapazität des Zwischenkreises eines Frequenzumrichters steigt üblicherweise mit der Nennausgangsleistung proportional. Von dieser Tatsache ausgehend, werden die Widerstände und der ESR entsprechend berechnet.

Dafür wird, falls vom Benutzer kein anderer Wert eingegeben wird, davon ausgegangen, dass die Zwischenkreiskapazität pro kW Umrichterausgangsleistung unter 10 kW 100 μF beträgt. Für größere Umrichter steigt die Kapazität meist nicht mehr so stark an, daher wird bei größeren Umrichterausgangsleistungen die Zunahme der Kapazität reduziert. Hierfür werden bei Leistungen zwischen 10 und 50 kW dann weitere 50 μF pro kW und für Leistungen über 50 kW weitere 20 μF pro kW Umrichterausgangsleistung hinzuaddiert. Der ESR eines beispielhaften 400 μF Folienkondensators mit einer Spannungsfestigkeit von 1000 V beträgt 1,8 m Ω . Somit wird die Kapazität des Kondensators, in der Standard Einstellung des Modells, in 400 μF Schritten skaliert und der ESR Wert dann entsprechend der Parallelschaltung berechnet. Die Größe des Kondensators kann zusammen mit dem ESR Wert eingestellt werden und somit kann auch die Skalierung der Kondensatorschritte verändert werden.

Für diesen Kondensatortyp werden keine Symmetriewiderstände benötigt, da eine Reihenschaltung zur Erhöhung der Spannungsfestigkeit nicht notwendig ist.

Für den Entladewiderstand wird von einem Standardwert von $47\text{ k}\Omega$ ausgegangen, dieser Wert kann ebenfalls verändert werden. Hierfür kann entweder ein Widerstandswert eingegeben werden oder es kann über die gewünschte Entladezeit der Zwischenkreiskondensatoren, in Verbindung mit der Zwischenkreisspannung, der Wert des Entladewiderstandes berechnet werden.

Der Widerstand der Kupferverschienung hängt von der Nennausgangsleistung des Umrichters ab und nimmt mit zunehmender Leistung ab, da der Kupferquerschnitt größer wird. Daher wird, wie in der Norm, von einem Spannungsfall an den Kupferschienen von $0,7\text{ V}$ ausgegangen, somit kann mittels des Bemessungsausgangsstromes der Widerstand der Kupferschienen berechnet werden.

Durch die freie Parametrierung der Systemwerte kann das Berechnungsprogramm auch für Umrichter mit kleiner Zwischenkreiskapazität eingesetzt werden. Diese Umrichter gewinnen aufgrund von schneller schaltenden Halbleitern zum Beispiel auf Basis von GaN-Halbleitern immer mehr an Bedeutung. Somit ist das Berechnungsprogramm für zukünftige Entwicklungen dynamisch anpassbar und immer auf dem Stand der neuesten Technik.

3.2.5 Ausgangswechselrichter

Bei den Verlusten im Ausgangswechselrichter handelt es sich im Wesentlichen um die Schalt- und Durchlassverluste in den Leistungshalbleitern. Die Verluste im Ausgangswechselrichter stellen einen erheblichen Anteil an den Gesamtverlusten des Frequenz-umrichtersystems dar. Zur Veranschaulichung zeigt die folgende Bild 5 exemplarisch das Schaltbild eines dreiphasigen Ausgangswechselrichters. Jeder der sechs dargestellten IGBTs wird pro Taktperiode einmal ein- und einmal ausgeschaltet. Auch die dazugehörigen antiparallelen Dioden werden pro Taktperiode einmal leitend und wieder sperrend. Somit leitet jeder der Halbleiter in jeder Taktperiode für eine gewisse Zeit Strom.

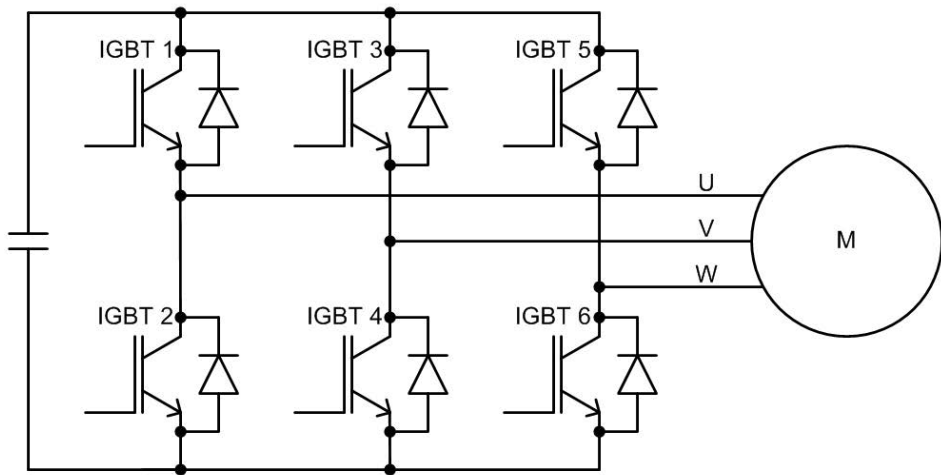


Bild 5: Schaltbild eines dreiphasigen Ausgangswechselrichters mit Motor als Last

In diesem Unterkapitel werden die Verluste die durch die Ansteuerung der Halbleiter entstehen nicht berücksichtigt, da diese bereits in Kapitel 3.2.1 berechnet wurden. Zur Berechnung der Schalt- und Durchlassverluste in IGBTs und Freilaufdioden müssen einige Bedingungen erfüllt sein, von denen hier ausgegangen wird. Es wird davon ausgegangen, dass der Ausgangsstrom einen sinusförmigen Verlauf aufweist und die PWM-Pulse über die sinusförmige Grundschwingungskurvenform des Stromes gleichmäßig verteilt sind. Dies wird erreicht, wenn die PWM-Frequenz mindestens das 20-fache der Grundschwingungsfrequenz des Motorstromes beträgt. Die Berechnung der Schalt- und Durchlassverluste stellt eine Näherung der mittleren Verluste in den Leistungshalbleitern dar. Das Ergebnis dieser Berechnung bildet in der Regel auch die Grundlage für die thermische Modellierung und Auslegung der Kühlung der Leistungselektronik und wird hier für die Energieeffizienzberechnung herangezogen. Somit können mit der gleichen Berechnungsvorschrift unterschiedliche Fragestellungen beantwortet werden.

Gemäß dem Vorgehen nach EN 50598-2:2014 werden die Schalt- und Durchlassverluste von IGBTs und Freilaufdioden einzeln berechnet. Dafür werden einige üblicherweise in den Datenblättern der Halbleiter enthaltenen Parameter pauschal angesetzt, beziehungsweise mit Annahmen auf Leistungshalbleiter unterschiedlicher Leistungsklassen umgerechnet.

Die Durchlassverluste von IGBTs berechnen sich wie folgt:

$$P_{L,on,T} = \sqrt{2} \cdot I_{out} \cdot U_{T,th} \cdot \left(\left(\frac{1}{2 \cdot \pi} \right) + \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos\varphi}{8} \right) + \frac{U_{T,r} - U_{T,th}}{I_{r,out}} \cdot 2 \cdot I_{out}^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos\varphi}{3 \cdot \pi} \right) \quad (13)$$

Nach Norm EN 50598-2:2014 werden die in Tabelle 7 dargestellten Referenzparameter zur Berechnung der Durchlassverluste in IGBTs eingesetzt. Mit I_{out} wird der Ausgangsstrom des Umrichters beschrieben, mit m der Modulationsindex, mit $\cos\varphi$ die Phasenverschiebung der Grundschwingung von Strom und Spannung und mit $I_{r,out}$ der Bemessungsstrom des Umrichters.

Tabelle 7: Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Durchlassverluste in IGBTs

Variablen	Beschreibung	Parameterwert	Einheit
$U_{T,th}$	Schwellenspannung eines Leistungstransistors (IGBT)	1,0	V
$U_{T,r}$	Durchlassspannung eines Leistungstransistors (IGBT) bei Bemessungsausgangsstrom	2,3	V

Für die Berechnung der Durchlassverluste der Freilaufdioden wird nach Norm EN 50598-2:2014 analog vorgegangen wie bei der Berechnung der Durchlassverluste der IGBTs.

Die Durchlassverluste der Freilaufdioden berechnen sich wie folgt:

$$P_{L,on,D} = \sqrt{2} \cdot I_{out} \cdot U_{D,th} \cdot \left(\left(\frac{1}{2 \cdot \pi} \right) - \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos\varphi}{8} \right) + \frac{U_{D,r} - U_{D,th}}{I_{r,out}} \cdot 2 \cdot I_{out}^2 \cdot \left(\frac{1}{8} - \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos\varphi}{3 \cdot \pi} \right) \quad (14)$$

Nach Norm EN 50598-2:2014 werden die in Tabelle 8 dargestellten Referenzparameter zur Berechnung der Durchlassverluste der Freilaufdioden eingesetzt. Mit I_{out} wird der Ausgangsstrom des Umrichters beschrieben, mit m der Modulationsindex, mit $\cos\varphi$ die Phasenverschiebung der Grundschwingung von Strom und Spannung und mit $I_{r,out}$ der Bemessungsstrom des Umrichters.

Tabelle 8: Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Durchlassverluste der Freilaufdioden

Variablen	Beschreibung	Parameterwert	Einheit
$U_{D,th}$	Schwellenspannung einer Leistungsdiode	1,1	V
$U_{D,r}$	Durchlassspannung der Leistungsdiode bei Bemessungsausgangsstrom	2,4	V

Neben den Durchlassverlusten entstehen in IGBTs und Freilaufdioden noch Schaltverluste. Die Schaltverluste sind neben dem Ausgangsstrom des Frequenzumrichtersystems vor allem von der Schaltfrequenz abhängig. Unter der Annahme, dass der Wechselrichterausgangsstrom sinusförmig ist und die Taktfrequenz mindestens das 20-fache der Grundschwingungsfrequenz des Motorstroms beträgt, werden die Schaltverluste in IGBTs nach Norm EN 50598-2:2014 wie folgt berechnet. Die Norm geht davon aus, dass bei kleinen Motorströmen die zusätzlichen Schaltverluste, welche durch die Motorleitung verursacht werden, nicht mehr zu vernachlässigen sind, daher wird hierfür ein Korrekturterm eingeführt.

$$P_{L,sw,T} = \frac{E_T}{\pi} \cdot U_{DC} \cdot \sqrt{2} \cdot (I_{out} \cdot I_{motor_cable}) \cdot f_{sw} \quad (15)$$

Nach Norm EN 50598-2:2014 werden die in Tabelle 9 dargestellten Referenzparameter zur Berechnung der Schaltverluste in IGBTs eingesetzt. Mit I_{out} wird der Ausgangsstrom des Umrichters beschrieben.

Die Schaltverluste in den Freilaufdioden werden nach Norm EN 50598-2:2014 in gleicher Weise berechnet.

$$P_{L,sw,D} = \frac{E_D}{\pi} \cdot U_{DC} \cdot \sqrt{2} \cdot (I_{out} \cdot I_{motor_cable}) \cdot f_{sw} \quad (16)$$

Nach Norm EN 50598-2:2014 werden die in Tabelle 10 dargestellten Referenzparameter zur Berechnung der Schaltverluste in IGBTs eingesetzt. Mit I_{out} wird der Ausgangsstrom des Umrichters beschrieben, mit U_{DC} die Zwischenkreisspannung des Umrichters, mit f_{sw} die Schaltfrequenz und

Tabelle 9: Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Schaltverluste in IGBTs

Variablen	Beschreibung	Parameterwert	Einheit
E_T	Schaltverlustenergie des Leistungstransistors (IGBT) je Volt und je Ampere	$7,5 \cdot 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$
U_{DC}	Zwischenkreisspannung des CDM	540	V
$I_{\text{motor_cable}}$	Motorkabelstrom, der für die ansteigenden Schaltverluste maßgeblich ist	4 für $I_{r,\text{out}} \leq 4$ A, $I_{r,\text{out}}$ für $4 \text{ A} < I_{r,\text{out}} \leq 10 \text{ A}$, 10 für $I_{r,\text{out}} \geq 10 \text{ A}$	A
f_{sw}	Schaltfrequenz des CDM	4 für CDM bis 90 kW, 2 für CDM über 90 kW	kHz

mit $I_{\text{motor_cable}}$ der Motorkabelstrom an einem Leistungsanschluss des Umrichters.

Tabelle 10: Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Schaltverluste der Freilaufdioden

Variablen	Beschreibung	Parameterwert	Einheit
E_D	Schaltverlustenergie der Leistungsdiode je Volt und je Ampere	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$

Die mittleren Gesamtverluste des Ausgangswechselrichters müssen für ein Drehstrom Frequenzumrichtersystem mit sechs IGBTs und sechs Dioden folgendermaßen berechnet werden. Hierbei werden die Durchlassverluste eines Leistungstransistors mit $P_{L,\text{on},T}$, die Durchlassverluste einer Leistungsdiode mit $P_{L,\text{on},D}$, die Schaltverlustleistung eines Leistungstransistors mit $P_{L,\text{sw},T}$ und die Schaltverluste einer Leistungsdiode mit $P_{L,\text{sw},D}$ beschrieben.

$$P_{L,inverter} = 6 \cdot (P_{L,on,T} + P_{L,on,D} + P_{L,sw,T} + P_{L,sw,D}) \quad (17)$$

Diese Berechnungsvorschrift setzt voraus, dass die Leistungshalbleiter im zeitlichen Mittel gleich belastet sind. Abweichungen hiervon kann es beim Betrieb mit sehr kleinen Grundschwingungsfrequenzen geben, hier sollen diese Betriebsfälle nicht weiter betrachtet werden, da diese für die Effizienzberechnung keine große Relevanz aufweisen. Für die thermische Auslegung müssen diese allerdings berücksichtigt werden.

Da die Norm EN 50598-2:2014 für einen sehr weiten Leistungsbereich von 0,12 kW bis 1.000 kW Gültigkeit besitzt, müssen für die allgemeingültige Berechnung gewisse Parameter pauschal angesetzt werden. Bei Messungen im Rahmen dieser Arbeit stellte sich heraus, dass die nach Norm berechneten Verluste größer sind als die gemessenen Verluste. Aus diesem Grund wurden weitere Berechnungen mit Werten aus den Datenblättern von Halbleitern durchgeführt, um zum einen den Grund für diese Abweichungen zu finden und zum anderen die Verlustberechnung zu verbessern. Diese Berechnungen wurden für verschiedene Leistungsklassen angestellt.

Die Formeln für die Berechnung werden dem Applikationshandbuch Leistungselektronik der Firma Semikron entnommen [51] und sind auch in anderen Quellen [52] in ähnlicher Form zu finden. Die Formeln zur Berechnung sind sehr ähnlich wie in der Norm und werden nachfolgend dargestellt. Die Formeln gelten für PWM-Spannungswechselrichter und sind dann gültig, wenn von folgenden Vereinfachungen ausgegangen werden kann.

- Vernachlässigung der Transistor- und Diodenschaltzeiten zur Berechnung der Durchlassverluste
- Annahme zeitlich konstanter Sperrschichttemperatur
- Lineare Aussteuerung der Halbleiter
- Vernachlässigung der Schaltfrequenzwelligkeit im Wechselstrom (sinusförmiger Ausgangsstrom)
- Schaltfrequenz deutlich größer als Ausgangsgrundfrequenz des Stromes (mindestens Faktor 20)

Durchlassverluste IGBT:

$$P_{L,on,T} = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi} + \frac{m \cdot \cos \varphi}{8} \right) \cdot U_{CE0} \cdot \hat{I}_1 + \left(\frac{1}{8} + \frac{m \cdot \cos \varphi}{3 \cdot \pi} \right) \cdot r_{CE} \cdot \hat{I}_1^2 \quad (18)$$

Mit \hat{I}_1 wird die Amplitude des Umrichter Ausgangsstromes beschrieben, mit m der Modulationsindex, mit $\cos\varphi$ die Phasenverschiebung der Grundschwingung von Strom und Spannung, mit U_{CE0} die Schwellspannung der Durchlasskennlinie des Leistungstransistors und mit r_{CE} der Bahnwiderstand des Leistungstransistors.

Durchlassverluste Diode:

$$P_{L,on,D} = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi} - \frac{m \cdot \cos\varphi}{8} \right) \cdot U_{F0} \cdot \hat{I}_1 + \left(\frac{1}{8} - \frac{m \cdot \cos\varphi}{3 \cdot \pi} \right) \cdot r_F \cdot \hat{I}_1^2 \quad (19)$$

Mit \hat{I}_1 wird die Amplitude des Umrichter Ausgangsstromes beschrieben, mit m der Modulationsindex, mit $\cos\varphi$ die Phasenverschiebung der Grundschwingung von Strom und Spannung, mit U_{F0} die Schwellspannung der Durchlasskennlinie der Leistungsdiode und mit r_F der Bahnwiderstand der Leistungsdiode.

Schaltverluste IGBT:

$$P_{L,sw,T} = f_{sw} \cdot (E_{on} + E_{off}) \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_1}{I_{ref}} \cdot \left(\frac{U_{CC}}{U_{ref}} \right)^{Kv} \cdot (1 + TC_{Esw} \cdot (T_j - T_{ref})) \quad (20)$$

Mit I_1 wird der Umrichter Ausgangsstrom beschrieben, mit f_{sw} die Schaltfrequenz des Umrichters, mit E_{on} die Verlustenergie des Leistungstransistors während des Einschaltens, mit E_{off} die Verlustenergie des Leistungstransistors während des Ausschaltens, mit I_{ref} ein Referenzstrom bezogen auf den Leistungstransistor, mit U_{ref} eine Referenzspannung bezogen auf den Leistungstransistor, mit U_{CC} die Kollektor-Emitter-Versorgungsspannung des Leistungshalbleiters, mit K_v der Exponent für die Spannungsabhängigkeit der Schaltverluste $\sim 1,3$, mit TC_{Esw} der Temperaturkoeffizient der Schaltverluste $\sim 0,003$ 1/K, mit T_j die Sperrschichttemperatur des Leistungstransistors und mit T_{ref} eine Referenztemperatur bezogen auf den Leistungstransistor.

Schaltverluste Diode:

$$P_{L,sw,D} = f_{sw} \cdot E_{rr} \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_1}{I_{ref}} \right)^{Ki} \cdot \left(\frac{U_{CC}}{U_{ref}} \right)^{Kv} \cdot (1 + TC_{Err} \cdot (T_j - T_{ref})) \quad (21)$$

Mit I_1 wird der Umrichterausgangsstrom beschrieben, mit f_{sw} die Schaltfrequenz des Umrichters, mit E_{rr} die Verlustenergie während der Sperrverzögerungszeit der Leistungsdiode, mit I_{ref} ein Referenzstrom bezogen auf die Leistungsdiode, mit U_{ref} eine Referenzspannung bezogen auf die Leistungsdiode, mit U_{CC} die Kollektor-Emitter-Versorgungsspannung der Leistungsdiode, mit K_i der Exponent für die Stromabhängigkeit der Schaltverluste $\sim 0,6$, mit K_v der Exponent für die Spannungsabhängigkeit der Schaltverluste $\sim 0,6$, mit TC_{Err} der Temperaturkoeffizient der Schaltverluste $\sim 0,006$ 1/K, mit T_j die Sperrschichttemperatur der Leistungsdiode und T_{ref} eine Referenztemperatur bezogen auf die Leistungsdiode.

Um einen Vergleich mit den nach Norm berechneten Verlusten ziehen zu können, wurden für zehn Ausgangswechselrichter verschiedener Leistungsklassen die Berechnungen der Schalt- und Durchlassverluste jeweils für IGBT und Diode durchgeführt. Um die Vergleichbarkeit zu verbessern, wurden für alle Berechnungen die nach Norm EN 50598-2:2014 angesetzten Leistungsfaktoren der Last angesetzt. In der nachfolgenden Tabelle 11 werden die Leistungsfaktoren abhängig von der Nennleistung des Ausgangswechselrichters und der tatsächlichen Auslastung dargestellt.

Tabelle 11: Leistungsfaktoren der Prüflast nach Norm EN 50598-2:2014, in Abhängigkeit von Nennleistung und tatsächlicher Auslastung des Ausgangswechselrichters

Bezugs Bemessungsstrom in %	Leistungsfaktor der Prüflast für einen Leistungsbe- reich (Umrichterausgangsleistung)				
	0,12 kW bis 0,75 kW	0,75 kW bis 5,5 kW	5,5 kW bis 45 kW	45 kW bis 200 kW	200 kW bis 1000 kW
25	0,34	0,38	0,49	0,54	0,57
50	0,51	0,60	0,71	0,75	0,78
75	0,64	0,72	0,80	0,83	0,85
100	0,73	0,79	0,85	0,86	0,87

Die Ergebnisse der Verlustleistungsberechnungen werden aufgeteilt in Schalt- und Durchlassverluste von IGBTs und Dioden, in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Vergleich der Halbleiterverluste im Ausgangswechselrichter nach Norm und Berechnungsprogramm

IGBT						
Leistungs- klasse	Durchlassverluste		Abwei- chung	Schaltverluste		Abwei- chung
	Norm	Berechnungsprogramm		Norm	Berechnungsprogramm	
5,0 kW	42,7 W	21,9 W	95 %	33,0 W	17,2 W	92 %
7,5 kW	66,2 W	32,2 W	105 %	49,5 W	26,2 W	89 %
15,0 kW	132,4 W	64,4 W	105 %	99,1 W	63,5 W	106 %
30,0 kW	264,8 W	131,4 W	102 %	198,2 W	111,8 W	77 %
50,0 kW	441,4 W	189,1 W	133 %	330,4 W	150,0 W	120 %
200,0 kW	1775,0 W	938,3 W	98 %	1321,0 W	635,5 W	108 %
Diode						
	Durchlassverluste		Abwei- chung	Schaltverluste		Abwei- chung
	Norm	Berechnungsprogramm		Norm	Berechnungsprogramm	
5,0 kW	5,1 W	4,7 W	9 %	11,0 W	10,6 W	4 %
7,5 kW	5,5 W	6,8 W	-19 %	16,5 W	13,6 W	22 %
15,0 kW	11,0 W	13,2 W	-17 %	33,0 W	39,2 W	-16 %
30,0 kW	22,0 W	24,1 W	- 9 %	66,1 W	95,1 W	-31 %
50,0 kW	36,7 W	48,6 W	-24 %	110,1 W	124,4 W	-11 %
200,0 kW	137,0 W	228,6 W	-40 %	440,5 W	352,5 W	25 %

Für die Berechnung wurde auf Leistungshalbleiter und auf Datenblattwerte der Firma Semikron zurückgegriffen. Für die Berechnung wurden, wie im Anwendungsbereich für 400 V AC-Nennspannungssystemen üblich, 1200 V Module mit entsprechender Stromtragfähigkeit ausgewählt, für kleinere Leistungen sogenannte Sixpackmodule für größere Leistungen Halbbrückenmodule. Die Berechnungen wurden jeweils für den Betriebspunkt mit

Bemessungsleistung bei Grundswingungsfrequenz von 50 Hz durchgeführt. Für die prozentuale Abweichung dient die Norm als Referenz.

Die nach Norm berechneten Schalt- und Durchlassverluste für IGBTs sind deutlich zu hoch, wie zu sehen ist, können diese bis zu mehr als dem doppelten Wert betragen.

Bei den Diodenverlusten werden die Durchlass- und Schaltverluste nach Norm eher zu klein berechnet, allerdings betragen die Abweichungen gegenüber den mit Datenblattangaben berechneten Verlusten nur etwa 40%.

Die Verifikation der Berechnungen erfolgt anhand von Messungen der Verluste von gesamten Umrichtern, diese sind in den Abbildung 4-28 bis 4-31 dargestellt.

Ein weiterer entscheidender Vorteil der Verlustberechnung durch das Berechnungsprogramm gegenüber der Norm ist, dass die Berechnungen auf andere Halbleiter Technologien wie zum Beispiel SiC oder GaN übertragen werden können. Hierfür sind lediglich kleine Änderungen an den Berechnungsvorschriften notwendig, wohingegen die Berechnungen nach Norm ausschließlich für Silizium IGBTs und Dioden gelten.

Des Weiteren können im Berechnungsprogramm auch andere Umrichter Topologien, wie zum Beispiel Multi-Level oder Matrix-Topologien, umgesetzt werden, hier unterscheidet sich die Verlustberechnung von der klassischen zwei-Level-Topologie [53]. Die Norm fokussiert sich dagegen ausschließlich auf den zwei-Level-Umrichter.

3.2.6 Eingangsgleichrichter

Beim Eingangsgleichrichter muss grundsätzlich unterschieden werden, ob es sich um eine aktive oder eine passive Gleichrichtung der Netzwechselspannung handelt. Zur Verdeutlichung der Unterschiede sind in folgenden Abbildungen die beiden möglichen Varianten dargestellt. Die Bild 6 zeigt das Schaltbild einer aktiven Gleichrichtung, wie sie in Frequenzumrichtern mit Energierückspeisung eingesetzt wird und die Bild 7 zeigt das Schaltbild einer passiven Gleichrichtung, wie sie häufig bei Frequenzumrichtern kleinerer Leistung ohne Energierückspeisung eingesetzt wird.

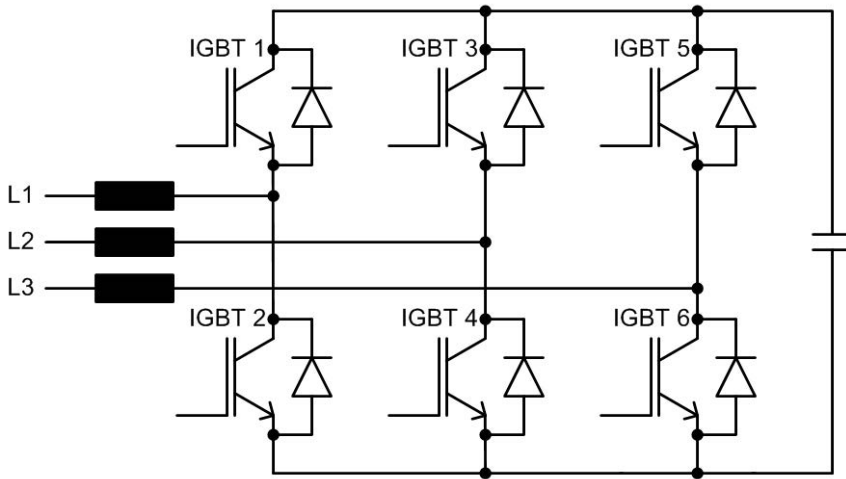


Bild 6: Schaltbild eines aktiven Eingangsgleichrichters

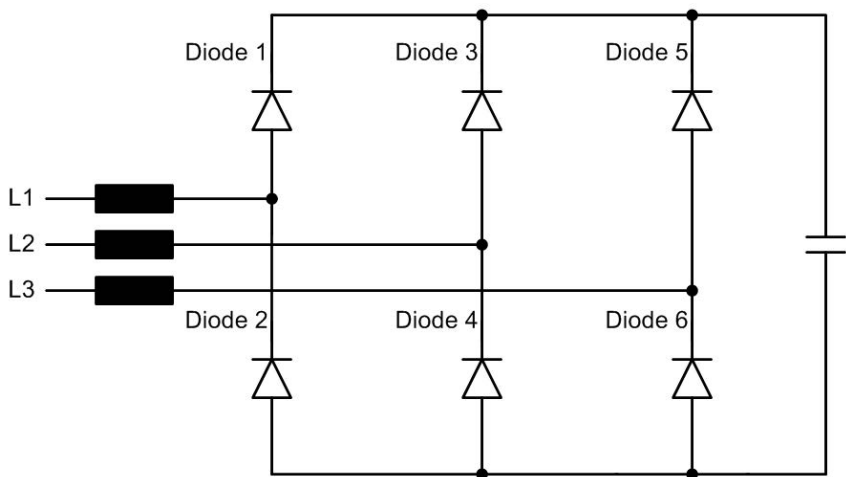


Bild 7: Schaltbild eines passiven Eingangsgleichrichters

Die Verluste hängen sehr stark von der Ausführung des Eingangsteils ab. Bei aktiver Gleichrichtung berechnen sich die Verluste in den Halbleitern nach denselben Formeln wie beim Ausgangswechselrichter. Bei einer passiven Gleichrichtung werden ausschließlich Dioden verwendet, was dazu führt, dass die Verluste im Gleichrichter deutlich geringer ausfallen als bei aktiver Gleichrichtung. Die Norm EN 50598-2:2014 betrachtet vordergründig einen passiven Eingangsgleichrichter. Im Simulationsmodell werden die beiden Arten jedoch berücksichtigt, um eine genauere Klassifizierung

der Verluste vornehmen zu können. Nach Norm berechnen sich die Verluste im Eingangsgleichrichter folgendermaßen:

$$P_{L,rectifier} = 6 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m \cdot \cos\varphi \cdot I_{out} \cdot U_{D,th,rectifier} + \frac{U_{D,r,rectifier} - U_{D,th,rectifier}}{\cos\varphi \cdot I_{r,out}} \cdot \left(\frac{m \cdot \cos\varphi \cdot I_{out}}{\lambda} \right)^2 \right) \quad (22)$$

Nach Norm EN 50598-2:2014 werden die in Tabelle 13 dargestellten Referenzparameter zur Berechnung der Verluste im Eingangsgleichrichter verwendet. Mit I_{out} wird der Ausgangsstrom des Umrichters beschrieben, mit m der Modulationsindex, mit $\cos\varphi$ die Phasenverschiebung der Grundschwingung von Strom und Spannung und mit $I_{r,out}$ der Bemessungsstrom des Umrichters.

Tabelle 13: Referenzparameter nach Norm EN 50598-2:2014 zur Berechnung der Verluste im Eingangsgleichrichter

Variablen	Beschreibung	Parameterwert	Einheit
$U_{D,th,rectifier}$	Schwellspannung der Gleichrichter Leistungsdioden	0,9	V
$U_{D,r,rectifier}$	Durchlassspannung der Gleichrichter Leistungsdiode bei Bemessungseingangstrom des CDM	2,2	V
λ	Leistungsfaktor von CDM-Eingangstrom und -spannung	0,7	

Im Simulationsmodell werden die Verluste sowohl für aktive als auch für passive Gleichrichtung nach den Formeln aus Kapitel 3.2.5 berechnet. Dabei werden jeweils nur die Bauelementedaten für die verwendeten Halbleiter eingesetzt. Wie beim Ausgangswechselrichter sind auch hier die Ergebnisse der Berechnung nach Norm und des Berechnungsprogramms als Vergleich in nachfolgender Tabelle 14 dargestellt.

Es zeigt sich, dass hier nur geringe Abweichungen zwischen der Berechnung nach Norm und dem Berechnungsprogramm vorhanden sind. Wie in der Norm definiert, gilt diese Tabelle nur für passive Netzgleichrichtung.

Tabelle 14: Vergleich der Halbleiterverluste im Eingangsgleichrichter nach Norm und Berechnungsprogramm

Verluste in den Dioden			
Leistungsklasse	Norm	Berechnungsprogramm	Abweichung
5,0 kW	63,7 W	55,8 W	14 %
7,5 kW	95,6 W	86,5 W	10 %
15,0 kW	191,2 W	189,9 W	0 %
30,0 kW	386,9 W	346,1 W	12 %
50,0 kW	644,9 W	614,3 W	5 %
200,0 kW	2579,4 W	2420,6 W	7 %

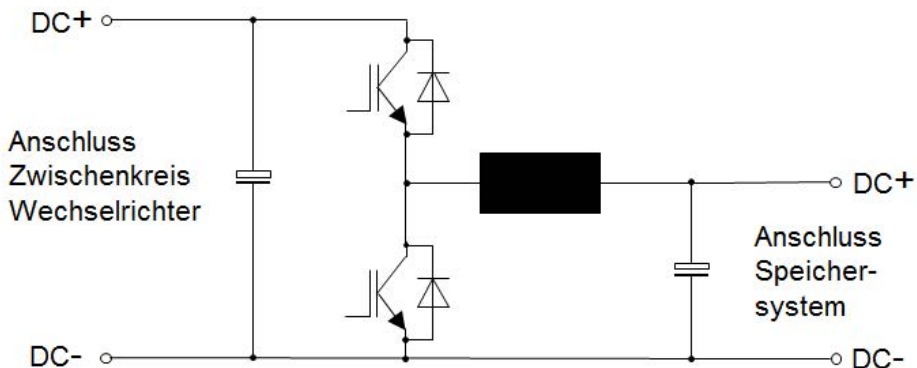


Bild 8: Schaltbild eines DC-Wandlers (Buck-Boost-Converters)

3.2.7 DC-Wandler

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Verluste eines Buck-Boost-Converters (Tief-Hochsetzsteller-Kombination) eingegangen, dies ist die einfachste Form eines nicht galvanisch getrennten DC-Wandlers. Die folgende Bild 8 zeigt das Schaltbild eines DC-Wandlers (Buck-Boost-Converters).

Solche Ausführungen bieten den Vorteil, dass sowohl die Verluste als auch die Kosten geringer sind als bei galvanisch getrennten Topologien, daher werden sie in vielen Anwendungen eingesetzt. Die Verluste bei dieser Wandlertopologie setzen sich aus den Verlusten in den Leistungshalbleitern, meist IGBTs und Diode, sowie aus den Verlusten in den passiven Bauelementen Spulen und Kondensatoren zusammen. Weiterhin sind wesentliche Verlustquellen die Ansteuerungsverluste und der Leistungsbedarf für die Kühlung (sogenannte Kühlverluste). Wie beim Ausgangswechselrichter und Eingangsgleichrichter schon beschrieben, werden die Ansteuerungsverluste pauschal veranschlagt und die Kühlverluste prozentual aus den Halbleiterverlusten errechnet. Die Verluste in den Halbleitern eines Buck-Boost-Converters können nicht analog zu den Verlusten in den Halbleitern von Wechselrichtern oder Gleichrichtern berechnet werden, auch wenn die Berechnungsformeln ähnlich sind. Daher sind nachfolgend die Berechnungsformeln für die Verlustberechnung nach [51] gezeigt.

Durchlassverluste IGBT:

$$P_{L,on,T,DC-DC} = (I_{out,DC-DC} \cdot (U_{CE0} + TC_v \cdot (T_j - 25^\circ C)) + I_{out,DC-DC}^2 \cdot (r_{CE} + TC_r \cdot (T_j - 25^\circ C))) \cdot DC_{(T)} \quad (23)$$

Mit $I_{out,DC-DC}$ wird der Laststrommittelwert beschrieben, mit U_{CE0} die Schwellspannung der Durchlasskennlinie des Leistungstransistors, mit r_{CE} der Bahnwiderstand des Leistungstransistors, mit TC_v und TC_r die Temperaturkoeffizienten der Durchlasskennlinie des Leistungstransistors, mit T_j die Sperrschichttemperatur des Leistungstransistors und mit $DC_{(T)}$ das Tastverhältnis des Leistungstransistors.

Durchlassverluste Diode:

$$P_{L,on,D,DC-DC} = (I_{out,DC-DC} \cdot (U_{F0} + TC_v \cdot (T_j - 25^\circ C)) + I_{out,DC-DC}^2 \cdot (r_F + TC_r \cdot (T_j - 25^\circ C))) \cdot DC_{(D)} \quad (24)$$

Mit $I_{out,DC-DC}$ wird der Laststrommittelwert beschrieben, mit U_{F0} die Schwellspannung der Durchlasskennlinie der Leistungsdiode, mit r_F der Bahnwiderstand der Leistungsdiode, mit TC_v und TC_r die Temperaturkoeffizienten der Durchlasskennlinie der Leistungsdiode, mit T_j die Sperrschichttemperatur der Leistungsdiode und mit $DC_{(D)}$ das Tastverhältnis der Leistungsdiode.

Schaltverluste IGBT:

$$P_{L,sw,T,DC-DC} = f_{sw,DC-DC} \cdot (E_{on} + E_{off}) \cdot \frac{I_{out,DC-DC}}{I_{ref}} \cdot \left(\frac{U_{CC}}{U_{ref}} \right)^{K_v} \cdot (1 + TC_{E_{sw}} \cdot (T_j - T_{ref})) \quad (25)$$

Mit $I_{out,DC-DC}$ wird der Laststrommittelwert beschrieben, mit $f_{sw,DC-DC}$ die Schaltfrequenz des DC-Wandlers, mit E_{on} die Verlustenergie des Leistungstransistors während des Einschaltens, mit E_{off} die Verlustenergie des Leistungstransistors während des Ausschaltens, mit I_{ref} ein Referenzstrom bezogen auf den Leistungstransistor, mit U_{ref} eine Referenzspannung bezogen auf den Leistungstransistor, mit U_{CC} die Kollektor-Emitter-Versorgungsspannung des Leistungshalbleiters, mit K_v der Exponent für die Spannungsabhängigkeit der Schaltverluste $\sim 1,3$, mit $TC_{E_{sw}}$ der Temperaturkoeffizient der Schaltverluste $\sim 0,003$ 1/K, mit T_j die Sperrschichttemperatur des Leistungstransistors und mit T_{ref} eine Referenztemperatur bezogen auf den Leistungstransistor.

Schaltverluste Diode:

$$P_{L,sw,D,DC-DC} = f_{sw,DC,DC} \cdot E_{rr} \cdot \left(\frac{I_{out,DC-C}}{I_{ref}} \right)^{K_i} \cdot \left(\frac{U_{CC}}{U_{ref}} \right)^{K_v} \cdot (1 + TC_{E_{err}} \cdot (T_j - T_{ref})) \quad (26)$$

Mit $I_{out,DC-DC}$ wird der Laststrommittelwert beschrieben, mit $f_{sw,DC-DC}$ die Schaltfrequenz des DC-Wandlers, mit E_{rr} die Verlustenergie während der Sperrverzögerungszeit der Leistungsdiode, mit I_{ref} ein Referenzstrom bezogen auf die Leistungsdiode, mit U_{ref} eine Referenzspannung bezogen auf die Leistungsdiode, mit U_{CC} die Kollektor-Emitter-Versorgungsspannung der Leistungsdiode, mit K_i der Exponent für die Stromabhängigkeit der Schaltverluste $\sim 0,6$, mit K_v der Exponent für die Spannungsabhängigkeit der Schaltverluste $\sim 0,6$, mit $TC_{E_{err}}$ der Temperaturkoeffizient der Schaltverluste $\sim 0,006$ 1/K, mit T_j die Sperrschichttemperatur der Leistungsdiode und mit T_{ref} eine Referenztemperatur bezogen auf die Leistungsdiode.

Mit Hilfe dieser Formeln und der entsprechenden Werte aus dem Datenblatt der Leistungshalbleiter werden im Berechnungsprogramm die Verluste der einzelnen Halbleiter berechnet. Bei der Schaltungstopologie des Buck-Boost-Converters ist immer nur ein IGBT oder eine Diode stromführend, daher berechnen sich die Gesamtverluste in den Leistungshalbleitern wie nachfolgend dargestellt. Hierbei werden die Durchlassverluste eines

Leistungstransistors mit $P_{L,on,T,DC-DC}$, die Durchlassverluste einer Leistungsdiode mit $P_{L,on,D,DC-DC}$, die Schaltverlustleistung eines Leistungstransistors mit $P_{L,sw,T,DC-DC}$ und die Schaltverluste einer Leistungsdiode mit $P_{L,sw,D,DC-DC}$ beschrieben.

$$P_{L,DC-DC} = P_{L,on,T,DC-DC} + P_{L,on,D,DC-DC} + P_{L,sw,T,DC-DC} + P_{L,sw,D,DC-DC} \quad (27)$$

Die Ansteuerungsverluste bestehen aus lastabhängigen und lastunabhängigen Anteilen. Mit Hilfe von Messungen wurden die Ansteuerungsverluste an verschiedenen DC-Wandlern untersucht, um daraus eine Berechnungsvorschrift zu entwickeln. Die folgende Tabelle 15 zeigt die Messwerte der Ansteuerungsverluste von DC-Wandlern mit verschiedenen Nennleistungen.

Tabelle 15: Messwerte der Ansteuerungsverluste bei DC-Wandlern mit unterschiedlichen Nennleistungen

Nennleistung des DC-Wandlers [W]	Ansteuerungsverluste [W]
100	3,9
500	4,1
1.000	4,3
5.000	5,1
10.000	6,0
20.000	8,2

Aus diesen Messwerten wurde die nachfolgende Formel für die Berechnung der Ansteuerungsverluste von DC-Wandlern entwickelt:

$$P_{V,Ansteuer,DC-DC} = P_{Ansteuer_0,DC-DC} + P_{Nenn,DC-DC} \cdot X_{Ansteuer,DC-DC} \quad (28)$$

Zur Berechnung der Ansteuerungsverluste werden die in Tabelle 16 dargestellten Referenzparameter verwendet. Die Nennleistung des DC-Wandlers wird mit $P_{Nenn,DC-DC}$ bezeichnet.

Die Verluste durch die notwendige Kühlung werden wie beim Wechselrichter und aktiven Gleichrichter wieder mit 10 % der auftretenden Verluste veranschlagt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der DC-Wandler durch eine forcierte Luftkühlung entwärmt wird.

Tabelle 16: Referenzparameter zur Berechnung der Ansteuerverluste von DC-Wandlern

Variablen	Beschreibung	Parameter	Einheit
$P_{\text{Ansteuer}_0, \text{DC-DC}}$	lastunabhängiger Anteil der Ansteuerverluste eines DC-Wandlers	4	W
$X_{\text{Ansteuer, DC, DC}}$	Faktor zur Berechnung der lastabhängigen Anteile der Ansteuerverluste eines DC-Wandlers	0,02	%

Die Verluste in den passiven Bauelementen können für die Drosseln, wie in Kapitel 3.2.3 und für die Kondensatoren, wie in Kapitel 3.2.4 dargestellt, berechnet werden.

3.3 Verluste in elektrischen Maschinen

Die verschiedenen Maschinentypen weisen aufgrund ihrer unterschiedlichen Bau- und Funktionsweise unterschiedlich hohe Verluste auf. Im Folgenden wird auf die beiden am meisten verwendeten Maschinentypen, die Asynchronmaschine und die permanenterregte Synchronmaschine, eingegangen.

3.3.1 Asynchronmaschinen

Die Verluste in Asynchronmaschinen setzen sich aus mehreren Verlustanteilen zusammen, welche zum Teil im Rotor und zum Teil im Stator entstehen. Die Norm EN 60034-2-1 befasst sich mit den Verlusten in Asynchronmaschinen insgesamt und mit den verschiedenen Teilverlusten [37].

Die Verluste einer elektrischen Maschine ergeben sich aus der Differenz der elektrisch zugeführten Leistung P_{el} und der abgegebenen mechanischen Leistung P_{mech} in Form eines Drehmoments M bei einer Drehzahl n an der Welle der Maschine.

$$P_{V, Motor} = P_{el} - P_{mech} = P_{el} - M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (29)$$

Die Verlustleistungen werden in Wärme umgesetzt und lassen sich grundsätzlich in die drei Verlustarten Reibungsverluste, Stromwärmeverluste und Eisenverluste aufteilen. Wobei die einzelnen Verluste sowohl im Rotor als auch im Stator entstehen können und wiederum in verschiedene Verlustarten zerlegt werden können.

Reibungsverluste:

Reibungsverluste entstehen durch Lager- und Luftreibung des Läufers. Das Reibdrehmoment hat einen von der Drehzahl unabhängigen und einen drehzahlabhängigen Anteil [54]. Ist zur Kühlung des Motors ein Lüfter an die Welle angeflanscht, so führt die Luftreibung des Lüfters ebenfalls zu Verlusten die mit der dritten Potenz der Drehzahl steigen [55]. Ist die Maschine fremdbelüftet oder wassergekühlt entfällt dieser Verlustanteil. Bei der Berücksichtigung der Gesamtenergiebilanz müssen die Aufwendungen für Fremdlüfter oder Kühlpumpe berücksichtigt werden.

Stromwärmeverluste:

Stromwärmeverluste, welche in der Literatur auch als Kupferverluste bezeichnet werden, entstehen durch den Strom in den Statorwicklungen und im Rotor. Sie sind abhängig vom Widerstand des Leiters und steigen mit dem Quadrat des Stromflusses an. Für einen Strang lassen sie sich mit der nachfolgenden Formel 3.30 berechnen.

$$P_{Cu,Strang} = R_{Strang} \cdot I_{Strang}^2 \quad (30)$$

Dabei wird der Strangwiderstand mit R_{Strang} und der Strangstrom mit I_{Strang} bezeichnet.

Der Widerstand des Leiters wird stark von dessen Temperatur beeinflusst. So bewirkt aufgrund des Temperaturkoeffizienten von Kupfer von circa 0,004 1/K eine Temperaturerhöhung von 100 K einen Anstieg des Widerstandes um 40 %. Zudem wird der Widerstand noch durch Stromverdrängungseffekte beeinflusst [56] [49]. Der Strom wird maßgeblich von der Grundschwingung der pulsweitenmodulierten WechselrichterAusgangsspannung hervorgerufen, entsteht aber auch durch Spannungsüberschwingungen und weist daher Stromüberschwingungen, wenngleich geringer Amplituden auf. Durch verschiedene Modulationsverfahren und damit verbunden unterschiedliche Pulsweiten werden umrichterbedingte Stromver-

drängungseffekte verschieden stark ausgeprägt. Auch diese haben entsprechenden Einfluss auf die Verluste [37].

Eisenverluste:

Die Eisenverluste einer Asynchronmaschine setzen sich aus Wirbelstrom- und Hystereseverlusten zusammen, welche wie in der Literatur und in der Praxis üblich getrennt voneinander betrachtet werden [56] [37]. Dieser Weg wird hier ebenfalls verfolgt.

Hystereseverluste:

Die spezifische Energie pro Volumeneinheit nach Gleichung 3.28 entspricht der Fläche innerhalb der B – H Hysteresekurve. Dabei wird die magnetische Flussdichte mit B und die magnetische Feldstärke mit H bezeichnet.

$$W_{hyst} = \int_0^B H \cdot dB \quad (31)$$

Das nachfolgende Bild 9 stellt eine Hysteresekurve eines ferromagnetischen Materials zur Motorherstellung dar.

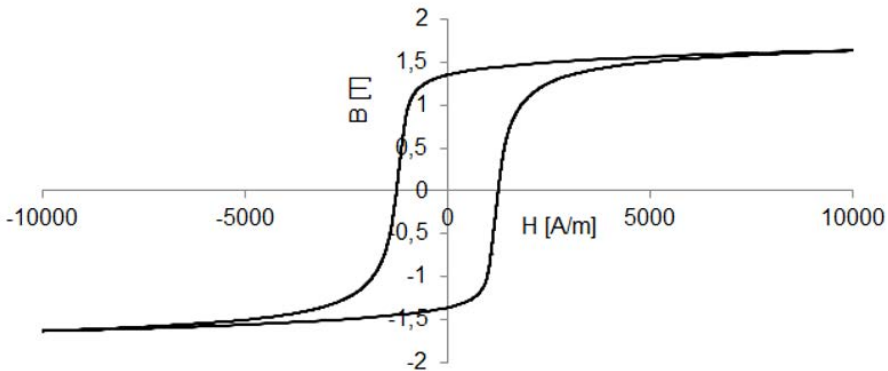


Bild 9: Prinzipieller Verlauf der Hysteresekurve eines ferromagnetischen Materials zur Motorherstellung [57]

Charles Steinmetz stellte schon in der Anfangszeit des Elektromaschinenbaus eine empirische Formel 3.29 mit einer Materialkonstante η_M auf, um die massenspezifische Hystereseverlustleistung P_H in Abhängigkeit von der

Ummagnetisierungsfrequenz f bestimmen zu können [58]. In diese Formel geht die Flussdichte B mit der 1,6 ten Potenz ein.

$$P_H = \eta_M \cdot f \cdot B^{1,6} \quad (32)$$

Rudolf Richter näherte diese Gleichung mittels einer zweigliedrigen Formel nach Gleichung 3,30 an [59].

$$P_H = f (\alpha B + \beta B^2) \quad (33)$$

Nach Richter wird die Konstante α bei einer Flussdichte B zwischen 1 T und 1,6 T negativ. Da bei elektrischen Maschinen die Flussdichte B immer in diesem Bereich liegt, kann der α -Term weggelassen werden, wenn dieser Verlustanteil in der Ersatzkonstanten σ_H für β berücksichtigt wird. Bezieht man nun diese Gleichung auf eine Frequenz f_N und eine Flussdichte B_N , so ergibt sich die in der Literatur häufig zu findende Berechnung der Hystereseverluste nach Gleichung 3,31 [33].

$$P_H = k_H \cdot \sigma_H \cdot \frac{f}{f_N} \cdot \left(\frac{B}{B_N} \right)^2 \quad (34)$$

In dieser Gleichung berücksichtigt der Faktor k_H die Einflüsse der Materialbearbeitung beim Maschinenfertigungsprozess. Das Ergebnis ist ein von der Masse des Materials abhängiger Verlustwert der üblicherweise in W pro kg angegeben wird und für eine sinusförmige Aussteuerung bei der Frequenz f_N und mit der Aussteuerungsamplitude der magnetischen Flussdichte B_N ermittelt wird.

Wirbelstromverluste:

Wirbelstromverluste entstehen durch Wirbelströme, welche bei der Ummagnetisierung des Bleches in einer elektrischen Maschine senkrecht zur Flussrichtung induziert werden. Um die Ausbreitung von Wirbelströmen zu unterdrücken, wird das Blechpaket aus mehreren Blechen zusammengesetzt. Die Elektrobleche wiederum weisen eine Isolierschicht (Lackschicht oder Oxidschicht) auf, um die Wirbelstrompfade innerhalb eines Bleches zu halten und damit diesen Verlustbeitrag zu minimieren. Die Wirbelstromverluste in den Elektroblechen sind von der Frequenz der magnetischen Erregung und der magnetischen Flussdichte quadratisch

abhängig. Für diese Berechnung wird die Frequenz mit f und die magnetische Flussdichte mit B beschrieben.

$$P_w \approx konst \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (35)$$

Für die spezifischen Wirbelstromverluste gilt mit Bezug auf eine Referenzfrequenz f_N und eine Referenzflussdichte B_N folgende Formel.

$$P_w = k_w \cdot \sigma_w \cdot \left(\frac{f}{f_N} \cdot \frac{B}{B_N} \right)^2 \quad (36)$$

Wobei σ_w eine Materialkonstante und k_w einen Zuschlagsfaktor für die Materialbearbeitung darstellt.

Gesamte Eisenverluste:

Für die gesamten Eisenverluste ergibt sich somit nach der klassischen Theorie mit Aufspaltung der Eisenverluste in Hysterese- und Wirbelstromanteil Gleichung 3.34.

$$P_{Fe} = P_H \cdot P_w = k_H \cdot \sigma_H \cdot \frac{f}{f_N} \cdot \left(\frac{B}{B_N} \right)^2 + k_w \cdot \sigma_w \cdot \left(\frac{f}{f_N} \cdot \frac{B}{B_N} \right)^2 \quad (37)$$

Die Verlustziffern in der Gleichung 3.38 beziehen sich immer auf eine Referenzfrequenz f_N und eine Referenzflussdichte B_N . Durch den Bezug auf diese Referenzwerte können die Verluste anderer Flussdichten B und Frequenzen f bestimmt werden.

Richter weist bei seinen Untersuchungen bereits darauf hin, dass seine Ansätze nur für Frequenzen bis zu 100 Hz gültig sind und dass die Hystereseverluste bei höheren Flussdichten, wie sie beispielsweise in Ankerzähnen auftreten, von den Berechnungsansätzen abweichen können.

Neben der klassischen Berechnung gibt es noch weitere Ansätze, um Eisenverluste bestimmen zu können. So gibt Bertotti einen weiteren Term P_{excess} an, bei dem die Frequenz mit der 1,5-fachen Potenz nach Gleichung 3.36 berücksichtigt wird [60].

$$P_{Fe} = P_H \cdot P_w \cdot P_{excess} = P_H \cdot P_w \cdot \alpha_{excess} \cdot \left(\frac{f}{f_N} \cdot \frac{B}{B_N} \right)^{1,5} \quad (38)$$

Jacobs gibt in [61] eine Gleichung an, in der ein weiterer Term den Anstieg der Verluste bei hoher Flussdichte genauer bestimmt.

$$P_{Fe} = a_2 \cdot B^2 \cdot f + (a_1 + a_4 \cdot B^{a_3}) \cdot B^2 \cdot f^2 \quad (39)$$

Reinlein gibt in [62] einen guten Überblick über die Berechnungsansätze von Bertotti und Jacobs und vergleicht diese mit Messungen an einer Sinusquelle. Er kommt zu dem Ergebnis, dass mit diesen Ansätzen eine Berechnung der Eisenverluste für höhere Frequenzen besser beschrieben wird als mit den klassischen Berechnungsgleichungen nach Steinmetz und Richter. Reinlein stellt in [62] einen eigenen Berechnungsansatz auf, der speziell die Verluste von stark gesättigtem Blech besser beschreibt.

$$P_{Fe} = \left(k_H \cdot \sigma_H \cdot \frac{f}{f_N} + k_w \cdot \sigma_w \cdot \left(\frac{f}{f_N} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{B}{B_N} \right)^2 \cdot m + \alpha_{Korrektur} \cdot f \cdot H \cdot B \cdot V \quad (40)$$

Das Besondere dieses neuen Ansatzes ist, dass die magnetische Feldstärke H in der Verlustberechnung berücksichtigt wird.

Die nachfolgende Tabelle 17 gibt einen Überblick über die elektrischen Verlustmechanismen in Asynchronmaschinen. In ihr sind die Verlustarten sowie die Orte der Entstehung der Verluste und die Entstehungsursachen aufgelistet. Die Reibverluste sind darin nicht berücksichtigt. Zudem werden die Zusatzverluste in der Auflistung nicht berücksichtigt.

Die durch die Grundwelle hervorgerufenen Verluste gelten als die klassischen Verluste der Asynchronmaschine, während die Verluste durch Oberwellen und Oberschwingungen zu den Zusatzverlusten gezählt werden. Die Tabelle 3-17 erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, so sind weitere in der Literatur noch zu findende Zusatzverluste nicht berücksichtigt [64], [65], [66].

Tabelle 17: Verluste einer Asynchronmaschine nach Entstehungsort und -ursache [63]

Verlustart	Ort der Entstehung	Entstehungsursache		
		Grundwelle	Oberwellen	Oberschwingungen (Umrichterbetrieb)
Eisenverluste	Stator	Ummagnetisierung mit Grundwellenfrequenz	Lastunabhängige und lastabhängige Pulsations- und Oberflächenverluste	Ummagnetisierung mit Oberschwingungsfrequenz
		Lastunabhängige und lastabhängige Pulsations- und Oberflächenverluste	Ummagnetisierung durch Oberwellen mit Oberwellenfrequenz	Ummagnetisierung mit Oberschwingungsfrequenz
Stromwärmeverluste	Stator	Stromwärme ohne bzw. mit geringer Stromverdrängung	Rückwirkungen der Oberwellen (Läuferresfelder) erzeugen Ströme in den Statorwicklungen	Oberschwingungsströme mit Stromverdrängung
	Rotor	Stromwärme ohne bzw. mit geringer Stromverdrängung Rotorquerströme	Oberwellenströme im Rotor mit Stromverdrängung	Oberschwingungsströme mit Stromverdrängung

3.3.2 Permanenterregte Synchronmaschinen

Auch bei permanenterregten Synchronmaschinen setzen sich die Verluste aus verschiedenen Verlustanteilen zusammen. Die Hauptverlustanteile sind dabei:

- Stromwärmeverluste in den Statorwicklungen $P_{V,Cu}$
- Eisenverluste im Stator durch Ummagnetisierung $P_{v,Fe}$
- Reibverluste durch Lager und Kühlung $P_{v,reib}$
- Zusätzliche Verluste durch Umrichterspeisung $P_{v,LHL}$

Bei der permanenterregten Synchronmaschine treten neben den hier aufgelisteten Verlusten natürlich auch noch Rotorverluste auf. Die Rotorverluste einer PMSM sind im Vergleich zu den Statorverlusten bei in der Industrie üblichen Polzahlen und Drehzahlbereichen jedoch als gering anzusehen. Die Rotorverluste werden durch Wirbelströme verursacht, die durch sich ändernde Magnetfelder im elektrisch leitfähigen Magnetmaterial und im ferromagnetischen Rotorrückschlussstück induziert werden.

Stromwärmeverluste:

Die Stromwärmeverluste können durch den ohmschen Widerstand der Statorwicklung und dem fließenden Strom beschrieben werden. Die Berechnung ist identisch zu der Berechnung der Stromwärmeverluste bei der Asynchronmaschine.

Da die PMSM nur im Stator bewickelt ist, treten diese Verluste im Rotor nicht auf.

Eisen- und Reibverluste:

Die Eisen- und Reibverluste berechnen sich analog zu denen in der Asynchronmaschine wie im vorangegangenen Kapitel bereits ausführlich beschrieben.

Rotorverluste:

Die im Rotor der PMSM auftretenden Verluste werden üblicherweise zu den Zusatzverlusten gezählt [67]. Sie setzen sich zusammen aus den Reibverlusten, den Magnetverlusten und den Ummagnetisierungsverlusten des

Rotors. Die Reibverluste lassen sich aus der Leerlaufmessung extrapolieren. Stromwärmeverluste durch Wirbelströme in den Permanentmagneten werden als Magnetverluste bezeichnet [68]. Die Ummagnetisierungsverluste im Rotor unterscheiden sich wesentlich von denen im Stator. Im Stator treten Induktionen mit der Frequenz der Grundwelle und deren Oberwellen auf. Da der Rotor mit der Frequenz der Flussverkettung rotiert, tritt im Rotor die Grundwelle nicht auf. Die auftretenden Frequenzen resultieren daher aus der Geometrie (Nutungsoberwellen) und dem Sättigungsverhalten des Eisenkerns [69], sowie der Wicklungsart.

Magnetverluste:

Die genaue Berechnung und messtechnische Bestimmung der Verluste in den Magneten einer permanenterregten Synchronmaschine sind heute noch Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten. Theoretische Ausführungen dazu sind in [69] zu finden. Messtechnische Untersuchungen die die Theorien belegen und erweitern sind in [68] zu finden.

3.4 Verluste in Getrieben

Es gibt eine Vielzahl von verschiedensten Getriebearten, die in der Industrie eingesetzt werden. Bei der Auswahl eines Getriebes für eine bestimmte Anwendung spielen die benötigten Drehzahlen, sowohl auf der Antriebs- als auch auf der Abtriebsseite eine entscheidende Rolle. Zudem hängt die Auswahl noch von dem zu erwartenden Drehmoment ab. Im Rahmen dieser Arbeit wird exemplarisch auf zwei häufig in der Industrie verwendete Getriebearten eingegangen. Dabei handelt es sich zum einen um das Stirnradgetriebe und zum anderen um das Planetengetriebe.

3.4.1 Stirnradgetriebe

Die Verluste eines Stirnradgetriebes setzen sich aus mehreren verschiedenen Verlustanteilen zusammen. Nachfolgend sind die wichtigsten Verlustanteile aufgeführt [70].

- Verzahnungsverluste $P_{V,Z}$
- Lagerverluste $P_{V,L}$
- Dichtungsverluste $P_{V,D}$
- Verluste sonstiger Bauteile $P_{V,X}$

Die Gesamtverluste eines Stirnradgetriebes ergeben sich aus der Addition der einzelnen hier aufgeführten Verlustanteile.

Die Verzahnungsverlustleistung lässt sich beim Stirnradgetriebe in einen lastabhängigen und einen lastunabhängigen Verlustanteil aufspalten.

Die Ursache für das Auftreten der lastabhängigen Verzahnungsverluste ist das Wälzen beziehungsweise Gleiten der Zahnflanken aufeinander, welches bei Kraftübertragung stattfindet. Die lastunabhängigen Verluste (Leerlaufverluste) beinhalten die Plantschverluste bei Tauchschmierung sowie Ventilationsverluste. Bei schnell laufenden Getrieben stellen die lastunabhängigen Verluste den deutlich höheren Anteil der Verzahnungsverluste dar.

Die Lagerverluste sind als drehzahlabhängig anzusehen. Eine Abhängigkeit vom anliegenden Drehmoment ist somit nicht gegeben. Zwar ändert sich die Reibung eines Wälzlagers in Abhängigkeit der wirkenden radialen Belastung, diese ist beim Getriebe jedoch konstant. Als Einflussgrößen auf die Lagerverluste gelten die Schmierstoffreibung, sowie die Reibung der Rollkörper und des Käfigs aufeinander.

Die Dichtungsverluste bezeichnen die zwischen Getriebedichtung und Welle auftretenden Reibungsverluste. Sie sind abhängig von der Drehzahl und dem Wellendurchmesser.

Allgemein ist der Einfluss der Last auf die Effizienz des Stirnradgetriebes als gering anzusehen. So sinkt der Wirkungsgrad einer Getriebestufe um lediglich 1 %, wenn das Getriebe nur noch mit 50 % der Nennlast belastet wird. Deutliche Effizienzeinbußen sind erst bei sehr geringen Lasten im Bereich von unter 10 % der Nennlast zu erwarten [71].

3.4.2 Planetengetriebe

Ein Planetengetriebe (auch Umlaufgetriebe genannt) besteht üblicherweise aus einem zentralen Zahnrad (Sonnenrad), einem innenverzahnten Hohlräder und mehreren „Planetenrädern“ die sowohl mit dem Hohlräder als auch mit dem Sonnenrad im Eingriff stehen. Dieser Aufbau ist in Bild 10 dargestellt. Die Planeten werden auf einem Planetenträger geführt der hier in braun gekennzeichnet ist. Somit laufen ihre Drehachsen um die gemeinsame, zentrale Achse des Planetengetriebes. Beim Planetengetriebe erge-

ben sich folglich die drei Achsen des Zentralrades, des Hohlrades und der Planeten.

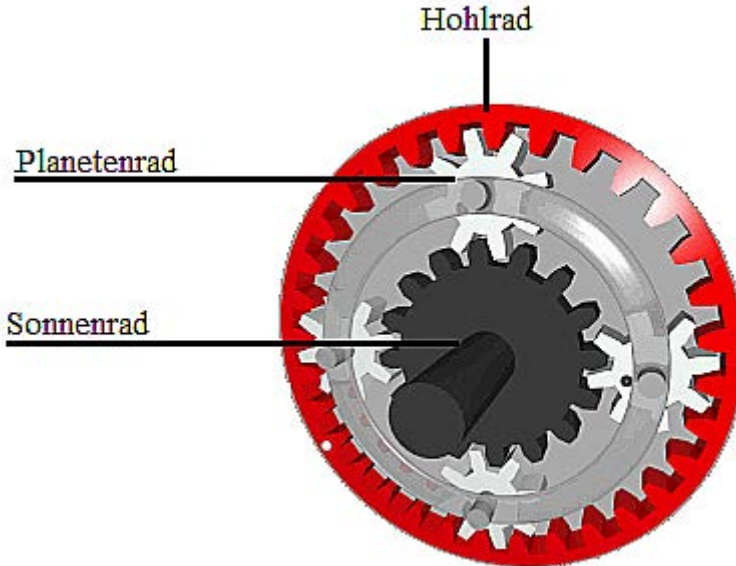


Bild 10: Aufbau eines Planetengetriebes [72]

Für die Standgetriebeübersetzung i_0 gilt:

$$i_0 = \frac{d_{\text{Hohlrad}}}{d_{\text{Sonnenrad}}} \quad (41)$$

Wobei der Hohlraddurchmesser mit d_{Hohlrad} und der Sonnenraddurchmesser mit $d_{\text{Sonnenrad}}$ bezeichnet wird.

Da das Planetengetriebe auf demselben Verzahnungsprinzip wie das Stirnradgetriebe beruht, lassen sich die Verluste wiederum in lastabhängige und lastunabhängige Anteile wie beim Stirnradgetriebe aufteilen. Der zu erwartende Wirkungsgrad ist dabei etwa gleich groß wie beim Stirnradgetriebe [71]. Ein wesentlicher Vorteil des Planetengetriebes ist der deutlich geringere Bauraum. Planetengetriebe sind häufig direkt in den Motor integriert, wodurch die Anlagenkomplexität gesenkt wird. Da sich beim Planetengetriebe eine Drehmomentaufteilung gemäß der Hebelarme ergibt, kann eine Leistungsverzweigung realisiert werden [73].

3.4.3 Verlustbetrachtung in Getrieben im Hinblick auf die Übersetzung

Die Übersetzung von Getrieben hat einen erheblichen Einfluss auf die Verlustbetrachtung, beziehungsweise auf das nach der Übersetzung zur Verfügung stehende Drehmoment. So müssen die Verluste in einem Getriebe mit dem Übersetzungsverhältnis multipliziert in die Drehmomentberechnung eingehen. Das bedeutet auch, dass der Einfluss der Verluste mit steigendem Übersetzungsverhältnis zunimmt. Nachfolgend sind die Zusammenhänge dargestellt. Für diese Darstellung wird davon ausgegangen, dass es sich um ein formschlüssiges Getriebe handelt und das Übersetzungsverhältnis aus n_1 geteilt durch n_2 berechnet werden kann. Das folgende Bild 11 zeigt die prinzipielle Darstellung einer Getriebeübersetzung.

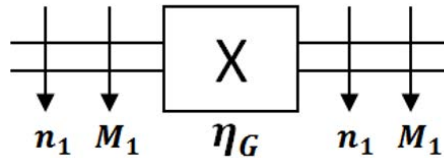


Bild 11: Prinzip Bild der Getriebeübersetzung mit Wirkungsgrad

Alternativ zu dieser klassischen Darstellung kann auch eine Leistungsbeurteilung eines Getriebes angestellt werden. Dies ist im folgenden Bild 12 zu sehen, hierbei wird davon ausgegangen, dass M_1 das System antreibt. Zudem sind sowohl die zugeführte als auch die abgegebene Leistung und die Verlustleistung dargestellt.

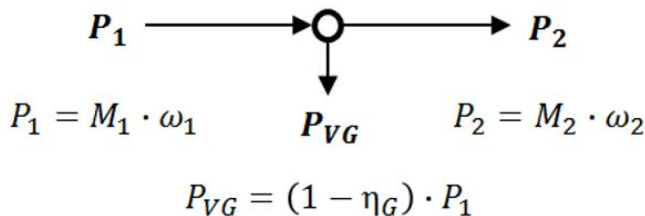


Bild 12: Darstellung Leistungsbeurteilung Getriebe

Wenn davon ausgegangen werden kann, dass $ü = n_1/n_2$ ist, kann der Einfluss des Wirkungsgrades auf das nach dem Getriebe vorhandene Drehmoment und der Drehzahl wie folgt berechnet werden.

$$M_1 \cdot \omega_1 = (1 - \eta_G) \cdot M_1 \cdot \omega_1 + M_2 \cdot \frac{\omega_1}{\ddot{u}} \quad (42)$$

Hierbei wird mit M_1 das Drehmoment vor dem Getriebe bezeichnet, mit M_2 das Drehmoment nach dem Getriebe, mit ω_1 die Kreisfrequenz vor dem Getriebe und mit η_G der Getriebewirkungsgrad.

Vereinfacht ergibt sich daraus dann folgender Ausdruck:

$$M_2 = \ddot{u} \cdot \eta_G \cdot M_1 \quad (43)$$

Wenn das System anstelle von M_1 von M_2 angetrieben wird, lässt sich der Zusammenhang wie folgt darstellen:

$$M_1 = M_2 \cdot \frac{\eta_G}{\ddot{u}} \quad (44)$$

Der Getriebewirkungsgrad ist eine Funktion von Drehmoment und Drehzahl. Ab einer bestimmten Belastung ist die Änderung des Wirkungsgrades nur noch sehr gering, weshalb im Rahmen dieser Arbeit für die Effizienzbeurteilung von einem mittleren Getriebewirkungsgrad ausgegangen wird.

3.5 Verluste in elektrischen und elektrochemischen Energiespeichern

Als mögliche Speicher zur Integration in Antriebssysteme stehen sowohl elektrische als auch elektrochemische Speicher zur Verfügung, dabei handelt es sich um Kondensatorbasierte Speicher und Akkumulatoren. Bei den beiden Typen entstehen sowohl beim Laden als auch beim Entladen des Speichers Verluste, zudem müssen ebenso bei beiden Typen die Effekte der Selbstentladung berücksichtigt werden.

Andere Speichersysteme und Speichermedien wie zum Beispiel Wasserstoff oder Redox-Flow Speicher werden hier nicht näher betrachtet, da der Fokus auf der Integration von Kurzzeitspeichern in elektrische Antriebsstränge gelegt wird. Zudem sind die Wirkungsgrade von Wasserstoff oder Redox-Flow Speichern deutlich geringer als die von Akkumulatoren oder Speichern auf Basis von Kondensatoren, was die Anwendung unter Energieeffizienz und letztendlich Kostengesichtspunkten gegenüber Doppelschichtkondensatoren nicht vorteilhaft erscheinen lässt.

3.5.1 Kondensatoren

Bei energietechnischen Systemen und Anlagen kommen Elektrolyt-, Folien- und Doppelschichtkondensatoren (sogenannte Supercaps) zum Einsatz. Deshalb soll hier auf diese drei Technologien für die nachfolgende Verlustmodellierung eingegangen werden. Die Verlustberechnung von Folien- und Elektrolytkondensatoren wird üblicherweise über die im Datenblatt angegebenen Serieneratzwiderstände (ESR, equivalent series resistor) durchgeführt. Bei Supercaps sind im Datenblatt üblicherweise die Innenwiderstände angegeben. Der Benutzer muss im Berechnungsprogramm einstellen mit welcher Art von Kondensatoren die Verluste berechnet werden sollen und muss zudem noch die Werte für den ESR oder den Innenwiderstand eingeben. Dabei kann entweder der Wert für die gesamte Schaltung oder für die einzelnen Kondensatoren in Verbindung mit der Definition der Verschaltung eingegeben werden. In diesem Fall werden die Ersatzwiderstände aus der Verschaltung berechnet und anschließend zur Verlustberechnung herangezogen.

Die Berechnung der Verluste von Elektrolyt- und Folienkondensatoren sind bereits in Kapitel 3.2.4 dargestellt. Die Berechnung der Verluste von Supercaps wird üblicherweise auf die Berechnung des ohmschen Verlustanteils am Innenwiderstand beschränkt. Somit berechnen sich die Verluste eines Supercaps aus der Multiplikation des Stromquadrates mit dem Innenwiderstand des Supercaps beziehungsweise mit dem Ersatzinnenwiderstand der Supercap-Schaltung [74].

3.5.2 Akkumulatoren

Es gibt sehr viele verschiedene Typen von Akkumulatoren, hierbei unterscheidet man üblicherweise anhand der verwendeten Aktivmaterialien. Zum Beispiel bei Anlagen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung werden Stand heute oftmals noch Bleibatterien eingesetzt. Die aktuelle Entwicklung tendiert jedoch sehr stark zum Einsatz von Lithium Akkus in den verschiedensten Ausprägungen. Auch andere Akkutechnologien wie zum Beispiel NiCd oder auch NiMH verlieren zunehmend an Bedeutung. Daher liegt der Fokus in dieser Arbeit auf den verschiedensten Lithium Akkus. Die Verluste in Lithium Akkus werden durch den Innenwiderstand der Akkuzellen selbst bestimmt und zu einem weiteren Teil durch die notwendigen Verbindungselemente und Überwachungs- sowie Ausgleichschaltungen. Die Verluste, welche durch den Innenwiderstand verursacht werden, hängen nach den bekannten Gesetzmäßigkeiten vom Quadrat

des Stromes ab [74]. Hier sei noch angemerkt, dass im Rahmen dieser Arbeit nur die Verluste, welche in energetischen Systemen von Belang sind, betrachtet werden. Hochfrequenzeffekte oder auch Leckströme werden somit vernachlässigt.

Der Innenwiderstand eines Lithium Akkus ist jedoch nicht konstant und hängt hauptsächlich von dessen Ladezustand und der Alterung ab, wobei sich die Erhöhung des Innenwiderstandes durch die Alterung bei neueren Akkutypen nicht mehr so gravierend auswirkt. Zur Veranschaulichung des Aufbaus eines Lithium Akkus zeigt das folgende Bild 13 ein Ersatzschaltbild eines Lithium Akkus in vier verschiedenen Detailierungsgraden. Je detaillierter das Ersatzschaltbild aufgebaut ist, desto genauer werden die Simulationsergebnisse, desto länger dauert aber auch die Simulation [75].

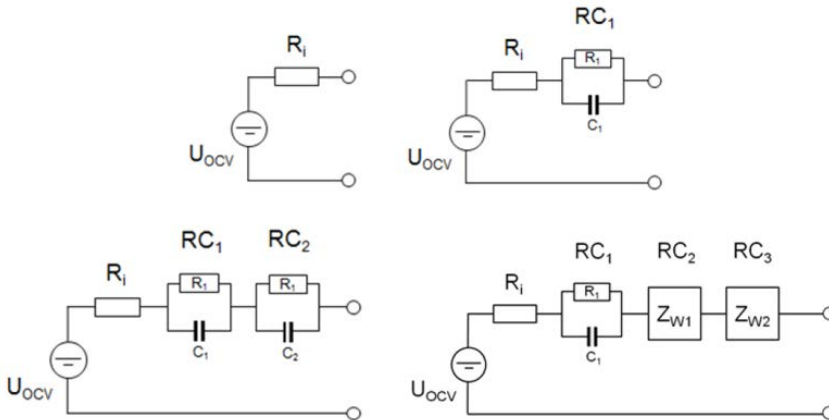


Bild 13: Ersatzschaltbild eines Lithium Akkus in vier verschiedenen Detailierungsgraden [75]

Der Innenwiderstand kann als Funktion des Ladezustandes (SOC) eines Akkus beschrieben werden. Zur Untersuchung des Einflusses der Innenwiderstandsänderung wurden zahlreiche Messungen an Akkus durchgeführt. Nachfolgend ist der Innenwiderstand einer Akkuzelle mit einer Nennspannung von 3,6 V dargestellt. Dabei handelt es sich um die Zelle Samsung INR18650-25R. Diese Zelle baut auf der heute weitverbreiteten Zellchemie LiNiMnCoO_2 auf und ist somit eine Trimix Zelle.

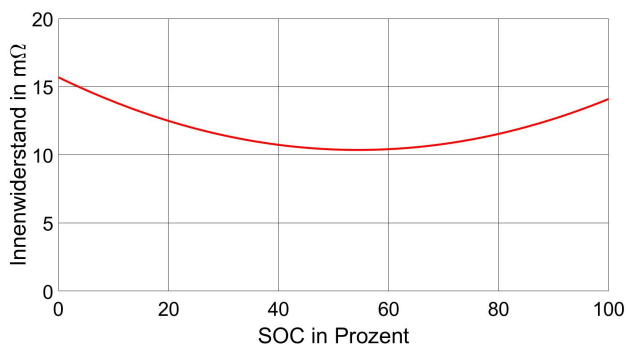


Bild 14: Verlauf des Innenwiderstandes einer Akkumulatorzelle Samsung INR18650-25R (Lade- /Entladerate 1C)

In Bild 14 ist zu sehen, dass der Innenwiderstand der Akkuzelle bei niedrigem Ladestand ansteigt. Kurz vor Erreichen der Ladeschlussspannung, also wenn die Zelle fast vollständig geladen ist, steigt der Innenwiderstand ebenfalls noch einmal an. Darin liegt auch einer der Gründe, warum bei Akkumulatoren üblicherweise nicht die komplette gespeicherte Energie genutzt wird. Wenn dies der Fall wäre, würde bei jedem Lade- und Entladezyklus der Bereich des deutlich erhöhten Innenwiderstandes genutzt werden müssen. Dies hätte eine deutliche Temperaturerhöhung der Zellen zur Folge, was wiederum dazu führen würde, dass die Alterung sehr stark beschleunigt würde, da diese sehr entscheidend von der Temperatur abhängt.

Um den Lade- beziehungsweise Entladevorgang eines Akkus zu verdeutlichen, wird im nachfolgenden Bild 15 der Spannungsverlauf einer Akkuzelle dargestellt. Bei dieser Messung handelt es sich wiederum um die Samsung INR18650-25R Zelle mit einer LiNiMnCoO_2 Verbindung. Sowohl die Ladung als auch die Entladung erfolgte mit einer Belastung der Zelle von 1 C (dies entspricht bei der hier verwendeten Zelle 2,5 A).

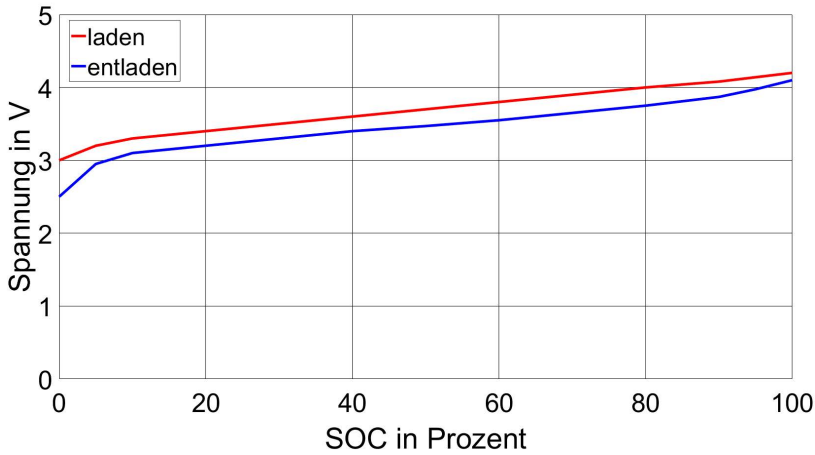


Bild 15: Spannungsverlauf beim Laden und Entladen einer Akkuzelle des Typs Samsung INR18650-25R

Der Betriebsenergiebedarf in einem Akkumulator System, welcher wiederum Verlusten entspricht, wird von Überwachungs- und Ausgleichschaltungen verursacht. In kommerziellen Akkumulator Systemen muss die Zellspannung jeder Zelle überwacht werden, aber auch die Temperatur der einzelnen Zellen. Dadurch entstehen Verluste, welche von der Last unabhängig sind. Diese Verluste treten im Standby- Betrieb in sehr geringer Höhe auf. Bei Lade- und Entladevorgängen sind die Verluste in den Ausgleichschaltungen deutlich höher als im Standby-Betrieb. Diese Verluste sind lastunabhängig aber sehr schwer vorzuberechnen, da sie sehr stark von der Alterung der Zellen abhängen. In dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und zugrundeliegenden Berechnungsprogramms werden diese Verluste pauschal angesetzt. Im Verhältnis zu den auftretenden Verlusten durch den Stromfluss sind diese sehr gering und fast vernachlässigbar.

4 Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten

Um das Ziel der Arbeit, eine ganzheitliche energetische Simulation eines Antriebsstranges über komplette Fahrzyklen zu erreichen und dabei sowohl die notwendige Genauigkeit der Simulation, als auch eine im Rahmen bleibende Simulationszeit zu gewährleisten, ist es notwendig die Berechnung des kompletten Systems mit Hilfe von Verlustkennfeldern durchzuführen. Es gäbe noch die Möglichkeit die Verluste in den Einzelkomponenten immer parallel zur Berechnung des Gesamtsystems durchzuführen, dies hätte allerdings eine deutliche Verlängerung der Simulationsdauer zur Folge. Dadurch wäre es nicht möglich in annehmbarer Zeit varianten Rechnungen von Komponenten durchzuführen. Zudem sollen auch komplexe Antriebssysteme, zum Beispiel mit einer Vielzahl von Motoren und damit zusammenhängend einer Vielzahl von weiteren Komponenten, betrachtet werden können. Auch sollen lange Fahrzyklen über mehrere Stunden oder Tage berechnet und analysiert werden. Am Beispiel eines Frequenzumrichters lässt sich die Problematik der Simulationsdauer besonders gut erläutern.

Die größte Herausforderung bestand darin, dass Teile der Verluste in Frequenzumrichtern nicht gleichmäßig verteilt über die Betriebsdauer entstehen, sondern immer nur in sehr kurzen Abschnitten während des Schaltens der Halbleiter. Dies geschieht zwar je nach Taktfrequenz mehrere tausend Mal pro Sekunde, dauert aber bei jedem Schaltvorgang nur wenige hundert Nanosekunden. Das folgende Bild 16 zeigt die Problematik der Berechnung über lange Fahrzyklen, sowie die Verlustentstehung im ns-Bereich in Frequenzumrichtern. Dabei sind von oben nach unten immer kleinere Zeitausschnitte dargestellt. Ganz oben ist ein Fahrzyklus von 70 s einer beliebigen Anwendung zu sehen. Als nächstes ist eine Netzperiode mit einer Dauer von 20 ms dargestellt, gefolgt von einer PWM-Periode in diesem Fall 500 μ s und ganz unten der Schaltvorgang des IGBT selbst, welcher hier eine Dauer von 100 ns aufweist. Für den Schaltvorgang wurde vereinfachend die Widerstandskommutierung angenommen. In realen Anwendungen mit induktiven Verbrauchern (Motoren) sind die Verläufe entsprechend komplexer und aufwendiger zu beschreiben. Darauf wird hier nicht näher eingegangen, da dies für die entstehenden Verluste nur eine untergeordnete Rolle spielt.

4 Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten

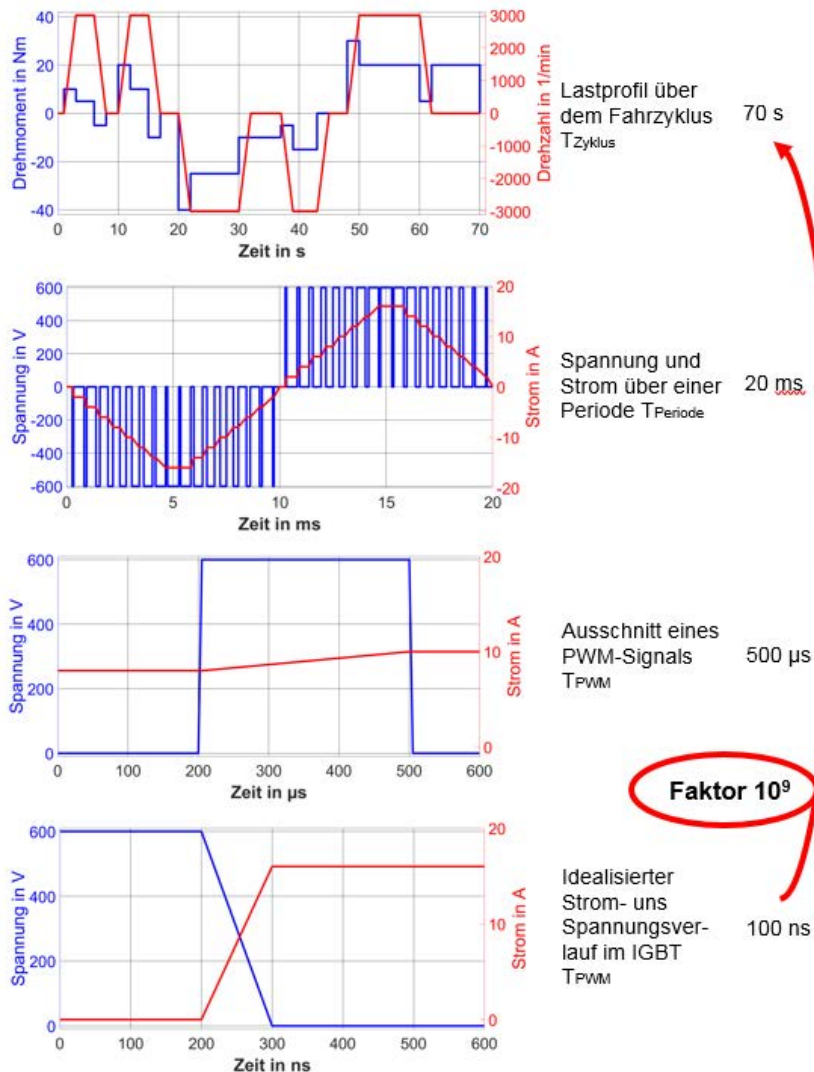


Bild 16: Verlustentstehung in leistungselektronischen Schaltern (Strom- und Spannungsverlauf am IGBT vereinfacht am Beispiel von ohmschen Verbrauchern)

Die Schaltverluste in den Halbleitern entstehen „nur“ während des Schaltvorgangs. Bei Frequenzumrichtern im Leistungsbereich unter 100 kW liegen diese im Bereich von 100 bis 200 ns wie in obiger Abbildung dargestellt. Die Taktfrequenz hingegen liegt üblicherweise im Bereich zwischen 2 kHz und 20 kHz, was eine Periodendauer von 500 µs – 50 µs zur Folge hat. Bei Umrichtern größerer Leistung sind die Schaltzeiten typischerweise etwas größer und die Schaltfrequenz nimmt deutlich ab. Die Schaltzeiten lie-

gen im Bereich von 200 ns bis 500 ns und die Taktfrequenz üblicherweise zwischen 500 Hz und 4 kHz. Da pro Periode jeder Halbleiter einmal ein- und einmal ausgeschaltet wird, liegt das Verhältnis von Schaltzeit und Periodendauer bei Umrichtern kleinerer Leistung im Bereich zwischen $4/1.000$ und $4/10.000$. Diese, nur in einem sehr kleinen Teil der Zeit entstehenden Verluste, legt man zur Verlustbudgetierung und Berechnung der Gesamtverlustenergie auf den kompletten Zeitraum um und erhält so einen Mittelwert der Schaltverluste. Die Durchlassverluste in den Halbleitern entstehen im Gegensatz dazu immer solange ein Halbleiter Strom führt. Dies ist bei IGBTs und MOSFETs immer dann, wenn diese eingeschaltet sind und bei Dioden immer dann, wenn der Strom durch die Freilaufzweige fließt. Bei den im industriellen Bereich üblichen Ansteuerarten der Frequenzumrichter sind immer drei IGBTs oder MOSFETs und drei Dioden vom Strom durchflossen. Die Höhe des Stroms ist jedoch immer unterschiedlich und ist mit der Frequenz der Grunddrehzahl wiederkehrend. Dies führt dazu, dass die Durchlassverluste in den einzelnen Halbleitern nicht zeitlich konstant sind, sondern mit der Drehfrequenz des Motors variieren. Zur Berechnung der Verluste über Fahrzyklen wird ein Mittelwert dieser Verluste gebildet, so dass diese dann für den jeweiligen Lastpunkt als konstant angesehen werden können.

Genauso verhält es sich mit den Verlusten in Motoren, auch diese sind zum Teil linear vom fließenden Strom abhängig, zum Teil aber auch quadratisch, was ebenfalls dazu führt, dass die Verluste innerhalb einer Periode der Drehfrequenz variieren. Hier wird zur Verlustbudgetierung über eine Grundfrequenzperiode ein Mittelwert gebildet. Das gleiche gilt für die weiteren Komponenten in denen die Verluste ganz oder teilweise vom Quadrat des Stromes abhängen.

Zur Evaluierung des Rechenzeitgewinns und damit zum prinzipiellen Vorgehen der Berechnung mit Hilfe von Verlustkennfeldern werden exemplarisch die Rechenzeiten an einem Antriebsstrang mit einer 7,5 kW ermittelt. Die Länge des gewählten exemplarischen Fahrzyklus beträgt 300 s. Der Antriebsstrang besteht aus folgenden Komponenten:

- Netzdrossel (7,5 kW Nennleistung)
- Netzeinheit mit aktiver Gleichrichtung (7,5 kW Nennleistung)
- Wechselrichter (7,5 kW Nennleistung)
- Asynchronmaschine 2 polig (7,5 kW Nennleistung)

Werden die Verlustberechnungen der Einzelkomponenten ohne Verlustkennfelder und damit jeweils zur Simulationszeit des Fahrprofils durchgeführt, liegt die gesamte Simulationsdauer bei 65 Minuten.

Wird die Berechnung mit Hilfe von vorher berechneten oder gemessenen Verlustkennfeldern durchgeführt dauert diese 19 Sekunden und ist somit in etwa um den Faktor 200 schneller.

Zudem wurde auch noch die Rechenzeit zur Berechnung der notwendigen Verlustkennfelder analysiert. Diese Berechnungen wurden mit jeweils 10.000 Stützpunkten durchgeführt. Die folgende Tabelle 18 zeigt die Berechnungsdauer der Verlustkennfelder.

Tabelle 18: Berechnungsdauer für Verlustkennfelder verschiedener Komponenten mit jeweils 10.000 Stützpunkten

Komponente	Berechnungsdauer
Netzdrossel	23 Sekunden
Netzeinheit mit aktiver Gleichrichtung	205 Sekunden
Wechselrichter	220 Sekunden
Asynchronmaschine	104 Sekunden

Alle Berechnungen zur Evaluierung der Rechenzeit wurden mit einem PC mit Windows 10 Betriebssystem durchgeführt. Bei dem PC handelt es sich um einen i7 Prozessor von Intel mit 4 parallel arbeitenden Kernen und einer Taktfrequenz von 2 GHz. Die Simulationen wurden mit der Matlab Version 2021a durchgeführt.

Ebenso wurden die Abweichungen in den Simulationsergebnissen zwischen Berechnung mit Hilfe von Verlustkennfeldern und der direkten Verlustberechnung untersucht. Diese Untersuchung wurde an fünf verschiedenen Antriebssträngen mit jeweils fünf verschiedenen Fahrprofilen durchgeführt. Die Abweichungen lagen dabei im Bereich von plus 1,3 Prozent bis minus 1,6 Prozent.

Die Vorgehensweise der Berechnung von Fahrzyklen mit Hilfe von Verlustkennfeldern bietet somit erhebliche Vorteile, da durch die Zeiteinsparung auch lange Fahrzyklen und Varianten von Antriebssträngen berechnet werden können. Die Verlustkennfelder selbst können mit Hilfe des entwi-

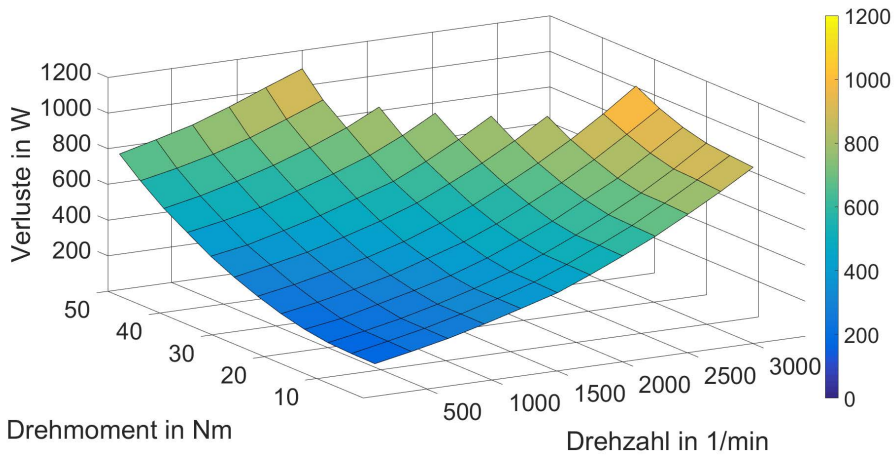


Bild 17: Gemessenes Verlustkennfeld einer 7,5 kW Asynchronmaschine mit 144 Messpunkten

ckelten Berechnungsprogramms berechnet werden, so dass hier auch keine Lücke im Vorgehen entsteht.

4.1 Asynchronmotor

Wie bei allen anderen Komponenten auch, können die Verlustkennfelder von Asynchronmotoren entweder gemessen oder berechnet werden. Im Vordergrund steht hier die Möglichkeit der Berechnung. Vor allem deshalb, weil eine Vermessung deutlich aufwändiger ist als eine Berechnung. Bei Asynchronmotoren besteht der Vorteil, dass die IE-Klassen eine sehr gute und genaue Beschreibung des Wirkungsgrades der einzelnen Motoren erlauben. Aus den Wirkungsgraden können dann entsprechend die Verluste berechnet werden. In der Norm EN 50598-2:2014 sind zudem Tabellen mit Koeffizienten zur Berechnung der Verluste von Asynchronmotoren in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment enthalten. Mit Hilfe dieser Tabellen lassen sich ebenfalls Verlustkennfelder für die IE klassifizierte Motoren berechnen. Der größte Vorteil der Berechnung gegenüber der Messung eines Verlustkennfeldes besteht darin, dass sehr einfach ein engmaschiges Kennfeld generiert werden kann. Die folgenden beiden Abbildungen verdeutlichen dies. Bild 17 zeigt ein gemessenes Verlustkennfeld einer 7,5 kW Asynchronmaschine mit 144 Messpunkten, Bild 18 dagegen ein berechnetes Verlustkennfeld der gleichen Maschine mit 10.000 Stützpunkten.

4 Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten

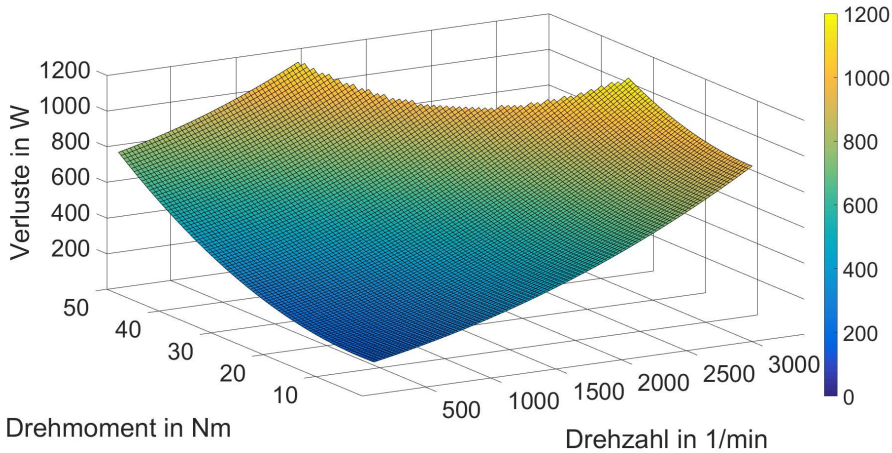


Bild 18: Berechnetes Verlustkennfeld einer 7,5 kW Asynchronmaschine mit 10.000 Stützpunkten

Durch diese Abbildung ist sehr gut zu sehen, dass bei der Verwendung von gemessenen Verlustkennfeldern zur Berechnung von Antriebssystemen zwischen den einzelnen Messpunkten deutlich stärker interpoliert werden muss, als dies bei berechneten Kennfeldern der Fall ist. Dadurch entsteht, durch die Teilweise quadratische Abhängigkeit der Verluste vom Strom, ein deutlich größerer Fehler als bei berechneten Kennfeldern. Ebenso kann die „Begrenzung“ der Leistung, welche aus den typischen Drehzahl-Drehmoment Kennlinien eines Asynchronmotors bekannt ist, deutlich besser herausgearbeitet werden. Im Bild des gemessenen Kennfeldes ist zu sehen, dass ein größerer Bereich nicht abgedeckt werden kann, dies kommt daher, dass der „Abstand“ der Messpunkte über den gesamten Betriebsbereich linear gewählt wurde. Das folgende Bild 19 stellt zur Verdeutlichung eine Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie eines typischen Asynchronmotors dar. Hier ist zu sehen, dass der Drehmomentverlauf über der Drehzahl als eine nichtlineare Kurve verläuft.

Verlustkennfelder für Asynchronmaschinen können auch mit Hilfe von Daten der Norm EN 50598-2:2014 berechnet werden. In den Tabellen F1 und F2 sind Koeffizienten zur Beschreibung der Verluste von 4poligen IE2 Motoren als Funktion des Drehmomentes beziehungsweise der Drehzahl für Motorleistungen im Bereich zwischen 0,12 kW und 1000 kW angegeben. Die Tabellen F3 und F4 der Norm EN50598-2:2014 beschreiben diese Koeffizienten für 2polige IE2 Motoren. In den beschriebenen Tabellen sind die Koeffizienten für 38 verschiedene Motoren in Abhängigkeit von deren

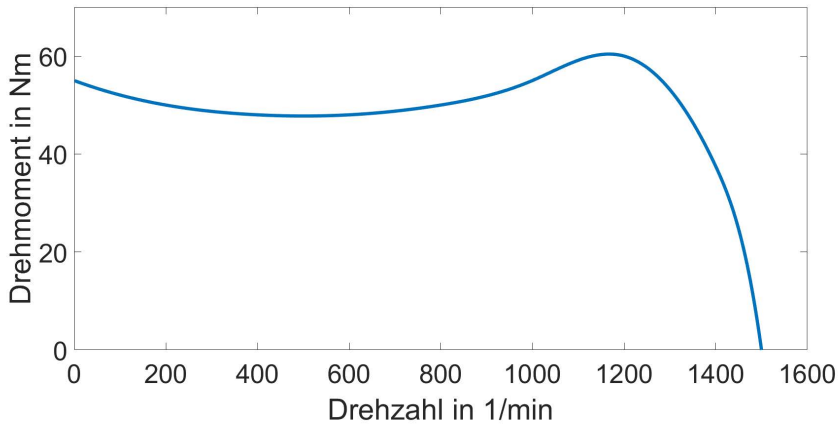


Bild 19: Stationäre Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie einer 7,5 kW Asynchronmaschine

Bemessungsleistung dargestellt. Jeder Motor ist mit zwölf Koeffizienten, sowohl für die Drehzahlabhängigkeit als auch für die Drehmomentabhängigkeit, beschrieben. Beispielhaft sind diese Werte als Funktion des Drehmoments in der nachfolgenden Tabelle 19 für den 4poligen 7,5 kW IE2 Motor dargestellt.

Tabelle 19: Koeffizienten für 4polige IE2 Motoren als Funktion des relativen Drehmoments

Koeffizient	25 % n_n	50 % n_n	75 % n_n	100 % n_n
A	0,0009435	0,0009817	0,001031	0,001091
B	-0,01669	-0,01757	-0,01870	-0,02007
C	3,040	3,897	4,946	6,210

Mit diesen Koeffizienten und der nachfolgenden Formel lassen sich die Verluste eines 4poligen IE2 Asynchronmotors relativ zur Bemessungsleistung des Motors als Funktion des relativen Drehmoments berechnen.

$$\frac{P_{LT}}{P_{r,M}} = A \cdot \left(\frac{M}{M_N} \right)^2 + B \cdot \frac{M}{M_N} + C \quad (45)$$

Analog ist dies mit den Koeffizienten als Funktion der relativen Drehzahl möglich. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Koeffizienten für 4polige IE2 Motoren als Funktion der relativen Drehzahl

Koeffizient	25 % M_N	50 % M_N	75 % M_N	100 % M_N
A	0,0001587	0,0001698	0,0001915	0,0002250
B	0,02253	0,02370	0,02587	0,02922
C	2,540	3,886	6,302	9,940

Mit diesen Koeffizienten und der nachfolgenden Formel lassen sich die Verluste eines 4poligen IE2 Asynchronmotors relativ zur Bemessungsleistung des Motors als Funktion der relativen Drehzahl berechnen. Mit P_{LT} werden dabei die Motorverluste bezeichnet, mit $P_{r,M}$ die Bemessungsleistung des Motors, mit n die Drehzahl und mit n_N die Nenndrehzahl des Motors.

$$\frac{P_{LT}}{P_{r,M}} = A \cdot \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 + B \cdot \frac{n}{n_N} + C \quad (46)$$

Mittels dieser Methode lässt sich für jede angegebene Motorleistung ein Verlustkennfeld, bestehend aus jeweils acht Parabelästen, erzeugen. Bild 20 zeigt dieses Verlustkennfeld, dabei sind hier wie in der Norm EN 50598-2:2014 die Verluste als relative Verluste der Bemessungsleistung dargestellt.

Basierend auf dem dargestellten Verlustkennfeld aus Koeffizienten aus der Norm EN 50598-2:2014 wird mittels eines Simulationsprogramms ein engmaschiges Verlustkennfeld errechnet. Dies ist unbedingt notwendig, da die betrachteten mechatronischen Antriebssysteme auch außerhalb der acht in der Norm vorgesehenen Punkte betrachtet und analysiert werden sollen. Um die Motorverluste für jeden beliebigen Betriebspunkt ermitteln zu können, wird eine Polynomregression 3. Ordnung (Curve Fitting) als Funktion der Drehzahl und des Drehmoments durchgeführt. Für diese Fit-Funktion werden neun Parameter p_{00} bis p_{03} berechnet. Hieraus resultiert eine Beschreibung des Verlustkennfeldes, wobei sowohl Drehmoment als auch Drehzahl in Prozent der Nennwerte angegeben sind.

$$p(L(n, M)) = P_{LT}/P_r(M) = p_{00} + p_{10} \cdot n/n_N + p_{01} \cdot M/M_N + p_{11} \cdot n/n_N \cdot M/M_N + p_{20} \cdot (n/n_N)^2 + p_{02} \cdot (M/M_N)^2 + p_{21} \cdot (n/n_N)^2 \cdot M/M_N + p_{12} \cdot n/n_N \cdot (M/M_N)^2 + p_{30} \cdot (n/n_N)^3 + p_{03} \cdot (M/M_N)^3 \quad (47)$$

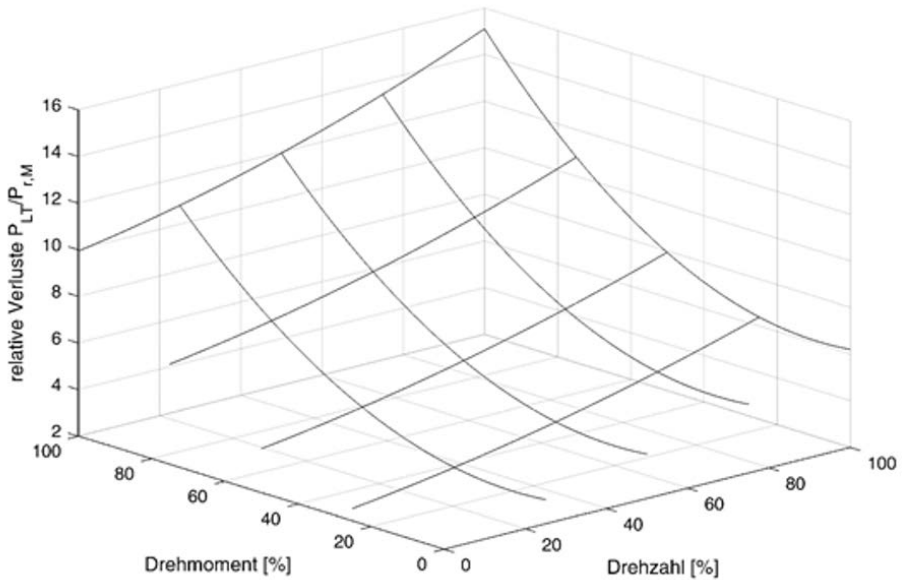


Bild 20: Verlustkennfeld auf Basis der Koeffizienten aus den Tabellen F.1 und F.2 aus der Norm EN 50598-2:2014

Aus dieser Funktion lässt sich mit Hilfe des in Matlab erstellen Simulationsmodells ein Verlustkennfeld des als Beispiel gewählten vierpoligen 7,5 kW Asynchronmotors nach den Koeffizienten aus den Tabellen F.1 und F.2 aus der Norm EN 50598-2:2014 berechnen. Bild 21 zeigt den Plot dieses Verlustkennfeldes. Die Drehzahl und das Drehmoment sind als relativer Wert der Nennwerte angegeben und die Verluste relativ zur Bemessungsleistung.

Die polynomische Annäherung aus Formel 46 des Verlustkennfeldes kann für jeden beliebigen Betriebspunkt (n,M) ausgewertet werden. Das Verlustkennfeld kann über den Ansatz aus der Norm berechnet oder messtechnisch ermittelt werden. Aus beiden Eingangsdaten kann über die Polynom-Näherung 3. Grades das engmaschige Verlustkennfeld des Motors generiert werden. Als Beispiel wurde die beschriebene polynomische Annäherung für drei Motoren unterschiedlicher Leistungen durchgeführt. Dabei wurde ein 3 kW, der schon beschriebenen 7,5 kW, sowie ein 45 kW Motor untersucht. Die errechneten Parameter für die Regression 3. Ordnung sind in folgender Tabelle 21 dargestellt

4 Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten

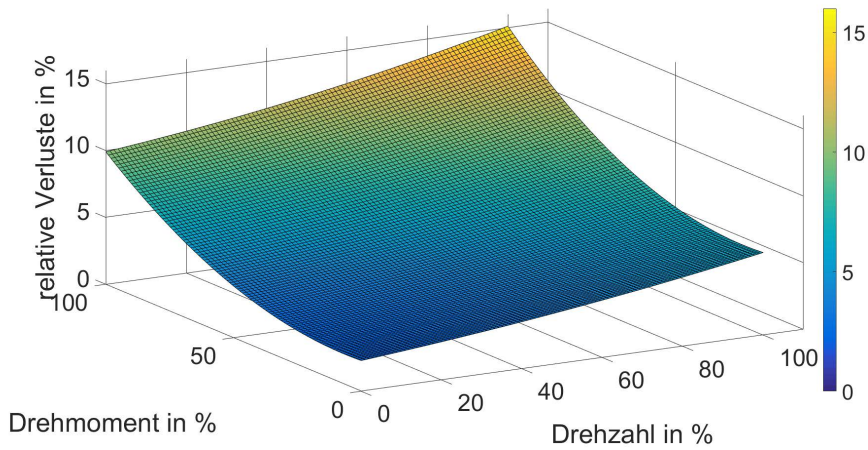


Bild 21: Polynomische Regression des Verlustkennfeldes aus F.1 und F.2 aus der Norm EN 50598-2:2014 für einen 4poligen 7,5 kW Asynchronmotor

Tabelle 21: Tabelle der Koeffizienten zur Verlustberechnung der Motoren

Leistungsklasse/ Parameter	3 kW	7,5 kW	45 kW
P ₀₀	3,8402	2,2919	1,0105
P ₁₀	0,0290	0,0258	0,0153
P ₀₁	-0,0056	-0,0117	-0,0013
P ₁₁	-1,009 · 10 ⁻⁴	-1,381 · 10 ⁻⁴	-6,831 · 10 ⁻⁵
P ₂₀	1,353 · 10 ⁻⁴	1,179 · 10 ⁻⁴	8,820 · 10 ⁻⁵
P ₀₂	1,058 · 10 ⁻³	8,550 · 10 ⁻⁴	4,372 · 10 ⁻⁴
P ₂₁	5,210 · 10 ⁻⁷	8,035 · 10 ⁻⁷	5,332 · 10 ⁻⁷
P ₁₂	1,318 · 10 ⁻⁶	1,889 · 10 ⁻⁶	1,070 · 10 ⁻⁶
P ₃₀	9,201 · 10 ⁻⁸	1,226 · 10 ⁻⁷	1,376 · 10 ⁻⁷
P ₀₃	2,451 · 10 ⁻⁷	2,377 · 10 ⁻⁷	3,181 · 10 ⁻⁸

Die Qualität der Annäherung wird über die Auswertung des Residuenfelds sichergestellt. Durch die Berechnung der maximalen Abweichung zwischen den gefitteten Funktionen und den Parabellasten nach Tabelle F.1 und F.2 aus der Norm EN 50598-2:2014 kann die Gesamtgüte der Regression abgeschätzt oder die Güte der Annäherung in einzelnen Betriebsbereichen ausgewertet werden. Je höher die Ordnung des gewählten Polynoms für die Berechnung gewählt wird, desto besser wird die Genauigkeit, allerdings steigt der Rechenaufwand bei Polynomen höherer Ordnung auch an. Daher wurde untersucht, welche Ordnung des Polynoms das beste Verhältnis aus Aufwand und Ergebnis darstellt. Die Berechnungen wurden mit Polynomen von 2. bis 5. Ordnung durchgeführt. Als Ergebnis lässt sich sagen, dass ab einem Polynom 3. Ordnung die Genauigkeit sehr gut ist und kaum noch zunimmt, aber wie bereits beschrieben der Rechenaufwand erheblich steigt. Daher wurde für alle weiteren Berechnungen auf Polynome 3. Ordnung zurückgegriffen.

4.2 Permanenterregte Synchronmaschine

In der industriellen Antriebstechnik spielen Synchronmotoren nur eine sehr stark untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nicht näher auf Synchronmotoren eingegangen.

4.3 Frequenzumrichter

Im Gegensatz zu den Motoren existieren für Frequenzumrichter keine genormten Wirkungsgradklassen. Mit der Norm EN 50598-2:2014 wurde zwar eine Verlustbetrachtung des gesamten Antriebssystems eingeführt, die darin veranschlagten Verluste für Frequenzumrichter weichen von den gemessenen Verlustwerten aber so weit ab, dass dieser Verlustansatz keine realitätsnahe Abbildung des Umrichters ergibt. Dies wurde anhand von Messungen verifiziert und ist in Kapitel 4.7 ausführlich dargestellt. Daher werden die Verlustkennfelder für Frequenzumrichter in dieser Arbeit mit Hilfe von Datenblattwerten der Hersteller berechnet. Hier sind neben den Datenblattwerten des „Systems“ Frequenzumrichter auch Datenblattwerte der verwendeten Komponenten und speziell der Halbleiter notwendig. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, besteht das „System“ Frequenzumrichter aus einer Vielzahl von Komponenten, welche nicht immer alle bei jedem Frequenzumrichter enthalten sein müssen. Bild 22 stellt die Komponenten eines Frequenzumrichters dar. Zudem zeigt die Abbildung noch, von welchen Größen die Verluste in den jeweiligen Komponenten abhängig sind.

4 Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten

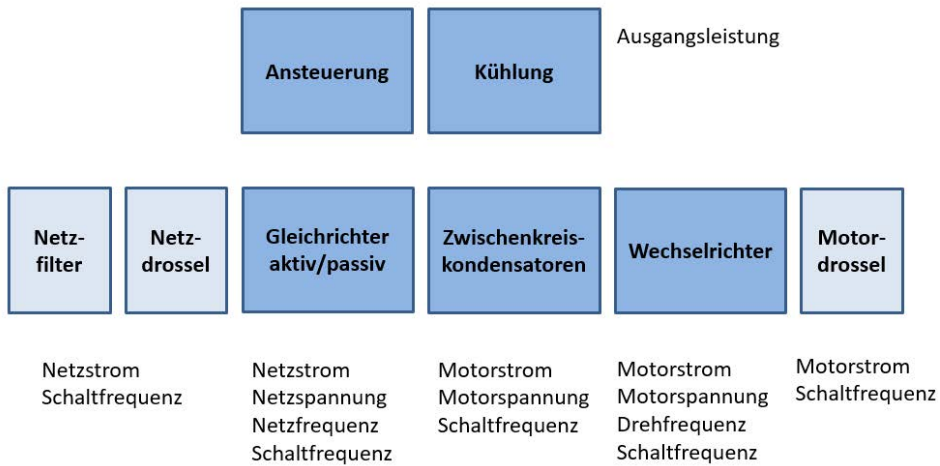


Bild 22: Komponenten eines Frequenzumrichters mit Abhängigkeiten der Verluste

Die dunkel hinterlegten Komponenten sind immer bei allen Frequenzumrichtern enthalten, die helleren Komponenten müssen nicht zwangsläufig enthalten sein, hier kommt es auf den jeweiligen Anwendungsfall an, ob diese Komponenten benötigt werden. Daher ist es für die Berechnung wichtig zu definieren aus welchen Komponenten der Frequenzumrichter besteht, beziehungsweise welche Komponenten für den jeweiligen Anwendungsfall benötigt werden.

Der hier dargestellte Block Wechselrichter zum Beispiel besteht aus sechs IGBTs und sechs Freilaufdioden, diese Komponenten werden entsprechend im Simulationsmodell separat modelliert und betrachtet. Dies bildet dann den Block Wechselrichter im Simulationsmodell, welcher auf der einen Seite an den Block Zwischenkreis und auf der anderen Seite an den Block Motordrossel, falls vorhanden, und wenn nicht direkt an den Block Motor angeschlossen ist. Bild 8 zeigt im oberen Teil ein Übersichtsmodell des Wechselrichters aus dem Simulationsmodell. In der Abbildung sind sechs Module zu sehen. In dem unteren Teil ist dann der Aufbau eines Moduls dargestellt. Die Eingänge des Wechselrichtermoduls sind die Leistungsanschlüsse, Zwischenkreis plus und minus, sowie die Ansteuersignale der jeweiligen Module. Die Zwischenkreisanschlüsse kommen aus dem Simulationsmodell des Zwischenkreises und die Ansteuersignale aus der Regelungseinheit. Die im Leistungspfad nach dem Wechselrichter folgende Motordrossel errechnet die eventuell vorhandenen Verluste einer Motordrossel. Der Block Motor repräsentiert den eingesetzten Motor, dies ist bei

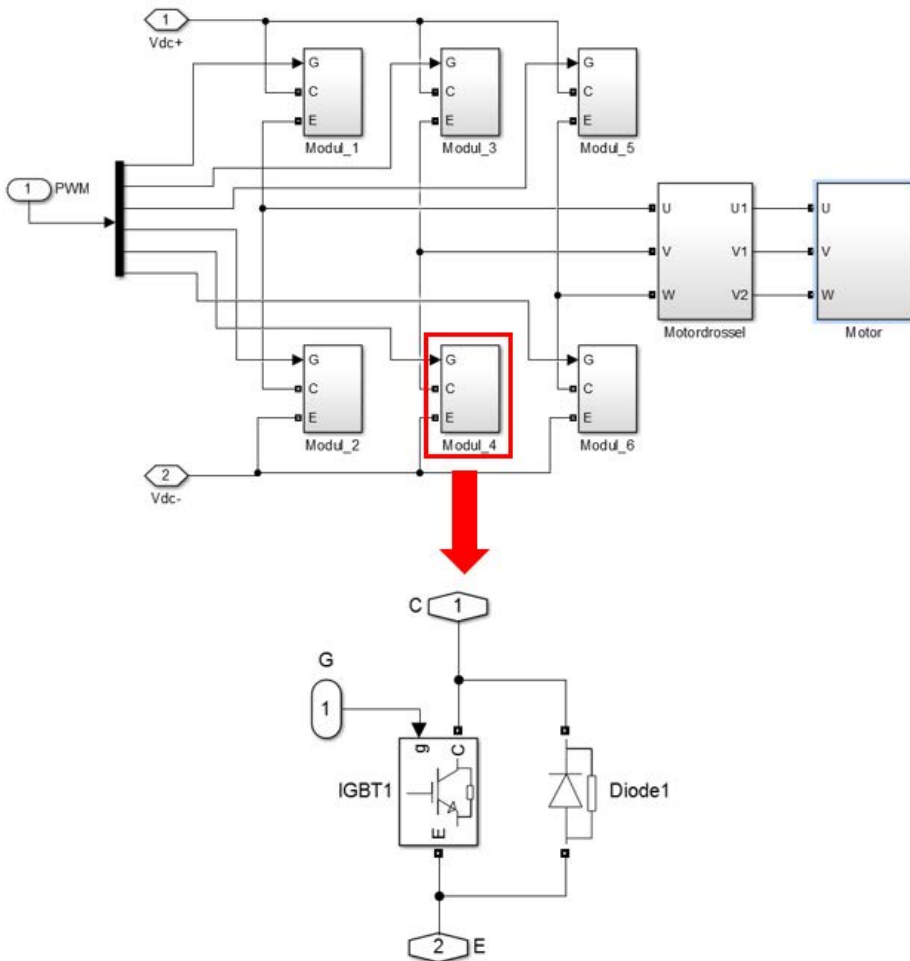


Bild 23: Simulationsmodell in Matlab Simulink Simscape zur Berechnung der Wechselrichterterverluste mit dem Teilmodell der Schaltzelle, bestehend jeweils aus IGBT- und Dioden-Modell

der Berechnung der Verluste des Wechselrichters unbedingt notwendig, da entstehenden Verluste von einigen Eigenschaften des Motors abhängen.

Die Verluste der einzelnen Komponenten aus Abbildung 22 werden demnach alle separat berechnet und am Ende zu einem Verlustkennfeld Frequenzumrichter zusammen geführt. Demnach können auch Variationen von einzelnen Komponenten und deren Einfluss auf die Verluste des Gesamtsystems untersucht werden. Zur Veranschaulichung ist in Bild 24 das Verlustkennfeld des Blockes Wechselrichter dargestellt. Dabei handelt

4 Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten

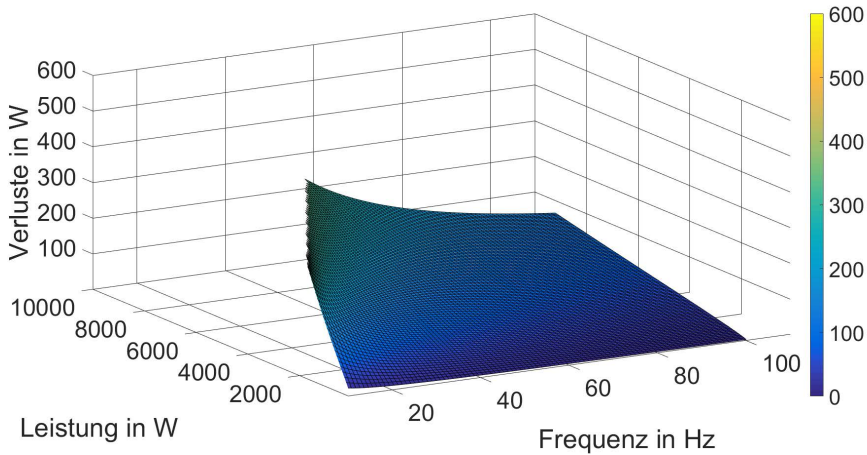


Bild 24: Verlustkennfeld des Wechselrichters eines 7,5 kW Frequenzumrichters bei einer Taktfrequenz von 8 kHz

es sich nur um die Verluste, welche in den sechs IGBTs und den sechs Freilaufdioden entstehen. Die Berechnung wurde hier beispielhaft an einem 7,5 kW Frequenzumrichter mit einer Taktfrequenz von 8 kHz durchgeführt.

Die Verluste in den IGBTs und Dioden hängen von den Werten der Halbleiter an sich ab. Hier wurde als Referenz von einem Halbleitermodul des Typs SKiiP 23AC126V1 der Firma Semikron ausgegangen. Aus dem Datenblatt werden folgende Werte für IGBT und Diode zur Berechnung der Verluste benötigt:

- Kollektor-Emitter-Schleusenspannung (statisch)
- Bahnwiderstand des IGBT
- Verlustenergie während der Einschaltzeit
- Verlustenergie während der Ausschaltzeit
- Kollektornennstrom
- Kollektor-Emitter-Versorgungsspannung
- Schleusenspannung Diode
- Durchlassersatzwiderstand Diode
- Verlustenergie während der Sperrverzögerungszeit

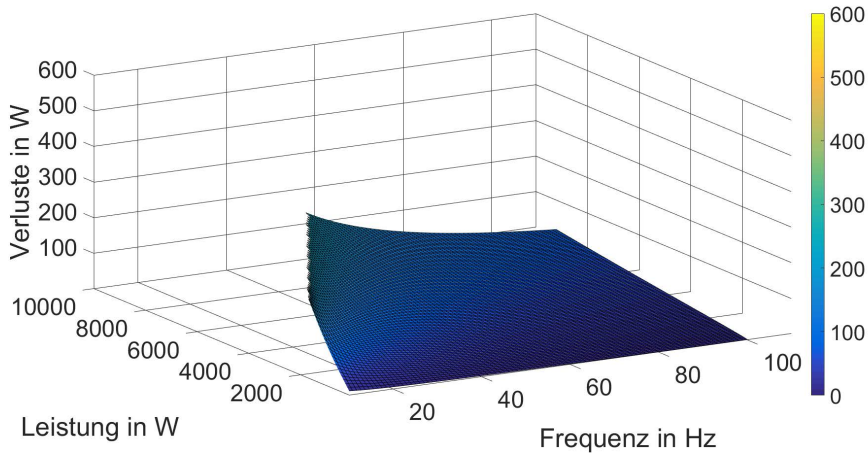


Bild 25: Verlustkennfeld des Wechselrichters eines 7,5 kW Frequenzumrichters bei einer Taktfrequenz von 4 kHz

Die im Wechselrichter entstehenden Verluste setzen sich aus den Schalt- und den Durchlassverlusten zusammen. Die Schaltverluste sind entscheidend von der Taktfrequenz der Leistungshalbleiter abhängig. Mit steigender Taktfrequenz erhöhen sich die Schaltverluste signifikant, daher ist es von der jeweiligen Anwendung abhängig ob die Schalt- oder die Durchlassverluste den dominierenden Part der Verluste darstellen. Um dies zu verdeutlichen ist in der folgenden Bild 25 das Verlustkennfeld des hier beschriebenen 7,5 kW Wechselrichters mit einer Taktfrequenz von 4 kHz und in Bild 26 mit einer Taktfrequenz 20 kHz dargestellt.

Aus diesen beiden Abbildungen könnte man schließen, dass ein System effizienter arbeitet, je geringer die Taktfrequenz der Halbleiter gewählt wird. Dies ist aufgrund von auftretenden Wechselwirkungen mit anderen Komponenten jedoch nicht der Fall. Zum Beispiel steigen die Verluste im Motor, wenn die Taktfrequenz im Wechselrichter sinkt. Zudem ist für eine gute und effiziente Regelung eines Motors auch eine, je nach Motorparameter unterschiedliche, minimale Taktfrequenz notwendig.

Die Berechnung der Verluste in den übrigen Komponenten funktioniert ähnlich der hier beschriebenen Vorgehensweise. Die Verluste im Block Gleichrichter hängen entscheidend davon ab, ob im System ein aktiver oder ein passiver Gleichrichter eingesetzt wird. Ist der Gleichrichter als aktives System ausgeführt, ist der Aufbau identisch zu dem Aufbau des Wechselrichters, siehe Bild 23. Dies ist vor allem immer dann der Fall,

4 Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten

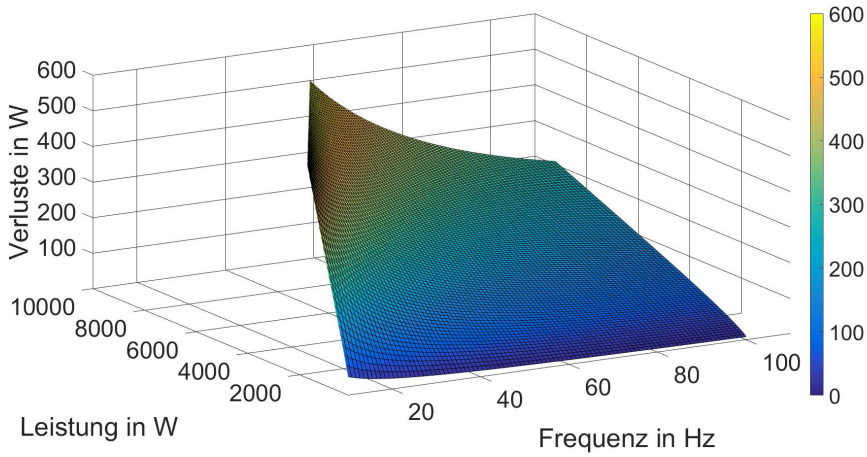


Bild 26: Verlustkennfeld des Wechselrichters eines 7,5 kW Frequenzumrichters bei einer Taktfrequenz von 20 kHz

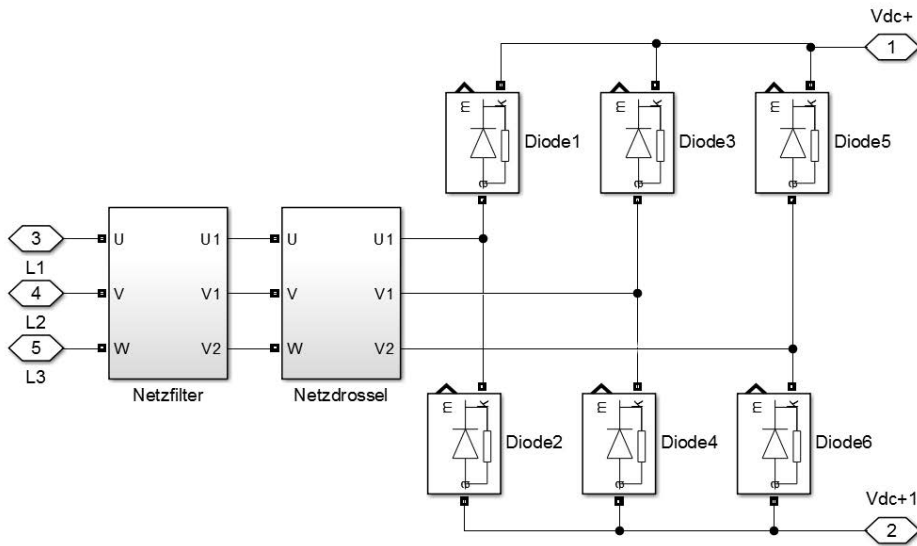


Bild 27: Modell eines passiven Gleichrichters als Netzmodul eines Frequenzumrichters

wenn es sich um ein Frequenzumrichtersystem mit Energierückspeicherung ins Stromnetz handelt. In allen anderen Fällen kann der Gleichrichter als passives System ausgeführt sein. Das bedeutet, dass die Gleichrichtung ausschließlich über Dioden stattfindet. Diese Variante eines Gleichrichters ist in Bild 27 dargestellt.

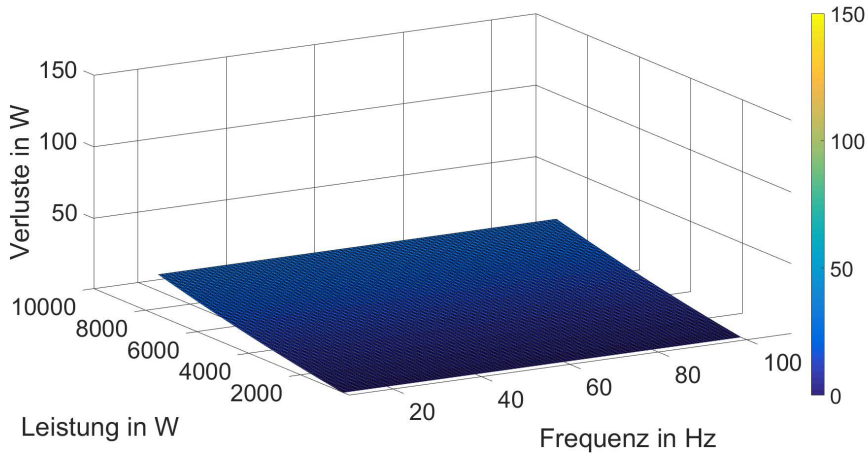


Bild 28: Verlustkennfeld passiver Gleichrichter für einen 7,5 kW Frequenzumrichter

Arbeitet ein Frequenzumrichtersystem mit einem passiven Gleichrichter ist die Zwischenkreisspannung geringer als bei einem aktiven System, dies hat zur Folge, dass auch die maximale Motorspannung geringer ist. Während ein aktiver Gleichrichter als Hochsetzsteller wirkt und somit die gleichgerichtete Netzspannung leicht anhebt auf typischerweise 560 V bis 600 V bei einem 400 V Drehstromnetz. Bei einem passiven Gleichrichter liegt die maximale Spannung im unbelasteten Zustand bei:

$$U_{DC} = U_{AC} \cdot \sqrt{2} \quad (48)$$

Was bei einer dreiphasigen Wechselspannung bei 400 V zu einer Gleichspannung von 565 V führt. Im belasteten Zustand sinkt die Spannung nochmal ab, man geht hier dann nicht vom Faktor Wurzel zwei aus, sondern von ungefähr 1,35 was dann einem Mittelwert der Gleichspannung von 540 V entspricht. Somit ist die für den Wechselrichter zur Verfügung stehende Gleichspannung um 10 Prozent kleiner als bei einer aktiven Gleichrichtung. Dies hat wiederum zur Folge, dass die maximale Drehzahl des Motors ohne Feldschwächung um etwa 10 Prozent sinkt. Der positive Effekt einer passiven Gleichrichtung ist im Gegenzug dazu deutlich geringere Verluste im Gleichrichter. Bild 28 zeigt das Verlustkennfeld des Gleichrichters für einen 7,5 kW Frequenzumrichter in passiver Ausführung und Bild 29 in aktiver Ausführung.

4 Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten

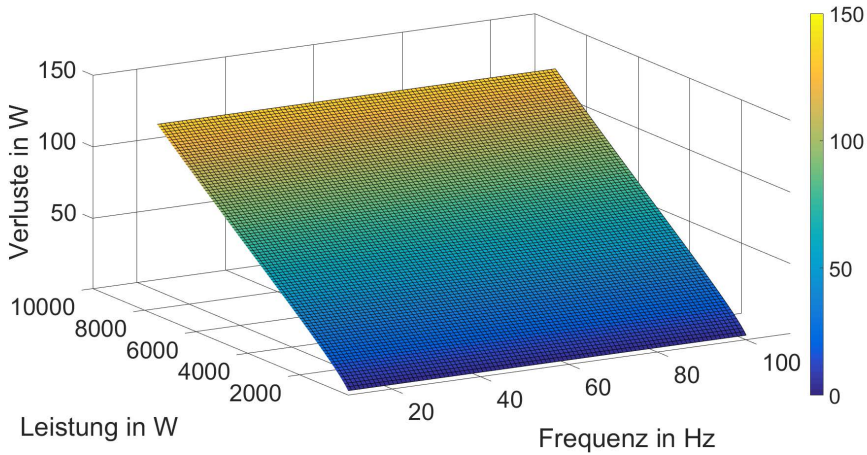


Bild 29: Verlustkennfeld aktiver Gleichrichter für einen 7,5 kW Frequenzumrichter (Taktfrequenz 8 kHz)

Aus den vorangegangenen Berechnungen lässt sich erkennen, dass die Verluste der passiven Gleichrichtung gegenüber der aktiven Gleichrichtung, beispielsweise im Arbeitspunkt 48 Nm und 1500 1/min was einer Leistung von 7,5 kW entspricht, nur ca. 22 Prozent betragen.

Die Gesamtverluste und somit auch das Verlustkennfeld eines Frequenzumrichters setzen sich somit aus mindestens fünf Verlustanteilen zusammen. In der Vollausbaustufe müssen acht Teilkomponenten in die Verlustberechnung einbezogen werden und entsprechend acht Teilverlustkennfelder addiert werden. Es hat sich gezeigt, dass die Ansteuerungsverluste aufgrund ihres geringen Beitrags als pauschale Verlustgröße einbezogen werden kann ohne die Verlustberechnung signifikant zu beeinflussen. Hier wurde dieser Weg für die Ansteuerungsverluste gewählt. Die Verluste für die Kühlung müssen je nach Ausführung des Kühlsystems entweder ebenfalls pauschal nach der Nennausgangsleistung oder pauschal nach der aktuellen Leistung des Frequenzumrichters berechnet werden. Die Berechnung nach der aktuellen Ausgangsleistung ist dann notwendig, wenn das Kühlsystem mittels Temperaturmessung vom Frequenzumrichter leistungsveränderlich gesteuert werden kann. Ein berechnetes Verlustkennfeld eines kompletten 7,5 kW Frequenzumrichters mit 100 x 100 Stützstellen, ist in Bild 30 dargestellt.

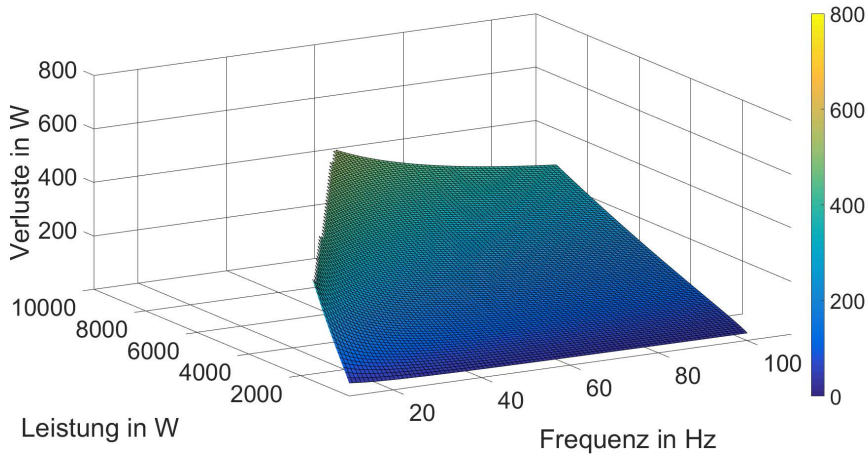


Bild 30: Verlustkennfeld gesamter Frequenzumrichter mit aktiver Gleichrichtung und 8 kHz Taktfrequenz

Neben der maximalen Leistung und einer maximalen Ausgangsfrequenz sind Frequenzumrichter üblicherweise auch noch im maximalen Ausgangsstrom begrenzt. Dies führt dazu, dass die Bemessungsleistung nicht in jedem Arbeitspunkt erreicht werden kann. In Arbeitspunkten mit kleiner Ausgangsfrequenz, was eine geringe Drehzahl des angeschlossenen Motors zur Folge hat, ist der Ausgangsstrom der begrenzende Faktor. Dies ist auch in dem Kennfeld zu sehen, da hier nur Punkte dargestellt werden, welche auch im Betrieb vorkommen können. Punkte die außerhalb des möglichen Betriebsbereiches liegen, werden abgeschnitten.

Den größten Einfluss auf die Verluste hat wie beim Wechselrichter auch beim Gesamtsystem Frequenzumrichter die Taktfrequenz der Halbleiter. Bei Frequenzumrichtern mit aktivem Gleichrichter ist die Taktfrequenz des Gleichrichters und des Wechselrichters ausschlaggebend. In Bild 31 ist zur Verdeutlichung der Problematik das Verlustkennfeld eines Frequenzumrichters mit einer Taktfrequenz von 4 kHz und aktiver Gleichrichtung dargestellt und in Bild 32 der gleiche Frequenzumrichter mit einer Taktfrequenz von 20 kHz. Die Taktfrequenz ist hier für den Gleichrichter und den Wechselrichter identisch.

Wenn man den Frequenzumrichter mit passiver Gleichrichtung und 4 kHz Taktfrequenz des Wechselrichters als Basis verwendet, sind die Verluste im Arbeitspunkt bei 48 Nm und 1500 1/min bei aktiver Einspeisung und 20 kHz Taktfrequenz des Wechselrichters um 188 Prozent höher. Bild 33 zeigt

4 Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten

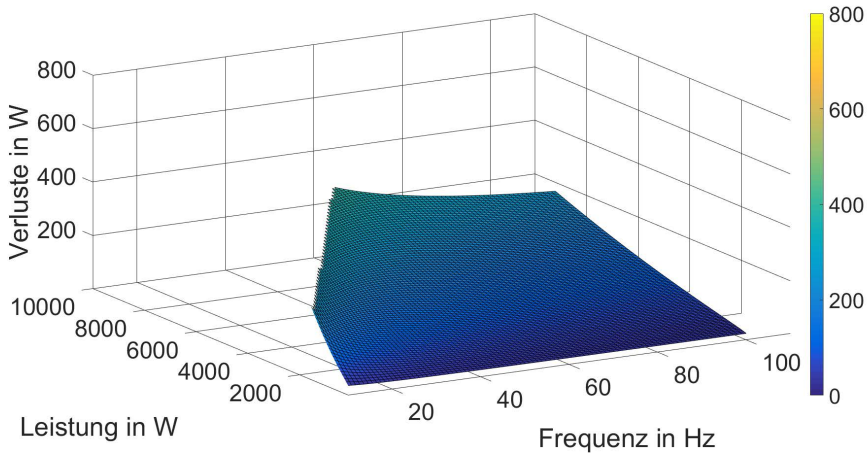


Bild 31: Verlustkennfeld gesamter Frequenzumrichter mit aktiver Gleichrichtung und 4 kHz Taktfrequenz

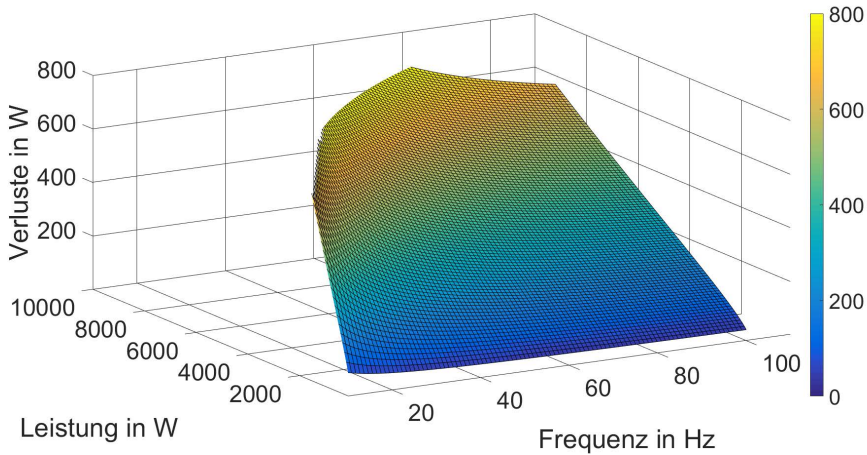


Bild 32: Verlustkennfeld gesamter Frequenzumrichter mit aktiver Gleichrichtung und 20 kHz Taktfrequenz

die Differenz der Verluste der beiden Betriebsmodi. Dabei ist wieder der Betrieb mit passiver Gleichrichtung und 4 kHz Taktfrequenz als Referenz angenommen.

Durch diese Erkenntnis ist klar, dass auch die Tatsache ob ein System mit passiver oder aktiver Einspeisung ausgeführt wird, genauestens betrachtet werden muss. Zudem sollte der Festlegung der Taktfrequenz erhöhte Auf-

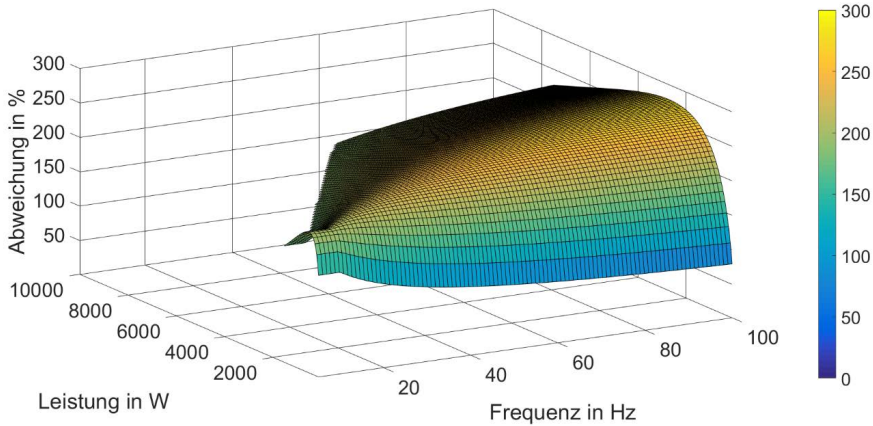


Bild 33: Erhöhung der Verluste des gesamten Wechselrichters von passiver Gleichrichtung mit 4 kHz Taktfrequenz zu aktiver Gleichrichtung mit 20 kHz Taktfrequenz

merksamkeit geschenkt werden, um damit Systeme effizient und kostengünstig ausführen zu können.

4.4 Doppelschichtkondensatoren

Ein für die Anwendung kurzfristige Speicherung von Energie in Antriebssystemen sehr gut geeignetes Speichermedium sind Doppelschichtkondensatoren, da diese sehr hohen Leistungen bezogen auf den Energieinhalt aufnehmen und abgeben können. Dies ist gerade für Antriebssysteme mit Bremsfunktionen und anschließender Beschleunigungsphasen entscheidend. Bei einem Speichersystem aus Supercaps handelt es sich in der Regel um eine Reihen- und Parallelverschaltung von einzelnen Zellen. Eine einzelne Supercap-Zelle hat üblicherweise eine Maximalspannung von 2,5 V, somit müssen zahlreiche Zellen in Reihe geschaltet werden. Die Kapazität der einzelnen Zellen liegt in einem sehr weiten Bereich von einigen hundert Millifarad bis zu einigen tausend Farad. Somit kann auch mit einem Supercap-Speicher ein relativ großer Energieinhalt erreicht werden, zumindest was den relevanten Energieaustausch in dem betrachteten Fahrzyklus betrifft. Da Aufgrund der Einschränkungen eines DC-Wandlers die Spannung der Supercaps nicht bis auf null heruntergefahren werden kann, berechnet sich der nutzbare Energieinhalt eines Supercap-Speichers wie folgt.

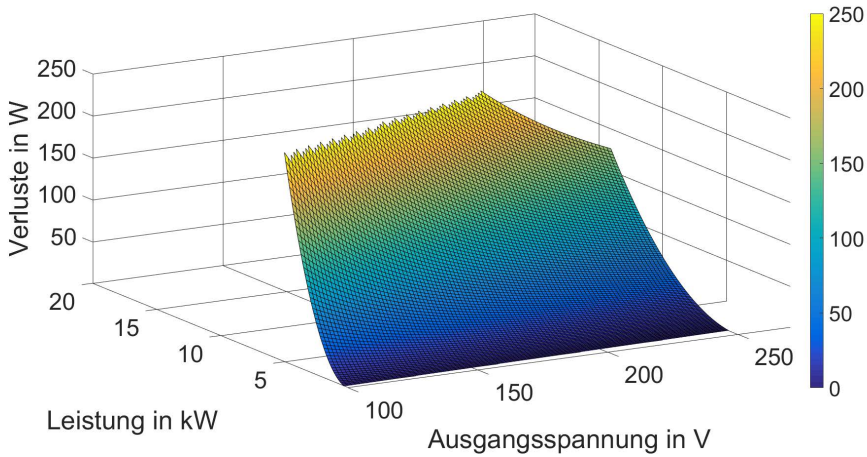


Bild 34: Verlustkennfeld des berechneten Supercap-Speichers

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_2^2 - U_1^2) \quad (49)$$

Dabei wird die Kapazität des Supercaps mit C bezeichnet, die maximale Spannung am Supercap mit U_2 und die minimale Spannung mit U_1 .

Dies bedeutet, dass ein Supercap-Speicher mit einer Kapazität von 100 F bei einem Spannungsbereich von 100 V bis 250 V einen Energieinhalt von 729 Wh hat. Die maximale Spannung von 250 V ergibt sich aus der Reihenschaltung von 100 Supercap-Zellen. Die minimale Spannung von 100 V aus dem noch sinnvollen Übersetzungsverhältnis des DC-Wandlers. Der maximale Strom, welcher aufgenommen und abgegeben werden kann, hängt in diesem Falle vom eingesetzten DC-Wandler ab. Für die Berechnung des Verlustkennfeldes des Supercap-Speichers wird von einem maximalen Strom von 50 A ausgegangen. Bild 34 zeigt das Verlustkennfeld des beschriebenen Supercap-Speichers.

Das Berechnungsprogramm ist so gestaltet, dass die Parameter des Supercap-Speichers frei eingegeben werden können. Es können entweder die Datenblattwerte der einzelnen Zellen in Verbindung mit der Verschaltung oder aber auch die Werte des Gesamtspeichers eingegeben werden. In Verbindung mit dem maximalen Strom wird dann das Verlustkennfeld berechnet.

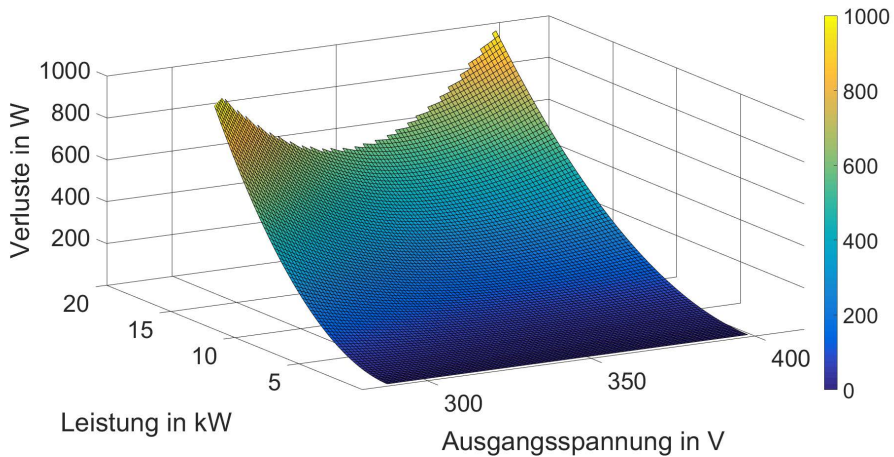


Bild 35: Verlustkennfeld eines Akkumulatorsystems

4.5 Akkumulatorsysteme

Als zweites mögliches Speichersystem werden Akkumulatoren betrachtet. Die Verluste bestehen wie in Kapitel 3.5.2 beschrieben aus lastabhängigen und lastunabhängigen Anteilen.

Die Nennspannung eines Akkumulatorsystems wird durch die Anzahl der in Reihe geschalteten Zellen bestimmt. Die Nennspannung der häufig verwendeten und auch hier betrachteten Lithium-NMC-Zellen (Nickel-Mangan-Cobalddioxid) beträgt 3,7 V. Die Ladeschlussspannung wird oftmals mit 4,15 V und die Entladeschlussspannung mit 3 V festgelegt. Die Nennspannung von Akkumulatorsystemen bewegt sich heute üblicherweise zwischen 44 V und 888 V, da die Reihenverschaltung oftmals in Blöcken von zwölf Zellen realisiert wird.

Für die hier beispielhafte Auslegung werden 96 Zellen in Reihe verschalten, somit ergibt sich eine Nennspannung von 355 V. Der Spannungsbereich des Speichersystems liegt somit zwischen 288 V und 398 V. Für dieses System ist in Bild 35 das Verlustkennfeld dargestellt.

Bei den Akkumulatoren handelt es sich um Zellen des Typs SLPB98106100 der Firma Kokam, mit einer Nennkapazität von 10 Ah. Die Zelle hat die Abmessung 107 x 102 x 10 mm, ein Foto ist in Bild 36 dargestellt. Der Energieinhalt bei der beschriebenen Reihenverschaltung liegt bei 3,55 kWh. Für diesen Anwendungsfall wurde auf Hochstromzellen zurückgegriffen. Diese



Bild 36: Foto der verwendeten Zelle des TypsSLPB98106100 der Firma Kokam [76]

können mit maximal 5 C geladen oder entladen werden, was einem Lade- und Entladestrom von 50 A entspricht.

Das Berechnungsprogramm ist so gestaltet, dass alle Parameter eines möglichen Akkumulatorsystems frei eingegeben werden können. Das Programm überprüft die Angaben dann auf Plausibilität und kann somit Kennfelder von verschiedensten Speicherkonfigurationen berechnen.

4.6 DC-Wandler

Zur Anbindung eines Speichersystems aus Supercaps oder Akkumulatoren an ein Antriebssystem beziehungsweise an dessen Wechselrichter ist ein DC-Wandler notwendig. Der DC-Wandler regelt dabei die Ladung und Entladung des Speichersystems. Der Wandler ist dabei als klassischer Buck-Boost-Converters (Tief-Hochsetzsteller) ausgeführt. Bild 37 zeigt das Schaltbild des verwendeten Wandlers.

Mit Hilfe des DC-Wandlers lässt sich das angeschlossene Speichersystem gezielt laden und entladen. Je nach verwendetem Speicher sind unterschiedliche Ladealgorithmen notwendig. Klassisch werden sowohl Akkumulatorsysteme als auch Supercaps zu Beginn im CC (control current) Betrieb und anschließend im CV (control voltage) Betrieb geladen. Dies dient dazu, sowohl die Strom- als auch die Spannungsgrenzen des Speichersystems aber auch des DC-Wandlers einzuhalten. Die Entladung der

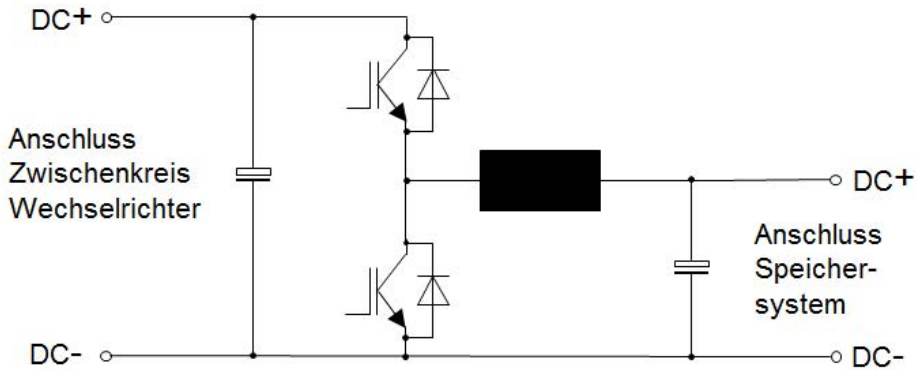


Bild 37: Schaltbild DC-Wandler zur Anbindung eines Speichers an ein Antriebssystem

Speicher wird üblicherweise im CC Betrieb durchgeführt. In der hier vorliegenden Arbeit werden die Vorgaben für den Lade- und Entladestrom anhand des Leistungsbedarfes des Antriebssystems und dem Ladezustand des Speichers berechnet. Da es mit dem eingesetzten Buck-Boost-Converters technisch nicht sinnvoll ist eine beliebige Spannung am Speicher einzustellen, würde die Speicherspannung auf die hier sinnvollen Werte von mindestens 50 V und maximal 500 V begrenzt. Somit kann je nach Größe des eingesetzten Speichers die Spannung variabel verändert werden. Wobei darauf zu achten ist, dass sich mit größer werdender Differenz der Spannung des Antriebssystems und des Speichers die Verluste vergrößern.

Als Beispiel wird nachfolgend ein DC-Wandler für den Einsatz eines Akkumulatorsystems als Speicher dargestellt. Für die Berechnung wird auf den in Kapitel 4.5 beschriebenen Speicher zurückgegriffen. Somit liegt das Spannungsübersetzungsverhältnis bei einer Zwischenkreisspannung des Antriebssystems von 600 V zwischen 0,48 und 0,66. Beziehungsweise beim Wiedereinspeisen der Energie vom Speicher in den Zwischenkreis des Antriebssystems zwischen 1,51 und 2,08. Die Verluste in einem DC-Wandler hängen wie beim Wechselrichter von verschiedenen Faktoren ab. Hier spielen neben den Strömen und Spannungen, die Schaltungstopologie und die eingesetzten Bauelemente, sowohl aktive als auch passive Bauelemente, eine entscheidende Rolle. Bild 38 zeigt das Verlustkennfeld eines DC-Wandlers in Buck-Boost Ausführung.

4 Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten

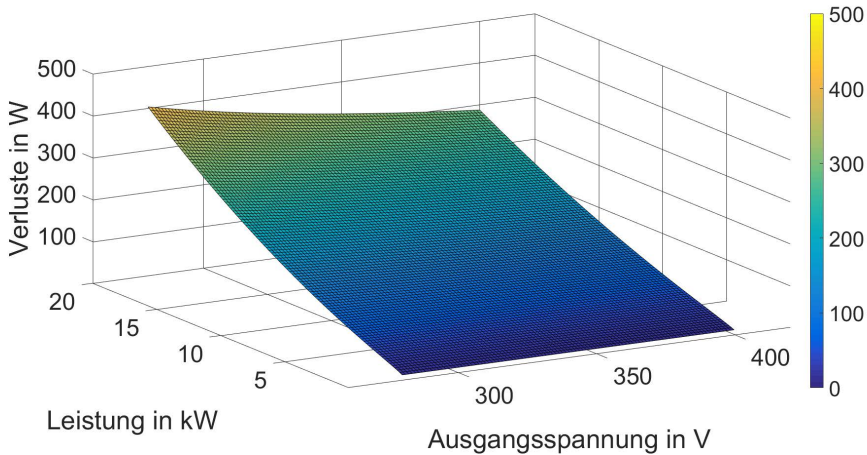


Bild 38: Verlustkennfeld eines DC-Wandlers in Buck-Boost Ausführung

Die Grundlage für die Berechnungen zum Wirkungsgradkennfeld stellen die in Kapitel 3.2 dargestellten Berechnungen von Verlusten in Leistungshalbleitern und passiven Bauelementen dar, weshalb hier nicht mehr näher auf die Einzelheiten eingegangen wird.

Wenn im Berechnungsprogramm ein Antriebssystem mit Speicher ausgewählt wird, muss für das Speichersystem der Spannungsbereich beziehungsweise die Verschaltung der Akkumulator oder Supercap-Zellen eingegeben werden. Aus diesen Daten werden dann der Spannungsbereich und der benötigte Strom des DC-Wandlers errechnet und das entsprechende Verlustkennfeld daraus erzeugt. Somit ist die Konfiguration des Systems maximal flexibel an die Anwendung anpassbar.

4.7 Vergleich gemessene und berechnete Verlustkennfelder

Zur Verifikation der Simulationsmodelle mit denen die Verlustkennfelder der einzelnen Komponenten eines Antriebsstranges berechnet werden, werden diese mit real gemessenen Verlustkennfeldern verglichen. Dazu werden die berechneten Verlustkennfelder mit deutlich weniger Stützpunkten erzeugt. Die in den voranstehenden Unterkapiteln zu sehenden Verlustkennfelder sind mit einer Auflösung von 10.000 Berechnungspunkten entstanden. Für den Vergleich mit real gemessenen Kennfeldern wurde

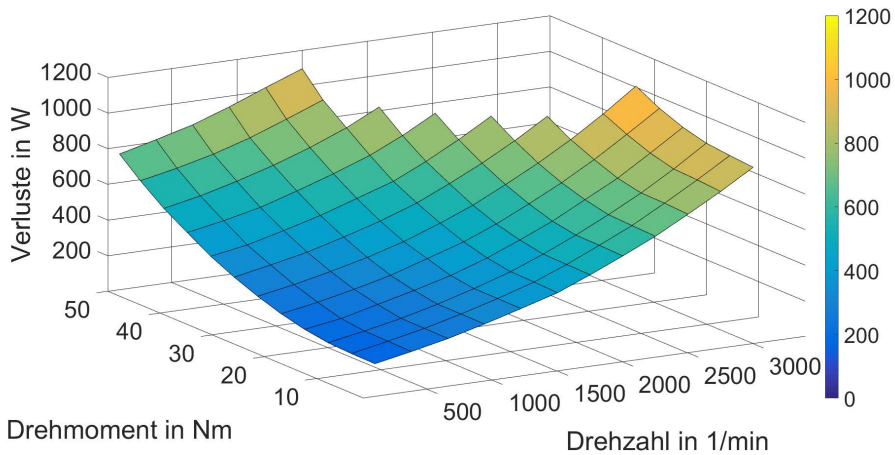


Bild 39: Gemessenes Verlustkennfeld einer 7,5 kW Asynchronmaschine mit 144 Messpunkten

die Auflösung auf 144 Berechnungspunkte reduziert. Die Messung der Kennfelder wurde ebenfalls mit jeweils 144 Messpunkten durchgeführt.

Als erstes wird das Berechnungsprogramm anhand der Asynchronmaschine verifiziert. Dafür wird die in Kapitel 4.1 bereits beschriebene 7,5 kW Asynchronmaschine betrachtet. Für diese Maschine wurde ein Verlustkennfeld mit 144 Messpunkten messtechnisch ermittelt. Dieses ist in Bild 39 zu sehen. Als Vergleich wird das berechnete Verlustkennfeld der gleichen 7,5 kW Asynchronmaschine mit 144 Stützpunkten in Bild 40 dargestellt.

Um einen besseren Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Verlustkennfeld ziehen zu können, sind in Bild 41 die Abweichungen der beiden Kennfelder in Watt dargestellt.

Hier ist zu sehen, dass die Abweichungen im Maximum 12 Watt betragen. Zusätzlich wurden noch die prozentualen Abweichungen der jeweiligen Vergleichspunkte berechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 42 zu sehen.

Als Fazit ist zu erkennen, dass nur minimale Abweichungen zwischen gemessenem und berechnetem Verlustkennfeld auftreten. Dieser Vergleich wurde zusätzlich mit einer 3 kW und einer 30 kW Asynchronmaschine durchgeführt. Hier waren die Ergebnisse sehr ähnlich. Aufgrund der Über-

4 Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten

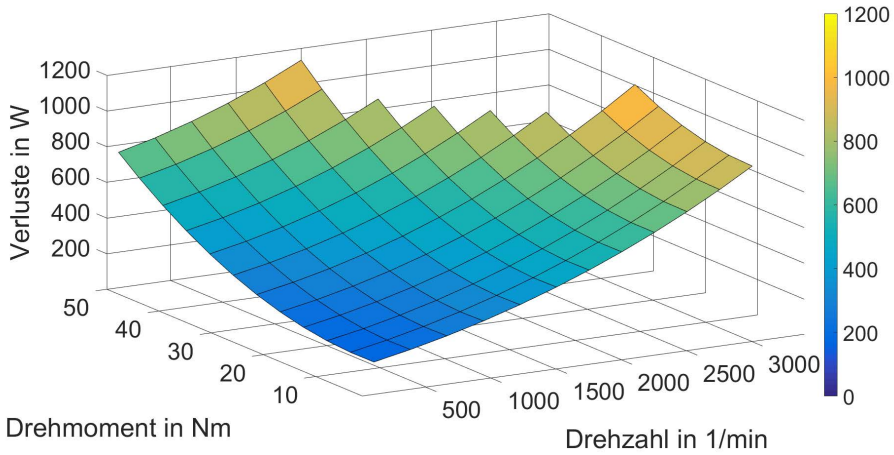


Bild 40: Berechnetes Verlustkennfeld einer 7,5 kW Asynchronmaschine mit 144 Stützpunkten

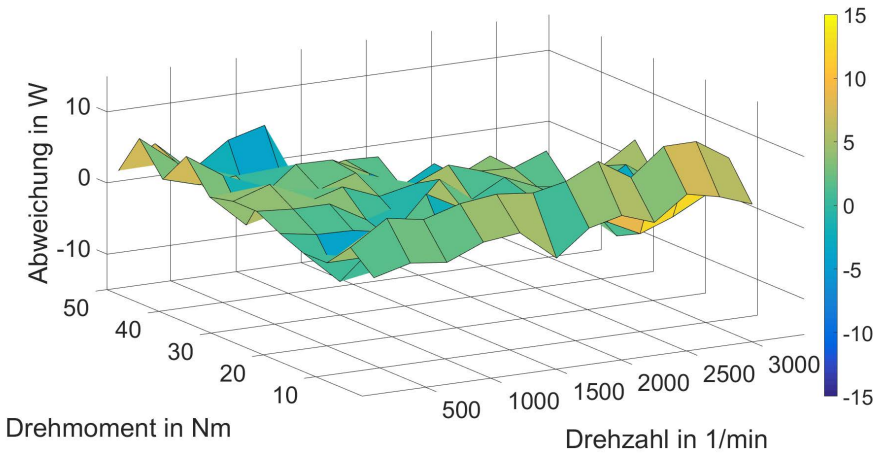


Bild 41: Absolute Abweichungen gemessenes und berechnetes Verlustkennfeld einer 7,5 kW Asynchronmaschine

sichtigkeit wird an dieser Stelle auf die Darstellung dieser Ergebnisse verzichtet.

Analog zur Asynchronmaschine ist nachfolgend die Verifikation des Berechnungsmodells eines Frequenzumrichters dargestellt. Das Vorgehen ist identisch, es wird wieder ein gemessenes mit einem berechneten Verlustkennfeld verglichen. Die Simulation wurde zum besseren Vergleich

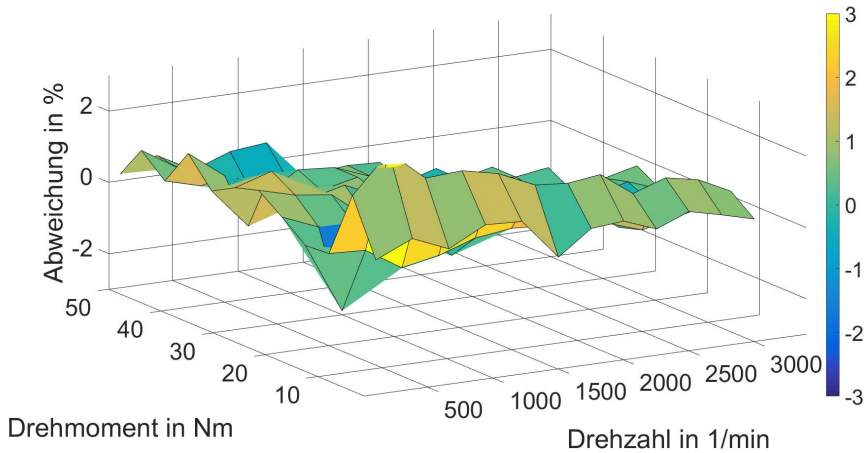


Bild 42: Prozentuale Abweichungen gemessenes und berechnetes Verlustkennfeld einer 7,5 kW Asynchronmaschine

wieder mit der gleichen Anzahl an Stützpunkten wie das gemessene Verlustkennfeld Messpunkte aufweist durchgeführt. Untersucht wurde ein Frequenzumrichter mit einer Leistung von 7,5 kW, die Taktfrequenz wurde für den Vergleich auf 8 kHz eingestellt. Bild 43 zeigt das gemessene Verlustkennfeld und Bild 44 das berechnete Verlustkennfeld nach den im Kapitel 3.2 dargestellten Berechnungsmethoden des identischen Frequenzumrichters mit einer aktiven Netzgleichrichtung.

Einen Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Verlustkennfeld stellt Bild 45 dar. Die Abweichung der Kennfelder wird hier in Watt dargestellt. Die Messung bildet dabei die Referenz für die Darstellung.

Die Abweichung beträgt maximal 13 Watt. Zudem wurde in Bild 46 noch die prozentuale Abweichung dargestellt.

Es treten nur geringe Abweichungen zwischen gemessenem und berechnetem Verlustkennfeld auf. Der hier dargestellte Vergleich wurde in gleicher Weise mit einem 3 kW und einem 30 kW Frequenzumrichter durchgeführt. Diese Ergebnisse waren sehr ähnlich, weshalb aufgrund der Übersichtlichkeit an dieser Stelle auf die Darstellung verzichtet wird. Als Fazit lässt sich sagen, dass die Berechnung sehr gut mit den Messungen übereinstimmen, weshalb das Berechnungsprogramm für den betrachteten Leistungsbereich als gültig betrachtet werden kann.

4 Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten

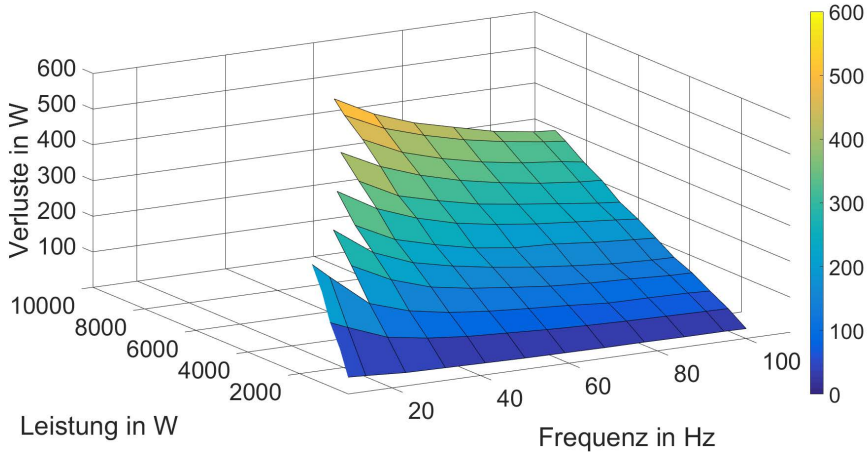


Bild 43: Gemessenes Verlustkennfeld eines 7,5 kW Frequenzumrichters mit 144 Messpunkten

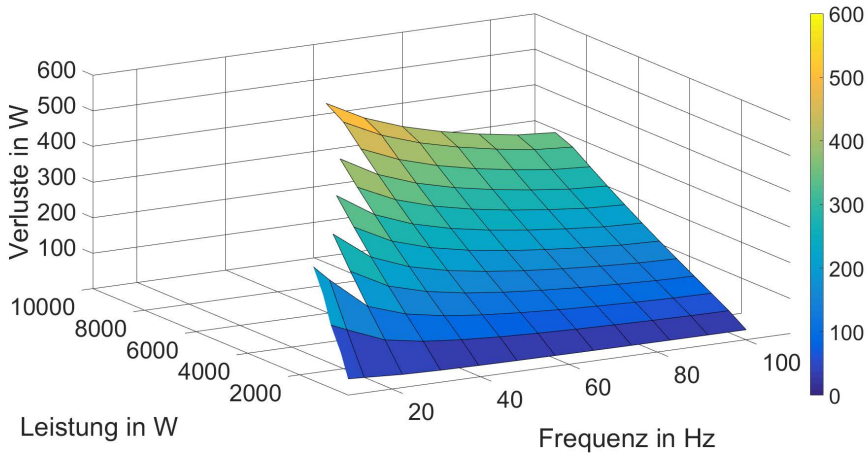


Bild 44: Berechnetes Verlustkennfeld eines 7,5 kW Frequenzumrichters mit 144 Stützpunkten

Sowohl beim Batteriespeichersystem als auch beim Supercap-Speicher ist die Verifikation der Modelle deutlich schwieriger, da die Verluste nicht direkt elektrisch gemessen werden können. Es gibt die Möglichkeit die Verluste über die entstehende Abwärme zu ermitteln oder über einen Energievergleich von zugeführter und abgegebener Energie. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Methode über den Energievergleich durchgeführt.

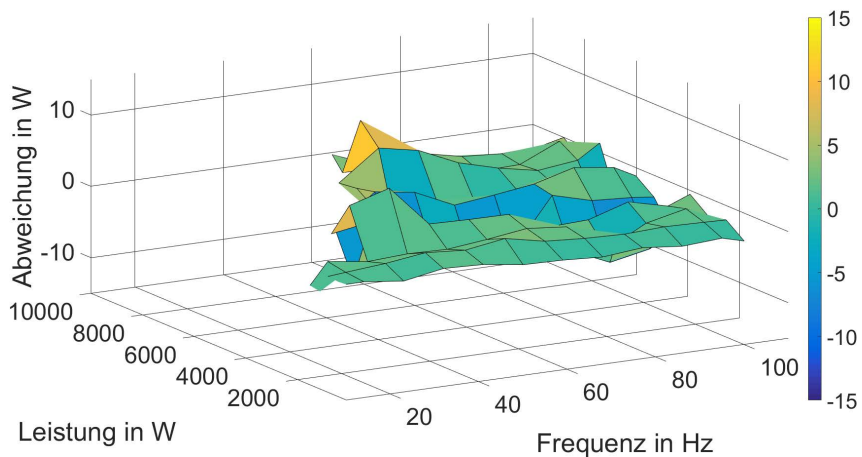


Bild 45: Absolute Abweichungen gemessenes und berechnetes Verlustkennfeld eines 7,5 kW Frequenzumrichters

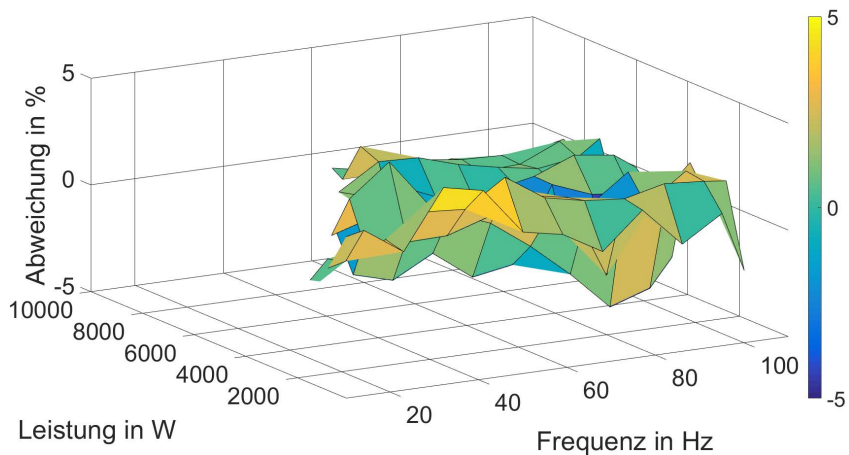


Bild 46: Prozentuale Abweichungen gemessenes und berechnetes Verlustkennfeld eines 7,5 kW Frequenzumrichters

Die Speichersysteme wurden dazu definiert geladen und wieder entladen. Sowohl beim Laden als auch beim Entladen wurde die Leistung gemessen und über den Zeitbezug die Energie errechnet. Durch die Differenz der Energie konnten somit die Verluste bestimmt werden.

4 Berechnung von Verlustkoeffizienten der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten

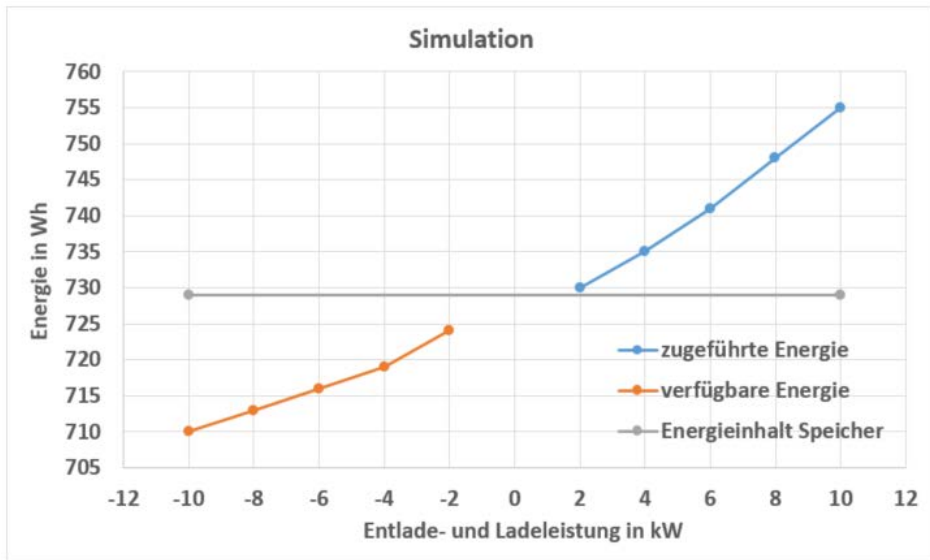


Bild 47: Energievergleich der Simulation verschiedener Lade- und Entladezyklen eines Supercap-Speichers

Das in Kapitel 4.4 beschriebene Speichersystem aus Supercaps wurde mit fünf verschiedenen Leistungen geladen und wieder entladen. Der Nennenergieinhalt des Supercap-Speichers beträgt 729 Wh. Die simulierten zugeführten und die wieder abgegebenen Energien sind in Bild 47 dargestellt.

Für die gleichen Betriebspunkte wurden die oben beschriebenen Messungen durchgeführt. Die zugeführten und wieder abgegebenen Energien der Messung sind in Bild 48 zu sehen.

In den beiden obenstehenden Abbildungen ist zu sehen, dass die Verluste, wie auch im Rechenmodell bereits beschrieben, mit zunehmender Leistung größer werden. Der Vergleich zwischen Simulation und Messung ist in Bild 49 als Abweichung zwischen den Werten dargestellt.

Die Abweichung der Messung gegenüber der Simulation betrug dabei über den gesamten Ladebereich weniger als drei Prozent. Somit können auch die Modelle der Supercap-Speicher, für diese Berechnung, als verifiziert angesehen werden.

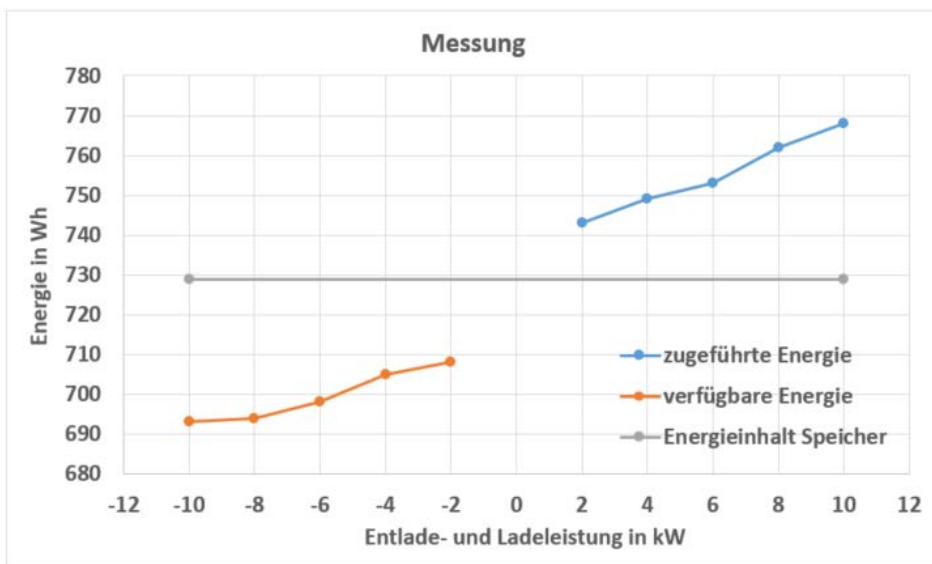


Bild 48: Energievergleich der Messung verschiedener Lade- und Entladezyklen eines Supercap-Speichers

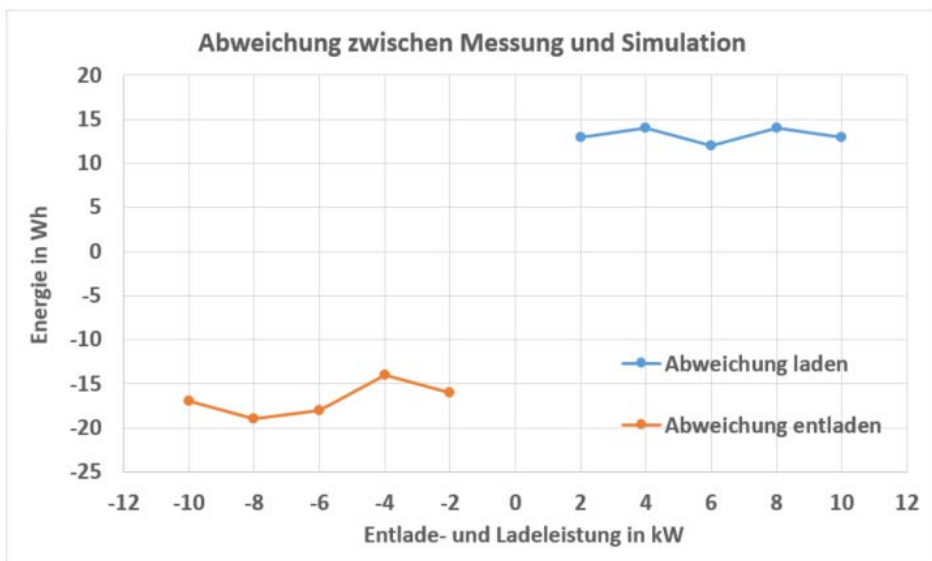


Bild 49: Vergleich zwischen Simulation und Messung der Verluste in einem Supercap-Speicher

4 Berechnung von Verlustkennfeldern der verschiedenen Komponenten anhand von Datenblattwerten

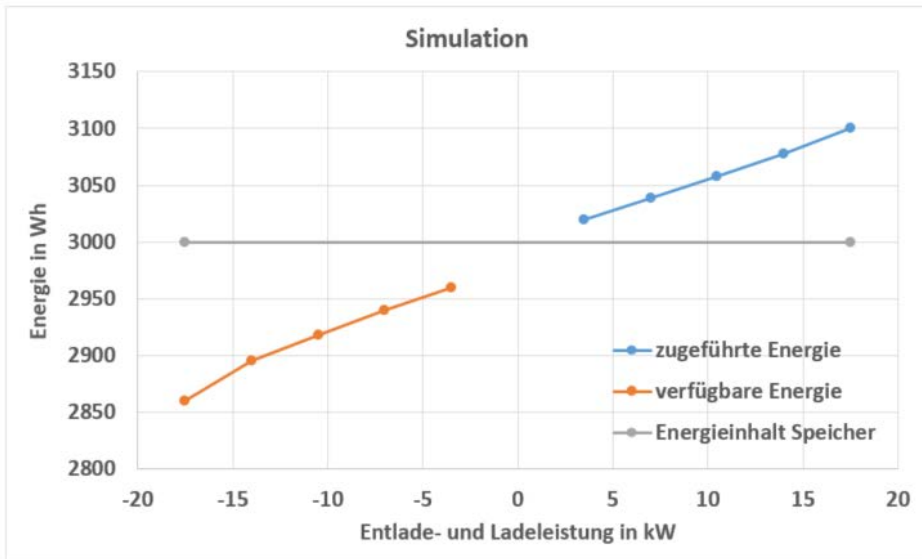


Bild 50: Energievergleich der Simulation verschiedener Lade- und Entladezyklen eines Akkumulator-Speichers

Das in Kapitel 4.5 beschriebene Speichersystem aus Akkumulatoren wurde mit fünf verschiedenen Leistungen geladen und wieder entladen. Der Nennenergieinhalt des Akkumulator-Speichers beträgt 3000 Wh. Die simulierten zugeführten und die wieder abgegebenen Energien sind in Bild 50 dargestellt.

Für den Betriebspunkt an dem die Simulationen durchgeführt wurden, wurde auch wieder eine Messreihe durchgeführt. Die zugeführten und wieder abgegebenen Energien der Messung sind in Bild 51 zu sehen.

Wie zu erwarten war, ist in den beiden obenstehenden Abbildungen zu sehen, dass die Verluste mit zunehmender Leistung größer werden. Der Vergleich zwischen Simulation und Messung ist in Bild 52 als Abweichung zwischen den Werten dargestellt.

Die Abweichung der Messung gegenüber der Simulation betrug dabei über den gesamten Betriebsbereich weniger als zwei Prozent. Somit können auch die Modelle der Akkumulator-Speicher als verifiziert angesehen werden.

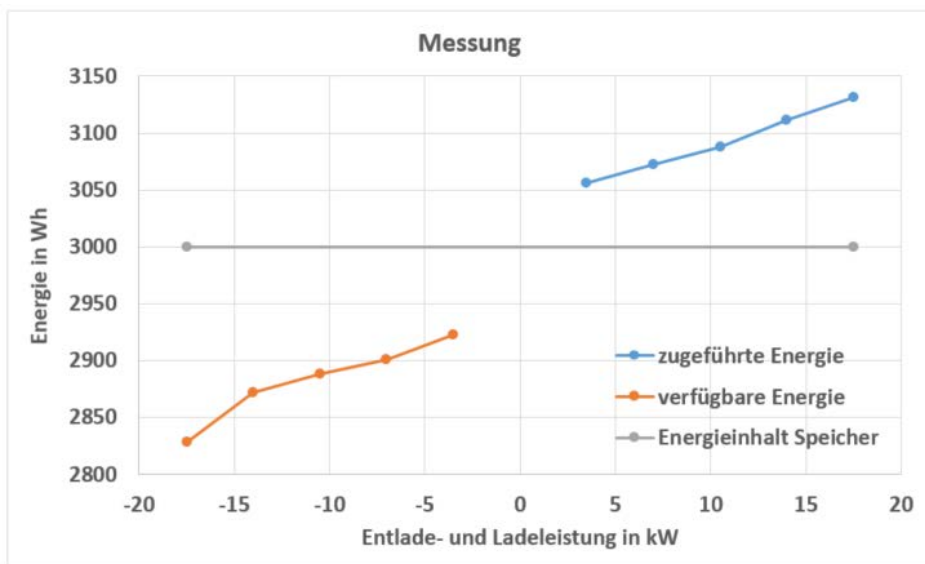


Bild 51: Energievergleich der Messung verschiedener Lade- und Entladezyklen eines Akkumulator-Speichers

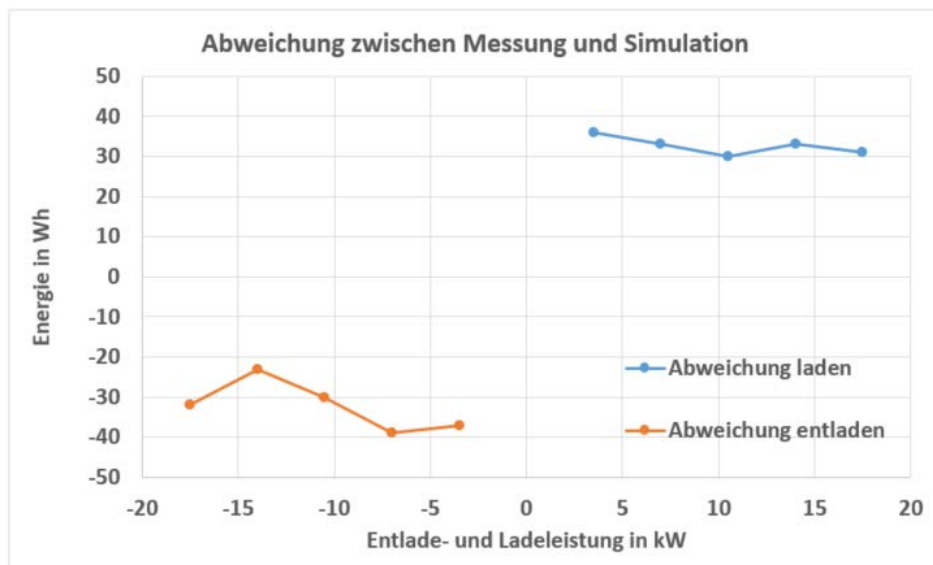


Bild 52: Vergleich zwischen Simulation und Messung der Verluste in einem Akkumulator-Speicher

5 Berechnung der Energieeffizienz anhand von Fahrprofilen

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Energieeffizienz von Systemen nicht wie im industriellen Umfeld üblich an einzelnen Arbeitspunkten bestimmt, sondern über definierte und für die jeweilige Anwendung typische Fahrprofile. Diese Fahrprofile werden von der Anwendung her in Drehzahl und Drehmoment vorgegeben, so dass die Vorgabe der Anforderung des Arbeitsprozesses entspricht. Wenn ein Getriebe im Antriebsstrang enthalten ist, entspricht die Vorgabe den Ausgangswerten des Getriebes. Wenn kein Getriebe eingesetzt wird, der Ausgangswerte der elektrischen Maschine.

5.1 Fahrprofilvorgaben

Als Vorgabe für die Berechnung der Energieeffizienz beziehungsweise des Energieverbrauchs über einen gesamten Fahrzyklus kann das Drehzahl-Drehmoment-Profil der Anwendung vorgegeben werden. Das vorgegebene Profil kann sich über alle vier Quadranten erstrecken und somit sowohl positive und negative Drehzahlen, sowie auch positive und negative Drehmomente enthalten. Dadurch ist es möglich alle Arten von Bewegungen, welche von einem mechatronischen Antriebssystem ausgeführt werden können, zu betrachten. In Bild 53 ist beispielhaft ein Fahrprofil zur Berechnung der Verluste eines mechatronischen Antriebssystems dargestellt.

Wie zu sehen ist, erstreckt sich das Fahrprofil über eine Zeit von 60 min. In den Betriebsbereichen der Konstant Fahrt (konstantes Drehmoment bei konstanter Drehzahl) wird die benötigte Leistung des Systems nur einmal berechnet und dann mit der entsprechenden Dauer des Betriebspunktes zur benötigten Energie multipliziert. In den Bereichen der Beschleunigung oder Abbremsung, in welchen sich entweder die Drehzahl oder das Drehmoment ändern, wird die Schrittweite zur Berechnung der benötigten Leistung der Problemstellung angepasst, um eine hinreichend genaue und zügige Effizienzberechnung durchführen zu können. Dadurch können verschiedene Brems- und Beschleunigungsgeschwindigkeiten oder auch Arten von Brems- und Beschleunigungsrampen miteinander verglichen werden. Die Betrachtung der Auswirkung von Brems- und Beschleunigungsrampen kann auch separat ohne die Kenntnis des kompletten Fahrprofils durchgeführt werden. Aus Abbildung 5-1 sind die Brems- und Beschleunigungs-

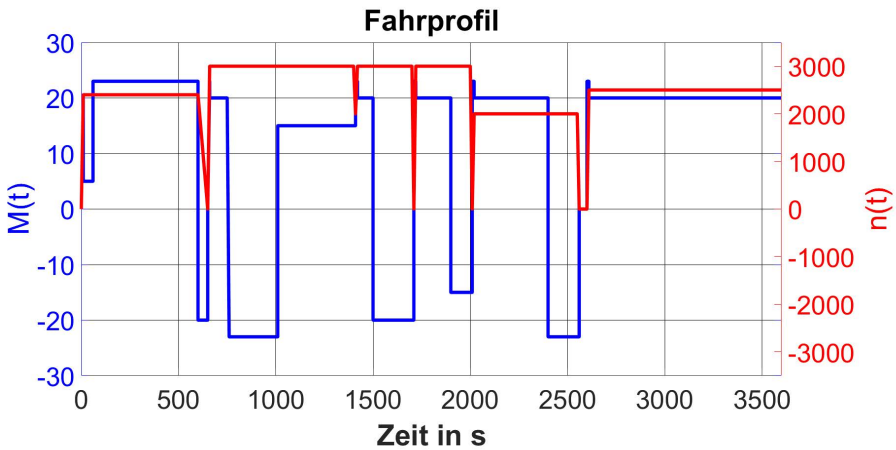


Bild 53: Vorgabe eines Fahrprofils zur Verlustberechnung eines Antriebssystems

rampen nicht immer aufgrund der zeitlichen Auflösung der Abbildung ersichtlich. Im Simulationsprogramm werden diese Rampen aber korrekt hinterlegt und korrekt im Energieumsatz berücksichtigt.

Aus den Drehzahl- und Drehmomentanforderungen des Fahrprofils kann das Simulationsprogramm neben der energetischen Simulation durch eine automatisierte Auswahl an geeigneten Motoren und Umrichter die Auslegung von Antriebssystemen unterstützen. Dazu wird geprüft welche der hinterlegten Motoren und Umrichter den geforderten Leistungs- beziehungsweise Drehzahl- und Drehmomentanforderungen entsprechen. Zudem wird errechnet ob der Einsatz eines Getriebes einen energetischen Vorteil bringen kann. In weiteren Auswahlfeldern kann der Nutzer angeben, ob eine Energierückspeisung von möglicher Bremsenergie in das Versorgungsnetz mit eingerechnet werden soll oder dies ausgeschlossen ist. Um eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchführen zu können, ist es notwendig, dass der Nutzer die Betriebsstunden des Systems pro Jahr oder eines anderen sinnvollen Bezugszeitraums spezifiziert. Der Algorithmus des Programms ist zudem so angelegt, dass errechnet werden kann, ob der Einsatz von höherwertigen Komponenten über die Betriebsdauer einen wirtschaftlichen Vorteil bringt oder ob der Energieverbrauch hier eine untergeordnete Rolle spielt. Hier besteht zum Beispiel die Möglichkeit des Einsatzes von IE₃ Motoren gegenüber dem Einsatz von IE₂ Motoren. Des Weiteren kann bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, wenn der Anwender dies wünscht, auch berechnet werden, ob sich der Einsatz von Rückspeiseeinheiten rechnet, beziehungsweise welche Amortisationszei-

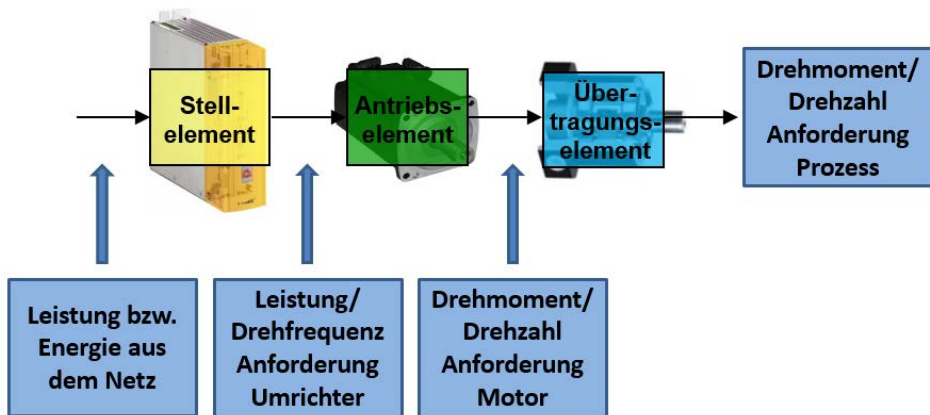


Bild 54: Aufbau eines mechatronischen Antriebsstrangs mit Drehzahl-/Drehmomentanforderung des Arbeitsprozesses

ten hier vorliegen. Allerdings muss erwähnt werden, dass im Berechnungsprogramm keine Zinseffekte oder steuerliche Aspekte berücksichtigt werden. Eine Programmerweiterung dahingehend wäre denkbar, wurde aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt.

Ausgehend von den Drehzahl- und Drehmomentanforderungen der Anwendung rechnet das Programm rückwärts bis zu der Energie, welche aus dem Energieversorgungsnetz aufgenommen werden muss. Bild 54 zeigt vereinfacht dargestellt den Aufbau eines zu berechnenden mechatronischen Antriebsstrangs mit Drehzahl-/Drehmomentanforderung des Arbeitsprozesses.

In der Abbildung ist zu erkennen, dass wie beschrieben die Drehzahl-/Drehmoment-Anforderung des Arbeitsprozesses in das Modell eingespeist wird. Diese Werte stellen die Abgabeparameter eines möglichen Getriebes oder wenn kein Getriebe vorhanden ist die Abgabeparameter des Motors dar. Im Anwendungsfall mit Getriebe werden aus diesen Werten die Verluste im Getriebe berechnet und aus den somit bekannten Verlusten und den Drehzahl-/Drehmomentanforderungen des Prozesses können die notwendigen Werte für die Drehzahl-/Drehmomentabgabe des Motors berechnet werden. Eine ähnliche Berechnungsmethode wird anschließend für den Motor durchgeführt. Auch hier werden aus dem abzugebenden Drehmoment und der Drehzahl die im Motor entstehenden Verluste berechnet. Als Eingang in den Motor werden die Leistung und die erforderliche Drehfrequenz errechnet. Dies beinhaltet entsprechend auch die im Motor entstehenden Verluste. Aus den Eingangsparametern des Motors,

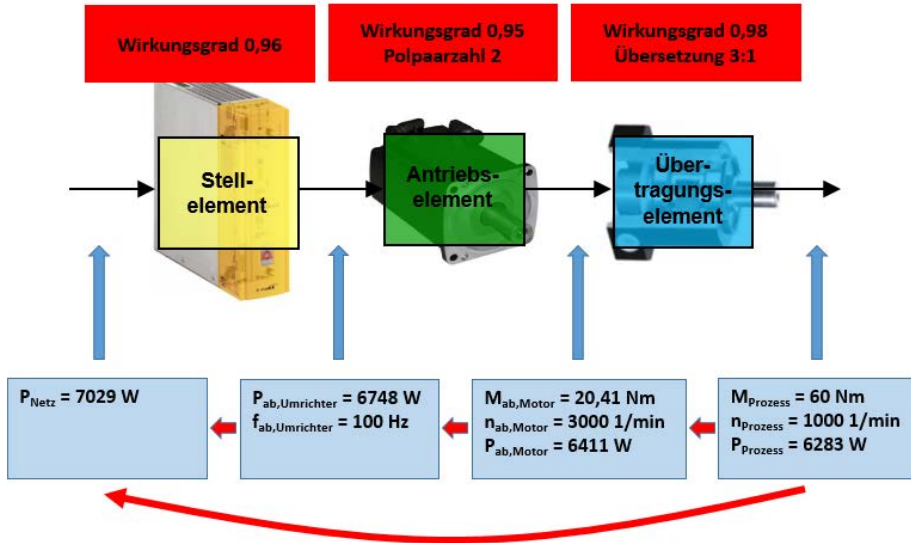


Bild 55: Beispiel der Berechnungskette der Leistung beziehungsweise des Energieflusses eines Antriebssystems an einem beispielhaften Arbeitspunkt

welche wiederum die Ausgangsparameter des Frequenzumrichters sind, werden dann wiederum die Verluste im Frequenzumrichter errechnet und somit die notwendige Eingangsleistung in den Frequenzumrichter. In Bild 55 ist die hier beschriebene Rechnung exemplarisch an einem beispielhaften Arbeitspunkt über ein komplettes Antriebssystem dargestellt.

Durch diese Maßnahme kann beginnend vom Anwendungsprozess die komplette Energiekette abgebildet werden und es können verschiedenste Varianten von Komponenten durchgerechnet werden. Eine derartige stufenweise Rechnung ist unumgänglich, da zum Beispiel Motoren mit verschiedenen Polpaarzahlen eingesetzt werden können und sich somit die Ausgangsfrequenz des Frequenzumrichters ändert oder auch andere Getriebeübersetzungen, was zu einer Änderung der Verluste im System führt.

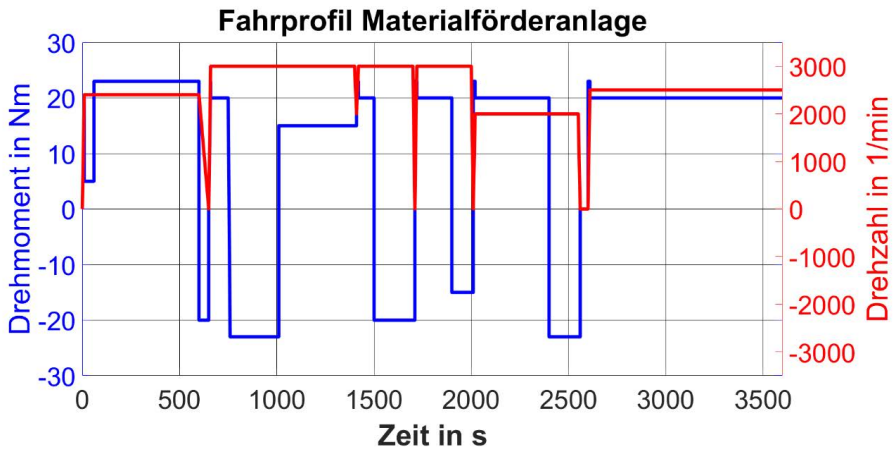


Bild 56: Fahrprofil einer Materialförderanlage über einen Zeitraum von 60 Minuten

5.2 Berechnungsergebnisse anhand einer realen Materialförderanlage

Als erstes Berechnungsbeispiel wird eine Materialförderanlage herangezogen. Dabei handelt es sich um eine reale Anlage zu der auch Messungen des Energieverbrauchs vorliegen. Das Fahrprofil erstreckt sich über 60 Minuten und beinhaltet sowohl Beschleunigungs-, Brems- und Konstantfahrtbereiche. Für die Berechnung wird, wie in der realen Anlage auch, mit einem Antriebssystem ohne Getriebe gerechnet. Bild 56 stellt das gewählte und vermessene Fahrprofil dar.

Bei der hier analysierten Materialförderanlage handelt es sich um ein Regalbediengerät. Von diesem wird exemplarisch einer der beiden unteren Fahrmotoren betrachtet. Bild 57 zeigt links ein Foto und rechts eine Skizze des Regalbediengerätes. Die wesentlichen Daten des Regalbediengerätes sind im Anhang zu finden.

Anhand des gewählten Fahrprofils werden der Energieverbrauch und somit die entstehenden Verluste, wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, berechnet. Diese Rückwärtsberechnung wurde zum einen mit dem in der realen Anlage eingesetzten zweipoligen Motor durchgeführt und als Varianz auch nochmal mit einem vierpoligen Motor. Dadurch entstehen zwei unterschiedliche notwendige Ausgangsparameter für den Frequenzumrichter. Dies liegt zum einen daran, dass die Frequenz der Grunddrehzahl für den Motor beim vierpoligen Motor doppelt so groß sein muss wie beim

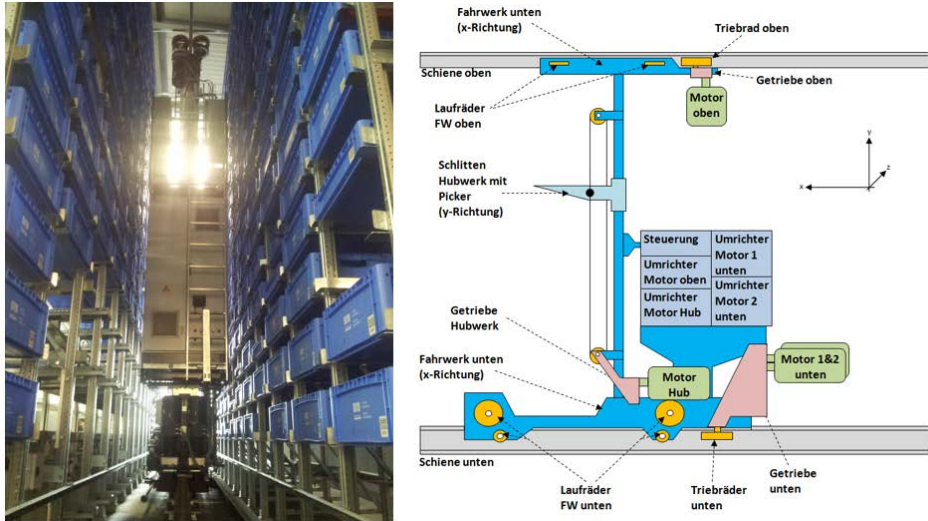


Bild 57: Foto (links) und Skizze (rechts) eines Regalbediengerätes

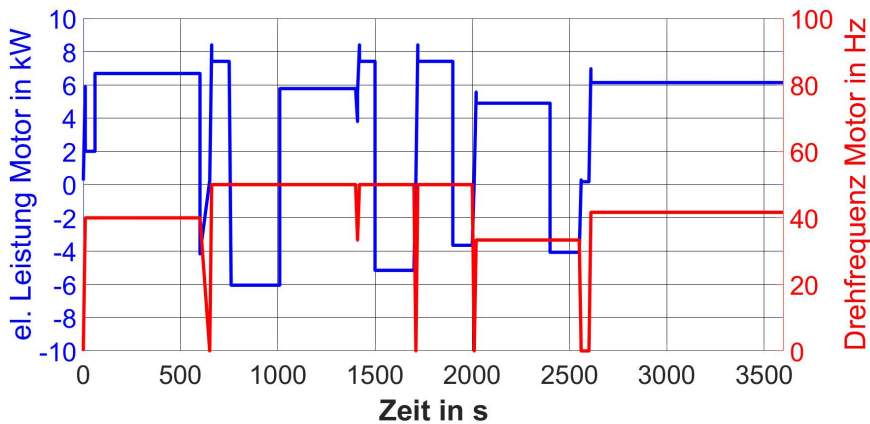


Bild 58: Elektrische Leistung und Drehfrequenzbewertung für den zweipoligen Motor

zweipoligen Motor und zum anderen daran, dass die Verluste der beiden Motoren leicht unterschiedlich sind. Bild 58 zeigt die notwendige Leistung und die Drehfrequenz, welche vom Umrichter für den zweipoligen Motor ausgegeben werden muss. Bild 59 zeigt die notwendige Leistung und Drehfrequenz für den vierpoligen Motor.

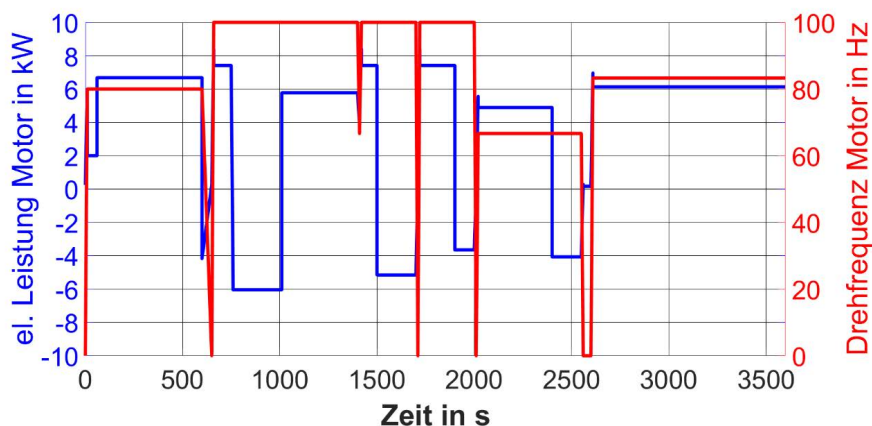


Bild 59: Elektrische Leistung und Drehfrequenzbewertung für den vierpoligen Motor

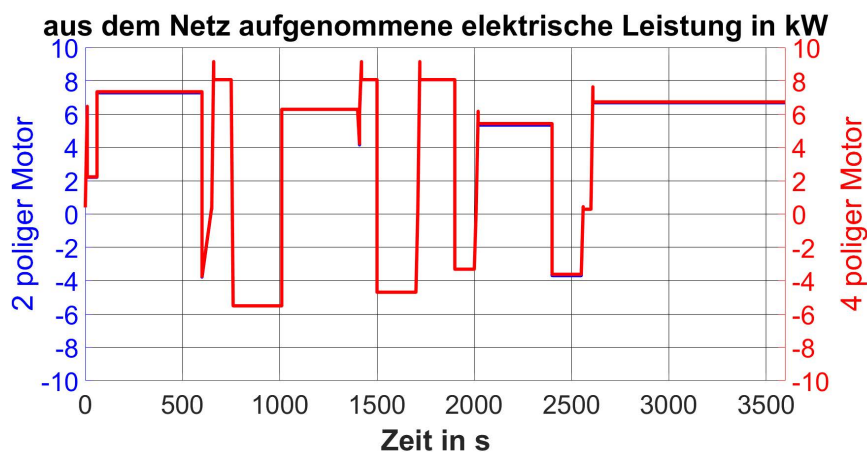


Bild 60: Aufgenommene Netzleistung aus dem Netz bei zwei- und vierpoligem Motor

Durch die Unterschiede in der Drehfrequenz und den Abweichungen der Effizienz der verschiedenen Motoren ist die Leistung, welche aus dem Netz aufgenommen werden muss, ebenfalls leicht unterschiedlich. Bild 60 zeigt die aufgenommene Leistung aus dem Netz beim Einsatz sowohl für den zweipoligen als auch für den vierpoligen Motor. Die Unterschiede sind in diesem Beispiel so gering, dass es kaum zu sehen ist.

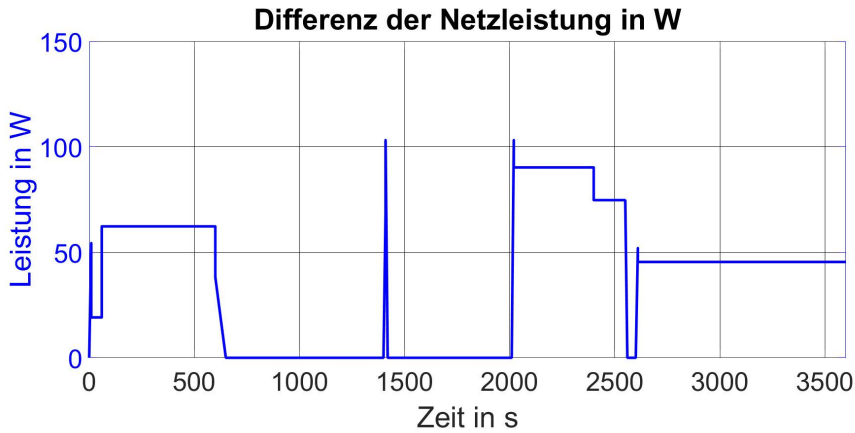


Bild 61: Vergleich der Netzleistung zwischen zweipoligem und vierpoligem Motor ($P_{\text{Differenz}} = P_{\text{vierpolig}} - P_{\text{zweipolig}}$)

Um die Unterschiede besser darstellen zu können, zeigt Bild 61 die Abweichung der aufgenommenen Leistung des Systems einmal mit einem zweipoligen Motor und einmal mit einem vierpoligen Motor. Dabei ist der in der realen Anlage im Einsatz befindliche zweipolige Motor als Referenz dargestellt und der vierpolige Motor zeigt die Abweichung dazu. Somit ist in der Abbildung $P_{\text{vierpolig}} - P_{\text{zweipolig}}$ zu sehen.

Wie hier zu sehen ist, sind die Unterschiede der Netzleistung nur sehr gering, daher ist der Unterschied der aus dem Netz aufgenommenen Leistung auch sehr gering. Beim vierpoligen Motor wurden 4,25 kWh und beim zweipoligen Motor 4,20 kWh aus dem Netz aufgenommen. Daraus ist zu erkennen, dass bei dem gewählten Fahrprofil die Polzahl des Motors nur eine untergeordnete Rolle spielt. Daher wird im Folgenden das Antriebssystem mit dem vierpoligen Motor betrachtet.

Eine deutlich entscheidendere Rolle im Hinblick auf die Energieeffizienz des hier dargestellten Systems, spielt die Tatsache ob die Antriebseinheit mit oder ohne Rückspeiseeinheit ausgeführt ist. Rückspeiseeinheit in einem Antriebssystem bedeutet, dass auftretende Bremsenergie ins Stromnetz zurück gespeist wird. Dadurch kann die als Bilanzsumme aufgenommene Energie aus dem Stromnetz je nach Anwendung deutlich reduziert werden. Ist ein Antriebssystem ohne Rückspeiseeinheit ausgeführt und soll dennoch elektrisch gebremst werden, muss die auftretende Bremsenergie in Widerständen in Wärme umgesetzt werden. Somit wird die Energieaufnahme aus dem Netz deutlich erhöht. Für eine Energierückspeisung

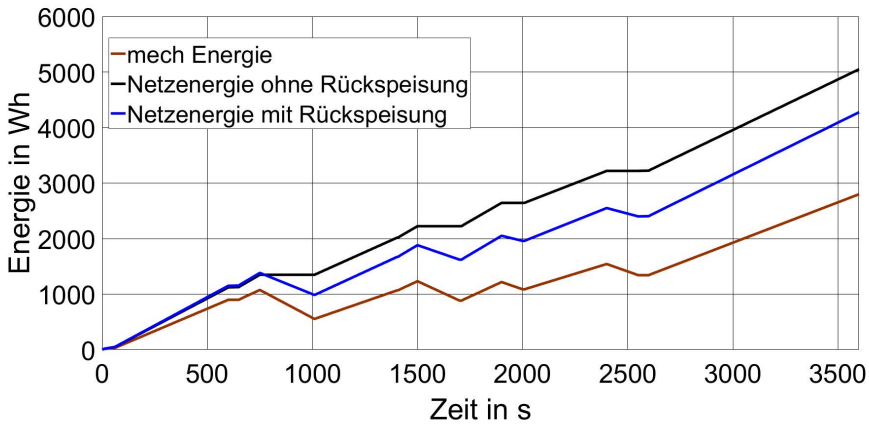


Bild 62: Vergleich der aus dem Netz bezogenen Energie mit und ohne Rückspeisung, sowie der mechanischen Energie einer Förderanlage

ins Stromnetz wiederum wird aber eine aktive Gleichrichtereinheit benötigt. Diese ist in der Effizienz allerdings etwas schlechter als passive Gleichrichter wie in Kapitel 4.3 dargestellt.

Der Einsatz einer Rückspeiseeinheit ist natürlich mit zusätzlichen Investitionskosten verbunden, daher wurde im Rahmen dieser Arbeit auch eine wirtschaftliche Betrachtung zum Einsatz einer solchen Einheit durchgeführt. Generell lässt sich feststellen, dass es entscheidend von der Kenntnis des Fahrprofils abhängt um beurteilen zu können, ob der Einsatz einer Rückspeiseeinheit wirtschaftlich sinnvoll ist.

Wie bereits geschrieben, kann eine Rückspeiseeinheit die als Bilanz aufgenommene Energie eines Antriebssystems deutlich reduzieren. Als Bilanz aufgenommen deshalb, weil nicht weniger Energie aufgenommen wird, sondern lediglich ein Teil der Energie wieder ins Netz zurück gespeist wird. Für das in Bild 55 dargestellte Fahrprofil sinkt die Energieaufnahme beim Einsatz einer Rückspeiseeinheit um 20 Prozent. Bild 62 stellt diesen Effekt graphisch dar. Dabei ist sowohl die mechanische Energie als auch die elektrische Energie mit und ohne Rückspeiseeinheit dargestellt.

Zur Veranschaulichung werden die für die verschiedenen Betriebsfälle aus dem Netz zu beziehenden Energien in der nachfolgenden Tabelle 22 dargestellt. Genauso wird auch die mögliche Energieeinsparung durch die Rückspeiseeinheit dargestellt.

Tabelle 22: Zusammenfassende Darstellung der benötigten Energie des Beispiels Regalbediengerät

	Energie aus dem Netz	Energieeinsparung in Prozent
Netzenergie ohne Rückspeiseeinheit	5030 Wh	
Netzenergie mit Rückspeiseeinheit	4250 Wh	15,5 %

Die Differenz von mechanischer Energie zu elektrischer Energie mit Rückspeiseeinheit repräsentiert die in der Antriebseinheit auftretenden Verluste. Die Differenz zwischen aufgenommener elektrischer Energie mit und ohne Rückspeiseeinheit stellt die Energie dar, welche, wenn keine Rückspeiseeinheit zum Einsatz kommt, beim Bremsen des Systems in der entsprechenden Vorrichtung in Wärme umgesetzt werden muss.

5.3 Evaluierung der Berechnungen anhand von Messungen

Im Folgenden werden die Berechnungen aus den vorangegangenen Kapiteln anhand von Messungen an der beschriebenen Materialförderanlage evaluiert. Dazu wurde die aufgenommene Energie der Materialförderanlage mit einem Energiezähler mit einer Genauigkeit von 0,5 % gemessen. Die Messung wurde dreimal für die Variante ohne Rückspeiseeinheit und dreimal für die Variante mit Rückspeiseeinheit durchgeführt. Es wurde dabei jeweils das Fahrprofil aus Abbildung 5-4 abgefahren. Anschließend wurde für jede der beiden Varianten der Mittelwert der aufgenommenen Energie ermittelt. Die Streuung der Messwerte über die drei Versuchsläufe betrug dabei 0,8 %. Die folgende Tabelle 23 zeigt den Vergleich der aufgenommenen Energie zwischen Messung und Berechnung des Regalbediengerätes.

Tabelle 23: Vergleich der aufgenommenen Energie zwischen Messung und Berechnung (Simulation) des Regalbediengeräts

	Energie aus dem Netz (Berechnung)	Energie aus dem Netz (Messung)	Abweichung
Netzenergie ohne Rückspeiseeinheit	5030 Wh	4953 Wh	+ 1,6 Prozent
Netzenergie mit Rückspeiseeinheit	4250 Wh	4172 Wh	+ 1,9 Prozent

6 Energieeinsparung durch Integration von Kurzzeitspeichern in Antriebssysteme

Die Integration von Kurzzeitspeichern direkt ins Antriebssystem ist neben der optimalen Auslegung der Antriebssysteme der zweite wichtige Hebel um Energieeinsparungen zu ermöglichen. Als direkte Integration ist hier die Einbindung von Speichern in den Zwischenkreis des Antriebsumrichters bezeichnet. Um einen möglichst großen Spannungsbereich des Kurzzeitspeichers (Doppelschichtkondensatoren) nutzen zu können und zudem eine optimale Auslegung des Speichers zu erreichen, wird die Anbindung mit Hilfe eines Gleichspannungswandlers realisiert. Bild 63 zeigt den prinzipiellen Aufbau des entwickelten Speichersystems für Antriebseinheiten. Vor allem bei Antriebssystemen die nicht kontinuierlich betrieben werden und bei denen Lasten abgebremst werden müssen, kann dieses System Anwendung finden. Als Beispiele sind hier Aufzüge oder auch Fördereinrichtungen zu nennen. Das System kann sowohl in neuen Antriebssystemen integriert werden, kann aber auch problemlos in bestehende Systeme nachgerüstet werden. Den Kern bildet eine Speichereinheit in der die beim Bremsen anfallende Rückspeiseenergie gespeichert werden kann. Diese gespeicherte Energie kann dann beim nächsten Beschleunigungszyklus wiederverwendet werden. Als Energiespeicher können sowohl jegliche Form von Akkumulatoren als auch Kondensatoren, hier vor allem Supercaps, dienen. Durch einen Gleichspannungswandler zwischen dem Antriebssystem und der Speichereinheit wird erreicht, dass die Spannung am Energiespeicher geregelt werden kann, was dazu führt, dass der Speicher effektiver genutzt werden kann als bei einer direkten Kopplung an den Zwischenkreis des Umrichters.

6.1 Potentialabschätzung der Speicherung im Antriebssystem

Um die Energieeffizienz von Antriebssystemen zu erhöhen liegt großes Potential in der Nutzung der zwangsläufig auftretenden Rückspeiseenergie, was im technischen Bereich unter dem Begriff Rekuperation [77], [78] behandelt wird. Im Prinzip führt jede Verwendung von Elektromotoren mit nicht konstanten Bewegungsabläufen zum Auftreten von generatorischer Energie, welche in Kombination mit einem Frequenzumrichter in dessen Zwischenkreis geladen wird. Rückspeiseenergie tritt auf, wenn ein Elektromotor nicht in motorischer, sondern in generatorischer Betriebs-

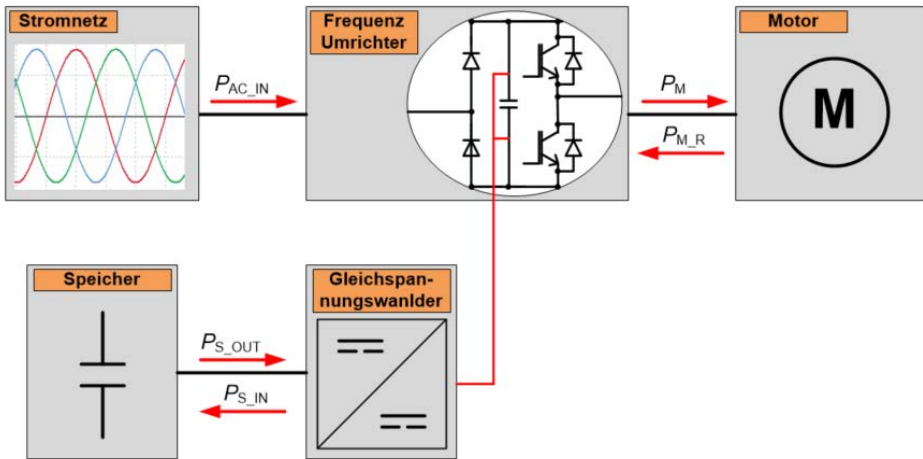


Bild 63: Übersichtsschaltbild des Energiespeichersystems in der Antriebseinheit

weise betrieben wird. Diese Umwandlung zwischen motorischer und generatorischer Betriebsweise kann bei periodischen Betriebsmodi, wie Start-Stopp-Fahrten oder das Heben und Senken von Lasten, permanent wechseln. In der Literatur wird häufig das Beispiel eines Personenaufzugs zur Verdeutlichung des Wechsels zwischen diesen beiden Betriebsweisen herangezogen [79], [80]. Bild 64 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines seilangetriebenen Aufzugs. Dabei ist die Personenkabine mit der Masse m_1 über einen Elektromotor M und einer Umlenkrolle mit einem Gegengewicht der Masse m_2 verbunden. Als Fahrtrichtung ist eine Auf- und Abwärtsbewegung in vertikaler Richtung möglich. Zur Beförderung stehen eine variable, aber durch den Bauraum limitierte, Anzahl an Personen mit der Masse m_p bereit.

Da die Anzahl der zu befördernden Personen sehr stark variieren kann, wird das Gegengewicht üblicherweise auf das Leergewicht der Aufzugskabine m_1 plus die halbe zulässige Beladung m_{p_MAX} durch Personen oder Güter ausgelegt [81]. Ist nun das Gewicht der Kabine mit den Personen größer als das Gegengewicht muss bei der Aufwärtsfahrt Energie aufgewendet werden, welche die Differenz dieses Gleichgewichts sowie alle Reibungen ausgleicht. Der Antrieb ist dabei in motorischer Betriebsweise.

Bei der Abwärtsfahrt hingegen wird aufgrund der potentiellen Energie die Kabine beschleunigt. Der Elektromotor wird dabei nur für mögliche Brems- und Beschleunigungsvorgänge oder Geschwindigkeitslimitierungen eingesetzt. Diese Abwärtsbewegung wandelt somit potentielle Energie

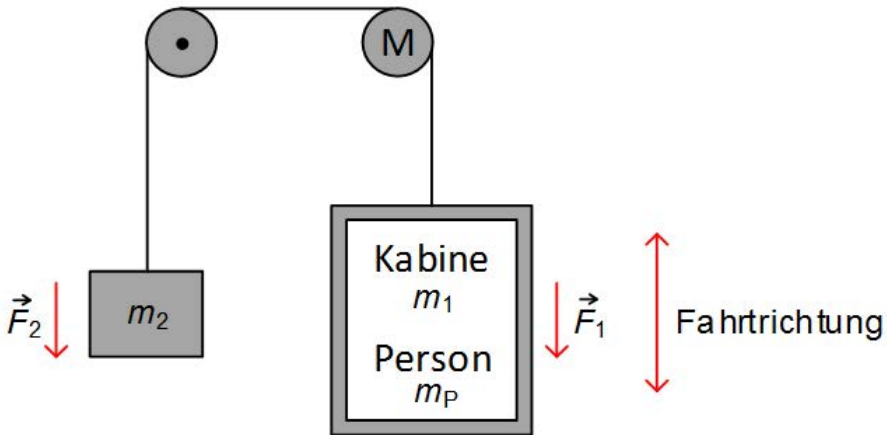


Bild 64: Prinzipdarstellung eines Aufzuges

in elektrische Energie um, womit der Motor in generatorischer Betriebsweise betrieben wird. Wird das Gewicht der Kabine (Leergewicht plus Gewicht der Personen) unter das Gewicht des Gegengewichtes reduziert, dreht sich die Richtung der Betriebsweisen um. Dieses Beispiel zeigt, dass die mögliche Rückspeiseenergie von der potentiellen Energie des Aufzuges, abzüglich der nötigen Energie für Brems- und Geschwindigkeitslimitierung sowie der Reibverluste, abhängt.

Die Potentiale für die Energieeinsparung und somit auch der Kosteneinsparung hängt sehr stark vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Im Prinzip kann die Potentialeinschätzung analog zu den Berechnungen der Rückspeiseenergie bei klassischen Antriebssystemen mit aktiver Netzeinheit durchgeführt werden. Für den Anwendungsfall Aufzug wurden bereits Untersuchungen durchgeführt. Hier wurden vom Aufzugshersteller Schindler AG Energieeinsparungen von 40 % durch die Rekuperation identifiziert [82].

Die potentiellen Einsatzgebiete der Rekuperation beschränken sich aber nicht nur auf das oben genannte Anwendungsbeispiel des Aufzuges. Verschiedenste Einsatzgebiete wie Zentrifugen, Prüfstände, Rolltreppen, Kräne sowie Pressen [83] sind aufgrund ihrer periodischen und nichtkonstanten Bewegungsabläufe denkbar. Mit Blick auf den im Bereich von Elektromotoren erwirtschafteten Umsatz laut ZVEI in den Jahren 2018 sowie 2019 von rund 9 Milliarden Euro [84], erschließt sich großes Potential der Energieeffizienzsteigerung durch das Thema der Rekuperation.

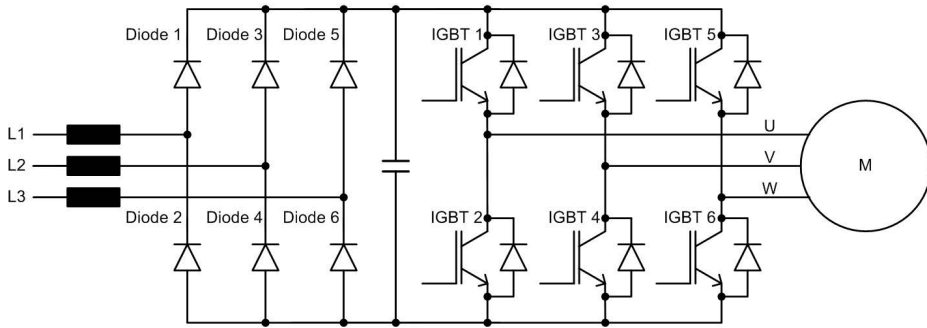


Bild 65: Schaltbild eines Antriebumrichters ohne Rückspeiseeinheit

Unter Rekuperation im industriellen Umfeld versteht man heute die Rückspeisung von Bremsenergie ins Energieversorgungsnetz. Dies wird mit Frequenzumrichtern mit aktiver Gleichrichtung realisiert. Ob diese Form der Rekuperation Anwendung findet, hängt sehr stark vom Einzelfall und der damit verbundenen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ab. Laut [85] kann die Rekuperation bei heutigen Frequenzumrichtern ab einer Leistung von 7,5 kW wirtschaftlich realisiert werden. Dies ist allerdings nur ein durchschnittlicher Wert. Somit muss jedes Antriebssystem bei der Auslegung auch hinsichtlich der Rückspeisung analysiert werden.

Wird bei einem Frequenzumrichter für ein Antriebssystem auf eine aktive Gleichrichtung verzichtet und somit die Möglichkeit der Energierückspeisung in das Energieversorgungsnetz ausgeschlossen, müssen dennoch Maßnahmen getroffen werden um die bei aktiven Bremsvorgängen entstehende Energie aus dem Frequenzumrichter abzuführen. Wäre diese Möglichkeit nicht gegeben, würde die Zwischenkreisspannung ohne Begrenzung ansteigen. Dies hätte eine Zerstörung der Zwischenkreiskondensatoren und der Leistungshalbleiter zur Folge. Als Lösung für das Problem werden üblicherweise Bremschopper eingesetzt. Diese bestehen aus einem Leistungshalbleiter und einem Widerstand. Der Leistungshalbleiter schaltet dabei den Widerstand direkt an den Zwischenkreis des Frequenzumrichters. Dadurch wird die überschüssige Energie in Wärme umgewandelt. Dies bedingt natürlich, dass der Widerstand so dimensioniert werden muss, dass dieser die maximal mögliche auftretende Energie in Wärme umwandeln kann. Bei dieser Methode ist die Energie, welche aus dem mechanischen Teil des Antriebssystems zurückgewonnen wird, nicht weiter nutzbar. Bild 65 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Antriebumrichters für einen Aufzug ohne Rückspeiseeinheit.

An diesem Punkt knüpft die hier beschriebene Entwicklung direkt an. So wurde ein System entwickelt, mit dem es möglich ist die auftretende Rückspeiseenergie auch beim Einsatz eines nicht rückspeisefähigen Frequenzumrichters wieder nutzbar zu machen. Dafür ist ein Energiespeicher notwendig. Im Folgenden wird auf mögliche Energiespeicher für die Anwendung Aufzug oder ähnlich gelagerte Anwendungen näher eingegangen.

Zur beispielhaften Berechnung wird von einem Aufzug mit einer Nutzlast von 2500 kg, was ungefähr 30 Personen entspricht, ausgegangen. Die Aufzugskabine hat dabei eine Leermasse von 750 kg, somit liegt die maximale Gesamtmasse der Aufzugskabine bei 3250 kg. Nach den beschriebenen üblichen Auslegungskriterien für einen Aufzug wird das Gegengewicht mit 2000 kg dimensioniert. Die maximal zu beschleunigende oder abzubremsende Masse im Betrieb beträgt somit 5250 kg. Die bei Konstantfahrt zu bewegendende Masse ist allerdings die Differenz der Massen, diese liegt bei dem hier beschriebenen Beispiel bei maximal 1250 kg. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass der Aufzug in einem Gebäude mit 20 Stockwerken eingesetzt wird, was einen Fahrweg von etwa 60 m entspricht. Mit der folgenden Formel für die potentielle Energie kann die maximale Rückspeiseenergie bei Konstantfahrt berechnet werden. Wobei die Masse mit m bezeichnet wird, die Gewichtskraft mit g und die Höhe mit h .

$$W_{pot} = m \cdot g \cdot h \quad (50)$$

Somit wird eine potentielle Energie von 204 Wh im System Aufzug gespeichert. Abzüglich der Verluste der Mechanik durch Reibung und weitere Effekte, steht eine Energie von etwa 180 Wh zur Rückspeisung oder Speicherung zur Verfügung.

Neben der Energie spielt die Leistung für die Dimensionierung der Systeme eine entscheidende Rolle. Für die verschiedenen Betriebsfälle sind unterschiedliche Antriebsleistungen notwendig. Für die Konstantfahrt sind je nach Beladung maximal 41 kW notwendig, die Leistung für die Beschleunigung beträgt maximal 66 kW. Zur Berechnung der Leistungen wird von einer Fahrgeschwindigkeit von 3 m/s und einer Beschleunigung von 3 m/s² ausgegangen.

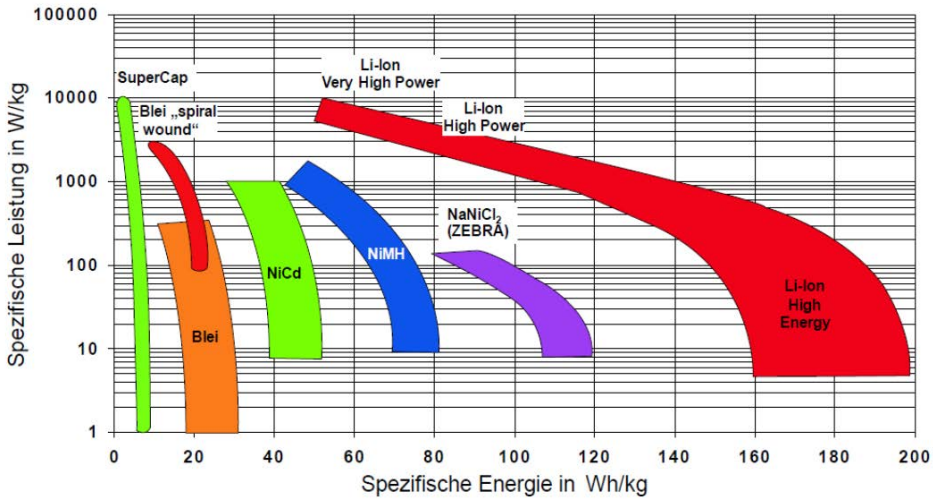


Bild 66: Ragone-Diagramm zum Vergleich von Energie- und Leistungsdichte von Akkumulatoren und Kondensatoren [86]

6.2 Vergleich von Energiespeichern, die im Antriebssystem zum Einsatz kommen können

Für die hier beschriebene Anwendung können verschiedenste Energiespeicher zum Einsatz kommen. Dabei kann es sich um elektrische, chemische aber auch mechanische Energiespeicher handeln. Bei der Auswahl des passenden Energiespeichers muss zuerst der Anwendungsfall betrachtet werden. Wesentliche Fragestellungen sind dabei:

- wie groß ist die Energie die gespeichert werden muss?
- mit welcher Zyklenzahl ist in der Anwendung zu rechnen?
- wie groß ist die dem Speicher zu entnehmende oder zuzuführende Leistung?

Anhand dieser Fragestellungen muss eine Analyse des am besten passenden Energiespeichers durchgeführt werden. Bei den chemischen Energiespeichern stehen eine Reihe von verschiedenen Akkumulator-Typen zur Verfügung, die elektrischen Energiespeicher werden durch verschiedenste Kondensatoren repräsentiert. Bild 66 zeigt ein Ragone-Diagramm zum Vergleich von Energie- und Leistungsdichte von verschiedenen Akkumulator- und Kondensator-Technologien.

Die heute gebräuchlichste Form der Energiespeicherung, welche zum Beispiel in Elektrofahrzeugen eingesetzt wird, ist die chemische Speicherung in Akkumulatoren. Dabei sind, wie oben zusehen, eine Vielzahl von verschiedenen Akkumulator-Technologien erhältlich. Die verschiedenen Technologien unterscheiden sich neben der Energie- und Leistungsdichte auch noch in ihrer Lebensdauer (Zyklenfestigkeit) und ihren Preisen. In den letzten Jahren haben die Lithium-Ionen-Akkumulatoren in ihren verschiedensten Ausprägungen die anderen Technologien weitestgehend abgelöst, da eine deutlich höhere Energiedichte bei stetig sinkenden Preisen erreicht werden kann. Wie in Bild 65 zu sehen ist, können Lithium-Ionen-Akkumulatoren sowohl so ausgeführt werden, dass diese eine hohe Energiedichte aufweisen, aber auch eine hohe Leistungsdichte ist möglich. Für den hier beschriebenen Anwendungsfall der Speicherung von Bremsenergie ist, wie in Kapitel 6.1 dargestellt, eine hohe Leistung bei vergleichsweise geringer Speicherkapazität das ausschlaggebende Kriterium. Was gerade bei Lithium Akkus sicher auch nicht außer Acht gelassen werden darf, ist das unterschiedliche Sicherheitsverhalten bei unterschiedlichen Technologien. Es gibt Technologien, welche aufgrund ihres strukturellen Aufbaus der Zelle bessere Sicherheitseigenschaften aufweisen als andere Technologien. Dies bezieht sich vor allem auf das Gefährdungspotenzial bei Erwärmung.

Die hier beschriebenen Akkumulatoren zählen zu der Gruppe der chemischen Energiespeicher. Hierfür muss die auftretende elektrische Bremsenergie in chemische Energie umgewandelt werden, was natürlich zu Wandlungsverlusten führt. Eine mögliche Alternative ist einen elektrischen Energiespeicher in Form eines Kondensators zu verwenden. Wobei herkömmliche Elektrolytkondensatoren aufgrund ihrer sehr geringen Energiedichte hier ebenso wenig geeignet sind, wie herkömmliche Folienkondensatoren. Die elektrische Energiespeicherung ist in Doppelschichtkondensatoren, sogenannten Supercaps, möglich. Dabei handelt es sich um spezielle Kondensatoren mit einer erhöhten Energiedichte. Allerdings ist die Energiedichte von Supercaps trotzdem noch um etwa den Faktor zehn kleiner als bei Lithium Akkumulatoren, was zu einem deutlich vergrößerten Bauraum führt. Supercaps haben allerdings zwei entscheidende Vorteile. Zum einen verfügen sie, wie in Bild 65 zu sehen, über eine sehr große Leistungsdichte. Zum anderen sind Supercaps extrem zyklensfest, was bedeutet, dass diese gerade in Anwendungen in denen viele Lade- und Entladezyklen notwendig sind, eingesetzt werden können.

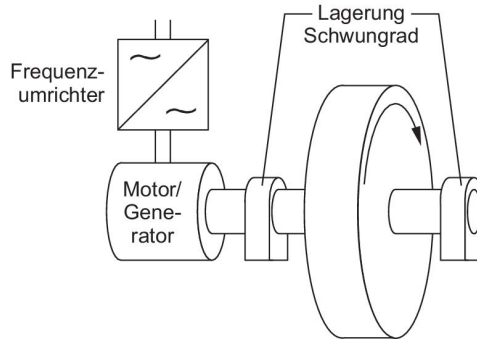


Bild 67: Darstellung des prinzipiellen Aufbaus eines Schwungradspeichersystems [88]

Eine weitere Möglichkeit stellt die mechanische Energiespeicherung dar, hier wäre vor allem ein Schwungradspeicher geeignet. Bei einem Schwungradspeicher wird die Energie in Form von Rotationsenergie gespeichert [87]. Bild 67 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Schwungradspeichersystems, bestehend aus dem Schwungrad selbst, der Motor-Generatoreinheit und dem Frequenzumrichter.

An Schwungradspeichern wird schon sehr lange gearbeitet und es gibt und gab bereits einige Anwendungen, allerdings eher im prototypischen Bereich und für Demonstratoren. So hat zum Beispiel die Firma Oerlikon in den 50er bis 70er Jahren Schwunräder für Busse entwickelt und auch gebaut. Volvo hatte ein Konzept für ein Hybridfahrzeug in dem ein Schwungrad als Energiespeicher diente. Porsche setzt seit 2010 ein Schwungrad als Speicher im Hybridrennwagen 911 GT3 R ein [89] und konnte damit sehr gute Ergebnisse erzielen. Die amerikanische Firma Amber Kinetics entwickelt und vertreibt Schwungradspeicher für stationäre Anwendungen, damit sollen Stromnetze stabilisiert werden und die Kurzzeitspeicherung von regenerativ erzeugter Energie vereinfacht werden [90]. Durch die von den verschiedensten Firmen entwickelten Technologien in Bezug auf Minimierung der Reibung, zum Beispiel durch Magnetlager und das Vakuumieren des Schwungradspeichergehäuses, konnte die vorher sehr große Selbstentladung deutlich reduziert werden. Moderne Schwunräder können heute mit einer Drehzahl von 50.000 1/min rotieren. Die gespeicherte Energie eines Schwungrades berechnet sich mittels nachfolgender Formel, wobei mit J das Massenträgheitsmoment und mit ω Winkelgeschwindigkeit bezeichnet wird.

$$W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (51)$$

Bei realen Anlagen ist eine Energienutzung aus dem Schwungrad bis Drehzahl null nicht möglich, da ansonsten die Ströme im Motor und Umrichter unverhältnismäßig groß werden würden. Die tatsächlich nutzbare Energie beziehungsweise die sinnvolle minimale Drehzahl ist sehr stark von der Realisierung des Schwungrades abhängig und liegt oft im Bereich von 10 %, was in diesem Beispiel hier eine minimale Drehzahl von 5000 1/min bedeutet. Demzufolge muss die Formel für die nutzbare Energie wie folgt erweitert werden.

$$W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot (\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (52)$$

Dies würde für die in Kapitel 6.1 berechnete zu speichernde Energie von 180 Wh bei einem Schwungrad mit einem Schwungmassedurchmesser von 0,2 m ein Gewicht der Schwungmasse von 10 kg bedeuten. (Aus Gründen der Vereinfachung wurde hier mit einer rotierenden Punktmasse gerechnet. Die Drehzahl wurde wie oben beschrieben im Bereich von 5.000 1/min bis 50.000 1/min angenommen.)

Der größte Vorteil von Schwungradspeichern ist die sehr gute Zyklusfestigkeit. Geringe Verschleißerscheinungen treten an den mechanischen Komponenten, sowie am Motor und Umrichter auf. Diese sind jedoch deutlich geringer als bei chemischen Energiespeichern. Zudem verfügt ein Schwungradspeicher im Allgemeinen über eine sehr hohe Leistungsdichte, was gerade für den hier beschriebenen Anwendungsfall von großer Bedeutung ist.

Ein Schwungrad hat im Gegensatz zu Akkumulator und Supercaps allerdings den Nachteil, dass eine deutlich aufwendigere Leistungsendstufe zum Ein- und Ausspeichern der Energie benötigt wird, wie in Bild 66 zu sehen ist.

6.3 Realisierung eines Speichersystems zur Integration in einen Antriebsstrang

Wie man aus den vorangegangenen Ausführungen ersehen kann, bietet das Konzept mit Supercaps gegenüber den Akkumulatoren und Schwungradspeichern Vorteile wie:

- hohe Zyklenzahl
- einfache Realisierung
- hohe Energieeffizienz

Aus diesem Grund wurde das Projekt im Rahmen dieser Arbeit mit einem Speicher aus Supercaps realisiert. Die maximale Rückspeiseenergie des Testsystems liegt im Bereich von 150 – 200 Wh, auf diese Energie muss der Speicher ausgelegt werden. Der Supercap-Speicher wurde auf Basis vorhandener Supercap-Module der Firma Maxwell montiert. Diese Module haben eine maximale Spannung von 48 V bei einer Kapazität von 165 F. Von diesen Modulen standen vier Stück zur Verfügung. Die vier Module wurden in Reihe geschaltet, so dass ein Speicher mit einer maximalen Spannung von 192 V und 41,25 F entstand. Der maximale Energieinhalt des Speichermoduls berechnet sich mittels nachfolgender Formel, wobei die Kapazität des Supercaps mit C bezeichnet wird und die Spannung am Supercap mit U .

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (53)$$

Somit ergibt sich ein maximaler Energieinhalt von 211,2 Wh. Um die gesamte gespeicherte Energie nutzen zu können, müsste der Supercap-Speicher auf 0 V entladen werden. Dies ist aufgrund von extrem groß werdenden Strömen bei konstanter Leistung jedoch nicht sinnvoll, da dadurch sehr große und teure Leistungshalbleiter eingesetzt werden müssten. Aus diesem Grund wurde festgelegt, dass der Supercap-Speicher in einem Betriebsbereich zwischen 100 V und 192 V betrieben werden soll. Somit entsteht ein Spannungsübersetzungsverhältnis von 6:1 am eingesetzten DC-Wandler, was einem technisch sinnvollen Wert entspricht, da die notwendige Stromtragfähigkeit des DC-Wandlers entsprechend begrenzt werden kann. Der nutzbare Energieinhalt des Supercap-Speichers berechnet sich dadurch wie folgt. Dabei wird die Kapazität des Supercaps mit C bezeichnet, die maximale Spannung am Supercap mit U_2 und die minimale Spannung mit U_1 .

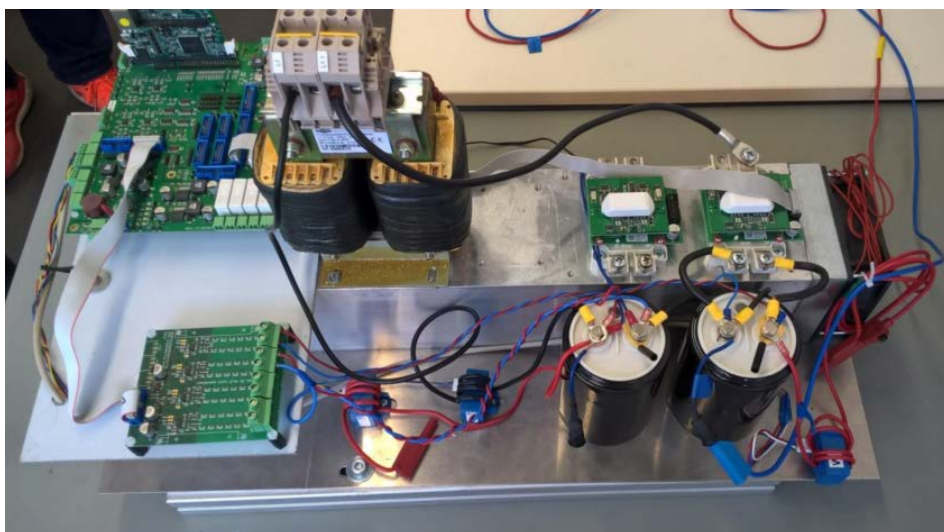


Bild 68: Foto des Aufbaus eines der entwickelten DC-Wandlers im Labor

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_2^2 - U_1^2) \quad (54)$$

Somit ergibt sich ein nutzbarer Energieinhalt von 154 Wh.

Als Bindeglied zwischen Speicher- und dem Antriebssystem wird ein DC-Wandler benötigt. Folgende Spezifikationen wurden für den DC-Wandler festgelegt:

- maximale Leistung 10 kW
- Spannungslevel Antriebsumrichter 600 V
- Spannungslevel Speicher (min. Spannung) 100 V
- maximaler Strom 100 A
- Stromwelligkeit an der Induktivität maximal 40 % des Nennstromes [91]

Es wurden, wie bei Antriebsumrichtern üblich, IGBTs mit einer Sperrspannung von 1200 V eingesetzt. Als Schaltungstopologie wurde die klassische DC-Wandler Topologie, bestehend aus einem Halbbrückenmodul wie in Bild 37 dargestellt, gewählt. Bild 68 zeigt ein Foto des Aufbaus des DC-Wandlers.

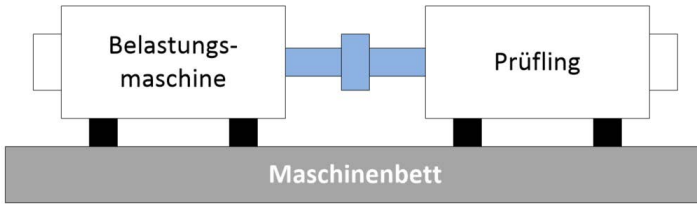


Bild 69: Prinzipieller Aufbau eines Motorenprüfstandes

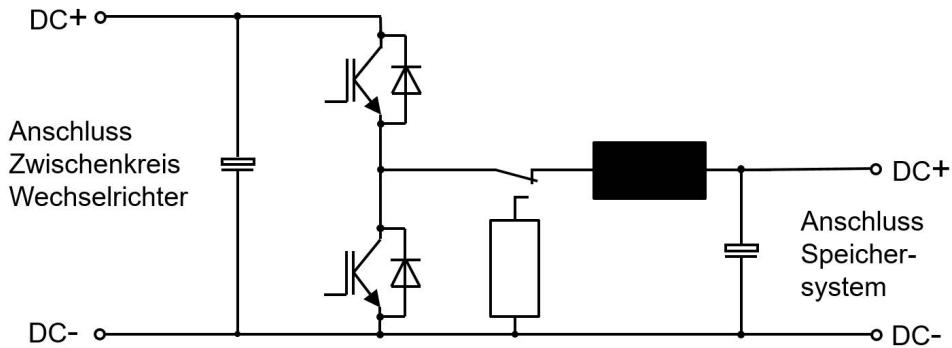


Bild 70: Schaltbild des DC-Wandlers um die Funktion eines Bremschoppers erweitert

Die Versuche zur Integration eines Speichers in einem Antriebsstrang wurden am Prüfstand durchgeführt. Dazu wurden zwei Motoren mechanisch gekoppelt, so dass ein Motor als Antriebsmaschine und der zweite Motor im generatorischen Betrieb als Last betrieben werden kann. Bild 69 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Prüfstandes.

Durch diesen Aufbau können alle gewünschten Funktionen getestet werden, ohne dass ein realer Aufzug oder eine Materialförderanlage notwendig ist.

Die Versuche zeigten, dass das Konzept und der Aufbau so wie angedacht funktionieren, es ist aber denkbar, dass in manchen Systemen Betriebszustände auftreten bei denen nicht die gesamte Bremsenergie in den Speichersystemen zwischengespeichert werden kann. In diesen Fällen ist es wiederum notwendig die Energie in Bremschopperelementen in Wärme umzuwandeln. Hierfür wurde die in Bild 37 gezeigte Schaltung des DC-Wandlers erweitert, um zusätzlich die Möglichkeit zu schaffen einen Bremschopper einzusetzen. Diese Schaltungserweiterung ist in Bild 70 dargestellt.

Durch diese Erweiterung der Schaltung können jetzt alle notwendigen Sicherheitsfunktionen realisiert werden. Zudem muss der Speicher damit auch nicht mehr auf die maximal auftretende Energie dimensioniert werden, sondern kann auf das wirtschaftliche Optimum ausgelegt werden.

Die hier dargestellte Integration von Energiespeichern in ein Antriebssystem kann neben dem Aufzug beliebig auf andere Anwendungen übertragen werden. Hier sind vor allem Anwendungen mit häufigen Wechseln zwischen Antriebs- und Bremsphasen interessant.

6.4 Energetischer Vergleich eines Aufzuges mit und ohne Speichersystem

In diesem Kapitel wird ein energetischer Vergleich, ähnlich der Auswertungen in Kapitel 5.2, anhand einer Aufzugsanlage mit und ohne integriertem Speicher in das Antriebssystem dargestellt. Der für die Berechnung zugrunde gelegte Aufzug hat folgende Daten:

Tabelle 24: Aufzugsdaten für die Beispielberechnung

Nutzlast	2500 kg
Leergewicht Aufzugskabine	750 kg
Gegengewicht	2000 kg
Fahrgeschwindigkeit	3 m/s
Fahrstrecke	60 m

Aus diesen Daten ergibt sich eine maximale potentielle Energie von 204 Wh. Diese Energie wird freigesetzt, wenn der Aufzug beispielsweise leer nach oben fährt und dadurch das Gegengewicht nach unten bewegt wird. Abzüglich der mechanischen Verluste für Reibung an den Seilen und Rollen und ähnliches steht eine mechanische Energie am Motor von circa 180 Wh zur Verfügung. Bei der definierten Fahrgeschwindigkeit von 3 m/s ergibt dies eine mechanische Leistung für die Rückspeisung am Motor während der Konstantfahrt von 32,4 kW. Bei identischen Wirkungsgradverhältnissen der Aufzugsmechanik wird für den umgekehrten Fahrweg eine mechanische Antriebsleistung des Motors während der Konstantfahrt von 41 kW benötigt. Dazu kommt noch die für Beschleunigungs- und Bremsvorgänge notwendige Leistung von maximal 25 kW. Die Beschleu-

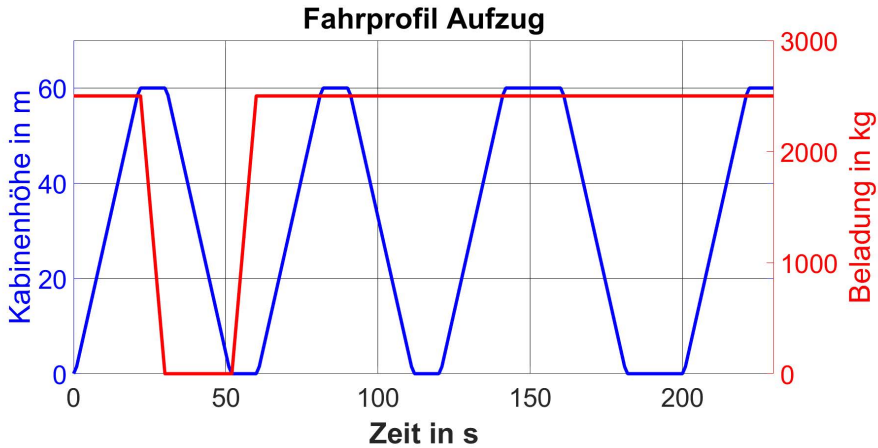


Bild 71: Höhenprofil des Aufzuges in Kombination mit der Beladung der Aufzugskabine

nigungs- und Bremsleistung ist abhängig von der Beladung des Aufzuges und von der Fahrtrichtung. Um alle möglichen Betriebsfälle abdecken zu können, wird hier von der maximalen Leistung ausgegangen. Somit ist eine Gesamtleistung von maximal 66 kW notwendig. Für die Berechnung wird der nächst größere vierpolige Normmotor verwendet. Dies entspricht einem Motor mit einer Leistung von 75 kW.

Für die exemplarische Betrachtung wurde ein Fahrprofil definiert, welches aus mehreren Fahrten des Aufzuges besteht. Bild 71 zeigt das Fahrprofil des Aufzuges als Höhenprofil kombiniert mit Beladung der Aufzugskabine.

Aus diesem Höhenprofil in Verbindung mit der Beladung kann anschließend ein Drehmoment- Drehzahlprofil für den Antrieb berechnet werden. Dieses Profil ist in Bild 72 zu sehen.

Mit diesen Vorgaben wurde anschließend das Antriebssystem entsprechend berechnet. Dabei wurden drei verschiedene Varianten untersucht. Zum einen ein Antriebssystem mit passiver Netzeinheit ohne Rückspeisemöglichkeit, zum anderen ein Antriebssystem mit aktiver Netzeinheit und Rückspeisemöglichkeit ins Stromnetz und als dritte Variante das hier beschriebene System mit integriertem Energiespeicher im Antriebssystem. Als Basis für die Berechnungen dienten wiederum die in Kapitel 4 berechneten Verlustkennfelder der verschiedenen Komponenten. In Bild 73 sind die bezogenen Netzenergien des Aufzuges nach dem in Bild 71 dargestell-

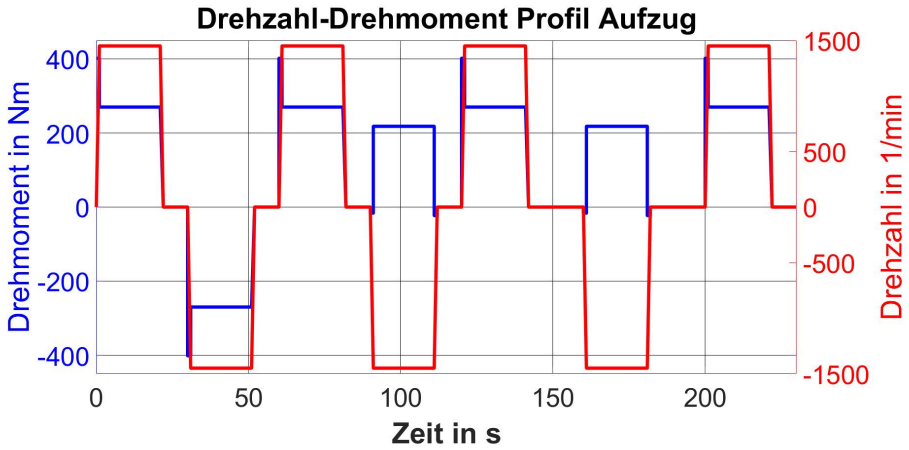


Bild 72: Drehmoment- Drehzahlprofil des Aufzugsantriebs

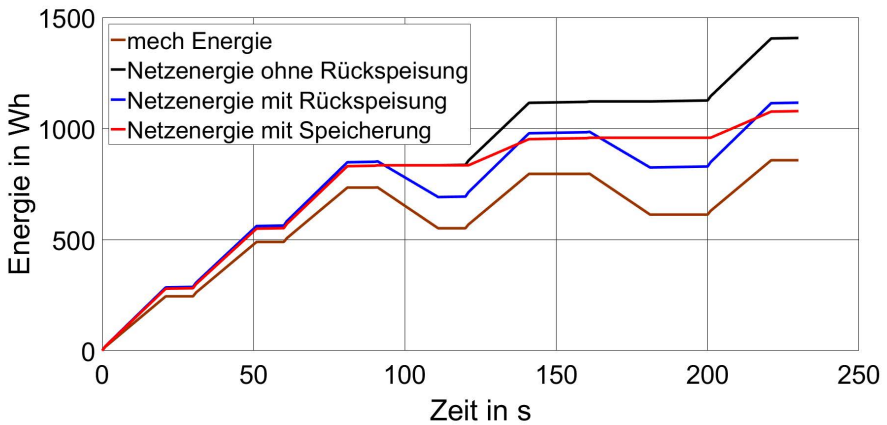


Bild 73: Vergleich der bezogenen Netzenergie des Aufzugssystems anhand des definierten Fahrprofils

ten Fahrprofils im Vergleich dargestellt. Als Vergleichsgröße ist zudem die mechanische Energie des Systems dargestellt.

Zur Verdeutlichung der Ergebnisse sind die bezogenen Netzenergien des Aufzuges in folgender Tabelle 25 nochmals dargestellt.

Tabelle 25: Zusammenfassung der bezogenen Netzenergien des Aufzuges und entsprechende Einsparungen

Beschreibung der Anlage	Energieverbrauch über den Fahrzyklus	Einsparung gegenüber Anlage ohne Energierückgewinnung
Mechanische Energie des Systems	857 Wh	
Bezogene Netzenergie ohne Rückspeiseeinheit und ohne Speicher	1.407 Wh	
Bezogene Netzenergie mit Rückspeiseeinheit	1.116 Wh	21,4 %
Bezogene Netzenergie mit Speicher im Antriebssystem	1.078 Wh	24,4 %

6.5 Energetischer Vergleich einer Materialförderanlage mit und ohne Speichersystem

Als weiteres Anwendungsbeispiel dient die in Kapitel 5.2 beschriebene und berechnete Materialförderanlage. Bei dieser Materialförderanlage kann ebenfalls mit einem Speicher im Antriebssystem gearbeitet werden.

Bild 74 zeigt die notwendigen Netzenergien der Materialförderanlage mit und ohne Speicher im Antriebssystem. Zudem wird noch die mechanische Energie und die aufgenommene Energie bei einem Antriebssystem mit Rückspeiseeinheit dargestellt.

Zur Verdeutlichung der Ergebnisse sind die bezogenen Netzenergien in folgender Tabelle 26 nochmals dargestellt.

Durch diese Vergleiche wird deutlich, dass durch Energierückgewinnung bei Antriebssystemen eine deutliche Energieeinsparung erzielt werden kann. Zudem ist zu sehen, dass das Energieeinsparungspotential durch die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Möglichkeit der Energiespeicherung im Antriebssystem nochmals um fast fünf Prozent gesteigert werden kann.

6.5 Energetischer Vergleich einer Materialförderanlage mit und ohne Speichersystem

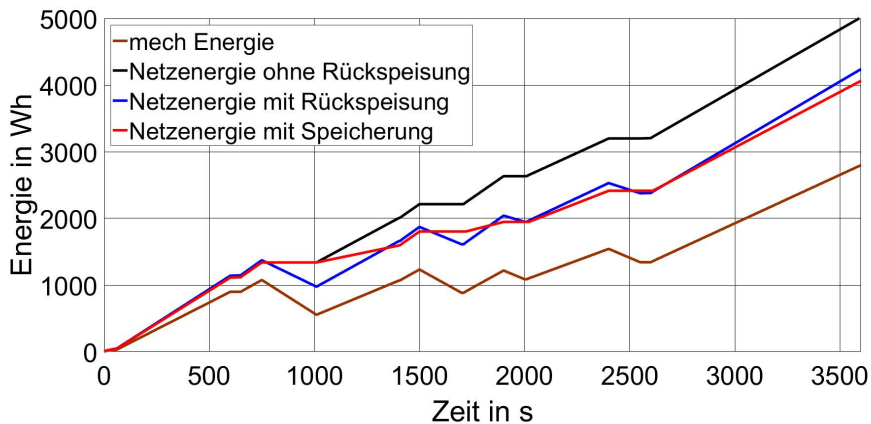


Bild 74: Vergleich der bezogenen Netzenergie der Materialförderanlage mit und ohne Speicher im Antriebssystem

Tabelle 26: Zusammenfassung der bezogenen Netzenergien der Materialförderanlage und entsprechende Einsparungen

Beschreibung der Anlage	Energieverbrauch über den Fahrzyklus	Einsparung gegenüber Anlage ohne Energierückgewinnung
Mechanische Energie des Systems	2.800 Wh	
Bezogene Netzenergie ohne Rückspeiseeinheit und ohne Speicher	5.030 Wh	
Bezogene Netzenergie mit Rückspeiseeinheit	4.250 Wh	15,5 %
Bezogene Netzenergie mit Speicher im Antriebssystem	4.030 Wh	19,9 %

6.6 Verifizierung der Berechnungen anhand von Messungen

Da eine Messung an einer realen Anlage leider nicht möglich war, wurde die Verifikation des Berechnungsprogramms zur Integration eines Kurzzeitspeichers am Prüfstand durchgeführt. Hierfür wurde das Fahrprofil des Aufzuges und der Aufzug selbst am Prüfstand nachgebildet. Somit wurde das Fahrprofil aus Bild 71 für die Verifikation der Berechnung verwendet.

Es wurden die drei bereits beschriebenen Konfigurationen untersucht:

- Antriebssystem ohne Rückspeiseeinheit
- Antriebssystem mit Rückspeiseeinheit
- Antriebssystem mit integriertem Kurzzeitspeicher

Die aufgenommene Energie wurde mit Hilfe eines Stromzählers erfasst. Um sicherzustellen, dass die Messungen reproduzierbar sind, wurde jede Messung dreimal durchgeführt und die aufgenommene Energie gemittelt, wobei die Abweichung zwischen den Simulationsläufen weniger als 3 Prozent betrug.

In der nachfolgende Tabelle 27 sind die aufgenommenen Energien sowohl aus der Messung als auch der Berechnung dargestellt. Zudem ist noch die prozentuale Abweichung zwischen Messung und Rechnung zu sehen.

Tabelle 27: Vergleich der aufgenommenen Energie zwischen Messung und Berechnung am Beispiel Aufzug

	Energie aus dem Netz (Berechnung)	Energie aus dem Netz (Messung)	Abweichung
Netzenergie ohne Rückspeiseeinheit	1407 Wh	1347 Wh	4,4 Prozent
Netzenergie mit Rückspeiseeinheit	1116 Wh	1068 Wh	4,5 Prozent
Netzenergie mit integriertem Kurzzeitspeicher	1078 Wh	1036 Wh	4,0 Prozent

Als Fazit lässt sich erkennen, dass die Abweichung zwischen Messung und Rechnung bei allen Konfigurationen des Aufzuges unter fünf Prozent liegt. Damit kann das Berechnungsprogramm auch für die Integration von Kurzzeitspeichern als verifiziert angesehen werden.

7 CO₂- und Kosteneinsparung durch Integration von Kurzzeitspeichern in Antriebssysteme

Neben den energetischen Aspekten spielen bei der Auslegung von Antriebssystemen natürlich auch die entstehenden Kosten eine entscheidende Rolle. Dabei muss zwischen Investitionskosten und Betriebskosten unterschieden werden. In diesem Kapitel wird eine vereinfachte Kostenabschätzung dargestellt. Die Amortisationszeiten beziehungsweise die Amortisationsrechnung wird auf Basis der dynamischen Amortisationsrechnung durchgeführt. Das heißt die zukünftigen Ein- und Auszahlungen werden mit dem Zinssatz diskontiert. Für die Berechnungen wird von einem Zinssatz von 4 Prozent ausgegangen. Aufgrund der aktuellen Ausnahmesituation bei den Strompreisen wird die Amortisationsrechnung komplett mit zwei verschiedenen Strompreisen durchgeführt. Zum einen mit dem aktuellen Industriestrompreis für kleine und mittlere Unternehmen von 54,9 ct/kWh und zum anderen mit dem Strompreis am Ende des Jahres 2021 von 21,38 ct/kWh [2].

Die vereinfachte Kostenabschätzung kann dazu dienen Amortisationszeiten von verschiedenen Konfigurationen zu berechnen und dient somit als Grundlage für die Entscheidung, welche Ausführung des Antriebssystems im konkreten Fall umgesetzt werden soll.

7.1 Berechnungsbeispiel Materialförderanlage mit Speichereinheit

Als erstes Berechnungsbeispiel wird die in Kapitel 5.2 beschriebene und energetisch berechnete Materialförderanlage betrachtet. Als Motor wird für die Berechnung der in der realen Anlage einsetzte zweipolige 11 kW Asynchronmotor und der dazu passende Frequenzumrichter der Firma Siemens angenommen. Bei dem Frequenzumrichter wurde ebenfalls auf die realen Bauteile zurückgegriffen. Das System ist mit Komponenten der Baureihe S120 realisiert. Bei dieser Baureihe handelt es sich um ein modulares System, bei dem die Netzeinheit unabhängig von der Motoreinheit konfiguriert werden kann. Als Motoreinheit wird ein Motormodul mit einer Nennleistung von 12,9 kW eingesetzt. Um die Kosteneffekte der Varianten mit und ohne Rückspeisung darzustellen, wurde das System mit einer aktiven Netzeinheit mit einer Leistung von 16 kW berechnet. Zu der akti-

ven Netzeinheit wird noch ein aktives Filtermodul mit einer Leistung von ebenfalls 16 kW benötigt. Für die passive Variante wird mit einer passiven Netzeinheit mit 20 kW Leistung sowie einer passenden Netzdrossel mit einem Maximalstrom von 37 A gerechnet. Die aktive Einheit wurde gewählt, weil diese der Einheit in der realen Anlage entspricht. Die passive Einheit wurde gewählt, da dies die nächste verfügbare Einheit der Leistungsabstufung ist. Neben den genannten Komponenten wird noch eine Control Unit benötigt. Weitere Kosten entstehen für den Schaltschrankbau und die benötigten Peripherie Komponenten, welche zum Betrieb notwendig sind. Nachfolgend in Tabelle 28 sind die Preise für die beschriebenen Komponenten dargestellt.

Die Kosten für das entwickelte System zur Speicherung von Energie im Antriebsstrang werden entsprechend abgeschätzt, da hierfür aktuell am Markt keine kommerziellen Systeme vorhanden sind. Das Speichersystem wird in Kombination mit einem Antriebssystem ohne Rückspeisemöglichkeit eingesetzt, so dass der Preis für das Antriebssystem selbst aus der Tabelle 28 entnommen werden kann.

Als Speicherelemente werden Supercaps eingesetzt, diese haben wie oben beschrieben den Vorteil, dass sehr hohe Leistungen bezogen auf den Energieinhalt entnommen und zugeführt werden können. Zudem ist die Alterung über die Lade- und Entladezyklen fast vernachlässigbar. Für die in Kapitel 6.5 berechnete Materialförderanlage, unter Annahme des dargestellten Fahrprofils, wird ein Energieinhalt im Speicher von etwa 410 Wh benötigt. Daher wird ein Supercap-Speicher mit einer Kapazität von 20 F eingesetzt. Der Spannungsbereich, in dem die Supercaps geladen und entladen werden, liegt zwischen 100 V und 400 V. Daher ist ein nutzbarer Energieinhalt von 416 Wh enthalten. Die maximale Leistung, welche dem Speichersystem zugeführt oder entnommen werden muss, liegt im Bereich von 6 kW. Dies entspricht bei der Minimalspannung des Supercap-Speichers von 100 V in etwa 60 A. Auf Basis dieser Zahlen werden die Kosten für das Speichersystem ermittelt. Für die Supercap-Einheit wird der Preis auf etwa 3.000 € und für den DC-Wandler auf etwa 800 € geschätzt. Somit entstehen Gesamtkosten für das Speichersystem von etwa 3.800 €. Die folgende Tabelle 29 zeigt einen Vergleich der Investitionskosten der drei verschiedenen beschriebenen Antriebssysteme.

Wie in der Tabelle zu sehen ist, sind die Investitionskosten für das Antriebssystem mit Speichereinheit deutlich höher als für die anderen beiden Varianten. Dies hat zur Folge, dass sich das Antriebssystem mit Spei-

Tabelle 28: Preisvergleich der Komponenten zweier Antriebssysteme der Materialförderanlage mit und ohne Rückspeisemöglichkeit der Bremsenergie ins Stromnetz

Bauteilbezeichnung	Preis für ein System mit Rückspeisemöglichkeit	Preis für ein System ohne Rückspeisemöglichkeit
Motormodul 6SL3120-1TE22-4ACo	1.800 €	1.800 €
Aktive Netzeinheit 6SL3130-7TE21-6AA4 (active line Module)	1.500 €	
Drossel und Filter Modul 6SL3100-0BE21-6ABo (active interface Modul)	1.000 €	
Passive Netzeinheit 6SL3130-1TE22-0AAo		800 €
Netzdrossel 6SL3000-0CE22-0AAo		500 €
Control Unit 6SL3040-1MA00-0AAo	400 €	400 €
Schaltschrankbau und Peripherie Kompo- nenten	2.000 €	2.000 €
Gesamtkosten	6.700 €	5.500 €

cher nur in Betriebsfällen mit hoher Zyklenzahl ausreichend schnell amortisieren wird.

Ein entscheidender Vorteil der Speicherung von Rückspeiseenergie im Antriebssystem ist allerdings, dass dieses System sehr einfach und ohne Eingriff in die eigentliche Anlage nachgerüstet werden kann. Dadurch können Energieeinsparpotentiale in bestehenden Anlagen gehoben werden. Die Kosten für ein Nachrüstsystem für die hier beschriebene Materialför-

Tabelle 29: Vergleich der Investitionskosten der drei verschiedenen, beschriebenen Antriebssysteme für eine Materialförderanlage

Beschreibung	Investitionskosten
Antriebssystem ohne Rückspeisemöglichkeit	5.500 €
Antriebssystem mit Rückspeisemöglichkeit	6.700 €
Antriebssystem mit Speicher	9.300 €

deranlage wird auf etwa 4.200 € geschätzt. Diese Kosten setzen sich aus den Kosten für den Supercap-Speicher, den DC-Wandler und ein Gehäuse inkl. Anschlusstechnik zusammen. Am Frequenzumrichter des Antriebssystems kann das Speichersystem einfach an den Klemmen des Bremschoppers angeschlossen werden und somit dem Zwischenkreis direkt Energie entnehmen oder zuführen.

Für das hier dargestellte Beispiel der Materialförderanlage sind in der nachfolgenden Tabelle 30 die Amortisationszeiten einer Neuanlage in den drei verschiedenen Konfigurationen und einer Nachrüstung einer Anlage mit einem Speichersystem dargestellt. Für die Berechnung wurde davon ausgegangen, dass es sich um eine Anlage handelt, welche 16 Stunden pro Tag und 300 Tage im Jahr in Betrieb ist. Die Energiekosten wurden für die gesamte Betriebsdauer als konstant angesetzt.

Für den technisch am sinnvollsten scheinenden Anwendungsfall der Nachrüstung eines Speichersystems in ein bestehendes Antriebssystem wird die Amortisationsrechnung in Bild 75 ausführlicher dargestellt. In der Abbildung ist auf der x-Achse der zeitliche Verlauf zu sehen. Direkt an der Kurve ist der kumulierte Barwert als Cashflow für jedes Betriebsjahr aufgetragen.

Neben der Kosteneinsparung durch die Verringerung des Stromverbrauchs entstehen dadurch natürlich auch positive Umwelteffekte durch CO₂ Einsparungen. Basierend auf der mittleren CO₂ Emission im deutschen Strommix von 420 Gramm pro Kilowattstunde [92] sind die in Tabelle 7-4 dargestellten CO₂ Einsparungen pro Jahr möglich.

Tabelle 30: Vergleich der Amortisationszeiten am hier dargestellten Beispiel einer Materialförderanlage

Beschreibung	Amortisationszeit bei einem Strompreis von 21,38 ct/kWh	Amortisationszeit bei einem Strompreis von 54,9 ct/kWh
Mit Rückspeiseeinheit gegenüber ohne Rückspeisung	1,6 Jahre	0,6 Jahre
Mit Speicher gegenüber ohne Rückspeisung	4,1 Jahre	1,5 Jahre
Mit Speicher gegenüber einer Rückspeiseeinheit	15,7 Jahre	5,0 Jahre
Nachrüstung eines Speichersystems in ein bestehendes Antriebssystem	4,5 Jahre	1,7 Jahre

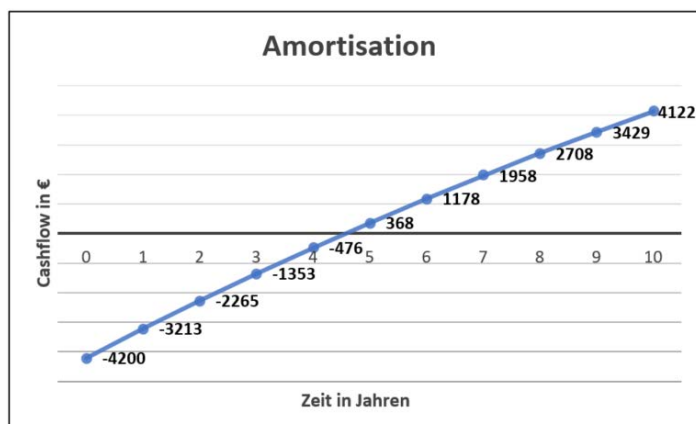


Bild 75: Darstellung der Amortisation der Nachrüstung eines Speichersystems in ein bestehendes Antriebssystem am Beispiel einer Materialförderanlage bei einem Strompreis von 21,38 ct/kWh

Tabelle 31: Vergleich der CO₂ Einsparung pro Jahr am hier dargestellten Beispiel einer Materialförderanlage

Beschreibung	CO ₂ Einsparung
Mit Rückspeiseeinheit gegenüber ohne Rückspeisung	2572 kg
Mit Speicher gegenüber ohne Rückspeisung	2016 kg
Mit Speicher gegenüber einer Rückspeiseeinheit	443 kg

7.2 Berechnungsbeispiel Aufzug mit Speichereinheit

Als weiteres Berechnungsbeispiel für Kosteneffizienz dient die in Kapitel 6.4 dargestellte Aufzugsanlage. Um die für den Aufzug benötigte Leistung bereitstellen zu können, muss ein 75 kW Motor eingesetzt werden. Zu diesem Motor werden dann die entsprechenden Umrichterkomponenten ausgewählt. In diesem Beispiel wird für das Antriebssystem ohne Rückspeisung, wie bei Aufzügen ohne Energierückspeisung üblich, auf einen Kompaktumrichter zurückgegriffen. Dadurch sind die Preisunterschiede der Varianten mit und ohne Rückspeisung deutlich größer. In der nachfolgenden Tabelle 32 sind die Komponentenpreise dargestellt.

Wie beim Beispiel Materialförderanlage werden auch hier wieder Supercaps als Speicher eingesetzt, da die Lade- und Entladezyklen sehr hoch sind. Zudem ist die entnommene und zugeführte Leistung zum Speicher in Bezug auf den Energieinhalt sehr groß. Bei dem in Kapitel 6.4 berechneten Aufzug, unter Annahme des dargestellten Fahrprofils, wird ein Energieinhalt im Speicher von etwa 160 Wh benötigt. Daher wird ein Supercap-Speicher mit einer Kapazität von 10 F eingesetzt. Der Spannungsbereich in dem die Supercaps geladen und entladen werden, liegt zwischen 200 V und 400 V. Daher ist ein nutzbarer Energieinhalt von 166 Wh enthalten. Die maximale Leistung welche dem Speichersystem zugeführt oder entnommen werden muss, liegt im Bereich von 60 kW. Dies entspricht bei der Minimalspannung des Supercap-Speichers von 200 V in etwa 300 A. Auf Basis dieser Zahlen werden die Kosten für das Speichersystem ermittelt. Für die Supercap-Einheit wird der Preis auf etwa 1.800 € und für den DC-Wandler auf etwa 1.600 € geschätzt. Somit entstehen Gesamtkosten für das Speichersystem von etwa 3.400 €. Die folgende Tabelle 33 zeigt einen Vergleich der Investitionskosten der drei verschiedenen, beschriebenen Antriebssysteme.

Tabelle 32: Kostenvergleich der Komponenten zweier Antriebssysteme der Aufzugsanlage mit und ohne Rückspeisemöglichkeit der Bremsenergie ins Stromnetz

Bauteilbezeichnung	Preis für ein System mit Rückspeisemöglichkeit	Preis für ein System ohne Rückspeisemöglichkeit
Motormodul	2.900 €	
Aktive Netzeinheit (active line Module)	2.500 €	
Drossel und Filter Modul (active interface Modul)	2.000 €	
Control Unit 6SL3040-1MA00-0AA0	400 €	
Kompaktumrichter ohne Rückspeisung		3.400 €
Netzdrossel		800 €
Schaltschrankbau und Peripherie Komponenten	4.000 €	3.000 €
Gesamtkosten	11.800 €	7.200 €

Tabelle 33: Vergleich der Investitionskosten der drei verschiedenen, beschriebenen Antriebssysteme

Beschreibung	Investitionskosten
Antriebssystem ohne Rückspeisemöglichkeit	7.200 €
Antriebssystem mit Rückspeisemöglichkeit	11.800 €
Antriebssystem mit Speicher	10.700 €

Anders als beim Beispiel der Materialförderanlage sind die Investitionskosten für ein Antriebssystem mit Speicher bei dem hier gewählten Beispiel eines Aufzuges geringer als für das Antriebssystem mit Rückspeiseeinheit. Daher stellen sich die Amortisationszeiten ganz anders dar als beim Beispiel der Materialförderanlage. Die errechneten Amortisationszeiten für das Beispiel Aufzug sind in der folgenden Tabelle 34 dargestellt. Für die Berechnung ist davon ausgegangen worden, dass das gewählte Fahrprofil des Aufzuges an 300 Tagen im Jahr pro Tag 60-mal gefahren wird. Auch die Berechnung dieses Beispiels wurde wie oben beschrieben aufgrund der aktuellen besonderen Situation mit zwei Strompreisen durchgeführt. Zum einem mit dem aktuellen Industriestrompreis für kleine und mittlere Unternehmen von 54,9 ct/kWh (max. Preis in 2023) und zum anderen mit dem Strompreis am Ende des Jahres 2021 von 21,38 ct/kWh [2]. Die Energiekosten wurden für die gesamte Betriebsdauer als konstant angesetzt.

Tabelle 34: Vergleich der Amortisationszeiten am hier dargestellten Beispiel eines Aufzuges

Beschreibung	Amortisationszeit bei einem Strompreis von 21,38 ct/kWh	Amortisationszeit bei einem Strompreis von 54,9 ct/kWh
Mit Rückspeiseeinheit gegenüber ohne Rückspeisung	5,4 Jahre	1,7 Jahre
Mit Speicher gegenüber ohne Rückspeisung	3,5 Jahre	1,1 Jahre
Mit Speicher gegenüber einer Rückspeiseeinheit	0 Jahre (Die Investitionskosten für die Speichereinheit ist günstiger als für die Rückspeiseeinheit)	
Nachrüstung eines Speichersystems in ein bestehendes Antriebssystem	3,8 Jahre	1,2 Jahre

Auch bei diesem Beispiel ist die einfache Nachrüstung einer bestehenden Aufzugsanlage ein erheblicher Vorteil des entwickelten Systems. Somit können Bestandsanlagen energetisch optimiert werden und zudem können erhebliche Kosten eingespart werden. Bei dem hier beschriebenen Fahrprofil liegt das Einsparpotential pro Jahr bei 5.958 kWh, was einer finanziellen

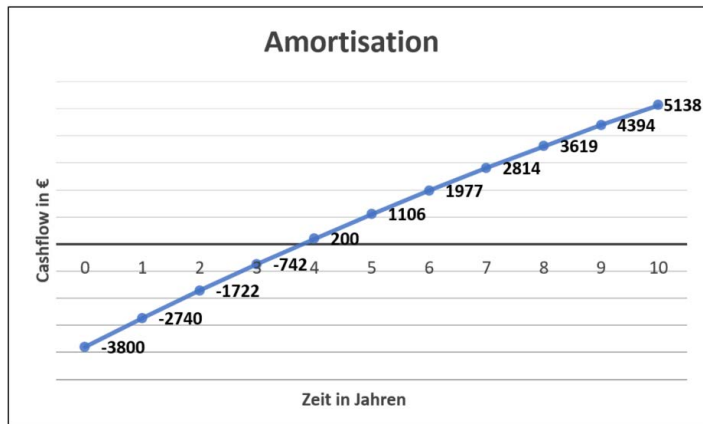


Bild 76: Darstellung der Amortisation der Nachrüstung eines Speichersystems in ein bestehendes Antriebssystem am Beispiel eines Aufzuges bei einem Strompreis von 21,38 ct/kWh

Entlastung von circa 3.271 € pro Jahr entspricht (bei einem Strompreis von 54,9 ct/kWh). Würde man davon ausgehen, dass diese Aufzugsanlage in einem privaten Umfeld installiert ist und die Stromkosten bei 40 ct/kWh liegen [93], wäre die jährliche Einsparung bei circa 2.383,20 €.

Für den technisch am sinnvollsten scheinenden Anwendungsfall der Nachrüstung eines Speichersystems in ein bestehendes Antriebssystem wird auch hier, wie bei der Materialförderanlage, die Amortisationsrechnung in Bild 76 ausführlicher dargestellt. In der Abbildung ist auf der x-Achse der zeitliche Verlauf zu sehen. Direkt an der Kurve ist der kumulierte Barwert als Cashflow für jedes Betriebsjahr aufgetragen.

Auch in diesem Fall kann durch die Reduzierung des Stromverbrauches wieder eine CO₂ Einsparungen erreicht werden. Basierend auf der mittleren CO₂ Emission im deutschen Strommix von 420 Gramm pro Kilowattstunde [92] sind die in Tabelle 35 dargestellten CO₂ Einsparungen pro Jahr möglich.

7.3 Kosteneinsparung durch den Einsatz von effizienteren Motoren

In den bisher dargestellten Kapiteln wird wie in der Norm EN 50598-2:2014 vom Einsatz von IE2 Motoren ausgegangen. Neben diesen Motoren sind aber auch Motoren mit höherer Energieeffizienz verfügbar. So sind aktuell

Tabelle 35: Vergleich der CO₂ Einsparung am hier dargestellten Beispiel eines Aufzuges

Beschreibung	CO ₂ Einsparung
Mit Rückspeiseeinheit gegenüber ohne Rückspeisung	2200 kg
Mit Speicher gegenüber ohne Rückspeisung	2502 kg
Mit Speicher gegenüber einer Rückspeiseeinheit	302 kg

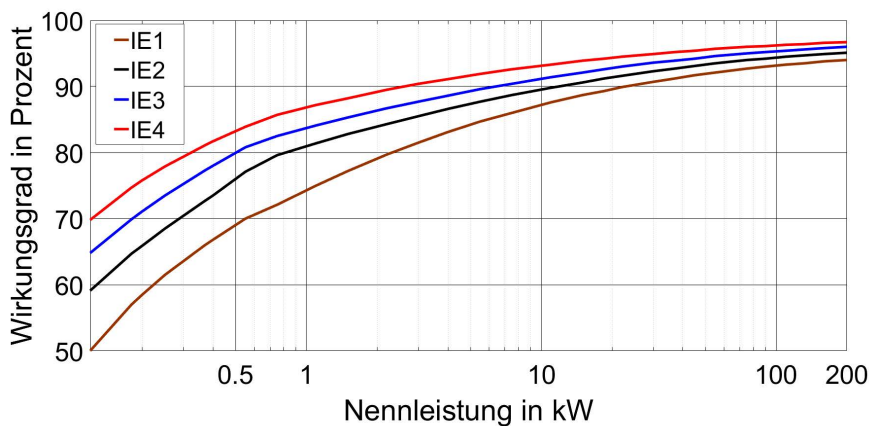


Bild 77: Übersicht über die Wirkungsgradevorgaben von Asynchronmotoren der verschiedenen Effizienzklassen nach DIN EN 60034-30-1 [94]

sowohl Motoren der Effizienzklasse IE₃ als auch IE₄ verfügbar. Laut Norm DIN EN 60034-30-1 dürfen bei Einsatz eines Frequenzumrichters Motoren der Effizienzklasse IE₂ und höher eingesetzt werden. Beim Einsatz direkt am Netz muss schon heute die Effizienzklasse IE₃ oder höher eingesetzt werden. Es gibt hier zwar eine Reihe von Ausnahmen, auf diese hier aber nicht näher eingegangen wird. Bild 77 zeigt die nach Norm verlangten Wirkungsgrade von Asynchronmaschinen verschiedener Leistungen.

Wie in der Abbildung zu sehen ist, sind deutliche Wirkungsgradunterschiede zwischen den verschiedenen Effizienzklassen vorhanden. Bei den dargestellten Wirkungsgraden handelt es sich um die Mindestanforderung zur Erreichung der jeweiligen Effizienzklasse.

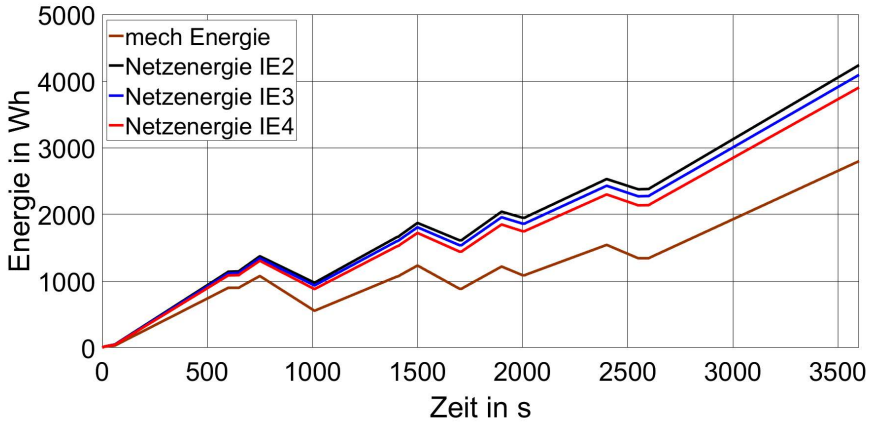


Bild 78: Vergleich der bezogenen Netzenergie der Materialförderanlage beim Einsatz von verschiedenen Motoren

Wird somit für ein Antriebssystem ein Motor mit einer höheren Effizienzklasse eingesetzt, so kann der Energieverbrauch reduziert werden. Durch die Reduzierung des Energieverbrauchs können auch die laufenden Kosten gesenkt werden. Allerdings sind Motoren mit höherer Effizienzklassen in der Anschaffung teurer, weshalb diese nur teilweise eingesetzt werden. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Berechnungsprogramm bietet die Möglichkeit auch diese Effekte zu berücksichtigen. So kann ein Antriebssystem mit Motoren der verschiedenen Effizienzklassen berechnet werden.

Als Beispiel dient die in Kapitel 5.2 berechnete Materialförderanlage. Anhand des Fahrprofils aus Bild 55 wird der Einfluss auf den Energieverbrauch durch den Einsatz von Motoren der verschiedenen Effizienzklassen untersucht. Wegen der Übersichtlichkeit wird nur die Antriebskonfiguration mit Rückspeiseeinheit dargestellt. Bild 78 zeigt den Vergleich der bezogenen Netzenergien mit IE2, IE3 und IE4 Motoren.

Es ist zu erkennen, dass eine signifikante Einsparung erzielt werden kann. Zur Verdeutlichung sind die Zahlen in der nachfolgenden Tabelle 36 nochmal dargestellt. Als Basis für die Einsparung dient der in der realen Anlage eingesetzte IE2 Motor. Für die Berechnung der Jahresenergie und der daraus resultierenden Einsparung wird, wie in Kapitel 7.1 beschrieben, von 16 Fahrzyklen am Tag und 300 Betriebstagen pro Jahr ausgegangen. Auch die Berechnung dieses Beispiels wurde aufgrund der aktuellen besonderen Situation mit zwei Strompreisen durchgeführt. Zum einem mit dem aktu-

ellen Industriestrompreis für kleine und mittlere Unternehmen von 54,9 ct/kWh und zum anderen mit dem Strompreis am Ende des Jahres 2021 von 21,38 ct/kWh [2]. Die Energiekosten wurden für die gesamte Betriebsdauer als konstant angesetzt.

Tabelle 36: Vergleich Energie- und Kosteneinsparung durch Motoren höherer Effizienzklassen am Beispiel Materialförderanlage

Effizienzklasse	IE2	IE3	IE4
Netzenergie pro Fahrzyklus in kWh	4,3 kWh	4,1 kWh	3,9 kWh
Netzenergie pro Jahr in kWh	20.400 kWh	19.632 kWh	18.720 kWh
Energieeinsparung pro Jahr in kWh	Basis	768 kWh	1.680 kWh
Kosteneinsparung pro Jahr in € (bei einem Strompreis von 21,38 ct/kWh)	Basis	164 €	359 €
Kosteneinsparung pro Jahr in € (bei einem Strompreis von 54,9 ct/kWh)	Basis	422 €	922 €

Alle drei Motoren werden als 7,5 kW Motoren ausgeführt, für die Kostenrechnung wird von folgenden, in Tabelle 37 dargestellten, Investitionskosten für die Motoren ausgegangen.

Tabelle 37: Vergleich der Investitionskosten von 7,5 kW Motoren in verschiedenen Effizienzklassen

Effizienzklasse	IE2	IE3	IE4
Investitionskosten in €	950 €	1.450 €	2.100 €

Anhang dieser Zahlen lässt sich die Amortisationszeit für die Investition der teureren Motoren einfach berechnen. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle 38 zusammengefasst dargestellt. Als Basis wird der in der realen Anlage verwendete IE2 verwendet.

Tabelle 38: Amortisationszeit der Investition von Motoren mit höherer Effizienz am Beispiel Materialförderanlage

Effizienzklasse	IE2	IE3	IE4
Amortisationszeit in Jahren (bei einem Strompreis von 21,38 ct/kWh)	Basis	3,3 Jahre	3,5 Jahre
Amortisationszeit in Jahren (bei einem Strompreis von 54,9 ct/kWh)	Basis	1,2 Jahre	1,3 Jahre

Anhand der Auswertungen ist zu sehen, dass die Amortisationszeiten für Motoren mit höherer Effizienz in dem gewählten Beispiel sehr kurz sind. Dies wird auch durch Untersuchungen des ZVEI in der Studie zu Energieeffizienz mit elektrischen Antrieben [3] bestätigt.

Zudem kann festgestellt werden, dass die Investitionskosten nur einen Bruchteil der Kosten eines Motors über die Lebensdauer verursachen. In dem hier dargestellten Beispiel betragen die Stromkosten eines IE2 Motors im Jahr mehr als das fünffache der Investitionskosten. In [95] ist nachzulesen, dass bei einem 11 kW Elektromotor mit 2.000 Betriebsstunden pro Jahr der Energiekostenanteil über die Lebensdauer 95,2 Prozent beträgt. Dies steht 3,8 Prozent Investitionskosten und 1 Prozent Wartungskosten gegenüber, wenn von einer durchschnittlichen Lebensdauer von 12 Jahren ausgegangen wird. Sind die Betriebsstunden eines Motors noch höher, so steigt der Energiekostenanteil an den Gesamtkosten noch weiter an.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, um die Energieeffizienz verschiedener Antriebstopologien einfacher und genauer gegenüber dem Stand der Technik vorausberechnen zu können. Neben der Energieeffizienz werden zudem noch die CO₂ Einsparungen und die Kosteneffizienz von Systemen betrachtet, so dass im Zuge der Auslegung eine gesamtheitliche Analyse eines Antriebssystems durchgeführt werden kann. Hierfür wurde ein Berechnungsprogramm entwickelt, welches mit der Eingabe von wenigen und zugänglichen Daten eine automatisierte Berechnung ermöglicht.

Aufgrund der Vielfalt bei mechatronischen Antriebssträngen wurde das Berechnungsprogramm so gestaltet, dass zum einen bei der Eingabe gewisse Vorgaben gemacht werden können, zum anderen aber auch verschiedene Konfigurationen automatisch vom Programm berechnet werden, wie zum Beispiel die Polzahl des Motors oder den Einsatz eines Getriebes, um nur einige zu nennen.

Zur Berechnung der Verluste eines Antriebsstranges wurden die einzelnen Verlustmechanismen beziehungsweise die Einflüsse von Betriebsstrategien auf die Verluste untersucht.

Einen wichtigen Aspekt der Arbeit bildet die Untersuchung der Verluste in den einzelnen Komponenten eines mechatronischen Antriebsstranges und die Bewertung der Genauigkeit der Verlustberechnung nach Norm EN 50598-2:2014. Die Untersuchungen ergaben, dass die Verlustberechnung nach Norm gerade im Bereich der Frequenzumrichter nur unzureichend umgesetzt ist und für das Berechnungsprogramm nicht genau genug abbildet. Daher wurden verbesserte Berechnungsmodelle untersucht und diese mit Messreihen verifiziert. Dadurch wurde eine Berechnungsmethode entwickelt, welche es erlaubt die Verluste in den einzelnen Komponenten eines Frequenzumrichters genau vorauszuberechnen. Es hat sich gezeigt, dass die Verlustberechnung der Motoren gemäß Norm EN 60034-30-1 hinreichend genau abbildet und wird deshalb im Berechnungsprogramm entsprechend verwendet. Da allerdings nur 16 Arbeitspunkte für ein Betriebskennfeld abgebildet sind, wurde für das Berechnungsprogramm eine Interpolation zwischen den Arbeitspunkten entwickelt, um alle auftretenden Lastpunkte berechnen zu können.

Um die Problematik der hohen zeitlichen Diskrepanz zwischen den im Nanosekunden Bereich auftretenden physikalischen Effekten, welche für die Verlustentstehung in Leistungshalbleitern ursächlich sind und der Berechnung von Fahrprofilen über mehrere Stunden zu lösen, wurde die Berechnung in zwei Teile gegliedert. Zuerst werden von den einzelnen Komponenten Verlustkennfelder errechnet. Diese können dann für die Berechnung von Anlagen über längere Fahrprofile eingesetzt werden. So ist es möglich in wenigen Sekunden Simulationszeit exakte Verlustberechnungen von mehreren Stunden Betriebsdauer von Antriebssystemen durchzuführen.

Durch die Modularisierung des Berechnungsprogramms, in welchem jede Komponente eines Antriebsstranges als eigenes Element betrachtet wird, kann das Programm flexibel für verschiedenste Applikationen eingesetzt werden. Der Nutzer kann frei einstellen welche Komponenten der Antriebsstrang beinhalten soll, beziehungsweise welche nicht benötigt werden.

Der Hauptaspekt der Arbeit liegt auf der Integration von Kurzzeitspeichern zur Erhöhung der Energieeffizienz in elektrischen Antriebssträngen. Hierfür wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Konzept entwickelt. Dieses Konzept wurde anschließend soweit ausgearbeitet, dass es am Prüfstand messtechnisch verifiziert werden konnte. Mit Hilfe des entwickelten Systems kann Bremsenergie im Antriebssystem selbst gespeichert werden und somit bei darauffolgenden Beschleunigungsphasen wieder genutzt werden. Dies sorgt vor allem bei bestehenden Antriebssystemen ohne Netzspeisung für erhebliche Effizienzsteigerungen. Durch diese Maßnahme kann nicht nur die Energieeffizienz, sondern auch die Kosteneffizienz erheblich gesteigert werden. Daneben kann noch eine deutliche Verbesserung der CO₂ Bilanz erreicht werden. Der ins Antriebssystem integrierbare Speicher wurde ebenfalls ins Berechnungsprogramm aufgenommen, so dass die Vorteile der Energiespeicherung im Antriebssystem bereits bei der Auslegung oder vor der Nachrüstung genau berechnet werden können. Zusätzlich zu den energetischen Aspekten werden auch die Einsparungen beziehungsweise wirtschaftlichen Aspekte im Berechnungsprogramm berücksichtigt.

9 Summary and outlook

As part of this work, a methodology was developed to be able to predict the energy efficiency of different drive topologies more easily and more accurately compared to the state of the art. In addition to energy efficiency, carbon dioxide savings and the cost efficiency of systems are also considered, so that a holistic analysis of a drive system can be carried out as part of the design. For this purpose, a calculation program was developed which enables an automated calculation by entering a small amount of accessible data.

Due to the variety of mechatronic drive trains, the calculation program was designed in such a way that, on the one hand, certain specifications can be made when entering, but on the other hand, various configurations are automatically calculated by the program, such as the number of poles of the motor or the use of a gearbox, to name just a few.

To calculate the losses of a drive train, the individual loss mechanisms and the influences of operating strategies on the losses were examined.

An important aspect of the work is the investigation of the losses in the individual components of a mechatronic drive train and the assessment of the accuracy of the loss calculation according to the EN 50598-2:2014 standard. The investigations showed that the loss calculation according to the standard is only inadequately implemented, especially in the area of frequency converters, and does not reflect it accurately enough for the calculation program. Therefore, improved calculation models were examined and these were verified with series of measurements. This resulted in the development of a calculation method that allows the losses in the individual components of a frequency converter to be precisely calculated in advance. It has been shown that the loss calculation of the motors in accordance with the EN 60034-30-1 standard provides sufficient accuracy and is therefore used accordingly in the calculation program. However, since only 16 operating points are shown for an operating map, an interpolation between the operating points was developed for the calculation program in order to be able to calculate all load points that occur.

In order to solve the problem of the high time discrepancy between the physical effects occurring in the nanosecond range, which are the cause of the loss in power semiconductors, and the calculation of driving profiles over several hours, the calculation was divided into two parts. First, loss

maps are calculated for the individual components. These can then be used to calculate systems over longer driving profiles. This makes it possible to carry out exact loss calculations of several hours of operating time for drive systems in just a few seconds of simulation time.

By modularizing the calculation program, in which each component of a drive train is viewed as a separate element, the program can be used flexibly for a wide variety of applications. The user can freely set which components the drive train should contain or which are not needed.

The main aspect of the work is the integration of short-term storage to increase energy efficiency in electric drive trains. A concept was developed for this purpose as part of this work. This concept was then developed to such an extent that it could be verified using measurements on the test bench. With the help of the developed system, braking energy can be stored in the drive system itself and can therefore be used again during subsequent acceleration phases. This ensures significant increases in efficiency, especially in existing drive systems without energy recovery. This measure can significantly increase not only energy efficiency, but also cost efficiency. In addition, a significant improvement in the CO₂ balance can be achieved. The memory that can be integrated into the drive system was also included in the calculation program, so that the advantages of energy storage in the drive system can be precisely calculated during the design or before retrofitting. In addition to the energy aspects, the savings and economic aspects are also taken into account in the calculation program.

Literaturverzeichnis

- [1] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, „BDEW-Strompreisanalyse“, 30 Juli 2020. [Online]. Available: https://www.bdew.de/media/documents/201013_BDEW-Strompreisanalyse_Juli_2020-Haushalte_und_Industrie.pdf. [Zugriff am 28 Dezember 2020].
- [2] „BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, "BDEW Strompreisanalyse",“ 31 Dezember 2022. [Online]. Available: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>. [Zugriff am 02 Januar 2023].
- [3] Elektronikindustrie, ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und, „Energieeffizienz mit elektrischen Antrieben“, Frankfurt am Main, 2017.
- [4] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., „Entwicklung des Nettostromverbrauch in Deutschland“, Berlin, 2018.
- [5] G. Koschnick und B. Sattler, „Energieeffizienz mit elektrischen Antrieben“, ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V., Frankfurt am Main, 2017.
- [6] A. Burke, „Energy Storage: Ultracapacitor“, *Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles*, p. 36, 2023.
- [7] M. Sterner und I. Stadler, *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*, Heidelberg: Springer-Vieweg, 2017.
- [8] P. Kurzweiler und O. Dietlmeier, *Elektrochemische Speicher: Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [9] M. Glasl, „Fahr-dynamische Grundlagen der energieeffizienten Antriebsauslegung für elektrische Schienenfahrzeuge des Nahverkehrs“, *Elektrotechnik & Informationstechnik*, Nr. 134/2, p. 8, 2027.
- [10] H. Ibrahim, A. Ilinca und J. Perron, „Comparison and Analysis of Different Energy Storage Techniques Based on their Performance Index“, in *Electrical Power Conference*, Canada, 2007.
- [11] A. Salimbeni, M. Porru, A. Damiano und A. Serpi, „A Smart Energy Management System of a Higly-Integrated Battery-Ultracapacitor System“, in *2020 2nd IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems*, Cagliari, Italy, 2020.

- [12] M. Robayo, M. Abusara, M. Mueller und S. Sharkh, „A Smart Energy Management System for Battery-Supercapacitor in Electric Vehicles based on the Discrete Wavelet Transform and Deep Learning,“ in *IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics*, Delft, Netherlands, 2020.
- [13] V. Castiglia, *Hybrid Energy Storage Modelling and Innovative Solutions for Energy Storage Management Systems*, Palermo, Italy, 2022.
- [14] T. Ponsati, *Modular platform for research in microgrids*, Barcelona, Spain, 2022.
- [15] H. Chen, „Model Predictive Control Based Real-time Energy Management for Hybrid Energy Storage System,“ *IEEE CSEE Journal of Power and Energy Systems*, Bd. 7, Nr. 4, 2021.
- [16] J. Liebl, M. Lederer, K. Rohde-Brandenburger, J.-W. Biermann, M. Roth und H. Schäfer, *Energiemanagement im Kraftfahrzeug*, Vieweg Springer, 2014.
- [17] Siemens AG, „Engineering Tools: Effiziente Auswahl für Umrichter und Motoren,“ Siemens, [Online]. Available: <https://www.siemens.com/de/de/produkte/antriebstechnik/auswahl-und-engineering-tools.html>. [Zugriff am 03 10 2023].
- [18] ABB, [Online]. Available: <https://selector.drivesmotors.abb.com/?lang=de-DE>. [Zugriff am 03 10 2023].
- [19] SEW, „Antriebsauslegung,“ [Online]. Available: <https://www.sew-eurodrive.de/os/ds/antriebsauslegung/dateneingabe/fahrwagen>. [Zugriff am 03 10 2023].
- [20] S. Feng, W. Wei, Y. Gu, X. Huang und J. Shen, „Energy Consumption Analysis of a Novel Two-speed e-Powertrain System for Electric Vehicle,“ in *IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition - Asia*, Singapore, 2021.
- [21] M. Novak, J. Novak, J. Morkus und O. Sivkov, „Energy Consumption Calculation of an Electric Bus with a Variable or Fixed Gearbox,“ in *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisabon, 2019.
- [22] A. Thanheiser, *Energetische Modellierung und Echtzeitsimulation von elektrischen Fahrzeugantrieben*, Dissertation TU München, 2015.
- [23] S. Yuan und W. Hofmann, „Systematische Identifizierung energieeffizienter Antriebskonfigurationen in Elektrofahrzeugen,“ *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2022.

- [24] W. Strasser und H. Neudorfer, „Modellierung und Simulation der Reichweite eines Elektro-Fahrzeugs,“ *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2022.
- [25] K. Benath, Analyse und Auslegung energieeffizienter Servoantriebssysteme, Dissertation TU Dresden: Shaker, 2017.
- [26] N. Uchiyama, K. Goto und S. Sano, „Analysis of energy consumption in fundamental motion of industrial machines and experimental verification,“ in *2015 American Control Conference (ACC)*, Chicago, 2015.
- [27] J. Eidam, Beurteilung und Simulation des Betriebsverhaltens von lagegeregelten elektrischen Direktantrieben als "Elektronische Kurvenscheiben", VDI Verlag, 1997.
- [28] H. Grzonka, Entwicklung von Servoantriebssystemen in Verarbeitungsmaschinen - Methoden zur Strukturauswahl und Dimensionierung, VDI Verlag, 2002.
- [29] W. Hofmann, „Energieoptimale Stellvorgänge und deren Auswirkung auf die Auslegung von rotatorischen und linearen Stellantrieben,“ *ETG Fachbericht 113, Elektrische-mechanische Antriebsysteme*, pp. 235 - 240, 2008.
- [30] T. Minav, P. Immonen, J. Pyrhönen und L. Laurila, „Effect of PMSM sizing on the energy efficiency of an electro-hydraulic forklift,“ in *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, Rome, 2010.
- [31] D. Bauer, Verlustanalyse bei elektrischen Maschinen für Elektro- und Hybridfahrzeuge zur Weiterverarbeitung in thermischen Netzwerkmodellen, Stuttgart: Springer, 2019.
- [32] S. Stipetic und J. Goss, „Calculation of efficiency maps using scalable saturated flux-linkage and loss model of a synchronous motor,“ in *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, 2016.
- [33] M. Reinlein, Simulation der Eisenverluste und des Magnetisierungsbedarfs unter Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen in Induktionsmaschinen, Phd thesis, Kaiserslautern: Shaker, 2018.
- [34] E. Lamprecht, Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator- Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen, Erlangen: Meisenbach, 2014.
- [35] M. Hoppert, Analytische und experimentelle Untersuchungen zum Wirkungsgradverhalten von Achsgetrieben, Ilmenau, 2016.

- [36] K. Bradley, W. Cao, J. Clare und P. Wheeler, „Predicting Inverter-Induced Harmonic Loss by Improved Harmonic Injection,“ *IEEE Transactions on power electronics*, Bd. 5, Nr. 23, pp. 2619 - 2624, 2008.
- [37] A. Kremser, *Elektrische Maschinen und Antriebe*; 3. Auflage, Taubner, 2008.
- [38] M. Kazmierkowski, „Control in Power Electronics,“ *Elsevier Science*, 2002.
- [39] S. Hörlin, A. Dietz, J. Franke und M. Hubert, „Energetic simulation of complex mechatronic drive systems over complete drive cycles,“ in *Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production*, Nürnberg, 2015.
- [40] S. Hörlin, N. Graß, A. Dietz, S. Rehmet und C. Raum, „High voltage battery storage system for dual use,“ in *2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Vancouver, 2014.
- [41] S. Hörlin, N. Graß, A. Dietz, S. Rehmet und C. Raum, „Multi use Battery storage System,“ in *iSEneC 2016*, Nürnberg, 2016.
- [42] S. Hörlin, A. Dietz, N. Graß, R. Gross und B. Schultes, „Modulares Batteriespeichersystem zum dual use,“ in *NEIS 2014 Konferenz*, Hamburg, 2014.
- [43] J. Maurer, „Lastunabhängige Verzahnungsverluste schnelllaufender Stirnradgetriebe,“ Diss. Universität Stuttgart, 1994.
- [44] M. Pehnet, *Energieeffizienz - Ein Lehr- und Handbuch*, Springer, 2021.
- [45] M. Günther, *Energieeffizienz durch erneuerbare Energien*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [46] M. Blesl und A. Kessler, *Energieeffizienz in der Industrie*, Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [47] M. Dehli, *Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe*, Wiesbaden: Springer, 2020.
- [48] W. Eichhorn, *Zur deutschen Energiewirtschaft an der Schwelle des neuen Jahrhunderts*, Leipzig: B.G. Teubner Stuttgart, 2000.
- [49] M. Albach, *Elektrotechnik 3. Auflage*, München: Pearson, 2011.
- [50] T. Bülo, „Methode zur Evaluation leistungselektronischer Schaltungstopologien für Anwendungen in dezentralen Netzeinspeisern kleiner Leistung,“ Diss. Universität Kassel, 2010.
- [51] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky und T. Reimann, *Applikationshandbuch Leistungshalbleiter Semikron*, Nürnberg: ISLE Verlag, 2010.

- [52] J. Specovius, Grundkurs Leistungselektronik, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2008.
- [53] A. Stahl, „Beiträge zur Bestimmung und Minimierung der Verlustleistung des Matrixumrichters,“ Diss. Karlsruher Instituts für Technologie, 2016.
- [54] R. Fischer, Das Getriebebuch, Wiesbaden: Springer Verlag, 2016.
- [55] A. Binder, Elektrische Maschinen und Antriebe, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2012.
- [56] G. Müller und B. Ponick, Grundlagen elektrischer Maschinen, Weinheim: Wiley-VCH, 2014.
- [57] G. Müller, K. Vogt und B. Ponick, Berechnung elektrischer Maschinen, Weinheim: WILEY-VCH, 2008.
- [58] C. Steinmetz, „On the law of hysteresis (originally published in 1892),“ *Proceedings of the IEEE*, vol. 72, no. 2, 1984.
- [59] R. Richter, Elektrische Maschinen; Erster Band; Allgemeine Berechnungselemente; Die Gleichstrommaschine, Basel und Stuttgart: Birkhäuser Verlag, 1967.
- [60] G. Bertotti, „Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials,“ Nr. vol. 57, *Journal of Applied Physics* vol. 57 1985.
- [61] S. Jacobs, D. Hectors, F. Henrotte, M. Hafner, M. Garcia, K. Hameyer und P. Goes, „Magnetic material optimization for hybrid vehicle PMSM drives,“ *Word Electric Vehicle Journal*, Nr. Vol. 3, 2009.
- [62] M. Reinlein, „Bestimmung der Eisenverluste der Grundschwingung bei hohen magnetischen Feldstärken von Asynchronmaschinen,“ Nürnberg, 2012.
- [63] A. Hoffmann, „Berechnung und Messung von umrichterbedingten Zusatzverlusten bei Asynchronmaschinen,“ Nürnberg, 2013.
- [64] M. Doppelbauer, „Zusatzverluste in Asynchronmaschinen,“ [Online]. Available: http://www.ewh.ieee.org/r8/germany/ias-pels/m_bruchsal/ieee_sew_zusatzverluste_in_drehstrom_asynchronmaschinen.pdf. 2004. [Zugriff am 18 12 2017].
- [65] A. Jimoh, R. Findlay und M. Poloujadoff, „Stray losses in induction machines,“ *Part I and Part II. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, pp. Vol. PAS-104, No.6, 1985.
- [66] K. Schwarz, „Survey of basic stray losses in squirrel-cage induction motors,“ *Proc. IEE*, pp. Vol. III, No. 9, 1964.

- [67] U. Vollmer, „Entwurf, Auslegung und Realisierung eines verlustoptimierten elektrischen Antriebs für Hybridfahrzeuge,“ 2012.
- [68] T. Gerlach, L. Rabenstein, A. Dietz, A. Kremser und D. Gerling, „Determination of eddy current losses in permanent magnets of SPMSM with concentrated windings: A hybrid loss calculation method and experimental verification,“ in *International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monaco, 2018.
- [69] T. Gerlach, R. Steckel, T. Hubert und A. Kremser, „Eddy current loss analysis in permanent,“ in *Electric Drive Production Conference (E|DPC)*, Nürnberg, 2016.
- [70] H. Kerle, *Getriebetechnik*, Wiesbaden: Springer, 2015.
- [71] H. Linke, *Stirnradverzahnungen*. Bd. 2, Hanser, 2010.
- [72] Wikimedia, „Epicyclic gearing,“ [Online]. Available: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/74/Planeetwielmechanisme.gif>. [Zugriff am 18.12.2017].
- [73] E. Kirchner, *Leistungsverzweigung in Fahrzeuggetrieben*, Berlin: Springer, 2007.
- [74] M. Sterner und I. Stadler, *Energiespeicher Bedarf-Technolgien-Integration*, Berlin: Springer, 2014.
- [75] P. Keil und A. Jossen, „Aufbau und Parametrierung von Batteriemodellen,“ in *19. DESIGN&ELEKTORNIK-Entwicklungsforum Batterien & Ladekonzepte*, München, 2012.
- [76] „Kokam SLPB-Cell-Brochure,“ [Online]. Available: <https://kokam.com/wp-content/uploads/2016/03/SLPB-Cell-Brochure.pdf>. [Zugriff am 11. November 2020].
- [77] Audi AG, „Rekuperation: Wer bremst, gewinnt,“ [Online]. Available: <http://www.audi.de/de/brand/de/neuwagen/layer/technologien/rekuperation.html>. [Zugriff am 23. Juni 2016].
- [78] VDE, „Rückgewinnung elektrischer Energie: Durch die Umwandlung von Bewegungsenergie und Wärmeenergie in elektrische Energie lassen sich die erzielbaren Reichweiten erhöhen,“ [Online]. Available: <https://www.vde.com/de/e-mobility/fahrzeugtechnik/energieerueckgewinnung/seiten/default.aspx>. [Zugriff am 12. Juni 2016].
- [79] A. Binder, *Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen, Betriebsverhalten.*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.

- [80] H. Giersch, H. Harthus und N. Vogelsang, Elektrische Maschinen: Prüfen, Normung, Leistungselektronik, 5. Auflage, Stuttgart: Teubner, 2003.
- [81] D. Unger, Aufzüge und Fahrtreppen: Ein Anwenderhandbuch, 2nd ed., Berlin: Springer Vieweg, 2015.
- [82] Schindler, „Bis zu 40 Prozent Einsparung durch Energierückspeisung: Aufzüge, die Strom produzieren / Regenerativer Antrieb ist nicht immer rentabel,“ [Online]. Available: <http://www.schindler.com/de/internet/de/ueber-schindler/Presse/2012/aufzuege--die-strom-produzieren.html>. [Zugriff am 12 Juli 2016].
- [83] ABB, „Vollintegrierte, rückspeisefähige Frequenzumrichter im Leistungsbereich 7,5 - 110 kW: In die neuen kompakten Frequenzumrichter der Serie ABB Industrial Drive können eine Vielzahl von Leistungsmerkmalen und Optionen integriert werden,“ [Online]. Available: <http://www.abb.de/cawp/seitp202/e86a674f60a4cb8dc1256f9000508e4e.aspx>. [Zugriff am 3 August 2016].
- [84] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie, „Elektroindustrie in Zahlen,“ [Online]. Available: <http://www.zvei.org/Publikationen/ZVEI-Elektroindustrie-in-Zahlen-2019.pdf>. [Zugriff am 4 August 2020].
- [85] ABB, „Vollintegrierte, rückspeisefähige Frequenzumrichter im Leistungsbereich 7,5 - 110 kW: In die neuen kompakten Frequenzumrichter der Serie ABB Industrial Drive können eine Vielzahl von Leistungsmerkmalen und Optionen integriert werden,“ [Online]. Available: <http://www.abb.de/cawp/seitp202/e86a674f60a4cb8dc1256f9000508e4e.aspx>. [Zugriff am 02 August 2016].
- [86] TU München, Lehrstuhl für elektrische Energiespeichertechnik, [Online]. Available: <https://docplayer.org/24464290-Ueberblick-ueber-moderne-batteriespeicher-und-deren-zukunft.html>. [Zugriff am 29 Dezember 2020].
- [87] A. Buchroithner, Schwungradspeicher in der Fahrzeugtechnik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [88] R. Zahoransky, Energietechnik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [89] ATZ online, [Online]. Available: <https://www.springerprofessional.de/automobil--motoren/schwungrad-speicher-im-porsche-911-gt3-r-hybrid-mit-potenzial-fu/6578938>. [Zugriff am 03 04 2017].
- [90] Amber Kinetics, [Online]. Available: <http://amberkinetics.com/>. [Zugriff am 03 04 2017].

- [91] H. Schmidt-Walter, „Dimensionierung von Schaltnetzteilen,“ [Online]. Available: http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/smps/abw_smps.html. [Zugriff am 12 10 2016].
- [92] „Umweltbundesamt "Energieversorgung Strom-Waermeversorgung in Zahlen "Strommix",“ 2021. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Strommix>. [Zugriff am 05 Januar 2023].
- [93] „BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft "BDEW Strompreisanalyse Haushalte",“ 31 Dezember 2022. [Online]. Available: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>. [Zugriff am 05 Januar 2023].
- [94] Norm, *DIN EN 60034-30-1:2014-12*, Beuth Verlag, 2014.
- [95] Allianz für Nachhaltigkeit Niedersachsen, „Antriebstechnik wird immer effizienter,“ Hannover, 2013.
- [96] G. Bertotti, „Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials.,“ 1985.
- [97] S. Jacobs, „Magnetic material optimization for hybrid vehicle PMSM drives,“ 2009.
- [98] „Strompreis für die Industrie,“ BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, 22 08 2019. [Online]. Available: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/strompreis-fuer-die-industrie/>. [Zugriff am 03 01 2020].
- [99] „CO₂-Emissionen sinken weiter,“ Umwelt Bundesamt, 08 April 2020. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2019-co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom>. [Zugriff am 30 Dezember 2020].
- [100] A. Binder, „Potentials for energy saving with modern drive technology a survey,“ in *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM*, Ischia Italien, 2008.
- [101] „BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, "BDEW-Strompreisanalyse",“ [Online]. Available: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>. [Zugriff am 02 Januar 2023].

- [102] „BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, BDEW-Strompreisanalyse,“ [Online]. Available: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>. [Zugriff am 02 Januar 2023].
- [103] „BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Strompreis Haushalte Deutschland,“ 14 08 2019. [Online]. Available: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/strompreis-fuer-haushalte/>. [Zugriff am 03 01 2020].

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2025):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab.
1989. ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab.
1989. ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab.
1989. ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab.
1990. ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätsteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab.
1991. ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder.
1991. ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab.
1991. ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumformverhalten mit elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab.
1991. ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab.
1992. ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssystemen von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.
1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.
1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.
1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.
1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulnwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.
1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.
1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner
Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.
1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.
1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.
1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.
1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.
1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Mefseinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.
1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.
1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungsverfahren für thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.
1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.
1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.
2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.
2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen

LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen

LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern

FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Nегendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen

LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation

LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten

FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)

FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme

FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur

LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter

FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen

FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion

FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen

LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten

LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie

LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen

LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen

LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung

LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren - Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik

LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.
2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.
2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.
2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.
2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schal-tungsträger (3D-MID)

FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinforma-tion zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Pro-duktion

FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse prä-keramischer Polymere

LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Be-stückung permanent erregter Läu-fer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechum-formprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatroni-scherBaugruppen

FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessausle-gung für das Umformen lokal wär-mebehandelter Aluminiumplatin-en

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfä-higkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme

FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen von Kunststoffen

LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirk-medienbasierte Doppelblech-Um-formung von Magnesiumlegierun-gen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen ver-stärkter Blech-Rahmenstrukturen

LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinfluss-größen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Löt-prozessen in der Elektronikpro-duktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von mak-romechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze

FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließ-ortkurven bei erhöhten Tempera-turen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen

FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen

LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe

LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlflügeoperationen

LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte

FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion

FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahlfließschweißen

LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld

FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile

LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen

LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks

LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen

LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung

LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche

LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe

LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten

LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation

LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil

FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren

LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren

LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014. ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des Anlagenengineering
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärteprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feiblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller
Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig
Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl
Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold
Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger
Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement - Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann

Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung - Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller

Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidlinchverfahren

LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen

FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc

Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen

LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer

Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung

FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer

Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden

FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018.

ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserie-rohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz

Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation

LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl

Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile

LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner

Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher

FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm

Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge

LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer

Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenprinzip

LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp

Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzimpuls-Lasermaterialbearbeitung

LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißcrimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend
Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen
LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert
Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung
KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander
Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten
KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz
Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen
LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona
Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle
KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann
Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014
LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner
Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung
KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel
Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobiler Traktionsantriebe
FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel
Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderring-Lagern
KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle
Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation
FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf
Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari
Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production
FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand
Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining
FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl
Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks
FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger
Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren
FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter
Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion
KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer
Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess
LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer
Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen
FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross
Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung
REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker
Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung
LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied
Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production
FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein
Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axialschub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen –
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf
Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl
Hochfrequent fokusbandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen
Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian
Numerische Auslegung von Oberflächenmikrostrukturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß
Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machinelles Lernen und hyper-spektrale Bildgebung: Multi-Spektrale Endoskopie im Gastrointestinaltrakt für die Hyper-Spektrale Endoskopie LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaf

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen – Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-äquivalent opto-/elastofluidic in-vitro mikrophysiologische vaskuläre Modelle für translationale Studien optischer Biopsies LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-507-0.

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völk

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgerverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft
Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme
KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang
Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen
FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer
Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten
FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer
Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren
FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao
Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte
KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer
Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik
FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn
Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung
LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos
Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau
LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid
Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehsicken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen
LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg
Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial
LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl
Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlsschweißen
LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf
Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert
Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert
Einsatzpotenziale der Rotations-schneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel
Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt
Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf
Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzner
Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker
Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn
Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-615-2.

Band 417: Benjamin Lengenfelder

Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging

LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer

Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden

KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-621-3.

Band 419: Matthias Friedlein

Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte

FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-625-1.

Band 420: Thomas Stoll

Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramiken

FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-631-2.

Band 421: Eric Eschner

Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M

LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-633-6.

Band 422: Fanuel Mehari

Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.

LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-641-1.

Band 423: Uwe Leicht

Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen

LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-643-5.

Band 424: Thomas Braun

Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau

FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-653-4.

Band 425: Reinhardt Seidel

Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses

FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-651-0.

Band 426: Matthias Lenzen

Maßgeschneiderte Werkstoffcharakterisierung für die numerische Auslegung von Blechumformprozessen

LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-663-3.

Band 427: Matthias Graser

Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen

LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-666-4.

Band 428: Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugrobotersystem für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld

FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-668-8.

Band 429: Petar Vukovic

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungsautomatisierung

FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-673-2.

Band 430: Fabian Knieps

Finite Elemente Simulation dünnter Verpackungsstähle: Entwicklung einer geeigneten Charakterisierungs- und Validierungsstrategie

LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-689-3

Band 431: Julian Seßner

Multimodale Bildsegmentierung gering strukturierter Umgebungen für die Navigation am Beispiel eines Assistenzsystems für sehbeeinträchtigte Personen

FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-697-8

Band 432: Benjamin Samuel Lutz

Smart Manufacturing System for Process Optimization Regarding Deviations among Material Batches

FAPS, xix, 208 Seiten, 77 Bilder, 14 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-703-6

Band 433: Michael Jüttner

Bewertung von Kantenpressungen auf Basis von Simulationen mehrfach überrollter elasto-plastischer Kontakte

KTmfk, xii, 162 Seiten, 59 Bilder, 7 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-713-5.

Band 434: Sebastian Wiesenmayer

Untersuchungen zur Stoffflusssteuerung beim Fügen durch Umformen von hochfesten Aluminiumlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung

LFT, xii u. 197 Seiten, 81 Bilder, 19 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-715-9.

Band 435: Clara-Maria Kuball

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstellung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen

LFT, viii u. 180 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-717-3.

Band 436: Martin Roth

Sampling-based Tolerance-Cost Optimization: The Key to Optimal Tolerance Allocation

KTmfk, xxxvii u. 337 Seiten, 97 Bilder, 56 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-719-7.

Band 437: Stephan Schirdewahn

Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärteprozess durch Verwendung maßgeschneiderter laserimplantierter Werkzeuge

LFT, viii u. 177 Seiten, 63 Bilder, 7 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-721-0.

Band 438: Andreas Rohmoser
Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaarung Metall-Kunststoff
LFT, x u. 166 Seiten, 94 Bilder, 6 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-723-4.

Band 439: Andreas Selmaier
DMAICS-Zyklus zur Digitalisierung in produzierenden Unternehmen
FAPS, xv u. 185 Seiten, 73 Bilder, 19 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-733-3.

Band 440: Thomas Kistner
Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsicherheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Simulation
FMT, xiii u. 134 Seiten, 64 Bilder, 9 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-735-7.

Band 441: Fabian Dworschak
Selbstverstärkendes Lernen als Beitrag zur Automatisierung der Anpassungskonstruktion
KTmfk, x, 205 Seiten, 87 Bilder, 16 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-739-5.

Band 442: Martin Killmann
Vorspannung und Ermüdung von Kaltmassivumformwerkzeugen für unrunde Bauteilgeometrien
LFT, ix u. 160 Seiten, 85 Bilder, 6 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-741-8.

Band 443: Ann-Kathrin Wiemann
Beitrag zur Messunsicherheitsermittlung für die Messung großer Zahnräder zur Erweiterung des virtuellen Koordinatenmessgerätes der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
FMT, xxiv u. 133 Seiten, 41 Bilder, 22 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-747-0.

Band 444: Andreas Jobst
Eigenspannungen beim Voll-Vorwärts-Fließpressen – Entstehung, Einstellung und Stabilität
LFT, ix u. 162 Seiten, 89 Bilder, 5 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-749-4.

Band 445: Martin Anton Kraus
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchungen zum Kaltfließpressen kleinster metallischer Pin-Strukturen aus der Blechebene
LFT, x u. 191 Seiten, 64 Bilder, 10 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-757-9.

Band 446: Moritz Späth
Assessment of microcirculation by shifted position-diffuse reflectance imaging (SP-DRI)
LPT, xi u. 109 Seiten, 37 Bilder, 8 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-759-3.

Band 447: Benedikt Göddeke
Methode zur Auswahl eines alternativen Blechwerkstoffes für flexibel gewalzte und direkt warmumgeformte Karosseriestrukturbau-
teile
LFT, xvi u. 222 Seiten, 66 Bilder, 27 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-762-3.

Band 448: Jan Hafenecker
Systematische Untersuchung zur Blechumformung von Hybridbauteilen
LFT, xxi u. 173 Seiten, 78 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-764-7.

Band 449: Sven Wirsching
Numerische Optimierung von sekundären, geschmierten Punkt- und Ellipsenkontakten zur gezielten Auslegung von Rollenlagern
KTmfk, xxv u. 206 Seiten, 70 Bilder, 16 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-766-1.

Band 450: Tobias Lechler
Der Digitale Zwilling im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 83 Bilder, 4 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-691-6.

Band 451: Eva Russwurm
Kombinierte Material- und Energieflussimulation gleichstrombasierter, automatisierter Produktionsanlagen
FAPS, xvi u. 165 Seiten, 67 Bilder, 13 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-770-8.

Band 452: Janik Schaude
Untersuchungen zur rasterkraft- und konfokalmikroskopischen Charakterisierung nanometrologischer Referenzkörper
FMT, x u. 167 Seiten, 74 Bilder, 4 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-776-0.

Band 453: Philipp Bräuer
Nahinfrarot-Laser-Strukturierung und nasschemische Metallisierung von Aluminiumoxid mittels Laser-Absorptionsschicht
FAPS, xx u. 152 Seiten, 55 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-780-7.

Band 454: Andreas Michael Müller
Definition and applications of the spatially discrete metrological descriptor framework for triangle mesh geometry data in 3D coordinate metrology
FMT, x u. 220 Seiten, 75 Bilder, 16 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-782-1.

Band 455: Sina Martin
Einstellung anisotroper Eigenschaften dielektrischer Elastomersysteme mittels eines selektiven Druckverfahrens
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 76 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-789-0.

Band 456: Manuel Reck
Grundlegendes Prozessverständnis zur Herstellung von Bauteilen mit texturierten Oberflächen durch Mikroprägen in einem kombinierten Umformprozess
LFT, ix u. 170 Seiten, 83 Bilder, 10 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-798-2.

Band 457: Simone Neermann
Untersuchung photonischer Sinterverfahren und Entwicklung eines neuen elektrischen Messverfahrens zur Qualifizierung der Sinterung gedruckter Elektronik
FAPS, xix u. 145 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2025. ISBN 978-3-96147-800-2.

Band 458: Christian Witzgall

Berücksichtigung vorausgegangener Ermüdungsschädigung in der Crashesimulation kurzfaserverstärkter Thermoplaste
KTmfk, xxiv u. 201 Seiten, 109 Bilder, 19 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-802-6.

Band 459: Lorenz Butzhammer

3-D-Scantrajektorien für die dimensionelle Röntgen-Computertomographie durch adaptive Messobjektneigung
FMT, xvi u. 212 Seiten, 81 Bilder, 2 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-812-5.

Band 460: Benjamin Gerschütz

Identifikation von Anwendungsfällen und Integration datengetriebener Methoden im Produktentwicklungsprozess
KTmfk, xi u. 209 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-814-9.

Band 461: Andreas Winkler

Numerische Verschleißmodellierung von trocken-, misch- und grenzreibungsbehafteten Wälzkontakten
KTmfk, xx u. 263 Seiten, 118 Bilder, 30 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-816-3

Band 462: Barbara Hansen

Methode zur Berücksichtigung von Schwankungen der tribologischen Halbzeugeigenschaften für die umformtechnische Herstellung von Karosseriebauteilen im Serienprozess
LFT, x u. 163 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-820-0

Band 463: Sebastian Hörlin

Integration von Kurzzeitspeichern zur Erhöhung der Energieeffizienz von elektrischen Antriebssträngen FAPS, xxiii u. 155 Seiten, 78 Bilder, 38 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-824-8

Abstract

As part of this work, a methodology was developed to calculate the energy efficiency of different drive topologies more simply and accurately in advance compared to the state of the art. In addition to energy efficiency, the CO₂ savings and cost efficiency of systems are also considered so that a holistic analysis of a drive system can be carried out during the design phase. A calculation program was developed for this purpose, which enables an automated calculation with the input of a small amount of accessible data.

To calculate the losses of a drivetrain, the individual loss mechanisms and the influences of operating strategies on the losses were examined.

The main aspect of the work is the integration of short-term storage systems to increase energy efficiency in electric powertrains. A concept was developed for this purpose as part of this work. This concept was then elaborated to such an extent that it could be verified by measurement on the test bench. With the help of the developed system, braking energy can be stored in the drive system itself and thus reused during subsequent acceleration phases. This leads to considerable increases in efficiency, particularly in existing drive systems without regenerative braking. This measure can not only significantly increase energy efficiency, but also cost efficiency. A significant improvement in the CO₂ balance can also be achieved. In addition to the energy aspects, the savings and economic aspects are also taken into account in the calculation program.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, um die Energieeffizienz verschiedener Antriebstopologien einfacher und genauer gegenüber dem Stand der Technik vorausberechnen zu können. Neben der Energieeffizienz werden zudem noch die CO₂-Einsparungen und die Kosteneffizienz von Systemen betrachtet, so dass im Zuge der Auslegung eine gesamtheitliche Analyse eines Antriebssystems durchgeführt werden kann. Hierfür wurde ein Berechnungsprogramm entwickelt, welches mit der Eingabe von wenigen und zugänglichen Daten eine automatisierte Berechnung ermöglicht.

Zur Berechnung der Verluste eines Antriebsstranges wurden die einzelnen Verlustmechanismen beziehungsweise die Einflüsse von Betriebsstrategien auf die Verluste untersucht.

Der Hauptaspekt der Arbeit liegt auf der Integration von Kurzzeitspeichern zur Erhöhung der Energieeffizienz in elektrischen Antriebssträngen. Hierfür wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Konzept entwickelt. Dieses Konzept wurde anschließend soweit ausgearbeitet, dass es am Prüfstand messtechnisch verifiziert werden konnte. Mit Hilfe des entwickelten Systems kann Bremsenergie im Antriebssystem selbst gespeichert werden und somit bei darauffolgenden Beschleunigungsphasen wieder genutzt werden. Dies sorgt vor allem bei bestehenden Antriebssystemen ohne Netzurückspeisung für erhebliche Effizienzsteigerungen. Durch diese Maßnahme kann nicht nur die Energieeffizienz, sondern auch die Kosteneffizienz erheblich gesteigert werden. Daneben kann noch eine deutliche Verbesserung der CO₂-Bilanz erreicht werden. Zusätzlich zu den energetischen Aspekten werden auch die Einsparungen beziehungsweise wirtschaftlichen Aspekte im Berechnungsprogramm berücksichtigt.

ISBN 978-3-96147-824-8

