

Raoul Laribi

»Selbsteinstellende Regelung von Schwungmassenspeichersystemen in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen«



Raoul Laribi

»Selbsteinstellende Regelung von Schwungmassenspeichersystemen in industriellen
Gleichspannungszwischenkreisen«

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl^{1,2}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer^{1,3}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke⁴

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber^{1,2}

¹Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

²Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

³Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

⁴Institut für Photovoltaik (*ipv*) der Universität Stuttgart

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12
70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-1101
info@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2024

D 93

2024

Druck und Weiterverarbeitung:

Fraunhofer Verlag, Mediendiensteleistungen, Stuttgart, 2024
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.



Dieses Werk steht, soweit nicht gesondert gekennzeichnet, unter folgender Creative-Commons-Lizenz:
Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen
International 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0).

Selbsteinstellende Regelung von Schwungmassenspeichersystemen in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen

**Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung**

Vorgelegt von

**Raoul Laribi
aus Stuttgart**

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Tag der mündlichen Prüfung: 17.07.2024

Institut für Energieeffizienz in der Produktion
der Universität Stuttgart

2024

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart sowie am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA).

Mein Dank gilt allen voran Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer für die fachliche Förderung meiner Dissertation, den großen Gestaltungsspielraum und die wertvollen Anregungen in jeder Phase der Arbeit. Bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl bedanke ich mich für die Erstellung des Korreferats und die wissenschaftliche Begleitung der Arbeit. Bedanken möchte ich mich zudem bei Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Meinen Mentoren Dr.-Ing. Timm Kuhlmann, Dr.-Ing. Darian Andreas Schaab und Dr.-Ing. Sebastian Weckmann danke ich vielmals für die Förderung meiner persönlichen und fachlichen Entwicklung in der angewandten Forschung. Ihre Ratschläge zur Strukturierung, Ausarbeitung und Korrektur trugen maßgeblich zum Gelingen der Arbeit bei. Ein wichtiger Erfolgsfaktor war außerdem der fachliche Austausch mit meinen Kolleginnen und Kollegen am EEP und IPA, insbesondere Isabella Bianchini, Jonas Knapp, Dietmar Hölderle, Daniel Umgelter und Lukas Baur sowie mit meinen Projektpartnern Albrecht Dorsel, Julien Homeier und Slavi Warkentin. Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen Studenten Philipp Harscher, Alexander Pfau und Marius Finke für ihren Fleiß und Ideenreichtum beim Aufbau und der Inbetriebnahme des Gleichstromlabors sowie bei der Anfertigung ihrer wissenschaftlichen Arbeiten. Mein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Ekrem Köse und Markus Reichart für die freundschaftlichen Motivationsschübe im Laufe der Promotion.

Ich danke meinen Eltern für ihre liebevolle Erziehung. Sie ermöglichten mir, meinen Ausbildungsweg stets an meinen Vorlieben und Stärken zu orientieren. Mein größter Dank gebührt meiner Frau Sarah Laribi, welche mich auf diesem Weg bedingungslos unterstützt hat und mir den Antrieb zur erfolgreichen Fertigstellung der Arbeit verliehen hat.

Waiblingen, im Oktober 2023

Raoul Laribi

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	I
Symbolverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	XIX
Tabellenverzeichnis	XXXI
Kurzfassung.....	XXXV
Abstract	XXXVII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Problemstellung.....	4
1.3 Zielsetzung und Forschungsfrage	5
1.4 Wissenschaftstheoretische Positionierung und Struktur der Arbeit.....	7
2 Grundlagen	11
2.1 Industrielle Gleichspannungszwischenkreise	11
2.1.1 Definition von industriellen Gleichspannungszwischenkreisen	11
2.1.2 Gleichrichter	15
2.1.3 Gleichspannungszwischenkreis	19
2.1.4 Wechselrichter.....	20
2.1.5 Konstantleistungslasten	20
2.2 Schwungmassenspeichersysteme	24
2.2.1 Definition von Schwungmassenspeichersystemen	24
2.2.2 Einsatzoptionen von Stromspeichern	24
2.2.3 Technische Kennzahlen von Leistungsspeichern	25

2.2.4	PMSM als Schwungmassenspeicher	27
2.3	Regelungssysteme.....	33
2.3.1	Definition von Regelungssystemen.....	34
2.3.2	Güteforderungen an Regelungssysteme	40
2.3.3	Modellbildung und Systemidentifikation	46
2.3.4	Virtuelle Inbetriebnahme.....	51
2.3.5	Maschinelles Lernen	53
2.4	Zwischenfazit.....	55
3	Stand der Wissenschaft und Technik.....	57
3.1	Forschungsprojekte	57
3.2	Systematische Literaturrecherche	59
3.3	Bestehende Ansätze im Untersuchungsbereich	63
3.3.1	Erkennung und Prognose von Lastprofilen.....	63
3.3.2	Modellbildung und Systemidentifikation	68
3.3.3	Speicherregelung	73
3.4	Zwischenfazit.....	80
4	Anforderungen und Handlungsbedarf.....	83
4.1	Klassifikation der Anforderungen.....	83
4.1.1	Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich.....	83
4.1.2	Anforderungen an die Regelung	84
4.2	Handlungsbedarf	86
4.2.1	Ansätze zur Erkennung und Prognose von Lastprofilen	87
4.2.2	Ansätze zur Modellbildung und Systemidentifikation.....	87
4.2.3	Ansätze zur Speicherregelung.....	89

4.3	Zwischenfazit	94
5	Selbsteinstellende Regelung.....	97
5.1	Modellbildung und Systemidentifikation des Speichersystems	99
5.2	Voranalyse	104
5.3	Lastprofilerkennung.....	106
5.3.1	Anregungsüberwachung.....	107
5.3.2	Suchmaschine	109
5.4	Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters der Industriemaschine	116
5.4.1	Datenakquisition und Datenvorverarbeitung	118
5.4.2	Hypothese, Training und Test.....	122
5.5	Reglerentwurf	139
5.5.1	Impedanzbasierte Stabilitätsprüfung	140
5.5.2	Trajektorienvorgabe	148
5.6	Speicherregelung	156
5.7	Zwischenfazit	161
6	Fallbeispiele	163
6.1	Modellbildung und Systemidentifikation des Speichersystems	163
6.2	Voranalyse	164
6.3	Fallbeispiel Werkzeugmaschine.....	166
6.3.1	Lastprofilerkennung.....	166
6.3.2	Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters der Industriemaschine	170
6.3.3	Reglerentwurf.....	176
6.3.4	Speicherregelung.....	186

6.3.5	Fazit	199
6.4	Fallbeispiel Holzbearbeitungsmaschine	201
6.4.1	Lastprofilerkennung	201
6.4.2	Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters der Industriemaschine.....	204
6.4.3	Reglerentwurf	209
6.4.4	Speicherregelung	218
6.4.5	Fazit	229
6.5	Zusammenfassung der Fallbeispiele	230
7	Reflexion und kritische Würdigung.....	233
7.1	Bewertung der Anforderungserfüllung	233
7.1.1	Erfüllung der Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich	233
7.1.2	Erfüllung der Anforderungen an die Regelung	233
7.2	Beantwortung der Forschungsfragen.....	235
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	239
8.1	Grenzen der selbsteinstellenden Regelung.....	240
8.2	Weiterentwicklungsmöglichkeiten	242
9	Literaturverzeichnis.....	245
10	Anhang	283
10.1	Klassifikation von Gleichrichtern.....	283
10.2	Klassifikation von Speichersystemen	284
10.3	Weitere Anwendungsfälle von Stromspeichern	285
10.4	Klassifikation von Regelungssystemen.....	287
10.5	Klassifikation von Stabilitätskriterien	291

10.6	Klassifikation der Modellbildung	293
10.7	Klassifikation der Systemidentifikation	294
10.8	Rollenverständnis bei der virtuellen Inbetriebnahme.....	296
10.9	Klassifikation des maschinellen Lernens.....	297
10.10	Elemente laut DIN 66001	298
10.11	Parallelschaltung von Impedanzen	298
10.12	Technische Daten des Messsystems.....	301
10.13	Technische Daten des Schwungmassenspeichersystems.....	301
10.14	Technische Daten der Gleichrichter und Antriebslasten.....	303
10.15	Betreute studentische Arbeiten	305
10.16	Veröffentlichungen	306

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AC	Wechselstrom (engl. alternating current)
AFE	Aktiver Gleichrichter (engl. active front-end converter)
AIC	Aktiver Gleichrichter (engl. active infeed converter)
ANFIS	Adaptives Neuro-Fuzzy-Inferenzsystem
ASM	Asynchronmaschine
B6U	Diodengleichrichter
BPNN	Rückwärts fortschreitendes Neuronales Netzwerk (engl. back propagation neural network)
CCL	Konstantstromlast (engl. constant current load)
CIL	Konstantimpedanzlast (engl. constant impedance load)
CNC	Rechnergestützte numerische Steuerung (engl. computerized numerical control)
CNN	Faltende neuronale Netze (engl. convolutional neural networks)
CPL	Konstantleistungslast (engl. constant power load)
DC	Gleichstrom (engl. direct current)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DLC	Doppelschichtkondensator (engl. double-layer capacitor)

DP	Dynamische Programmierung
EKF	Erweitertes Kalman-Filter
EMK	Elektromotorische Kraft
FM	Funktionsmodul
GM	Amplitudenreserve (engl. gain margin)
GMPM	Amplituden- und Phasenreserve (engl. gain margin phase margin)
GMV	Verallgemeinerter Minimum-Varianz-Regler
IGBT	Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode (engl. insulated-gate bipolar transistor)
ILC	Iterativ lernende Regelung (engl. iterative learning control)
IMC	Inneres-Modell-Prinzip
KERS	System zur Rückgewinnung kinetischer Energie (engl. kinetic energy recovery system)
LSTM	Neuronale Netze mit langem Kurzzeitgedächtnis (engl. long short-term memory networks)
LTI-System	Linear zeitinvariantes System (engl. linear time invariant system)
MIAC	Adaptive Regelung ohne Vergleichsmodell oder selbsteinstellende Regelung (engl. model identification adaptive control)
MPC	Modellprädiktive Regelung (engl. model predictive control)
MRAC	Adaptive Modell-Referenz-Regelung (engl. model reference adaptive control)

NC	Numerische Steuerung (engl. numerical control)
NRMSE	Normalisierte Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (engl. normalized root mean square error)
OEM	Erstausstatter (engl. original equipment manufacturer)
P-/ I-/ D-Regler	Proportional-/ Integral-/ Differential-Regler
PM	Phasenreserve (engl. phase margin)
PMSM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine
PRBS	Pseudo-Rausch-Binär-Signale (engl. pseudo random binary sequence)
PT1	Verzögerungsglied erster Ordnung
RC	Repetitive Regelung (engl. repetitive control)
RMKQ	Rekursive Methode der kleinsten Quadrate
SC	Superkondensator (engl. supercap, supercapacitor)
SCADA	Überwachung, Steuerung und Datenerfassung (engl. supervisory control and data acquisition)
SMSP	Schwungmassenspeichersystem
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
U-BBC	Back-to-Back U-Umrichter
UC	Ultrakondensator (engl. ultracapacitor)
UF	Unterfunktion
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung

VIBN Virtuelle Inbetriebnahme

VSC Aktiver Gleichrichter (engl. voltage source converter)

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	%	Anpassungsgüte
a_1	-	Koeffizienten eines Polynoms
a_0, a_1, a_2	$\frac{\text{Nm}}{\left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^d}$	Polynomkoeffizienten des Reibmoments mit dem Grad d
B	-	Halbe Rahmenbreite des Savitzky-Golay-Filters
c	-	Zielgröße eines Regelungssystems
\tilde{C}	F	Schätzwert der Zwischenkreiskapazität
\tilde{C}_g	F	Schätzwert der Zwischenkreiskapazität des Gleichrichters
C_g	F	Zwischenkreiskapazität des Gleichrichters
C_{gDB}	F	Zwischenkreiskapazität des Gleichrichters laut Datenblatt
\tilde{C}_l	F	Schätzwert der Zwischenkreiskapazität der Konstantleistungslast
C_l	F	Zwischenkreiskapazität der Konstantleistungslast
C_{lDB}	F	Zwischenkreiskapazität der Konstantleistungslast laut Datenblatt
$\cos(\theta)$	-	Wirkfaktor
C_s	F	Zwischenkreiskapazität des Speicherumrichters

d	-	Prozessänderung eines Regelungssystems
d/dt	s	Differentialoperator der zeitlichen Ableitung
e	-	Regeldifferenz eines Regelungssystems
E	-	Zentrumspunkt
f_a	Hz	Abtastfrequenz des Messsystems
f_b	Hz	Dominante Prozessfrequenz
f_e	Hz	Eckfrequenz
f'_e	Hz	Normalisierte Eckfrequenz
f_{Nyquist}	Hz	Nyquist-Frequenz
f_s	Hz	Schaltfrequenz des Umrichters
f_{sim}	Hz	Simulationsfrequenz
f_x	Hz	Schnittpunktfrequenz
G_{bg}	A/A	Übertragungsfunktion des Balancefaktors
G_{cg}	V/A	Übertragungsfunktion der Gleichrichterkapazität
G_d	A/V	Übertragungsfunktion der Quasistatikkontakte
G_{is}	V/A	Übertragungsfunktion des Stromreglers des SMSP
G_j	$\frac{\text{rad}}{\text{s Nm}}$	Übertragungsfunktion des Trägheitsmoments
GM	dB Ω , Ω	Amplitudenreserve
G_{ns}	As/rad	Übertragungsfunktion des Drehzahlreglers des SMSP

G_{pid}	-	Übertragungsfunktion eines PID-Reglers
G_{pt1s}	A/A	Übertragungsfunktion eines Stromreglers als PT1-Glied
G_{r}	$\frac{\text{s Nm}}{\text{rad}}$	Übertragungsfunktion des Reibmoments
G_{tg}	-	Übertragungsfunktion des Totzeitglieds
G_{vg}	A/V	Übertragungsfunktion des Spannungsreglers des aktiven Gleichrichters
$g(x)$	-	Funktion von x
H	-	Prüfsumme
i	-	Laufvariable, Initialwert
$i_{\text{cg}}, i_{\text{cl}}, i_{\text{cs}}$	A	Kondensatorstrom des Gleichrichters (g), der Last (l) und des Speichers (s)
$i_{\text{dcg}}, i_{\text{dcl}}, i_{\text{dcs}}$	A	DC-Strom des Gleichrichters (g), der Last (l) und des Speichers (s)
$i_{\text{dg}}, i_{\text{qg}}$	A	AC-Istströme im dq-Koordinatensystem am Gleichrichter
$i_{\text{dg}}^*, i_{\text{qg}}^*$	A	AC-Sollströme im dq-Koordinatensystem am Gleichrichter
$\underline{i}_{\text{dq}}$	A	Stromvektor im dq-Koordinatensystem
$i_{\text{ds}}, i_{\text{qs}}$	A	Iststatorströme im dq-Koordinatensystem
$i_{\text{ds}}^*, i_{\text{qs}}^*$	A	Sollstatorströme im dq-Koordinatensystem
$i_{\text{ng}}, i_{\text{nl}}, i_{\text{ns}}$	A	Laststrom des Gleichrichters (g), der Last (l) und des Speichers (s)

$\dot{i}_{q\text{smax}}$	A	Maximaler drehmomentgebender Strom
\dot{i}_s	A	Statorstrom
\dot{i}_{smax}	A	Maximaler Statorstrom
i_0	A	DC-Strom im Arbeitspunkt
$\dot{i}_1, \dot{i}_2, \dot{i}_3$	A	AC-Netzströme
j	-	Imaginäre Einheit
J	kg m^2	Massenträgheitsmoment
k	-	Laufvariable
K_{bg}	A/A	Balancefaktor zwischen AC- und DC-Seite des aktiven Gleichrichters
K_{diff}	-	Differentialanteil eines Reglers
K_{d}	A/V	Quasistatikkonstante des Spannungsreglers im B6U
K_{i}	-	Integralanteil eines Reglers
K_{ins}	V/(As)	Integralanteil des Stromreglers des SMSP
K_{ins}	A/rad	Integralanteil des Drehzahlreglers des SMSP
K_{ivg}	A/(Vs)	Integralanteil des Spannungsreglers des aktiven Gleichrichters
k_{m}	Nm/A_{eff}	Drehmomentkonstante
K_{p}	-	Proportionalanteil eines Reglers
K_{pis}	V/A	Proportionalanteil des Stromreglers des SMSP

K_{pns}	As/rad	Proportionalanteil des Drehzahlreglers des SMSP
K_{pvg}	A/V	Proportionalanteil des Spannungsreglers des aktiven Gleichrichters
k_v	$\frac{V_{eff}}{1.000 \text{ 1/min}}$	Spannungskonstante
L_d	H	Längsinduktivität
L_q	H	Querinduktivität
L_s	H	Statorinduktivität
m	-	Reglerausgangsgröße eines Regelungssystems
M_b	Nm	Beschleunigungs- oder Bremsmoment
M_i	Nm	Inneres Istdrehmoment, Hauptmoment der PMSM
M_i^*	Nm	Inneres Söldrehmoment der PMSM
$M_{i,max}$	Nm	Maximales Drehmoment der PMSM
M_l	Nm	Lastmoment
m_{nr}	-	Nennergrad des Reglers
m_{ns}	-	Nennergrad der Strecke
M_r	Nm	Reibmoment der PMSM
m_t	-	Totzeitgrad
M_w	Nm	Widerstandsmoment
m_{zr}	-	Zählergrad des Reglers

m_{zs}	-	Zählergrad der Strecke
n	1/min	Mechanische Istdrehzahl der PMSM
N	-	Anzahl der Zeitstempel
n^*	1/min	Mechanische Solldrehzahl der PMSM
n_{max}	1/min	Maximale mechanische Drehzahl der PMSM
n_{min}	1/min	Minimale mechanische Drehzahl der PMSM
NRMSE	%	Normalisierte Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme
O	-	Polynomordnung des Savitzky-Golay-Filters
p	-	Polpaarzahl
P_b	W	Verlustleistung im Bremswiderstand
$P_{dcg,m}, P_{dcg,o}$	W	DC-Gleichrichterleistung mit (m) und ohne (o) Speicher
$P_{dcg,m,max}, P_{dcg,o,max}$	W	Maximale Lastspitze mit (m) und ohne (o) Speicher
P_e	W	Elektrische Leistung der PMSM
$P_{g,max}$	W	Erlaubte Dauerleistung des Gleichrichters laut Datenblatt
P_k, P_{k+1}	W	Leistung des Ankerpunkts und des Folgeextremums
P_{kapp}	W	Kappungsniveau
P_l	W	Elektrische Leistung der Konstantleistungslast (Verbraucherleistung)

$P_{l,maxC}$	W	Maximal erlaubte Verbraucherleistung in Abhängigkeit der erlaubten Lastkapazität
P_m	W	Mechanische Leistung der PMSM
PM	°	Phasenreserve
PM^*	°	Sollphasenreserve
$P_{ng,mess}$	W	Gleichrichterleistung laut Messung (s. Laststrom)
$P_{ng,sim}$	W	Gleichrichterleistung in der Simulation (s. Laststrom)
$P_r, P_{r,sim}, P_{r,stat}$	%	Relative Lastspitzenreduktion in der Simulation (sim) und statisch (stat)
P_s	W	Elektrische Leistung des SMSP
P_s^*	W	Sollwerttrajektorie des SMPS
$P_{s,max}$	W	Maximale elektrische Leistung des SMSP
r	-	Rückführgröße eines Regelungssystems
R_l	Ω	Virtueller Widerstand der Konstantleistungslast
R_s	Ω	Strangwiderstand
q	-	Aufgabengröße eines Regelungssystems
Q	-	Arbeitspunkt
s	1/s	Laplace-Variable
S_k	-	Vorzeichen des Ankerpunkts
s_1, s_2, \dots, s_6	-	Modulationssignale der sechs IGBT

SOC	%	Ladezustand des Speichers
SOC*	%	Sollwerttrajektorie des Ladezustands des Speichers
SOC _{max}	%	Maximaler Ladezustand des Speichers
SOC _{min}	%	Minimaler Ladezustand des Speichers
SOC ₀	%	Startladezustand des Speichers
t	s	Zeit
T	%	Vertrauenswürdigkeit
T _d	s	Vorhaltezeit
T _{el}	s	Elektrische Zeitkonstante des Motors
t _{ex}	s	Beidseitiger Zeitpuffer für Anregungsfenster
t _g	s	Glättungszeit
T _h	-	Taylor-Polynom der Stufe h
t _k , t _{k+1}	s	Zeitstempel des Ankerpunkts und des Folgeextremums
T _{MLG}	-	Schleifenverstärkung
T _n	s	Nachstellzeit eines Reglers
T _{ng}	s	Nachstellzeit des Spannungsreglers des aktiven Gleichrichters
T _{ns}	s	Nachstellzeit des Drehzahlreglers des SMSP
t _{oben} , t _{unten}	s	Zeitspanne zwischen der unteren und oberen Spannung während eines Bremsvorgangs

t_r	s	Rampenzeit
t_{soc}	s	Rückführungszeit des Ladezustands
t_v	s	Vorausschau
T_w	s	Zeitkonstante des Wechselrichters
u	-	Stellgröße eines Regelungssystems
v	V	DC-Istspannung
V	-	Varianz
v_{ac}	V	Spannungseffektivwert der AC-Seite
\underline{v}_{dq}	V	Statorspannungsvektor im dq-Koordinatensystem
v_{dqS}	V	Betrag der Statorspannung im dq-Koordinatensystem
v_{ds}, v_{qs}	V	Statorspannungen im dq-Koordinatensystem
v_g	V	DC-Istspannung am Gleichrichter
v_g^*	V	DC-Sollspannung am Gleichrichter
v_l	V	DC-Spannung an der Konstantleistungslast
v_{LN}	V	Strangspannung zwischen Leiter und Neutralleiter
v_{oben}, v_{unten}	V	Obere und untere Spannung während eines Bremsvorgangs
v_p	V	Induzierte Spannung, elektromotorische Kraft oder Polradspannung
v_s	V	DC-Istspannung am Speicherumrichter

v_0	V	DC-Spannung im Arbeitspunkt
v_{12}, v_{23}, v_{31}	V	Verkettete AC-Spannungen
v^*	V	DC-Sollspannung
\hat{v}	V	Scheitelwert der Gleichspannung
$v_{\alpha g}, v_{\beta g}$	V	AC-Istspannungen im α - β -Koordinatensystem des aktiven Gleichrichters
$v_{\alpha g}^*, v_{\beta g}^*$	V	AC-Sollspannungen im α - β -Koordinatensystem des aktiven Gleichrichters
w	-	Führungsgröße eines Regelungssystems
W_{abs}	J	Absolute Abweichung der aufgewendeten elektrischen Energie
$W_{a,o}$	J	Beschleunigungsenergie des Gleichrichters
$W_{b,m}, W_{b,o}$	J	Bremsenergie im System mit (m) und ohne (o) Speicher
$w_e, w_{e,sim}, w_{e,stat}$	%	Relative Bremsenergiereduktion durch den Speichereinsatz in der Simulation (sim) und statisch (stat)
$W_{g,m}, W_{g,o}$	J	Gleichrichterenergie mit (m) und ohne (o) Speicher
$W_{ges,m}, W_{ges,o}$	J	Gesamtenergie mit (m) und ohne (o) Speicher
$W_{g,m}, W_{g,o}$	J	Gleichrichterenergie mit (m) und ohne (o) Speicher
w_m, w_o	%	Prozentualer Anteil der Bremsenergie an der Beschleunigungsenergie mit (m) und ohne (o) Speicher

w_r	%	Relative Abweichung der aufgewendeten elektrischen Energie
W_s	J	Energieinhalt des Speichers
x	-	(Eingangs-) Daten/ Regelungsgröße eines Regelungssystems
x_0	-	Entwicklungspunkt
x_{Messung}	-	Messdaten
x_{Modell}	-	Modelldaten
\tilde{X}	-	Parameterschätzwerte
X	-	Echte Parameterwerte
\tilde{X}_{am}	-	Schätzwert über die maximale Anpassungsgüte
\tilde{X}_{med}	-	Schätzwert als Medianlösung aller Schätzwerte
x_r	%	Relative Abweichung der Parameterschätzwerte von den echten Parameterwerten
x_{ram}	%	Relative Abweichung der Parameterschätzwerte von den echten Parameterwerten (maximale Anpassungsgüte)
x_{rmed}	%	Relative Abweichung der Parameterschätzwerte von den echten Parameterwerten (Medianlösung)
y	-	Trainingsdaten
Y	-	Admittanzübertragungsfunktion
z		Störgröße eines Regelungssystems

Z_{cpl}	Ω	Kleinsignal- oder Inkrementalimpedanz der Konstantleistungslast
Z_e, Z_{e1}, Z_{e2}	Ω	Erzeugerimpedanzübertragungsfunktion beim Entladen (1) und Laden (2) des Speichers
Z_g, Z_{gm}, Z_{go}	Ω	Impedanzübertragungsfunktion des Gleichrichters mit (m) und ohne (o) Stromregler
Z_l, Z_{lm}, Z_{lo}	Ω	Impedanzübertragungsfunktion der CPL mit (m) und ohne (o) Stromregler
Z_s	Ω	Speicherimpedanzübertragungsfunktion
Z_v, Z_{v1}, Z_{v2}	Ω	Verbraucherimpedanzübertragungsfunktion beim Entladen (1) und Laden (2) des Speichers
$|Z_x|, |Z_x|_{dB}$	$\Omega, dB\Omega$	Schnittpunktbetrag
α	-	Polynom des Savitzky-Golay-Filters
β	-	Parameter
$\tilde{\beta}^{LS}$	-	Parameterschätzwerte der Methode der kleinsten Quadrate
γ	$^\circ$	Rotorwinkel
γ_0	$^\circ$	Startwert des Rotorwinkels
δ	-	Ableitungsoperator
$\Delta i_{dg}, \Delta i_{qg}$	A	AC-Stromabweichungen im dq-Koordinatensystem des aktiven Gleichrichters
ΔP	W	Rückführungsleistung des SMSP

$\Delta SOC_{\min\max}$	%	Ladezustandsabweichung zwischen dem Startladezustand und der nähergelegenen Betriebsgrenze des Speichers
Δt	s	Abtastzeit, Zeitinkrement
Δv	V	Spannungsabweichung zwischen Anfang und Ende der Simulation
Δv_g	V	Abweichung der Spannung am Gleichrichter
ΔW_{ges}	J	Differenz der Gesamtenergien ohne und mit Speicher
ΔW_{rot}	J	Änderung der Rotationsenergie des Schwungmassenspeichers
$\Delta W_{\text{zk,m}}, \Delta W_{\text{zk,o}}$	J	Änderung der Zwischenkreisenergie mit (m) und ohne (o) Speicher
$\Delta \omega_m$	rad/s	Abweichung der mechanischen Winkelgeschwindigkeit
ϵ_0	-	Quadratischer Fehler
η_g	-	Elektrischer Wirkungsgrad des Gleichrichters
η_s	-	Elektrischer Wirkungsgrad des SMSP
θ	°	Phasenwinkel der Netzspannung
λ_{PWM}	-	Anzahl der Spannungstakte pro Periode der Pulsweitenmodulation
τ_g	s	Zeitkonstante des Stromreglers des aktiven Gleichrichters
τ_l	s	Zeitkonstante des Stromreglers der Konstantleistungslast
τ_{PWM}	s	Periodendauer der Pulsweitenmodulation

τ_s	s	Zeitkonstante des Stromreglers des SMSP
τ_t	s	Totzeitkonstante
ϕ_e	°	Quellenseitige Phase
ϕ_v	°	Lastseitige Phase
ψ_d, ψ_q	Vs	Verketteter Fluss im dq-Koordinatensystem
$\underline{\psi}_{dq}$	Vs	Verketteter Flussvektor im dq-Koordinatensystem
ψ_{PM}	Vs	Verketteter Fluss der Permanentmagnete
ω	1/s	Elektrische Kreisfrequenz
ω_m	rad/s	Mechanische Winkelgeschwindigkeit

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen ohne Quellenangaben sind eigene Abbildungen des Verfassers.

Abbildung 1.1: Betrachtungsrahmen der vorliegenden Arbeit.....	6
Abbildung 1.2: Wissenschaftssystematik in Anlehnung an (Ulrich & Hill 1979, S.305).	7
Abbildung 1.3: a) Forschungsprozess nach Ulrich und daran angelehnt b) die Struktur der vorliegenden Arbeit (Ulrich 2001, S.195).	9
Abbildung 2.1: a) Produktionsebenen in Anlehnung an (Wiendahl et al. 2007, S.785), b) Automatisierungsebenen in Anlehnung an (Bauernhansl et al. 2014, S.405).	12
Abbildung 2.2: Allgemeine Struktur von drehzahlvariablen Antriebssystemen in Anlehnung an (Teigelkötter 2013, S.1).	13
Abbildung 2.3: Topologische Unterscheidung von Zwischenkreis, Zwischenkreisverbund und DC-Mikronetz, in Anlehnung an (Laribi et al. 2023a, S.13).	14
Abbildung 2.4: Frequenzumrichter in der Ausführung mit a) Diodengleichrichter (B6U) oder b) aktivem Gleichrichter (AFE) mit Gleichspannungszwischenkreis, bestehend aus dem Bremschopper, Bremswiderstand und Kondensator zur Versorgung des Wechselrichters in Anlehnung an (Bernet 2012, S.10), (Zach 2010, S.216) und (Schröder 2012, S.197).....	15
Abbildung 2.5: Spannungsorientierte Regelung eines aktiven Gleichrichters in Anlehnung an (Bernet 2012, S.170).	18
Abbildung 2.6: a) Strom-Spannungs-Kennlinie einer Konstantleistungslast (CPL) mit Tangente im Arbeitspunkt $Q(v_0, i_0)$, b) konstante Last über der Spannung, c) linearisiertes Kleinsignalmodell der CPL, d) nichtlineares Großsignalmodell der CPL, in Anlehnung an (König et al. 2013, S.34; Singh et al. 2017, S. 408–409).	22
Abbildung 2.7: Feldorientierte Regelung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine (PMSM) in Anlehnung an (Quang & Dittrich 2015, S.11) und (Gerlach 2021, S.7).	28

Abbildung 2.8: Ersatzschaltbild der permanentmagneterregten Synchronmaschine in rotorfesten Koordinaten für die a) d-Achse und die b) q-Achse in Anlehnung an (Teigelkötter 2013, S.105; Richter 2016, S.16).	30
Abbildung 2.9: Ersatzschaltbild der PMSM im stationären Zustand mit den Spannungszeigern $\mathbf{v1} = \mathbf{vd} + \mathbf{j} \cdot \mathbf{vq}$ und $\mathbf{vp} = \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \psi\mathbf{PM}$ sowie dem Stromzeiger $\mathbf{i1}$, in Anlehnung an (Schröder 2015, S.1073).	31
Abbildung 2.10: Struktur adaptiver Regelungen a) ohne Rückführung sowie b) mit Rückführung, in Anlehnung an (Trächtler & Gausemeier 2018, S.22).	35
Abbildung 2.11: Struktur einer a) adaptiven Modell-Referenz-Regelung (MRAC) und einer b) adaptiven Regelung ohne Vergleichsmodell (MIAC) bzw. selbststellenden Regelung, in Anlehnung an (Müller & Villegas 2014, S.242).	37
Abbildung 2.12: Aufteilung in Erzeuger- und Verbraucherimpedanz in Anlehnung an (Schaade 2003, S.10; Riccobono & Santi 2014, S.3526; Singh et al. 2017, S.409).	42
Abbildung 2.13: Erweitertes Bode-Diagramm mit a) Amplitude der Erzeuger- und Verbraucherimpedanz b) Phase der Schleifenverstärkung und c) Amplitude der Schleifenverstärkung mit Amplitudenreserve (GM) und Phasenreserve (PM) laut GMPM-Kriterium in Anlehnung an (Wildrick et al. 1995, S.281).	43
Abbildung 2.14: Allgemeine Klassifikation von Modellbildungskonzepten in Anlehnung an (Kroll 2016, S.42).	47
Abbildung 2.15: Lebenszyklus im Maschinen- und Anlagenbau ohne und mit virtueller Inbetriebnahme in Anlehnung an (VDMA 2020, S.7).	52
Abbildung 5.1: a) Lösungsweg für Regelungsaufgaben in Anlehnung an (Lunze 2016b, S. 14–15) und b) Funktionsumfang der selbststellenden Regelung in der vorliegenden Arbeit. 97	
Abbildung 5.2: Kaskadenregelung des Schwungmassenspeichersystems mit detailliertem Stromregelkreis in Anlehnung an (Schröder 2015, S.1076).	100
Abbildung 5.3: Kaskadenregelung des Schwungmassenspeichersystems mit vereinfachtem PT1-Stromregelkreis.....	101

Abbildung 5.4: Zwischenkreismodell des Schwungmassenspeichersystems.	103
Abbildung 5.5: Bode-Diagramm mit a) Betrag und b) Phase der Speicherimpedanz Z_s als CPL für das Entladen und Laden.	104
Abbildung 5.6: Erstes Funktionsmodul „Lastprofilerkennung“ (FM1).	106
Abbildung 5.7: Unterfunktion „Anregungsüberwachung“ (UF1.1).	108
Abbildung 5.8: Beispielhafte Verläufe a) der Spannung, b) der Anregung, c) der Inaktivitätszeit und d) des Auslösesignals.	109
Abbildung 5.9: Unterfunktion „Suchmaschine“ (UF1.2).	111
Abbildung 5.10: Beispielhafter Einfluss eines Savitzky-Golay-Filters auf originale Messdaten.	112
Abbildung 5.11: Extrema des Lastprofils für die Bildung der Prüfsummen.	112
Abbildung 5.12: Beispielhafte exakte Treffer der Prüfsummen auf der gemessenen und in der Datenbank gespeicherten Zeitskala.	114
Abbildung 5.13: Beispielhafte Verläufe a) der Leistung, b) der erkannten Lastprofilnummer und c) der Vertrauenswürdigkeit ohne und mit Rauschen.	115
Abbildung 5.14: Zweites Funktionsmodul „Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters“ (FM2).	117
Abbildung 5.15: Unterfunktion „Datenakquisition und Datenvorverarbeitung“ (UF2.1).	119
Abbildung 5.16: Beispielhafte Messdaten des a) Laststrom i_{ng} und der b) Zwischenkreisspannung v_g einer Werkzeugmaschine.	120
Abbildung 5.17: Anregungsdetektion für die Systemidentifikation. a) Ausschnitt der Spannungsmessung, b) binäre Anregung, wobei der Wert 1 eine Anregung repräsentiert, während der Wert 0 keine Anregung bedeutet, c) Summe der Anregungsfenster im gewählten Zeitabschnitt.	121
Abbildung 5.18: Unterfunktion „Hypothese, Training und Test“ (UF2.2).	123

Abbildung 5.19: Zwischenkreismodell der Spannungsregelschleife eines aktiven Gleichrichters a) mit vereinfachtem Stromregler als PT1-Glied in Anlehnung an (Parvez et al. 2015, S.124) und b) ohne Stromregler in Anlehnung an (Ben Ali et al. 2020, S.4).....	124
Abbildung 5.20: Einfluss des Proportionalanteils K_{pvg} auf a) den Betrag sowie b) die Phase der Impedanz Z_{gm} des aktiven Gleichrichters.....	129
Abbildung 5.21: Zwischenkreismodell der Spannungsregelschleife eines Diodengleichrichters.	129
Abbildung 5.22: a) Nichtlineares und b) linearisiertes Zwischenkreismodell der umrichteragespeisten Antriebslasten als Blockschaltbilder	132
Abbildung 5.23: Einfluss der Verbraucherleistung PI auf a) den Betrag sowie b) die Phase der Impedanz ZI der Konstantleistungslast.....	133
Abbildung 5.24: Ersatzschaltbilder für die Parallelschaltung der Impedanzen des Gleichrichters und der Antriebslasten	134
Abbildung 5.25: Beispielhafte Anpassungsgüte über dem jeweiligen Anregungsfenster.....	136
Abbildung 5.26: Beispielhafte Testdaten zur Validierung der Parameterschätzung mittels Vergleichs von Mess- und Simulationsdaten a) des Laststroms ing , b) der Zwischenkreisspannung v_g und c) der Verbraucherleistung Png	138
Abbildung 5.27: Drittes Funktionsmodul „Reglerentwurf“ (FM3).....	139
Abbildung 5.28: Unterfunktion „Impedanzbasierte Stabilitätsprüfung“ (UF3.1).....	141
Abbildung 5.29: Ersatzschaltbilder für die Parallelschaltung der Erzeuger- und Verbraucherimpedanz bei dem a) Entladen des Speichers und b) Laden des Speichers.....	142
Abbildung 5.30: Einfluss der Parallelschaltung der Speicherimpedanz Zs mit der Gleichrichterimpedanz Zg auf a) den Betrag und b) die Phase der Erzeugerimpedanz $Ze1$ beim Entladen des Speichers ($Ps < 0$).	143
Abbildung 5.31: Ist-Phasenreserve PM und Soll-Phasenreserve PM^* als Stabilitätsebenen in Abhängigkeit der Verbraucherleistung PI und der Speicherleistung Ps für den Fall der Entladung des Speichers.	144

Abbildung 5.32: Einfluss der Parallelschaltung der Speicherimpedanz Z_s mit der Lastimpedanz Z_l auf a) den Betrag und b) die Phase der Verbraucherimpedanz Z_v beim Laden des Speichers ($P_s > 0$).....	145
Abbildung 5.33: Überschneidung der Stabilitätsebenen von Ist-Phasenreserve PM und Soll-Phasenreserve PM^* bei hohen Ladeleistungen P_s des Speichers und einer hohen Verbraucherleistung PL	146
Abbildung 5.34: Unterfunktion „Trajektorienvorgabe“ (UF3.2).	149
Abbildung 5.35: a) Verfügbare Leistung, b) Ladezustand und c) Rotationsenergie des Schwungmassenspeichers in Abhängigkeit der Drehzahl.	150
Abbildung 5.36: Beispielhafter gleitender Mittelwert des skalierten Lastprofils bzw. Kappungsniveau über jeweils eine Sekunde bzw. 1.000 Messpunkte.....	151
Abbildung 5.37: Beispielhafte Sollwerttrajektorien a) der Speicherleistung und b) des Speicherladezustands für einen Zielladezustand von 50 %.	153
Abbildung 5.38: Beispielhafte Energiebilanz der Speicherregelung ohne Reibmoment.	154
Abbildung 5.39: Viertes Funktionsmodul „Speicherregelung“ (FM4).....	157
Abbildung 5.40: Beispielhafte a) Gleichrichterleistung und b) Zwischenkreisspannung für eine Glättungszeit von 100 s, eine Vorausschau von 50 ms und einen Zielladezustand von 70 %.	158
Abbildung 5.41: Beispielhafte Auswertung der Gütekriterien in Abhängigkeit der Vorausschau und des Zielladezustands für eine Glättungszeit von 1 s.....	160
Abbildung 5.42: Beispielhafte Verläufe der energetischen Gütekriterien über dem Zielladezustand für eine Vorausschau von 50 ms.	161
Abbildung 6.1: Vergleich der Messdaten mit dem Modell des Schwungmassenspeichers. a) Drehzahl, b) Drehmoment und c) mechanische Leistung.	164
Abbildung 6.2: Versuchsumgebungen für die Systemidentifikation im a) ersten Fallbeispiel und im b) zweiten Fallbeispiel.	165

Abbildung 6.3: Originale und mit Savitzky-Golay-Filter geglättete Messdaten im ersten Fallbeispiel.....	167
Abbildung 6.4: Lastprofilerkennung im ersten Fallbeispiel. a) Zwischenkreisspannung am Gleichrichter, b) Anregung, c) Inaktivitätszeit, d) Auslösesignal.	168
Abbildung 6.5: Lastprofilerkennung im ersten Fallbeispiel. a) Leistung, b) erkannte Lastprofilnummer, c) Vertrauenswürdigkeit ohne und mit 0,5 % Rauschen.	169
Abbildung 6.6: Skalierter Datensatz der Werkzeugmaschine mit a) gemessenem Laststrom, b) gemessener Zwischenkreisspannung, c) binärer Anregung und d) Anregungsfenstern...	171
Abbildung 6.7: Anpassungsgüte der Parameterschätzung über den Anregungsfenstern für $tex = 50 ms$ im ersten Fallbeispiel.....	172
Abbildung 6.8: Vergleich der Testdaten der Messung und der Simulation a) des Stroms, b) der Spannung und c) der Leistung im Zeitbereich unter der Annahme der Datenblattkapazitäten und $tex = 50 ms$ im ersten Fallbeispiel.	173
Abbildung 6.9: Anpassungsgüte der Parameterschätzung über den Anregungsfenstern für $tex = 500 ms$ im ersten Fallbeispiel.	174
Abbildung 6.10: Vergleich der Testdaten der Messung und der Simulation a) des Stroms, b) der Spannung und c) der Leistung im Zeitbereich unter der Annahme der Datenblattkapazitäten und $tex = 500 ms$ im ersten Fallbeispiel.....	175
Abbildung 6.11: Einfluss der Parallelschaltung der Speicherimpedanz Zs mit der Gleichrichterimpedanz Zg auf a) den Betrag und b) die Phase der Erzeugerimpedanz $Ze1$ für das Entladen des Speichers ($Ps = -1 kW$) und das Werkzeugmaschinenlastprofil ($Pl = 28 kW$) im ersten Fallbeispiel.....	177
Abbildung 6.12: Ist-Phasenreserve PM und Soll-Phasenreserve PM^* als Stabilitätsebenen in Abhängigkeit der Verbraucherleistung Pl und der Speicherleistung Ps für das Entladen des Speichers und das Werkzeugmaschinenlastprofil im ersten Fallbeispiel.	178
Abbildung 6.13: Einfluss der Parallelschaltung der Speicherimpedanz Zs mit der Lastimpedanz Zl auf a) den Betrag und b) die Phase der Verbraucherimpedanz $Zv2$ für das	

Laden des Speichers ($Ps = 50 \text{ kW}$) und das Werkzeugmaschinenlastprofil ($Pl = 28 \text{ kW}$) im ersten Fallbeispiel.....	179
Abbildung 6.14: Ist-Phasenreserve PM und Soll-Phasenreserve PM^* als Stabilitätsebenen in Abhängigkeit der Verbraucherleistung Pl und der Speicherleistung Ps für das Laden des Speichers und das Werkzeugmaschinenlastprofil im ersten Fallbeispiel.	180
Abbildung 6.15: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion bei einer statischen Trajektorienvorgabe in Abhängigkeit der Glättungszeit und des Zielladezustands im ersten Fallbeispiel.	184
Abbildung 6.16: a) Leistung und b) Ladezustand des Speichers bei einer statischen Trajektorienvorgabe für eine Glättungszeit von 100 s und einen Zielladezustand von 70 % im ersten Fallbeispiel.....	185
Abbildung 6.17: Verbraucherleistung ohne und mit Speicher auf Basis der statischen Trajektorienvorgabe für eine Glättungszeit von 100 s und einen Zielladezustand von 70 % ohne Vorausschau und Reibmoment im ersten Fallbeispiel.....	185
Abbildung 6.18: Energiebilanz der statischen Trajektorienvorgabe für eine Glättungszeit von 100 s und einen Zielladezustand von 70 % im ersten Fallbeispiel.	186
Abbildung 6.19: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion über der Vorausschau und dem Ladezustand für eine Glättungszeit von 10 s ohne Reibmoment im ersten Fallbeispiel.....	189
Abbildung 6.20: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und des Zielladezustands für eine Vorausschau von 20 ms ohne Reibmoment im ersten Fallbeispiel.....	190
Abbildung 6.21: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und der Vorausschau für einen Zielladezustand von 50 % ohne Reibmoment im ersten Fallbeispiel.....	191
Abbildung 6.22: a) Leistung und b) Ladezustand des Speichers ohne Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladezustand von 50 % im ersten Fallbeispiel.....	192

Abbildung 6.23: a) Gleichrichterleistung und b) Zwischenkreisspannung ohne und mit Speicher ohne Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladezustand von 50 % ohne Reibmoment im ersten Fallbeispiel.	193
Abbildung 6.24: Energiebilanz der Speicherregelung ohne Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladezustand von 50 % im ersten Fallbeispiel.....	194
Abbildung 6.25: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion über der Vorausschau und dem Ladezustand für eine Glättungszeit von 10 s mit Reibmoment im ersten Fallbeispiel.	196
Abbildung 6.26: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und des Zielladezustands für eine Vorausschau von 20 ms mit Reibmoment im ersten Fallbeispiel.	197
Abbildung 6.27: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und der Vorausschau für einen Zielladezustand von 50 % mit Reibmoment im ersten Fallbeispiel.	198
Abbildung 6.28: Energiebilanz der Speicherregelung mit Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladezustand von 50 % im ersten Fallbeispiel.....	199
Abbildung 6.29: Originale und mit Savitzky-Golay-Filter geglättete Messdaten im zweiten Fallbeispiel.....	201
Abbildung 6.30: Lastprofilerkennung im zweiten Fallbeispiel. a) Zwischenkreisspannung am Gleichrichter, b) Anregung, c) Inaktivitätszeit, d) Auslösesignal.	202
Abbildung 6.31: Lastprofilerkennung im zweiten Fallbeispiel. a) Leistung, b) erkannte Lastprofilnummer, c) Vertrauenswürdigkeit ohne und mit 0,5 % Rauschen.	203
Abbildung 6.32: Skalierter Datensatz der Holzbearbeitungsmaschine mit a) gemessenem Laststrom, b) gemessener Zwischenkreisspannung, c) binärer Anregung und d) Anregungsfenstern.....	204

Abbildung 6.33: Anpassungsgüte der Parameterschätzung über den Anregungsfenstern für $t_{ex} = 50 \text{ ms}$ im zweiten Fallbeispiel.....	205
Abbildung 6.34: Vergleich der Testdaten der Messung und der Simulation a) des Stroms, b) der Spannung und c) der Leistung im Zeitbereich mit den Medianparameterwerten und $t_{ex} = 50 \text{ ms}$ im zweiten Fallbeispiel.....	206
Abbildung 6.35: Anpassungsgüte der Parameterschätzung über den Anregungsfenstern für $t_{ex} = 500 \text{ ms}$ im zweiten Fallbeispiel.	207
Abbildung 6.36: Vergleich der Testdaten der Messung und der Simulation a) des Stroms, b) der Spannung und c) der Leistung im Zeitbereich mit den Medianparameterwerten und $t_{ex} = 500 \text{ ms}$ im zweiten Fallbeispiel.	208
Abbildung 6.37: Einfluss der Parallelschaltung der Speicherimpedanz Z_s mit der Gleichrichterimpedanz Z_g auf a) den Betrag und b) die Phase der Erzeugerimpedanz Z_{e1} für das Entladen des Speichers ($P_s = -1 \text{ kW}$) und das Holzbearbeitungsmaschinenlastprofil ($P_l = 30 \text{ kW}$) im zweiten Fallbeispiel.	210
Abbildung 6.38: Ist-Phasenreserve PM und Soll-Phasenreserve PM^* als Stabilitätsebenen in Abhängigkeit der Verbraucherleistung P_l und der Speicherleistung P_s für das Entladen des Speichers und das Holzbearbeitungsmaschinenlastprofil im zweiten Fallbeispiel.	211
Abbildung 6.39: Einfluss der Parallelschaltung der Speicherimpedanz Z_s mit der Lastimpedanz Z_l auf a) den Betrag und b) die Phase der Verbraucherimpedanz Z_{v2} für das Laden des Speichers ($P_s = 50 \text{ kW}$) und das Holzbearbeitungsmaschinenlastprofil ($P_l = 30 \text{ kW}$) im zweiten Fallbeispiel.....	212
Abbildung 6.40: Ist-Phasenreserve PM und Soll-Phasenreserve PM^* als Stabilitätsebenen in Abhängigkeit der Verbraucherleistung P_l und der Speicherleistung P_s für das Laden des Speichers und das Holzbearbeitungsmaschinenlastprofil im zweiten Fallbeispiel.	213
Abbildung 6.41: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion bei einer statischen Trajektorienvorgabe in Abhängigkeit der Glättungszeit und des Zielladezustands im zweiten Fallbeispiel.....	216

Abbildung 6.42: a) Leistung und b) Ladezustand des Speichers bei einer statischen Trajektorienvorgabe für eine Glättungszeit von 10 s und einen Zielladezustand von 90 % im zweiten Fallbeispiel.	217
Abbildung 6.43: Verbraucherleistung ohne und mit Speicher auf Basis der statischen Trajektorienvorgabe für eine Glättungszeit von 10 s und einen Zielladezustand von 90 % ohne Vorausschau und Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.	218
Abbildung 6.44: Energiebilanz der statischen Trajektorienvorgabe für eine Glättungszeit von 10 s und einen Zielladezustand von 90 % im zweiten Fallbeispiel.	218
Abbildung 6.45: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion über der Vorausschau und dem Ladezustand für eine Glättungszeit von 10 s ohne Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.	220
Abbildung 6.46: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und des Zielladezustands für eine Vorausschau von 20 ms ohne Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.	221
Abbildung 6.47: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und der Vorausschau für einen Zielladezustand von 50 % ohne Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.	222
Abbildung 6.48: a) Leistung und b) Ladezustand des Speichers ohne Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladezustand von 50 % im zweiten Fallbeispiel.	223
Abbildung 6.49: a) Gleichrichterleistung und b) Zwischenkreisspannung ohne und mit Speicher ohne Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladezustand von 50 % ohne Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.	224
Abbildung 6.50: Energiebilanz der Speicherregelung ohne Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladezustand von 50 % im zweiten Fallbeispiel.	224

Abbildung 6.51: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion über der Vorausschau und dem Ladezustand für eine Glättungszeit von 10 s mit Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.	226
Abbildung 6.52: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und des Zielladezustands für eine Vorausschau von 20 ms mit Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.	227
Abbildung 6.53: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und der Vorausschau für einen Zielladezustand von 50 % mit Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.	228
Abbildung 6.54: Energiebilanz der Speicherregelung mit Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladezustand von 50 % im zweiten Fallbeispiel.	229
Abbildung 10.1: Klassifikation von Gleichrichtern anhand ihrer Eigenschaften, Zusammenstellung aus (Rodriguez et al. 2005, S.6).....	284
Abbildung 10.2: Energiespeicherübersicht in Anlehnung an (Böker et al. 2019, S.347).	285
Abbildung 10.3: Blockschaltbild eines elementaren Regelungssystems, in Anlehnung an (DIN IEC 60050-351:2014-09, S.43).	287
Abbildung 10.4: Klassifikation von Regelungen als Komposition mehrerer Literaturquellen, in Anlehnung an ¹ (Unbehauen 2007), ² (Zacher 2017), ³ (Nelles 2018a), ⁴ (Nelles 2018b), ⁵ (Adamy 2014), ⁶ (Kroll 2016), ⁷ (Lunze 2016b), ⁸ (Lunze 2016a), ⁹ (Unbehauen 2008).....	289
Abbildung 10.5: Kombination einer Vorsteuerung und eines Reglers, in Anlehnung an (Lunze 2016b, S.11).	290
Abbildung 10.6: Interaktion der Akteure aus der Zuliefererkette im Maschinen- und Anlagenbau im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme in Anlehnung an (VDMA 2020, S.6).	296
Abbildung 10.7: Übersicht zu Lernverfahren des maschinellen Lernens, in Anlehnung an ¹ (Reichensdörfer et al. 2017, S. 11–14), ² (Döbel et al. 2018, S. 10–11).....	297

Abbildung 10.8: Elemente der Programmablaufpläne und Programmnetze laut (DIN 66001).

..... 298

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Einsatzoptionen von Stromspeichern in Produktionssystemen, in Anlehnung an (Zimmermann et al. 2019, S.15).	25
Tabelle 2.2: Technische und ökonomische Kennzahlen von Stromspeichertechnologien in Anlehnung an (Sterner & Stadler 2019, S. 641–645).	26
Tabelle 2.3: Zeitkonstanten in DC-Stromkreisen (Bessei 2011, S.52; Konsortium DC-INDUSTRIE2 2022, S.104).....	45
Tabelle 3.1: Morphologischer Kasten für die Suchkriterien der Literaturrecherche.	60
Tabelle 3.2: Übersicht zu Ansätzen zur Erkennung und Prognose von Lastprofilen.....	64
Tabelle 3.3: Übersicht zu Ansätzen der Modellbildung und Systemidentifikation.	69
Tabelle 3.4: Übersicht zu Ansätzen der Modellbildung und Systemidentifikation (Fortsetzung).	70
Tabelle 3.5: Übersicht zu Ansätzen der Speicherregelung.....	74
Tabelle 4.1: Evaluation der Ansätze zur Erkennung und Prognose von Lastprofilen mit den Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich und die Regelung.	88
Tabelle 4.2: Evaluation der Ansätze zur Modellbildung und Systemidentifikation von mit den Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich und die Regelung.	89
Tabelle 4.3: Evaluation der Ansätze zur Speicherregelung mit den Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich und die Regelung.	91
Tabelle 4.4: Zusammenfassung der Evaluation.....	92
Tabelle 4.5: Zusammenfassung der Evaluation (Fortsetzung).	93
Tabelle 5.1: Parameter des Mittelwertmodells eines aktiven Gleichrichters mit Datenquelle.	127
Tabelle 5.2: Parameter des Modells eines Diodengleichrichters mit Datenquelle.....	131

Tabelle 5.3: Beispielhafte relative Abweichungen x_{ram}/r_{med} der Parameterschätzwerte \mathbf{X} von den echten Parameterwerten \mathbf{X} für die größte Anpassungsgüte.....	137
Tabelle 5.4: Zusammenfassung der impedanzbasierten Stabilitätsprüfung mit Schnittpunktfrequenz f_x , Schnittpunktbetrag Z_{xdB} bzw. Z_x und Phasenreserve PM für Kombinationen der Verbraucherleistung PI und der Speicherleistung Ps	148
Tabelle 5.5: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Leistungsreduktion oder Bremsenergiereduktion der Speicherregelung.	156
Tabelle 5.6: Symbole der Gütekriterien bei der Trajektorienvorgabe und der dynamischen Simulation.	158
Tabelle 5.7: Versuchsplan mit Nummer des Eintrags in dem jeweiligen Parametervektor..	159
Tabelle 6.1: Untersuchte Parametervariation bei der Lastprofilerkennung.	166
Tabelle 6.2: Parametervariation der Modellbildung und Systemidentifikation.	170
Tabelle 6.3: Relative Abweichungen x_r der Parameterschätzwerte \mathbf{X} von den echten Parameterwerten \mathbf{X} des aktiven Gleichrichters und der Antriebslasten für die maximale Anpassungsgüte (am) sowie den Median (med) bei einem Zeitpuffer von $\pm 50\text{ ms}$ im ersten Fallbeispiel.....	172
Tabelle 6.4: Relative Abweichungen x_r der Parameterschätzwerte \mathbf{X} von den echten Parameterwerten \mathbf{X} des aktiven Gleichrichters und der Antriebslasten für die maximale Anpassungsgüte (am) sowie den Median (med) bei einem Zeitpuffer von $tex = \pm 500\text{ ms}$ im ersten Fallbeispiel.	174
Tabelle 6.5: Parametervariation der impedanzbasierten Stabilitätsprüfung im ersten Fallbeispiel.....	176
Tabelle 6.6: Schnittpunktfrequenz f_x , Schnittpunktbetrag Z_{xdB} bzw. Z_x und minimalen Phasenreserve PM_{min} für Kombinationen der Verbraucherleistung PI und der Speicherleistung Ps im ersten Fallbeispiel.....	181
Tabelle 6.7: Parametervariation der Trajektorienvorgabe.	182

Tabelle 6.8: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Leistungsreduktion der statischen Trajektorienvorgabe im ersten Fallbeispiel.	182
Tabelle 6.9: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Bremsenergiereduktion der statischen Trajektorienvorgabe im ersten Fallbeispiel.....	183
Tabelle 6.10: Parametervariation der Speicherregelung.	187
Tabelle 6.11: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Leistungsreduktion der Speicherregelung ohne Reibmoment im ersten Fallbeispiel.	188
Tabelle 6.12: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für der relativen Bremsenergiereduktion der Speicherregelung ohne Reibmoment im ersten Fallbeispiel....	188
Tabelle 6.13: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Leistungsreduktion der Speicherregelung mit Reibmoment im ersten Fallbeispiel.	194
Tabelle 6.14: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für der relativen Bremsenergiereduktion der Speicherregelung mit Reibmoment im ersten Fallbeispiel.	195
Tabelle 6.15: Relative Abweichungen \mathbf{x}_r der Parameterschätzwerte \mathbf{X} von den echten Parameterwerten \mathbf{X} des Diodengleichrichters und der Antriebslasten für $t_{ex} = \pm 500 \text{ ms}$.	205
Tabelle 6.16: Relative Abweichungen \mathbf{x}_r der Parameterschätzwerte \mathbf{X} von den echten Parameterwerten \mathbf{X} des Diodengleichrichters und der Antriebslasten für $t_{ex} = \pm 500 \text{ ms}$	207
Tabelle 6.17: Parametervariation der impedanzbasierten Stabilitätsprüfung im zweiten Fallbeispiel.	209
Tabelle 6.18: Schnittpunktfrequenz f_x , Schnittpunktbetrag Z_{xdB} bzw. Z_x und minimalen Phasenreserve PM_{min} für Kombinationen der Verbraucherleistung P_l und der Speicherleistung P_s im zweiten Fallbeispiel.	214
Tabelle 6.19: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Leistungsreduktion der statischen Trajektorienvorgabe im zweiten Fallbeispiel.....	215
Tabelle 6.20: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Bremsenergiereduktion der statischen Trajektorienvorgabe im zweiten Fallbeispiel.	215

Tabelle 6.21: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Leistungsreduktion der Speicherregelung ohne Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.	219
Tabelle 6.22: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für der relativen Bremsenergiereduktion der Speicherregelung ohne Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.	219
Tabelle 6.23: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Leistungsreduktion der Speicherregelung mit Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.	225
Tabelle 6.24: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für der relativen Bremsenergiereduktion der Speicherregelung mit Reibmoment im zweiten Fallbeispiel....	225
Tabelle 7.1: Bewertung der Anforderungserfüllung.	234
Tabelle 10.1: Übersicht zu Stabilitätskriterien ausgewählter Autoren.	292
Tabelle 10.2: Qualitativer Vergleich der Modellbildungskonzepte, in Anlehnung an (Kroll 2016, S.46).....	294
Tabelle 10.3: Informationen zum verwendeten Messsystem imc CRONOSflex 400.....	301
Tabelle 10.4: Parameterwerte des Motors und des Umrichters.	302
Tabelle 10.5: Parameterwerte des aktiven Gleichrichters im ersten Fallbeispiel.	303
Tabelle 10.6: Parameterwerte der elektronischen Last im ersten Fallbeispiel.	303
Tabelle 10.7: Parameterwerte des Diodengleichrichters im zweiten Fallbeispiel.	304
Tabelle 10.8: Parameterwerte der elektromechanischen Last im zweiten Fallbeispiel.....	304

Kurzfassung

Der industrielle Energieeinsatz ist zum Großteil auf motorische Verbraucher zurückzuführen. Die elektrische Leistung für die dynamischen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge von Industriemaschinen müssen durch Gleichrichter vorgehalten werden, auch wenn die maximalen Leistungen nur kurzzeitig auftreten. Dies führt zu überdimensionierten Anschlussleistungen und dementsprechenden Kosten für die elektrische Versorgung. Schwungmassenspeichersysteme können dazu eingesetzt werden, die Spitzenleistungen einer Industriemaschine aus Netzsicht zu reduzieren, Bremsenergie aufzunehmen und zusätzliche Erzeugungskapazität für neuinstallierte Prozesse bereitzustellen. Die Nachrüstung eines Schwungmassenspeichersystems in einer Industriemaschine ist ein komplexer Inbetriebnahmevorgang, der mithilfe der vorliegenden Arbeit vereinfacht wird.

In der Arbeit wird ein Software-Artefakt für eine selbsteinstellende Regelung von Schwungmassenspeichersystemen in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen entwickelt. Es ermöglicht die virtuelle Inbetriebnahme eines nachgerüsteten Schwungmassenspeichersystems, bevor die Hardware des Speichersystems integriert wird. Darüber hinaus werden die relativen Potenziale der Leistungsreduktion und Nutzung von Bremsenergie simulativ bestimmt und bewertet. Das Software-Artefakt der selbsteinstellenden Regelung setzt sich aus vier Funktionsmodulen zusammen. Dazu gehören die Lastprofilerkennung, die Systemidentifikation des Frequenzumrichters der Industriemaschine, der Reglerentwurf und die Speicherregelung. Die selbsteinstellende Regelung wurde in zwei Fallbeispielen für die Lastprofile einer Werkzeugmaschine und einer Holzbearbeitungsmaschine erfolgreich validiert.

Abstract

Motor loads are responsible for most of the industrial energy consumption. Rectifiers must provide electrical power for the dynamic acceleration and braking processes of industrial machines, even if the maximum power only occurs for a short time. This leads to an oversized electrical power supply and corresponding costs. Flywheel energy storage systems can reduce the peak power of an industrial machine from a grid perspective, absorb braking energy and provide additional generation capacity for newly installed processes. Retrofitting a flywheel storage system in an industrial machine is a complex commissioning process that is simplified by this dissertation.

The dissertation develops a software artifact for self-tuning control of flywheel storage systems in industrial direct current (DC) intermediate circuits. It enables the virtual commissioning of a retrofitted flywheel storage system before the hardware is integrated. In addition, the relative potential of power reduction and use of braking energy is determined and evaluated through simulation. The software artifact of the self-tuning control consists of four functional modules. These include load profile recognition, system identification of industrial frequency converters, control design and storage control simulation. The self-tuning control was successfully validated in two case studies for the load profiles of a machine tool and a woodworking machine.

1 Einleitung

Dieses Kapitel schildert die Ausgangssituation sowie die Motivation für eine selbsteinstellende Regelung von Schwungmassenspeichern zur schnelleren virtuellen Inbetriebnahme im Gleichspannungszwischenkreis von Industriemaschinen. Außerdem wird die zu lösende Problemstellung beschrieben. Daraus lässt sich die Zielsetzung und der Forschungsbedarf für diese Arbeit ableiten. Zudem werden in diesem Kapitel die wissenschaftliche Einordnung und die Struktur der Arbeit erläutert.

1.1 Ausgangssituation

Der Industriesektor war im Jahr 2021 für 29 % bzw. 699 Terawattstunden des Endenergieverbrauchs in Deutschland verantwortlich. Beinahe ein Drittel dieser Energie wurde in Form von elektrischem Strom verbraucht (AG Energiebilanzen 2022, S.1). Der Industriesektor nutzte im vergangenen Jahrzehnt mehr als 40 % der produzierten elektrischen Energie in Deutschland, wovon wiederum knapp 70 % elektrischen Antrieben zuzuschreiben sind (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2021, S. 45–48). Dies ist vor allem auf Pumpen, Lüfter, Kompressoren und Antriebe mit hoher Betriebsstundenzahl und permanentem Teillastbetrieb zurückzuführen (Specovius 2011, S.307).

Durch die fortschreitende Digitalisierung entstehen auch im Industriesektor neue Potenziale zur Verbesserung der Energieeffizienz (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2016, S.30) unter dem Leitprinzip „*efficiency first*“ (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2019, S.17). Die Digitalisierung eröffnet neue Möglichkeiten zur Überwachung, Steuerung und Regelung von Produktionsprozessen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2019, S.19). Dies ermöglicht wiederum die Nutzung neuer Einsparpotenziale (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2019, S.19).

Zu den hardwarebasierten Ansätzen zur Steigerung der Energieeffizienz von Industriemaschinen zählen die Auswahl eines effizienteren mechatronischen Gesamtsystems, der Austausch von bestehender Hardware durch bessere Einzelkomponenten sowie die

Systemerweiterung durch eine Energiespeicherintegration (Carabin et al. 2017, S.2). Softwareseitig lassen sich die Trajektorien der Industriemaschine und die Reihenfolge von Bewegungen (engl. *scheduling*) im Betriebslauf optimieren (Carabin et al. 2017, S.6). Ebenso können Software- und Hardware-Ansätze vereint werden, wie beispielsweise beim gemeinsamen Einsatz von Energiespeichern mit einer optimierten Trajektorienplanung (Carabin et al. 2017, S.15).

Elektrische Antriebsstränge in Industriemaschinen bestehen in der Regel aus permanentmagnetisch erregten Synchronmaschinen (PMSM) in Verbindung mit einem Servoumrichter für die Motoransteuerung (Eggers 2019, S.18). Mehrachsmaschinen, wie Roboter, Sondermaschinen und Werkzeugmaschinen, sind durch häufige Anfahr- und Bremsvorgänge gekennzeichnet, was zu kurzfristigen elektrischen Spitzenleistungen führt (Juhász et al. 2013, S.51). Die dafür installierte Anschlussleistung wirkt sich unmittelbar auf die Investition der Maschine aus (Juhász et al. 2013, S.51), obwohl die mittlere Leistung der Produktionsprozesse meist deutlich niedriger liegt (Schaab et al. 2019, S.151). Ein Beispiel hierfür sind Roboter zur Fertigung von Karosserieteilen in der Automobilindustrie (Juhász et al. 2013, S.51; Schaab et al. 2019, S.151). Beschleunigungs- und Bremsvorgänge der involvierten Achsen können simultan auftreten. Die höchsten Leistungen treten zu Beginn einer Bewegung auf, um den angeschlossenen Massen ihre benötigte, kinetische Energie zuzuführen. Bremsvorgänge führen zur Rückspeisung elektrischer Energie, welche die Kondensatoren im Gleichspannungszwischenkreis der verbundenen Gleich- und Wechselrichter lädt (Hansen et al. 2015, S.201). Diese generatorische Energie wird beim Überschreiten einer definierten Gleichspannungsschwelle mithilfe von Bremswiderständen in Wärme gewandelt, falls keine rückspeisefähigen Versorgungsmodule (vgl. aktiver Gleichrichter) vorhanden sind (Eggers 2019, S.19).

Die aktive Rückspeisung von Bremsenergie in das AC-Netz findet vor allem bei Industriezentrifugen, Fahr- und Hubantrieben (Specovius 2011, S.310) sowie Werkzeugmaschinen statt (Neugebauer 2012, S.363). Das energetische Potenzial der Rückspeisung in das AC-Netz ist von der zeitlichen Nutzung des Antriebs abhängig (Specovius 2011, S.310). Die Nutzung zurückgespeicherter Bremsenergie motorischer Prozesse bietet ein Energieeffizienzpotenzial zwischen einem und 20 % je nach Betriebsklasse (Papanikolaou et

al. 2013, S.472). Grbović taxiert diesen Wert sogar auf bis zu 50 % (Grbović 2010, S.5). Steigende Strompreise begünstigen seit Jahren den zunehmenden Austausch herkömmlicher Bremswiderstände durch Rekuperationstechnologien (Papanikolaou et al. 2013, S.462).

Für die Zwischenspeicherung kinetischer Energie kommen mechanische, elektrische, elektrochemische, hydraulische und hydroelektrische Speicher infrage (Kapoor & Parveen 2013, S.1). Die hochdynamischen Bewegungen von Mehrachssystemen bedingen zwar nur geringe Speicherkapazitäten, jedoch muss die Bremsenergie innerhalb kürzester Zeit durch den Speicher aufgenommen werden können (Hansen et al. 2015, S.202). Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf Schwungmassenspeichersysteme, da diese als Leistungsspeicher für kurzzeitige dynamische Prozesse prädestiniert sind (Sternner & Stadler 2019, S.44). Sie weisen zudem eine höhere Energiedichte, bessere zyklische Lebensdauer und geringere energiespezifische Investition als vergleichbare Leistungsspeicher auf, wie beispielsweise Superkondensatoren (vgl. Abschnitt 2.2.3) (Sternner & Stadler 2019, S. 641–645).

Im Rahmen einer Umfrage durch Zimmermann et al. gaben 37 % der Befragten an, bereits Energiespeicher in ihrem Unternehmen zu nutzen (Zimmermann et al. 2019, S.13). Mit einem Anteil von über 30 % befindet sich der Energiespeicheranschluss am häufigsten auf der Werksebene der befragten Unternehmen. Nur 13 bis 18 % der Befragten äußerten, dass Energiespeicher bisher auf der Maschinenebene integriert werden (Zimmermann et al. 2019, S.39).

Die Inbetriebnahme einer Produktionsanlage ist für 15 bis 25 % der Projektdauer verantwortlich. Bis zu 90 % davon sind für die Inbetriebnahme der Elektrik und Steuerungstechnik vorzusehen. Aus diesem Anteil sind wiederum 70 % auf Softwarefehler zurückzuführen (Wünsch 2008, S.1). Um diese Kosten zu verringern, kommen seit der Jahrtausendwende beispielsweise sogenannte Werkzeuge zur virtuellen Inbetriebnahme zum Einsatz (Wünsch 2008, S.29). Der große Kostenanteil der Inbetriebnahme bedingt, dass Unternehmen den technischen Integrationsaufwand einer Speichertechnologie vermeiden möchten. Hinzu kommt, dass im Vergleich zu den Speichertechnologien eher die Fertigungsprozesse auf der Maschinen- und Anlagenebene zum Fachwissen der Unternehmen zählen (Zimmermann et al. 2019, S.40).

1.2 Problemstellung

Die erste Herausforderung in dieser Arbeit besteht darin, das Einsparpotenzial eines nachgerüsteten Schwungmassenspeichersystems hinsichtlich der relativen Leistungs- und Bremsenergiereduktion innerhalb weniger Stunden festzustellen. Die zweite Herausforderung ist die virtuelle Inbetriebnahme des Schwungmassenspeichersystems im Zwischenkreis einer Industriemaschine. Daraus ergeben sich mehrere Problemstellungen, die in der Folge erläutert werden.

Unbekannte Strecken- und Reglerparameter

Einige wichtige Informationen von kommerziellen leistungselektronischen Geräten verschiedener Hersteller sind gewöhnlich nicht verfügbar. Der Mangel an genauen Modellen ist ein Hindernis für den Reglerentwurf (Li et al. 2019, S.4840). Die proprietären Kommunikationssysteme unterschiedlicher Steuerungshersteller von Industriemaschinen erschweren den Informationsaustausch und stehen der einfachen Nachrüstung von Schwungmassenspeichersystemen zuwider (Laribi et al. 2020a, S.278). Darüber hinaus ist die Bestimmung von Strecken- und Reglerparametern eines Frequenzumrichters eine aufwändige Tätigkeit, die normalerweise individuell an jedem Gerät durchgeführt werden muss und dabei den Produktionsfluss unterbricht (Huerta et al. 2010, S.96).

Spannungsstabilität trotz veränderter Topologie

Jedes Gerät im Zwischenkreis kann in einem bestimmten Spannungsband betrieben werden. Die Nennspannung liegt meist zwischen 600 und 700 V (Laribi et al. 2020a, S.278). Geregelte Umrichtersysteme weisen eine negative Impedanzcharakteristik auf, was den Zwischenkreis destabilisieren kann (Emadi et al. 2006, S.1112). Es ist nicht sicher, ob die ursprüngliche Spannungsstabilität des Zwischenkreises nach der Speichernachrüstung weiterhin gegeben ist (Laribi et al. 2020a, S.280).

Unbekannte Lastprofile

Industriemaschinen, wie zum Beispiel Roboter für Bestückungs- und Handhabungsanwendungen, führen in aller Regel repetitive Bewegungen aus (Siciliano & Khatib 2016, S.190). Über die Laufzeit eines Produktionsprogramms verändert sich jedoch der

Energieverbrauch der Industriemaschine immer wieder (Juhász et al. 2013, S.52). Da sich Produktionsanlagen nach festen Abläufen in Form von numerischem Programm-Code richten, ist der Energieverbrauch der Antriebe vorhersagbar (Fraunhofer IFF 2013, S.4f.). Die Problemstellung in dieser Arbeit besteht darin, Lastprofile ohne die Informationen des Programm-Codes automatisch zu erkennen und die Speicherregelung dahingehend anzupassen.

Veränderliche Speichergrößen

Die Adaption von Reglerparametern oder Führungsgrößen ist rechtzeitig unter Beachtung des Speicherladezustands, der begrenzten Speicherkapazität und Speicherleistung durchzuführen (Männel et al. 2020, S.904).

Dynamik

Da Schwungmassenspeicher träge sind, müssen sie vorausschauend angesteuert werden (Juhász et al. 2013, S.52). Typischerweise liegt die mechanische Zeitkonstante von Schwungmassenspeichern zwischen 10 und einigen 100 Millisekunden (Fraunhofer IFF 2013, S.4).

Die Auslegung und Optimierung der benötigten Kapazität und der Austauschleistung von Stromspeichern werden in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt. Zimmermann behandelt Ansätze zur Dimensionierung von Stromspeichern in der Industrie (Zimmermann 2022).

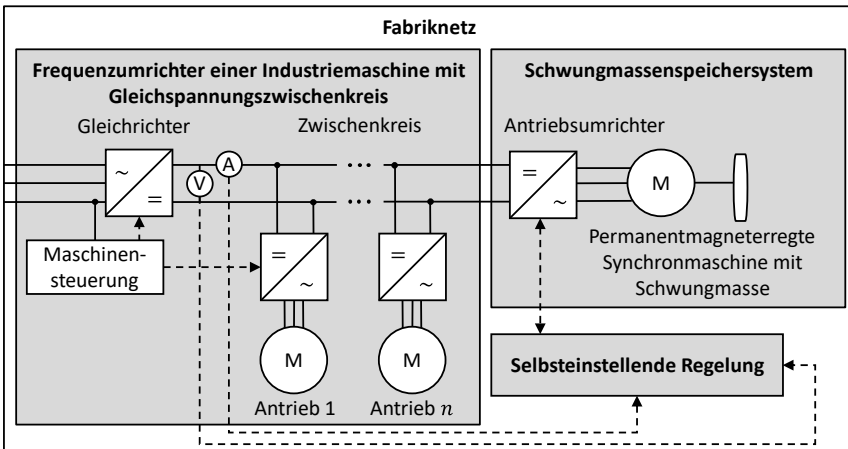
1.3 Zielsetzung und Forschungsfrage

Das Ziel dieser Dissertation ist die Entwicklung und energetische Bewertung einer selbsteinstellenden Regelung für Schwungmassenspeichersysteme in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen zur Vergleichmäßigung des netzseitigen Leistungsbezugs und Aufnahme von Bremsenergie. Dieses Ziel wird durch die Beantwortung der zentralen Forschungsfrage und der fünf Unterforschungsfragen erreicht:

„Wie kann eine selbsteinstellende Regelung für Schwungmassenspeichersysteme in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen entworfen und energetisch bewertet werden?“

1. Wie sind industrielle Gleichspannungszwischenkreise, Schwungmassenspeichersysteme und selbsteinstellende Regelungen definiert?
2. Welche Lösungsansätze für die Regelung von Schwungmassenspeichersystemen in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen existieren bereits?
3. Welche Anforderungen ergeben sich für die selbsteinstellende Regelung von Schwungmassenspeichersystemen in industriellen Gleichspannungsnetzen?
4. Aus welchen Funktionsmodulen setzt sich die selbsteinstellende Regelung zusammen und wie interagieren diese miteinander?
5. Wie kann der Lösungsansatz für die selbsteinstellende Regelung validiert sowie energetisch bewertet werden und wo liegen dessen Einsatzgrenzen?

Der Betrachtungsrahmen der vorliegenden Arbeit in Abbildung 1.1 umfasst ein Fabriknetz sowie den Frequenzumrichter einer Industriemaschine, in dessen Zwischenkreis ein Schwungmassenspeichersystem nachgerüstet werden soll.



Legende

- > Unidirektionale Kommunikationsverbindung
- <-----> Bidirektionale Kommunikationsverbindung
- (A) Stromsensor
- Stromleitung
- Netzknoten
- (V) Spannungssensor

Abbildung 1.1: Betrachtungsrahmen der vorliegenden Arbeit.

Die selbsteinstellende Regelung verarbeitet Messdaten des Zwischenkreises sowie des Speichersystems und gibt Sollwerte an den Umrichter des Speichers weiter.

Der folgende Abschnitt vollzieht die wissenschaftstheoretische Positionierung und stellt die Struktur der Arbeit vor.

1.4 Wissenschaftstheoretische Positionierung und Struktur der Arbeit

Wissenschaft kann definiert werden als „*menschliches Denken, das in bestimmten, spezialisierten Institutionen (Universitäten usw.) nach bestimmten Regeln stattfindet*“ (Ulrich & Hill 1979, S.305). Die Wissenschaftssystematik in Abbildung 1.2 teilt Wissenschaft grundlegend in die Formalwissenschaften und Realwissenschaften.

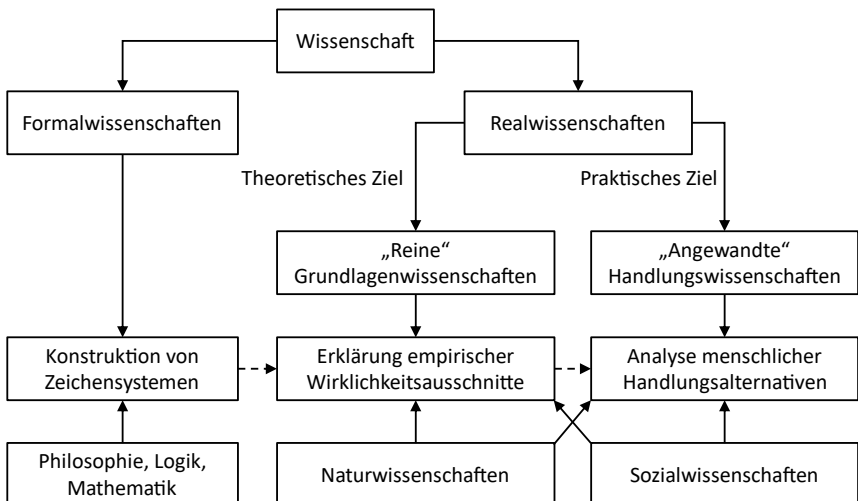


Abbildung 1.2: Wissenschaftssystematik in Anlehnung an (Ulrich & Hill 1979, S.305).

Zu den Formalwissenschaften zählen die Logik, Philosophie und Mathematik. Sie konstruieren Sprachen und Zeichensysteme. Die Realwissenschaften beschäftigen sich mit wahrnehmbaren Wirklichkeiten und besitzen entweder ein theoretisches oder ein praktisches Ziel. Soll ein theoretisches Ziel mithilfe empirischer Erklärungsmodelle erreicht werden, ist von Grundlagenwissenschaften die Rede. Angewandte (Handlungs-) Wissenschaften hingegen betrachten menschliche Handlungsalternativen in sozialen und technischen Systemen zur

Erreichung praktischer Ziele (Ulrich & Hill 1979, S.305). Realwissenschaften basieren zwingend auf Erkenntnissen aus den Formalwissenschaften (Ulrich & Hill 1979, S.306).

Ropohl unterscheidet zudem die Technikwissenschaften von den Naturwissenschaften (Ropohl 2009a, S. 161–162). Technikwissenschaften sind eine nicht klar abgrenzbare Disziplin (Ropohl 2009a, S.163). Während Naturwissenschaften auf theoretische Erkenntnisse abzielen, sollen Technikwissenschaften die praktische Funktionsfähigkeit künstlicher Gegenstände erfolgreich umsetzen (Ropohl 2009a, S.162). Diese von Menschen künstlich geschaffenen Sachsysteme werden auch als Artefakte bezeichnet (Ropohl 2009b, S.149).

Das Ziel angewandter Wissenschaften ist die Schaffung neuer Realitäten mittels Regeln und Modellen (Ulrich 2001, S.179). Empirische Untersuchungen dienen in den angewandten Wissenschaften zur Prüfung von entwickelten Gestaltungsmodellen in Anwendungen (Ulrich 2001, S.179). Laut Ulrich hat der Forschungsprozess der angewandten Wissenschaft seinen Ausgangspunkt in der Praxis (Ulrich 2001, S.194). Die Praxis beeinflusst die Schritte eins, vier, sechs und sieben in Abbildung 1.3 (Ulrich 2001, S.194). Die Theorien und Hypothesen im zweiten Schritt nach Ulrich können mehreren Grundlagenwissenschaften entstammen (Ulrich 2001, S.194). Die vorliegende Arbeit ist interdisziplinär und umfasst, neben der allgemeinen Elektrotechnik, die Kybernetik, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik sowie maschinelles Lernen. Sie lässt sich somit den angewandten Technikwissenschaften zuordnen. Darüber hinaus zählt sie aufgrund der eingesetzten mathematischen Lösungsverfahren in Teilen zu den Formalwissenschaften.

Abbildung 1.3 verknüpft den Forschungsprozess nach Ulrich mit der Struktur der vorliegenden Arbeit. Nachdem die praxisrelevanten Probleme in Abschnitt 1.2 beschrieben worden sind, widmet sich die Dissertation in der Folge den Schritten zwei bis sieben nach Ulrich. Das zweite Kapitel schildert die notwendigen Grundlagen für die Ausarbeitung der Lösung. Im dritten Kapitel erfolgt die Erläuterung bestehender Ansätze aus dem Stand der Wissenschaft und Technik des Untersuchungsbereichs als Ergebnis einer systematischen Literaturrecherche. Das vierte Kapitel umfasst die Anforderungsanalyse für die selbsteinstellende Regelung, die Bewertung der bestehenden Ansätze eben jener gestellten Anforderungen sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen für das Lösungskonzept.



Abbildung 1.3: a) Forschungsprozess nach Ulrich und daran angelehnt b) die Struktur der vorliegenden Arbeit (Ulrich 2001, S.195).

Die Funktionsmodule (FM) und Unterfunktionen (UF) der selbsteinstellenden Regelung in Form von Algorithmen, Gütekriterien und Parametervariationen sind Inhalt des fünften Kapitels. Das sechste Kapitel dient zur Validierung der selbsteinstellenden Regelung mithilfe zweier Fallbeispiele, für welche die Gütekriterien aus dem fünften Kapitel für unterschiedliche Parameterkombinationen ausgewertet werden. Das siebte Kapitel bewertet die Beantwortung der Forschungsfragen und den Erfüllungsgrad der Anforderungen aus den Abschnitten 1.3 und 4.1. Das achte Kapitel enthält die Zusammenfassung der Dissertation, zeigt deren Grenzen auf und motiviert weitere Forschungsarbeiten.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel ordnet die vorliegende Arbeit zunächst in die entsprechenden Produktions- und Automatisierungsebenen ein. Dann erläutert es den Aufbau und die Funktionsweise der elektrischen Energieversorgung von Industriemaschinen. Hierzu gehören industrielle Frequenzumrichter, Gleichrichter, Gleichspannungszwischenkreise, Wechselrichter und elektrische Antriebe. Daraufhin klassifiziert dieses Kapitel verschiedene Speichertechnologien und erklärt speziell den Einsatz von permanentmagneterregten Synchronmaschinen als Schwungmassenspeicher. Des Weiteren klassifiziert dieses Kapitel verschiedene Regelungssysteme, geht auf Ansätze zur Modellbildung und Systemidentifikation ein, stellt die virtuelle Inbetriebnahme vor und inkludiert zudem die Lastprofilerkennung und Lastprofilprognose mittels maschineller Lernverfahren.

2.1 Industrielle Gleichspannungszwischenkreise

Dieser Abschnitt schildert den Aufbau und die Funktionsweise industrieller Frequenzumrichter mit Gleichspannungszwischenkreis, welche in Produktionsmaschinen verbaut sind.

2.1.1 Definition von industriellen Gleichspannungszwischenkreisen

Der Betrachtungsrahmen der vorliegenden Arbeit umfasst die Maschinen- und Aggregatsebene in der Produktion. Abbildung 2.1 zeigt zunächst die klassischen Produktions- und Automatisierungsebenen. Im Hinblick auf die Automatisierungsebenen sind die Steuerungsebene, die Ein- und Ausgangssignale sowie der Produktionsprozess für die selbsteinstellende Regelung relevant.

Die Überwachung und Steuerung der Produktionsprozesse auf der Steuerungsebene erfolgt in der Regel über Feldbussysteme, welche auf der Prozessleitebene an ein übergeordnetes System (engl. *supervisory control and data acquisition*, SCADA) angebunden werden (Heisig 2016, S.7; Heinrich et al. 2017, S. 5–7). Während es sich bei einer Werkzeugmaschine um eine

Einzelmaschine mit einem einzigen Fertigungsverfahren und automatischer Ablaufsteuerung handelt, bieten Bearbeitungszentren mehrere Fertigungsverfahren (Bauernhansl 2020, S.152). Industrieroboter bilden hingegen die Basis für automatisch arbeitende Montagezellen (Bauernhansl 2020, S.156). Bei den Fertigungsarten in einer Produktionsumgebung werden die Einzelfertigung, die Serienfertigung und die Massenfertigung unterschieden (Bauernhansl 2020, S.116). Im Gegensatz zur Einzelfertigung weist eine Serienfertigung häufige Wiederholungen und eine auftragsunabhängige Arbeitsplanung auf (Bauernhansl 2020, S.175). Für diese Arbeit ist ausschließlich die Serienfertigung relevant, da die selbststellende Regelung von Speichersystemen für sich wiederholende Prozesse prädestiniert ist.

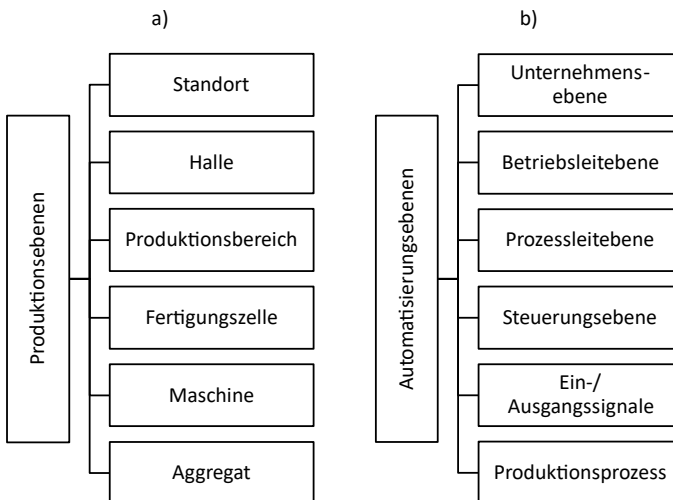


Abbildung 2.1: a) Produktionsebenen in Anlehnung an (Wiendahl et al. 2007, S.785), b) Automatisierungsebenen in Anlehnung an (Bauernhansl et al. 2014, S.405).

Die Bedeutung der Antriebstechnik in der Produktion soll anhand einer Werkzeugmaschine kurz erläutert werden. Der Hauptantrieb einer Werkzeugmaschine setzt sich gewöhnlich aus einem Motor, einem Getriebe und einer Kupplung zusammen (Förster & Förster 2018, S.234). Die Hauptantriebsachse beherbergt die Spindel, dient zur Aufnahme der Werkzeuge und leistet die Schnittbewegung (Förster & Förster 2018, S.235). Die Nebenantriebe übernehmen

die Vorschubbewegungen sowie Anstell-, Zustell- und Nachstellbewegungen (Neugebauer 2012, S.322). Hinzu kommen Hilfsantriebe, welche unter anderem im Kühlkreislauf, bei der Schmierung oder im Hydrauliksystem eingesetzt werden (Neugebauer 2012, S.322). Sie sind außerdem für den Werkzeug- und Werkstückwechsel verantwortlich (Neugebauer 2012, S.322). Die Spindel und die Servoantriebe verantworten den Hauptteil des elektrischen Energieverbrauchs einer Werkzeugmaschine (Stoic et al. 2018, S.55). Wie in Abbildung 2.2 dargestellt, setzen sich elektrische Antriebssysteme in der Regel aus einer Energiequelle, einem Stromrichter, einer Regelung, einer elektrischen Maschine und einer Arbeitsmaschine zusammen.

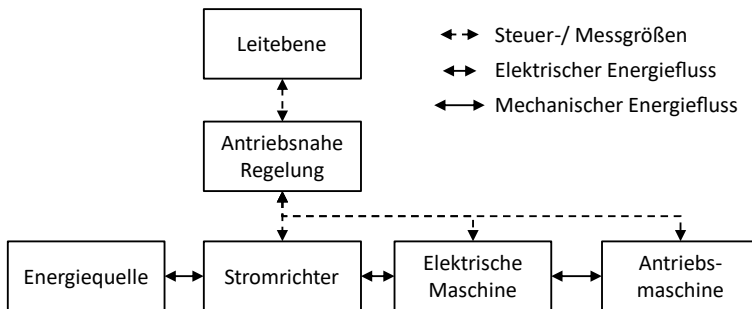


Abbildung 2.2: Allgemeine Struktur von drehzahlvariablen Antriebssystemen in Anlehnung an (Teigelkötter 2013, S.1).

Die Anbindung der Antriebe kann je nach Aufgabe auf verschiedene Arten erfolgen (Neugebauer 2012, S.358). Handelt es sich bei dem Antrieb um einen unregelmäßig Drehstrommotor, wie z. B. einen Asynchronmotor bei Pumpen, so ist eine frequenzstarre, binäre Anschaltung über AC-Schütze an das versorgende 50-Hertz-Netz ausreichend (Neugebauer 2012, S.359). Wird hingegen ein Frequenzumrichter verbaut, sind drehzahlvariable Antriebsbewegungen möglich (Neugebauer 2012, S.360). Der elektrische Anschluss von positions-, drehzahl- und drehmomentgeregelten Bearbeitungsmaschinen und Industrierobotern befindet sich in der Regel auf der Niederspannungsebene unter 1.000 V (Sauer 2021, S.9). Frequenzumrichter bestehen aus einem Eingangsstromrichter bzw. Gleichrichter, einem Zwischenkreis und einem Ausgangswechselrichter auf der Motorseite (Specovius 2011, S.299). Zusätzlich sind Steuerungs-, Regelungs- und

Kommunikationseinrichtungen ein Teil des Frequenzumrichters (Specovius 2011, S.299). In einem sogenannten Zwischenkreisverbund werden mehrere Zwischenkreise miteinander verbunden, sodass ein Antrieb die Bremsenergie eines anderen Antriebs aufnehmen kann (Austermann 2018, S.9). Kommen zusätzlich erneuerbare Erzeugungsanlagen und Energiespeicher hinzu, ist die Rede von einem Gleichspannungsmikronetz (engl. *DC microgrid*) (Sauer 2021, S.17). Die topologische Unterscheidung eines Zwischenkreises, Zwischenkreisverbunds und Gleichspannungsmikronetzes ist Abbildung 2.3 zu entnehmen.

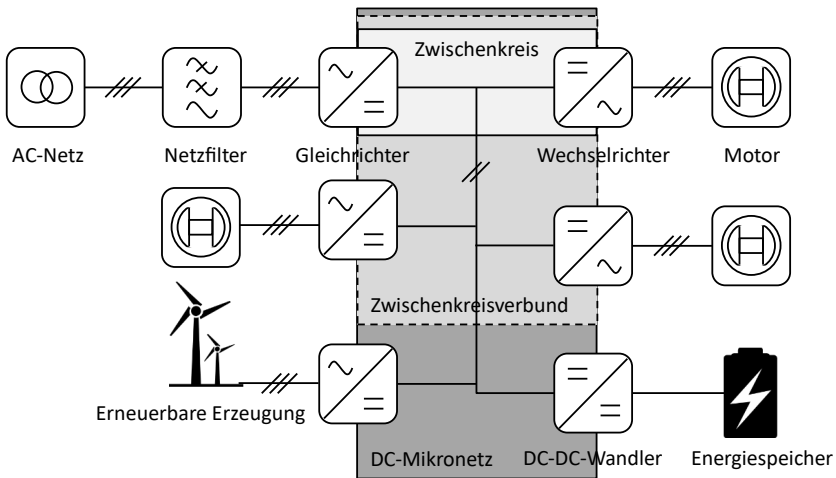


Abbildung 2.3: Topologische Unterscheidung von Zwischenkreis, Zwischenkreisverbund und DC-Mikronetz, in Anlehnung an (Laribi et al. 2023a, S.13).

Etwa die Hälfte der elektrischen Energie moderner Staaten wird durch Leistungselektronik gewandelt (Bernet 2012, S.1). Diese steuert die Energieflüsse zwischen energetischen Systemen (Schröder 2012, S.1). Für die AC-AC-Wandlung von der Netzfrequenz- und Netzamplitude zur variablen Motorfrequenz und Motorspannungsamplitude eignen sich Frequenzumrichter mit Gleichspannungszwischenkreis oder Gleichstromzwischenkreis sowie Matrix-Konverter ohne Zwischenkreis (Kolar et al. 2008, S.28). Während im Gleichspannungszwischenkreis ein Kondensator als Energiespeicher dient, nutzen Gleichstromzwischenkreise stattdessen Drosselinduktivitäten (Kolar et al. 2008, S.27).

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Bestandteile eines Frequenzumrichters, beginnend mit dem Gleichrichter, genauer untersucht.

2.1.2 Gleichrichter

Für die vorliegende Arbeit sind ausschließlich dreiphasige Diodengleichrichter und aktive Gleichrichter mit Spannungszwischenkreis relevant. Anhang 10.1 enthält die Klassifikation der Gleichrichter. Abbildung 2.4 stellt die Schaltungstopologien der beiden Gleichrichtertypen dar.

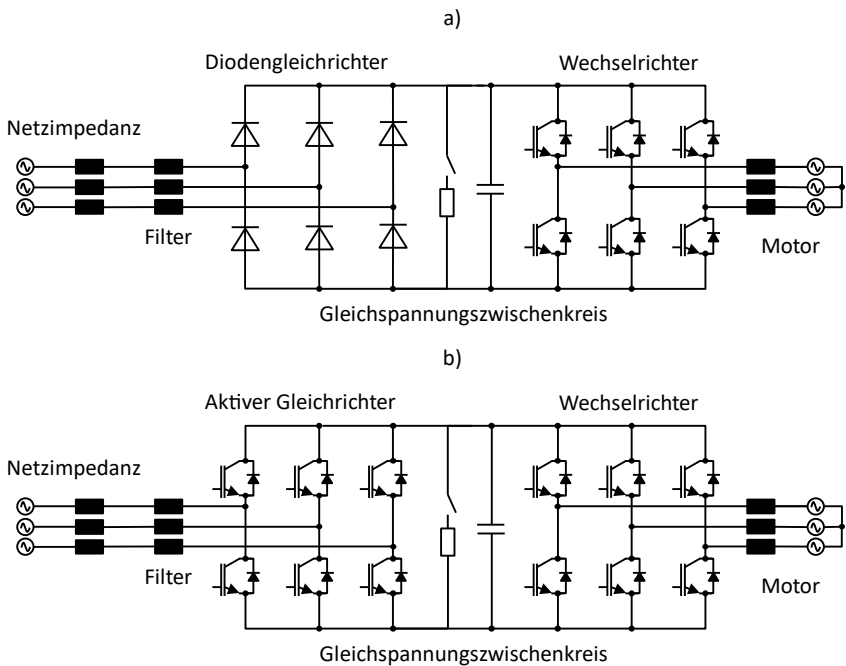


Abbildung 2.4: Frequenzumrichter in der Ausführung mit a) Diodengleichrichter (B6U) oder b) aktivem Gleichrichter (AFE) mit Gleichspannungszwischenkreis, bestehend aus dem Bremschopper, Bremswiderstand und Kondensator zur Versorgung des Wechselrichters in Anlehnung an (Bernet 2012, S.10), (Zach 2010, S.216) und (Schröder 2012, S.197).

Diodengleichrichter

Diodengleichrichter gehören zur Gruppe der netzgeführten (engl. *line commutated*) Stromrichter (Sankar & Vaideeswaran 2018, S.148). Der Vorteil der ungesteuerten B6-Brücke (B6U, Diodenbrücke) liegt vor allem in ihren geringeren Kosten im Vergleich zu rückspeisungsfähigen Gleichrichtern (Rufer & Barrade 2002, S.1152). Auf der anderen Seite kann die ungesteuerte B6-Brücke aufgrund ihrer Diodenschaltung keine Energie in das AC-Netz zurückspeisen. Darüber hinaus kann sie keine Blindleistung kompensieren und nimmt die Blindleistung der Grundschwingung auf. Des Weiteren führt der nicht sinusförmige Eingangsstrom zu einer nennenswerten Verzerrungsleistung (Specovius 2011, S.301). Die dreiphasigen Eingangsdrosseln (vgl. Filter) in Abbildung 2.4 dienen deshalb zur Reduktion von Netzurückwirkungen (Specovius 2011, S.300).

Um die Oberschwingungsströme bei ungesteuerten Gleichrichtern begrenzen zu können, sind in vielen Fällen Drosselinduktivitäten im Zwischenkreis verbaut (Schröder 2012, S.943). Außerdem hängt die Gleichspannung im Zwischenkreis unmittelbar von dem Eingangsspannungsniveau ab (Specovius 2011, S.301). Bei einem dreiphasigen AC-Netz mit einem Spannungseffektivwert v_{ac} von 400 V bzw. einer Strangspannung v_{LN} von 230 V beträgt der Scheitelwert \hat{v} der Gleichspannung ohne Last in Gl. (2.1) ca. 565 V (Senfelds et al. 2015, S.1335). Der eigentliche Gleichrichtwert liegt dagegen bei etwa 540 V (Specovius 2011, S.301).

$$\hat{v} = \sqrt{2} \cdot v_{ac} = \sqrt{6} \cdot v_{LN} \quad (2.1)$$

Im Fall eines Bremsvorgangs verbindet ein umrichtergesteuerter Schalter, der sogenannte Bremschopper, bei Erreichen einer vordefinierten Spannungsschwelle den Bremswiderstand mit dem Zwischenkreis zum Abbau der erhöhten Spannung (Austermann 2018, S. 10–11). Darüber hinaus gibt es Lösungen, welche einen zusätzlichen Wechselrichter in den Zwischenkreis eines Diodengleichrichters integrieren, um Bremsenergie in das AC-Netz zurückzuspeisen (He et al. 2011, S.4636). Teilweise ist die Rückspeisung elektrischer Energie in das AC-Netz jedoch unzulässig (Schröder 2012, S.536).

Aktiver Gleichrichter

Pulsgleichrichter zählen zu den selbstgeführten Stromrichtern. Sie nutzen abschaltbare Leistungshalbleiter in Form von Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode (engl. *insulated-gate bipolar transistor*, IGBT) (Schröder 2012, S.625). Bidirektionale (engl. *regenerative*) Pulsgleichrichter finden sich vor allem in frequenzvariablen Antriebssystemen mit hohen mechanischen Lasten wieder (He et al. 2011, S.4636). Der annähernd sinusförmige Eingangsstrom garantiert eine niedrige Verzerrungsleistung. Die Gleichspannung im Zwischenkreis ist näherungsweise konstant, einstellbar und muss stets über dem Scheitelwert der Netzspannung liegen (Specovius 2011, S.300f.). Im Fall von Bremsvorgängen der elektrischen Antriebe ermöglichen aktive Gleichrichter die Rückspeisung elektrischer Energie in das AC-Netz und kompensieren bei Bedarf Blindleistung. Diese zusätzlichen Vorteile gehen mit einem höheren Preis einher (Specovius 2011, S.301). Obwohl ungesteuerte Gleichrichter in Industrienetzen verbreitet sind, geht der Trend auch auf der Netzseite hin zu selbstgeführten Stromrichtern (Schröder 2012, S.942f.). Der folgende Abschnitt erläutert deren Aufbau und Funktionsweise.

Im angloamerikanischen Raum nennt man bidirektionale Pulsgleichrichter auch *Active Front-End Converter* (AFE) (Specovius 2011, S.343), *Active Infeed Converter* (AIC) (Sauer 2021, S.58), *Voltage Source Converter* (VSC) (Lin et al. 2019, S.4911) oder *Back-to-Back U-Umrichter* (U-BBC) (Schröder 2012, S.627). Zudem ist die Bezeichnung „aktiver Netzstromrichter“ gängig (Bernet 2012, S.11). Im Vergleich zu Diodengleichrichtern zeichnen sich *Active Front-End* Umrichter durch einen höheren Leistungsfaktor aufgrund eines kleineren Phasenversatzes zwischen Strom und Spannung sowie durch eine geringere harmonische Verzerrung aus (Pavlova & Grigorii 2018, S.941ff.). Ein aktiver Gleichrichter ermöglicht einen Vierquadrantenbetrieb, je zwei als Gleichrichter und als Wechselrichter (Sankar & Vaideeswaran 2018, S.149). Die meisten Pulsgleichrichter für Dreiphasensysteme werden mit sechs Pulsen betrieben (Barcenás et al. 2006, S.1).

Die weit verbreitete spannungsorientierte Regelung von aktiven Gleichrichtern in Abbildung 2.5 ermöglicht die indirekte Regelung der Wirk- und Blindleistung (Bernet 2012, S.166). Zunächst misst die spannungsorientierte Regelung zwei verkettete AC-Spannungen v_{12} , v_{23} und zwei AC-Ströme i_1 , i_2 . Die Ströme i_1 , i_2 werden zunächst in das ortsfeste α - β - und

schließlich in das netzspannungssynchrone d-q-System transformiert (Bernet 2012, S.170). Die DC-Sollspannung v_g^* wird zu Beginn festgelegt und laufend am Reglereingang mit der Zwischenkreisspannung v_g am Gleichrichter verglichen (Bernet 2012, S.169). Ein PI-Spannungsregler generiert die Sollwerte für die dq-Ströme i_{dg}^* und i_{qg}^* . Die wirkleistungsbildende d-Komponente i_{dg} sowie die blindleistungsbildende q-Komponente i_{qg} werden mit den Sollwerten verglichen und den beiden unabhängigen Stromreglern zugeführt (Bernet 2012, S.169). Wenn für den Wirkfaktor $\cos(\theta) = 1$ gilt, folgt $i_{qg}^* = 0$ (Bernet 2012, S.169). Die Stromregler geben wiederum die Spannungssollwerte v_{dg}^* , v_{qg}^* für die Koordinatentransformation der d-q- in α - β -Größen $v_{\alpha g}^*$, $v_{\beta g}^*$ vor (Bernet 2012, S.170). Die Koordinatentransformationen erhalten den Phasenwinkel der Netzspannung θ über eine Phasenregelschleife (engl. *phase-locked loop*) (Böcker 2019, S.166). In Abhängigkeit der Spannungsabweichung zwischen den Sollwerten $v_{\alpha g}^*$, $v_{\beta g}^*$ und den Istwerten $v_{\alpha g}$, $v_{\beta g}$ nach der Koordinatentransformation in das α - β -System generiert die spannungsorientierte Regelung die Modulationssignale s_1 bis s_6 für die sechs IGBT. Dadurch stellt sich der gewünschte Ausgleichsstrom zwischen dem AC-Netz und dem Zwischenkreis ein (Sankar & Vaideeswaran 2018, S.148).

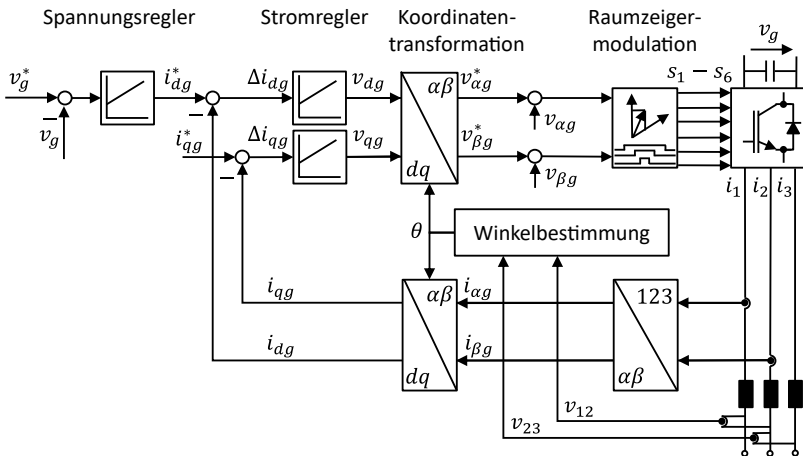


Abbildung 2.5: Spannungsorientierte Regelung eines aktiven Gleichrichters in Anlehnung an (Bernet 2012, S.170).

Die Spannungs- und Frequenzsollwerte können über eine skalare U-f-Kennliniensteuerung oder einen Spannungsraumzeiger vorgegeben werden (Specovius 2011, S.301). Weitere Informationen zur der Koordinatentransformation (Binder 2012, S.1014) und Raumzeigermodulation (Zach 2010, S.174; Bernet 2012, S.128; Schröder 2012, S.696) sind den genannten Quellen zu entnehmen.

2.1.3 Gleichspannungszwischenkreis

Die betrachteten industriellen Frequenzumrichter verfügen über einen Gleichspannungszwischenkreis. Bevor ein Frequenzumrichter betrieben werden kann, muss seine Zwischenkreiskapazität vorgeladen werden, um einen hohen Stromstoß zu vermeiden (Schröder 2012, S.625). Dies geschieht in der Regel über einen Vorladewiderstand, der nach dem erfolgreichen Erreichen der Sollspannung am Kondensator gebrückt wird (Specovius 2011, S.303). Der Gleichrichter liefert die elektrische Energie für den Spannungszwischenkreis (Specovius 2011, S.300). Der Zwischenkreiskondensator übernimmt in der Folge mehrere Aufgaben. Er stellt im Zusammenspiel mit einem Spannungsregelkreis eine nahezu konstante Zwischenkreisspannung sicher (Sankar & Vaideeswaran 2018, S.148). Dies hat den Vorteil, dass mehrere Wechselrichter über einen gemeinsamen Zwischenkreis elektrische Energie austauschen können (Schröder 2012, S.944). Durch seine niedrige Impedanz bei hohen Frequenzen filtert er zunächst das Spannungsripple auf der DC-Seite des Gleichrichters, was durch das Schalten der Halbleiter hervorgerufen wird (Kavitha & Subramanian 2017, S.217). Der Kondensator begrenzt dabei aktiv die Schaltüberspannungen und verkleinert die Dauer der Kommutierung (Schröder 2010, S.627). Des Weiteren hält er die Zwischenkreisspannung auf dem gewünschten Niveau im Falle einer Lastveränderung (Schröder 2012, S.942) oder eines kurzzeitigen Netzausfalls (Kavitha & Subramanian 2017, S.217). Die Kapazität des Zwischenkreiskondensators richtet sich nach mehreren Aspekten. Allen voran ist das erlaubte Spannungsband der Antriebe für die Auslegung der Kapazität von Bedeutung (Schröder 2012, S.942).

2.1.4 Wechselrichter

Wie bereits in Abschnitt 2.1.3 erklärt, nutzt der spannungsgespeiste Wechselrichter einen Kondensator zur Glättung der Zwischenkreisspannung. Wechselrichter mit eingepprägter Spannung (U-Umrichter) vereinen mehrere Vorteile. Sie können sowohl Asynchron- als auch Synchronmotoren speisen und darüber hinaus mehrere Motoren parallel betreiben. Die Motoren können unabhängig voneinander zu- oder abgeschaltet werden. Mit spannungsgespeisten Wechselrichtern lassen sich weite Frequenzbereiche bis 1.000 Hz abdecken sowie ein Wechsel der Drehfeld- und damit der Energierichtung vollzogen werden (Schröder 2012, S.604).

Dreiphasige Wechselrichter setzen sich normalerweise aus drei baugleichen Halbbrückenzeigen zusammen, deren Mittelpunkte mit der Last verbunden sind (Bernet 2012, S.72). Zweipunktwechselrichter sind bei Antrieben in der Niederspannungsebene unter 1.000 V am stärksten vertreten (Bernet 2012, S.9). Mit Hilfe von Modulationsverfahren, z. B. Pulsweitenmodulation und Raumzeigermodulation, werden die Steuersignale für die Leistungshalbleiter zur Generierung der anvisierten Ausgangsspannung am Wechselrichter berechnet (Bernet 2012, S.107). Die Raumzeigermodulation ist hier vorteilhaft, da sie auf modernen, digitalen Steuerungen leichter implementiert werden kann (Bernet 2012, S.145). In der Regel liegen die Pulsfrequenzen von IGBT-Wechselrichtern im niedrigen kHz-Bereich unter 20 kHz (Schröder 2012, S.659). Im Allgemeinen treiben die zuvor vorgestellten Pulswechselrichter entweder Synchron-, Reluktanz- oder Asynchronmotoren an (Schröder 2012, S.944). Bei einer Abbremsung agieren die Drehstrommaschinen als Generator, sodass ihre mechanische in elektrische Energie umgewandelt wird (Bernet 2012, S.9). Der Wechselrichter fungiert dann als Gleichrichter und die elektrische Energie gelangt in den Zwischenkreis (Bernet 2012, S.9). Abschnitt 2.2.4 geht in diesem Zusammenhang auf elektrische Maschinen und Umrichter zur Nutzung als Schwungmassenspeichersystem ein.

2.1.5 Konstantleistungslasten

Die Spannungsstabilität in Elektroenergiesystemen hängt von der Dynamik der Verbraucher ab (Merkle 2002, S.61). Das Ziel der Lastmodellbildung sind möglichst einfache mathematische Modelle zur Beschreibung des Lastverhaltens (Arif et al. 2018, S.5986) mit wenigen

Parametern (Merkle 2002, S.61). Lasten können in statische und dynamische Modelle eingeteilt werden (Arif et al. 2018, S.5986). Statische Lasten nutzen die Wirk- und Blindleistung zur Modellbildung in Abhängigkeit der Spannungsamplitude und der Frequenz (Arif et al. 2018, S.5987). Mit statischen Lasten lassen sich zudem dynamische Lasten annähern (Arif et al. 2018, S.5987).

ZIP-Lastmodelle, auch Polynommodelle genannt, setzen sich aus drei Anteilen zusammen (Erlinghagen 2019, S.33f.). Dazu gehört zu einem die Konstantimpedanzlast (engl. *constant impedance load*, CIL, Z-Last), welche sich zur Modellierung von Beleuchtungsanlagen eignet. Z-Lasten weisen eine quadratische Spannungsabhängigkeit auf (Erlinghagen 2019, S.33). Des Weiteren lassen sich ohmsche Verbraucher durch sogenannte Konstantstromlasten (engl. *constant current load*, CCL, I-Last) abbilden, da sie einen linearen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung aufweisen. Zum anderen gibt es Konstantleistungslasten (engl. *constant power load*, CPL, P-Last), welche bei stationären Leistungsflüssen zum Einsatz kommen. Das CPL-Modell ist nur bei geringen Spannungseinbrüchen valide, da der Strom im Falle einer sehr niedrigen Spannung gegen unendlich strebt, um die konstante Leistung aufrechtzuerhalten (Erlinghagen 2019, S.33).

Wenn die technischen Eigenschaften der Verbraucherantriebe bzw. Wechselrichter weitgehend unbekannt sind, sollte ein möglichst einfach parametrierbares Modell gewählt werden (König et al. 2015, S.471). Im Zuge der immer stärker werdenden Umstellung auf dezentrale Erzeuger und Verbraucher werden zumeist Konstantleistungslasten eingesetzt, um das Verhalten von geregelten, leistungselektronischen Geräten zu modellieren. Dies gilt unabhängig von der Anwendung, wie beispielsweise bei der Modellbildung von Wechselrichtern in Elektrofahrzeugen bzw. Hybridfahrzeugen, (Emadi et al. 2006, S.1112; König et al. 2013, S.29), DC-Mittelspannungsnetzen auf Schiffen (Cupelli et al. 2015, S.2364) und DC-Mikronetzen (Lu et al. 2015, S.2770; Al-Nussari et al. 2017, S.1656; Singh et al. 2017, S.408).

Konstantleistungslasten und aktive Lasten sind als synonym anzusehen (Lu et al. 2014, S.2670). Die differentielle Eingangsimpedanz Z_{cpl} der CPL in Gl. (2.2) ist die Ableitung der Zwischenkreisspannung v_l und des DC-Stroms i_{dcl} der Last. Das Produkt dieser beiden Größen ist die Verbraucherleistung P_l . Die Eingangsimpedanz weist ein negatives Vorzeichen auf und

hat dadurch eine destabilisierende Wirkung auf den Zwischenkreis (Emadi et al. 2006, S.1112). Der virtuelle Widerstand R_l wird auch als Kleinsignal- oder Inkrementalimpedanz Z_{cpl} der Last im Arbeitspunkt $Q(v_0, i_0)$ in Abbildung 2.6 bezeichnet (Cespedes et al. 2011, S.1834).

$$Z_{cpl} = \frac{\delta v_l}{\delta i_{dcl}} = \frac{\delta}{\delta i_{dcl}} \left(\frac{P_l}{i_{dcl}} \right) = - \frac{P_l}{i_{dcl}^2} = - \frac{v_0}{i_0} = -R_l \quad (2.2)$$

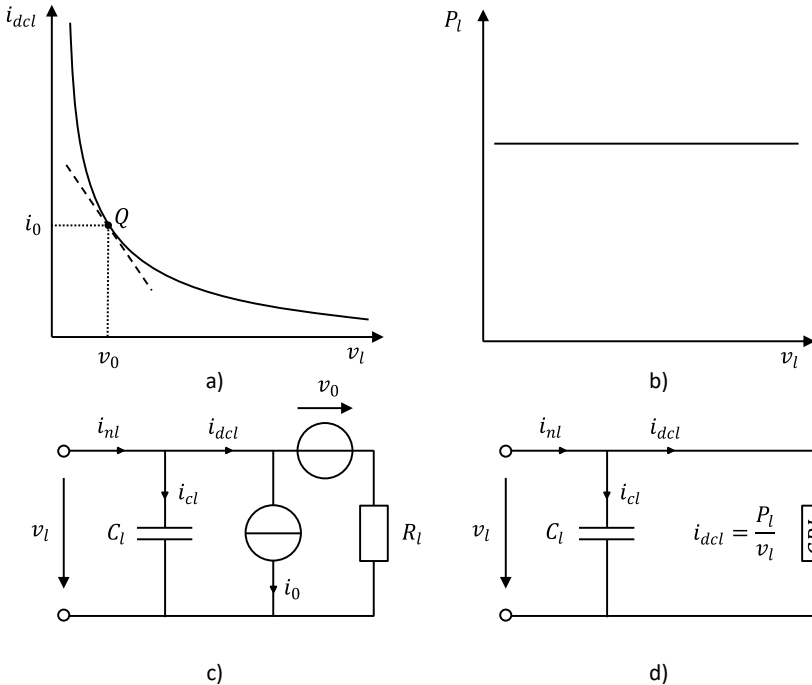


Abbildung 2.6: a) Strom-Spannungs-Kennlinie einer Konstantleistungslast (CPL) mit Tangente im Arbeitspunkt $Q(v_0, i_0)$, b) konstante Last über der Spannung, c) linearisiertes Kleinsignalmodell der CPL, d) nichtlineares Großsignalmodell der CPL, in Anlehnung an (König et al. 2013, S.34; Singh et al. 2017, S. 408–409).

Bei dem nichtlinearen CPL-Modell in Gl. (2.3) steigt der Laststrom, sobald die Spannung am Zwischenkreiskondensator einbricht. Steigt die Spannung, verringert sich dementsprechend die Stromstärke, um einen konstanten Leistungsfluss zu gewährleisten (Emadi et al. 2006, S.1112).

$$f^0(v_l) = i_{dcl}(v_l) = \frac{P_l}{v_l} \quad (2.3)$$

Dieser nichtlineare Zusammenhang (vgl. Hyperbel in Abbildung 2.6a) kann linearisiert werden. Das linearisierte Modell resultiert aus dem Taylorpolynom T der Stufe h um den Entwicklungspunkt x_0 der Funktion $g(x)$ in Gl. (2.4) (Kimmerle & Stroppel 2011, S.102).

$$T_h(g, x, x_0) := \sum_{k=0}^h \frac{g^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k \quad (2.4)$$

Das Polynom ersten Grades entspricht der linearen Gleichung, welche die Tangente durch den Arbeitspunkt $Q(v_0, i_0)$ beschreibt. Mit der Tangentensteigung im Arbeitspunkt und dem Taylorpolynom T_1 der ersten Stufe ergibt sich die lineare Gleichung für i_{dcl} in Abhängigkeit von v_l (vgl. Gl. (2.5) bis (2.8)).

$$\left. \frac{\delta i_{dcl}}{\delta v_l} \right|_{x_0=v_0} = -\frac{P_l}{v_0^2} \quad (2.5)$$

$$T_1(g, v, v_0) = \frac{g^0(v_0)}{0!} \cdot (v - v_0)^0 + \frac{g^1(v_0)}{1!} \cdot (v - v_0)^1 \quad (2.6)$$

$$i_{dcl}(v_l) = \frac{P_l}{v_0} + \left(-\frac{P_l}{v_0^2} \cdot (v_l - v_0) \right) \quad (2.7)$$

$$i_{dcl}(v_l) = -\frac{P_l}{v_0^2} \cdot v_l + 2 \cdot \frac{P_l}{v_0} \quad (2.8)$$

Die vereinfachende Linearisierung kann jedoch die Stabilitätsauslegung erschweren (Hossain 2016, S.10). Stabilisierende Maßnahmen zur Kompensation der negativen Impedanz behandeln (Hossain 2016, S.12), (Hossain et al. 2018, S.33285), (Cespedes et al. 2011, S.1832) und (Cupelli et al. 2015, S.2367).

2.2 Schwungmassenspeichersysteme

Dieses Unterkapitel sowie Anhang 10.2 und 10.3 erläutern den Unterschied zwischen Energiespeichern, Stromspeichern und Leistungsspeichern. Das Unterkapitel enthält außerdem Informationen zu deren Einsatzoptionen und technischen Kennzahlen. Zuletzt stellt es detailliert die mathematischen Zusammenhänge von permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PMSM) zur Nutzung als Schwungmassenspeicher vor.

2.2.1 Definition von Schwungmassenspeichersystemen

Sterner und Bauer definieren Energiespeicher folgendermaßen (Sterner & Stadler 2017, S.26): *„Ein Energiespeicher ist eine energietechnische Anlage zur Speicherung von Energie in Form von innerer, potentieller oder kinetischer Energie. Ein Energiespeicher umfasst die drei Prozesse Einspeichern (Laden), Speichern (Halten) und Ausspeichern (Entladen) in einem Zyklus. Diese werden physikalisch in Form von Energiewandlern (Ein- und Ausspeichern), einer Speichereinheit (Halten) und Hilfsaggregaten realisiert, weshalb die gesamte Anlage auch als Energiespeichersystem bezeichnet wird.“*

Mechanische, elektrische und elektrochemische Energiespeicher zählen zu den Stromspeichern (Zimmermann et al. 2019, S.43). Stromspeicher sind wie folgt definiert (Zapf 2017, S.96): *„Stromspeicher kennzeichnen diejenigen Energiespeicher, die durch Stromfluss elektrische Energie, ggf. über einen Energiewandler und ggf. in eine andere Energieform, laden und zeitversetzt wieder elektrische Energie abgeben können.“*

Wie in Anhang 10.2 dargestellt, zählen Schwungmassenspeicher zu den mechanischen Stromspeichern. Anhang 10.2 enthält zudem weitere Informationen zur Klassifikation von Speichersystemen und den Anwendungsfällen von Stromspeichern.

2.2.2 Einsatzoptionen von Stromspeichern

Schwungmassenspeicher, Kondensatoren sowie Blei-Säure-, Natrium-, Lithium- oder Redox-Flow-Batterien zur kurz- bis mittelfristigen Speicherung kommen für Einsatzoptionen in der Industrie infrage (Zimmermann et al. 2019, S.43). Tabelle 2.1 gruppiert Einsatzoptionen von Stromspeichern in Produktionssystemen. Im Rahmen der Absicherung der Produktion sollen

Stromspeicher verhindern, dass Stromausfälle oder Netzstörungen die Produktqualität verschlechtern oder gar einen vollständigen Produktionsausfall verursachen (Zimmermann et al. 2019, S.16). Bei der Optimierung des Energiebezugs können Stromspeicher ebenfalls einen Beitrag leisten. Zudem ist es möglich, Systemdienstleistungen mittels Stromspeicher bereitzustellen.

Tabelle 2.1: Einsatzoptionen von Stromspeichern in Produktionssystemen, in Anlehnung an (Zimmermann et al. 2019, S.15).

Absicherung der Produktion	Optimierung des Energiebezugs	Bereitstellung von Systemdienstleistungen
Versorgungssicherheit (USV)	Eigenverbrauchsoptimierung	Abschaltbare Lasten
Versorgungsqualität	Rekuperation von Bremsenergie Handel an der Strombörse Netzentgeltreduktion	Regelenergiebereitstellung

2.2.3 Technische Kennzahlen von Leistungsspeichern

Da die betrachteten Produktionsprozesse regelmäßige, kurzzeitige, dynamische Lastspitzen mit geringem Energieinhalt aufweisen (vgl. Abschnitt 2.1), betrachtet die vorliegende Arbeit in der Folge nur noch Leistungsspeicher. Die dazugehörigen Superkondensatoren und Schwungmassenspeicher eignen sich für die beschriebenen Produktionsprozesse, da sie eine hohe Zyklenlebensdauer aufweisen (Zimmermann et al. 2019, S.58). Doppelschichtkondensatoren (engl. *double-layer capacitor*, DLC) und Superkondensatoren (engl. *supercaps*, *supercapacitors*, SC) sind Synonyme (Jabbour & Mademlis 2016, S.8400). Es handelt sich, wie bei den Ultrakondensatoren (UC) (Pikkarainen 2016, S.1), um eine Weiterentwicklung klassischer Kondensatoren. Sie sind technologisch zwischen den elektrischen und elektrochemischen Energiespeichern einzuordnen (Böker et al. 2019, S.337). Tabelle 2.2 stellt die technischen und ökonomischen Kennzahlen von Doppelschichtkondensatoren (DLC) bzw. Superkondensatoren (SC) bzw. Ultrakondensatoren (UC) und Schwungmassenspeichern (SMSP) quantitativ gegenüber.

Schwungmassenspeicher weisen im Vergleich zu Superkondensatoren eine höhere gravimetrische und volumetrische Energiedichte auf. Der Wirkungsgrad der Superkondensatoren liegt dagegen tendenziell höher. Ein Schwungmassenspeicher kann sich rasch selbstentladen, wohingegen ein Superkondensator im unbelasteten Zustand deutlich weniger Ladung im Laufe eines Tages verliert. Die zyklische Lebensdauer von Schwungmassenspeichern erreicht zudem mehrere Millionen Zyklen.

Tabelle 2.2: Technische und ökonomische Kennzahlen von Stromspeichertechnologien in Anlehnung an (Sternier & Stadler 2019, S. 641–645).

Kennzahl	Einheit	DLC/SC/UC	SMSP
Gravimetrische Energiedichte	Wh/kg	0,1 bis 10	5 bis 90
Volumetrische Energiedichte	kWh/m ³	10	210
Wirkungsgrad	%	90 bis 95	83 bis 93
Selbstentladung	%/d	0,004 bis 0,013	72 bis 100
Zyklische Lebensdauer	Zyklen	1.000.000	> 1.000.000
Energiespezifische Investition	€/kWh	5.150 bis 12.000	650 bis 2.625
Leistungsspezifische Investition	€/kW	125 bis 300	125 bis 275

Leistungsspeicher weisen im Vergleich zu Batterien deutlich höhere energiespezifische Kosten auf. Superkondensatoren und Schwungmassenspeicher bedingen eine ähnliche leistungsspezifische Investition. Aufgrund ihrer Eigenschaften kommen Leistungsspeicher, wie Schwungmassenspeicher und Superkondensatoren, im Produktionskontext für eine Auswahl der vorgestellten Einsatzoptionen in Tabelle 2.1 infrage:

- Nutzung von Bremsenergie zur Erhöhung der Energieeffizienz (vgl. Rekuperation)
- Bereitstellung von Spitzenleistung zur Begrenzung des netzseitigen Leistungsbezugs (vgl. Netzentgeltreduktion)
- Überbrückung von Spannungseinbrüchen des Versorgungsnetzes (vgl. Versorgungsqualität)
- Überbrückung von Stromausfällen des Versorgungsnetzes (vgl. Versorgungssicherheit, USV)

Da Schwungmassenspeicher den Superkondensatoren in mehreren technischen und ökonomischen Kennzahlen überlegen sind, betrachtet die vorliegende Arbeit diese Speichertechnologie im Detail. Der nächste Abschnitt beschreibt deshalb die Nutzung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PMSM) als Schwungmassenspeicher.

2.2.4 PMSM als Schwungmassenspeicher

Der in dieser Arbeit betrachtete Schwungmassenspeicher besteht aus einer permanentmagneterregten Synchronmaschine mit Schwungmasse ohne Verbindung zu einer Arbeitsmaschine, bei dem der Rotor als Innenläufer ausgeführt ist. Auf seiner Oberfläche befinden sich vier Permanentmagnete. Des Weiteren sind zwei Kugellager am Rotor angebracht. Beim Rotormaterial handelt es sich um eine Kombination aus hochfesten Stahlblechen und einer Kohlefaserschicht. Eine Vakuumpumpe evakuiert den Innenraum des Motors und verringert dadurch die Luftreibung. Die Evakuierung ermöglicht außerdem hohe Drehzahlen ohne Spannungsdurchschlag unter Beachtung des Paschen-Gesetzes.

Permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PMSM) sind bei Schwungmassenspeichern am häufigsten vertreten. Zudem gibt es Anwendungen, welche auf Reluktanzmotoren setzen. Asynchronmaschinen dienen dagegen selten als Basis für SMSP (Schulz et al. 2015, S.483).

Die Vorteile der PMSM sind ihre hohe Leistungsdichte, ihr sehr guter Wirkungsgrad und der kleine Formfaktor. Dem gegenüber stehen höhere Kosten, Demagnetisierungseffekte und höhere Leerlaufverluste (Li & Palazzolo 2021, S.12). Asynchronmaschinen sind günstiger, robuster und simpler aufgebaut. Allerdings weisen sie eine geringere Leistungsdichte, einen schlechteren Wirkungsgrad und ein höheres Schlupfverhältnis auf (Li & Palazzolo 2021, S.12). Bei Reluktanzmaschinen kommt es zu keinen Demagnetisierungseffekten. Sie sind ähnlich zu den ASM robust und einfach aufgebaut. Allerdings ist ihre Regelung deutlich komplexer und die Technologie bisher weniger ausgereift (Li & Palazzolo 2021, S.12).

Bei der Rotorbauform von Schwungmassenspeichern werden Außen- und Innenläufer unterschieden. Als Rotormaterialien werden meistens Kohlefaserverbundwerkstoffe (CFK) eingesetzt und die Lagerung erfolgt größtenteils magnetisch (Schulz et al. 2015, S.482). Im Trend liegen dabei kleine Rotormassen und hohe Drehzahlen (Schulz et al. 2015, S.482).

PMSM ähneln Gleichstrommotoren, da bei beiden die induzierte Spannung proportional zur Drehzahl ist (Kubade et al. 2017, S.63). Darüber hinaus ist das Drehmoment der PMSM proportional zum Statorstrom. Im Gegensatz zum klassischen Gleichstrommotor nutzt die PMSM keine Bürsten, sondern einen Wechselrichter für die Kommutierung (Kubade et al. 2017, S.63). Die PMSM kann drei Betriebsmodi einnehmen (Gale et al. 2015, S.335):

1. Lademodus
2. Freilaufmodus
3. Entlademodus

Die spannungsorientierte Regelung aktiver Gleichrichter (vgl. Abschnitt 2.1.2) lässt sich auf die feldorientierte Regelung elektrischer Maschinen übertragen (Bernet 2012, S.166). Statt einer Zwischenkreisregelung nutzt die feldorientierte Regelung einen Drehzahlregelkreis (Bernet 2012, S.166). Die feldorientierte Regelung einer PMSM ist in Abbildung 2.7 dargestellt.

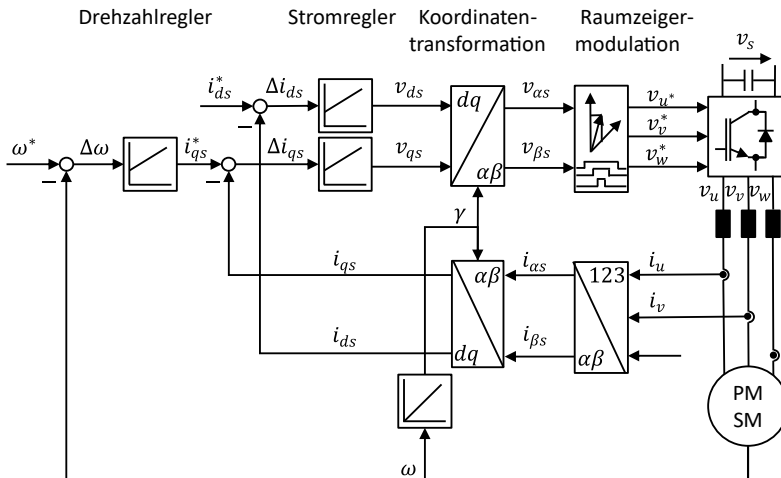


Abbildung 2.7: Feldorientierte Regelung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine (PMSM) in Anlehnung an (Quang & Dittrich 2015, S.11) und (Gerlach 2021, S.7).

Die feldorientierte Regelung ist ein Standardverfahren zur Regelung von Drehfeldmaschinen (Perassi 2007, S.15). Dabei teilen sich die Spannungen und Ströme in eine drehmomentbildende Richtung q und eine flussbildende Richtung d auf (Perassi 2007, S.15),

welche orthogonal aufeinander stehen (Richter 2016, S.18). Dadurch lassen sich die zwei Achsen entkoppeln, was auf dem Modell einer einfachen Gleichstrommaschine aufbaut (Perassi 2007, S.15). Die feldorientierte Regelung bietet den Vorteil, dass das Drehmoment am Motor direkt festgelegt werden kann (Specovius 2011, S.303). Die Ausgangsspannungen der Endstufe werden über eine Raumzeigermodulation mit Pulsweitenmodulation gesteuert.

Die zeitliche Ableitung des Rotorwinkels γ in Gl. (2.9) entspricht der elektrischen Kreisfrequenz ω (Richter 2016, S.16). Der Startwert des Winkels ist γ_0 . Die elektrische Kreisfrequenz ω in Gl. (2.10) kann zudem über die mechanische Drehzahl n bzw. mechanische Winkelgeschwindigkeit ω_m und die Polpaarzahl p berechnet werden (Teigelkötter 2013, S.106).

$$\gamma = \int \omega dt + \gamma_0 \quad (2.9)$$

$$\omega = \frac{d\gamma}{dt} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot p = \omega_m \cdot p \quad (2.10)$$

Die Ständerspannungsgleichung (2.11) im dq-System setzt sich aus drei Anteilen zusammen. Der Stromfluss \underline{i}_{dq} verursacht einen Spannungsabfall am Strangwiderstand R_s . Die Veränderung der Flussverkettung $\underline{\psi}_{dq}$ in der Statorwicklung beruht zum einen auf der Stromänderung $\frac{d\underline{\psi}_{dq}}{dt}$ und zum anderen auf der Rotordrehung $j\omega\underline{\psi}_{dq}$ (Richter 2016, S.16).

$$\underline{v}_{dq} = R_s \cdot \underline{i}_{dq} + \frac{d\underline{\psi}_{dq}}{dt} + j\omega\underline{\psi}_{dq} \quad (2.11)$$

In Gl. (2.12) und (2.13) erfolgt die Zerlegung der Ständerspannungsgleichung in den Real- und Imaginärteil (Teigelkötter 2013, S. 104–105; Richter 2016, S.16). Bei isotropen PMSM mit Oberflächenmagneten (engl. *surface-mounted permanent magnet synchronous motor*, SPMSM) entspricht die Längsinduktivität L_d der Querinduktivität L_q (Teigelkötter 2013, S.105). Die Statorspannungsgleichungen sind außerdem abhängig von den Statorströmen i_{dS} und i_{qS} und dem verketteten Fluss der Permanentmagnete ψ_{PM} . Abbildung 2.8 zeigt das Ersatzschaltbild der PMSM für die d- und q-Achse.

$$v_{ds} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q = R_s \cdot i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_q i_{sq} \quad (2.12)$$

$$v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d = R_s \cdot i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} + \omega(i_{ds}L_d + \psi_{PM}) \quad (2.13)$$

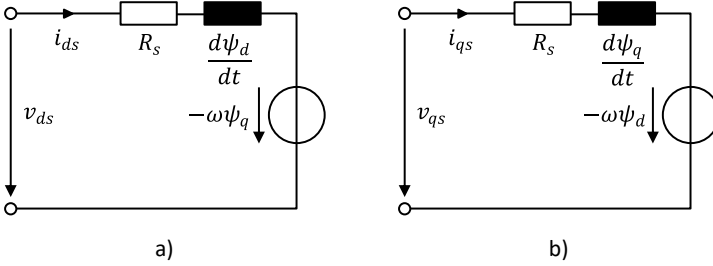


Abbildung 2.8: Ersatzschaltbild der permanentmagneterregten Synchronmaschine in rotorfesten Koordinaten für die a) d-Achse und die b) q-Achse in Anlehnung an (Teigelkötter 2013, S.105; Richter 2016, S.16).

Im eingeschwungenen Zustand gelten die Zusammenhänge in Gl. (2.14) und (2.15), da $di_{ds}/dt = 0$ und $di_{qs}/dt = 0$ ist (Teigelkötter 2013, S.107).

$$v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} - \omega \cdot L_q \cdot i_{qs} \quad (2.14)$$

$$v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \omega \cdot L_d \cdot i_{ds} + \omega \cdot \psi_{PM} \quad (2.15)$$

Die Statorspannungen treiben die PMSM an, welche die elektrische Leistung P_e in die mechanische Leistung P_m wandelt, wie in Gl. (2.16) bis (2.19) dargestellt (Teigelkötter 2013, S.105; Gerlach 2021, S.9).

$$P_e = \frac{3}{2} \cdot (\omega \cdot i_{qs} \cdot i_{qd} \cdot (L_d - L_q) + \omega \cdot \psi_{PM} \cdot i_{qs}) \quad (2.16)$$

$$P_e = \frac{3}{2} \cdot (i_{ds} \cdot v_{ds} + i_{qs} \cdot v_{qs}) \quad (2.17)$$

$$P_e = \frac{\omega}{p} \cdot M_i \quad (2.18)$$

$$P_m = \omega_m \cdot M_i \quad (2.19)$$

Die induzierte Spannung v_p in Gl. (2.20) und Abbildung 2.9, auch elektromotorische Kraft (EMK) oder Polradspannung genannt, hängt von der elektrischen Winkelgeschwindigkeit ω und dem verketteten magnetischen Fluss der Permanentmagnete ψ_{PM} im rotorfesten Koordinatensystem ab (Gerlach 2021, S.13).

$$v_p = \psi_{PM} \cdot \omega \quad (2.20)$$

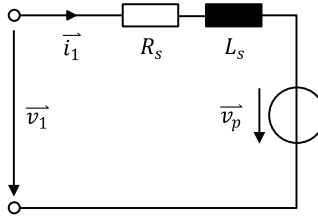


Abbildung 2.9: Ersatzschaltbild der PMSM im stationären Zustand mit den Spannungszeigern $\vec{v}_1 = v_d + j \cdot v_q$ und $\vec{v}_p = j \cdot \omega \cdot \psi_{PM}$ sowie dem Stromzeiger \vec{i}_1 , in Anlehnung an (Schröder 2015, S.1073).

Nach dem Gleichsetzen von Gl. (2.16) und (2.18) sowie dem Kürzen der Winkelgeschwindigkeit erhält man den Zusammenhang in Gl. (2.21). Durch Einsetzen von Gl. (2.22) und (2.23) in (2.21) resultiert Gl. (2.24). Da es sich um eine isotrope PMSM (engl. *non-salient pole machine*) mit $L_d = L_q = L_s$ handelt, welche darüber hinaus nicht im Feldschwächebereich betrieben wird ($i_{ds} = 0$), kann das Reluktanzmoment vernachlässigt werden (Teigelkötter 2013, S.105).

Das Hauptmoment M_i , respektive das innere Drehmoment, ist in Gl. (2.25) daher nur von dem magnetischen Fluss der Permanentmagnete, der Polpaarzahl p und dem Statorstrom in q -Richtung i_{sq} abhängig. Drehmomentmindernde Streuverluste werden hierbei allerdings nicht berücksichtigt (vgl. (Richter 2016, S.27)).

$$M_i = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\psi_d \cdot i_{qs} - \psi_q \cdot i_{ds}) \quad (2.21)$$

$$\psi_d = \psi_{PM} + L_d \cdot i_{ds} \quad (2.22)$$

$$\psi_q = L_q \cdot i_{qs} \quad (2.23)$$

$$M_i = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \left(\underbrace{\psi_{PM} \cdot i_{qs}}_{\text{Hauptmoment}} + \underbrace{(L_d - L_q) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs}}_{\text{Reluktanzmoment}} \right) \quad (2.24)$$

$$M_i = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \psi_{PM} \cdot i_{sq} \quad \text{für } L_d = L_q \text{ oder } i_{sd} = 0 \quad (2.25)$$

Die Drehmomentkonstante k_m in Gl. (2.26) fasst den Koeffizienten vor der Querstromkomponente i_{qs} in Gl. (2.25) zusammen (Gerlach 2021, S. 9–10). Sie gibt die Drehmomentbildung als Resultat des eingepprägten q-Stroms an. Die Drehmomentkonstante lässt sich außerdem in die äquivalente Spannungskonstante k_v umrechnen, welche ebenfalls auf Motordatenblättern zu finden ist.

$$M_i = k_m \cdot i_{qs} \quad (2.26)$$

(Ackermann 2012) leitet einen Ansatz zur gewinnbringenden Nutzung des Reluktanzmoments ab. Für detaillierte Ausführungen zu den Induktivitäten L_d und L_q bei Schenkelpolmaschinen (engl. *salient-pole machine*) sei auf (Dajaku & Gerling 2007) sowie (Richter 2016) verwiesen. Bei dem in dieser Arbeit verwendeten SMSP handelt es sich um eine isotrope Maschine mit oberflächenmontierten Magneten auf dem Rotor (auch Läufer), d. h. es gilt $L_d = L_q$. Anisotropien können hier vernachlässigt werden. Sie äußern sich in der Regel durch Sättigungseffekte im Eisen der Magnete, die Rotorextrizität oder fertigungsbedingte Rotorasymmetrien (Perassi 2007, S.30). Das heißt, dass die Gleichungen vereinfacht werden können und die PMSM durch das sogenannte Grundwellenmodell beschrieben wird. Weitere Annahmen für das Grundwellenmodell erläutert (Perassi 2007, S.23f.). Für die Betrachtung des dreidimensionalen Flussverkettungsmodells unter Berücksichtigung der Eisensättigung, Kreuzverkopplung und Oberwellen sei auf die allgemeinen Systemgleichungen von (Richter 2016, S. 20–21) verwiesen.

Der Statorstrom i_s darf den maximalen Statorstrom i_{smax} in Gl. (2.27) nicht überschreiten. Der Betrag der Statorspannung v_{dqs} in Gl. (2.28) lässt sich ebenso geometrisch herleiten (Teigelkötter 2013, S. 109–110).

$$i_{smax} \geq i_s = \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2} \quad (2.27)$$

$$v_{dqs} = \sqrt{v_{ds}^2 + v_{qs}^2} \quad (2.28)$$

Das Beschleunigungs- oder Bremsmoment M_b resultiert als Differenz zwischen dem inneren Drehmoment M_i und dem Reibmoment M_r (vgl. Gl. (2.29) und (2.30)). Da die PMSM keine mechanisch gekoppelte Lastmaschine antreibt, ist das Lastmoment $M_l = 0$ zu vernachlässigen. Das Reibmoment M_r entspricht damit dem Widerstandsmoment M_w . Das Moment M_b verantwortet die Veränderung der mechanischen Drehzahl n bzw. elektrischen Winkelgeschwindigkeit ω über die Trägheit des Motors J .

$$M_b = M_i - M_r - M_l = M_i - M_w \approx M_i - M_r \quad (2.29)$$

$$M_i - M_r = J \cdot 2\pi \frac{dn}{dt} = \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2.30)$$

Die Verfahren zur Bestimmung der Rotorposition und somit der Drehzahl im Betrieb sind abhängig von der Modellierung des Motors (Perassi 2007, S.31). In dieser Arbeit verwendet der Antriebsverstärker des SMSP zur Bestimmung der Rotorposition einen Beobachter, welcher die induzierte Spannung v_p in den Statorwicklungen auswertet. Dabei verzichtet das Verfahren auf einen Lagegeber und spart somit Kosten (Perassi 2007, S.137).

2.3 Regelungssysteme

Dieses Unterkapitel definiert und klassifiziert Regelungssysteme. Darüber hinaus führt es die klassischen Anforderungen an Regelungssysteme auf. Zudem werden unterschiedliche Ansätze der Modellbildung und Systemidentifikation behandelt. Das Unterkapitel führt außerdem die virtuelle Inbetriebnahme ein. Zuletzt geht das Unterkapitel auf die Lastprofilerkennung und Lastprofilprognose mittels maschineller Lernverfahren ein.

2.3.1 Definition von Regelungssystemen

Die DIN IEC 60050-351 definiert eine Regelung als einen „Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße erfasst (gemessen), mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. [...] Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.“ (DIN IEC 60050-351:2014-09, S.136).

Im weiteren Verlauf des Unterkapitels sowie in Anhang 10.4 werden unterschiedliche Regelungsarten klassifiziert und beschrieben. Die Wahl der Regelung hängt dabei von den Güteanforderungen in Abschnitt 2.3.2 ab (Lunze 2016b, S.358). In der Folge liegt der Fokus auf adaptiven Regelungen und deren Ausprägungen.

Adaptive Regelung

Regelstrecken sind im Betrieb unterschiedlichen Arbeitsbedingungen, Störungen, Alterungserscheinungen und Lastwechseln unterworfen (Unbehauen 2008, S.295). Eine adaptive Regelung passt die Struktur oder Parameter der Regeleinrichtung selbstständig im Hinblick auf Optimierungskriterien oder Einstellregeln an (Unbehauen 2008, S.295), um veränderliche Betriebsbedingungen und –zustände zu egalisieren (DIN IEC 60050-351:2014-09, S.161). In der Literatur gibt es keine allgemeingültige Definition für adaptive Regelungen (Frank et al. 2004, S.76). Die Adjektive „selbsteinstellend“, „selbstanpassend“, „selbstoptimierend“ und „selbstlernend“ werden in vielen Fällen synonym zum Begriff „adaptiv“ angewandt (Unbehauen 2008, S.295). Daher soll an dieser Stelle die Trennung dieser Begriffe erfolgen.

Adaptive Regelungen sind immer nichtlinear strukturiert (Unbehauen 2008, S.296). Sie setzen sich aus drei Teilschritten zusammen (Unbehauen 2008, S.295):

1. Identifikation
2. Entscheidungsprozess bzw. Reglerentwurf
3. Modifikation

Adaptive Regelungssysteme gibt es in drei unterschiedlichen Ausführungen, welche in ihrer Struktur und Funktionsweise differieren (Unbehauen 2008, S.295).

Als erste Gruppe sind die Verfahren der gesteuerten Adaption (engl. *parameter scheduling, gain scheduling*) zu nennen, welche vor allem dann Anwendung finden, wenn das Systemverhalten für messbare Parameteränderungen bzw. Störungen der Strecke vorab bekannt ist (Unbehauen 2008, S.296; Trächtler & Gausemeier 2018, S.160). Dies ist zum Beispiel bei mechatronischen Systemen der Fall (Adamy 2014, S.273). Zur Anwendung der gesteuerten Adaption muss zu Beginn die Linearisierung der Regelstrecke in verschiedenen Arbeitspunkten erfolgen (Adamy 2014, S.273). Die linearen Teilmodelle dienen dann als Grundlage für den Reglerentwurf. Im Betrieb wird dann zwischen den einzelnen Reglern interpoliert, sodass man die Hürden nichtlinearer Regelungen durch lineare Entwurfsmethoden umgehen kann (Adamy 2014, S.273). Typischerweise handelt es sich um eine Nachschlagetabelle (engl. *look-up table*), welche eine bereits vorab kalkulierte Zuordnung zwischen den Ein- und Ausgangssignalen vornimmt (Nelles 2018b, S.285).

Abbildung 2.10 verdeutlicht sowohl die Struktur einer adaptiven Regelung ohne Rückführung (engl. *feedforward adaptive control*) als auch mit Rückführung (engl. *feedback adaptive control*). Im Fall ohne Rückführung werden nur messbare Störgrößen bzw. Einflüsse z evaluiert. Ein prominentes Beispiel hierfür ist das oben beschriebene „Gain-Scheduling“ (Frank et al. 2004, S.76). Ist hingegen eine Rückführung vorhanden, werden die Stellgrößen u , Prozessänderungen d und die Systemgrößen x zum Zeitpunkt t betrachtet (Trächtler & Gausemeier 2018, S.21f.). Beide in der Folge beschriebenen Ansätze adaptiver Regelungen (vgl. MRAC, MIAC) fußen auf der Rückführung von Signalen.

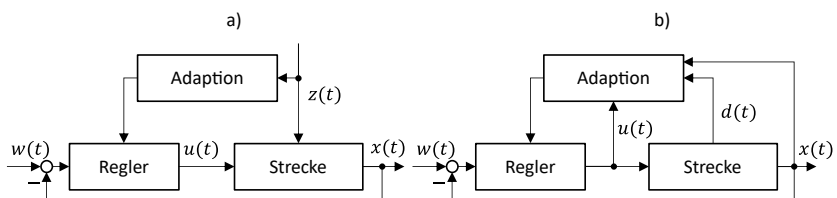


Abbildung 2.10: Struktur adaptiver Regelungen a) ohne Rückführung sowie b) mit Rückführung, in Anlehnung an (Trächtler & Gausemeier 2018, S.22).

Die zweite Gruppe der Modellvergleichsverfahren nutzt ein festes Modell, das gleichzeitig neben dem Grundregelkreis agiert (Unbehauen 2008, S.295). Der adaptive Regler erhält den Modellfehler als Differenz der Regelgröße und des Modellausgangs. Er sorgt dafür, dass der Modellfehler in Abhängigkeit eines Gütekriteriums verringert wird (Unbehauen 2008, S.295f.). Die sogenannte adaptive Modell-Referenz-Regelung (engl. *model reference adaptive control*, MRAC) wird auch als direkte adaptive Regelung bezeichnet (Nelles 2018b, S.288). Ein vorab entworfenes Referenzmodell bildet bei die MRAC die Auswirkungen der Reglerparameter auf die Strecke ab und adaptiert sie im Betrieb (Müller & Villegas 2014, S.241).

Zur dritten Gruppe zählen adaptive Regelungen ohne Vergleichsmodell. In der Regel werden die Parameter der Regelstrecke laufend identifiziert. Allerdings kann auch direkt der Online-Reglerentwurf für die Reglerstrecke erfolgen (Unbehauen 2008, S.296). Die Online-Reglersynthese kann bei zahlreichen Reglertypen eingesetzt werden, wie z. B. Proportional-Integral-Differenzial-Regler (PID), Zustandsregler, verallgemeinerte Minimum-Varianz-Regler (GMV) (Unbehauen 2008, S.296), Deadbeat-Regler sowie Vorgaben der Phasen- und Amplitudenreserve oder der Pole (Bohn & Unbehauen 2016, S.137). Eine Spezialform der adaptiven Regelungen mit Rückführung nennt sich „*Model Identification Adaptive Control*“ (MIAC) (Frank et al. 2004, S.77) (vgl. Abbildung 2.11). Da das Modell aus dem System identifiziert wird, eignet es sich besonders für Fälle mit hoher Unsicherheit (Müller & Villegas 2014, S.243). Man spricht bei dieser Gruppe auch von selbsteinstellenden Regelungen (engl. *self-tuning control*) (Frank et al. 2004, S.78; Bohn & Unbehauen 2016, S.137; Nelles 2018b, S.286). Die grundlegende Idee selbsteinstellender Regelungen besteht darin, eine rekursiven Schätzalgorithmus mit einem Reglerentwurf zu vereinen (Park & Jeong 1999, S.4607). Die Berechnungsvorschriften für den Reglerentwurf gelten dabei als bekannt. Selbsteinstellende Regelungen erleichtern die Inbetriebnahme von Systemen und sind bereits in zahlreichen Serienprodukten implementiert (Frank et al. 2004, S.78). Zur Online-Identifikation eignen sich in den meisten Fällen rekursive Parameterschätzverfahren (Bohn & Unbehauen 2016, S.137). Die geschätzten Regelstreckenparameter aus der Identifikation sind stets als die echten Werte anzusehen, ohne dabei auf den Einfluss von Unsicherheiten zu berücksichtigen (Bohn & Unbehauen 2016, S.173). Der Regler wird inklusive der Unsicherheiten bei jeder diskreten Abtastung neu entworfen (Bohn & Unbehauen 2016, S.137). Selbsteinstellende Regelungen

sind entweder explizit/ indirekt oder implizit/ direkt ausgeführt (Unbehauen 2008, S.295). Im expliziten Fall werden die Identifikation und die Reglersynthese bei jeder Abtastung separat behandelt, sodass ein explizites Streckenmodell zur Reglersynthese herangezogen wird (Bohn & Unbehauen 2016, S.137). Der implizite Fall ermöglicht die direkte Bestimmung bzw. Identifikation der Reglerparameter, sofern die Streckenparameter indirekt als Funktion des Reglers darstellbar sind (Bohn & Unbehauen 2016, S.137f.). Dieses implizite Modell der Strecke vereinfacht die Adaption maßgeblich (Bohn & Unbehauen 2016, S.138).

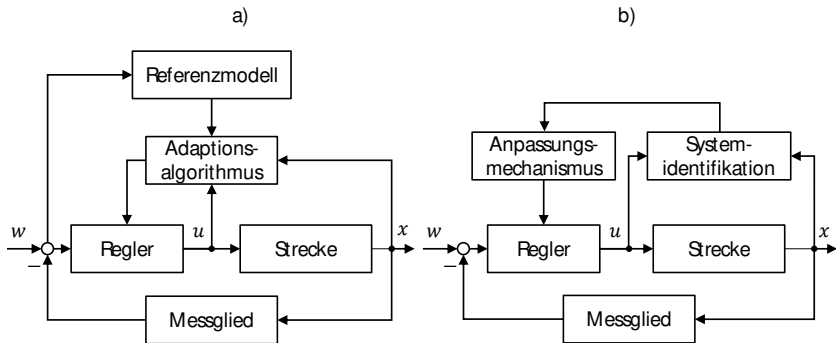


Abbildung 2.11: Struktur einer a) adaptiven Modell-Referenz-Regelung (MRAC) und einer b) adaptiven Regelung ohne Vergleichsmodell (MIAC) bzw. selbststellenden Regelung, in Anlehnung an (Müller & Villegas 2014, S.242).

Weitere modellbasierte Ansätze für adaptive Regelungen zur Abhilfe bei nichtlinearen Unsicherheiten neben dem „Gain-Scheduling“ und der MRAC sind die Gleitzustandsregelung (engl. *sliding-mode control*), das „Backstepping“ das „Adaptive Pole Placement“ und die „Time Delay Control“ (Venanzi 2016, S.656). Modellfreie Ansätze (engl. *model free adaptive control*) umfassen unter anderem die bereits erwähnten Regler mit Unschärfelogik (engl. *fuzzy logic control*) und solche auf der Basis von neuronalen Netzen (Venanzi 2016, S.656).

Anhang 10.4 umfasst die Klassifikation und Beschreibung unterschiedlicher Regelungsansätze. Im englischsprachigen Raum existiert eine Vielzahl weiterer Begriffe für Verfahren des experimentellen oder auch datengetriebenen Reglerentwurfs, wie etwa durch ¹(Hou & Jin 2011, S.1549), ²(Rojas Fernández 2012, S.1) und ³(Duriez et al. 2017, S.vii) beschrieben:

- *data-based control*¹,
- *data-driven control*¹,
- *model-free adaptive control*¹,
- *iterative learning control*¹,
- *unfalsified control*¹,
- *virtual reference feedback tuning*¹²,
- *iterative feedback tuning*¹²,
- *correlation based tuning*²,
- *machine learning control*³

Iterativ lernende und repetitive Regelung

Iterativ lernende Regelungen (engl. *iterative learning control*, ILC) zählen ebenfalls zu den soeben genannten signalbasierten Selbsteinstellungsverfahren (Noack 2018, S.2). Die von (Arimoto et al. 1984) eingeführten iterativ lernenden Regelungen sind prädestiniert für kontinuierliche zyklische oder periodische Prozesse, welche einer vorbestimmten Referenztrajektorie folgen (Kennel 2017, S.1). In derartigen Systemen beeinflussen repetitive Störungen und Dynamiken den Prozess (Kennel 2017, S.1). Das Erlernen dieser Einflüsse ermöglicht den Reglerentwurf (Kennel 2017, S.1). Darüber hinaus können iterativ lernende Verfahren bereits in Betrieb genommene Regelungen ergänzen (Kennel 2017, S.2). Kennel kombiniert beispielsweise eine modellprädiktive Regelung mit einem iterativ lernenden Verfahren (Kennel 2017, S.4). Ein Nachteil der ILC ist der hohe Speicher- und Rechenbedarf (Kennel 2017, S.5). Während klassische adaptive Regelungen und oder auch neuronale Netze den Regler im Betrieb aktiv verändern, modifizieren iterativ lernende Regelungen ein Vorsteuersignal auf Basis der Fehlerinformationen vorangegangener Zyklen bzw. Iterationen. ILC können somit exogene Signale, wie z. B. Führungsgrößen und Störungen, antizipieren (Bristow et al. 2006, S.97). Adaptive Regelungen nutzen die Informationen aus sich wiederholenden Führungs- und Störgrößen dagegen nicht (Bristow et al. 2006, S.96). Im Vergleich zu reinen Vorsteuerungen (engl. *feedforward control*) sind ILC nicht anfällig gegenüber Systemunsicherheiten (vgl. Nichtlinearitäten, Reibung, Störungen) (Bristow et al.

2006, S.97). Den Vergleich von MPC und ILC an einer Spritzgussmaschine betrachtet (Stemmler 2020, S.90).

Repetitive Regelungen (engl. *repetitive control*, RC) weisen großen Ähnlichkeiten zu iterativ lernenden Regelungen auf (Cuiyan et al. 2004, S.1163). Sie basieren entweder auf dem Inneren-Modell-Prinzip (vgl. IMC) oder nutzen ein externes Modell zur Kompensation periodischer Stör- und Führungsgrößen (Cuiyan et al. 2004, S.1160). Ein Beispiel für eine repetitive Regelung findet sich in (Fabian 2009). Iterativ lernende Regelungen unterscheiden sich von repetitiven Regelungen im Wesentlichen dadurch, dass ILC eher für einen diskontinuierlichen Betrieb entworfen werden. Repetitive Regelungen laufen dagegen kontinuierlich ohne Pausen ab (Bristow et al. 2006, S.97). Des Weiteren kehren ILC nach jedem Durchlauf zu denselben Anfangsbedingungen zurück. RC übernehmen stattdessen die Endbedingungen des letzten Durchlaufs als neue Anfangsbedingungen (Longman 2000, S.930f.).

Selbstoptimierende Regelung

Selbstoptimierende Regelungen bauen auf adaptiven Regelungen auf (Frank et al. 2004, S.78). Werden die Vorschriften einer adaptiven Regelung angepasst, spricht man von Selbstoptimierung (Frank et al. 2004, S.78). Frank et al. lieferten 2004 die folgende ausführliche Definition für den Begriff der Selbstoptimierung:

„Unter Selbstoptimierung eines technischen Systems wird die endogene Anpassung der Ziele des Systems auf veränderte Einflüsse und die daraus resultierende zielkonforme autonome Anpassung der Parameter und ggf. der Struktur und somit des Verhaltens dieser Systeme verstanden. Damit geht Selbstoptimierung über die bekannten Regel- und Adaptionsstrategien wesentlich hinaus; Selbstoptimierung ermöglicht handlungsfähige Systeme mit inhärenter „Intelligenz“, die in der Lage sind, selbständig und flexibel auf veränderte Betriebsbedingungen zu reagieren.“ (Frank et al. 2004, S.5).

Drei Aktionen müssen in selbstoptimierenden Systemen laufend durchgeführt werden (Frank et al. 2004, S.11):

1. Analyse der Ist-Situation
2. Bestimmung der Systemziele
3. Anpassung des Systemverhaltens

Somit handelt es sich um eine adaptive Regelung, wenn der zweite Schritt übersprungen wird. Das Ziel der Selbstoptimierung ist nicht nur für Regelungen relevant, sondern lässt sich auch auf Produktionssysteme übertragen (Brecher 2011, S.747ff.).

2.3.2 Güteforderungen an Regelungssysteme

Güteforderungen an geschlossene Regelkreise werden in vier Gruppen eingeteilt (Lunze 2016a, S.9):

1. Stabilitätsforderung
2. Forderung nach Sollwertfolge
3. Dynamikanforderungen an das Übergangsverhalten
4. Robustheitsforderung

Der geschlossene Regelkreis erreicht dadurch das gewünschte Verhalten. Hierzu gehört zunächst, dass jeder Sollwert einen beschränkten Istwert erwirkt. Die stationäre Regelabweichung zwischen Soll- und Istwert soll trotz des Einflusses von Störgrößen minimiert werden. Falls sich der Sollwert dynamisch verändert, muss eine kleine Anregelzeit bei leichtem Überschwingen gewährleistet sein. Die Stellgrößen für Ströme, Drehmomente und Drehzahlen dürfen außerdem keine unzulässigen Werte einnehmen (Teigelkötter 2013, S.136). Als Nächstes werden die Güteforderungen näher erläutert.

Stabilität

Der geschlossene Regelkreis muss asymptotische Stabilität aufweisen (Lunze 2016b, S.354). Asymptotische Stabilität ist gewährleistet, sofern ein System nach einer begrenzten Anregung zurück in seinen Ursprungszustand gelangt (Berns et al. 2019, S.129). In einem instabilen

System nimmt die Regeldifferenz e im Anschluss an eine Anregung unbegrenzt zu (Berns et al. 2019, S.129).

Als Spannungsstabilität wird die Eigenschaft eines elektrischen Energiesystems bezeichnet, die Spannung im Betrieb auf ein erlaubtes Spannungsband zu begrenzen (Schwab 2012, S.896). Der Verlust der Spannungsstabilität kann durch einen unvermittelten Lastzuwachs oder Erzeugungsausfall ausgelöst werden (Schwab 2012, S.896). Dabei wird zwischen der Klein- und der Großsignalstabilität unterschieden (Schwab 2012, S.868). Bei kleinen Störungen, wie Lastschwankungen, lässt sich die Kleinsignalstabilität eines Systems mittels Linearisierungen um den Arbeitspunkt beurteilen (Schwab 2012, S.868). Die Betrachtung der Großsignalstabilität rückt in den Fokus, sobald größere Störungen vorliegen, wie beispielsweise der Wegfall von Erzeugungskapazitäten (Schwab 2012, S.868). Die Beurteilung der Großsignalstabilität erfordert die Lösung eines nichtlinearen Gleichungssystems mithilfe numerischer Verfahren (Schwab 2012, S.868). Die vorliegende Arbeit prüft die Kleinsignalstabilität mittels linearisierter Modelle, da lediglich Lastschwankungen als Störungen auftreten.

Es gibt numerische, z. B. das Hurwitz-Kriterium, sowie graphische Stabilitätskriterien wie das Nyquist-Kriterium (Schumacher & Maurer 2014, S.102). Am häufigsten werden in der Literatur das *“Middlebrook Criterion”*, das *„Opposing Argument Criterion”*, das *„Gain Margin Phase Margin Criterion”* (GMPM), das *„Energy Source Analysis Criterion”* sowie das Nyquist-Kriterium genannt. Die direkte Methode von Ljapunow (int. *Lyapunov*) ist ein möglicher Ansatz, um die Stabilität nichtlinearer Systeme zu prüfen (Schaade 2003, S.21). Die analytische Beurteilung der Stabilität ist bei Systemen mit mehreren Zuständen aufwendig (Schaade 2003, S.12). Zur Stabilitätsanalyse des Kleinsignalverhaltens eignen sich impedanzbasierte Verfahren (Schaade 2003, S. 8–9). Sie sind auf alle Arten von Gleichspannungsnetzen übertragbar (Schaade 2003, S.8). Impedanzbasierte Verfahren unterteilen ein System in frequenzabhängige Impedanzen der Erzeuger Z_e und der Verbraucher Z_v , wie in Abbildung 2.12 dargestellt.

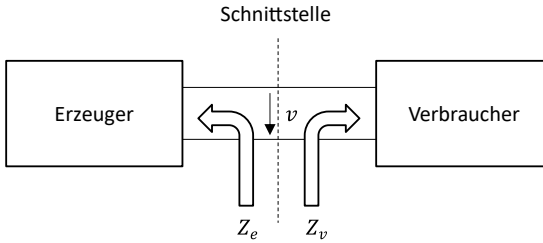


Abbildung 2.12: Aufteilung in Erzeuger- und Verbraucherimpedanz in Anlehnung an (Schaade 2003, S.10; Riccobono & Santi 2014, S.3526; Singh et al. 2017, S.409).

Das Nyquist-Kriterium ist zugleich ein notwendiges und hinreichendes Kriterium für Stabilität (Riccobono & Santi 2014, S.3526). Für Systeme mit mehreren Parametern gestaltet sich die Beurteilung der Stabilität mittels Nyquist-Kriterium allerdings schwierig (Schaade 2003, S.13). Das einfachere Middlebrook-Kriterium basiert auf dem Nyquist-Kriterium und gilt als konservatives Auslegungsverfahren (Schaade 2003, S.13). Das Middlebrook-Kriterium liefert zwar eine hinreichende, aber keine notwendige Stabilitätsbedingung (Riccobono & Santi 2014, S.3526). Dies gilt für alle Verfahren, die auf der Schleifenverstärkung (engl. *minor-loop gain*) basieren (Riccobono & Santi 2014, S.3525). Das Middlebrook-Kriterium in Gl. (2.31) sagt aus, dass der Betrag der Erzeugerimpedanz Z_e kleiner als jener der Verbraucherimpedanz Z_v sein muss. Die Schleifenverstärkung T_{MLG} in Gl. (2.32) muss daher kleiner als eins bzw. 0 dB sein, sodass die Amplitudenreserve (engl. *gain margin*, GM) einen Wert größer eins annimmt (Riccobono & Santi 2014, S.3526). Das Middlebrook-Kriterium betrachtet dabei nicht die Phase der Impedanz.

1. Stabilitätsbedingung nach Middlebrook/GMPM:

$$|Z_e| \ll |Z_v| \quad (2.31)$$

$$|T_{MLG}| = \frac{|Z_e|}{|Z_v|} = \frac{1}{GM} \ll 1 \quad (2.32)$$

Neben der absoluten Stabilität, welche binär als positive oder negative Entscheidung getroffen wird, muss stets zusätzlich die Stabilitätsreserve betrachtet werden (Svaricek 2013, S.96).

Diese besteht aus der Amplituden- und Phasenreserve bzw. dem Amplituden- und Phasenrand in Abbildung 2.13.

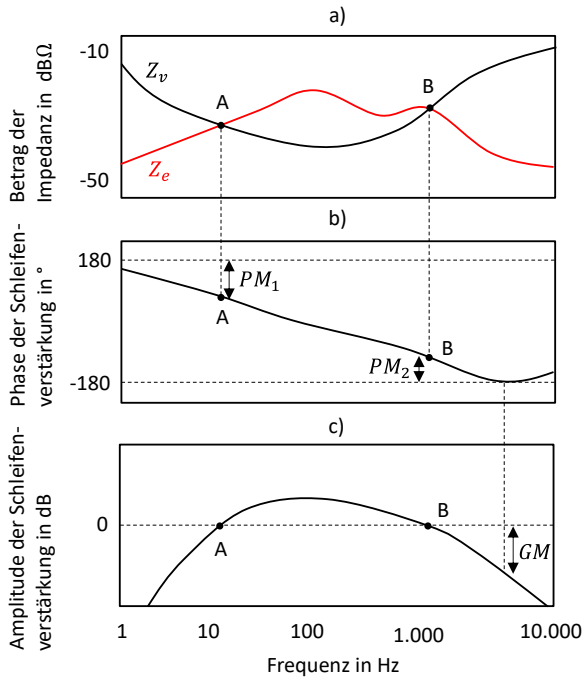


Abbildung 2.13: Erweitertes Bode-Diagramm mit a) Amplitude der Erzeuger- und Verbraucherimpedanz b) Phase der Schleifenverstärkung und c) Amplitude der Schleifenverstärkung mit Amplitudenreserve (GM) und Phasenreserve (PM) laut GMPM-Kriterium in Anlehnung an (Wildrick et al. 1995, S.281).

Das GMPM-Kriterium ist eine Erweiterung des Middlebrook-Kriteriums, gilt als weniger konservativ und betrachtet sowohl die Amplitudenreserve als auch die Phasenreserve (Riccobono & Santi 2014, S.3527). Das GMPM-Kriterium erlaubt unter bestimmten Bedingungen überlappende Amplitudenverläufe (Wildrick et al. 1995, S.280). Aufgrunddessen wird das GMPM-Kriterium in dieser Arbeit angewandt. Das GMPM-Kriterium nutzt in Gl. (2.35) die Phasenreserve (engl. *phase margin*, PM) als zweite Stabilitätsbedingung in Abhängigkeit der quellenseitigen Phase ϕ_e aus Gl. (2.33) und lastseitigen Phase ϕ_v aus Gl. (2.34). Da zwei Schnittpunkte zwischen den Impedanzverläufen der Erzeuger und der Verbraucher auftreten

können (vgl. Abbildung 2.13), gibt es zwei Phasenreserven PM_1 und PM_2 (Wildrick et al. 1995, S.281).

$$\phi_e = \arg(Z_e) \quad (2.33)$$

$$\phi_v = \arg(Z_v) \quad (2.34)$$

2. Stabilitätsbedingung nach GMPM:

$$180^\circ - PM_1 < \phi_e - \phi_v < 180^\circ + PM_2 \quad (2.35)$$

Eine Sollphasenreserve PM^* von 60° (Wildrick et al. 1995, S.281) gilt als erstrebenswert. Als Sollwert der Amplitudenreserve GM^* nennt (Wildrick et al. 1995, S.281) 6 dB bzw. umgerechnet 2. Mit Gl. (2.32) führt dies zu $T_{MLG} = 0,5$. In der vorliegenden Arbeit beträgt die geforderte Phasenreserve 30° , die Amplitudenreserve wird nicht beziffert.

Anhang 10.5 enthält weitere Stabilitätskriterien.

Sollwertfolge

Die Regelgröße x muss einer veränderten Führungsgröße w folgen (Unbehauen 2008, S.185). Die bleibende Regelabweichung $e(\infty)$ muss für vorgegebene Führungs- und Störsignale nach einer größeren Zeit t null betragen (Gl. (2.36)) (Lunze 2016b, S.355). Ist diese Forderung erfüllt, gilt der Regelkreis als stationär genau (Lunze 2016b, S.355).

$$e(\infty) = 0 \quad \text{mit} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} (w(t) - x(t)) = 0 \quad (2.36)$$

Da das Schwungmassenspeichersystem in der vorliegenden Arbeit bereits über einen stabilen und stationär genauen Drehzahlregelkreis verfügt, ist lediglich die Einhaltung der Spannungsgrenzen im Zwischenkreis zu überwachen.

Dynamik

Die Regelgröße muss sich rasch an eine Veränderung der Führungsgröße anpassen (Unbehauen 2008, S.185). Eine hohe Dynamik ermöglicht eine gute Unterdrückung von Störgrößen (Weigel 2004, S.89). In der vorliegenden Arbeit sind die Dynamiken des

Gleichrichters und des Schwungmassenspeichersystems für die Glättung von Antriebslasten relevant. Tabelle 2.3 fasst typische Zeitkonstanten in DC-Stromkreisen zusammen.

Tabelle 2.3: Zeitkonstanten in DC-Stromkreisen (Bessei 2011, S.52; Konsortium DC-INDUSTRIE2 2022, S.104).

Anwendung	Zeitkonstante
DC-Industriesteuerungen	≤ 10 ms
Batteriestromkreise	≤ 5 ms
DC-Motoren und Antriebe	20 bis 40 ms
Elektromagnete	Bis 1.000 ms
Photovoltaikanlagen	1 bis 3 ms
Spannungszwischenkreiswechselrichter	1 bis 3 ms

Die Dynamik eines Antriebssystems richtet sich nach der elektrischen Zeitkonstante T_{el} des Motors in Gl. (2.37) (Laptev 2017, S.69). Sie beträgt bei Antrieben mit geringer Induktivität wenige Millisekunden (Laptev 2017, S.69). Wie in Gl. (2.37) dargelegt, ist die Zeitkonstante des Wechselrichters T_w deutlich kleiner als die elektrische Zeitkonstante T_{el} (Gerlach 2021, S.13). Bei einer Schaltfrequenz von 5 bis 10 kHz beträgt die Periodendauer eines Schaltvorgangs 0,1 bis 0,2 ms (Laptev 2017, S.69). Meist ist T_{el} 50 bis 100 mal größer als T_w , sodass der Strom linearisiert werden darf (Laptev 2017, S.69).

$$T_w \ll T_{el} \quad (2.37)$$

Die vorliegende Arbeit nutzt daher linearisierte Modelle zur Abbildung des Systemverhaltens. Leitungsimpedanzen werden nicht modelliert, da die Zeitkonstanten bei den verwendeten Querschnitten vernachlässigbar klein sind (vgl. (Konsortium DC-INDUSTRIE2 2022, S.104)).

Robustheit

Die Robustheit eines Regelkreises äußert sich dadurch, dass er unempfindlich gegenüber nennenswerten Parameteränderungen ist (Unbehauen 2008, S.185). Sie beschreibt die Fähigkeit, die Funktionalität der Regelung auch dann sicherzustellen, wenn die Regelstrecke große Abweichungen vom sogenannten nominellen Streckenmodell aufweist (Hrycej 2018, S.30). Das nominelle Streckenmodell dient zuvor als Grundlage des Reglerentwurfs (Hrycej 2018, S.30). Die Ursachen von Abweichungen resultieren zunächst daraus, dass

Standardregler bei verschiedenen Produktexemplaren zum Einsatz kommen, obwohl diese Toleranzen aufweisen und dadurch variieren (Hrycej 2018, S.30). Der Regler hängt von Umweltbedingungen ab, welche die Regelstrecke beeinflussen (Hrycej 2018, S.30). Weitere Gründe für abweichende Streckenmodelle können Verschleiß, Deformation und Degradation während der Nutzungsdauer sein. Die Werte für Bauteile, wie z. B. elektrische Filter, sind zwar meist aus Datenblättern bekannt, aber Toleranzen bei der Herstellung und Alterungserscheinungen führen zu Parameterabweichungen (Koppinen et al. 2018, S.6270).

Außerdem können Messungenauigkeiten die Genauigkeit des Modells limitieren. Zudem ist zu bedenken, dass es sich in vielen Fällen bei der Abstraktion des Systems um Vereinfachungen im Hinblick auf die Modellordnung handelt und Nichtlinearitäten ggf. linearisiert werden (Lunze 2016b, S.357; Hrycej 2018, S.31). Je kleiner die Modellunbestimmtheiten, desto genauer lässt sich der Regler auf die Strecke abstimmen (Lunze 2016b, S.379). Bei großen Modellunbestimmtheiten bringen zu hohe Reglerverstärkungen die Stabilität in Gefahr (Lunze 2016b, S.379). Die Robustheit eines Regelkreises kann qualitativ und quantitativ bewertet werden (Lunze 2016b, S.357). Die quantitative Robustheitsanalyse kontrolliert, ob die Güteforderungen an den Regelkreis trotz einer zahlenmäßig limitierten Modellunsicherheit erfüllt werden (Lunze 2016b, S.358). Um dies sicherzustellen, werden in der vorliegenden Arbeit systematisch Parametervariationen durchgeführt.

2.3.3 Modellbildung und Systemidentifikation

Dieser Abschnitt gibt Auskunft zu Verfahren der theoretischen, experimentellen und erfahrungsbasierten Modellbildung. Er geht anschließend auf die invasive- und nicht-invasive Systemidentifikation ein. Die Anhänge 10.6 und 10.7 enthalten weitere Informationen zur Klassifikation dieses Themenkomplexes.

Modellbildung

Modelle helfen dabei, Machbarkeitsstudien zu vollziehen, Systeme zu optimieren und adaptieren sowie sämtliche Betriebsmodi simulativ zu erproben (Schmitt & Andres 2019, S.4). Ein Modell muss „die Realität so genau wie nötig“ (Schmitt & Andres 2019, S.4) abbilden. Wie aus Abbildung 2.14 ersichtlich ist, gibt es drei Herangehensweisen zur Modellbildung. Die erste wird als theoretische, deduktive, fundamentale, rigorose (Kroll 2016, S.42) oder auch

axiomatische Modellbildung bezeichnet (Schumacher & Maurer 2014, S.95). Die zweite Art der Modellbildung wird in Lehrbüchern meist als experimentelle Modellbildung oder (System-) Identifikation definiert (Isermann & Münchhof 2011, S.1; Kroll 2016, S.42). Daneben gibt es die sogenannte regelbasierte Modellbildung, die zum Bereich der Expertensysteme zählt (Kroll 2016, S.45).

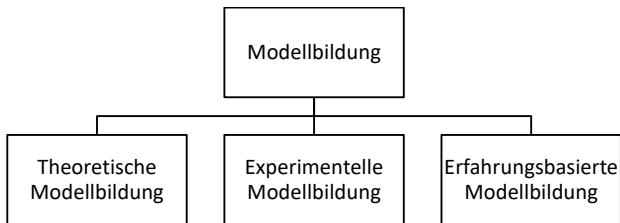


Abbildung 2.14: Allgemeine Klassifikation von Modellbildungskonzepten in Anlehnung an (Kroll 2016, S.42).

Invasive und nicht-invasive Systemidentifikation

Zadeh definierte im Jahr 1962 den Begriff der Identifikation: *„Identifikation ist die experimentelle Bestimmung des zeitlichen Verhaltens eines Prozesses oder Systems. Man verwendet gemessene Signale und bestimmt das zeitliche Verhalten innerhalb einer Klasse mathematischer Modelle. Der Fehler (bzw. die Abweichung) zwischen dem realen Prozess oder System und seinem mathematischen Modell soll so klein wie möglich sein.“* (aus dem Englischen (Isermann & Münchhof 2011, S.8)).

Der Zweck der Systemidentifikation in der Literatur teilt sich in zwei Stoßrichtungen. Die erste umfasst integrierte Überwachungsmethoden für die Maschinenkomponenten, um frühzeitig Fehlerzustände in den Maschinen und Anlagen modellbasiert erkennen zu können (Hellmich et al. 2013, S.1; Hellmich et al. 2014, S.425). Zweitens ermöglicht sie automatische Verfahren zur Reglerparametrierung unter der Zuhilfenahme von Optimierungsverfahren und Einstellregeln (Hellmich et al. 2013, S.2; Hellmich et al. 2014, S.425), vor allem für die Erstinbetriebnahme einer Maschine oder Anlage (Hellmich et al. 2013, S.4). Durch die Systemidentifikation lassen sich Gegenmaßnahmen, wie z. B. eine Regleradaption oder Maschinenwartung, einleiten (Hellmich et al. 2013, S.2). Systemidentifikationsverfahren kommen zum Einsatz, wenn entweder die Modellstruktur gänzlich unbekannt ist oder eine vorgegebene Modellstruktur parametrieren soll (Kroll 2016, S.43). Die Quellen ¹(Bohn

& Unbehauen 2016, S.8f.), ²(Isermann & Münchhof 2011, S.10ff.) und ³(Kroll 2016, S.44) teilen das Vorgehen bei der Systemidentifikation in mehrere Schritte ein:

1. Festlegen des Zwecks², der Ziele³, Systemgrenzen³ und Anforderungen³ der Identifikation
2. Sammeln des A-priori-Wissens²
3. Versuchsplanung¹²³
4. Datenerfassung¹²³
5. Datensichtung und -vorverarbeitung²³
6. Auswahl der Modellstruktur und Durchführung des Identifikationsverfahrens¹²³
7. Validierung des ermittelten Modells¹²³

Im Rahmen der Versuchsplanung und -Durchführung wird die Abtastfrequenz ausgewählt (Kroll 2016, S.44). Unter Beachtung der Nyquist-Frequenz $f_{Nyquist}$ muss die Abtastfrequenz f_a in Gl. (2.38) mindestens mehr als doppelt so groß wie die dominante Prozessfrequenz f_b (vgl. Bandbreite) sein (Bohn & Unbehauen 2016, S.503). Zur Vermeidung von „Aliasing“ sollten die Signale zusätzlich noch vor der Abtastung eine analoge Tiefpassfilterung durchlaufen (Bohn & Unbehauen 2016, S.506). Wird die Abtastfrequenz f_a zu groß bzw. die Abtastzeit $\Delta t = 1/f_a$ zu klein gewählt, resultieren numerische Probleme, da benachbarte Abtastwerte linear abhängig werden (Bohn & Unbehauen 2016, S.503). Bei zeitdiskreten Regelungen im geschlossenen Regelkreis beträgt die Abtastfrequenz im Idealfall das Zehnfache der Prozessbandbreite (Bohn & Unbehauen 2016, S.504). Andere Autoren legen den Wertebereich der Abtastfrequenz großzügiger aus und empfehlen einen Faktor zwischen fünf und 15 (vgl. Gl. (2.39)) (Isermann & Münchhof 2011, S.568).

$$f_a > 2 \cdot f_b = f_{Nyquist} \quad (2.38)$$

$$f_a \approx 5 \dots 15 \cdot f_b \quad (2.39)$$

Für die Modellidentifikation müssen strukturelle Annahmen, wie z. B. die Modellordnung und Totzeiten, getroffen werden (Kroll 2016, S.43f.). Auf die Durchführung des Identifikationsverfahrens (vgl. Parameterschätzung) folgt die Modellvalidierung, bei der die zu Beginn getroffenen Anforderungskriterien geprüft werden (Kroll 2016, S.44). Die

Identifikation von Systemen ist typischerweise ein iterativer Prozess, bei dem nach dem ersten Durchlauf nicht sofort die notwendige Modellgüte erreicht wird (Isermann & Münchhof 2011, S.12).

Für selbsteinstellende Regelungen ist die Identifikation der Regelstrecke eine zentrale Aufgabe (Nelles 2018b, S.287). Eine Identifikation kann entweder im offenen oder geschlossenen Regelkreis vollzogen werden (Nelles 2018b, S.287). Problematisch für die Identifikation im geschlossenen Regelkreis ist, dass eine erfolgreiche Regelung ein ruhiges Signalverhalten sicherstellt. Jedoch ist für die Identifikation ein dauerhaftes Anregungssignal notwendig. Dies ist im offenen Regelkreis simpler, da hier das Anregungssignal frei wählbar ist (Nelles 2018b, S.287). Außerdem gibt der Regler die Eingangssignale nicht vor und Störungen korrelieren aufgrund der fehlenden Rückführung nicht mit den Eingangssignalen (Nelles 2018b, S.287). Aus diesem Grund werden bei der invasiven Systemidentifikation sogenannte Testsignale in das System eingebracht (Nelles 2018b, S.286). Test- oder Eingangssignale (engl. *input signals*) können deterministische, stochastische bzw. zufällige sowie pseudo-stochastische Eigenschaften aufweisen (Isermann & Münchhof 2011, S.13). Zu den am häufigsten verwendeten Testsignalen zählen Sprungfunktionen, Rampen, periodische Sinussignale, Anstiegsfunktionen, Rechteckfunktionen, Impulsfunktionen (Schneider & Heinrich 2017, S.44) und Pseudo-Rausch-Binär-Signale (engl. *pseudo random binary sequence*, PRBS) (Schröder 2010, S.278).

Die meisten Systemidentifikationsverfahren für die Elektromechanik von Werkzeugmaschinen fußen auf invasiven Testsignalen, welche den Prozess anregen (Hellmich et al. 2013, S.2). Dadurch erhöhen sich die Stillstandszeiten der Anlagen, welche während der Identifikation gezielte Bewegungen durchführen müssen. Deshalb wird die Systemidentifikation nicht regelmäßig durchgeführt, was die zeitliche Veränderlichkeit der Regelstreckenparameter vernachlässigt (Hellmich et al. 2013, S.2). Aufgrund von Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsaspekten sowie Instabilitätsbedenken darf der Regelkreis häufig nicht zur Identifikation geöffnet werden (Bohn & Unbehauen 2016, S.127). Die Identifikation integral wirkender Strecken im offenen Regelkreis wird jedoch kritisch gesehen und ist gegebenenfalls nicht möglich (Isermann & Münchhof 2011, S.588; Hellmich et al. 2013, S.4). In dieser Arbeit

weisen die Strecken teilweise integrales Verhalten auf (vgl. Zwischenkreis Kapazitäten, Massenträgheitsmoment).

Die Identifikation im geschlossenen Regelkreis ist zudem vorteilhaft, da die bedeutendsten Frequenzen schon vorhanden sind (Nelles 2018b, S.287). Bei bereits lauffähigen Systemen nach erfolgter Inbetriebnahme wird das Aufschalten von Testsignalen kritisch gesehen (Kroll 2016, S.45). Da für die Experimente an der Anlage oft nur wenig Zeit eingeräumt wird, sollten kontinuierlich „aus aufgezeichneten Betriebsdaten geeignete (informationstragende) Sequenzen“ (Kroll 2016, S.45) herausgefiltert werden. Bei der nicht-invasiven Identifikation ist zu beachten, dass die Modellordnung nicht zu groß gewählt wird und vernachlässigte Modelleigenschaften die Identifikationsgüte in Form von Störungen verschlechtern (Hellmich et al. 2013, S.6).

Bevor ein Identifikationsverfahren zum Einsatz kommt, ist zunächst die generelle bzw. strukturelle Identifizierbarkeit der Parameter zu überprüfen (Isermann & Münchhof 2011, S.246). Anschließend muss sichergestellt werden, dass Parameter im Sinne einer ausreichenden Anregung identifizierbar sind (Isermann & Münchhof 2011, S.250). Eine Strecke ist identifizierbar, wenn entweder ein Testsignal auf den Reglerausgang geschaltet wird oder der Regler variiert wird oder spezielle Bedingungen für die Modellordnungen der Strecke und des Reglers gelten (Bohn & Unbehauen 2016, S.129). Die Bedingungen lauten wie folgt (Isermann & Münchhof 2011, S.356):

1. Bedingung: Die Modellordnung muss vorab bekannt sein.
2. Bedingung: Die Ordnung des Reglers muss groß genug sein, um Gl. (2.40) bis (2.43) zu erfüllen. Hier werden der Zählergrad des Reglers m_{zr} , der Nennergrad des Reglers m_{nr} , der Totzeitgrad m_t , der Zählergrad der Strecke m_{zs} sowie der Nennergrad der Strecke m_{ns} miteinander verglichen.

Wenn für den Zählergrad des Reglers m_{zr} die Ungleichung (2.40) gilt, dann gilt als Bedingung Gl. (2.41).

$$m_{zr} > m_{nr} - m_t + m_{ns} - m_{zs} \quad (2.40)$$

$$m_{zr} \geq m_{ns} - m_t \quad (2.41)$$

Wenn stattdessen für den Zählergrad des Reglers m_{zr} die Ungleichung (2.42) gilt, dann gilt als Bedingung Gl. (2.43).

$$m_{zr} < m_{nr} - m_t + m_{ns} - m_{zs} \quad (2.42)$$

$$m_{nr} \geq m_{zs} \quad (2.43)$$

Im Rahmen der Identifikation muss außerdem die Prozessanregung detektiert werden sowie die Prüfung des Ergebnisses durch Gütekriterien erfolgen (Hellmich et al. 2013, S.6). Hierfür können beispielsweise der Absolutwert sowie die zeitliche Änderung der Ein- und Ausgangssignale oder die spektrale Autoleistungsdichte beobachtet werden (Hellmich 2014, S. 79–84).

2.3.4 Virtuelle Inbetriebnahme

Das Ziel einer virtuellen Inbetriebnahme ist die Validierung von Steuerungssystemen und das Auffinden von Fehlern durch Ablaufsimulationen auf der Grundlage virtueller Modelle (VDI 4499-2:2011-05, S.13). Die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) erleichtert die Zusammenarbeit der Disziplinen Mechanik, Elektrik und Software, indem sie ein mechatronisches Simulationsmodell bereitstellt (VDMA 2020, S.5). Virtuelle Inbetriebnahmen bilden außerdem den Grundstein für digitale Zwillinge (VDMA 2020, S.13).

Abbildung 2.15 verdeutlicht den Einfluss der virtuellen Inbetriebnahme auf den Lebenszyklus im Maschinen- und Anlagenbau. Das zugehörige Rollenverständnis befindet sich in Anhang 10.8. Die virtuelle Inbetriebnahme umfasst die Modellierung der Simulation, die Konfiguration des virtuellen Testaufbaus und den virtuellen Test. Im Vergleich zu einer ausschließlich realen Inbetriebnahme soll sie einen Zeit- und Qualitätsgewinn erwirken und zusätzlich zu den üblicherweise ausgelieferten Elementen ein Simulationsmodell bereitstellen.

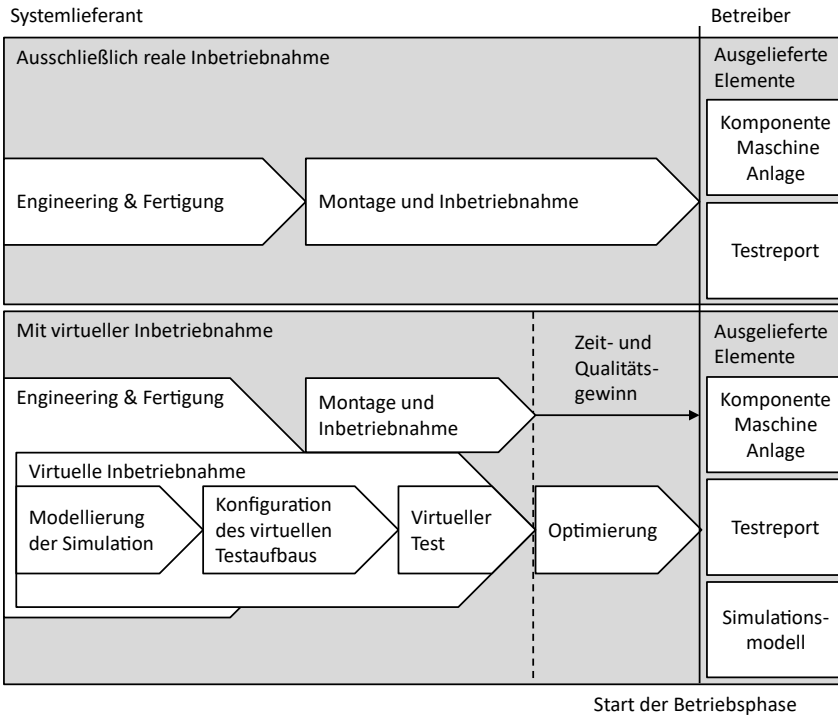


Abbildung 2.15: Lebenszyklus im Maschinen- und Anlagenbau ohne und mit virtueller Inbetriebnahme in Anlehnung an (VDMA 2020, S.7).

Die Verknüpfung eines Simulationsmodells mit einem Steuerungssystem ist als virtueller Testaufbau oder X-in-the-Loop-System (XiL) definiert, mit den drei Ausprägungen Model-in-the-Loop (MiL), Software-in-the-Loop (SiL) und Hardware-in-the-Loop (HiL) (VDMA 2020, S.10).

Die vorliegende Arbeit agiert aus der Sicht des Softwarelieferanten, der das Simulationswerkzeug und Software-Artefakte der selbsteinstellenden Regelung bereitstellt. Die virtuelle Inbetriebnahme des Schwungmassenspeichersystems mithilfe einer selbsteinstellenden Regelung kann einen Beitrag dazu leisten, den theoretischen Nutzen eines nachgerüsteten Speichersystems bereits vor dessen Einbau zu bestimmen. Dies ermöglicht die

frühzeitige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Retrofit-Lösung ohne eine ungenaue Abschätzung der auftretenden elektrischen Lastprofile.

Der Model-in-the-Loop-Ansatz der vorliegenden Arbeit bildet den Frequenzumrichter der Industriemaschine, das Schwungmassenspeichersystem sowie seine selbsteinstellende Regelung in der Modellierungsumgebung *MATLAB/SIMULINK* ab. Die Emulation der Steuerungssoftware (vgl. SiL) sowie die Übertragung der Steuerungssoftware auf die reale Hardware (vgl. HiL) sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Anders als bei klassischen virtuellen Inbetriebnahmen (vgl. (Illmer 2022, S. 46–47)) sind das kinematische Modell und die numerischen Bewegungsreferenzen der Industriemaschine im vorliegenden Fall nur indirekt in Form von Lastprofilen für die selbsteinstellende Regelung relevant.

2.3.5 Maschinelles Lernen

Das Forschungsgebiet der Künstlichen Intelligenz zielt darauf ab, komplexe Systeme nicht nur zu verstehen, sondern auch selbst erschaffen zu können (Russell & Norvig 2021, S.19). Maschinelles Lernen gilt dabei als Schlüsseltechnologie der Künstlichen Intelligenz (Döbel et al. 2018, S.8). Maschinelles Lernen gilt als Nachfolger manuell entworfener Expertensysteme (Döbel et al. 2018, S.8). Zum maschinellen Lernen gehören mathematische und statistische Verfahren, welche die datengetriebene Modellierung sowie die Mustererkennung in Daten ermöglichen (Trächtler & Gausemeier 2018, S.75). Maschinelles Lernen dient dazu, auch bisher unbekannte Daten mithilfe eines Modells verarbeiten zu können (Döbel et al. 2018, S.8). Der Einsatzzweck von maschinellem Lernen umfasst die Zustandsüberwachung, vorausschauende Instandhaltung, Anomalieerkennung sowie die Steuerung, Regelung und Optimierung von Prozessen (Trächtler & Gausemeier 2018, S.74). Die Literatur unterscheidet hinsichtlich des Lernstils das überwachte (engl. *supervised learning*), unüberwachte (engl. *unsupervised learning*) und bestärkende Lernen (engl. *reinforcement learning*) (Döbel et al. 2018, S.10; Russell & Norvig 2021, S.671). Diese nutzen sogenannte Agenten, die über Sensoren und Aktoren mit ihrer Umwelt interagieren können (Russell & Norvig 2021, S.54).

Überwachtes Lernen

Das überwachte Lernen benötigt die korrekten Antworten zu den Trainingsdaten in Form von Kategorien (engl. *label*) (Döbel et al. 2018, S.10). Das überwachte Lernen generiert über einen Agent eine Funktion, welche Eingangs- und Ausgangsdaten miteinander verknüpft (Russell & Norvig 2021, S.671). Bei dem überwachten Lernen unterscheidet man die Klassifikation von der Regression (Russell & Norvig 2021, S.670). Die Klassifikation behandelt Lernverfahren, deren Vorhersage auf einer finiten Anzahl an Klassen basieren (Russell & Norvig 2021, S.670). Die Regression beschäftigt sich hingegen mit Problemstellungen zur Vorhersage von Zahlenwerten (Russell & Norvig 2021, S.670), also beispielsweise elektrischen Leistungen.

Unüberwachtes Lernen

Bei dem unüberwachten Lernen erkennt ein Agent unterschiedliche Muster in den Eingangsdaten, ohne dass er eine explizite Rückmeldung in Form von *Labels* erhält (Russell & Norvig 2021, S.671). Der prominenteste Vertreter dieser Kategorie ist das *Clustering*, also die Gruppierung von rohen Eingangsdaten nach ihren Mustern (Döbel et al. 2018, S.10).

Bestärkendes Lernen

Das bestärkende Lernen verwendet Rückmeldungen aus dem Zusammenspiel mit der Umwelt zur Optimierung von Handlungen und Verringerung von Abweichungen in der Zukunft (Döbel et al. 2018, S.10). Bei den Rückmeldungen aus der Umwelt handelt es sich entweder um Belohnungen oder Bestrafungen (Russell & Norvig 2021, S.671).

In der englischsprachigen Wissenschaftsliteratur treten mit „*prediction*“ und „*forecasting*“ zwei Begriffe auf, die häufig synonym im Rahmen von Zeitreihenanalysen angewandt werden. In dieser Arbeit bedarf es allerdings einer logischen Trennung dieser Begriffe.

- Der erste Fall bezeichnet die Erkennung eines unbekanntes Ausgangswerts mithilfe von bekannten Eingangsinformationen zum Zeitpunkt t (vgl. *prediction*).
- Der zweite Fall beschreibt die Prognose eines zukünftigen Lastprofils für die Zeitpunkte $t + x$ basierend auf vergangenen und aktuellen Informationen (vgl. *forecasting*) (Walther & Weigold 2021, S.5).

Wird der Produktionsprozess transparent gemacht, können beispielsweise Lastspitzen reduziert werden und Anomalien erkannt werden (Mühlbauer et al. 2021, S. 1–2).

Anhang 10.9 ordnet maschinelle Lernverfahren aus der Literatur den drei Lernstilen zu.

2.4 Zwischenfazit

Das zweite Kapitel führt Frequenzumrichter im Produktionsumfeld ein, z. B. in Werkzeugmaschinen und Robotern. Der Überschuss an Bremsenergie im Generatorbetrieb der Antriebe kann entweder über bidirektionale Gleichrichter in das AC-Netz zurückgespeist, durch eine veränderte Bewegungstrajektorie und Energieaustausch im Zwischenkreis optimiert oder in einem zusätzlichen Stromspeicher gepuffert werden. Darüber hinaus ist die Kombination dieser Ansätze ebenfalls möglich (Hansen et al. 2015, S.201). Als Stromspeicher kommen für den Einbau in den Zwischenkreis eines industriellen Frequenzumrichters drei Technologien infrage:

- Batterien
- Superkondensatoren
- Schwungmassen

Die theoretischen Einsatzoptionen für diese Technologien innerhalb einer Produktionsmaschine umfassen, neben der Erhöhung der Energieeffizienz, die Spitzenkappung der Antriebslasten zum Versorgungsnetz hin sowie die unterbrechungsfreie Stromversorgung im Falle eines Stromausfalls oder eines kurzzeitigen Spannungseinbruchs. Ein leistungselektronischer Wandler ermöglicht die gezielte Ansteuerung der Stromspeicher. Für die Systemidentifikation des Frequenzumrichters gibt es invasive und nicht-invasive Verfahren auf der Basis theoretischer, experimenteller oder erfahrungsbasierter Modelle. Zur Regelung von Stromspeichersystemen eignen sich zahlreiche Ansätze, wie beispielsweise PID-Regler, modellprädiktive Regler, optimale Regler, Kennlinienregler, Hysterese- bzw. Schwellenregler, direkte Stromregler, Fuzzy-Regler oder Neuronale Netze sowie deren Kombinationen. Die Regelung von trägen Schwungmassenspeichern muss jedoch durch eine Vorsteuerung überlagert werden, um eine dynamische Systemantwort sicherzustellen. Zudem muss das Regelungssystem stabil, robust und genau agieren.

Die vorliegende Arbeit verfolgt den MIAC-Ansatz, der eine Identifikation voraussetzt. Eine nicht-invasive Systemidentifikation ist hierbei hinsichtlich der Aufwände vorteilhaft, schränkt jedoch den bestimmbaren Modellgrad ein.

Die Software-Artefakte zur Lösung der Regelungsaufgabe lassen sich mit dem Vorgehen der virtuellen Inbetriebnahme verknüpfen. Für die automatische Lastprofilerkennung und Lastprofilprognosen kommen außerdem maschinelle Lernverfahren infrage.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Zu Beginn dieses Kapitels stehen zunächst relevante Forschungsprojekte und die Systematik der Literaturrecherche für den Stand der Wissenschaft und Technik im Mittelpunkt. Daraufaufgehend werden die wichtigsten wissenschaftlichen Ansätze für die Lastprofilerkennung bzw. Lastprofilprognose, die Modellbildung und Systemidentifikation sowie die Speicherregelung vorgestellt und analysiert. Die Lösungsansätze aus dem Stand der Wissenschaft und Technik werden in Kapitel 4 anhand der gestellten Anforderungen bewertet.

3.1 Forschungsprojekte

In den folgenden Abschnitten werden Forschungsprojekte der vergangenen Dekade vorgestellt, welche den wissenschaftlichen Rahmen und die Basis für die vorliegende Arbeit bilden.

Meike und Rankis beschreiben eine Möglichkeit der Systemerweiterung über einen gemeinsamen Zwischenkreis (Meike & Rankis 2012). Dieser Ansatz erhöht die Energieeffizienz von Industrierobotern um 20 % ohne den Einsatz von Energiespeichern. Das Forschungsprojekt „*Automation and Robotics for European Sustainable manufacturing*“ (AREUS, 2013–2016) betrachtete in diesem Zusammenhang eine Roboterzelle mit mehreren Prozessschritten aus dem Karosserierohbau (Europäische Kommission 2017, S.1).

In den Forschungsprojekten „*DC-INDUSTRIE I*“ (2016–2019) und „*DC-INDUSTRIE II*“ (2019 – 2022) wird der Ansatz des erweiterten Zwischenkreises zu einem Mikronetz auf der Basis von Gleichstrom (engl. *direct current*, DC) ausgebaut. DC-Mikronetze ermöglichen die Integration und intelligente Regelung erneuerbarer Energieerzeuger und Energiespeichersysteme (ZVEI e. V. 2022, S.1).

Im Forschungsprojekt „*Fast Storage BW II*“ (FSBW II, 2015 – 2017) entwickelten die Projektpartner sogenannte PowerCaps, einen hybriden Energiespeicher mit den Vorzügen von Batterien und Superkondensatoren. Diese neue Technologie wurde u. a. in ein industrielles

Gleichstromnetz, fahrerlose Transportsysteme und ein Regalbediengerät integriert (Fraunhofer IPA 2017, S.1).

Im Zuge des Forschungsprojekts *„Energiesparender Schwungmassenspeicher mit HTSL-Magnetlagern für den dezentralen Einsatz“* (DynaStore, 2000 – 2006) wurde an der Technischen Universität Braunschweig ein Schwungmassenspeichersystem mit berührungsloser Lagerung zur Sicherung der Spannungsqualität und unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) von Industrieprozessen sowie zur Bremsenergienutzung und Spitzenlastreduktion im Verkehrssektor entwickelt (Canders et al. 2007, S.1).

Das Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung untersuchte im Forschungsprojekt *„Energierückgewinnung für Mehrachsmaschinen“* (ERMA, 2011 – 2013) den Einsatz eines Schwungmassenspeichersystems im Zwischenkreis von Sondermaschinen, Werkzeugmaschinen und Robotern. Die Forscher nutzten eine vorausschauende, modellbasierte Echtzeitsimulation der Maschine sowie das Bewegungsprogramm zur Steuerung des Speichers und des Zwischenkreises (Fraunhofer IFF 2013, S.3).

Im Rahmen des Projekts *„Energieeffiziente Fabrik für interdisziplinäre Technologie- und Anwendungsforschung“* (ETA-Fabrik, 2013 – 2018) an der TU Darmstadt untersuchten die Wissenschaftler einen kinetischen Energiespeicher zur elektrischen Lastspitzenglättung in Produktionsbetrieben. Der Schwungmassenspeicher reduzierte die Anschlussleistung der ETA-Fabrik und erbrachte zudem Systemdienstleistungen, d. h. Frequenzregelung bzw. Primärregelung (TU Darmstadt 2019b, S.1).

Das verwandte Forschungsvorhaben *„Kostenreduktion bei gleichzeitiger Erhöhung der Verfügbarkeit und Effizienz von Schwungmassenspeichern in Außenläufer-Bauform“* (KoREV-SMS I, 2015 – 2019) der Technischen Universität Darmstadt zielte darauf ab, die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit dieser Technologie zu verbessern. Die Forschungsschwerpunkte lagen auf der Reduktion der Betriebskosten, der Magnetlagerung im Betrieb und der Fanglagerung im Fehlerfall (TU Darmstadt 2019a, S.1). Im Nachfolgeprojekt KoREV-SMS II (2019 – 2022) sollte die Gesamteffizienz des Systems weiter erhöht werden, um daraus ein marktreifes Produkt abzuleiten, welches zur Stabilisierung des Stromnetzes eingesetzt werden kann (TU Darmstadt 2022, S.1).

Das Verbundprojekt „HESIS“ war die Grundlage für die Entwicklung des in dieser Arbeit betrachteten Schwungmassenspeichersystems. Die Forscher testeten die direkte Ansteuerung des Energiepuffers in einer Servopresse, indem sie die Drehzahlregelung eines Schwungmassenspeichers mit den im Produktionsprogramm vorgesehenen Hüben synchronisierten (Juhász & Hein 2019, S.1).

Die vorliegende Dissertation basiert in Teilen auf dem Forschungsprojekt „Selbsteinstellende Energieeffizienzregelung für intelligente Schwungmassenspeicher“ (StEff-Control, 2019 – 2021). Ziel des Vorhabens war die schnellere Inbetriebnahme der mechanischen Stromspeichertechnologie in industriellen Zwischenkreisen von Werkzeugmaschinen und Aufzügen zur Nutzung von Bremsenergie und zur perspektivischen Reduktion der Anschlussleistung (Fraunhofer IPA 2021, S.1).

Das aktuelle Forschungsprojekt „Energiespeicher in der Produktion“ (ESIP, 2022 – 2025) fokussiert sich auf die Erstellung eines Werkzeugs zur Auslegung sowie zur Betriebsführung von Energiespeichern auf der Maschinen- und Anlagenebene. Des Weiteren entwickeln die Projektpartner einen Digitalen Zwilling der Maschinen, Anlagen, Energiespeicher und deren Betriebsführung (KIT 2022, S.1).

3.2 Systematische Literaturrecherche

Damit der Stand der Wissenschaft und Technik in dieser Arbeit die wichtigen und aussagekräftigen Veröffentlichungen umfasst, müssen die Suchkriterien eingegrenzt und die Ergebnisse gefiltert werden. Dafür eignet sich die Detaillierung der Suchkategorien mit ihren Ausprägungen in Tabelle 3.1. Die Literaturrecherche im Rahmen dieser Arbeit umfasst industrielle Frequenzrichter mit Gleichspannungszwischenkreis auf der Niederspannungsebene, in welche ein Schwungmassenspeicher indirekt über einen leistungselektronischen Wandler integriert werden soll.

Tabelle 3.1: Morphologischer Kasten für die Suchkriterien der Literaturrecherche.

Kategorie	Ausprägungen*			
Energiesektoren	Industrie	Haushalte	Gewerbe, Handel, Dienst- leistungen	Verkehr
Spannungsebenen	Niederspannung	Mittelspannung	Hochspannung	Höchstspannung
Anwendungsfälle von Stromspeichern	Energiemarkt- partizipation	Erneuerbare Energie-erzeugung	Automotive und Transport	Tragbare Stromspeicher
	Inselnetze	Mikronetze	Industriemaschinen (Roboter, Pressen, Werkzeugmaschinen, Aufzüge, Hochregallager, etc.)	
Charakterisierung der Prozesse	Stochastisch		Deterministisch	
Industrielle Stromspeicher- technologien	Batterien	Kondensatoren	Schwungmassen	
Einsatzoptionen von Stromspeichern	Versorgungssicherheit (USV)	Eigenverbrauchs- optimierung	Handel an der Strombörse	Abschaltbare Lasten
	Versorgungs- qualität	Rekuperation von Bremsenergie	Netzentgelt- reduktion	Regelenergie- bereitstellung
Zwischenkreis- kopplung der Stromspeicher	Direkt		Über einen leistungselektronischen Wandler	

*Die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Ausprägungen sind grau hervorgehoben.

Energiesektoren

Ausschließlich der industrielle Energiesektor ist für diese Arbeit relevant.

Spannungsebenen

Stromspeicher lassen sich auf mehreren Spannungsebenen integrieren. In dieser Arbeit ist jedoch nur die Niederspannungsebene bei einem Effektivwert der Netzspannung von 400 bis 480 Volt relevant. Hier werden die betrachteten Frequenzumrichter der Industriemaschinen in der Regel angeschlossen.

Anwendungsfälle von Stromspeichern

Als Anwendungsfälle für die Integration von Stromspeichern kommen Industriemaschinen mit Zwischenkreis sowie die verwandten (DC-) Mikronetze infrage. Der wissenschaftliche Fokus in dieser Arbeit liegt auf produktionstechnischen Frequenzumrichtern und verwandten Maschinen. Hierzu gehören Aufzüge, Hochregallager, Industrieroboter, Pressen und Werkzeugmaschinen.

Charakterisierung der Prozesse

Die genannten Produktionsanlagen arbeiten deterministische Programme ab. Stochastische Anwendungen aus dem Verkehrssektor mit zufälligen Fahrprofilen sowie (öffentliche) Stromnetze mit erneuerbaren Erzeugungsanlagen (vgl. (Böttiger et al. 2018)) zählen zu den häufigsten Anwendungsfällen für Stromspeicher. Jedoch unterliegen sie exogenen Einflüssen, wie etwa Temperaturschwankungen, der Sonneneinstrahlung, Energiemarktpreisen und Routenoptionen. Die Prognose exogener Signale außerhalb von industriellen Produktionsanlagen ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Da Produktionsanlagen auch Aufzugsanwendungen umfassen, sind diese trotz ihres teilweise stochastischen Prozessverhaltens vertreten.

Industrielle Stromspeichertechnologien

Veröffentlichungen wie (Zhao et al. 2020), welche z. B. einen hydraulischen Energiespeicher zur Rekuperation von Bremsenergie in einem Aufzugssystem nutzen, sind irrelevant, da der Fokus auf industriellen Stromspeichern liegt. Darunter fallen ausschließlich Technologien, wie Batterien, Kondensatoren oder Schwungmassenspeicher.

Einsatzoptionen von Stromspeichern

Als Einsatzoptionen für Stromspeicher in Zwischenkreisen kommen die Nutzung von Bremsenergie, die Kappung dynamischer Verbraucherlasten sowie die Bereitstellung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung infrage. Letztere ist aufgrund der geringen Kapazität des in dieser Arbeit betrachteten Speichersystems nicht realistisch. Alle anderen vorgestellten Einsatzoptionen, vor allem in Verbindung mit dem Energiemarkt und erneuerbaren Erzeugungsanlagen, liegen ebenfalls außerhalb der Systemgrenze.

Zwischenkreiskopplung der Stromspeicher

Kondensatorspeicher zählen zu den elektrischen Energiespeichern und können entweder direkt oder über einen leistungselektronischen Wandler mit dem Zwischenkreis verbunden werden (Rufer & Barrade 2002, S.1152). Ansätze ohne steuerbaren Wandler als Nahtstelle zwischen Stromspeicher und Zwischenkreis, wie in (Neugebauer 2012; Putz et al. 2015; Putz et al. 2016) vorgestellt, sind für Schwungmassenspeicher aufgrund der unmöglichen direkten Kopplung ungeeignet und werden deshalb nicht weiter betrachtet.

Mit den getroffenen Einschränkungen des Suchbereichs ergeben sich Schlagwortkombinationen mit ODER-, UND- bzw. UND-NICHT-Operatoren, welche in mehreren Datenbanken geprüft werden. Zu verwendeten Datenbanken zählen:

- DART Europe
- Deutsche Nationalbibliothek (DNB)
- Global ETD Search
- Pro Quest
- Scopus / Science Direct (Elsevier)
- Springer Link
- IEEE Xplore
- Google und Google Scholar

Ziel der Suche sind jeweils maximal 50 bis 200 Ergebnisse pro Schlagwortkombination in einer der Datenbanken. Die gefundenen Artikel werden anhand ihrer Kurzfassung auf ihre Relevanz hin geprüft und entweder aussortiert oder vollständig gelesen und zusammengefasst. Zudem ist es sinnvoll, die Literaturverzeichnisse relevanter Kernquellen nach weiteren Ansätzen aus der Vergangenheit zu untersuchen. Darüber hinaus bietet es sich an, zusätzlich in den Datenbanken die Referenzen anderer Quellen aus dem nachfolgenden Zeitraum auf die besagte Kernquelle zu überprüfen. Mit jeder Suche werden neu bestimmte Synonyme in die Schlagwortkombinationen aufgenommen. Ein Beispiel hierfür sind die unterschiedlichen Bezeichnungen für aktive Gleichrichter im deutsch- und englischsprachigen Raum. Synonyme werden mit ODER-Operatoren verknüpft.

3.3 Bestehende Ansätze im Untersuchungsbereich

In den kommenden Abschnitten werden Ansätze zur Lastprofilerkennung und Lastprofilprognose, Modellbildung und Systemidentifikation sowie zur Speicherregelung anhand repräsentativer Kernquellen erläutert. Der folgende Abschnitt präsentiert zunächst wissenschaftliche Ansätze zur Erkennung und Prognose von Lastprofilen in Industriemaschinen.

3.3.1 Erkennung und Prognose von Lastprofilen

Wie bereits in Abschnitt 2.3.5 erläutert, muss zwischen der Erkennung und Prognose von Lastprofilen unterschieden werden. Tabelle 3.2 bietet eine Übersicht der Ansätze zur Erkennung und Prognose von Lastprofilen sowie der dazugehörigen Anwendungsfälle.

Aus der Literaturrecherche resultieren 13 Ansätze zur Erkennung und Prognose von Lastprofilen, welche teilweise durch die Autoren kombiniert werden:

1. Lineare Regression
2. Gaußprozess-Regression
3. Polynomiale Regression
4. Kreuzkorrelationsanalyse
5. Hidden Markov Models
6. (Kurzzeit-) Fourier-Transformation
7. Wavelet-Transformation
8. K-Means Clustering
9. Fuzzy C-Means Clustering
10. Support Vector Machine
11. Entscheidungsbaum und Zufallswald
12. (Tiefe) Neuronale Netze
13. Adaptives Neuro-Fuzzy-Inferenzsystem

Tabelle 3.2: Übersicht zu Ansätzen zur Erkennung und Prognose von Lastprofilen.

Ansatz	Autoren und Jahr	Anwendungsfall	Zweck
Regression (Gaußprozess)	(Park et al. 2015)	CNC-Fräsmaschine	Prognose
Regression (Gaußprozess)	(Bhinge et al. 2017)	Werkzeugmaschine	Prognose
Regression (polynomial), genetischer Algorithmus	(Sangwan & Kant 2017)	Werkzeugmaschine	Prognose
Regression (linear, Gaußprozess, polynomisch, Zufallswald)	(Mühlbauer et al. 2021)	Fräsmaschine	Prognose
Kreuzkorrelationsanalyse	(Männel et al. 2020)	DC-Mikronetz	Erkennung
Hidden Markov Models, Fourier-Transformation, Wavelet-Transformation, Kreuzkorrelation	(Reger et al. 2015)	Drehmaschine	Erkennung
K-Means Clustering	(Teiwes et al. 2018)	Werkzeugmaschine und Roboter	Erkennung, Prognose
Fuzzy C-Means Clustering	(Barreto et al. 2020)	Industriemaschinen	Erkennung
Support Vector Machine, Neuronale Netze, lineare Regression	(Duerden et al. 2016)	Fertigungsmaschine	Prognose
Entscheidungsbaum, Zufallswald	(Chen et al. 2019)	CNC-Maschine	Prognose
Entscheidungsbaum	(Brillinger et al. 2021)	CNC-Maschine	Prognose
Künstliche Neuronale Netze	(Kant & Sangwan 2015)	Werkzeugmaschine	Prognose
Tiefe Neuronale Netze (LSTM, CNN)	(Dietrich et al. 2021)	Werkzeugmaschine	Prognose
Tiefe Neuronale Netze (LSTM, CNN)	(Petruschke et al. 2021)	Werkzeugmaschine	Erkennung
Adaptives Neuro-Fuzzy- Inferenzsystem	(Efimov et al. 2020)	Roboter	Prognose

Die einzelnen Ansätze zur Erkennung und Prognose von Lastprofilen werden nun anhand repräsentativer Kernquellen erläutert.

Regression

Mühlbauer et al. (2021) setzen Verfahren des maschinellen Lernens ein, um den zeitlichen Verlauf des Energieverbrauchs einer Fräsmaschine prognostizieren zu können (Mühlbauer et al. 2021, S.2). Als Informationen nutzen die Autoren den NC-Code (Vorschub, Drehzahl, Koordinatenpositionen, Werkzeug, Bearbeitungsart, etc.) der Maschine sowie Zerspanungsgrößen (Schnitttiefe, Schnittbreite). Die Zerspanungsgrößen resultieren aus Simulationen des Zerspanungsvorgangs. Hinzu kommen Messungen an der Werkzeugmaschine über weitere Schnittstellen (Mühlbauer et al. 2021, S.3). Für jede gemessene Einzelaktion resultiert ein Regressionsmodell (lineare Regression, Gaußprozess-Regression, polynomiale Regression, Random Forest Regression) (Mühlbauer et al. 2021, S.5).

Kreuzkorrelationsanalyse

Männel et al. (2020) widmen sich der Lastprofilerkennung zyklischer Prozesse in industriellen DC-Mikronetzen mit Lithium-Ionen-Batterien. Die Autoren gehen in drei Schritten vor:

1. Lastprofilerkennung
2. Lastprofilanalyse
3. Online-Adaption der Leistungsaufteilung

Eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) speichert das Lastprofil der Maschine auf Basis einer geschätzten Zykluszeit (Männel et al. 2020, S.905). Zur Lastprofilerkennung wird nach jedem geschätzten Zyklus eine normalisierte Kreuzkorrelationsanalyse zwischen dem letzten und dem aktuellen Zyklusprofil durchgeführt (Männel et al. 2020, S.906). Anschließend nutzen die Autoren den Mittelwert und die dreifache Standardabweichung der Kreuzkorrelation zur Bestimmung ihrer Spitzenwerte, welche jeweils einen Schätzzyklus einschnüren. Für die Batterie wählen Männel et al. im Rahmen der Lastanalyse zwei getrennte Einsatzszenarien, einerseits die Eigenverbrauchsoptimierung der Bremsenergie und andererseits die Spitzenkappung (Männel et al. 2020, S.907). Zur Validierung des Ansatzes variieren die Autoren das Lastprofil während des Versuchs, sodass sich die Statikregelung anpassen muss (Männel et al. 2020, S.909). Sie adaptieren sowohl die Steigung der abschnittsweise-linearen Kennlinien als auch deren Verschiebung in y-Richtung. Der Lösungsansatz von Männel et al. erkennt die Lastprofile spätestens nach dem dritten Zyklus

bei einer finalen Abweichung zwischen der Lade- und Entladeenergie von lediglich 0,6 %, welche mit den Unsicherheiten bei den Wandlungswirkungsgraden begründet werden (Männel et al. 2020, S.904).

Hidden Markov Models

Reger et al. (2015) untersuchen Ansätze zur automatischen Mustererkennung in Lastprofilen elektrischer Antriebe, welche in mehrachsigen Drehmaschinen verbaut sind. Sie leiten daraus die Energieeffizienz der Antriebe sowie weitere Kennzahlen ab (Reger et al. 2015, S.1). Die Autoren kombinieren zunächst verdeckte Markow-Modelle (engl. *Hidden Markov Models*, HMM) mit der Kreuzkorrelationsanalyse. Jedes Muster erhält dabei sein eigenes HMM und wird über die Kreuzkorrelation klassifiziert. Für erhöhte Robustheit beim Training des HMM wird dem ursprünglichen Signal weißes Rauschen überlagert (Reger et al. 2015, S.3). Die Autoren setzen 95 % als Untergrenze für den Kreuzkorrelationskoeffizienten (Reger et al. 2015, S.4) an. Im weiteren Verlauf wenden sie die Kurzzeit-Fourier-Analyse sowie die diskrete und kontinuierliche Wavelet-Transformation zur Bestimmung von Merkmalen im Frequenzbereich an (Reger et al. 2015, S.6).

K-Means Clustering

Teiwes et al. (2018) wenden K-Means Clustering zur Gruppierung von Lastprofilen an. Dabei leiten sie produktspezifische Energieverbräuche in einem Bearbeitungszentrum mittels Informationen zu den einzelnen Prozessdauern ab (Teiwes et al. 2018, S.273). Darüber hinaus entwickeln die Autoren ein Verfahren zur Vorhersage des Lastprofils, welches auf dem Abgleich von Basisarbeitsschritten (z. B. Handling, Werkzeugwechsel, Schweißen) eines Industrieroboters mit einer Energiedatenbank basiert (Teiwes et al. 2018, S.275).

Fuzzy C-Means Clustering

Barreto et al. (2020) verwenden Fuzzy C-Means Clustering zur Bestimmung typischer Lastprofile von drei Industriemaschinen in einer Textilproduktion. Alle gemessenen Lastprofile werden zur besseren Vergleichbarkeit auf die gleiche Länge gebracht und anhand des Energieverbrauchs über jeweils fünf Minuten gruppiert. Jedes Verbraucherprofil kann gewichtete Schnittmengen mit mehreren Clustern aufweisen (Barreto et al. 2020, S.157). Die Autoren untersuchen vier Szenarien mit zwei bis sechs Clustern (Barreto et al. 2020, S.158).

Support Vector Machine

Duerden et al. (2016) untersuchen Stützvektormaschinen (engl. *support vector machine*, SVM) und vergleichen diese mit neuronalen Netzen und linearen Regressionsansätzen zur Prognose des Energieverbrauchs einer Fertigungsmaschine. Dazu nutzen sie historische Lastprofile der Maschine (Duerden et al. 2016, S.625).

Entscheidungsbaum und Zufallswald

Im Beitrag von Brillinger et al. (2021) werden drei Arten von Entscheidungsbäumen (engl. *decision tree*) bzw. Zufallswäldern (engl. *random forest*) zur Prognose des Energieverbrauchs einer CNC-Maschine untersucht. Die Wissenschaftler verknüpfen den NC-Code mit dem Energieverbrauch, indem sie vorab die Maschinengeometrie analysieren (Brillinger et al. 2021, S.715). Die Autoren zeichnen NC-Daten von 37 Eingangsmerkmalen mit einer Abtastfrequenz von 500 Hz auf. Diese müssen nachträglich in ein für das maschinelle Lernverfahren lesbares Format gewandelt werden (Brillinger et al. 2021, S.719).

Neuronale Netze

Dietrich et al. (2021) vergleichen Ansätze des tiefen Lernens (engl. *deep learning*), darunter neuronale Netze mit langem Kurzzeitgedächtnis (engl. *long short-term memory networks*, LSTM) und faltende neuronale Netze (engl. *convolutional neural networks*, CNN) zur Nutzung von Demand Response auf der Maschinen- oder Fabrikebene. Die Autoren variieren die Hyperparameter und Netzstrukturen und validieren den Ansatz anhand realer Produktionsdaten. Der Ansatz ermöglicht die Kurzzeitprognose der nächsten 100 Sekunden des Lastprofils zur Applikation von Lastverschiebungen oder Lastspitzenkappung (Dietrich et al. 2021, S.5283). Die Maschinensteuerung liefert den Betriebszustand, während ein Messgerät die elektrischen Lastprofile der Werkzeugmaschine und ihrer Peripherie als Eingangsdaten mit einer Abtastfrequenz von einem Hertz zur Verfügung stellt. Für das Modelltraining und die Validierung werden mehrere Hundert Zyklen des Lastprofils aufgezeichnet (Dietrich et al. 2021, S.5286).

Neuro-Fuzzy-Inferenzsystem

Ein adaptives Neuro-Fuzzy-Inferenzsystem (ANFIS) dient Efimov et al. (2020) zur Lastprofilprognose eines Roboters. Die Autoren erhalten von der Robotersteuerung die kartesischen Koordinaten, verknüpfen diese mit dem gemessenen dreiphasigen AC-Strom, während die Spannung als konstant angenommen wird (Efimov et al. 2020, S.1).

3.3.2 Modellbildung und Systemidentifikation

Tabelle 3.3 und Tabelle 3.4 fassen die Ansätze zur Modellbildung und Systemidentifikation von Frequenzumrichtern und deren Peripherie zusammen. Hierunter fallen alle recherchierten Ansätze, welche sich mit der Identifikation von Netzimpedanzen, Filtern, Gleichrichtern und Wechselrichtern beschäftigen. Es resultieren acht Ansätze für die Modellbildung und Systemidentifikation von industriellen Frequenzumrichtern:

1. Analytische Schätzung
2. Numerische Algorithmen
3. Sprungantwort
4. Injektion eines Anregungssignals
5. (Nichtlineare, rekursive) Methode der kleinsten Quadrate (RMKQ)
6. Erweitertes Kalman-Filter (EKF)
7. Adaptive Modell-Referenz-Regelung (MRAC)
8. Neuronale Netze

Die einzelnen Ansätze zur Modellbildung und Systemidentifikation werden nun im Einzelnen anhand einer repräsentativen Kernquelle vorgestellt.

Analytische Schätzung

Arif et al. (2015) leiten die Netzimpedanz eines aktiven Gleichrichters durch die Messung der AC-Ströme, der DC-Spannung und der Schalterzustände analytisch her. Die Autoren aktualisieren online laufend die Eingangsimpedanz in der implementierten modellprädiktiven Regelung (MPC) (Arif et al. 2015, S.4617). Anschließend wird ebenfalls die Netzspannung analytisch geschätzt (Arif et al. 2015, S.4618).

Tabelle 3.3: Übersicht zu Ansätzen der Modellbildung und Systemidentifikation.

Ansatz	Autoren und Jahr	Teilsysteme
Analytische Schätzung	(Arif et al. 2015)	Netzimpedanz, Gleichrichter
Numerische Algorithmen	(Huerta et al. 2010; Huerta et al. 2012)	Filter, Gleichrichter
Sprungantwort	(Grbović 2010)	Speichersystem
Sprungantwort	(Schaab 2023)	Leistungselektronische Wandler
Injektion (PRBS)	(Miao et al. 2005)	Umrichter
Injektion (PRBS)	(Martin & Santi 2014)	Netzimpedanz, Netzwechselrichter
Injektion (PRBS)	(Neshvad et al. 2015)	Netzimpedanz, Netzwechselrichter
Injektion (PRBS)	(Koppinen et al. 2018)	Filter, Netzwechselrichter
Injektion (PRBS), Methode der kleinsten Quadrate (RMKQ)	(Gong et al. 2018)	Filter, Netzwechselrichter
Injektion (PRBS)	(Riccobono et al. 2018)	Netzimpedanz, Netzwechselrichter
Injektion (PRBS)	(Li et al. 2019)	Filter, Gleichrichter
Injektion (PRBS)	(Mohammed et al. 2019)	Netzimpedanz, Netzwechselrichter
Injektion	(Zhou et al. 2019)	Filter, Wechselrichter
RMKQ, Sprungantwort	(Arriagada et al. 2003)	Filter
RMKQ	(Araya & Espinoza 2005)	Filter
RMKQ	(Ma et al. 2005)	Filter, Gleichrichter, DC-DC-Wandler
Methode der kleinsten Quadrate (RMKQ)	(Kwak et al. 2014)	Gleichrichter
Nichtlineare RMKQ	(Esparza et al. 2019)	Netzimpedanz, Filter, Gleichrichter
Erweitertes Kalman-Filter	(Hoffmann & Fuchs 2014)	Netzimpedanz, Filter, Wechselrichter
Erweitertes Kalman-Filter	(Abdelrahem et al. 2018)	Netzimpedanz, Filter, Gleichrichter

Tabelle 3.4: Übersicht zu Ansätzen der Modellbildung und Systemidentifikation (Fortsetzung).

Ansatz	Autoren und Jahr	Teilsysteme
MRAC	(Takeshita & Matsui 1992)	Filter, Gleichrichter
MRAC	(Vidal et al. 2015)	Filter, Netzwechselrichter
MRAC	(Liu et al. 2017)	Gleichrichter
MRAC	(Mukherjee et al. 2017)	Filter, Netzwechselrichter
Neuronale Netze	(Bechouche et al. 2015)	Filter, Gleichrichter
Neuronale Netze	(Lin et al. 2019)	Gleichrichter

Numerische Algorithmen

Huerta et al. (2010, 2012) wählen Black-Box-Identifikationsmethoden für die selbststellende Stromregelung eines aktiven Gleichrichters mit LCL-Filter. Das AC-Netz wird durch eine variierende Impedanz repräsentiert und wirkt als Störgröße auf die Stromregelung des aktiven Gleichrichters (Huerta et al. 2010, S.98). Die Stromregelung basiert auf einer diskreten Zustandsraumdarstellung eines linearen Mittelwertmodells. Als Eingangsdaten dienen die dq-Strom- und Spannungswerte vor und nach dem Filter (Huerta et al. 2010, S.96). Bei der Parameterschätzung nähert sich zuerst ein iterativer Algorithmus (engl. *numerical algorithm for subspace state space system identification*, N4SID) dem globalen Minimum einer mehrdimensionalen Kostenfunktion. Auf dieser Grundlage bestimmt ein nachgeschalteter, iterativer Algorithmus zur Minimierung des Vorhersagefehlers (engl. *prediction error minimization*, PEM) schlussendlich das Filtermodell (Huerta et al. 2010, S.97). Die Autoren vergleichen die Schätzergebnisse für unterschiedliche Abtastraten und erhalten bei 50 Mikrosekunden die beste Näherung von 99,9 % (Huerta et al. 2010, S.100). In einer späteren Veröffentlichung vergleichen Huerta et al. die MOESP- (engl. *multivariable output error state space*) mit der N4SID-Methode zum Entwurf von Black-Box-Modellen (Huerta et al. 2012, S.4648). Die N4SID-Methode schneidet deutlich besser als die MOESP-Methode ab, da sie weniger stark von den Eingangsdaten abhängt (Huerta et al. 2012, S.4651f.).

Sprungantwort

Schaab (2023) bestimmt das Übertragungsverhalten leistungselektronischer Wandler in DC-Mikronetzen, indem er die gemessene Sprungantwort der Spannung für unterschiedliche Verstärkungsfaktoren des Spannungsreglers mit einem Grey-Box-Modell vergleicht. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Identifikation der Regelstrecke im geschlossenen Zustand und inkludiert alle Totzeiten des Regelkreises (Schaab 2023, S. 97–98). Außerdem empfiehlt Schaab (2023) einen einfachen Modellansatz, um eine Überanpassung zu vermeiden. Des Weiteren verweist der Autor ebenfalls auf die Modellierung der Totzeit der Regelstrecke anhand der digitalen Abtastzeit (Schaab 2023, S.98).

Injektion eines Anregungssignals

Um die Regelung eines aktiven Gleichrichters zur Versorgung einer Konstantleistungslast zu entwerfen, widmen sich Li et al. (2019) der Identifikation der Netzimpedanz am Netzanschlusspunkt (engl. *point of common coupling*). Die Autoren nehmen Daten aus dem Zeitbereich und erstellen daraus ein Zustandsraummodell des AC-Netzes am Netzanschlusspunkt, welches durch ein LCR-Glied repräsentiert wird. Der Reglerentwurf basiert auf einem H2-Optimierungsalgorithmus (Li et al. 2019, S. 4840–4841). Li et al. nutzen den aktiven Gleichrichter als Störquelle und erzeugen mit einer PRBS dessen Stromsollwerte. Die Spannungsantwort der Netzimpedanz wird gleichzeitig abgetastet. Mit einem weiteren Algorithmus zur Fehlerminimierung erlangen die Autoren schließlich das Zustandsraummodell der Netzimpedanz. Li et al. schlagen vor, das identifizierte Modell und die echten Werte im Frequenzbereich mittels Bode-Diagramm zu vergleichen (Li et al. 2019, S.4843).

Methode der kleinsten Quadrate

Kwak et al. (2014) schlagen eine modellprädiktive Regelung mit adaptiver Online-Parameteridentifikation für einen aktiven Gleichrichter vor, um Parameter- und Modellunsicherheiten auszuräumen. Die Autoren nutzen die Methode der kleinsten Quadrate zur Bestimmung der Eingangsinduktivität und des Eingangswiderstands in jedem diskreten Abtastzeitpunkt. Dabei stellt die Regelung sinusförmige Eingangsströme sicher, bei einem Leistungsfaktor von eins trotz Parameterunsicherheiten. Die modellprädiktive Regelung sagt im Betrieb die Wirk- und Blindleistungen vorher, indem sie die Ströme und Spannungen auf

der AC-Seite sowie die Zwischenkreisspannung auswertet und anschließend einen von sieben möglichen Schaltzuständen am Umrichter auswählt. Dieser recheneffiziente Ansatz benötigt ansonsten keine weiteren Sensoren (Kwak et al. 2014, S.6179). Die Autoren bewerten den mittleren absoluten Fehler der Wirk- und Blindleistung (Kwak et al. 2014, S.6182). Der matrixbasierte Systemidentifikationsalgorithmus konvergiert nach 10 ms und ist unabhängig von Startwerten (Kwak et al. 2014, S.6185).

Kalman-Filter

Die Online-Parameterschätzung der Filter- und Netzimpedanz eines aktiven Gleichrichters durch Abdelrahem et al. (2018) basiert auf einer modellprädiktiven Regelung mit einer endlichen Lösungsmenge in Kombination mit einem Erweiterten Kalman-Filter (EKF). Das EKF dient sowohl zur adaptiven Parameterschätzung in Echtzeit als auch zur Filterung von Messrauschen. Die Beobachtbarkeit des Systems wird zu jedem Zeitschritt geprüft (Abdelrahem et al. 2018, S.1497). Außerdem wird der Zeitverzug der digitalen Berechnung kompensiert. Die Autoren messen die AC-Ströme und -Spannungen, die Zwischenkreisspannung sowie den Referenzstrom der d-Achse. Werden die modellprädiktive Regelung sowie die Parameterschätzung von Abdelrahem et al. deaktiviert, nähert sich das System der Stabilitätsgrenze, da die Sollströme ihre Grenzwerte erreichen (Abdelrahem et al. 2018, S.1504).

Adaptive Modell-Referenz-Regelung (MRAC)

Liu et al. (2017) entwickeln eine prädiktive, direkte Leistungsregelung für einen aktiven Gleichrichter auf Basis des Identifikationsschemas einer adaptiven Modell-Referenz-Regelung (MRAC). Hierfür messen die Autoren sämtliche verfügbare Größen sowohl auf der AC- als auch die DC-Seite des Gleichrichters (Liu et al. 2017, 4).

Neuronale Netze

Lin et al. (2019) stellen eine nicht-invasive Methode zur Abschätzung von Strecken- und Regelungsparametern eines aktiven Gleichrichters vor. Das Ziel der Autoren ist die Identifikation von neun Parametern. Dazu gehören die Netzimpedanz mit ihrem Widerstand und ihrer Induktivität, der Filterwiderstand und die Filterinduktivität, die Gerätekapazität sowie die Proportional- und Integralanteile des DC-Spannungs- und AC-Stromreglers (Lin et al.

2019, S.4912). Zunächst messen zwei Geräte die Strom- und Spannungsverläufe von Harmonischen höheren Grades. Lin et al. trainieren offline ein künstliches neuronales Netzwerk mit Simulationsdaten und stationären Modellen des offenen und geschlossenen Regelkreises zur Berücksichtigung von Modellunsicherheiten des Gleichrichters. Für den Fall, dass die Reglerstruktur bekannt ist, liegen die Abweichungen der neun Parameter von ihren echten Werten im Mittel unter einem Prozent. Falls die Reglerstruktur vorab unbekannt ist, stellen sich Abweichungen zwischen 0 und 9 % sowie 5 % im Mittel ein (Lin et al. 2019, S.4920).

Im nächsten Abschnitt folgt die Vorstellung und Analyse von Speicherregelungsansätzen in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen und DC-Mikronetzen.

3.3.3 Speicherregelung

Nachdem im vorhergehenden Abschnitt die Ansätze zur Modellbildung und Systemidentifikation von Frequenzumrichtern vorgestellt worden sind, richtet sich der Fokus der Arbeit nun auf Ansätze der Speicherregelung. Tabelle 3.5 unterscheidet Speicherregelungsansätze und gibt zudem Auskunft über die Anwendungsfälle und verwendeten Speichertechnologien. Als Ergebnis der Literaturrecherche sind insgesamt acht Speicherregelungsansätze zu differenzieren:

1. Hysterese- oder Schwellenwertregelung
2. PID-Regelung mit den Spezialfällen P-Regelung und PD-Regelung
3. Statikregelung (ggf. mit Vorsteuerung)
4. Modellprädiktive Regelung (MPC)
5. Dynamische Programmierung
6. Fuzzy-Regelung
7. Neuronale Netze
8. Neuro-Fuzzy-Regelung

Die einzelnen Ansätze zur Speicherregelung werden anhand von Kernquellen vorgestellt.

Tabelle 3.5: Übersicht zu Ansätzen der Speicherregelung.

Ansatz	Autoren und Jahr	Anwendungsfall	Technologie
Hysterese/ Schwellenwerte	(Tominaga et al. 2002)	Aufzug	Batterie
Hysterese/ Schwellenwerte	(Oyarbide et al. 2011)	Aufzug	Kondensator
Hysterese/ Schwellenwerte	(Mitronikas et al. 2014)	Aufzug	Kondensator
Hysterese/ Schwellenwerte	(Appunn et al. 2018)	Aufzug	Kondensator
Hysterese/ Schwellenwerte	(Kafalis & Karlis 2016)	Aufzug	Kondensator, Schwungmasse
Hysterese/ Schwellenwerte	(Kubade et al. 2017)	Aufzug	Kondensator
P-Regelung	(Grbović 2010)	Mehrachsmaschine	Kondensator
PD-Regelung	(Gale et al. 2015)	Roboter	Kondensator
Statikregelung mit Vorsteuerung	(Hansen et al. 2015)	Mehrachsmaschine	Kondensator, Schwungmasse
Statikregelung	(Schaab et al. 2018)	Hochregallager	Powercap, Kondensator
Statikregelung	(Lu et al. 2021a)	Roboter	Schwungmasse
Statikregelung	(Schaab 2023)	DC-Mikronetz	Kondensator, Batterie, Schwungmasse
Modellprädiktive Regelung (MPC)	(Attaianese et al. 2004)	Hochregallager	Kondensator
MPC vs. PI-Regelung	(Neugebauer et al. 2011)	Werkzeugmaschine	Kondensator
MPC	(Juhász et al. 2013; Juhász et al. 2014)	Roboter	Schwungmasse
MPC	(Juhász & Hein 2019)	Presse	Schwungmasse
Dynamische Programmierung	(Bilbao et al. 2014)	Aufzug	Kondensator
Fuzzy-Regelung	(Li & Ruan 2008)	Aufzug	Kondensator
Fuzzy-Regelung	(Jabbour & Mademlis 2016)	Aufzug	Kondensator
Regelung mit Neuronalen Netze	(Zhang et al. 2012)	Aufzug	Kondensator
Neuro-Fuzzy-Regelung	(Mesemanolis et al. 2014)	Aufzug	Kondensator

Hysteres- oder Schwellenwertregelung

Oyarbide et al. (2011) rüsten einen Aufzug nachträglich mit einem Ultrakondensatorsystem aus (Oyarbide et al. 2011, S.462). Die von den Autoren entwickelte Regelung wertet die Last, das anvisierte Stockwerk und weitere Informationen aus, um die benötigte Energie aus dem Speicher zu bestimmen. Dafür verbinden Oyarbide et al. den DC-DC-Wandler mit dem Zwischenkreis lediglich über zwei Leistungskabel (Oyarbide et al. 2011, S.462). Die Autoren stellen drei neuartige Anforderungen an ihre Lösung (Oyarbide et al. 2011, S.462):

1. Verallgemeinerte Anwendbarkeit in kommerziellen Antriebsumrichtern
2. „Plug & Play“- Fähigkeit ohne Anpassung der Programmierung oder Modifikationen der bestehenden Maschine
3. Nachrüsttauglichkeit der bestehenden Maschine

Die Autoren verfolgen mit dem Speicher das Ziel, Bremsenergie zu nutzen, Lastspitzen zu kappen und im Notfall eine USV bereitzustellen (Oyarbide et al. 2011, S.464). Eine einfache Hysteres-Regelung am DC-DC-Wandler stellt sicher, dass die Zwischenkreisspannung niemals unterhalb der passiven Gleichrichterspannung liegt und die Spannung nie über die Einschaltswelle des Bremswiderstands steigt (Oyarbide et al. 2011, S.464). Außerdem beeinträchtigt die „Plug & Play“- Fähigkeit den Normalbetrieb nicht, auch wenn der Speicher bereits vollständig geladen oder entladen sein sollte (Oyarbide et al. 2011, S.465).

PID-Regelung

Grbović (2010) betrachtet die Reglerauslegung eines Ultrakondensatorsystems im Zwischenkreis eines Frequenzumrichters zur Erhöhung der Energieeffizienz und Bereitstellung einer USV (Grbović 2010, S.9). Aus regelungstechnischer Sicht verfolgt Grbović in seiner Dissertation drei Ziele (Grbović 2010, S.100):

1. Regelung der Mittelpunktspannung des Dreipunkt-DC-DC-Wandlers und des Kondensatorstroms
2. Asymptotische Regelung der Zwischenkreisspannung
3. Laderegelung für den Ultrakondensator

Um die Zwischenkreisspannung trotz Diodengleichrichter aktiv regeln zu können, entwickelt Grbović einen neuartigen Wandler, der sowohl den Ultrakondensator anbindet als auch eine netzseitige Leistungsfaktorkorrektur (engl. *power factor correction*) ermöglicht. Diesen Wandler setzt er zwischen den Diodengleichrichter und den Zwischenkreis. Er hebt damit sekundärseitig die Zwischenkreisspannung auf 650 V (Grbović 2010, S.169). Der Autor definiert außerdem Spannungsschwellen, in denen der Speicher bestimmte Aktionen durchführen soll (Grbović 2010, S.42). Der Spannungsregler des Ultrakondensators besteht aus einem reinen P-Anteil, dem ein Stromregler nachfolgt. Die Kondensatorspannung durchläuft zudem einen Tiefpassfilter (vgl. PT1-Glied), bevor es zum Vergleich mit der Sollspannung kommt (Grbović 2010, S.84). Die Reaktionszeit des Stromreglers liegt unterhalb von 500 μ s, während die Spannungsregelung des Zwischenkreises typischerweise zwischen einer und fünf Millisekunden zur Reaktion benötigt (Grbović 2010, S.92f.). Perspektivisch sieht Grbović vor allem die Inbetriebnahme und Selbsteinstellung der Systemregler als wichtiges Forschungsfeld. Dafür müssen die Kapazitäten des Zwischenkreises und des Speichers bekannt sein (Grbović 2010, S.203).

Gale et al. (2015) modellieren und simulieren ein Schwungmassenspeichersystem (engl. *flywheel energy storage system*, FESS) im Zusammenspiel mit einem Industrieroboter. Ein unidirektionaler Diodengleichrichter versorgt den gemeinsamen Zwischenkreis der Servoantriebe (Gale et al. 2015, S.334). Die Regelung auf dem Umrichter des FESS registriert Spannungsänderungen im Zwischenkreis. Ein PD-Regler steuert die Lade- und Entladevorgänge des FESS, während die Drehzahl über eine Drehmomentregelung verändert wird. Das Drehzahlfenster wird über Sättigungsglieder beschränkt (Gale et al. 2015, S.335). Aufgrund des begrenzten Zugriffs auf die Robotersteuerung können Gale et al. keine Aussage zu möglichen Energieeinsparungen durch die FESS-Nachrüstung treffen. Die Autoren merken allerdings an, dass ein Roboter mit einer höheren Dynamik operiert als ein Schwungmassenspeicher (Gale et al. 2015, S.337).

Statikregelung

Hansen et al. (2015) setzen ungenutzte Antriebsachsen einer Mehrachsmaschine während deren Stillstandszeiten als Schwungmassenspeicher ein und vergleichen deren Performanz mit einem elektrischen Stromspeicher. Der Ansatz lässt sich explizit auf andere

Mehrachssysteme mit Diodengleichrichter und Zwischenkreiskopplung, z. B. Roboter, ohne Anpassung der Bewegungssequenzen übertragen (Hansen et al. 2015, S.201). Die Speicherregelung greift in Echtzeit über einen Feldbus auf den Servoumrichter der pausierten Achsen zu (Hansen et al. 2015, S.202). Die Autoren messen die DC- und AC-Leistungen mit einer Abtastfrequenz von 100 Hz und übertragen pro Sekunde 1.000 Sollwerte der Achstrajektorien über eine Simulink-Echtzeitschnittstelle und einen EtherCAT-Feldbus (Hansen et al. 2015, S.204). Die Autoren messen außerdem die Zwischenkreisspannung im Umrichter der ungenutzten Achse und generieren daraus einen Drehmomentsollwert mittels einer Proportionalverstärkung, der momentanen Drehzahl und eines vorgegebenen, erlaubten Spannungsbands (Hansen et al. 2015, S.204). Dieser Ansatz ähnelt dem einer klassischen Statikregelung. Hansen et al. erweitern die Spannungsrückführung um ein Vorsteuersignal, das den Laststrom kompensiert. Dieses basiert auf der Vorhersage der Last, welche aus den bekannten Sollwerten der Bewegungstrajektorie und dem parametrisierten Systemmodell resultiert. Diese Vorsteuerung kompensiert darüber hinaus, durch zusätzlich aufgebrauchte Drehmomentanteile, die analytisch erfassten elektrischen und mechanischen Verluste der Speicherachse und verhindert die vollständige Abbremsung der Welle (Hansen et al. 2015, S.204f.). Die Autoren variieren die Lastprofile hinsichtlich ihrer Dynamik und adaptieren dabei jeweils die beiden Proportionalverstärkungen des Reglers, um den veränderten Ladezustand des Schwungmassenspeichers zu berücksichtigen (Hansen et al. 2015, S.208). Beim Vergleich der beiden Speichertechnologien schneidet der Superkondensator besser ab als die ungenutzte Achse, welche vor allem bei langsamen Profilen teilweise mehr Energie verbraucht als im Ursprungszustand (Hansen et al. 2015, S.209). Der Superkondensator passt seine Regelung nach einigen Bewegungszyklen selbständig an (Hansen et al. 2015, S.207).

Modellprädiktive Regelung

Neugebauer et al. (2011) integrieren einen Superkondensator sowohl indirekt über einen DC-DC-Wandler als auch direkt in den Zwischenkreis eines Bearbeitungszentrums. Neben der erhöhten Energieeffizienz und Spitzenlastdeckung ermöglicht der Stromspeicher die Verkleinerung des Gleichrichters. Gemäß Neugebauer et al. zählen Schwungmassenspeicher und Elektrolytkondensatoren zu den adäquaten Technologien für den Ausgleich der

Leistungsprofile von Werkzeugmaschinen. Die Autoren modellieren die Antriebsachsen und Spindel einzeln mithilfe eines physikalischen Modells. Anschließend validieren Messungen die entwickelten Verbrauchermodelle mit einer energetischen Abweichung von lediglich 0,7 %. Neugebauer et al. vergleichen einen Proportional-Integral-Regler (PI-Regler) mit einem modellprädiktiven Regler auf einem DC-DC-Wandler. Der modellprädiktive Regler basiert auf der minimalen Lösung eines quadratischen Integrals. Der klassische PI-Regler auf dem DC-DC-Wandler liefert eine deutlich geringere Energieeinsparung. Der passiv eingebundene Superkondensator dringt bei der Spitzenlastreduktion in ähnliche Sphären wie der indirekte Ansatz vor, kann die Energieeffizienz aber um wenige Prozent erhöhen (Neugebauer et al. 2011).

Juhász et al. (2013, 2014) entwickeln eine modellbasierte Echtzeitsimulation für einen dreiachsigen Industrieroboter mit inkludiertem ASM-Schwungmassenspeicher. Die Autoren stellen ein vorausschauendes Verhalten als Anforderung an das Energiemanagement des Speichersystems und des Zwischenkreises (Juhász et al. 2013, S.51). Das Energiemanagement muss mehr als zehn Millisekunden in die Zukunft blicken können (Fraunhofer IFF 2013, S.3). Die empirisch bestimmte Reaktionszeit bzw. Prädiktionszeit der Schwungmasse beträgt 54 ms (Juhász et al. 2014, S.615). Wegen des programm-basierten Betriebs der betrachteten Mehrachsmaschinen ist die vorausschauende Ansteuerung im Prinzip möglich (Juhász et al. 2013, S.51). Die Autoren verwenden einen virtuellen NC (engl. *numerical control*) Kern (VNCK) für die Industriesteuerung des Frequenzumrichterherstellers zur Simulation der Achsbewegungen. Der G-Code des Bearbeitungsprogramms in der Industriesteuerung wird somit virtuell in eine Modellsprache übersetzt (Juhász et al. 2013, S.52). Die Maschinensteuerung des Roboters behandelt den Umrichter des Schwungmassenspeichers wie eine zusätzliche Achse (Juhász et al. 2013, S.54) und definiert laufend eine Leitachse, welcher die anderen Achsen folgen (Juhász et al. 2014, S.613).

Regelung mit dynamischer Programmierung

Bilbao et al. (2014) reduzieren in einem Aufzug mit Diodengleichrichter die Spitzenleistung und den Energieverbrauch, indem sie ein optimales Energiemanagement für ein Superkondensatorsystem basierend auf einer dynamischen Programmierung (DP) implementieren (Bilbao et al. 2014, S.1233). Die stochastische Last, welche von der

Stockwerkswahl und der Passagieranzahl abhängt, wird statistisch modelliert. Die dynamische Programmierung minimiert oder maximiert eine Kostenfunktion, indem sie die Problemstellung in kleinere Teile zerlegt. Die Lösung dieser Einzelprobleme führt dann zur Gesamtlösung (Bilbao et al. 2014, S.1236). Die DP orientiert sich in diesem Fall an der Theorie der Lagerverwaltung (Bilbao et al. 2014, S.1237). Zuletzt vergleichen die Autoren den DP-Ansatz mit einer regelbasierten Herangehensweise (Bilbao et al. 2014, S.1240), wobei die DP besser abschneidet (Bilbao et al. 2014, S.1242). Der eingesetzte Algorithmus besitzt die Fähigkeit, von der durchlaufenen Zyklen zu lernen und sich an unterschiedliche Situationen anzupassen (Bilbao et al. 2014, S.1238).

Fuzzy-Regelung

Jabbour und Mademlis (2016) entwickeln auf Grundlage der Arbeiten von Li und Ruan (2008) eine verbesserte Regelungsstrategie für ein System aus Superkondensator und bidirektionalem DC-DC-Wandler zur expliziten Nachrüstung in Aufzügen mit Diodengleichrichter (Jabbour & Mademlis 2016, S.8398). Anstelle eines PI-Reglers werden ebenfalls zwei Fuzzy-Regler eingesetzt. Sie bestimmen den Sollwert der Zwischenkreisspannung, welcher online durch den Speichereinsatz in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen des Aufzugs sowie der AC-seitigen Spannungsschwankungen anzupassen ist (Jabbour & Mademlis 2016, S.8398). Die Bewegungsrichtung des Aufzugs ergibt sich aus der Anfrage am Bedientaster (Jabbour & Mademlis 2016, S.8401). Vor einer auftretenden Last wird die DC-Spannung durch den Superkondensator angehoben (Jabbour & Mademlis 2016, S.8401). Der erste Fuzzy-Regler beobachtet die AC-Spannung, der zweite wertet den Strom des Superkondensators aus (Jabbour & Mademlis 2016, S.8402). Dafür implementieren die Autoren eine zweiadrige, kommunikationsseitige Verbindung zwischen der Aufzugssteuerung und dem DC-DC-Wandler zur Auswertung des Pulssignals am Aufzug. Hinzu kommen zwei weitere Kabel für die Messung der DC-Spannung sowie zwei für die Messung der AC-Spannungen (Jabbour & Mademlis 2016, S.8399). Jabbour und Mademlis bestätigen die Stabilität der geschlossenen SC-Zwischenkreisregelung anhand des Nyquist-Kriteriums (vgl. positive Phasenreserve) im offenen Regelkreis (Jabbour & Mademlis 2016, S.8404). Die Autoren legen zudem ein Augenmerk auf die Sollwertfolge zur Minimierung des

Stromwelligkeit am Superkondensator, um dessen Lebensdauer zu verlängern (Jabbour & Mademlis 2016, S.8401).

Regelung mit Neuronalen Netzen

Zhang et al. (2012) entwickeln ein dynamisches Energiemanagement auf Basis eines rückwärts fortschreitenden Neuronalen Netzwerks (engl. *back propagation neural network*, BPNN) für ein Superkondensatorsystem in einem Aufzug. Mithilfe des BPNN lässt sich die benötigte Gleichgewichtsspannung des SC zu Beginn einer Aufzugsfahrt vorhersagen und gezielt vorab steigern. Dasselbe Prinzip gilt bei einer Abwärtsfahrt bei einer niedrigeren Gleichgewichtsspannung des SC zur Aufnahme von Bremsenergie. Im Zuge dessen erhält das neuronale Netzwerk als Eingangsdaten das aktuelle sowie das anvisierte Stockwerk, die erwartete Bewegungsrichtung und die Anzahl der Passagiere (Zhang et al. 2012, S.1404f.).

Neuro-Fuzzy-Regelung

Mesemanolis et al. (2014) implementieren ein selbsteinstellendes, adaptives Neuro-Fuzzy-Inferenzsystem (ANFIS) für einen Superkondensator samt DC-DC-Wandler in einem von einem Diodengleichrichter gespeisten Aufzug (Mesemanolis et al. 2014, S.1). Das ANFIS wird durch die Aufzugsfahrten trainiert und passt schließlich die Beschleunigung bzw. Abbremsung sowie die Drehzahl des Aufzugsmotors an (Mesemanolis et al. 2014, S.1). Dabei werden das Drehmoment des Motors sowie die zurückgelegte Distanz der Kabine gemessen (Mesemanolis et al. 2014, S.2). Nach jeder Fahrt bzw. Epoche wird das ANFIS aktualisiert und dadurch verbessert (Mesemanolis et al. 2014, S.5).

3.4 Zwischenfazit

Erkennung und Prognose von Lastprofilen

Die meisten Autoren beschäftigen sich entweder mit der Erkennung oder mit der Prognose von Lastprofilen. Nur Teiwes et al. (2018) decken beide Einsatzzwecke ab. Einige Autoren zielen darauf ab, typische Lastprofile für Prozesse mittels Clustering abzuleiten. Die meisten Ansätze sind davon geprägt, dass sie Maschinencode oder Geometrieinformationen in energetische Kenngrößen übersetzen. In mehreren Fällen ist die Aufzeichnung zahlreicher

Lastzyklen oder Merkmale für die Erkennung oder Prognose notwendig. Zudem sind häufig mehrere vorverarbeitende Schritte zur Merkmalsgenerierung aus den Daten durchzuführen.

Modellbildung und Systemidentifikation

Die Modellbildung und Systemidentifikation ist für Netzwechselrichter, Gleichrichter, Antriebswechselrichter, DC-DC-Wandler und Speichersysteme relevant. Der am häufigsten genutzte Ansatz zur Systemidentifikation ist die Injektion eines Pseudo-Rausch-Binär-Signals (PRBS). In vielen Fällen kommt außerdem die Methode der kleinsten Quadrate zum Einsatz. Die Identifikation legt meist den Grundstein für den Reglerentwurf von Umrichtersystemen. Lin et al. (2019) liefern einen interessanten Ansatz, der neun unbekannte Parameter nicht-invasiv bestimmt.

Speicherregelung

Die Ansätze zur Speicherregelung basieren oft auf Hysterese- bzw. Schwellenwertregelungen. Daneben nutzen die Autoren sowohl klassische PID- und Statikregelungen als auch neuartige neuronale Netze oder deren Kombination mit Unschärfelogik (Fuzzy-Regler). Elektrische Super- oder Ultrakondensatoren kommen besonders bei Aufzugsanwendungen zum Einsatz. Die Nutzung passiver Antriebsachsen als Schwungmassenspeicher wird ebenfalls untersucht. Vereinzelt fordern die Autoren bereits selbsteinstellende Systeme und „Plug & Play“, wie etwa Oyarbide et al. (2011). Oft besteht jedoch gezwungenermaßen eine Kommunikationsverbindung zwischen der Maschinensteuerung und Speicherregelung.

4 Anforderungen und Handlungsbedarf

4.1 Klassifikation der Anforderungen

In dieser Arbeit werden zwei Anforderungsklassen unterschieden. Die Klasse der Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich definiert, für welche technischen Systeme die Herangehensweise dieser Arbeit valide ist. Sie ziehen zudem die Bilanzgrenze für die Evaluierung der energetischen Gütekriterien im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme. Die Klasse der vier typischen Anforderungen an die Regelung werden durch den Aspekt der Selbsteinstellung erweitert. Die Selbsteinstellung umfasst wiederum die Systemidentifikation, die Lastprofilerkennung, die vorausschauende Regelung und die Adaption von (Regler-) Parametern oder Führungsgrößen. Eine ausführliche Zusammenfassung von Anforderungen an die selbsteinstellende Regelung eines Schwungmassenspeichersystems bietet (Laribi et al. 2020a).

4.1.1 Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich

Applikation in einem industriellen Zwischenkreis

Der Betrachtungsrahmen der Arbeit in Abschnitt 1.3 zeigt einen industriellen Frequenzumrichter mit Gleichspannungszwischenkreis, welcher in dieser Arbeit als Systemgrenze dient. Der Objektbereich muss industrielle Frequenzumrichter mit Gleichspannungszwischenkreis zur Ansteuerung von Antriebssystemen sowie einen per leistungselektronischem Wandler angebotenen Stromspeicher umfassen. Industrielle Mikronetze werden als Erweiterung von Zwischenkreisen ebenfalls betrachtet. Allerdings unterscheiden sich DC-Mikronetze von räumlich begrenzten industriellen Zwischenkreisen darin, dass sie erneuerbare Energieerzeuger inkludieren (Sauer 2021, S.13) und Leitungslängen von mehr als zehn Metern aufweisen (Konsortium DC-INDUSTRIE2 2022, S.11).

Unabhängigkeit von der Maschinensteuerung

Die selbsteinstellende Regelung muss unabhängig von der Steuerungseinheit der Industriemaschine sein. Damit lässt sich sicherstellen, dass die Regelung keiner proprietären Hersteller-Software unterworfen ist (Laribi et al. 2020a, S.278) und in verschiedenen Systemen zum Einsatz kommen kann (Laribi et al. 2020a, S.274).

Keine Software-Anpassung

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Frequenzumrichterhersteller darf keine Anpassung bzw. Reprogrammierung des Gleichrichters und der Antriebsumrichter vorgenommen werden. Dadurch erhält das zu integrierende Speichersystem die Fähigkeit des „Plug & Play“ (vgl. (Oyarbide et al. 2011, S.462)).

4.1.2 Anforderungen an die Regelung

Stabilität der Regelung

Die Spannungsstabilität des Zwischenkreises und die Versorgung der Verbraucher müssen zu jedem Zeitpunkt gegeben sein. Die Stabilität des geschlossenen Regelkreises kann mithilfe der Kriterien aus Abschnitt 2.3.2 überprüft werden. Ein fehlerhaft parametrierter Regler gefährdet die Stabilität des Systems. Dem ist durch eine angemessene Begrenzung der Wertebereiche sowie Gradienten der Ströme und Spannungen vorzubeugen.

Genauigkeit und Sollwertfolge der Regelung

Die Genauigkeit der vorgegebenen Speicherleistung und des Ladezustands (vgl. Drehzahl, Klemmenspannung) wirkt sich unmittelbar auf den Erfolg der Lastkappung aus. Störgrößen, wie die Selbstentladungsrate des Speichers, müssen zudem dauerhaft kompensiert werden (vgl. Abschnitt 2.3.2).

Dynamik der Regelung

Die entworfene Regelung muss den Umrichter des Stromspeichersystems hochdynamisch beeinflussen (vgl. Abschnitt 2.3.2), sodass positive und negative Lastspitzen mit geringem Energieinhalt innerhalb von Millisekunden mittels eines gezielten Stromflusses aus dem oder in den Speicher geglättet werden (Hansen et al. 2015, S.202). Dabei muss das Speichersystem

trotz seiner nötigen Reaktionszeit dem System die vorhandene Bremsenergie entziehen, bevor der aktive Gleichrichter am Versorgungsnetz oder der Bremswiderstand des Diodengleichrichters dies tun können.

Robustheit der Regelung

Modellparameter und der darauf aufbauende Reglerentwurf können Unsicherheiten aufweisen (Lunze 2016b, S.357). Auch bei Störungen, wie etwa Messrauschen, muss die Regelung robust funktionieren. Die Forderung nach der Robustheit der Regelung muss im Rahmen der Validierung geprüft werden, zum Beispiel mithilfe von überlagertem weißen Rauschen (vgl. (Reger et al. 2015, S.3)).

Selbsteinstellung der Regelung

Neben den vier grundlegenden Anforderungen an Regelungen wird in dieser Arbeit die Fähigkeit zur Selbsteinstellung gefordert. Diese Fähigkeit setzt sich aus vier Aspekten zusammen, die in der Folge beschrieben werden.

Systemidentifikation des Frequenzumrichters

Der Verbund aus bestehendem Frequenzumrichter und Stromspeichersystem wird in dieser Arbeit als Regelstrecke bezeichnet. Die selbststellende Regelung muss die Regelstrecke mithilfe von Messdaten, Modellhypothesen und Datenblattinformationen identifizieren. Die mathematischen Bedingungen für die Identifizierbarkeit von geschlossenen Regelungssystemen werden in Abschnitt 2.3.3 erläutert. Die geschätzten Parameter müssen anschließend für den Reglerentwurf zur Verfügung stehen. Des Weiteren stehen Informationen aus der Voranalyse zur Verfügung, wie z. B. elektrische Schaltpläne, Datenblätter und Listenhandbücher. Die Informationen zu Zwischenkreiskapazitäten auf der Erzeuger- und Verbraucherseite sowie Randbedingungen für die Leistungsfähigkeit der angeschlossenen Geräte resultieren aus der Voranalyse der Maschine.

Automatische Lastprofilerkennung

Die zeit- und amplitudenabhängige Erkennung der Last als Störgröße im Regelungssystem basiert auf historischen Zeitreihenwerten der elektrischen Verbraucherleistung eines Referenzprozesses. Hierbei stehen keine weiteren exogenen Einflussgrößen zur Verfügung,

wie z. B. die Temperatur. Die Regelung muss sich an wechselnde Anlagenszenarien anpassen können. Dafür muss eine Veränderung der Last automatisch erkannt und der Speicherregelung gemeldet werden. Die Lastprofilerkennung muss nach wenigen Sekunden erfolgen und darf über keine zusätzlichen Informationen des Produktionsprogramms verfügen. Männel et al. (2020) erreichen dies beispielsweise nach drei Zyklen. Mindestens zwei Lastprofile müssen unterschieden werden können. Die Lastprofilerkennung für die Regelung des Speichersystems muss zudem anhand einer einmaligen Messdatenaufnahme des Prozesses möglich sein.

Vorausschauende Regelung

Die vorausschauende Regelung muss sicherstellen, dass der Ladezustand des Speichersystems langfristig konstant bleibt (Männel et al. 2020, S.907). Immer wenn die anderen Antriebe keine Beschleunigungsvorgänge durchlaufen, muss der Speicher nachgeladen werden ohne eine neue Leistungsspitze zu generieren. Dadurch kann der Speicher immer zur Kappung von Spitzenlasten eingesetzt werden. Aufgrund der Trägheit der Schwungmasse ist die Antizipation von Spitzenlasten elementar für den Erfolg der selbsteinstellenden Regelung (Fraunhofer IFF 2013, S.4). Die Funktionsfähigkeit der Regelung muss über mehrere Lade- und Entladezyklen des Stromspeichersystems bewiesen werden.

Adaption des Reglers oder der Führungsgrößen

Die Regelung muss sich selbstständig an die energetischen Zustände im Zwischenkreis anpassen, um stets das gewünschte Leistungsgleichgewicht zwischen Gleichrichter, Speicher und Last zu erreichen. Da mehrere Lastspitzen im Abstand weniger Sekunden aufeinander folgen können (Laribi et al. 2020a, S.276) und sich der Ladezustand wegen des Leistungsaustauschs und der Selbstentladung ständig verändert, müssen entweder die Reglerparameter oder die Sollwerte der Speicherregelung laufend angepasst werden (Laribi et al. 2020b, S.187).

4.2 Handlungsbedarf

Nachfolgend werden die wissenschaftlichen Ansätze aus Abschnitt 3.3 anhand der Anforderungen aus Abschnitt 4.1 evaluiert. Die Anforderungen werden dabei entweder erfüllt

oder nicht erfüllt. Aus der Evaluation resultieren die Forschungslücken und eine Handlungsempfehlung.

4.2.1 Ansätze zur Erkennung und Prognose von Lastprofilen

Tabelle 4.1 bewertet die Ansätze zur Erkennung und Prognose von Lastprofilen anhand der gestellten Anforderungen. Bei der Unabhängigkeit von der Maschinensteuerung ergibt sich ein gemischtes Bild. Mit Ausnahme der adaptiven Speicherregelung von Männel et al. (2020) stimmen die Autoren darin überein, dass sie nach der Erkennung oder Prognose der Lastprofile keine direkt nachgelagerte Aktion durchführen.

Die Stabilitätsbetrachtung und die Robustheit sind kaum Gegenstand der Ansätze zur Erkennung und Prognose von Lastprofilen. Die Genauigkeit ist eine deutlich relevantere Anforderung für die bisherigen Ansätze. Etwa die Hälfte der Ansätze bezieht die Forderung nach der Dynamik des Ansatzes mit ein. Insgesamt ist zu bemängeln, dass die meisten Veröffentlichungen keine Brücke zwischen der Lastprofilanalyse, der Systemidentifikation und der Speicherregelung schlagen.

4.2.2 Ansätze zur Modellbildung und Systemidentifikation

Die Bewertung der Ansätze in Tabelle 4.2 zeigt, dass fast alle Quellen sich auf industrielle Frequenzumrichter mit Gleichspannungszwischenkreis beziehen. Nur Schaab (2023) liegt im verwandten Bereich der DC-Mikronetze. Auffällig ist darüber hinaus, dass sieben von acht Ansätzen von der Steuerung der Industriemaschine abhängig sind und zudem die Software der Umrichter beeinflusst wird. Der Abgleich der Anforderungen an die Regelung mit den Ansätzen zur Modellbildung und Systemidentifikation verdeutlicht, wie stark der Fokus auf der Dynamik und der Genauigkeit liegt. Die vier grundlegenden Anforderungen werden durch die bisherigen Ansätze größtenteils zufriedenstellend erfüllt. Der Großteil der Systemidentifikationsansätze nutzt das invasive PRBS-Verfahren mit einer Strominjektion. Keiner der Ansätze adressiert die Lastprofilerkennung und nur Kwak et al. (2014) fordern die vorausschauende Eigenschaft der Regelung. Die Adaption des Reglers oder der Führungsgröße wird von der Hälfte der Autoren umgesetzt.

Tabelle 4.1: Evaluation der Ansätze zur Erkennung und Prognose von Lastprofilen mit den Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich und die Regelung.

Anforderungen		Mühlbauer et al. (2021)	Männel et al. (2020)	Reger et al. (2015)	Teiwes et al. (2018)	Barreto et al. (2020)	Duerden et al. (2016)	Brillinger et al. (2021)	Dietrich et al. (2021)	Efimov et al. (2020)
		Applikation in einem industriellen Zwischenkreis	●	○	●	●	●	●	●	●
Unabhängigkeit von der Maschinensteuerung	○	○	●	○	●	●	○	○	○	○
Keine Software-Anpassung	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●
Stabilität	○	●	○	○	○	○	○	○	●	○
Dynamik	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
Genauigkeit und Sollwertfolge	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Robustheit	○	○	●	○	○	○	○	○	●	○
Selbsteinstellung	Systemidentifikation	○	○	○	●	○	○	○	○	●
	Automatische Lastprofilerkennung	○	●	●	●	●	○	○	○	○
	Vorausschauende Regelung	●	●	○	●	●	●	●	●	●
	Adaption des Reglers oder der Führungsgröße	○	●	○	○	○	○	○	○	○

● Anforderung erfüllt ○ Anforderung nicht erfüllt

Tabelle 4.2: Evaluation der Ansätze zur Modellbildung und Systemidentifikation von mit den Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich und die Regelung.

Anforderungen		Arif et al. (2015)	Huerta et al. (2010, 2012)	Schaab (2023)	Li et al. (2019)	Kwak et al. (2014)	Abdelrahem et al. (2018)	Liu et al. (2017)	Lin et al. (2019)
Applikation in einem industriellen Zwischenkreis		●	●	○	●	●	●	●	●
Unabhängigkeit von der Maschinensteuerung		○	○	○	○	○	○	○	●
Keine Software-Anpassung		○	○	○	○	○	○	○	●
Stabilität		●	○	●	●	○	●	●	●
Dynamik		●	●	●	●	●	●	●	●
Genauigkeit und Sollwertfolge		●	●	●	●	●	●	●	●
Robustheit		●	○	●	○	●	●	●	○
Selbsteinstellung	Systemidentifikation	●	●	●	●	●	●	●	●
	Automatische Lastprofilerkennung	○	○	○	○	○	○	○	○
	Vorausschauende Regelung	○	○	○	○	●	○	○	○
	Adaption des Reglers oder der Führungsgröße	●	○	○	○	●	●	●	○

● Anforderung erfüllt ○ Anforderung nicht erfüllt

4.2.3 Ansätze zur Speicherregelung

Tabelle 4.3 bewertet den Erfüllungsgrad der Speicherregelungsansätze hinsichtlich der Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich sowie an die Regelung selbst. Die vertretenen Anwendungen erstrecken sich über Aufzüge, Roboter, Werkzeugmaschinen und Pressen. Dabei ist der Großteil der Wandler direkt mit der Maschinensteuerung verbunden. Eine Anpassung der Antriebssysteme oder des Gleichrichters ist eher selten, was mit der

Dominanz der Diodengleichrichter zusammenhängt. Aktive Gleichrichter kommen zum Einsatz, wenn große Massen durch die Antriebe bewegt werden müssen. Für die selbsteinstellende Regelung von Stromspeichersystemen in Zwischenkreisen mit aktivem Gleichrichter sind nach der Literaturrecherche keine Ansätze bekannt.

Die meisten Autoren verzichten auf eine Stabilitätsbetrachtung bei der Integration eines Stromspeichers in den Zwischenkreis eines industriellen Frequenzumrichters. Diese Untersuchungen werden häufiger bei DC-Mikronetzen durchgeführt. In dieser Arbeit muss zunächst geprüft werden, inwiefern sich gängige Stabilitätskriterien auf den Zwischenkreis von Frequenzumrichtern übertragen lassen. Außerdem liegt der Fokus der betrachteten Quellen oft auf der Prozessdynamik, vor allem wenn ein Schwungmassenspeichersystem eingebunden wird. Da die meisten Veröffentlichungen eine vorausschauende Regelung über eine Vorsteuerung lösen, ist die Anforderung an die Genauigkeit bzw. Sollwertfolge zentral. Dagegen spielt die Robustheit gegenüber ungenauen Modellen und Daten bisher keine große Rolle. Beide Ansätze von Juhász et al. sowie Neugebauer et al. adaptieren nicht die Reglerparameter, sondern die Sollwerte des Wandlers am Stromspeicher. Eine explizit lernfähige Vorsteuerung bieten darüber hinaus Bilbao et al., Hansen et al. und Mesemanolis et alii. Oyarbide et al. fordern die Fähigkeit zum „Plug & Play“ und bemängeln bisherige Ansätze dahingegen, dass diese auf dem Austausch von Signalen zwischen der Aufzugsteuerung und dem Wandler des Speichersystems beharren. Die Autoren schlagen zwar vor, die Regelung statistisch während des Betriebs an die Last anzupassen, setzen dies allerdings nicht um.

Die größte Schnittmenge mit den Anforderungen an die Regelung weisen die Ansätze von Hansen et al. (2015), Juhász et al. (2013, 2014), Jabbour und Mademlis (2016), Zhang et al. (2012) sowie Mesemanolis et al. (2014) auf. Das ist darauf zurückzuführen, dass sich diese Quellen mit der Systemidentifikation und Vorausschau als Teil der selbsteinstellenden Regelung auseinandersetzen. Darüber hinaus beschäftigt sich keiner der Autoren mit der automatischen Lastprofilerkennung, da meist eine Verbindung zur Steuerung der Industriemaschine besteht.

Tabelle 4.3: Evaluation der Ansätze zur Speicherregelung mit den Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich und die Regelung.

Anforderungen		Oyarbide et al. (2011)	Gale et al. (2015)	Hansen et al. (2015)	Neugebauer et al. (2011)	Juhász et al. (2013, 2014)	Bilbao et al. (2014)	Jabbour und Mademlis (2016)	Zhang et al. (2012)	Mesemanolis et al. (2014)
Applikation in einem industriellen Zwischenkreis		●	●	●	●	●	●	●	●	●
Unabhängigkeit von der Maschinensteuerung		○	●	○	●	○	○	○	○	○
Keine Software-Anpassung		●	●	○	●	○	●	●	●	●
Stabilität		○	○	○	○	○	○	●	○	○
Dynamik		○	●	●	●	●	○	●	●	○
Genauigkeit und Sollwertfolge		○	●	●	●	●	●	●	●	●
Robustheit		●	○	○	○	○	○	○	○	○
Selbsteinstellung	Systemidentifikation	○	●	○	○	●	○	○	●	●
	Automatische Lastprofilerkennung	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Vorausschauende Regelung	○	○	●	●	●	●	●	●	●
	Adaption des Reglers oder der Führungsgröße	○	○	●	○	○	●	●	○	●

● Anforderung erfüllt ○ Anforderung nicht erfüllt

Keine der aufgeführten Quellen aus den vergangenen drei Abschnitten erfüllt alle Anforderungen an die Erkennung und Prognose von Lastprofilen, die Modellbildung und Systemidentifikation sowie die Speicherregelung vollständig (vgl. Tabelle 4.4, Tabelle 4.5). Die Ansätze decken jeweils Teile der selbsteinstellenden Regelung für Schwungmassenspeicher in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen ab. Sie offerieren methodische Bausteine, welche durch die vorliegende Arbeit zu einem Gesamtbild zusammengefügt werden.

Tabelle 4.4: Zusammenfassung der Evaluation.

Gruppe	Autoren des Ansatzes	Bilanz- und Objektbereich	Regelung
Erkennung und Prognose von Lastprofilen	Mühlbauer et al. (2021)	●	●
	Männel et al. (2020)	○	●
	Reger et al. (2015)	●	●
	Teiwes et al. (2018)	●	●
	Barreto et al. (2020)	●	●
	Duerden et al. (2016)	●	●
	Brillinger et al. (2021)	●	●
	Dietrich et al. (2021)	●	●
	Efimov et al. (2020)	●	●
Modellbildung und Systemidentifikation	Arif et al. (2015)	●	●
	Huerta et al. (2010, 2012)	●	●
	Schaab (2023)	○	●
	Li et al. (2019)	●	●
	Kwak et al. (2014)	●	●
	Abdelrahem et al. (2018)	●	●
	Liu et al. (2017)	●	●
	Lin et al. (2019)	●	●

● Anforderungen erfüllt ● Anforderungen teilweise erfüllt ○ Anforderungen nicht erfüllt

Tabelle 4.5: Zusammenfassung der Evaluation (Fortsetzung).

Gruppe	Autoren des Ansatzes	Bilanz- und Objektbereich	Regelung
Speicherregelung	Oyarbide et al. (2011)	●	●
	Gale et al. (2015)	●	●
	Hansen et al. (2015)	●	●
	Neugebauer et al. (2011)	●	●
	Juhász et al. (2013, 2014)	●	●
	Bilbao et al. (2014)	●	●
	Jabbour & Mademlis (2016)	●	●
	Zhang et al. (2012)	●	●
	Mesemanolis et al. (2014)	●	●

● Anforderungen erfüllt ● Anforderungen teilweise erfüllt ○ Anforderungen nicht erfüllt

Zusammenfassend lassen sich die folgenden Forschungslücken ableiten:

1. Die Ansätze zur Modellbildung und Systemidentifikation von industriellen Frequenzumrichtern und deren Peripherie bedürfen der Unabhängigkeit von der Maschinensteuerung. Dasselbe gilt für die Speicherregelung sowie die Erkennung und Prognose von Lastprofilen.
2. Die Systemidentifikation der Regelungsparameter von Gleichrichtern und Antriebslasten wird für den Zweck der Nachrüstung eines Speichersystems nicht vollzogen. Die Autoren fokussieren sich bisher auf die Identifikation von Impedanzen für den Reglerentwurf von Umrichtern.
3. Die automatische Lastprofilerkennung in Verbindung mit Stromspeicherregelungen wird bisher nur marginal betrachtet.
4. Die Stabilitätsuntersuchung des Zwischenkreises im Falle einer Stromspeichernachrüstung ist für Zwischenkreise neuartig, während sie in DC-Mikronetzen zum Stand der Technik zählt.

5. Die Anforderung an die Robustheit wird durch die bisherigen Ansätze der Lastprofilerkennung und Speicherregelung nicht erfüllt. Lediglich bei der Modellbildung und Systemidentifikation wird teilweise darauf geachtet.

Als Handlungsempfehlung ergeben sich die folgenden Punkte:

1. Eine nicht-invasive Systemidentifikation in Verbindung mit einer automatischen Lastprofilerkennung ermöglicht die Übertragung der selbsteinstellenden Regelung auf unterschiedliche Frequenzumrichter, ohne die Maschinensteuerung auszulesen oder zu manipulieren.
2. Eine Systemidentifikation der Regelungsparameter aktiver Gleichrichter und Diodengleichrichter eröffnet die Chance, Impedanzmodelle für die Stabilitätsuntersuchung und den Reglerentwurf des Speichers zu kreieren.
3. Eine Lastprofilerkennung auf der Basis elektrischer Signale zur Regelung von Stromspeichern ist zu entwickeln. Eine Lastprofilprognose ist besonders bei stochastischen Prozessen sinnvoll.
4. Eine Stabilitätsprüfung des Zwischenkreises vor dem Einsatz des Speichers ist zum Schutz des Systems durchzuführen.
5. Die Robustheit der Speicherregelung und der Lastprofilerkennung ist beispielsweise durch überlagertes Rauschen und Parametervariationen zu prüfen.

4.3 Zwischenfazit

In Kapitel 4 resultieren acht Anforderungen, welche mit den Ansätzen der drei Rechercheschwerpunkte verglichen werden. Die Autoren der untersuchten Kernquellen erfüllen nur teilweise die gestellten Anforderungen und decken lediglich Teilbereiche zur Lösung der Problemstellung ab. Die Lastprofilerkennung dient meist der Zuweisung der spezifischen Energieverbräuche zu Produktionsprozessen und nur selten der Regelung eines Speichersystems. Die Modellbildung und Systemidentifikation erfolgt häufig im Rahmen des Reglerentwurfs von Umrichtern. Die Identifikation von Parametern bereits in Betrieb genommener Umrichtersysteme wird kaum betrachtet. Die Literatur zur Speicherregelung bietet ein großes Spektrum an simplen und komplexen Ansätzen. Die einfache

Übertragbarkeit der Ansätze durch Selbsteinstellung ist aufgrund der meist vorhandenen Verbindung zur Maschinensteuerung der Prozesse nicht gegeben. Es ergeben sich daher fünf Forschungslücken, die jeweils eine Handlungsempfehlung nach sich ziehen.

5 Selbsteinstellende Regelung

Dieses Kapitel stellt das Lösungskonzept für eine selbsteinstellende Regelung von Schwungmassenspeichern in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen vor. Ein regelungstechnisches Problem lässt sich nach Lunze in sieben Schritten lösen (Abbildung 5.1a).

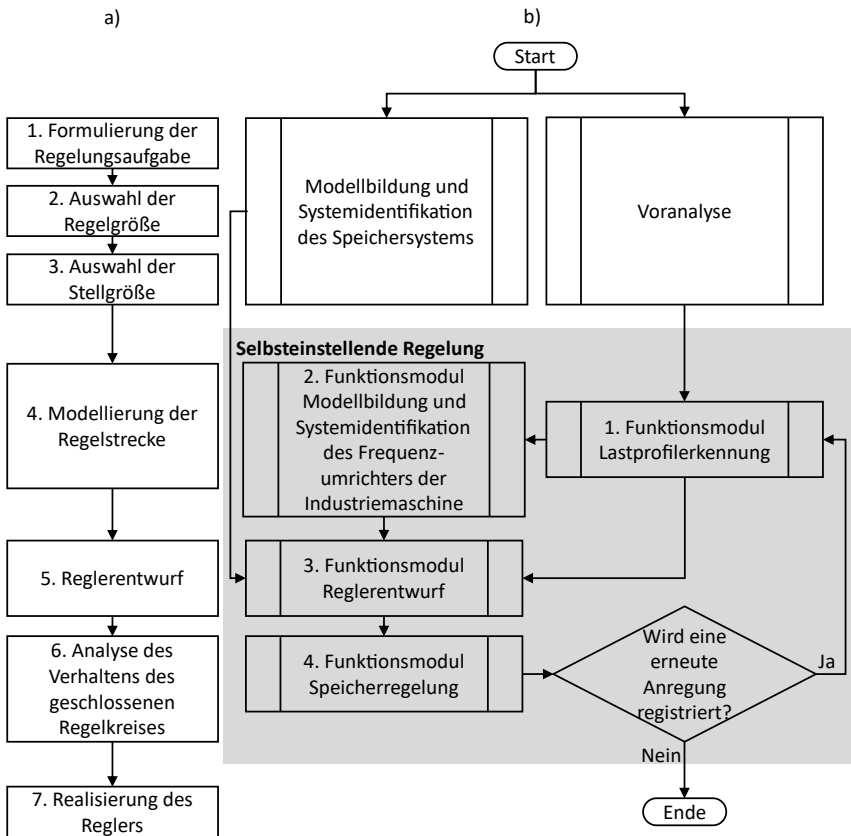


Abbildung 5.1: a) Lösungsweg für Regelungsaufgaben in Anlehnung an (Lunze 2016b, S. 14–15) und b) Funktionsumfang der selbsteinstellenden Regelung in der vorliegenden Arbeit.

Im ersten Schritt definiert die Aufgabenstellung, wie sich das Regelungssystem verhalten soll. Anschließend erfolgt im zweiten Schritt die Wahl der Regelgröße, welche sich oft unmittelbar aus den Güteforderungen ableiten lässt (Lunze 2016b, S.14). Der dritte Schritt umfasst die Auswahl der Stellgröße zur Beeinflussung der Regelgröße. Die Modellierung der Regelstrecke folgt als vierter Schritt (Lunze 2016b, S.14). Wie in Abschnitt 2.3.3 erläutert, kann dies auf der Grundlage theoretischer, experimenteller oder erfahrungsbasierter Ansätze geschehen. Das Modell dient als Ausgangspunkt zur Bewertung der Stabilität. Der fünfte Schritt widmet sich dem Reglerentwurf, der alle in Kapitel 4 gestellten Anforderungen erfüllen muss. Eine Vorsteuerung kann hierbei das Führungsverhalten des Regelkreises beschleunigen (Lunze 2016b, S.15). Zur Analyse des Verhaltens des geschlossenen Regelkreises im sechsten Lösungsschritt werden meist Simulationen durchgeführt. Die Simulationen zeigen auf, inwiefern der Reglerentwurf die Anforderungen erfüllt. Simulationen eignen sich außerdem, um bisher nicht berücksichtigte Einflüsse von Stellgrößenbeschränkungen, verrauschten Messdaten und Modellunsicherheiten zu inkludieren. Im siebten und letzten Schritt wird der Regler softwareseitig in einem Mikrorechner implementiert und parametrisiert (Lunze 2016b, S.15). Da die vorliegende Arbeit simulationsbasierte Untersuchungen auf Basis realer Messdaten vornimmt, wird der siebte Schritt nicht betrachtet. Das fünfte Kapitel erläutert das Lösungskonzept der selbst-einstellenden Regelung in Form von Programmablaufplänen und deren Vereinigung zu Programmnetzen, deren grafische Elemente sich an der DIN 66001 orientieren (vgl. Abbildung 10.8 im Anhang).

Der Start des Lösungskonzepts in Abbildung 5.1b mündet in einer Voranalyse, in der die elektrischen und topologischen Eigenschaften der leistungselektronischen Hardware im Fokus stehen. Zudem muss der Speicherhersteller ein vollständiges Modell des Speichersystems zuliefern. In der vorliegenden Arbeit wird die Validierung des Speichermodells vor den Simulationen durchgeführt (vgl. Unterkapitel 6.1), auch wenn diese per se nicht Teil der selbst-einstellenden Regelung ist.

Die vier Funktionsmodule (FM) der selbst-einstellenden Regelung in Abbildung 5.1b umfassen weitere Unterfunktionen (UF), die im Programm-Code nacheinander aufgerufen werden. Mit der Anregungsdetektion beginnt einerseits die Messung und andererseits mit sofortiger Wirkung die Lastprofilerkennung als erstes Funktionsmodul (FM1). Zum Erreichen dieses

Regelungsziels muss die selbsteinstellende Regelung das bestehende System aus Gleichrichter und Antriebslasten mittels des zweiten Funktionsmoduls (FM2) modellieren und identifizieren. Das dritte Funktionsmodul (FM3) enthält den Reglerentwurf, der die impedanzbasierte Stabilitätsprüfung und die statische Trajektorienvorgabe für den Speicher umfasst. Die Anpassung der Führungsgröße der Speicherregelung in Simulationen anhand der vorgegebenen Trajektorie ist Teil des vierten Funktionsmoduls (FM4). Zusätzlich werden im Rahmen des vierten Funktionsmoduls einige Parameter variiert, um die Robustheit der Regelung zu testen. Das vierte Funktionsmodul bewertet außerdem die Speicherregelung anhand von energetischen Gütekriterien. Wird nach einer festgelegten Wartezeit keine erneute Anregung im Zwischenkreis registriert, ist das Ende der selbsteinstellenden Regelung erreicht. Die inhaltliche Erläuterung der Funktionsmodule setzt sich immer aus dem Algorithmus, den verwendeten Gütekriterien und der Parametervariation zusammen.

Zunächst erfolgen die Modellbildung und Systemidentifikation des Speichersystems.

5.1 Modellbildung und Systemidentifikation des Speichersystems

Das Schwungmassenspeichersystem besteht aus einem Antriebsumrichter, einer permanentmagnetenerregten Synchronmaschine (PMSM), einer Drossel, einer Vakuumpumpe und einer Kältemittelversorgung. Das Vakuum- und das Kältesystem werden nicht explizit modelliert, da von einem konstanten Einfluss ausgegangen wird. Für die Modellbildung des Schwungmassenspeichersystems stellt der Hersteller eine Parameterdatei zur Verfügung, welche alle Eigenschaften des Antriebssystems aufführt und damit die Grundlage für die feldorientierte Regelung und die Raumzeigermodulation bildet. Die Herausforderung besteht nun darin, aus technischen Datenblättern, der Parameterdatei und wenigen Experimenten ein Modell des Speichersystems zu bestimmen. Das Modell muss vor allem die zu erwartende Dynamik der Motorschwungmasse im Zusammenspiel mit dem Antriebsumrichter abbilden.

Die Kaskadenregelung des Schwungmassenspeichersystems in Abbildung 5.2 umfasst den überlagerten Drehzahlregler, die unterlagerte Stromregelung und die Regelstrecke mit den elektromechanischen Eigenschaften der PMSM.

$$G_{is}(s) = \frac{v_{qs}(s)}{\Delta i_{qs}(s)} = K_{pis} + \frac{K_{iis}}{s} \quad (5.3)$$

Die drehzahlabhängige, induzierte Spannung v_p wirkt als langsame Störgröße auf die q-Komponente der Stromregelung (Gerlach 2021, S.13). Der Drehmoment- bzw. Stromregelkreis kann als PT1-Glied G_{pt1s} vereinfacht werden (Hintz 2003, S.91; Teigelkötter 2013, S.139). Die Ersatzzeitkonstante τ_s des PT1-Glieds in Gl. (5.4) und Abbildung 5.3 beträgt in der Regel zwischen 0,25 ms und 10 ms (Teigelkötter 2013, S.139).

$$G_{pt1s}(s) = \frac{i_{qs}(s)}{i_{qs}^*(s)} = \frac{1}{1 + \tau_s \cdot s} \quad (5.4)$$

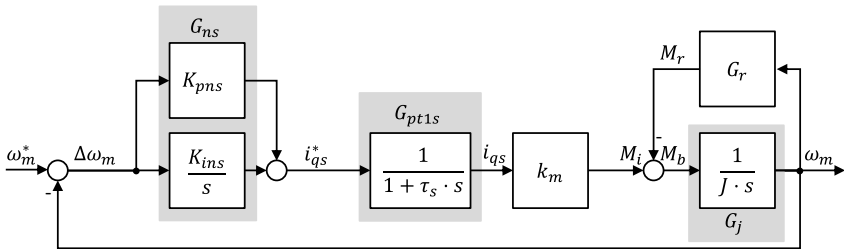


Abbildung 5.3: Kaskadenregelung des Schwungmassenspeichersystems mit vereinfachtem PT1-Stromregelkreis.

Aus der Integration des Beschleunigungsdrehmoments M_b über das Massenträgheitsmoment J des Rotors in Gl. (5.5) resultiert die mechanische Winkelgeschwindigkeit ω_m im Bildbereich.

$$G_j(s) = \frac{\omega_m(s)}{M_b(s)} = \frac{1}{J \cdot s} \quad (5.5)$$

Das Reibmoment M_r ist drehzahlabhängig und kann über Messungen bestimmt werden. Zur Bestimmung des Reibmoments in Abhängigkeit der Drehzahl wird der Motor auf seine maximale Rotationsgeschwindigkeit beschleunigt und anschließend die Drehmomentbegrenzung M_i auf null gesetzt. Dadurch ist das negative Reibmoment M_r gleich dem Beschleunigungsmoment M_b in Gl. (5.6).

$$M_b = M_r(\omega_m) = J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} \quad \text{für } M_i = 0 \quad (5.6)$$

Die resultierende Funktion G_r zwischen dem Reibmoment M_r und der mechanischen Winkelgeschwindigkeit ω_m in Abbildung 5.3 und Gl. (5.7) lässt sich beispielsweise durch ein lineares oder quadratisches Polynom (Gl. (5.8)) approximieren (vgl. Anhang 10.13).

$$G_r(s) = \frac{M_r(s)}{\omega_m(s)} \quad (5.7)$$

$$M_r(\omega_m) = a_0 + a_1 \cdot \omega_m + a_2 \cdot \omega_m^2 \quad (5.8)$$

Das Reibmoment des Schwungmassenspeichers führt dazu, dass seine Drehzahl innerhalb weniger Minuten gegen null strebt, sofern der Motor nicht kontinuierlich mit elektrischer Energie bzw. einem Haltemoment versorgt wird.

Der Ladezustand (engl. *state of charge*, SOC) des Schwungmassenspeichers in Gl. (5.9) hängt, neben der aktuellen Drehzahl n , von der minimalen und maximalen Drehzahl n_{min} bzw. n_{max} ab.

$$SOC(n) = \frac{n^2 - n_{min}^2}{n_{max}^2 - n_{min}^2} \quad (5.9)$$

Für den DC-Strom des Schwungmassenspeichersystems resultiert das vereinfachte Verhältnis in Gl. (5.10) mit dem elektrischen Wandlungswirkungsgrad η_s . Die Drehzahlregelung liefert die aktuelle Drehzahl n (vgl. Ladezustand SOC) sowie den Istwert des q-Stroms i_{qs} zur Abschätzung des DC-Stroms i_{dcs} , der wiederum mit dem Zwischenkreis interagiert. Als Summe des DC-Stroms i_{dcs} und des Last- bzw. Störstroms i_{ns} fließt der Kondensatorstrom i_{cs} in die Umrichterkapazität C_s und verändert deren Spannung $v_s \approx v_g$.

$$i_{dcs}(t) = \frac{P_s(t)}{v_s(t)} = \frac{P_e(t)}{v_s(t)} \cdot \eta_s = \frac{\sqrt{3} \cdot i_{qs}(t) \cdot v_{qs}(t)}{v_s(t)} \cdot \eta_s \quad (5.10)$$

Da es sich bei dem Speicher wiederum um ein umrichter gespeistes Antriebssystem handelt, kann das Zwischenkreismodell in Abbildung 5.4 als Konstantleistungslast (CPL) mit

Stromregler beschrieben werden. Hierfür wird in Abschnitt 5.5.2 die Sollwerttrajektorie der Speicherleistung P_s entworfen.

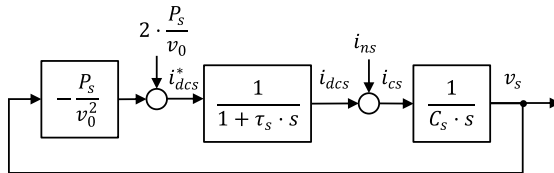


Abbildung 5.4: Zwischenkreismodell des Schwungmassenspeichersystems.

Das Verhältnis des Laststroms i_{ns} und der Spannung v_s in Gl. (5.11) definiert die Impedanz Z_s des Speichersystems, welche zur Evaluation der Stabilität in Abschnitt 5.5.1 dient.

$$Z_s(s) = \frac{v_s(s)}{i_{ns}(s)} = \frac{\frac{1}{C_s} \cdot \left(s + \frac{1}{\tau_s}\right)}{s^2 + s \cdot \frac{1}{\tau_s} + \frac{P_s}{v_0^2 \cdot \tau_s \cdot C_s}} \quad (5.11)$$

Das Bode-Diagramm in Abbildung 5.5 unterscheidet die Speicherimpedanz je nach Betriebsmodus, wobei die Leistungen und damit die Impedanzbeträge in diesem Beispiel identisch sind. Das Laden ($P_s > 0$) führt zu dem klassischen CPL-Verhalten mit negativ-ohmscher Widerstandscharakteristik und einer anfänglichen Phase von -180° , wie bei den Antriebslasten. Das Entladen des Speichers ($P_s < 0$) bedingt hingegen eine Phase von 0° bei kleinen Frequenzen, d. h. eine positiv-ohmsche Widerstandscharakteristik. In beiden Fällen dominiert der Zwischenkreis Kondensator bei hohen Frequenzen, sodass sich die Phasenverläufe bei -90° treffen.

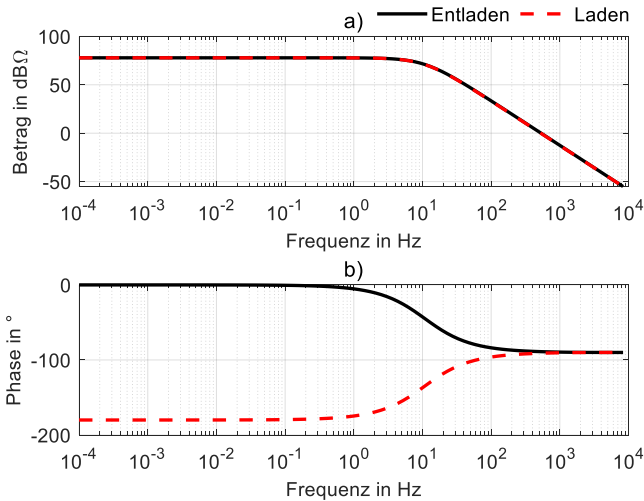


Abbildung 5.5: Bode-Diagramm mit a) Betrag und b) Phase der Speicherimpedanz Z_s als CPL für das Entladen und Laden.

Da nun die Parameter des Speichermodells feststehen, kann die Voranalyse erfolgen.

5.2 Voranalyse

Die ersten drei Schritte zählen in dieser Arbeit zur Voranalyse des Systems. Hierbei muss bereits die Modellbildung und Systemidentifikation des Speichersystems durch den Hersteller erfolgt sein, um die Regelungsaufgabe lösen zu können.

Regelungsaufgabe

Der Zweck des Speichereinsatzes besteht in der Kappung positiver und negativer Lastspitzen im Zwischenkreis eines industriellen Frequenzumrichters. Dabei soll der Speicher mit der Bremsenergie aus dem Zwischenkreis geladen werden und diese zeitversetzt zum Speisen der Antriebslasten wieder abgeben. Insgesamt soll die netzseitige Leistungsaufnahme geglättet werden. Dabei übernimmt der Gleichrichter die weniger dynamische Grundlast, während die Zwischenkreiskondensatoren und der Speicher die Spitzenleistungen decken.

Mess- und Regelgrößen

Als Messgrößen für die Regelung stehen am Speicherumrichter die Drehzahl n , die Zwischenkreisspannung v_s und das aktuelle Drehmoment M_i zur Verfügung. Die Abweichung der Zwischenkreisspannungen an verschiedenen Messstellen innerhalb des Zwischenkreises ist vernachlässigbar klein aufgrund der niedrigen ohmschen Verluste über die kurzen Leitungsstrecken. Über einen zusätzlichen Sensor wird der Laststrom i_{ng} am Gleichrichter gemessen, um die nicht-invasive Systemidentifikation des Frequenzumrichters, die statische Trajektorienvorgabe und die Bilanzierung der aufgenommenen Leistung in dynamischen Simulationen vor und nach dem Speichereinsatz zu ermöglichen.

Stellgrößen

Die Stellgrößen umfassen die Sollwerte für die Drehzahl des Schwungmassenspeichers n^* sowie dessen inneres Drehmoment M_i^* . Der Gleichrichter und die Antriebsumrichter sollen explizit nicht in ihrem Regelverhalten beeinflusst werden (vgl. Kapitel 4).

Zur Voranalyse zählt außerdem die Schaltplananalyse zur Bestimmung der Anzahl und Verteilung der Gleichrichter und Antriebsumrichter. Des Weiteren ist zu prüfen, ob ein Auslösesignal (engl. *trigger*) der Maschine zur Verfügung steht. Das Auslösesignal markiert den Start eines Produktionsprogramms und würde die Anregungsüberwachung zur logischen Trennung der Programme obsolet machen. Da nicht an jeder Industriemaschine ein solches Auslösesignal zu erwarten ist, wird eine fehlende Anregung der Zwischenkreisspannung nach einer festen Zeit zur logischen Trennung der Messdaten verwendet. Die Voranalyse umfasst darüber hinaus die Informationsbeschaffung aus Datenblättern und Funktionshandbüchern. Als relevante Informationen resultieren die Schaltfrequenzen und verbauten Zwischenkreiskapazitäten der Umrichter, die Leistungs- und Strombegrenzungen, die AC-Nennspannung sowie eine Abschätzung der Leitungslängen und Leitungsquerschnitte zwischen Gleichrichtern und Antriebslasten.

Der nächste Abschnitt stellt die Lastprofilerkennung vor.

5.3 Lastprofilerkennung

Abbildung 5.6 beschreibt das erste Funktionsmodul „Lastprofilerkennung“.

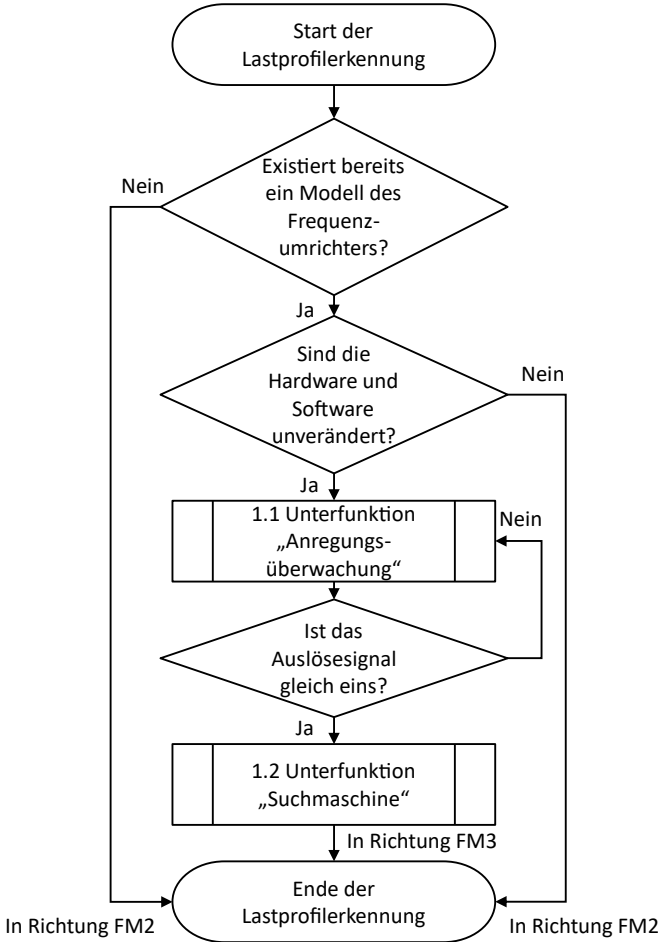


Abbildung 5.6: Erstes Funktionsmodul „Lastprofilerkennung“ (FM1).

Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, deterministische Lastprofile im Zwischenkreis von Industriemaschinen zu erkennen. Da keine Verbindung zur Maschinensteuerung besteht, sind keine *Labels* verfügbar. Das Verfahren kann demnach nicht vorhersagen, von welchem Produktionsprogramm (vgl. *Label*) die Trainingsdaten stammen. Aus diesem Grund rücken unüberwachte Lernverfahren des maschinellen Lernens in den Fokus.

Zunächst prüft der Algorithmus, ob es bereits ein Modell des Frequenzumrichters gibt und ob sich seit der letzten Verwendung die Hardware oder Software des Frequenzumrichters in der Industriemaschine verändert hat. Das erste Funktionsmodul enthält außerdem die Unterfunktion „Suchmaschine“, die auf einem Audiosuchalgorithmus basiert.

5.3.1 Anregungsüberwachung

Bei der Anregungsüberwachung dient die statistische Bewertung der Zwischenkreisspannung als Indikator für eine elektromechanische Achsenbewegung der Produktionsmaschine (Abbildung 5.7).

Liegt die Spannung mehr als drei Standardabweichungen von ihrem Sollwert v^* entfernt, handelt es sich um einen statistischen Ausreißer und damit um eine Anregung. In Abhängigkeit der binären Anregung werden die Aktivitätszeit oder die Inaktivitätszeit auf null zurückgesetzt und mit jedem Abtastzyklus wieder um ein Inkrement erhöht. Das Auslösesignal zur zeitlichen Trennung der Lastprofile wird nur auf den Wert 1 gesetzt, wenn es zuvor gleich null war und die letzte Anregung länger als eine kritische Zeitspanne zurückliegt.

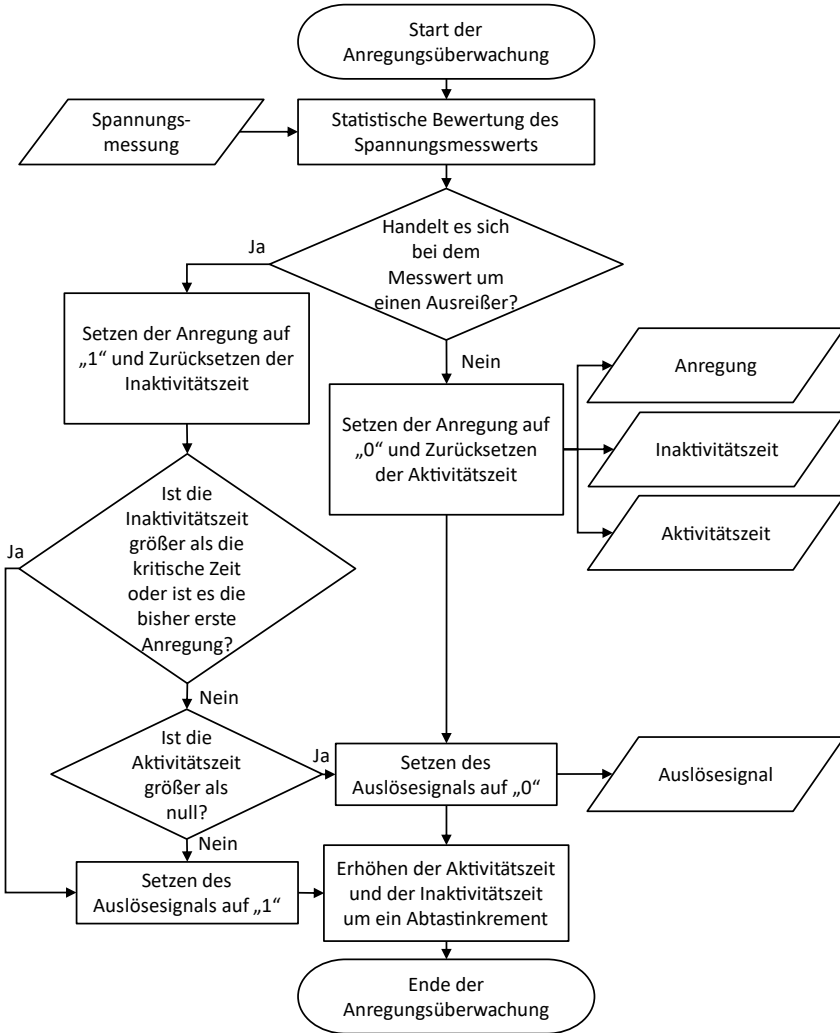


Abbildung 5.7: Unterfunktion „Anregungsüberwachung“ (UF1.1).

Abbildung 5.8 zeigt beispielhaft die Verläufe der gemessenen Zwischenkreisspannung, der daraus folgenden Anregung, der damit in Verbindung stehenden Inaktivitätszeit sowie des resultierenden Auslösesignals. Im folgenden Abschnitt steht die Suchmaschine im Fokus.

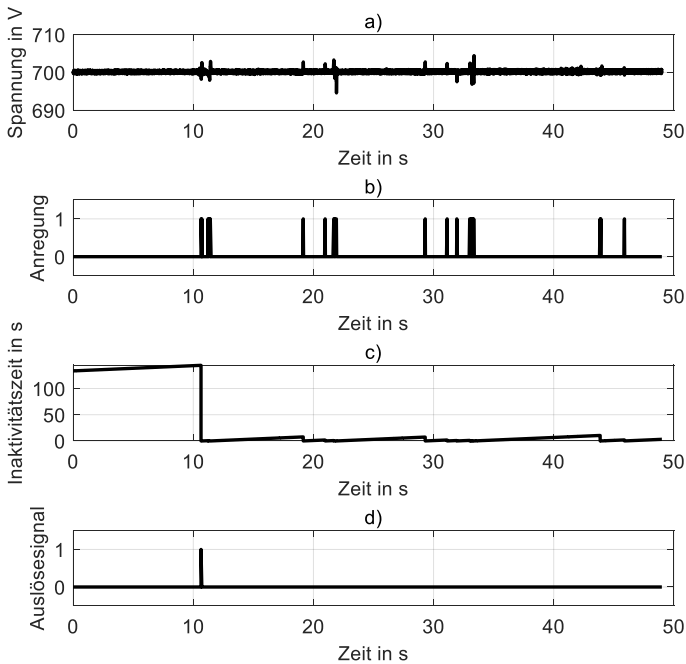


Abbildung 5.8: Beispielhafte Verläufe a) der Spannung, b) der Anregung, c) der Inaktivitätszeit und d) des Auslösesignals.

5.3.2 Suchmaschine

Der Kern der Suchmaschine zur Lastprofilerkennung entstammt dem Audiosuchalgorithmus von (Wang 2003), der in einer weltweit bekannten Applikation zum Auffinden von Musikstücken implementiert ist. Der Algorithmus ermöglicht die Identifikation von Liedern aus einer Datenbank mit mehreren Millionen Einträgen (Wang 2003, S.1). Anstatt der Zeit- und Frequenzdaten von Liedern nutzt die vorliegende Arbeit gemessene Zeit- und Leistungsverläufe. Die zugrundeliegende Logik des Audiosuchalgorithmus mit Fingerabdrücken des Lastprofils hat zum Beispiel (Ellis 2009) in *MATLAB* implementiert. Die vereinfachte Übertragung der einzelnen Schritte auf diesen Anwendungsfall beschreibt (Laribi et al. 2023a).

Algorithmus

Abbildung 5.9 beschreibt den Algorithmus der Suchmaschine in Form eines Programmablaufplans. Der erste Schritt der Unterfunktion 1.2 dient zur Filterung der gemessenen Leistungsdaten, um das Signalrauschen zu verringern (Abbildung 5.10). Der Algorithmus nutzt dazu das Tiefpassverhalten eines Savitzky-Golay-Filters. Da diese Filter einerseits dazu neigen, die Breite und Höhe von Spitzen zu erhalten und andererseits keinen Phasenversatz aufweisen (Schafer 2011, S.116), eignen sie sich für den beschriebenen Anwendungsfall der Lastprofilerkennung. Ein Savitzky-Golay-Filter richtet sich nach zwei Designparametern, wozu die Polynomordnung O und die halbe Rahmenbreite B mit dem Zentrumspunkt E gehören. Den Einfluss dieser beiden Designparameter auf die Eckfrequenz des Filters diskutiert (Schafer 2011, S.115). Ein Savitzky-Golay-Filter erzeugt das geglättete Signal über ein Polynom α mit den Koeffizienten a_l , das den mittleren quadratischen Fehler ϵ_O der Eingangsdaten x in Gl. (5.12) minimiert (Schafer 2011, S.111). Es muss stets $O \leq 2B$ gelten, damit alle Koeffizienten bestimmbar sind (Schafer 2011, S.112).

$$\epsilon_O = \sum_{E=-B}^B (\alpha(E) - x(E))^2 = \sum_{E=-B}^B \left(\sum_{l=0}^O a_l E^l - x(E) \right)^2 \quad (5.12)$$

Wie von (Schafer 2011, S.115) vorgeschlagen, kann ein Savitzky-Golay-Filter anhand von Gl. (5.13) empirisch ausgelegt werden. Die normalisierte Eckfrequenz f'_e ist das Verhältnis aus der geforderten Eckfrequenz f_e und der Nyquistfrequenz bzw. halben Abtastfrequenz $f_a/2$.

$$f'_e = \frac{f_e}{f_a/2} = \frac{O + 1}{3,2 \cdot B - 4,6} \quad \text{für } B \geq 25 \text{ und } O < B \quad (5.13)$$

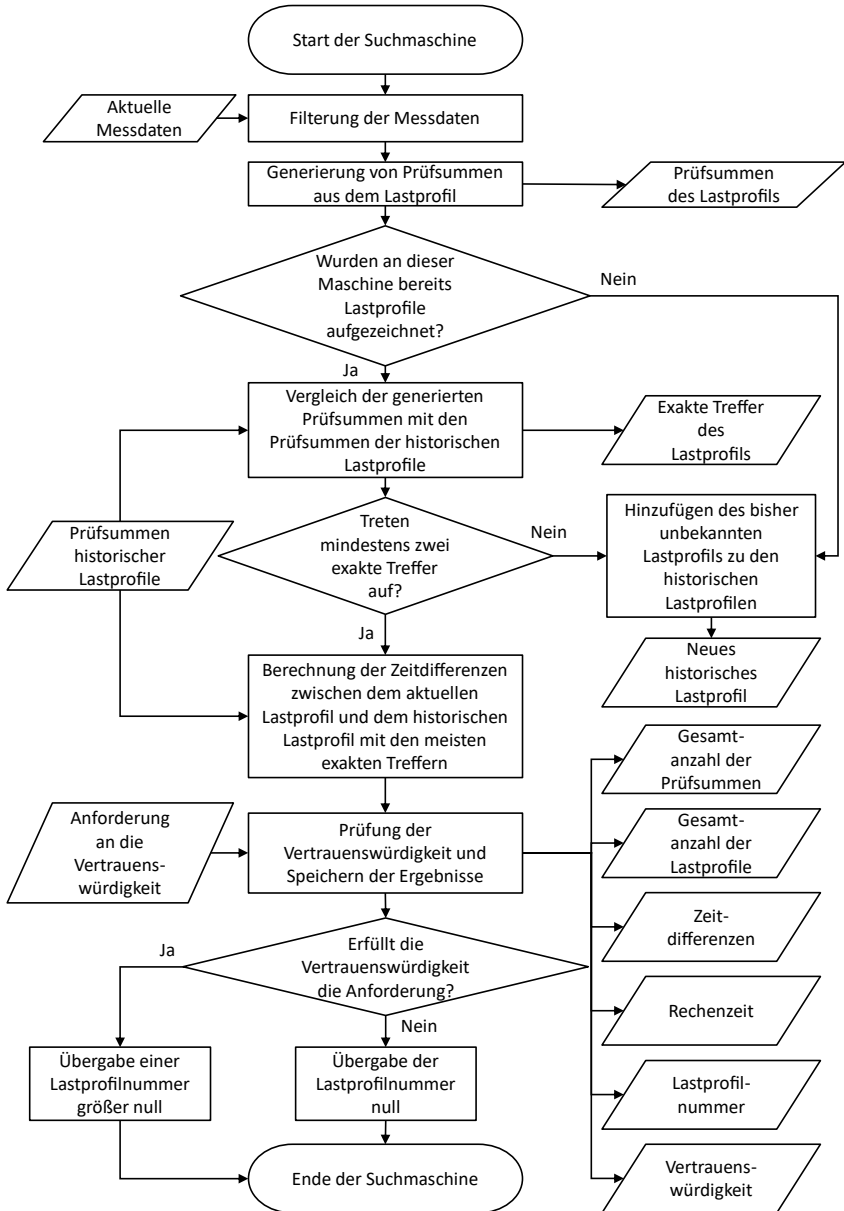


Abbildung 5.9: Unterfunktion „Suchmaschine“ (UF1.2).

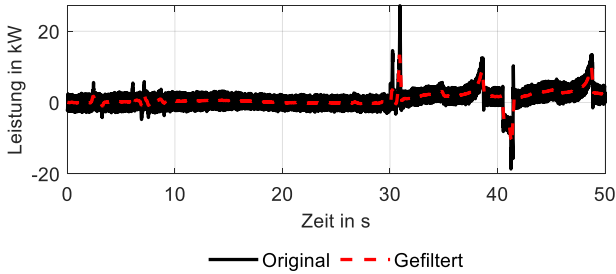


Abbildung 5.10: Beispielhafter Einfluss eines Savitzky-Golay-Filters auf originale Messdaten.

Im zweiten Schritt generiert der Algorithmus sogenannte Prüfsummen (engl. *hash*) H aus den vorverarbeiteten Zeit- und Leistungsdaten. Ein Ringpuffer füllt sich mit Zeit- und Leistungsdaten der vergangenen Sekunde, die einen Lastprofilausschnitt bilden. Anschließend identifiziert der Algorithmus zunächst alle relevanten Extrema des Lastprofilausschnitts, d. h. Minima und Maxima des Lastprofils. Die Extrema haben einen Mindestabstand von 1 kW, um die Anzahl der Prüfsummen in der Datenbank zu begrenzen. Jedes Extremum in Abbildung 5.11 nimmt genau einmal die Rolle des Ankerpunkts ein, was über eine Schleife realisiert wird.

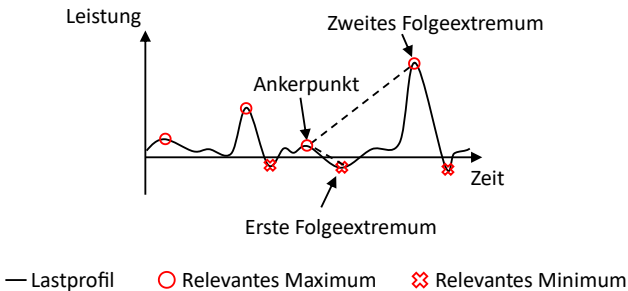


Abbildung 5.11: Extrema des Lastprofils für die Bildung der Prüfsummen.

Eine Prüfsumme H in Gl. (5.14) besitzt zehn Ziffern und setzen sich aus vier Teilen zusammen:

1. Vorzeichen des Ankerpunkts mit $S_k = 0$ bei negativer Leistung und $S_k = 1$ bei positiver Leistung.
2. Absolutbetrag der Leistung im Ankerpunkt, gerundet auf eine ganze Zahl in kW.
3. Absolutbetrag der Leistung im ersten Folgeextremum, gerundet auf eine ganze Zahl in kW.
4. Zeitdifferenz zwischen dem Zeitstempel t_k des Ankerpunkts und jenem Zeitstempel t_{k+1} des ersten Folgeextremums in Millisekunden.

$$H = S_k \cdot 10^9 + |P_k| \cdot 10^6 + |P_{k+1}| \cdot 10^4 + (t_{k+1} - t_k) \cdot 10^0 \quad (5.14)$$

Die zweite Ziffer der Prüfsumme 10^8 ist in diesem Fall nicht belegt und daher stets gleich null. Das Vorgehen ist valide, sofern sich die Leistungen im zweistelligen Kilowattbereich befinden und die Zeitdifferenzen unterhalb von zehn Sekunden liegen. Das wird garantiert, da bei einer fehlenden Anregung innerhalb eines vorab festgelegten Zeitraums ein Produktionsprogramm ohnehin als abgeschlossen gewertet wird. Dadurch kann auf ein maschinenseitiges Auslösesignal verzichtet werden. Damit ist die selbsteinstellende Regelung vollständig unabhängig von der Maschinensteuerung. Bei größeren Leistungen oder größeren Zeitdifferenzen müssen die Prüfsummen entsprechend verlängert werden. Optional kann auch das zweite Folgeextremum in Verbindung mit dem jeweiligen Ankerpunkt zur Generierung von Prüfsummen eingesetzt werden, um weitere Merkmale zur Verfügung zu stellen. Die vorliegende Arbeit wendet diese Option an. Der zweite Schritt der Suchmaschine umfasst den Vergleich zwischen den Prüfsummen des aktuell gemessenen Lastprofils und den bereits in der Datenbank vorhandenen Prüfsummen. Falls noch keine Lastprofile aufgezeichnet worden sind, ist die Datenbank leer und dieser Schritt entfällt. Wenn mindestens zwei Prüfsummen aus der aktuellen Messung und der Datenbank exakt übereinstimmen, wird die Nummer des Lastprofils aus der Datenbank mit den meisten exakten Treffern im dritten Schritt weitergegeben. Die exakten Treffer lassen sich mittels Zeitdifferenzen, wie in Abbildung 5.12, visualisieren. Im idealen Fall ohne zusätzliches Rauschen liegen alle Treffer auf einer Geraden mit einer Steigung von 45° , sodass alle gefundenen Prüfsummen exakte Treffer symbolisieren.

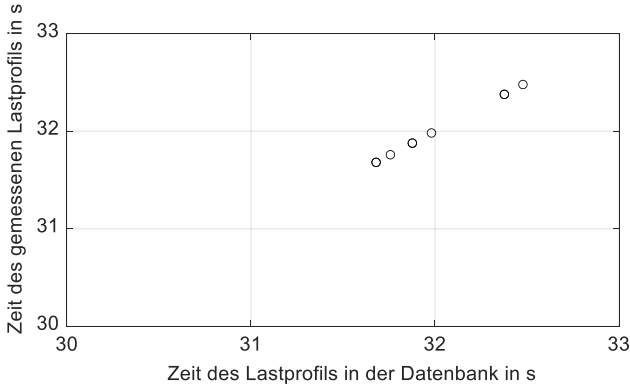


Abbildung 5.12: Beispielhafte exakte Treffer der Prüfsummen auf der gemessenen und in der Datenbank gespeicherten Zeitskala.

Gütekriterien

Die Vertrauenswürdigkeit (engl. *trustworthiness*) T in Gl. (5.15) dient als Gütekriterium der Lastprofilerkennung im vierten Schritt. Sie repräsentiert das Verhältnis zwischen den exakten Treffern und der Anzahl der gefundenen Prüfsummen in einem Lastprofilausschnitt.

$$T = \frac{\text{Exakte Treffer}}{\text{Anzahl der gefundenen Prüfsummen}} \geq 10 \% \quad (5.15)$$

Wenn mindestens zehn Prozent der identifizierten Prüfsummen exakte Treffer sind, gilt das Lastprofil als erkannt und die bereits gespeicherte Lastprofilnummer resultiert aus der Datenbank. Liegt die Vertrauenswürdigkeit unterhalb von 10 %, wird das Lastprofil nicht erkannt, woraufhin der Algorithmus eine null ausgibt. Das nicht erkannte Lastprofil erhält eine fortlaufende Nummer größer null, sobald das Produktionsprogramm abgeschlossen ist. Ab dem nächsten Produktionsprogramm steht es dann als historisches Lastprofil inklusive seiner Prüfsummen zur Verfügung. Des Weiteren wertet der Algorithmus die Rechenzeit zwischen der Prüfsummenbildung und der Erkennung des Lastprofils aus.

Parametervariation

Die Unsicherheit einer Messung muss üblicherweise mindestens zehnmal kleiner als die angegebene Toleranz des Sensors sein (Sartorius 2019, S.54). Bei der Multiplikation zweier

Messwerte addieren sich deren relative Fehler (Sartorius 2019, S.56). Demnach setzt sich die Messunsicherheit der DC-Leistungsmessung im Zwischenkreis aus statistischen Messschwankungen, dem sogenannten Rauschen, der Strom- und der Spannungsmessung zusammen. Bandbreitenlimitiertes, weißes Rauschen ist standardnormalverteilt mit einem Mittelwert von null (Lotichius 2017, S.61). Die Rauschamplitude des addierten weißen Rauschsignals basiert auf einem Zufallsgenerator, in Anlehnung an die Vorgehensweise von (Sartorius 2019, S.287). Durch die Steigerung der Rauschamplitude im Vergleich zum Messsignal vergrößert sich die Varianz der Trainingsdaten (Sartorius 2019, S.194). Die Zeitstempel werden hingegen als konstant angenommen, da die Sensoren der Industriemaschine und des Speichersystems in festen Zeitabständen die physikalischen Gegebenheiten im Zwischenkreis abtasten, welche wiederum Sollwertvorgaben einleiten. Abbildung 5.13 illustriert beispielhafte Verläufe der Lastprofilerkennung.

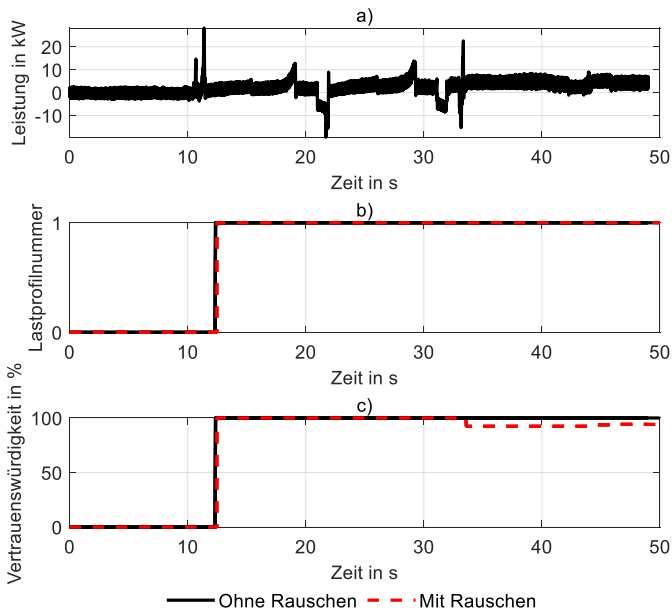


Abbildung 5.13: Beispielhafte Verläufe a) der Leistung, b) der erkannten Lastprofilnummer und c) der Vertrauenswürdigkeit ohne und mit Rauschen.

Im nächsten Abschnitt geht die vorliegende Arbeit auf die Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters ein, der die Achsen der Industriemaschine mit elektrischer Energie versorgt.

5.4 Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters der Industriemaschine

Der Gleichrichter und die Antriebsumrichter sind über den Zwischenkreis miteinander verbunden. Die Antriebsumrichter weisen die Charakteristik einer Konstantleistungslast (CPL) auf (vgl. Abschnitt 2.1.5).

Bevor das Schwungmassenspeichersystem den Zwischenkreis erweitert, soll ein Modell für den bestehenden Frequenzumrichter bestimmt werden. Diese Arbeit verfolgt einen hybriden Ansatz aus theoretischer und experimenteller Modellbildung. Die statische Struktur sowie das dynamische Verhalten des zu integrierenden Schwungmassenspeichersystems wird in den Abschnitten 2.2.4, 5.1 sowie 6.1 modelliert, identifiziert und validiert. Die Parameterwerte der Hardware und Reglersoftware sind hierbei bekannt und durch den Hersteller des Schwungmassenspeichers vorgegeben.

Einige Parameter des industriellen Gleichspannungszwischenkreises, in welchen das Schwungmassenspeichersystem integriert wird, gelten allerdings zunächst als unbekannt. Lediglich die Grobstruktur und wenige Systemeigenschaften der verbauten Geräte sind in Form von Datenblättern und technischer Dokumentation verfügbar. Sie werden im Rahmen der Voranalyse bestimmt (vgl. Abschnitt 5.2). Die Herausforderung besteht darin, die Verhaltensweisen des Gleichrichters, des Zwischenkreises und der Antriebslasten mit geringem Vorwissen zu identifizieren. Im Anschluss an die Modellbildung und Systemidentifikation erfolgt der Reglerentwurf in Abschnitt 5.5.

Die Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters repräsentiert das zweite Funktionsmodul der selbsteinstellenden Regelung in Abbildung 5.14.

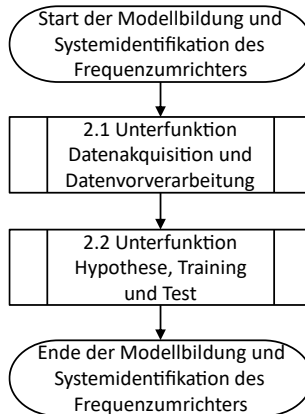


Abbildung 5.14: Zweites Funktionsmodul „Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters“ (FM2).

Das Verhalten des Gleichrichters und der frequenzvariablen Lasten ist im Vorfeld nicht als rein axiomatisches Abbild modellierbar, da im Rahmen der selbsteinstellenden Regelung kein Frequenzumrichterhersteller konsultiert wird bzw. keine Steuerungsinformationen der Industriemaschine vorhanden sind und daher wichtige Parameterwerte unbekannt sind. Die Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters müssen allein anhand der technischen Dokumentation, Schaltplänen und Messungen abgeleitet werden.

Die Parameteridentifikation des Frequenzumrichters erfolgt im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme des Schwungmassenspeichersystems, um das theoretische Potenzial der Lastkappung und der Bremsenergienutzung vor dem Einbau des Speichersystems bestimmen zu können. Es wird davon ausgegangen, dass die Umrichter sich für jedes Produktionsprogramm näherungsweise identisch verhalten und die Parameter im Rahmen der Systemidentifikation daher nur einmal identifiziert werden müssen. Um Redundanzen zu schaffen, können bei Bedarf verschiedene Produktionsprogramme mehrmals durchlaufen werden und anschließend die identifizierten Parameter verglichen werden.

Die nächsten Abschnitte stellen die Einzelschritte der Programmablaufpläne zur Modellbildung und Systemidentifikation von Frequenzumrichtern dar, beginnend mit der

Datenakquisition und Datenvorverarbeitung, gefolgt von der Modellhypothese, dem Training und dem Test.

5.4.1 Datenakquisition und Datenvorverarbeitung

Nachdem der Zweck der Identifikation beschrieben ist, die Anforderungen geklärt sind und das A-priori-Wissen vorhanden ist, folgen in Abbildung 5.15 die Datenakquisition und die Datenvorverarbeitung. Für diese Arbeit ist es notwendig, Strom- und Spannungswerte an Systemen mit Diodengleichrichtern und aktiven Gleichrichtern aufzuzeichnen. Die gemessenen Lastprofile einer Werkzeugmaschine decken den Fall des aktiven Gleichrichters ab. Hinzu kommen Messungen an dem Diodengleichrichter einer Holzbearbeitungsmaschine. Bei den Versuchen können zufällig unterschiedliche Einflussfaktoren variieren oder sie können Toleranzen aufweisen, wie zum Beispiel die Versorgungsspannung des AC-Netzes, das Produktionsprogramm, den Kühlmiteleinsatz, das Werkstück, das Werkzeug und die Lagertemperaturen.

In manchen Fällen ist es möglich, das Auslösesignal (engl. *trigger signal*) der Produktionsmaschine zu messen, um die Länge eines Produktionsprogrammes zu bestimmen. Im Hinblick auf die Anforderungen an die selbsteinstellende Regelung wird davon ausgegangen, dass kein Auslösesignal der Produktionsmaschine verfügbar ist. Die Lastprofile werden ausgehend von der Unterfunktion 1.2 benannt und gespeichert.

Auf die Datenakquisition folgt die Datenaufbereitung. Die Unterfunktion 2.1 wertet die wichtigsten Signalcharakteristika aus, wie Mittel- und Grenzwerte der Strom-, Spannungs- und Leistungsdaten, und stellt diese für den Reglerentwurf bereit. Schon während der Messung müssen die Analogwerte eine Filterung durchlaufen, um Aliasing zu vermeiden. Eine nachträgliche Filterung oder Glättung der Originaldaten kann den Informationsgehalt verschlechtern und ist daher zu vermeiden.

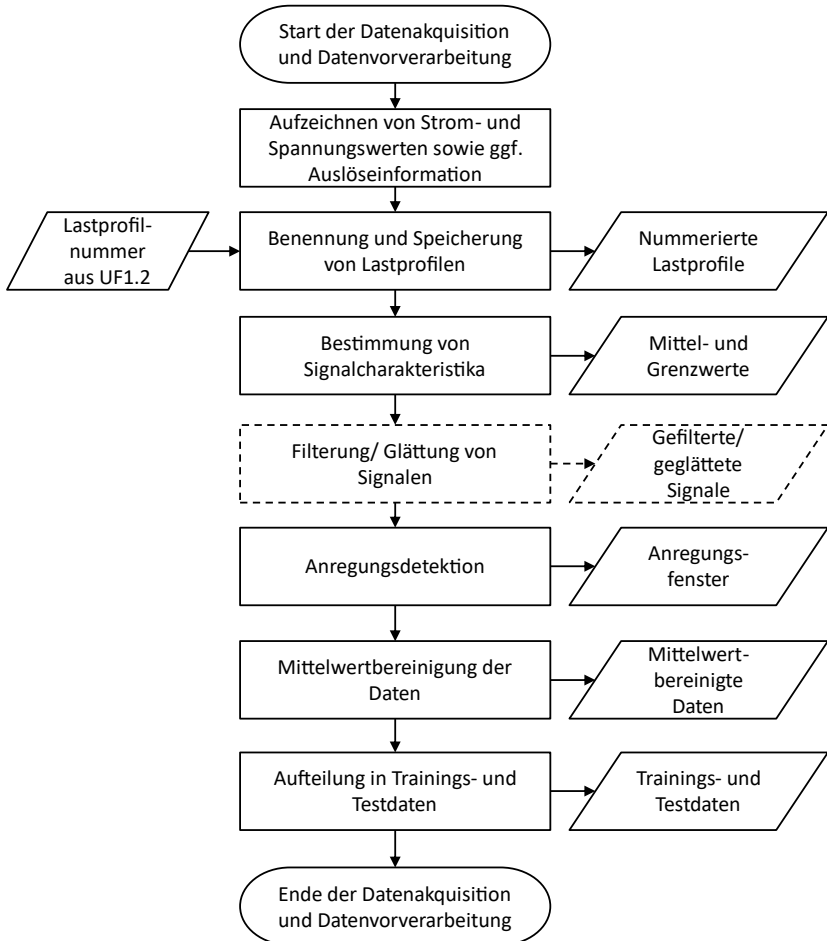


Abbildung 5.15: Unterfunktion „Datenakquisition und Datenvorverarbeitung“ (UF2.1).

Eine automatische Anregungsdetektion ist elementar, da wegen der vorteilhaften nicht-invasiven Identifikationsverfahren kein zusätzliches Testsignal aufgeschaltet wird. Zur automatischen Anregungsdetektion stehen in dieser Arbeit sowohl die Originalsignale als auch die zeitlichen Ableitungen des gemessenen Laststroms i_{ng} und der Zwischenkreisspannung v_g zur Verfügung. Die Anregungsdetektion ist nicht nur für die Systemidentifikation hinsichtlich des eingesparten Rechenaufwands nützlich, sondern auch zur Erkennung des ersten

Beschleunigungsvorgangs eines Produktionsprogramms für den Fall, dass kein Auslösesignal verfügbar ist (vgl. Unterkapitel 5.3). Der Laststrom und die Zwischenkreisspannung weisen typischerweise horizontale Abschnitte und steile Flanken auf (s. Abbildung 5.16).

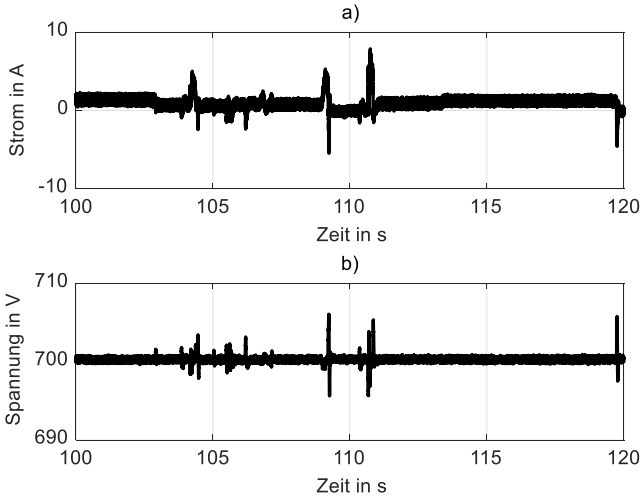


Abbildung 5.16: Beispielhafte Messdaten des a) Laststrom i_{ng} und der b) Zwischenkreisspannung v_g einer Werkzeugmaschine.

Die Signale müssen binär in Zeitabschnitte mit und ohne Anregung eingeteilt werden. Dabei ist es unerheblich, ob das Vorzeichen der Anregung positiv oder negativ ist. Eine Anregung liegt immer dann vor, wenn der Laststrom eine Änderung der Zwischenkreisspannung hervorruft und die Spannungsregelung nicht eingeschwungen ist. Da es keine vorab festgelegten absoluten Schwellenwerte für die Anregung gibt, teilt ein Algorithmus automatisch die Messdaten den beiden Gruppen zu. Zur Verbindung mehrerer benachbarter Anregungsfenster kann ein zeitlicher Puffer an den Rändern der identifizierten Anregungsfenster vorgesehen werden. Falls die Anregungsfenster sich dann überschneiden, verschmelzen sie zu einem größeren Anregungsfenster.

Eine naheliegende Lösung für das Auffinden von Anregungsfenstern ist die statistische Betrachtung der Signale. Bei den Lastspitzen handelt es sich im Vergleich zur mittleren Last um Anomalien, ähnlich wie bei der Erkennung von Ausreißern. Daher gelten jene Messwerte

der Spannung als Spitzen bzw. Ausreißer, welche eine größere Distanz als drei Standardabweichungen zum Mittelwert besitzen (Sartorius 2019, S.225). Im zweiten Fallbeispiel variiert der Ansatz, da der Diodengleichrichter keinen symmetrischen Spannungsregler besitzt.

Über die dreifache Standardabweichung ergibt sich die binäre Anregungsdetektion der Zwischenkreisspannung in Abbildung 5.17. Die Anregungsfenster werden nachträglich beidseitig jeweils den Zeitpuffer t_{ex} vergrößert, damit das Parameterschätzverfahren genügend Datenpunkte erhält und der Einfluss der Ein- und Ausgangsdaten auf die Anpassungsgüte aus den Experimenten hervorgeht. Die Datenvorverarbeitung in Abbildung 5.15 befreit außerdem die Originalsignale von ihren Mittelwerten, da dies eine Voraussetzung für die Parameterschätzung in *MATLAB* ist. Dadurch werden statische Anteile entfernt und die dynamischen Anteile bestimmen die Koeffizienten der angenäherten Übertragungsfunktion.

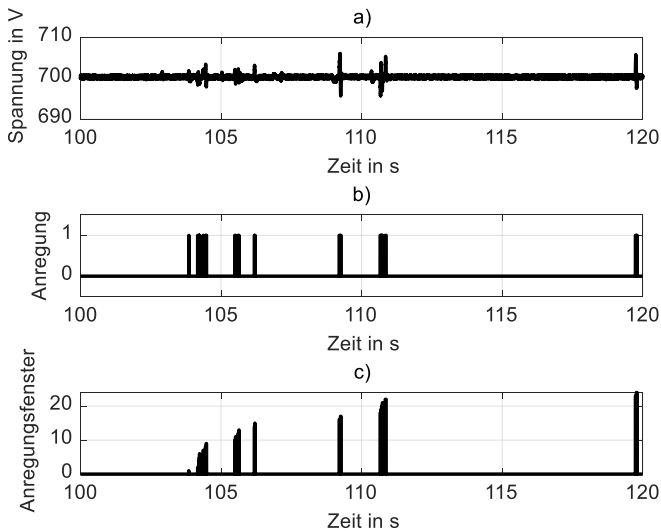


Abbildung 5.17: Anregungsdetektion für die Systemidentifikation. a) Ausschnitt der Spannungsmessung, b) binäre Anregung, wobei der Wert 1 eine Anregung repräsentiert, während der Wert 0 keine Anregung bedeutet, c) Summe der Anregungsfenster im gewählten Zeitabschnitt.

Bevor die vorverarbeiteten Daten der Unterfunktion 2.2 zugeführt werden, müssen sie in Trainings- und einen Testdaten separiert werden. Die vorliegende Arbeit wählt 60:40 als Verhältnis zwischen Trainings- und Testdaten, welches in der Praxis neben dem üblichen Pareto-Prinzip 80:20 zum Einsatz kommt (Joseph 2022, S.531).

5.4.2 Hypothese, Training und Test

Nach der Datenakquisition und Datenvorverarbeitung können die Modellhypothese und das Identifikationsverfahren für die Parameterschätzung gewählt werden. Anschließend wird das Modell anhand von Testdaten und Gütekriterien in Form von Fehlermaßen validiert (vgl. Abbildung 5.18). Die resultierende Modellgüte wird mit der Anforderung an die Genauigkeit abgeglichen. Wird die Anforderung nicht erfüllt, muss die Modellhypothese angepasst werden. Wenn die Genauigkeit zufriedenstellend ist, führen die Parameterschätzwerte zu dem validierten Frequenzumrichtermodell.

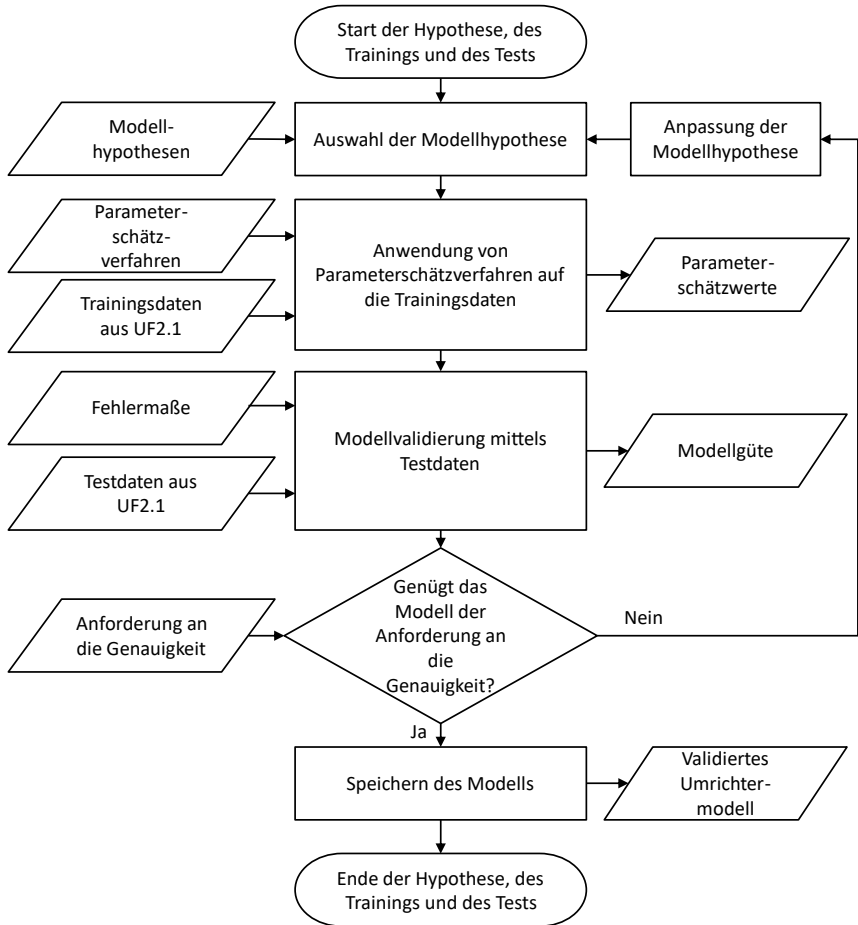


Abbildung 5.18: Unterfunktion „Hypothese, Training und Test“ (UF2.2).

Zunächst werden in den kommenden Abschnitten die Modellhypothesen für die Systemidentifikation hergeleitet.

Algorithmus

Es folgt die Herleitung der Modelle des aktiven Gleichrichters, des Diodengleichrichters und der Antriebslasten sowie der Parallelschaltung der Impedanzen.

Modell des aktiven Gleichrichters

Mehrere Nichtlinearitäten sind Teil des regelungstechnischen Modells eines aktiven Gleichrichters. Dazu zählen die Begrenzung des DC-Ausgangsstroms sowie das Schaltverhalten der IGBT und die Raumzeigermodulation des Spannungssignals. Unter die mikroskopische Betrachtung fallen die Untersuchungen innerhalb einer Schaltperiode (Zach 2010, S.1742). Beim Regelungsentwurf stört die mikroskopische Betrachtung schaltfrequenter Signalanteile der Ströme und Spannungen (Böcker 2019, S.62). Da die Regelung diese durch die Arbeitsweise der Halbleiter inhärenten Signalanteile nicht korrigieren soll, sind sie für das Modell unerheblich (Böcker 2019, S.62) und es genügt die makroskopische Betrachtung (Zach 2010, S.1741). Daher eignet sich die sogenannte dynamische Mittelwertmodellierung (engl. *dynamic averaging*) über eine Pulsperiode zur Abstraktion der leistungselektronischen Wandler (Böcker 2019, S.62). Der Regelkreis eines aktiven Gleichrichters als linearisiertes Mittelwertmodell ist in Abbildung 5.19 dargestellt. Im Allgemeinen wird bei aktiven Netzeinspeisungen eine Kaskadenregelung aus Spannungs- und Stromregelung eingesetzt, bei der die Zeitkonstante der äußeren Spannungsregelung mindestens um den Faktor zehn größer als die Zeitkonstante der Stromregelung ist, damit keine Interaktionen zwischen den Reglern auftreten (Ben Ali et al. 2020, S.1).

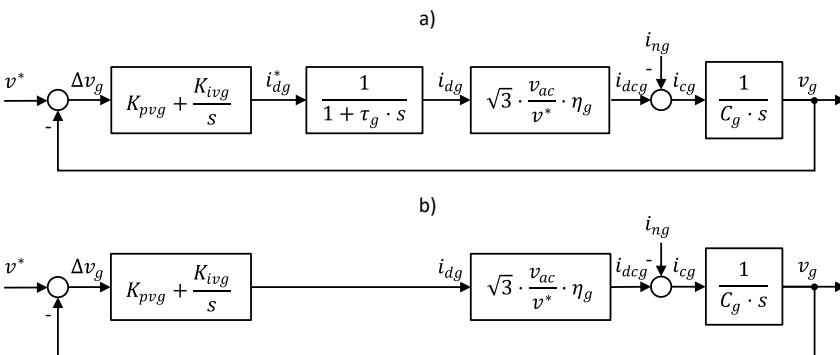


Abbildung 5.19: Zwischenkreismodell der Spannungsregelschleife eines aktiven Gleichrichters a) mit vereinfachtem Stromregler als PT1-Glied in Anlehnung an (Parvez et al. 2015, S.124) und b) ohne Stromregler in Anlehnung an (Ben Ali et al. 2020, S.4).

Der PI-Spannungsregler G_{vg} in Gl. (5.16) mit dem Proportionalanteil K_{pvg} und der Nachstellzeit T_{ng} bzw. dem Integralanteil K_{ivg} erhält als Eingang die Spannungsabweichung Δv_g . Daraus resultiert der Sollwert der Wirkstromkomponente i_{dg}^* .

$$G_{vg}(s) = \frac{i_{dg}^*(s)}{\Delta v_g(s)} = K_{pvg} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{ng} \cdot s} \right) \quad (5.16)$$

Die Blindstromkomponente i_{qg} des aktiven Gleichrichters wird auf null geregelt und deshalb vernachlässigt. Während (Ben Ali et al. 2020, S.4) auf einen Stromregler verzichtet, nutzt (Parvez et al. 2015, S.124) diesen in Form eines PT1-Glieds. Dieses Vorgehen ist vergleichbar zur Vereinfachung bei der Kaskadenregelung des Schwungmassenspeichersystems. Die Zeitkonstante τ_g des PT1-Glieds in Gl. (5.17) bildet die diskrete Sollwertvorgabe im Umrichter nach (Austermann 2018, S.116). Sie richtet sich nach der Schaltfrequenz f_s des Umrichters und der Anzahl λ_{PWM} der Spannungstakte pro Periode der Pulsweitenmodulation (Gerlach 2021, S.13).

$$G_{pt1g}(s) = \frac{i_{dq}(s)}{i_{dq}^*(s)} = \frac{1}{1 + \tau_g \cdot s} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\lambda_{PWM} \cdot f_s} \cdot s} \quad (5.17)$$

Zur Übersetzung des dq-Systems in DC-Größen muss zudem die Übertragungsfunktion G_{bg} bzw. der Balancefaktor K_{bg} eingeführt werden (Gl. (5.18)). Der Spannungseffektivwert der Netzseite v_{ac} und die Sollspannung im Zwischenkreis v^* sind näherungsweise konstant. Hinzu kommt der elektrische Wandlungswirkungsgrad des Gleichrichters η_g . Dieser Zusammenhang stammt aus dem Leistungsgleichgewicht der AC- und DC-Seite.

$$G_{bg}(s) = \frac{i_{dcg}(s)}{i_{dgg}(s)} = \sqrt{3} \cdot \frac{v_{ac}}{v^*} \cdot \eta_g = K_{bg} \quad (5.18)$$

Der Laststrom i_{ng} wirkt als Störgröße auf das Regelungssystem des aktiven Gleichrichters. Die Summe aus dem DC-Strom i_{dcg} am Ausgang des Gleichrichters und dem Laststrom i_{ng} ergibt den Kondensatorstrom i_{cg} . Der Kondensatorstrom i_{cg} in Gl. (5.19) verändert die Spannung v_g an der Zwischenkreiskapazität C_g des aktiven Gleichrichters. Für einen positiven Kondensatorstrom steigt die Spannung. Bei negativen Werten ist der Laststrom betragsmäßig

größer als der DC-Ausgangsstrom des Gleichrichters, wodurch die Spannung an der Kapazität sinkt.

$$G_{cg}(s) = \frac{v_g(s)}{i_{cg}(s)} = \frac{1}{C_g \cdot s} \quad (5.19)$$

Einige Autoren empfehlen, zusätzlich hinter dem Stromregler ein Totzeitglied G_{tg} mit der Totzeit τ_t als Teil der Strecke zu modellieren, um den Abtast-Halte-Vorgang (*engl. sample and hold*) der zeitdiskreten Regelung zu berücksichtigen (Agorreta et al. 2011, S. 771–772; Böcker 2016, S. 79–80; Austermann 2018, S. 115–117). Das Totzeitglied in Gl. (5.20) kann durch eine Padé-Approximation erster oder höherer Ordnung in ein weiteres PT1-Glied (Gl. (5.21)) überführt werden, mit einer Zeitkonstante $\tau_t \approx 1,5 \dots 2,5 \cdot \tau_{PWM}$ als Vielfaches der Periodendauer der Pulsweitenmodulation $\tau_{PWM} = 1/f_s$. Dieser Ansatz wird in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht angewandt, um keine weiteren Unbekannten in das System einzubringen.

$$e^{-s \cdot \tau_t} \approx \frac{1 - \frac{1}{2} \cdot \tau_t \cdot s}{1 + \frac{1}{2} \cdot \tau_t \cdot s} \quad (5.20)$$

$$G_{tg}(s) = \frac{1}{1 + \tau_t \cdot s} \quad (5.21)$$

Die Regelungsparameterwerte des aktiven Gleichrichters sind unbekannt und müssen im Rahmen der Modellbildung und Systemidentifikation für die selbsteinstellende Regelung bestimmt werden. Diese Aufgabe muss bewältigt werden, ohne die echten Werte aus der Steuerung des aktiven Gleichrichters auszulesen. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass Zwischenkreise unterschiedlicher Hersteller für eine Speichernachrüstung befähigt werden. Andere Parameterwerte und Randbedingungen, wie z. B. die Zwischenkreiskapazität und der Bemessungsstrom des Geräts, können wiederum Datenblättern oder der technischen Gerätedokumentation entnommen werden. Tabelle 5.1 fasst die unbekannt Parameter eines aktiven Gleichrichters zusammen.

Tabelle 5.1: Parameter des Mittelwertmodells eines aktiven Gleichrichters mit Datenquelle.

Parameter	Datenquelle
Zwischenkreiskapazität C_g	Datenblatt/ Identifikation
Sollspannung des Zwischenkreises v^*	Messung
Nennspannung der AC-Seite v_{ac}	Messung/ Datenblatt
Proportionalanteil des Spannungsreglers K_{pvg}	Identifikation
Nachstellzeit bzw. Integralanteil des Spannungsreglers T_{ng} bzw. K_{ivg}	Identifikation
Ersatzzeitkonstante des Stromreglers τ_g	Schätzung

Die Drosselinduktivität der aktiven Netzeinspeisung begrenzt die Dynamik des AC-Stroms auf der d-Achse des internen Stromreglers. Die Reglerdynamik des aktiven Gleichrichters beeinflusst, welche Stromspitzenanteile durch das Speichersystem gedeckt werden können. Relevant sind der Proportional- sowie der Integralanteil der Spannungsregelung und sowie die Ersatzzeitkonstante der Stromregelung. Dabei muss untersucht werden, welche Bandbreite und Eckfrequenz die aktive Netzeinspeisung aufgrund ihrer Parametrierung erreicht. Sollte das Speichersystem keine ausreichend schnelle Dynamik aufweisen, kann diese durch bestimmte Maßnahmen verbessert werden:

- Einbau zusätzlicher Zwischenkreiskapazität
- Verwendung eines schnelleren Speichersystems mit kleinerer elektrischer Zeitkonstante
- Veränderung der Parametrierung der aktiven Netzeinspeisung
- Vorausschauende Ansteuerung des Speicherumrichters

Hierbei kommt nur die vorausschauende Ansteuerung des Speicherumrichters infrage, da die anderen Maßnahmen mit Mehraufwand verbunden wären oder den physikalischen Einschränkungen des gegebenen Speichersystems unterliegen.

In Gl. (5.22) ist die allgemeine Impedanz des aktiven Gleichrichters mit der Strecke G_S und dem Regler G_R aufgetragen.

$$Z_g(s) = \frac{v_g(s)}{i_{ng}(s)} = \frac{G_S(s)}{1 + G_R(s) \cdot G_S(s)} \quad (5.22)$$

Dadurch ergibt sich die Impedanz Z_{g0} des aktiven Gleichrichters ohne Stromregler in Gl. (5.23) und die Impedanz Z_{gm} des aktiven Gleichrichters mit Stromregler in Gl. (5.24).

$$Z_{g0}(s) = \frac{\frac{1}{C_g} \cdot s}{s^2 + s \cdot \frac{K_{pvg} \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{v_{ac}}{v^*} \cdot \eta_g}{C_g} + \frac{K_{ivg} \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{v_{ac}}{v^*} \cdot \eta_g}{C_g}} \quad (5.23)$$

$$Z_{gm}(s) = \frac{\frac{1}{C_g} \cdot s \cdot \left(s + \frac{1}{\tau_g}\right)}{s^3 + s^2 \cdot \frac{1}{\tau_g} + s \cdot \frac{K_{pvg} \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{v_{ac}}{v^*} \cdot \eta_g}{C_g \cdot \tau_g} + \frac{K_{ivg} \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{v_{ac}}{v^*} \cdot \eta_g}{C_g \cdot \tau_g}} \quad (5.24)$$

Die Modellstruktur in Abbildung 5.19b und die Übertragungsfunktion in Gl. (5.23) dienen als Hypothese für den aktiven Gleichrichter, da die sehr kleinen Zeitkonstanten des Stromreglers unter den gewählten Rahmenbedingungen nur schwierig oder unmöglich zu identifizieren sind. Sie lassen sich jedoch anhand von Literaturwerten und Datenblättern abschätzen. Es gilt somit $Z_g = Z_{g0}$.

Wie in Abschnitt 4.1 gefordert, dürfen die Eigenschaften des aktiven Gleichrichters nicht verändert werden. Trotzdem soll zum besseren Verständnis zumindest kurz der Einfluss der Parameter auf die Impedanz des aktiven Gleichrichters diskutiert werden. Abbildung 5.20 zeigt stellvertretend für alle variierbaren Parameter den Einfluss des Proportionalanteils K_{pvg} auf den Impedanzverlauf des aktiven Gleichrichters. Die Vergrößerung des Proportionalanteils K_{pvg} , der Nachstellzeit T_{ng} , der Kapazität C_g und des Wirkungsgrads η_g , sowie die Verkleinerung der Stromreglerzeitkonstante τ_g und des Sollwerts der Zwischenkreisspannung v^* wirken sich in diesem Szenario positiv auf die Stabilität aus. Die Parameter können jedoch nicht beliebig groß oder klein gewählt werden. Bei niedrigen Frequenzen ist der PI-Spannungsregler des aktiven Gleichrichters dominant, was an dem steigenden Betrag der Impedanz und der Phase von 90° ersichtlich ist. Im mittleren Frequenzbereich rund um den Maximalbetrag kann man den Kehrwert des Proportionalanteils $1/K_{pvg}$ des aktiven

Gleichrichters ablesen. Bei höheren Frequenzen ist nur noch der Einfluss der Zwischenkreiskapazitäten zu erkennen, sodass die Phasen aller Impedanzen auf -90° abfallen.

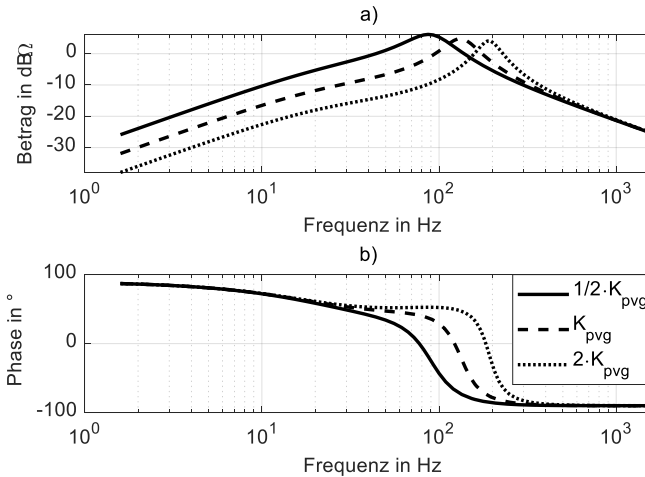


Abbildung 5.20: Einfluss des Proportionalanteils K_{pvg} auf a) den Betrag sowie b) die Phase der Impedanz Z_{gm} des aktiven Gleichrichters.

Modell des Diodengleichrichters

Abbildung 5.21 illustriert das vereinfachte Blockschaltbild der Spannungsregelschleife eines Diodengleichrichters.

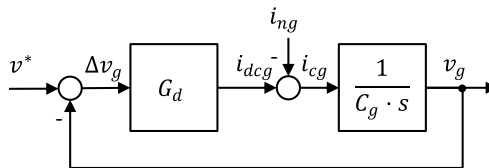


Abbildung 5.21: Zwischenkreismodell der Spannungsregelschleife eines Diodengleichrichters.

Das Verhalten eines Diodengleichrichters lässt sich über die nichtlineare Übertragungsfunktion G_d mit der Quasistatikkonstante K_d in Gl. (5.25) beschreiben (Lu et al. 2021a, S.391). Bei einem Spannungseinbruch versorgt der Gleichrichter den Zwischenkreis näherungsweise über eine konstante Kennliniencharakteristik (vgl. P-Regler). Sobald die

Spannung aufgrund von Bremsvorgängen über den Scheitelwert \hat{v} steigt, kann der Gleichrichter keinen Strom in das AC-Netz zurückspeisen, sodass die Kennliniensteigung in diesem Fall gleich null ist. Der Überschuss an elektrischer Energie lädt die Zwischenkreiskondensatoren bis der Bremschopper bei einer vordefinierten Spannungsschwelle aktiviert wird und die Ladung im Bremswiderstand in Wärme gewandelt wird. Die Impedanz $Z_g = Z_{go}$ des Diodengleichrichters ohne Stromregler resultiert in Gl. (5.26).

$$G_d(s) = \begin{cases} K_d & \text{für } v_g < \hat{v} \\ 0 & \text{für } v_g \geq \hat{v} \end{cases} \quad (5.25)$$

$$Z_{go}(s) = \frac{v_g(s)}{i_{ng}(s)} = \frac{\frac{1}{C_g}}{s + \frac{K_d}{C_g}} \quad (5.26)$$

Das Vorgehen zur Bestimmung der Zwischenkreiskapazität $C = C_g + C_l$ muss aufgrund der Nichtlinearität der Quasistatistikkonstante angepasst werden. Der symmetrische Ansatz des aktiven Gleichrichters ist hier nicht mehr uneingeschränkt anwendbar. Im Bereich zwischen dem Scheitelwert \hat{v} und der Bremschopperschwelle ist der Laststrom i_{ng} gleich dem Kondensatorstrom i_{cg} , da $G_d = 0$ gilt. Dieses Spannungsfenster dient deshalb als Alternative zur Bestimmung der Zwischenkreiskapazität über ein vereinfachtes Steigungsdreieck (Gl. (5.27)). Das Steigungsdreieck beschreibt den Ladevorgang zwischen einer unteren Spannung v_{unten} und einer oberen Spannung v_{oben} über einen Zeitraum $t_{oben} - t_{unten}$ und einen näherungsweise konstanten Bremsstrom i_{ng} der Last. Dabei wird immer nur die positive Flanke des Ladevorgangs vor dem Eingriff der Bremschoppers analysiert. Um den Einfluss von Schwingungen zu mitigieren, werden alle Ladevorgänge innerhalb der Trainingsdaten ausgewertet und der Median der Ergebnisse schließlich als Schätzwert \tilde{C} angenommen.

$$\tilde{C} = |i_{ng}| \cdot \frac{t_{oben} - t_{unten}}{v_{oben} - v_{unten}} \quad (5.27)$$

Die Parameter des Zwischenkreismodells eines Diodengleichrichters mit ihrer Datenquelle sind Tabelle 5.2 zu entnehmen.

Tabelle 5.2: Parameter des Modells eines Diodengleichrichters mit Datenquelle.

Parameter	Datenquelle
Zwischenkreiskapazität C_g	Datenblatt/ Identifikation
Sollspannung des Zwischenkreises v^*	Messung
Nennspannung der AC-Seite v_{ac}	Messung/ Datenblatt
Quasistatikkonstante K_d	Identifikation

Das Bode-Diagramm eines Diodengleichrichters ähnelt jenem eines Speichers im Entladebetrieb (vgl. Abbildung 5.5), wobei eine höhere Quasistatikkonstante die Stabilität begünstigt.

Modell der Antriebslasten

Wie in Abschnitt 2.1.5 bereits erläutert, werden umrichter gespeiste Antriebslasten als Konstantleistungslasten (CPL) modelliert. Diese Lasten weisen ein negatives Impedanzverhalten auf, da sie ihren Eingangsstrom bei abnehmender Zwischenkreisspannung erhöhen. Die Linearisierung der CPL ist lediglich in unmittelbarer Nähe des Arbeitspunkts zulässig. Alle vorhandenen Antriebslasten der Maschine können vereinfacht zu einer CPL zusammengefasst werden, die deren Globalverhalten beschreibt (Singh et al. 2017, S.410). Die verteilten Kapazitäten C_{ll} der l Antriebslasten werden daher zur Gesamtlastkapazität C_l und die l Einzelströme i_{nll} zum Laststrom i_{nl} summiert (Gl. (5.28)-(5.29)). Die Impedanzen der Übertragungselemente werden dabei vernachlässigt. Ebenso entfällt die Betrachtung von DC-Hochfrequenzfiltern, da diese keinen bedeutenden Einfluss auf die Gesamtimpedanz im betrachteten Frequenzband unterhalb von 1 kHz haben.

$$C_l = \sum_{l=1}^k C_{ll} \quad (5.28)$$

$$i_{nl} = \sum_{l=1}^k i_{nll} \quad (5.29)$$

Abbildung 5.22 stellt die Blockschaltbilder des nichtlinearen und des linearisierten Modells der umrichter gespeisten Antriebslasten einander gegenüber. Die CPL wird in Gl. (5.30) und (5.31)

um einen PT1-Stromregler mit der Zeitkonstante τ_l und die Zwischenkreiskapazität C_l samt Kondensatorstrom i_{cl} erweitert, um das Verhalten des Umrichters realitätsnah abzubilden. Die Zeitkonstante τ_l resultiert wieder aus einer Näherung unter Zuhilfenahme der Schaltfrequenz der Motorumrichter (vgl. Gl. (5.21)). Die Zwischenkreiskapazität C_l kann den Datenblättern entnommen werden, wird aber auch über Messdaten identifiziert.

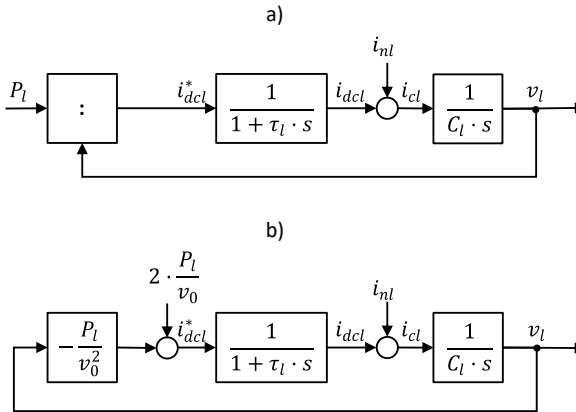


Abbildung 5.22: a) Nichtlineares und b) linearisiertes Zwischenkreismodell der umrichtergespeisten Antrieblasten als Blockschaltbilder.

$$G_{pt1l}(s) = \frac{i_{dcl}(s)}{i_{dcl}^*(s)} = \frac{1}{1 + \tau_l \cdot s} \quad (5.30)$$

$$G_{cl}(s) = \frac{v_l(s)}{i_{cl}(s)} = \frac{1}{C_l \cdot s} \quad (5.31)$$

Die Gleichungen (5.32) und (5.33) enthalten die Lastimpedanzen Z_{lm} und Z_{lo} des linearisierten Modells mit und ohne Stromregler als Übertragungsfunktion aus Abbildung 5.22b. Für die Systemidentifikation gilt analog zum Gleichrichter $Z_l = Z_{lo}$.

$$Z_{lm}(s) = \frac{v_l(s)}{i_{nl}(s)} = \frac{\frac{1}{C_l} \cdot \left(s + \frac{1}{\tau_l}\right)}{s^2 + s \cdot \frac{1}{\tau_l} + \frac{P_l}{v_0^2 \cdot \tau_l \cdot C_l}} \quad (5.32)$$

$$Z_{io}(s) = \frac{v_l(s)}{i_{nl}(s)} = \frac{\frac{1}{C_l}}{s + \frac{P_l}{v_0^2 \cdot C_l}} \quad (5.33)$$

Abbildung 5.23 verdeutlicht den Einfluss der Verbraucherleistung auf den Betrag und die Phase der CPL-Impedanz Z_l . Höhere Leistungen führen zu einem kleineren Betrag und einer flacheren Phase, sodass die Stabilitätsreserve sinkt. Da die CPL einen negativen Widerstand aufweist, liegt ihre Phase anfänglich bei -180° . Der Betrag der Last entspricht im horizontalen Bereich dem ohmschen Widerstandswert v_0^2/P_l im Arbeitspunkt der Linearisierung. Im Bereich höherer Frequenzen wird ihr Verhalten aufgrund des Zwischenkreiskondensators kapazitiv und die Phase steigt auf -90° .

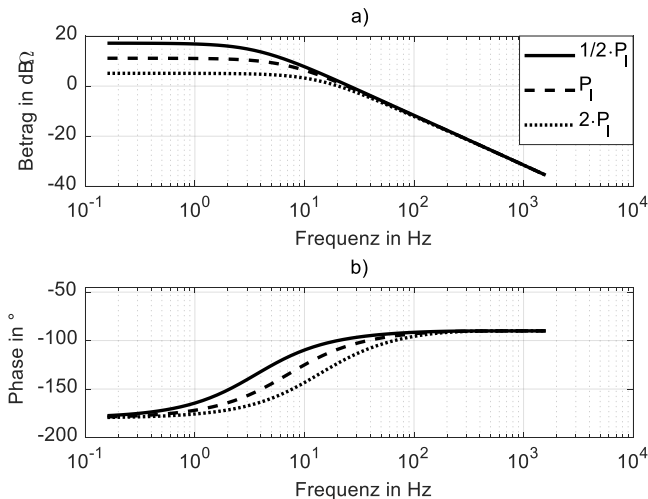


Abbildung 5.23: Einfluss der Verbraucherleistung P_l auf a) den Betrag sowie b) die Phase der Impedanz Z_l der Konstantleistungslast.

Modell der parallelgeschalteten Impedanz

Da der Gleichrichter und die Antrieblasten im Betrieb über den Zwischenkreis interagieren, muss die Gesamtimpedanz Z des Frequenzumrichters mittels des Ersatzschaltbildes in Abbildung 5.24 hergeleitet werden.

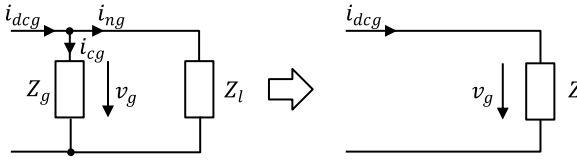


Abbildung 5.24: Ersatzschaltbilder für die Parallelschaltung der Impedanzen des Gleichrichters und der Antriebslasten.

Dazu wird die Admittanz Y mithilfe der Übertragungsfunktionen der inversen Impedanzen der Erzeuger- und Lastseite berechnet (Rowell 2003, S.7). Die Herleitung der Admittanz Y in Gl. (5.34) bzw. Impedanz Z in Gl. (5.35) befindet sich im Anhang 10.11 dieser Arbeit. Da die Bestimmung der kleinen Zeitkonstanten der Stromregler mit den gemessenen Messdaten in Vorversuchen nicht möglich gewesen ist, basieren die Berechnungen auf dem Ansatz ohne Stromregler. Die Leitungsimpedanzen bei Kabellängen von wenigen Metern zwischen dem Erzeuger und der Last werden wegen des geringen Spannungsabfalls vernachlässigt. Es wird angenommen, dass $v_g \approx v_l$ gilt.

$$Y(s) = \frac{i_{dcg}(s)}{v_g(s)} = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{Z_g(s)} + \frac{1}{Z_l(s)} \quad (5.34)$$

$$Z(s) = \frac{v_g(s)}{i_{dcg}(s)} \quad (5.35)$$

Da der DC-Strom i_{dcg} im Zwischenkreis mangels Zugänglichkeit nicht direkt gemessen werden kann, muss er über die Ableitung der gemessenen Spannung v_g und den Laststrom i_{nlg} rekonstruiert werden. Bei C_{gDB} und C_{lDB} in Gl. (5.36) handelt es sich um die Kapazitäten des Gleichrichters und der Antriebslasten laut Datenblatt (DB).

$$i_{dcg}(t) = i_{nlg}(t) + \frac{dv_g(t)}{dt} \cdot (C_{gDB} + C_{lDB}) \quad (5.36)$$

Beim Koeffizientenvergleich kann nur die gesamte geschätzte Zwischenkreiskapazität $\tilde{C} = \tilde{C}_g + \tilde{C}_l$ geschätzt werden. Anhand der Datenblattwerte können die Kapazitäten der Erzeuger und Lasten allerdings nach der Parameterschätzung anteilig bestimmt werden (Gl. (5.37)-(5.38)).

$$\tilde{C}_g = \frac{\tilde{C}}{1 + \frac{C_{IDB}}{C_{gDB}}} \quad (5.37)$$

$$\tilde{C}_l = \tilde{C} - \tilde{C}_g \quad (5.38)$$

Bevor die Identifikation der unbekannt Parameterwerte durchgeführt wird, erfolgt die Prüfung der Identifizierbarkeit des Systems. Da die Modellordnungen der Regelstrecke und des Reglers bekannt sind, muss nur noch die zweite Bedingung in Gl. (2.40) bis (2.43) überprüft werden. Unter Verwendung von Gl. (2.42) und (2.43) ist die strukturelle Identifizierbarkeit von Z generell gegeben.

Als Identifikationsverfahren nutzt die vorliegende Arbeit die nichtlineare Methode der kleinsten Quadrate (engl. *least squares method*) (vgl. (Kwak et al. 2014)), welche auch *MATLAB* in seiner *System Identification Toolbox* anbietet. Wie in Gl. (5.39) dargelegt, ist das Ziel dieser Methode die geeignete Auswahl der Parameter β sodass die Varianz V der Summe der Fehlerquadrate aus den Trainingsdaten y und den nichtlinearen Funktionen $g(t, \beta_N)$ über alle N Zeitstempel minimiert wird. Die Schätzwerte $\tilde{\beta}^{LS}$ der Parameter in Gl. (5.40) minimieren das quadratische Funktional (Ljung 1999, S.545).

$$V_N(\beta) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N [y(t) - g(t, \beta)]^2 \quad (5.39)$$

$$\tilde{\beta}^{LS} = \arg \min V_N(\beta) \quad (5.40)$$

Dem Algorithmus werden als Eingangsdaten die rekonstruierten Stromdaten und als Ausgangsdaten die ungefilterten gemessenen Spannungsdaten übergeben. Des Weiteren erhält der Algorithmus den Zähler- und Nennergrad der gewünschten Modellhypothese der Gesamtimpedanz Z ohne Stromregler. Die gewählten Startwerte der Parameterschätzung werden auf null gesetzt. Der Algorithmus wählt automatisch eines von vier Verfahren zur Initialisierung der Übertragungsfunktionen, indem er die anfänglichen Vorhersagefehler miteinander vergleicht. Aufgrund der Abtastfrequenz der Messung von 1 kHz liegt der gewichtete Frequenzbereich, also der sogenannte Durchlassbereich (engl. *passband*), der Parameterschätzung zwischen 0 und 500 Hz.

Gütekriterien

Als Gütekriterium für den Vergleich der Zeitverläufe aus Messung und Modell kommt die normalisierte Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (engl. *normalized root mean square error*, NRMSE) in Gl. (5.41) zum Einsatz, da sie für den Nutzer eine direkt interpretierbare Kenngröße darstellt. Die NRMSE bewertet die Simulationsdaten des Modells x_{Modell} in Verbindung mit den Messdaten $x_{Messung}$. Die beste Parameterschätzung mit der kleinsten NRMSE bzw. der größten Anpassungsgüte (engl. *goodness of fit*) A in Gl. (5.42) liefert schließlich die Parameter des Ersatzmodells für den Reglerentwurf.

$$NRMSE = 100 \% \cdot \frac{\|x_{Messung} - x_{Modell}\|}{\|x_{Messung} - \bar{x}_{Messung}\|} \quad (5.41)$$

$$A = 100 \% - NRMSE \quad (5.42)$$

Dabei ist darauf zu achten, dass nicht die Trainingsdaten zur Validierung eingesetzt werden, sondern andere Zeitabschnitte der Messung. Dies vermeidet eine Überanpassung (engl. *overfitting*) an einen bestimmten Signalausschnitt (Russell & Norvig 2021, S.673). Normalerweise ist eine iterative Anpassung der Eingangsdaten, Modellstruktur oder Startwerte der Parameterschätzung notwendig bis schließlich ein akkurates Modell resultiert. Abbildung 5.25 zeigt einen beispielhaften Verlauf der Anpassungsgüte A über den Anregungsfenstern aus Abschnitt 5.4.1.



Abbildung 5.25: Beispielhafte Anpassungsgüte über dem jeweiligen Anregungsfenster.

Die horizontalen Bereiche weisen auf eine Überlagerung der Anpassungsfenster in einem Zeitabschnitt hin. Die Parameter werden über eine Schleife automatisch über eine Vielzahl von Anregungsfenstern geschätzt. Darauf folgt der Vergleich der Parameterschätzwerte \tilde{X} mit den echten Parametern X des Verbunds aus Gleichrichter und Antriebslasten. Dazu wird deren relative Abweichung x_r in Prozent angegeben (Gl. (5.43)).

$$x_r = \frac{\tilde{X} - X}{X} \cdot 100 \% \quad (5.43)$$

Zuletzt werden die Parameterschätzwerte \tilde{X} in der beispielhaften Tabelle 5.3 mit den echten Parameterwerten X verglichen und mithilfe der relativen Abweichung x_r evaluiert. Der erste Lösungsweg verläuft über den Schätzwert der maximalen Anpassungsgüte \tilde{X}_{am} und der zweite über den Median aller Schätzwerte \tilde{X}_{med} sowie deren relative Abweichungen x_{ram} und x_{rmed} . Da die echten Parameter in der Regel unbekannt sind und anforderungsseitig kein Zugriff auf die Steuerung der Maschine möglich ist, erfolgt dieser Schritt rein zur Validierung des Lösungsansatzes.

Tabelle 5.3: Beispielhafte relative Abweichungen $x_{ram/rmed}$ der Parameterschätzwerte \tilde{X} von den echten Parameterwerten X für die größte Anpassungsgüte.

Parameter	X	\tilde{X}_{am}	x_{ram}	\tilde{X}_{med}	x_{rmed}
Zwischenkreiskapazität C	... mF	... mF	... %	... mF	... %
Zwischenkreiskapazität C_g	... mF	... mF	... %	... mF	... %
Zwischenkreiskapazität C_l	... mF	... mF	... %	... mF	... %
Proportionalanteil K_{pvg}	... A/V	... A/V	... %	... A/V	... %
Integralanteil K_{ivg}	... A/(Vs)	... A/(Vs)	... %	... A/(Vs)	... %
Nachstellzeit T_{ng}	... s	... s	... %	... s	... %

Des Weiteren werden die Simulationsdaten auf Basis der besten Parameterschätzwerte und mit den gemessenen Testmessdaten verglichen (s. Abbildung 5.26).

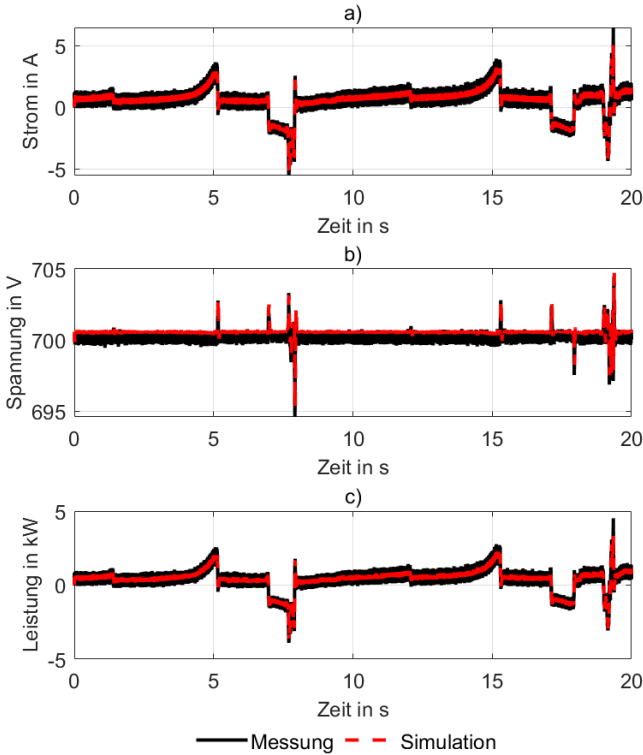


Abbildung 5.26: Beispielhafte Testdaten zur Validierung der Parameterschätzung mittels Vergleichs von Mess- und Simulationsdaten a) des Laststroms i_{ng} , b) der Zwischenkreisspannung v_g und c) der Verbraucherleistung P_{ng} .

Die relative Abweichung w_r und die absolute Abweichung W_{abs} der aufgewendeten elektrischen Energie in Gl. (5.44)-(5.45) dienen zusätzlich als Gütekriterien, da die NRMSE für längere Zeitausschnitte unter dem Einfluss von Rauschen an Aussagekraft verliert. Die Abtastfrequenz der Messung f_a ist in diesem Fall gleich der Simulationsabtastfrequenz f_{sim} .

$$w_r = 100 \% \cdot \left(\frac{\frac{1}{f_{sim}} \cdot \sum_{t=0}^{t_{sim}} P_{ng,sim}(t)}{\frac{1}{f_a} \cdot \sum_{t=0}^{t_{sim}} P_{ng,mess}(t)} - 1 \right) \quad (5.44)$$

$$W_{abs} = \frac{1}{f_{sim}} \cdot \sum_{t=0}^{t_{sim}} P_{ng,sim}(t) - \frac{1}{f_a} \cdot \sum_{t=0}^{t_{sim}} P_{ng,mess}(t) \quad (5.45)$$

Parametervariation

Der Algorithmus benötigt im Normalfall bei der Breite des Anregungsfensters mindestens 100 Stützpunkte zur Parameterschätzung, um relevante Zeitabschnitte mit Schwingungen der Zwischenkreisspannung abzudecken. Beginnend mit einem Zeitpuffer von ± 50 ms um die Anregungsfenster, d. h. mindestens 100 Stützpunkte bei einer Abtastfrequenz von 1 kHz, werden die Parameter geschätzt. Der Einfluss größerer Anregungsfenster wird ebenfalls untersucht.

5.5 Reglerentwurf

Der Reglerentwurf in Abbildung 5.27 setzt sich aus den beiden Unterfunktionen zur impedanzbasierten Stabilitätsprüfung und Trajektorienvorgabe zusammen.

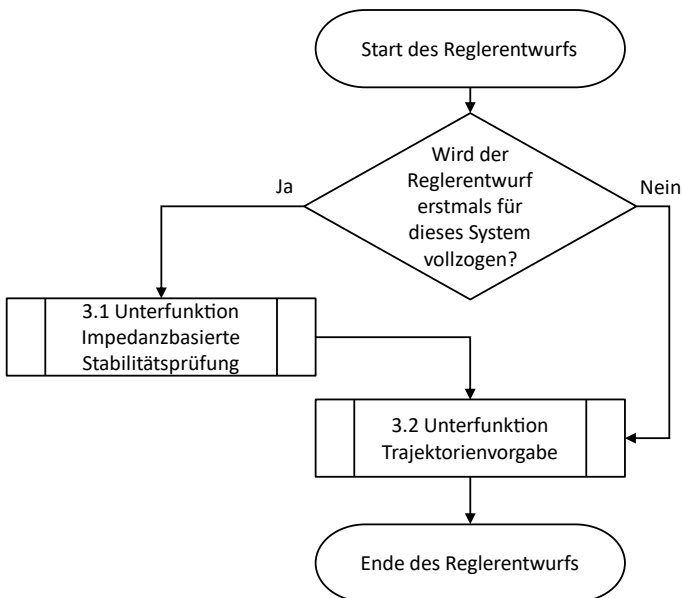


Abbildung 5.27: Drittes Funktionsmodul „Reglerentwurf“ (FM3).

Wenn das System erstmals auf seine Stabilität hin geprüft werden soll, berechnet der Algorithmus, ob bei der Vorgabe der Trajektorie bestimmte Einschränkungen des Speicherbetriebs in Abhängigkeit der Verbraucherlast notwendig sind. Fehlt nur eine Trajektorie für ein neues Lastprofil, kann die Stabilitätsprüfung übergangen werden.

Der Speicherhersteller wählt bereits vor der virtuellen Inbetriebnahme die Reglerparameter auf dem Umrichter des Schwungmassenspeichersystems. Die Drehzahlregelung stellt sicher, dass der Schwungmassenspeicher innerhalb seiner Drehzahlgrenzen bleibt und keine unerlaubten Schwingungen auftreten. Der Speicherhersteller wählt den erlaubten Maximalwert des Drehmoments an der Welle in Absprache mit dem Hersteller der E-Maschine. Der Speicherhersteller vermisst außerdem den elektromechanischen Wirkungsgrad und die Eigenreibung des Schwungmassenspeichersystems über das Drehzahlband sowie den elektrischen Wirkungsgrad des Umrichters bei Teil- und Vollast.

5.5.1 Impedanzbasierte Stabilitätsprüfung

Die folgenden Abschnitte erläutern den Algorithmus, die Parametervariationen und die Gütekriterien der impedanzbasierte Stabilitätsprüfung in Abbildung 5.28. Die Stabilitätsprüfung auf der Basis von Impedanzen benötigt die Modelle des Frequenzumrichters und des Schwungmassenspeichersystems sowie die gemessenen Lastprofile.

Algorithmus

Das bestehende System aus Gleichrichter und Antriebslasten ist eindeutig stabil, da es vor der Nachrüstung des Speichersystems mindestens eine vollständige Inbetriebnahme durchlaufen hat und bereits Teil der Produktion ist. Ohne Speichersystem bestimmt der Gleichrichter die Erzeugerimpedanz und die Antriebslasten bilden im motorischen Betrieb die Verbraucherimpedanz. Durch die Hinzunahme des Schwungmassenspeichersystems verändern sich die Impedanzen auf der Erzeuger- und der Lastseite.

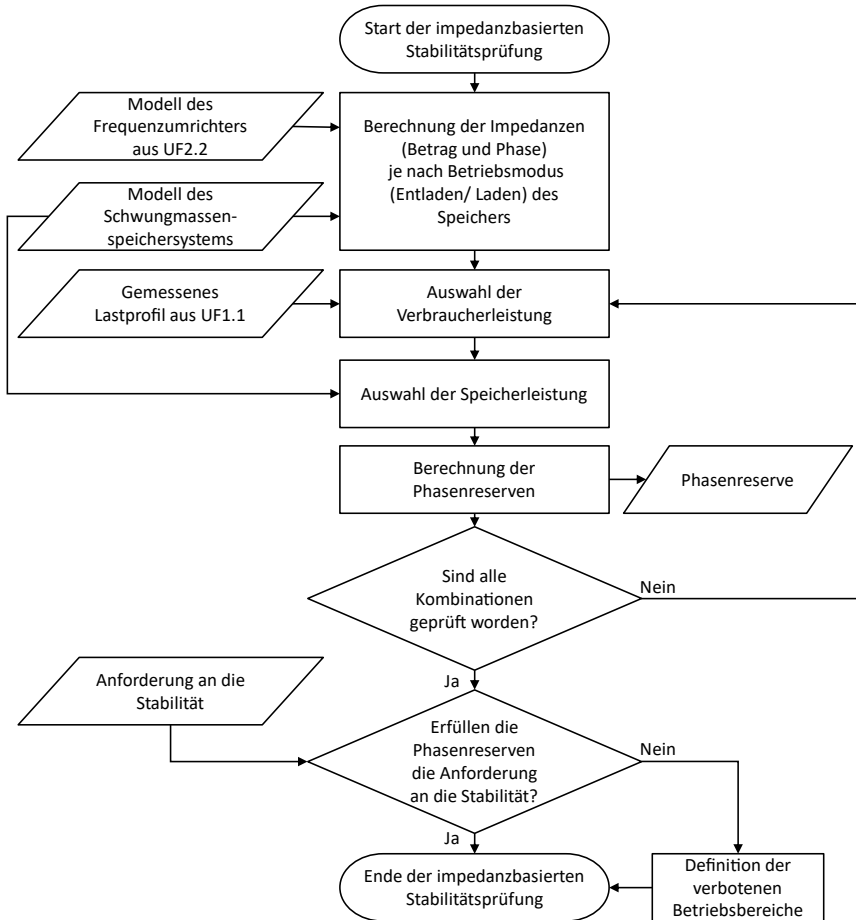


Abbildung 5.28: Unterfunktion „Impedanzbasierte Stabilitätsprüfung“ (UF3.1).

Je nach Betriebszustand, also Laden oder Entladen des Speichers, muss die Impedanz Z_s des Speichersystems entweder der Erzeugerimpedanz $Z_{e1,2}$ oder jener der Verbraucherimpedanz $Z_{v1,2}$ zugeordnet werden, was Abbildung 5.29 zeigt.

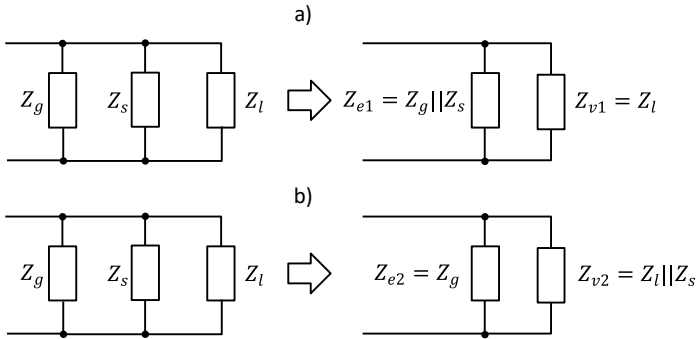


Abbildung 5.29: Ersatzschaltbilder für die Parallelschaltung der Erzeuger- und Verbraucherimpedanz bei dem a) Entladen des Speichers und b) Laden des Speichers.

Entladen des Speichers

Die Erzeugerimpedanz Z_{e1} beim Entladen des Speichers setzt sich in Gl. (5.46) aus der Gleichrichterimpedanz Z_g und der Speicherimpedanz Z_s zusammen. In Gl. (5.47) ist die Impedanz der Antriebslasten Z_l gleich der Verbraucherimpedanz Z_{v1} .

$$\frac{1}{Z_{e1}(s)} = \frac{1}{Z_g(s)} + \frac{1}{Z_s(s)} \quad (5.46)$$

$$Z_{v1}(s) = Z_l(s) \quad (5.47)$$

Die Impedanzen der einzelnen Netzteilnehmer leitet Abschnitt 5.4.2 her. Da die Stromregler die Stabilität beeinflussen, sind sie in Form von PT1-Gliedern ein Bestandteil der Übertragungsfunktionen. Es gilt daher $Z_g = Z_{gm}$. Die Beträge und Phasen der einzelnen und parallelgeschalteten Impedanzen stammen aus der Umwandlung der Übertragungsfunktionen in komplexe Zahlen. Die Parallelschaltung der Gleichrichterimpedanz Z_g mit der Speicherimpedanz Z_s führt zu einem etwas niedrigeren Betrag der Erzeugerimpedanz Z_{e1} im Vergleich zur reinen Gleichrichterimpedanz Z_g in Abbildung 5.30.

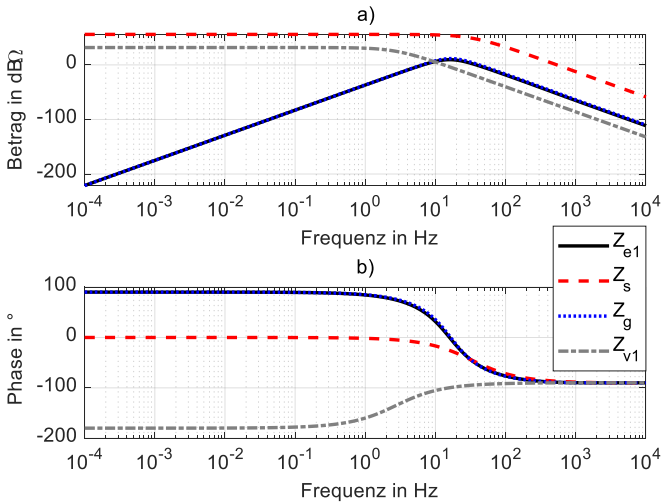


Abbildung 5.30: Einfluss der Parallelschaltung der Speicherimpedanz Z_s mit der Gleichrichterimpedanz Z_g auf a) den Betrag und b) die Phase der Erzeugerimpedanz Z_{e1} beim Entladen des Speichers ($P_s < 0$).

Je nach Verbraucher- und Speicherleistung verdeutlicht Abbildung 5.31 die Phasenreserve als Ebene im dreidimensionalen Raum für das Entladen des Speichers. Die Ist-Phasenreserve resultiert aus zahlreichen statischen Betrachtungen der Kleinsignalstabilität mittels GMPM-Kriteriums über die Wertebereiche der Verbraucher- und Speicherleistung hinweg. In Abbildung 5.31 kommt es zu keiner Überschneidung der Ist-Phasenreserve PM mit der Sollphasenreserve PM^* von beispielhaften 30° . Das System weist in einigen Arbeitspunkten deutliche Phasenreserven von über 80° auf.

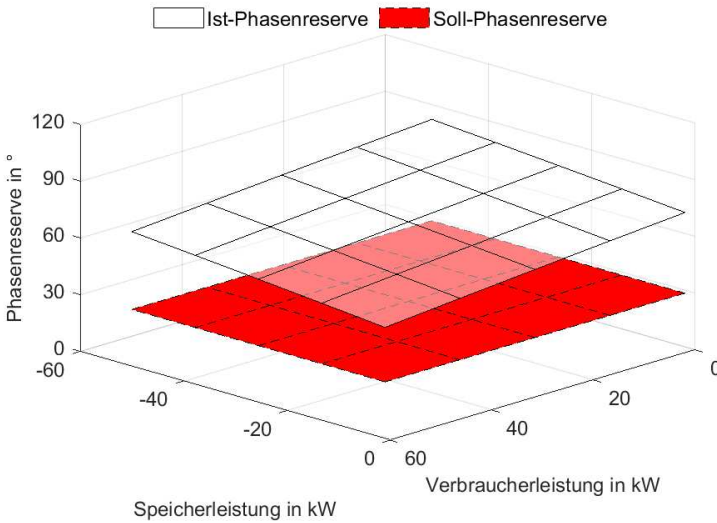


Abbildung 5.31: Ist-Phasenreserve PM und Soll-Phasenreserve PM^* als Stabilitätsebenen in Abhängigkeit der Verbraucherleistung P_l und der Speicherleistung P_s für den Fall der Entladung des Speichers.

Laden des Speichers

Die Erzeugerimpedanz Z_{e2} bei dem Laden des Speichers in Gl. (5.48) ist gleich der Gleichrichterimpedanz Z_g und versorgt allein die Verbraucher inklusive Speicher. Falls der Speicher während des Motorbetriebs der Antriebslasten lädt, erhöht er die Last für den Gleichrichter. Dadurch verändert sich die Verbraucherimpedanz Z_{v2} in Gl. (5.49).

$$Z_{e2}(s) = Z_g(s) \quad (5.48)$$

$$\frac{1}{Z_{v2}(s)} = \frac{1}{Z_l(s)} + \frac{1}{Z_s(s)} \quad (5.49)$$

Abbildung 5.32 stellt den Einfluss der Speicherimpedanz Z_s auf die Verbraucherimpedanz Z_{v2} dar. Der Betrag und die Phase von Z_{v2} sinken im Vergleich zur reinen Lastimpedanz Z_l .

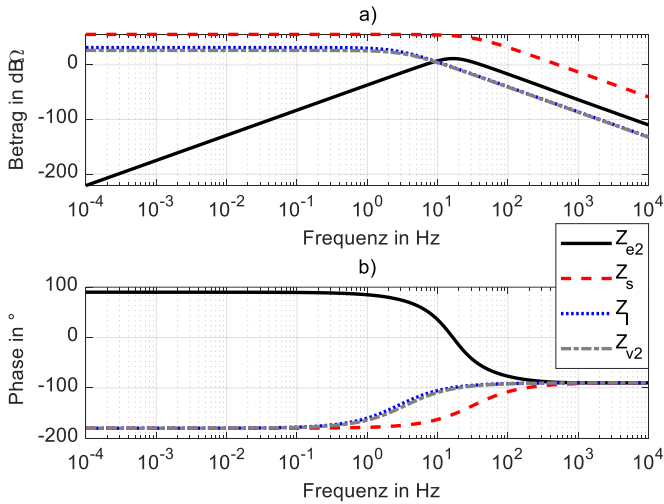


Abbildung 5.32: Einfluss der Parallelschaltung der Speicherimpedanz Z_s mit der Lastimpedanz Z_l auf a) den Betrag und b) die Phase der Verbraucherimpedanz Z_{v2} beim Laden des Speichers ($P_s > 0$).

Abbildung 5.33 zeigt ein System, bei dem die Verbraucherleistung P_l der Antriebslasten und die Ladeleistung P_s des Speichers so groß sind, dass die Impedanzen die geforderten 30° Phasenreserve nicht mehr in allen Arbeitspunkten einhalten. An diesen Stellen unterschreitet die Ist-Phasenreserve die Soll-Phasenreserve und die Stabilitätsebenen schneiden sich. Bei noch größeren Antriebslasten kann die Phasenreserve auch den instabilen Fall unterhalb von 0° erreichen.

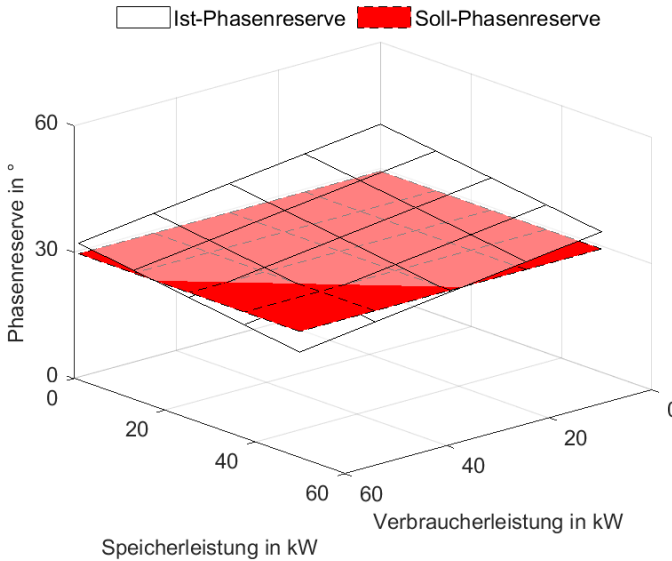


Abbildung 5.33: Überschneidung der Stabilitätsebenen von Ist-Phasenreserve PM und Soll-Phasenreserve PM^* bei hohen Ladeleistungen P_s des Speichers und einer hohen Verbraucherleistung P_L .

Gütekriterien

Wie bereits in Abschnitt 2.3.2 erläutert, kann die Stabilität mittels Impedanzkriterien beurteilt werden. Es sind drei Stabilitätsfälle hinsichtlich der Phasenreserve zu unterscheiden:

- Ausreichende Phasenreserve laut Vorgabe $PM > PM^*$ bzw. eindeutig stabil
- Kritische Phasenreserve $0^\circ \leq PM < PM^*$ bzw. grenzstabil
- Negative Phasenreserve $PM < 0^\circ$ bzw. eindeutig instabil

Die Phasenreserve PM hängt von der maximalen Differenz der Erzeugerphase ϕ_e und Verbraucherphase ϕ_v ab. Der Algorithmus des Funktionsmoduls berechnet den Schnittpunktbetrag sowie die Schnittpunktfrequenz der Erzeuger- und Verbraucherimpedanz und gibt außerdem mit Gl. (5.50) die Phasenreserve PM für das Frequenzband oberhalb der Schnittpunktfrequenz an.

$$PM = 180^\circ - \max(|\phi_e - \phi_v|) \quad (5.50)$$

Aus der impedanzbasierten Stabilitätsbetrachtung resultieren die Einschränkungen für den Speicherbetrieb. In Abhängigkeit der Leistung P_l der Antriebslasten muss die Leistung P_s des Speichers im Falle einer möglichen Instabilität oder fehlenden Stabilitätsreserve begrenzt werden. Als untere Grenze der minimalen Phasenreserve nutzt die vorliegende Arbeit 30° , was die Hälfte der in der Literatur genannten Soll-Phasenreserven aus Abschnitt 2.3.2 darstellt. Je nach Kombination können auch Fälle ohne Schnittpunkte der Impedanzbeträge auftreten, die per se stabil sind und keiner weiteren Untersuchung bedürfen. Liegt die minimale Phasenreserve in den Extremfällen der Leistungen immer oberhalb von 30° , sind keine stabilitätskritischen Einschränkungen für die Trajektorienvorgabe der Speicherleistung in Abschnitt 5.5.2 abzuleiten.

Parametervariation

Die impedanzbasierte Stabilitätsprüfung über alle möglichen Betriebspunkte hinweg liefert die Leistungseinschränkungen für den Entwurf der Speichertrajektorien in Abhängigkeit der Verbraucherleistung und der Stromrichtung des Speichers. Als weitere Einschränkungen kommen die inhärenten Eigenschaften des Gleichrichters hinzu, z. B. sein erlaubter Dauerstrom. Verschiedene Kombinationen der Verbraucherleistung P_l und der Speicherleistung P_s führen zu den beispielhaften Ergebnissen für die Phasenreserve PM sowie die Frequenzen f_x und Beträge $|Z_x|_{dB}$ bzw. $|Z_x|$ der Schnittpunkte von Verbraucher- und Erzeugerimpedanz (vgl. Bode-Diagramme) in Tabelle 5.4. Die zu untersuchenden Extremfälle hinsichtlich der Stabilität sind die maximal erlaubte Verbraucherleistung $P_{l,maxC}$ in Abhängigkeit der erlaubten Lastkapazität C_l sowie der erlaubten Dauerleistung $P_{g,max}$ laut Datenblatt des Gleichrichters. Der Wertebereich des Speichers reicht von der maximalen Entladeleistung $-P_{s,max}$ bis zu der maximalen Ladeleistung $P_{s,max}$.

Tabelle 5.4: Zusammenfassung der impedanzbasierten Stabilitätsprüfung mit Schnittpunktfrequenz f_x , Schnittpunktbetrag $|Z_x|_{dB}$ bzw. $|Z_x|$ und Phasenreserve PM für Kombinationen der Verbraucherleistung P_l und der Speicherleistung P_s .

P_l	P_s	f_x$	|Z_x|_{dB}$	$|Z_x|$	PM
$P_{l,maxC}$	$-P_{s,max}$	... Hz	... dBΩ	... Ω	...°
...	...	... Hz	... dBΩ	... Ω	...°
$P_{l,maxC}$	$P_{s,max}$	... Hz	... dBΩ	... Ω	...°
$P_{g,max}$	$-P_{s,max}$	... Hz	... dBΩ	... Ω	...°
...	...	... Hz	... dBΩ	... Ω	...°
$P_{g,max}$	$P_{s,max}$	... Hz	... dBΩ	... Ω	...°

Der nächste Abschnitt erläutert die Trajektorienvorgabe.

5.5.2 Trajektorienvorgabe

Die begrenzte Speicherkapazität und Dynamik des Schwungmassenspeichers erfordert eine Vorsteuerung der Austauschleistung. Abbildung 5.34 beschreibt das Vorgehen bei der Trajektorienvorgabe. Hierzu wird zunächst das gemessene Lastprofil der Produktionsmaschine analysiert. Nach der Bestimmung des Kappungsniveaus und der Auswahl des mittelfristigen Zielladezustands erfolgt die Bestimmung der Rückführungsleistung in Abhängigkeit der nähergelegenen Ladezustandsgrenze. Die verfügbare Speicherleistung richtet sich dabei stets nach dem aktuellen Ladezustand, sodass dem Speicher keine nicht erreichbaren Vorgaben gemacht werden können. Der Reglerentwurf gibt die Trajektorie der Solldrehzahl n^* bzw. des Sollladezustands SOC^* und der Sollleistung P_s^* unter Beachtung der Drehmomentbegrenzung vor. Aus dem Reglerentwurf resultiert der Verlauf des Ladezustands über eine Schleife, und zwar noch ohne Simulation. Falls das Lastprofil im ersten Funktionsmodul erkannt worden ist und bereits eine Trajektorie aus vergangenen Durchläufen vorhanden ist, kann die Auslegung der Trajektorien übersprungen werden.

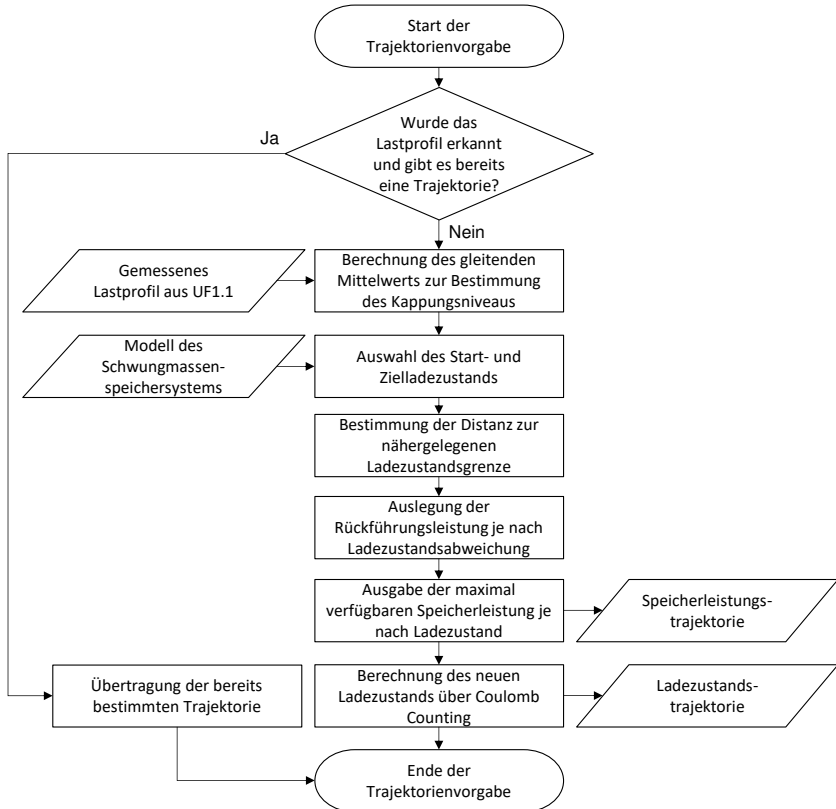


Abbildung 5.34: Unterfunktion „Trajektorienvorgabe“ (UF3.2).

Algorithmus

Das Verbraucherlastprofil sowie mehrere technische Eigenschaften des Speichersystems (vgl. Abbildung 5.35) und des Gleichrichters beeinflussen die Berechnung der Sollwerttrajektorien. Zu den relevanten, technischen Eigenschaften gehören die Speicherkapazität W_s , das erlaubte Drehzahlband, die maximale Dynamik in Form des Trägheitsmoments J und der eingestellten Rampenzeit t_r , die maximal verfügbare Speicherleistung $P_{s,max}$ in Abhängigkeit des Ladezustands SOC sowie der langfristige Start- und Zielladezustand SOC_0 .

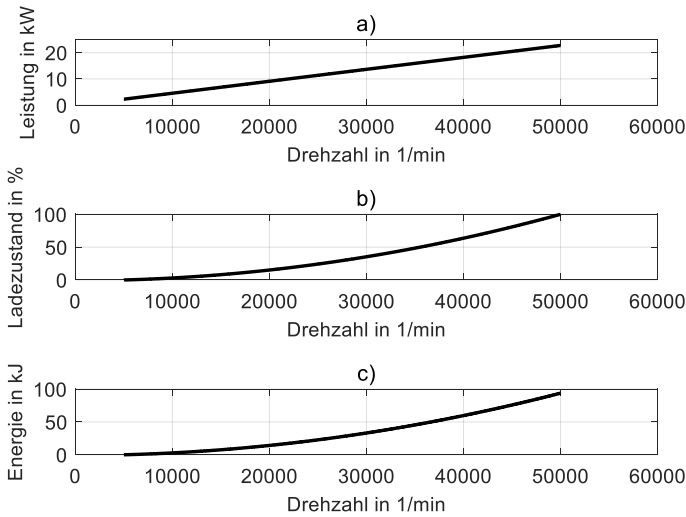


Abbildung 5.35: a) Verfügbare Leistung, b) Ladezustand und c) Rotationsenergie des Schwungmassenspeichers in Abhängigkeit der Drehzahl.

Der Algorithmus zur Trajektorienvorgabe vernachlässigt die Vorausschau, welche erst bei der Simulation der Speicherregelung zum Tragen kommt. Zunächst glättet der Algorithmus das skalierte Lastprofil (vgl. Abbildung 5.36), um die Spitzen zu dämpfen. Das Ziel der Glättung besteht darin, den Gleichrichter die statische Grundlast decken zu lassen und den Speicher mit der Spitzenlastdeckung zu beauftragen. Der gleitende Mittelwert des skalierten Lastprofils über eine vorgegebene Anzahl an Messpunkten bzw. die Glättungszeit t_g definiert das Kappungsniveau P_{kapp} in Gl. (5.51).

$$P_{kapp}(t) = \frac{1}{f_a \cdot t_g} \cdot \sum_{i=0}^{f_a \cdot t_g - 1} P_i(t - i) \quad (5.51)$$

Der Speicher soll nun im Idealfall alle Leistungen oberhalb und unterhalb des Kappungsniveaus durch Entladen und Laden ausgleichen. Das skalierte Lastprofil und der gleitende Mittelwert bzw. das Kappungsniveau weisen dieselben Energiemengen auf.

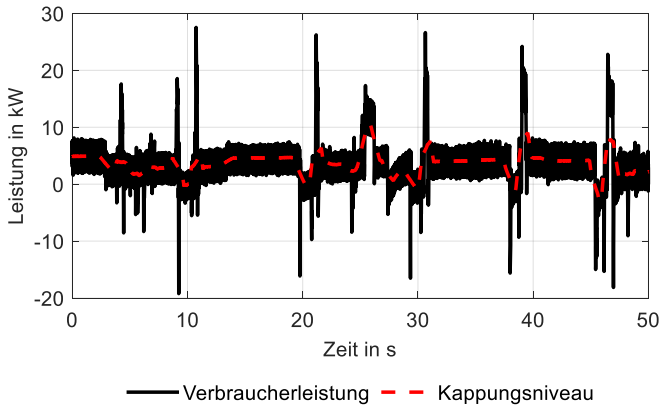


Abbildung 5.36: Beispielhafter gleitender Mittelwert des skalierten Lastprofils bzw. Kappungsniveau über jeweils eine Sekunde bzw. 1.000 Messpunkte.

Die Randbedingungen der Trajektorienvorgabe werden in Gl. (5.52) und (5.53) definiert.

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (5.52)$$

$$-P_{s,max} \leq P_s \leq P_{s,max} \quad (5.53)$$

Die Ladezustandsabweichung ΔSOC in Gl. (5.54) beschreibt die Differenz aus dem Ladezustand SOC und dem Startladezustand SOC_0 . Gleichung (5.55) wählt als Ladezustandsabweichung ΔSOC_{minmax} die Distanz zwischen dem Startladezustand SOC_0 und der nähergelegenen Betriebsgrenze, d. h. dem maximalen oder minimalen Ladezustand SOC_{max} und SOC_{min} . Dadurch vermeidet der Algorithmus das Erreichen der Betriebsgrenzen, um dem Speicher stets Flexibilität einzuräumen.

$$\Delta SOC(t) = SOC(t) - SOC_0 \quad (5.54)$$

$$\Delta SOC_{minmax} = \min \begin{cases} SOC_{max} - SOC_0 \\ SOC_0 - SOC_{min} \end{cases} \quad (5.55)$$

Die maximal verfügbare Leistung $P_{s,max}$ des Speichers hängt von seinem Ladezustand SOC , den Drehzahlgrenzen n_{min} und n_{max} sowie dem maximalen Drehmoment $M_{i,max}$ in Gl. (5.56) ab.

$$P_{s,max}(SOC) = M_{i,max} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60 \frac{s}{min}} \cdot \sqrt{SOC \cdot (n_{max}^2 - n_{min}^2) + n_{min}^2} \quad (5.56)$$

In Gl. (5.57) dient ΔSOC_{minmax} in Verbindung mit dem Energieinhalt W_s des Speichers und dessen maximal verfügbarer Leistung $P_{s,max}$ zur Berechnung der Rückführungszeit t_{soc} des Ladezustands. In Anlehnung an die Vorgehensweise in (Laribi et al. 2020b, S.189) ergibt mit der energetischen Abweichung $\Delta SOC \cdot W_s$ die Rückführungsleistung ΔP zu jedem Zeitpunkt t in Gl. (5.58). Die Sollwerttrajektorie P_s^* in Gl. (5.59) setzt sich aus der Rückführungsleistung ΔP und der Differenz aus dem Lastprofil P_l und dem Kappungsniveau P_{kapp} zusammen.

$$t_{soc} = \frac{\Delta SOC_{minmax} \cdot W_s}{P_{s,max}} \quad (5.57)$$

$$\Delta P(t) = \frac{\Delta SOC(t) \cdot W_s}{t_{soc}} \quad (5.58)$$

$$P_s^*(t) = P_{kapp}(t) - P_l(t) - \Delta P(t) \quad (5.59)$$

Aus P_s^* , SOC_0 , W_s und der diskreten Zeitdifferenz Δt zwischen zwei Abtastzeitpunkten ergibt sich über eine Schleife die Sollwerttrajektorie SOC^* des Ladezustands in Gl. (5.60) für die Simulation mittels *Coulomb Counting*.

$$SOC^*(t+1) = SOC(t) + \frac{P_s^*(t) \cdot \Delta t}{W_s} \quad (5.60)$$

Abbildung 5.37 visualisiert beispielhafte Verläufe der Sollwerttrajektorien der Speicherleistung und des Ladezustands. Positive Leistungen bewirken das Aufladen des Speichers, während negative Leistungen eine Entladung verursachen.

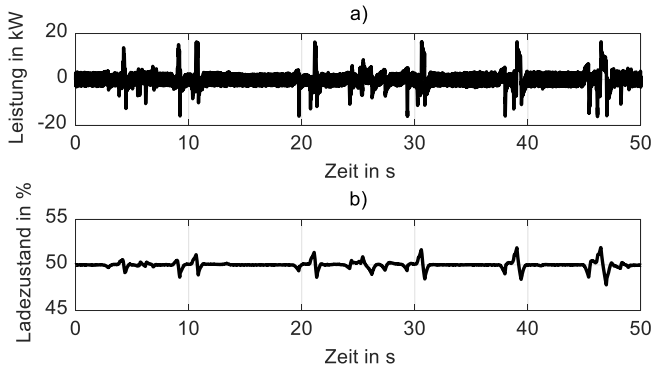


Abbildung 5.37: Beispielhafte Sollwerttrajektorien a) der Speicherleistung und b) des Speicherladezustands für einen Zielladezustand von 50 %.

Gütekriterien

Bevor die statisch optimierten Sollwerttrajektorien in dynamischen Simulationen validiert werden, durchlaufen sie eine Auswertung mithilfe der folgenden Gütekriterien.

Die Gesamtenergie $W_{ges,o}$ ohne Speicher in Gl. (5.61) setzt sich aus der Änderung der Ladungsenergie $\Delta W_{zk,o}$ der Zwischenkreiskondensatoren und der Energie des Gleichrichters $W_{g,o}$ zusammen. Sobald das Speichersystem mit seiner Zwischenkreiskapazität C_s hinzukommt, ergibt sich die Gesamtenergie $W_{ges,m}$ aus der Gleichrichterenergie $W_{g,m}$, der Änderung der Zwischenkreisladung $\Delta W_{zk,m}$ und der Änderung der Rotationsenergie ΔW_{rot} des Schwungmassenspeichers vor und nach dem Speichereinsatz (Gl. (5.62)). Die Energiedifferenz deren beiden Größen mit und ohne Speicher ist ΔW_{ges} (Gl. (5.63)).

$$W_{ges,o} = |W_{g,o}| + |\Delta W_{zk,o}| = \Delta t \sum_{t_0}^{t_e} |P_{dcg,o}(t)| + \left| \frac{1}{2} (C_g + C_l) \Delta v^2 \right| \quad (5.61)$$

$$W_{ges,m} = |W_{g,m}| + |\Delta W_{zk,m}| + |\Delta W_{rot}| \\ = \Delta t \sum_{t_0}^{t_e} |P_{dcg,m}(t)| + \left| \frac{1}{2} (C_g + C_l + C_s) \Delta v^2 \right| + \left| \frac{1}{2} J \Delta \omega_m^2 \right| \quad (5.62)$$

$$\Delta W_{ges} = W_{ges,o} - W_{ges,m} \quad (5.63)$$

Die Beschleunigungsenergie $W_{a,o}$ des Gleichrichters ohne Speicher leitet sich aus Gl. (5.64) ab. Gleichung (5.65) beschreibt die theoretisch rekuperierbare Bremsenergie $W_{b,o}$ der Produktionsmaschine ohne Speicher. Die Bremsenergie $W_{b,m}$ bei dem Speichereinsatz resultiert in Gl. (5.66). Dabei muss im zweiten Fallbeispiel die Verlustleistung P_b im Bremswiderstand miteinbezogen werden.

$$W_{a,o} = \Delta t \sum_{t_0}^{t_e} P_{dcg,o}(t) \text{ f\u00fcr } P_{dcg,o}(t) < 0 \quad (5.64)$$

$$W_{b,o} = \Delta t \sum_{t_0}^{t_e} P_{dcg,o}(t) + P_b(t) \text{ f\u00fcr } P_{dcg,o}(t) > 0 \quad (5.65)$$

$$W_{b,m} = \Delta t \sum_{t_0}^{t_e} P_{dcg,m}(t) + P_b(t) \text{ f\u00fcr } P_{dcg,m}(t) > 0 \quad (5.66)$$

Die Energiebilanz der Beschleunigungs- und Bremsenergien sowie die \u00c4nderungen der Zwischenkreisenergie und Rotationsenergie ist beispielhaft in Abbildung 5.38 aufgetragen. Die \u00c4nderungen der mechanischen und elektrischen Energiespeicher sind klein gegen\u00fcber den Beschleunigungs- und Bremsenergien, da die Regelung daf\u00fcr sorgt, dass die Istwerte der Spannung und Drehzahl immer wieder zu ihrem Sollwert zur\u00fcckgef\u00fchrt werden.

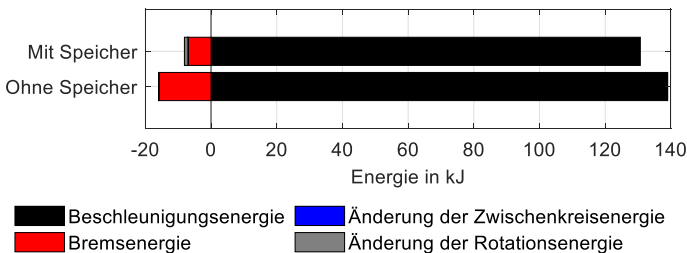


Abbildung 5.38: Beispielhafte Energiebilanz der Speicherregelung ohne Reibmoment.

Gl. (5.67) beschreibt den prozentualen Anteil w_o der theoretisch verfügbaren Bremsenergie $W_{b,o}$ an der Beschleunigungsenergie $W_{a,o}$, während Gl. (5.68) die ungenutzte Bremsenergie w_m aufführt.

$$w_o = \frac{W_{b,o}}{W_{a,o}} \cdot 100 \% \quad (5.67)$$

$$w_m = \frac{W_{b,m}}{W_{a,o}} \cdot 100 \% \quad (5.68)$$

Die relative Bremsenergiereduktion w_e durch den Speichereinsatz ist die Differenz aus w_o und w_m in Gl. (5.69).

$$w_e = w_o - w_m \quad (5.69)$$

Das Verhältnis der maximalen Lastspitze $P_{dcg,m,max}$ nach und der Lastspitze $P_{dcg,o,max}$ vor dem Speichereinsatz liefert zudem in Gl. (5.70) die relative Lastspitzenreduktion p_r . Im Fall einer unzureichenden Trajektorie, bei welcher der Speicher einen Ladevorgang zum falschen Zeitpunkt durchführt, kann $P_{dcg,m,max}$ auch größer als $P_{dcg,o,max}$ sein.

$$p_r = \left(1 - \frac{|P_{dcg,m,max}|}{|P_{dcg,o,max}|} \right) \cdot 100 \% \quad (5.70)$$

Parametervariation

Die Glättungszeit t_g des gleitenden Mittelwerts bestimmt maßgeblich das Kappungsniveau. Um den Einfluss der Glättungszeit über einen größeren Wertebereich evaluieren zu können, wird dieser Parameter über vier Dekadenschritte zwischen 10^{-1} und 10^2 Sekunden variiert.

Der Startwert des Ladezustands SOC_0 darf weder zu hoch noch zu niedrig gewählt werden, damit der Speicher in beide Stromrichtungen mit dem Zwischenkreis interagieren kann. Erreicht der Speicher während der Optimierung seine obere bzw. unterere Ladezustandsgrenze, drosselt er seine Aufnahme- bzw. Abgabeleistung auf null. Der Startwert des Ladezustands wird von 10 % bis 90 % in Intervallen von 10 % variiert.

Die besten und schlechtesten Parameterkombinationen der Trajektorienvorgabe und der Speicherregelung werden wie in Tabelle 5.5 absteigend nach den energetischen Gütekriterien sortiert. Für die Trajektorienvorgabe entfällt die Spalte mit der Vorausschau t_v .

Tabelle 5.5: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Leistungsreduktion oder Bremsenergiereduktion der Speicherregelung.

Rang	t_g	t_v	SOC_0	p_r oder w_e
1	... s	... ms	... %	... %
2	... s	... ms	... %	... %
...
359	... s	... ms	... %	... %
360	... s	... ms	... %	... %

Zudem folgt im nächsten Abschnitt die Untersuchung der Speicherregelung in Simulationen.

5.6 Speicherregelung

Abbildung 5.39 zeigt die Schleife, welche iterativ der Simulation unterschiedliche Parametersätze der Versuchsplanung ohne und mit Speichereinsatz zuführt. Die energetischen Gütekriterien bewerten die Auswirkungen der Speicherregelung und geben Auskunft über die entstehenden Vor- oder Nachteile. Die Schleife wird so lange durchlaufen, bis alle gewünschten Experimente durchgeführt worden sind.

Algorithmus

Das Systemverhalten des Schwungmassenspeichersystems und des Frequenzumrichters der Produktionsmaschine wird mithilfe von dynamischen Simulationen in *MATLAB/SIMULINK* untersucht. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind für alle drei Teilsysteme die Modelle in *SIMULINK* entworfen worden. Die gegebenen und identifizierten Modellparameter sowie die gemessenen Lastprofile der Produktionsmaschinen sind in zusätzlichen Skripten hinterlegt und werden zu Beginn im Code aufgerufen.

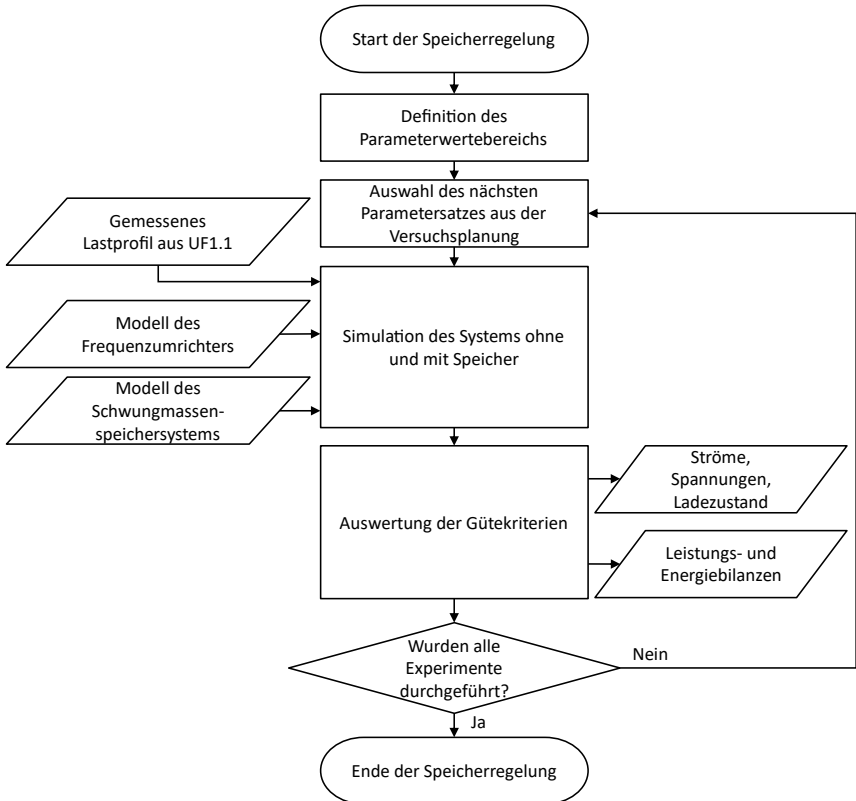


Abbildung 5.39: Viertes Funktionsmodul „Speicherregelung“ (FM4).

Gütekriterien

Für die Auswertung der Simulationen eignen sich die Gütekriterien der Trajektorienvorgabe in Abschnitt 5.5.2. Tabelle 5.6 überträgt die Symbole der Gütekriterien von dem allgemeinen Fall auf die Trajektorienvorgabe und die dynamische Simulation.

Tabelle 5.6: Symbole der Gütekriterien bei der Trajektorienvorgabe und der dynamischen Simulation.

Betrachtungsrahmen	Relative Leistungsreduktion	Relative Bremsenergiereduktion
Allgemein	p_r	w_e
Trajektorienvorgabe	$p_{r,stat}$	$w_{e,stat}$
Dynamische Simulation	$p_{r,sim}$	$w_{e,sim}$

Als weitere Gütekriterien können der Anstieg der mittleren Gleichrichterleistung und das genutzte Zwischenkreisspannungsband ohne und mit Speicher bewertet werden (Abbildung 5.40). Diese Gütekriterien betrachtet die vorliegende Arbeit jedoch nur am Rande.

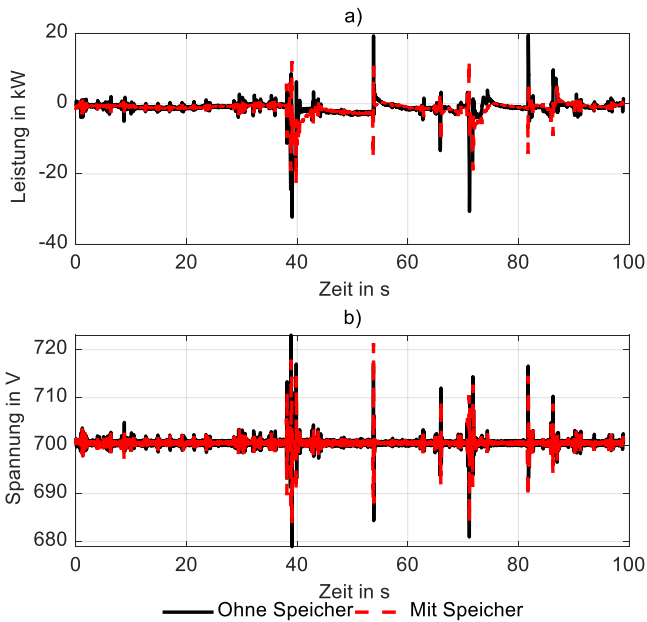


Abbildung 5.40: Beispielhafte a) Gleichrichterleistung und b) Zwischenkreisspannung für eine Glättungszeit von 100 s, eine Vorausschau von 50 ms und einen Zielladezustand von 70 %.

Parametervariation

Die Parametervariation adressiert die Anforderung der Robustheit an die selbststellende Regelung. Zusätzlich zu den Parametervariationen der Glättungszeit und des Zielladezustands

bei der Trajektorienvorgabe prüft die Simulation den Einfluss des Reibmoments und der Vorausschau auf die Gütekriterien der selbsteinstellenden Regelung.

Das Reibmoment gilt als Kerngröße für die Effizienzbetrachtung des Speichereinsatzes. Zu Beginn wird das Reibmoment vernachlässigt und im zweiten Teil der Validierung beeinflusst es das Speichermodell und somit die energetischen Gütekriterien der Simulation.

Die vorausschauende Regelung ist wegen der Trägheit der Schwungmasse elementar. Die zeitliche Verschiebung der Sollwerttrajektorie wird in der vorliegenden Arbeit als Vorausschau t_v bezeichnet. In Anlehnung an die Literaturwerte in Abschnitt 1.2 beträgt die Verzögerung typischer Schwungmassenspeicher zwischen 10 ms und mehreren 100 ms. Der Speicherhersteller muss die Information zur ungefähren Verzögerung des Systems bereitstellen, damit der Algorithmus einen geeigneten Wertebereich simulieren kann. Der Wertebereich der Vorausschau liegt deswegen in dieser Arbeit zwischen 0 und 90 ms.

Die zusätzliche Variation der drei Parameter „Glättungszeit“, „Vorausschau“ und „Zielladezustand“ führt zu dem Versuchsplan in Tabelle 5.7. Insgesamt führen vier Glättungszeiten, zehn Varianten der Vorausschau und neun Zielladezustände zu 360 Experimenten. Dasselbe erfolgt für den Fall mit aktiviertem Reibmoment, sodass insgesamt 720 Experimente auszuwerten sind.

Tabelle 5.7: Versuchsplan mit Nummer des Eintrags in dem jeweiligen Parametervektor.

Experiment	t_g	t_v	SOC_0
1	Nr. 1	Nr. 1	Nr. 1
2	Nr. 2	Nr. 1	Nr. 1
...
359	Nr. 3	Nr. 10	Nr. 9
360	Nr. 4	Nr. 10	Nr. 9

Die Ergebnisse der Experimente lassen sich mehrdimensional darstellen, wie beispielsweise in Abbildung 5.41.

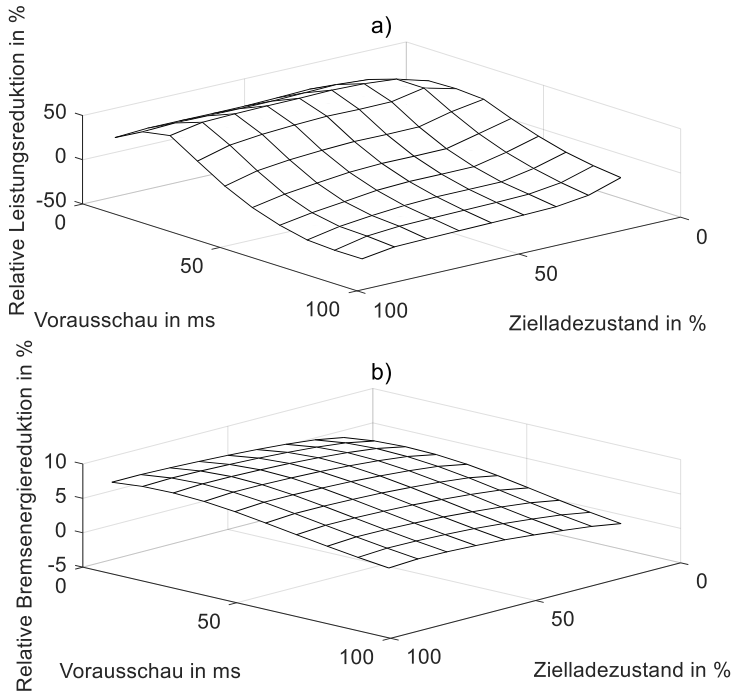


Abbildung 5.41: Beispielhafte Auswertung der Gütekriterien in Abhängigkeit der Vorausschau und des Zielladezustands für eine Glättungszeit von 1 s.

Abbildung 5.42 zeigt beispielhaft die energetischen Gütekriterien in Abhängigkeit des Zielladezustands, was einem zweidimensionalen Schnitt durch Abbildung 5.41 bei einer festen Vorausschau entspricht. In Kapitel 6 werden außerdem die energetischen Gütekriterien über der Vorausschau visualisiert, was hier aus Platzgründen nicht zielführend ist.

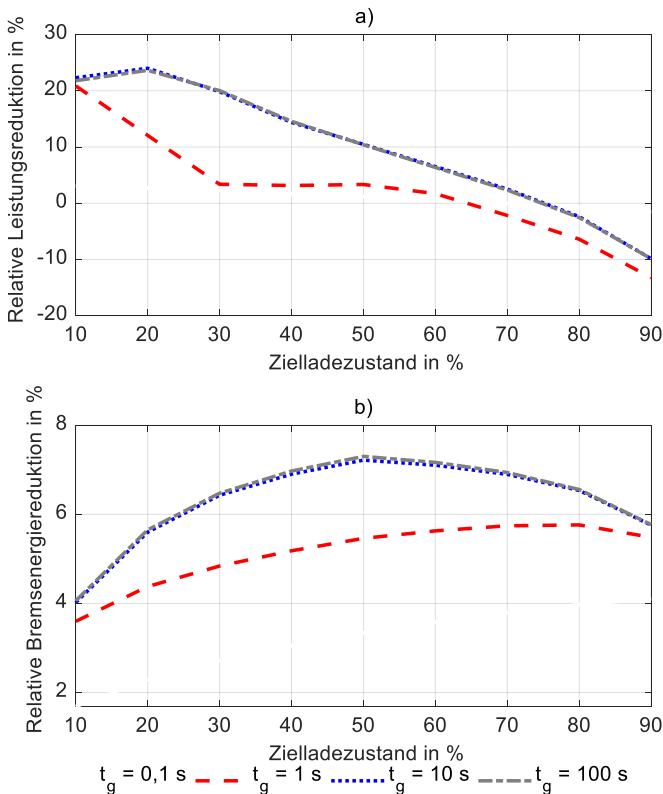


Abbildung 5.42: Beispielhafte Verläufe der energetischen Gütekriterien über dem Zielladezustand für eine Vorausschau von 50 ms.

5.7 Zwischenfazit

Das fünfte Kapitel beschreibt das Lösungskonzept der selbsteinstellenden Regelung mithilfe von Algorithmen, Gütekriterien und Parametervariationen. Die selbsteinstellende Regelung umfasst vier Funktionsmodule mit Unterfunktionen, welche in Programmablaufplänen dokumentiert sind. Als externe Faktoren kommen die Modellbildung und Systemidentifikation des Schwungmassenspeichersystems sowie die Voranalyse hinzu, welche wichtige Informationen und Randbedingungen für die selbsteinstellende Regelung bereitstellen.

Die Lastprofilerkennung entspricht dem ersten Funktionsmodul. Der Algorithmus stellt sicher, dass Anregungen des Zwischenkreises detektiert werden und prüft zudem, ob ihm deterministische Lastprofile einer Industriemaschine bereits bekannt sind.

Das zweite Funktionsmodul ermöglicht die Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters ohne künstliche Anregung. Es isoliert Anregungsfenster aus Trainingsdaten, leitet die Modellhypothese in Form einer impedanzbasierten Übertragungsfunktion her und schätzt im ersten Fallbeispiel vier bzw. im zweiten Fallbeispiel drei unbekannte Parameter mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate. Das zweite Funktionsmodul validiert anschließend das identifizierte Modell mit Testdaten.

Im dritten Funktionsmodul werden die impedanzbasierte Stabilitätsprüfung und die Trajektorienvorgabe der Speicherleistung sowie des Ladezustands hintereinandergeschaltet. Die beiden statischen Ansätze erzeugen Ladezustands- und Leistungssollwerte für den Speicher bei gleichzeitiger Sicherstellung der Spannungsstabilität.

Das vierte Funktionsmodul prüft schließlich die Auswirkungen der Speicherregelung, indem es energetische Gütekriterien von Simulationen ohne und mit Speicher miteinander vergleicht. Dadurch lassen sich die Einsatzoptionen der netzseitigen Leistungsreduktion und der Bremsenergienutzung bewerten.

6 Fallbeispiele

Dieser Abschnitt leitet die Validierung der vorliegenden Dissertation ein. Zuerst erfolgen die Modellbildung und Systemidentifikation des Speichersystems sowie die Voranalyse. Im weiteren Verlauf dienen die beiden Fallbeispiele „Werkzeugmaschine“ und „Holzbearbeitungsmaschine“ aus der Serienfertigung dazu, die selbststellende Regelung des Schwungmassenspeichersystems zu validieren. Im ersten Fallbeispiel soll die selbststellende Regelung am Lastprofil einer hochdynamischen Werkzeugmaschine erprobt werden. Sie verfügt über einen aktiv geregelten, rückspeisefähigen Gleichrichter. Es treten hohe Stromanstiegsgeschwindigkeiten auf. Das zweite Fallbeispiel behandelt eine Holzbearbeitungsmaschine, deren eher gleichförmige Bewegungen ein Diodengleichrichter speist. Der Diodengleichrichter ist nicht rückspeisefähig und wandelt deshalb Bremsenergie in einem Widerstand in Verlustwärme um.

6.1 Modellbildung und Systemidentifikation des Speichersystems

Der Vergleich der Zeitverläufe in Abbildung 6.1 und die Auswertung mathematischer Gütekriterien (vgl. NRMSE) validieren an dieser Stelle das theoretische Schwungmassenspeichermodell. Die NRMSE beträgt bei der Drehzahl 0,8 % und für das Drehmoment 9,5 %. Für die mechanische Leistung ergibt sich eine NRMSE von 9,2 %.

Der Hersteller des Schwungmassenspeichers gibt zudem an, dass die Verzögerung zwischen der Sollwertvorgabe am Eingang der Drehzahlkaskade und dem Feldwechsel an der Rotorwelle zwischen 30 und 40 ms betragen kann. Hinzu käme im Realsystem die Latenz der speicherprogrammierbaren Steuerung und des Feldbussystems, welche mit ca. 10 ms abgeschätzt werden kann.

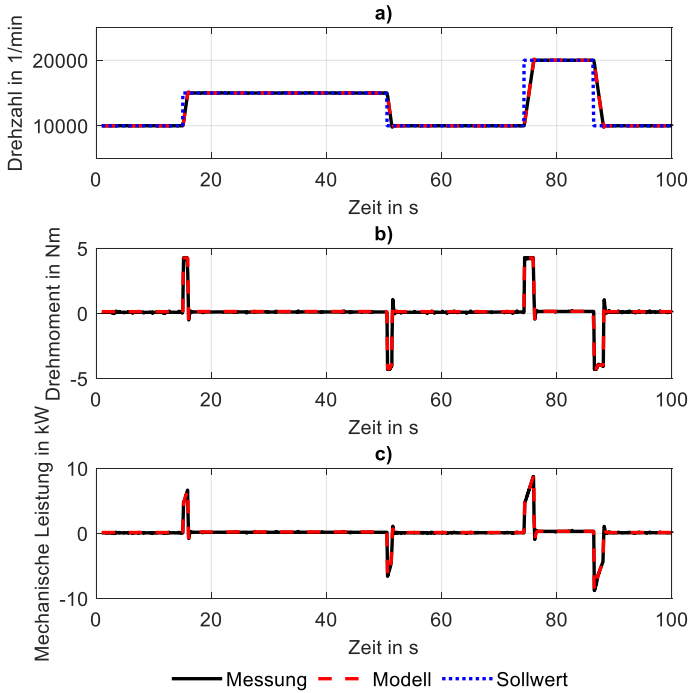


Abbildung 6.1: Vergleich der Messdaten mit dem Modell des Schwungmassenspeichers. a) Drehzahl, b) Drehmoment und c) mechanische Leistung.

6.2 Voranalyse

Im Rahmen der Voranalyse stellt Abbildung 6.2 zunächst das Messkonzept und die Versuchsumgebungen vor, welche zentral für die Modellbildung und Systemidentifikation sind. Die Strom- und Spannungssensoren in beiden Fallbeispielen sind identisch. Als Messgrößen dienen im ersten Fallbeispiel der Laststrom und die Zwischenkreisspannung. Im zweiten Fallbeispiel kommt der Strom in den Bremswiderstand als dritte Messgröße hinzu. Die Leitungen werden in beiden Fällen nicht modelliert, da es sich jeweils um Distanzen von nur wenigen Metern handelt. Die physikalischen Eigenschaften der Geräte aus den Testaufbauten und der Sensorik sind den Anhängen 10.12, 10.13 und 10.14 der Arbeit zu entnehmen.

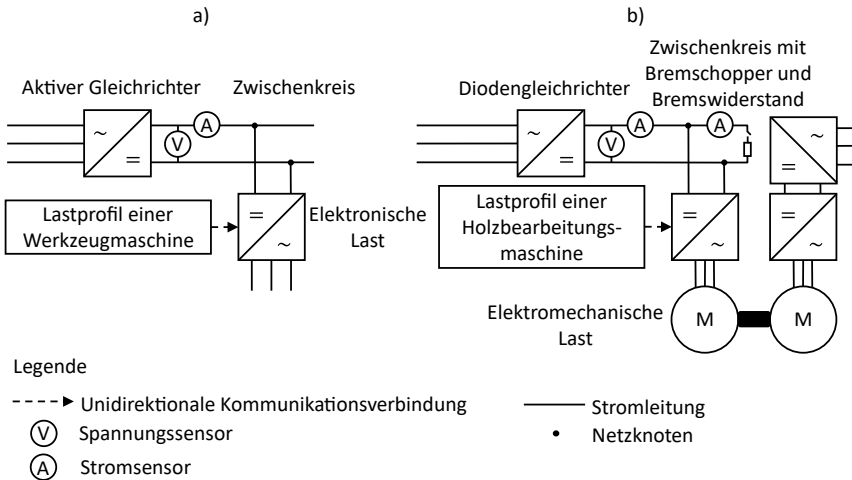


Abbildung 6.2: Versuchsumgebungen für die Systemidentifikation im a) ersten Fallbeispiel und im b) zweiten Fallbeispiel.

Im ersten Fallbeispiel (s. Abbildung 6.2a) wird das mit einer Abtastfrequenz von 1 kHz gemessene, dynamische Lastprofil einer Werkzeugmaschine auf die Nennleistung einer elektronischen Last skaliert und schließlich über eine Industriesteuerung vorgegeben. Der Sollstrom der elektronischen Last richtet sich dabei nach der Sollleistung und der aktuellen Zwischenkreisspannung am Umrichter, sodass sich das Verhalten einer Konstantleistungslast (CPL) einstellt.

Im zweiten Fallbeispiel (s. Abbildung 6.2b) wird das skalierte Lastprofil einer Holzbearbeitungsmaschine auf eine elektromechanische Last per Drehmomentvorgabe bei konstanter Drehzahl vorgegeben. Der Zwischenkreis des Diodengleichrichters verfügt über einen Bremschopper und einen Bremswiderstand. Die beiden Antriebe sind mechanisch miteinander gekoppelt, sodass die Energie über einen weiteren Zwischenkreis und einen zweiten aktiven Gleichrichter bzw. Wechselrichter mit dem AC-Netz ausgetauscht wird.

6.3 Fallbeispiel Werkzeugmaschine

Das Vorgehen in den Fallbeispielen basiert auf den Funktionsmodulen aus Kapitel 5. Zunächst validiert der nächste Abschnitt die Lastprofilerkennung.

6.3.1 Lastprofilerkennung

Laut Datenblatt besitzen die verwendeten Stromzangen eine Messgenauigkeit von $\pm 1,5\%$ (vgl. Abschnitt 10.12). Die Unsicherheit beträgt demnach näherungsweise $\pm 0,15\%$ pro Sensor. Es wird davon ausgegangen, dass die Unsicherheiten der Strom- und Spannungsmessung in der gleichen Größenordnung liegen und summiert werden müssen. Als Mindestanforderung an die Robustheit muss die Lastprofilerkennung trotz einer Unsicherheit von $\pm 0,3\%$ funktionieren. Der Variationswert in Tabelle 6.1 liegt etwas höher, um die Robustheit des Ansatzes zu bestätigen.

Tabelle 6.1: Untersuchte Parametervariation bei der Lastprofilerkennung.

Parameter	Grundeinstellung	Variation
Rauschamplitude	0,0 %	$\pm 0,5\%$

Zunächst werden die Messdaten vereinfacht, indem nur jeder zehnte Messwert durch den Algorithmus abgetastet wird. Dies beschleunigt die Rechenzeit und wirkt dem Rauschen entgegen. Die Messdaten werden außerdem vor der Umwandlung in Prüfsummen durch ein Savitzky-Golay-Filter mit einem Polynomgrad von $O = 1$ und einer halben Rahmenbreite $B = 49$ geglättet (Abbildung 6.3).

Das Filter basiert demnach auf einem einfachen linearen Polynom über einen Datenausschnitt von ungefähr einer Sekunde. Die gefilterten Daten weisen dadurch eine niedrige normierte Eckfrequenz unterhalb von 0,01 auf, was bei einer Abtastfrequenz von 1 kHz und einer Nyquistfrequenz von 500 Hz umgerechnet 5 Hz entspricht (vgl. (Schafer 2011, S.115)). Mit diesen Einstellungen lässt sich der Einfluss des Rauschens zusätzlich verringern und die Prüfsummen der Messdaten behalten trotzdem einen ausreichenden Informationsgehalt.

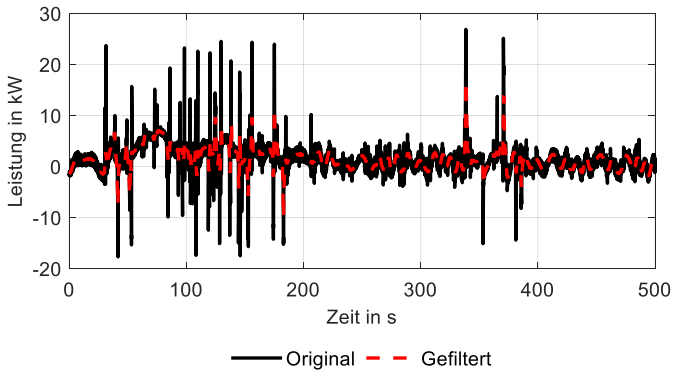


Abbildung 6.3: Originale und mit Savitzky-Golay-Filter geglättete Messdaten im ersten Fallbeispiel.

Der Algorithmus detektiert zuverlässig die Anregungen der Spannung an den Zwischenkreiskondensatoren in Abbildung 6.4, welche die Lastspitzen der Verbraucher kurzzeitig puffern, bevor der Gleichrichter den Zwischenkreis unterstützt. Die Anregungsüberwachung schließt das vorhergehende Lastprofil ab und aktiviert zudem erneut die Suchmaschine, indem sie jeweils das Auslösesignal auf den Wert 1 setzt. Die Aktivitäts- bzw. Inaktivitätszeiten steigt, wenn eine Anregung detektiert bzw. nicht detektiert wird. Ab einer vorab festgelegten Inaktivitätszeit von 30 s führt eine Anregung im ersten Fallbeispiel zu einem positiven Auslösesignal. Dasselbe gilt bei der allerersten Anregung.

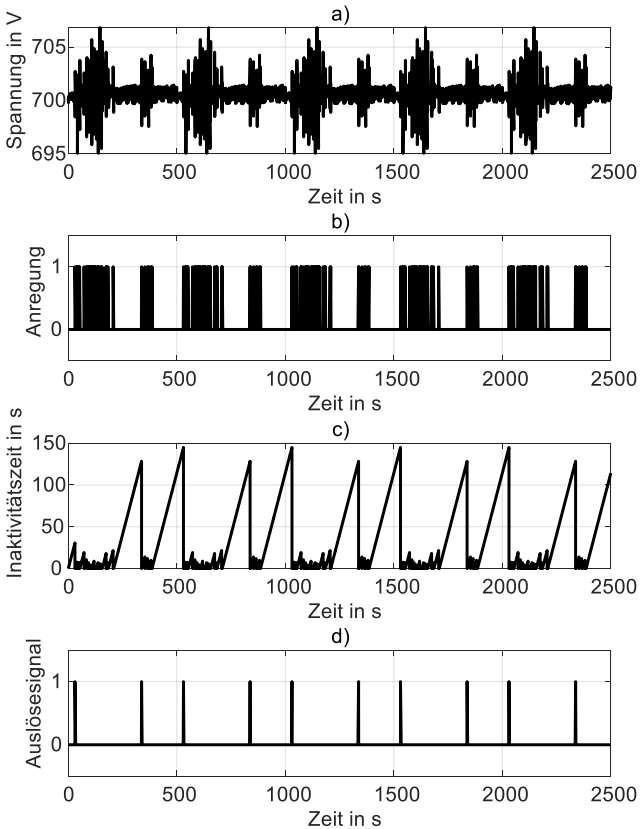


Abbildung 6.4: Lastprofilerkennung im ersten Fallbeispiel. a) Zwischenkreisspannung am Gleichrichter, b) Anregung, c) Inaktivitätszeit, d) Auslösesignal.

Im ersten der fünf Produktionszyklen in Abbildung 6.5 ist die Datenbank noch leer. Die Prüfsummen des Lastprofils werden somit frühestens ab dem zweiten positiven Auslösesignal erkannt, sobald die Merkmale von mindestens einem Lastprofil in die Datenbank aufgenommen worden sind. Die Suchmaschine erkennt zwei Lastprofile innerhalb des 500 s langen Produktionsprogramms der Werkzeugmaschine. Trotz einer Rauschamplitude von 0,5 % der gemessenen Maximalleistung liegt die Vertrauenswürdigkeit stets weit oberhalb der

geforderten 10 % bei annähernd 100 %. Die Rechenzeit zwischen Anregung und Erkennung beträgt immer weniger als eine Sekunde.

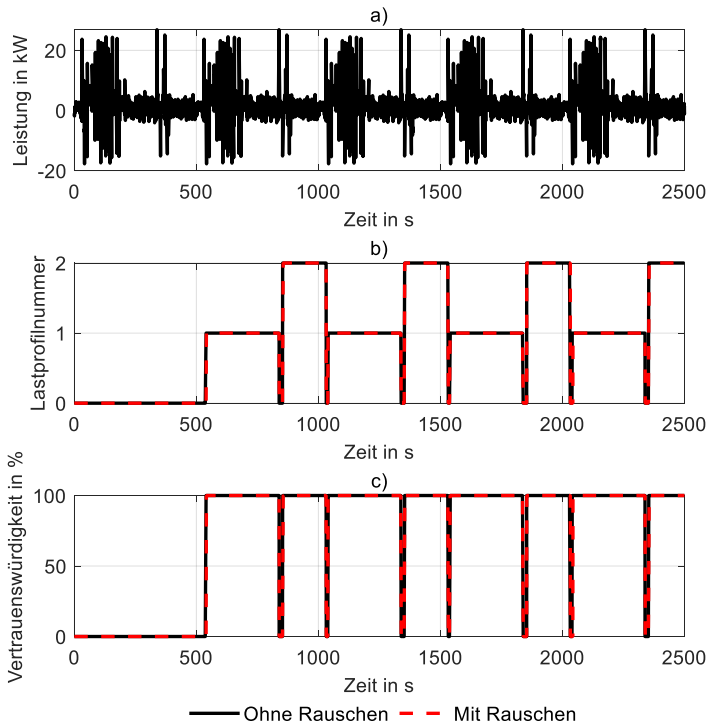


Abbildung 6.5: Lastprofilerkennung im ersten Fallbeispiel. a) Leistung, b) erkannte Lastprofilnummer, c) Vertrauenswürdigkeit ohne und mit 0,5 % Rauschen.

Im nächsten Abschnitt folgt die Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters der Industriemaschine im ersten Fallbeispiel.

6.3.2 Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters der Industriemaschine

Nun wird das Vorgehen aus Abschnitt 5.4 zur Identifikation des rückspeisefähigen Frequenzumrichters angewandt. Der Trainingsdatensatz des ersten Fallbeispiels stammt von einem aktiven Gleichrichter, der über seinen Zwischenkreis eine elektronisch gesteuerte, bidirektionale Last versorgt. Tabelle 6.2 enthält Informationen zur Parametervariation des zweiten Funktionsmoduls. Die Parameter werden so gewählt, dass relevante Zwischenkreisdynamiken erfasst werden, ohne gleichzeitig zu große Signalausschnitte auszuwählen, welche die Rechenzeit unnötig erhöhen.

Tabelle 6.2: Parametervariation der Modellbildung und Systemidentifikation.

Parameter	Grundeinstellung	Variation
Erweiterte Breite des Anregungsfensters t_{ex}	± 50 ms	± 500 ms

Abbildung 6.6 zeigt zunächst den Trainingsdatensatz für die Systemidentifikation im Rahmen des ersten Fallbeispiels. Der Laststrom und die Zwischenkreisspannung werden gemessen und die binäre Anregungsdetektion basiert auf der statistischen Ausreißerbetrachtung der Spannungsdaten. Der Trainingsdatensatz, basierend auf dem Lastprofil der Werkzeugmaschine, liefert knapp 250 Anregungsfenster, d. h. ebenso viele Durchläufe zur Parameterschätzung.

Die automatisch bestimmten Anregungsfenster werden beidseitig um den Zeitpuffer t_{ex} erweitert, um der Parameterschätzung mehr Daten zur Verfügung zu stellen. Der Zeitpuffer wird variiert (vgl. Tabelle 6.2), sodass unterschiedliche Anpassungsgüten und relative Abweichungen auftreten. Als Eingang der Parameterschätzung dient der rekonstruierte DC-Strom i_{dcg} auf Basis der Kapazitäten C_{gDB} und C_{IDB} laut Datenblatt (Gl. (5.36)). Als Ausgang fungiert die Spannung v_g . Die Initialwerte der Parameterschätzung betragen null. Diese Arbeit verzichtet auf die Vorverarbeitung der Daten durch digitale Filter oder Wavelets, damit die Daten keinen Informationsverlust erleiden, der die Parameterschätzung negativ beeinflussen kann.

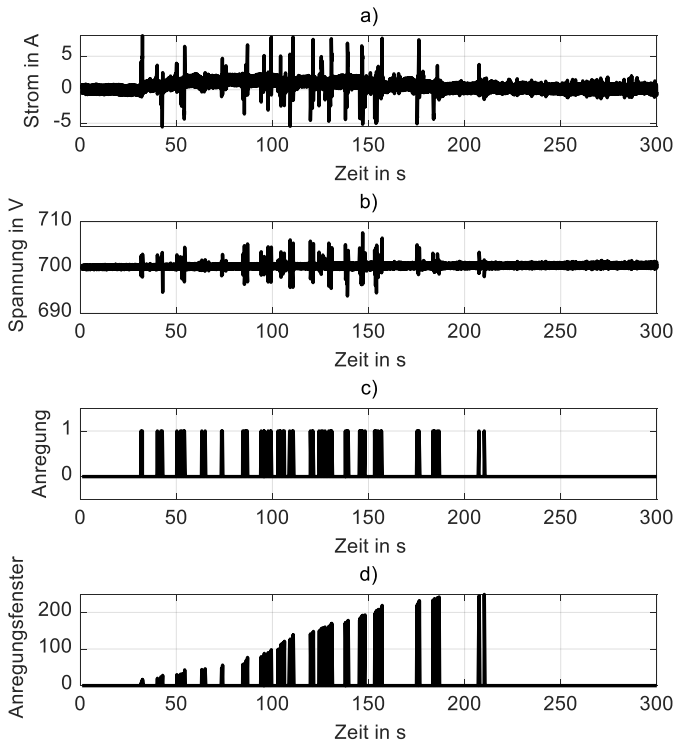


Abbildung 6.6: Skalierter Datensatz der Werkzeugmaschine mit a) gemessenem Laststrom, b) gemessener Zwischenkreisspannung, c) binärer Anregung und d) Anregungsfenstern.

Abbildung 6.7 legt die Anpassungsgüte der Parameterschätzung über den Anregungsfenstern für $t_{ex} = 50 \text{ ms}$ dar. Die Anpassungsgüte liegt zwischen 11,8 % und 89,9 %, im Mittel erreicht sie 63,9 %.

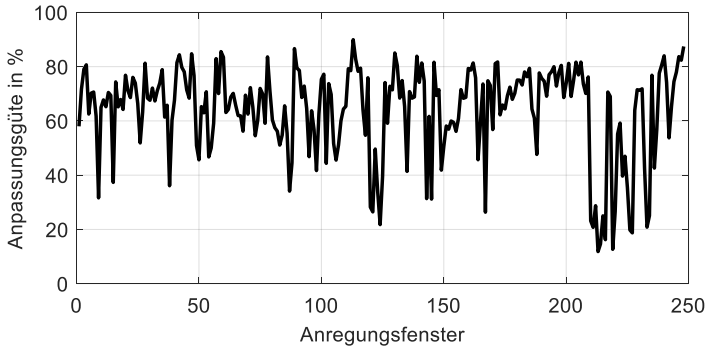


Abbildung 6.7: Anpassungsgüte der Parameterschätzung über den Anregungsfenstern für $t_{ex} = 50 \text{ ms}$ im ersten Fallbeispiel.

Tabelle 6.3 präsentiert die relativen Abweichungen der Parameterschätzwerte von den echten Parameterwerten für die größte erzielte Anpassungsgüte von 89,9 %. Die relativen Abweichungen der Parameter liegen im niedrigen einstelligen Prozentbereich. Die Identifikation des Integralanteils K_{ivg} gelingt am genauesten. Die Medianlösung der Parameterschätzung eignet sich dagegen nicht zur Bestimmung der Unbekannten.

Tabelle 6.3: Relative Abweichungen x_r der Parameterschätzwerte \tilde{X} von den echten Parameterwerten X des aktiven Gleichrichters und der Antriebslasten für die maximale Anpassungsgüte (am) sowie den Median (med) bei einem Zeitpuffer von $\pm 50 \text{ ms}$ im ersten Fallbeispiel.

Parameter	X	\tilde{X}_{am}	x_{ram}	\tilde{X}_{med}	x_{rmed}
Zwischenkreiskapazität C	6,25 mF	6,34 mF	1,5 %	10,98 mF	75,6 %
Zwischenkreiskapazität C_g	3,90 mF	3,96 mF	1,5 %	6,85 mF	75,6 %
Zwischenkreiskapazität C_l	2,35 mF	2,38 mF	1,5 %	4,13 mF	75,6 %
Proportionalanteil K_{pvg}	0,58 A/V	0,56 A/V	-3,5 %	0,73 A/V	30,5 %
Integralanteil K_{ivg}	40,00 A/(Vs)	39,87 A/(Vs)	-0,6 %	89,13 A/(Vs)	123,5 %
Nachstellzeit T_{ng}	14,50 ms	14,07 ms	-3,0 %	9,50 ms	-32,5 %

Abbildung 6.8 stellt die Testdaten der Messung und der Simulation einander gegenüber. Generell ist festzustellen, dass die Messdaten eine höhere Rauschamplitude im Grundlastbereich aufweisen als die Simulationsdaten. Dies liegt an der vereinfachten Modellhypothese der parallelgeschalteten Impedanz.

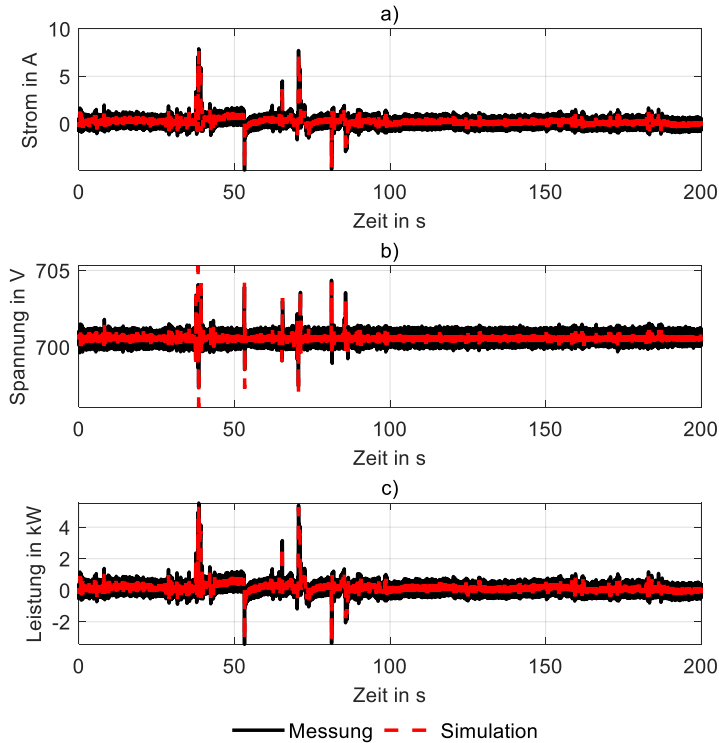


Abbildung 6.8: Vergleich der Testdaten der Messung und der Simulation a) des Stroms, b) der Spannung und c) der Leistung im Zeitbereich unter der Annahme der Datenblattkapazitäten und $t_{ex} = 50 \text{ ms}$ im ersten Fallbeispiel.

Das Gütekriterium NRMSE eignet sich nicht zur Beurteilung der Testdaten, da es das Grundrauschen zu stark wertet. Die Annäherung des Grundrauschens ist zudem für die Spitzenglättung unerheblich. Wichtiger sind hierfür die energetischen Betrachtungen. Die energetische Abweichung der Testdaten aus Messung und Simulation beläuft sich auf

vernachlässigbare $-0,004\%$ bzw. -1% . Die maximale Spannungsabweichung beträgt $2,3\text{ V}$, liegt jedoch meist unter einem Volt.

Wird der Zeitpuffer auf $\pm 500\text{ ms}$ erhöht, sinkt die maximale Anpassungsgüte in Abbildung 6.9 geringfügig auf $89,4\%$. Der Algorithmus bestimmt als geringste Anpassungsgüte einen Wert von $27,7\%$, während sich das arithmetische Mittel bei $71,5\%$ befindet.

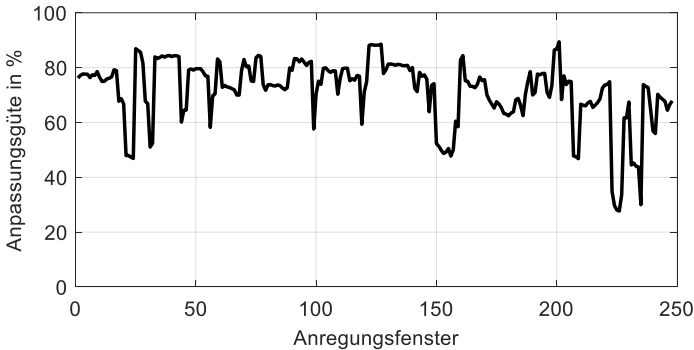


Abbildung 6.9: Anpassungsgüte der Parameterschätzung über den Anregungsfenstern für $t_{ex} = 500\text{ ms}$ im ersten Fallbeispiel.

Gleichzeitig steigt die relative Abweichung der Zwischenkreiskapazitäten auf knapp 13% in Tabelle 6.4.

Tabelle 6.4: Relative Abweichungen x_r der Parameterschätzwerte \tilde{X} von den echten Parameterwerten X des aktiven Gleichrichters und der Antriebslasten für die maximale Anpassungsgüte (am) sowie den Median (med) bei einem Zeitpuffer von $t_{ex} = \pm 500\text{ ms}$ im ersten Fallbeispiel.

Parameter	X	\tilde{X}_{am}	x_{ram}	\tilde{X}_{med}	x_{rmed}
Zwischenkreiskapazität C	6,25 mF	7,03 mF	12,5 %	7,15 mF	14,4 %
Zwischenkreiskapazität C_g	3,90 mF	4,39 mF	12,5 %	4,46 mF	14,4 %
Zwischenkreiskapazität C_l	2,35 mF	2,64 mF	12,5 %	2,69 mF	14,4 %
Proportionalanteil K_{pvg}	0,58 A/V	0,59 A/V	2,1 %	0,66 A/V	11,5 %
Integralanteil K_{ivg}	40,00 A/(Vs)	40,16 A/(Vs)	0,1 %	44,34 A/(Vs)	10,4 %
Nachstellzeit T_{ng}	14,50 ms	14,78 ms	1,9 %	15,08 ms	2,0 %

Die Genauigkeit des Integralanteils ist noch höher, während der Proportionalanteil seinen relativen Fehler betragsmäßig ebenfalls verringert. Die maximale Spannungsabweichung liegt bei 2,1 V. Die energetische Abweichung beträgt nur -0,003 % bzw. -1 J. Insgesamt führt die groß geschätzte Kapazität zu einem gedämpfteren Spannungsband, vor allem beim Grundrauschen um die Nennspannung (Abbildung 6.10).

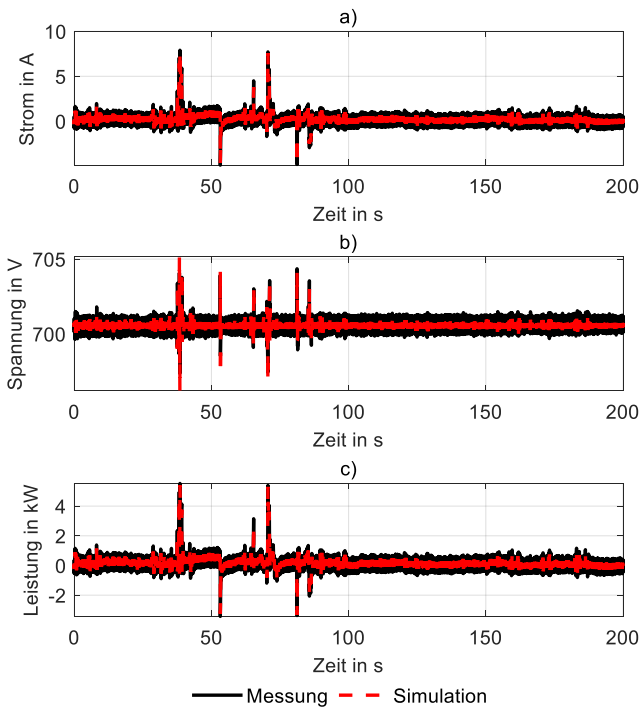


Abbildung 6.10: Vergleich der Testdaten der Messung und der Simulation a) des Stroms, b) der Spannung und c) der Leistung im Zeitbereich unter der Annahme der Datenblattkapazitäten und $t_{ex} = 500 \text{ ms}$ im ersten Fallbeispiel.

Auf Grundlage der regelungstechnischen Zwischenkreismodelle des Gleichrichters der umrichter gespeisten Antriebslasten und des Schwungmassenspeichersystems folgt im nächsten Abschnitt der Reglerentwurf.

6.3.3 Reglerentwurf

Unter Bezugnahme auf Abschnitt 5.5.1 folgt nun zunächst die impedanzbasierte Stabilitätsprüfung für skalierte Lastprofile als Randbedingung der sich daran anschließenden Trajektorienvorgabe.

Impedanzbasierte Stabilitätsprüfung

Der Einfluss einiger Modellparameter auf die erzielbare Phasenreserve ist Gegenstand dieses Abschnitts. Tabelle 6.5 schildert die Parametervariation der impedanzbasierten Stabilitätsprüfung.

Tabelle 6.5: Parametervariation der impedanzbasierten Stabilitätsprüfung im ersten Fallbeispiel.

Parameter	Standard	Variation
Anzahl der Verbraucher l	5	14
Lastkapazität C_l	11,75 mF	32,90 mF
Verbraucherleistung P_l	28 kW	0 bis 80 kW in 1 kW Schritten
Speicherleistung P_s	-23 kW	-50 bis 50 kW in 1 kW Schritten

Aufgrund von Einschränkungen im Rahmen der Vorladung und Regelung dürfen laut Datenblatt über den verwendeten aktiven Gleichrichter nur Antriebe mit einer maximalen Zwischenkreiskapazität von 13 mF versorgt werden. Dies entspricht im ersten Fallbeispiel fünf Antrieben mit einer Einzelkapazität von 2,35 mF. Hinzu kommt die Kapazität des Speicherumrichters. Die maximale Summenlast des gemessenen Werkzeugmaschinenprofils beträgt bei fünf identischen Antrieben ca. 28 kW und die Speicherleistungen liegen zwischen -1 kW und -50 kW. Die Verbraucherleistung wird in 1 kW Schritten bis zur Bemessungsleistung des aktiven Gleichrichters gesteigert, um die Phasenreserve über das vollständige Leistungsspektrum trotz Einschränkungen seitens Datenblatt beurteilen zu können.

Abbildung 6.11 zeigt den Fall mit der kleinsten Phasenreserve von 48,23°. Der Speicher entlädt mit -1 kW und die Antriebslast beträgt 28 kW. Der Schnittpunkt der Beträge von Z_{e1} und Z_{v1} liegt bei 9,51 Hz und 3,03 dBΩ bzw. 1,42 Ω.

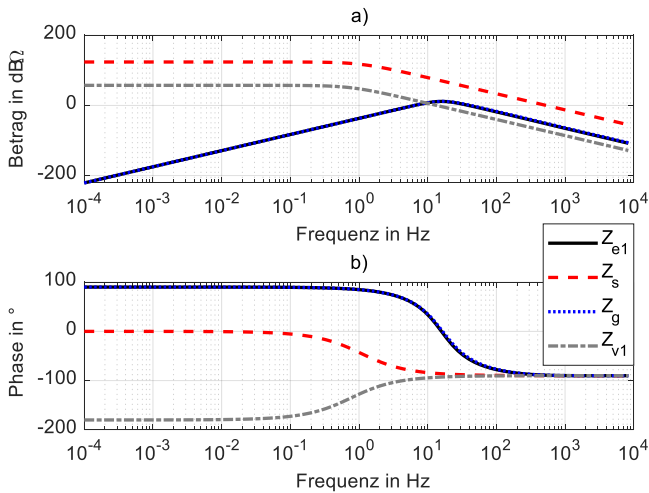


Abbildung 6.11: Einfluss der Parallelschaltung der Speicherimpedanz Z_s mit der Gleichrichterimpedanz Z_g auf a) den Betrag und b) die Phase der Erzeugerimpedanz Z_{e1} für das Entladen des Speichers ($P_s = -1 \text{ kW}$) und das Werkzeugmaschinenlastprofil ($P_l = 28 \text{ kW}$) im ersten Fallbeispiel.

Bei einem passiven Speicher ($P_s = 0$) beträgt die Phasenreserve $48,13^\circ$. Allerdings tritt dieser Sonderfall aufgrund der kontinuierlichen Selbstentladung des Speichers selten ein. Über den Wertebereich der negativen Speicherleistungen variiert die Phasenreserve zwischen $48,23^\circ$ und $61,20^\circ$ (vgl. Abbildung 6.12). Sie liegt damit weit genug von der geforderten Soll-Phasenreserve entfernt, welche auf 30° veranschlagt wird.

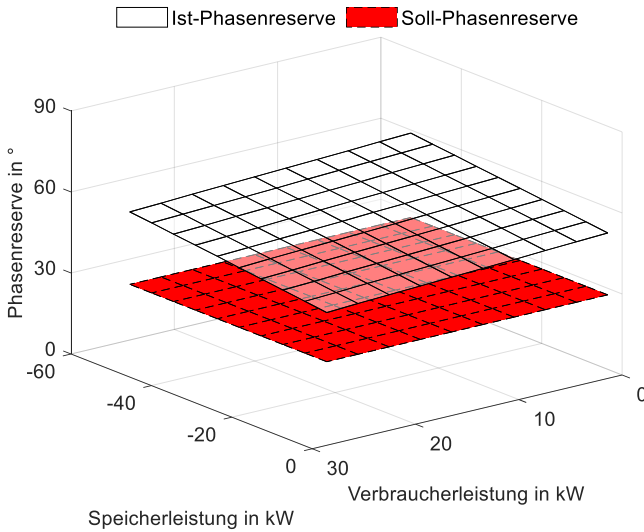


Abbildung 6.12: Ist-Phasenreserve PM und Soll-Phasenreserve PM^* als Stabilitätsebenen in Abhängigkeit der Verbraucherleistung P_l und der Speicherleistung P_s für das Entladen des Speichers und das Werkzeugmaschinenlastprofil im ersten Fallbeispiel.

Wird der Speicher zusätzlich zur Antriebsleistung von 28 kW mit 50 kW geladen, resultiert das Bode-Diagramm in Abbildung 6.13. Der Schnittpunkt der Beträge liegt bei 9,33 Hz und 2,79 dBΩ bzw. 1,38 Ω bei einer Phasenreserve von 37,97°. Die Verläufe der Gleichrichterimpedanz Z_g und der Erzeugerimpedanz Z_{e2} sind identisch. Die Speicherimpedanz Z_s und die Lastimpedanz Z_l agieren beide als klassische Konstantleistungslasten (CPL).

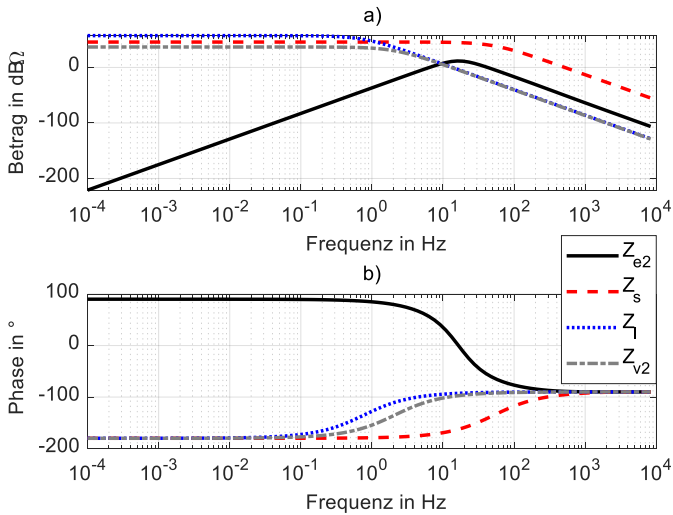


Abbildung 6.13: Einfluss der Parallelschaltung der Speicherimpedanz Z_s mit der Lastimpedanz Z_l auf a) den Betrag und b) die Phase der Verbraucherimpedanz Z_{v2} für das Laden des Speichers ($P_s = 50 \text{ kW}$) und das Werkzeugmaschinenlastprofil ($P_l = 28 \text{ kW}$) im ersten Fallbeispiel.

Die Stabilitätsfläche in Abbildung 6.14 weist Phasenreserven zwischen $37,97^\circ$ und $51,09^\circ$ für den Wertebereich der positiven Speicherleistungen im Ladebetrieb auf. Das System hält die geforderten 30° Phasenreserve ein.

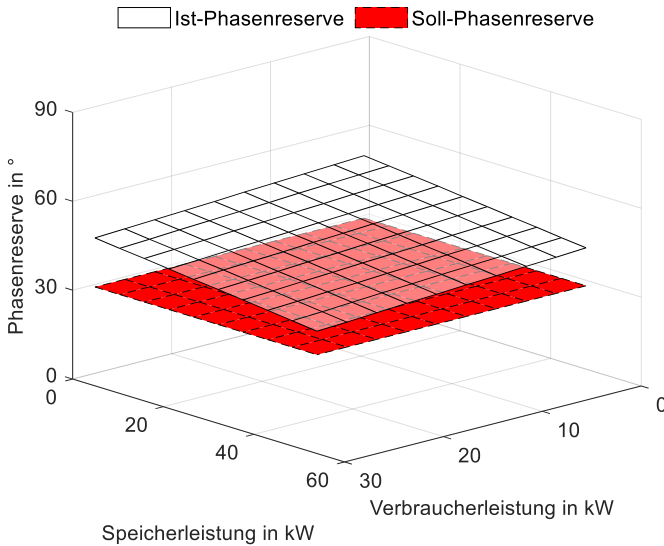


Abbildung 6.14: Ist-Phasenreserve PM und Soll-Phasenreserve PM^* als Stabilitätsebenen in Abhängigkeit der Verbraucherleistung P_l und der Speicherleistung P_s für das Laden des Speichers und das Werkzeugmaschinenlastprofil im ersten Fallbeispiel.

Tabelle 6.6 fasst die Ergebnisse der impedanzbasierten Stabilitätsprüfung des ersten Fallbeispiels zusammen. Sie führt die Frequenzen und die Beträge der Schnittpunkte im Bode-Diagramm sowie die Phasenreserve für die jeweilige Kombination aus Verbraucher- und Speicherleistung auf. Bei fünf baugleichen Antrieben bzw. 28 kW Last erfüllt die Phasenreserve das Stabilitätskriterium. Die Schnittpunktfrequenz liegt bei knapp 10 Hz, während der Impedanzbetrag am Schnittpunkt ca. $1,4 \Omega$ erreicht. Bei einer erhöhten Last von 80 kW sinken die Frequenzen und die Beträge der Schnittpunkte auf ca. 5 Hz und $0,9 \Omega$.

Bei einer Summenlast von 28 kW der fünf baugleichen Antriebsumrichter resultieren für die Speicherleistung keine Einschränkungen. Der folgende Abschnitt behandelt die Trajektorienvorgabe für das Speichersystem zur Glättung der skalierten Lastprofile.

Tabelle 6.6: Schnittpunktfrequenz f_x , Schnittpunktbetrag $|Z_x|_{dB}$ bzw. $|Z_x|$ und minimalen Phasenreserve PM_{min} für Kombinationen der Verbraucherleistung P_l und der Speicherleistung P_s im ersten Fallbeispiel.

P_l	P_s	f_x$	|Z_x|_{dB}$	$|Z_x|$	PM_{min}
28 kW	0 kW	9,51 Hz	3,04 dBΩ	1,42 Ω	48,13°
28 kW	-1 kW	9,51 Hz	3,03 dBΩ	1,42 Ω	48,23°
28 kW	-23 kW	9,79 Hz	2,78 dBΩ	1,38 Ω	52,14°
28 kW	-50 kW	10,20 Hz	2,43 dBΩ	1,32 Ω	56,86°
28 kW	0 kW	9,46 Hz	2,87 dBΩ	1,39 Ω	46,77°
28 kW	1 kW	9,46 Hz	2,87 dBΩ	1,39 Ω	46,61°
28 kW	23 kW	9,40 Hz	2,84 dBΩ	1,39 Ω	42,73°
28 kW	50 kW	9,33 Hz	2,79 dBΩ	1,38 Ω	37,97°
80 kW	0 kW	5,51 Hz	-1,24 dBΩ	0,87 Ω	20,96°
80 kW	-1 kW	5,52 Hz	-1,24 dBΩ	0,87 Ω	21,12°
80 kW	-23 kW	5,57 Hz	-1,33 dBΩ	0,86 Ω	23,39°
80 kW	-50 kW	5,65 Hz	-1,44 dBΩ	0,85 Ω	26,18°
80 kW	0 kW	5,51 Hz	-1,31 dBΩ	0,86 Ω	20,78°
80 kW	1 kW	5,51 Hz	-1,31 dBΩ	0,86 Ω	20,68°
80 kW	23 kW	5,49 Hz	-1,34 dBΩ	0,86 Ω	18,36°
80 kW	50 kW	5,47 Hz	-1,38 dBΩ	0,85 Ω	15,57°

Trajektorienvorgabe

Bei der Trajektorienvorgabe werden die Glättungszeit sowie der Startladezustand variiert. Tabelle 6.7 enthält die Standardwerte und die betrachteten Variationen. Die Glättungszeit t_g wird von 0,1 s bis 100 s in Zehnerpotenzen gesteigert, um einen möglichst breiten Parameterbereich abzudecken. Kleinere Glättungszeiten haben aufgrund der Abtastfrequenz von 1 kHz einen zu geringen Einfluss auf die Spitzen. Für größere Werte im Bereich mehrerer Minuten verändert sich der gleitende Mittelwert nicht mehr. Der Startladezustand liegt standardmäßig bei 50 % und nimmt Werte zwischen 10 % und 90 % an.

Tabelle 6.7: Parametervariation der Trajektorienvorgabe.

Parameter	Standard	Variation
Glättungszeit t_g	10 s	0,1 s; 1 s; 100 s
Startladezustand SOC_0	50 %	10 % bis 90 %

Tabelle 6.8 und Tabelle 6.9 bewerten unterschiedliche Parameterkombinationen der statischen Trajektorienvorgabe hinsichtlich der Leistungs- und Bremsenergiereduktion. Die statische Trajektorienvorgabe beruht dabei auf der Verbraucherleistung, also dem Produkt des gemessenen Laststroms i_{ng} und der Zwischenkreisspannung v_g . Hierbei ist zu beachten, dass die relative Bremsenergiereduktion im späteren Verlauf der Arbeit an der simulierten Gleichrichterleistung bilanziert wird, nachdem die Zwischenkreiskapazitäten bereits einen Teil der Bremsenergie aufgenommen haben. Bis zu 66 % der Leistung sind laut statischer Trajektorienvorgabe durch den Speicher zu kappen. Im schlechtesten Fall liegt die relative Leistungsreduktion immer noch bei 19 %. Die besten Leistungsreduktionen resultieren für einen Zielladezustand zwischen 60 und 70 %. Die Parameterkombinationen mit einer Glättungszeit größer als 1 s und einem Zielladezustand von 50 bis 60 % belegen mit bis zu 16 % Bremsenergiereduktion die ersten Ränge. In den schlechtesten Fällen berechnet der Trajektorienalgorithmus eine Bremsenergiereduktion von 10 % für das skalierte Lastprofil der Werkzeugmaschine. Insgesamt sind 36 statische Trajektorienvorgaben berechnet worden.

Tabelle 6.8: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Leistungsreduktion der statischen Trajektorienvorgabe im ersten Fallbeispiel.

Rang	t_g	SOC_0	$p_{r,stat}$
1	100 s	70 %	66 %
2	10 s	70 %	65 %
3	100 s	60 %	63 %
...
34	0,1 s	20 %	19 %
35	0,1 s	10 %	19 %
36	0,1 s	90 %	19 %

Tabelle 6.9: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Bremsenergiereduktion der statischen Trajektorienvorgabe im ersten Fallbeispiel.

Rang	t_g	SOC_0	$w_{e,stat}$
1	100 s	50 %	16 %
2	10 s	50 %	16 %
3	100 s	60 %	16 %
...
34	0,1 s	90 %	10 %
35	0,1 s	20 %	10 %
36	0,1 s	10 %	10 %

Eine Glättungszeit von 10 bis 100 s bei einem Zielladezustand von 70 % resultiert in der größten relativen Leistungsreduktion in Abbildung 6.15. Bei der Bremsenergiereduktion ist ein Zielladezustand von 50 % vorteilhaft, da das Gütekriterium zu den Ladezustandsrändern hin symmetrisch abnimmt.

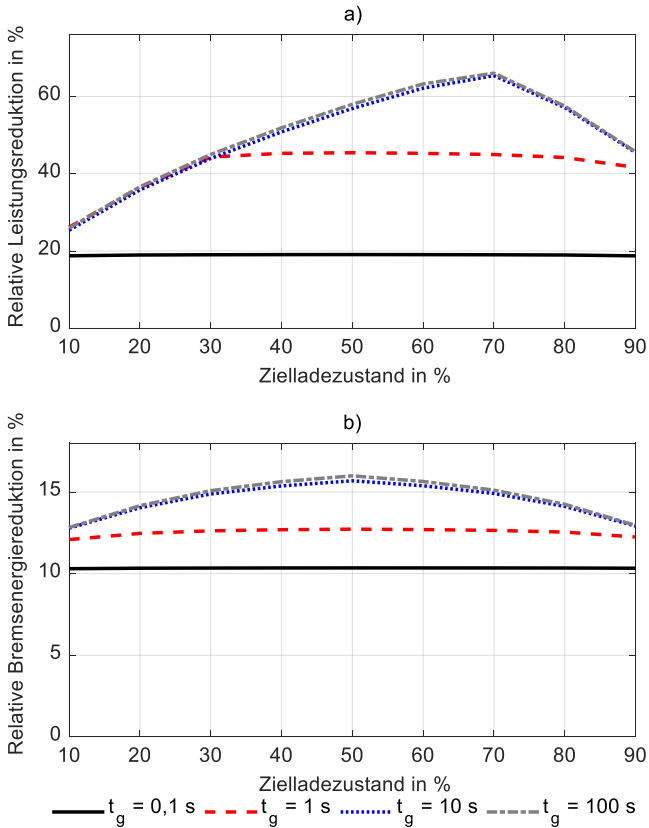


Abbildung 6.15: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion bei einer statischen Trajektorienvorgabe in Abhängigkeit der Glättungszeit und des Zielladezustands im ersten Fallbeispiel.

Die verfügbare Speicherleistung wird in Abbildung 6.16 in beide Stromrichtungen ausgereizt. Der Ladezustand weicht um bis zu 11 % ab, folgt aber mittelfristig dem Zielladezustand von 70 %. Abbildung 6.17 präsentiert die Verbraucherleistung ohne und mit Speicher, was eine potenzielle Leistungsreduktion von 66 % ergibt. Da es sich um eine statische Auslegung handelt, wird keine Zwischenkreisspannung dargestellt.

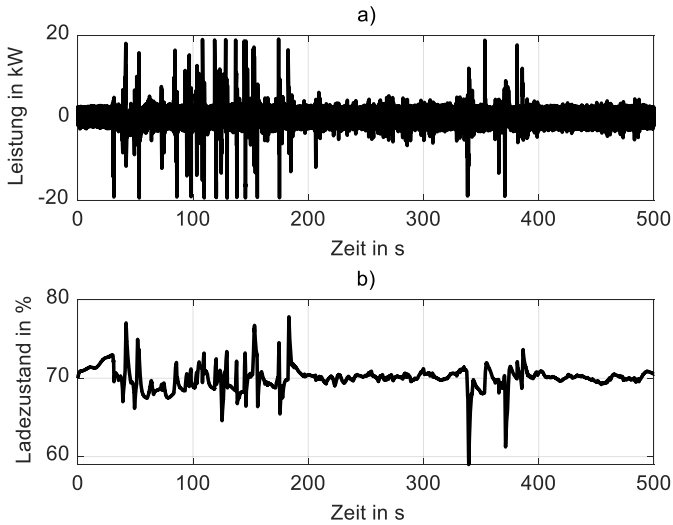


Abbildung 6.16: a) Leistung und b) Ladezustand des Speichers bei einer statischen Trajektorienvorgabe für eine Glättungszeit von 100 s und einen Zielladezustand von 70 % im ersten Fallbeispiel.

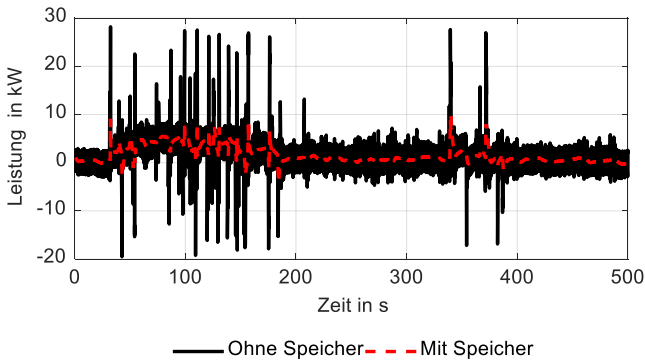


Abbildung 6.17: Verbraucherleistung ohne und mit Speicher auf Basis der statischen Trajektorienvorgabe für eine Glättungszeit von 100 s und einen Zielladezustand von 70 % ohne Vorausschau und Reibmoment im ersten Fallbeispiel.

In Anbetracht der statischen Trajektorienvorgabe ermöglicht der Speichereinsatz in Abbildung 6.18 eine Bremsenergiereduktion von ca. 16 %, wenn beispielsweise die Glättungszeit 100 s

beträgt und der Zielladezustand bei 70 % liegt. Derselbe Betrag wird bei der Beschleunigungsenergie eingespart. Die Selbstentladung des Speichers in Form des Reibmoments wird bei der statischen Trajektorienvorgabe nicht berücksichtigt. Die Änderung der Zwischenkreisenergie entfällt aufgrund der statischen Betrachtung und die Änderung der Rotationsenergie ist sehr klein in Relation zu den Beschleunigungs- und Bremsenergien der Verbraucher.

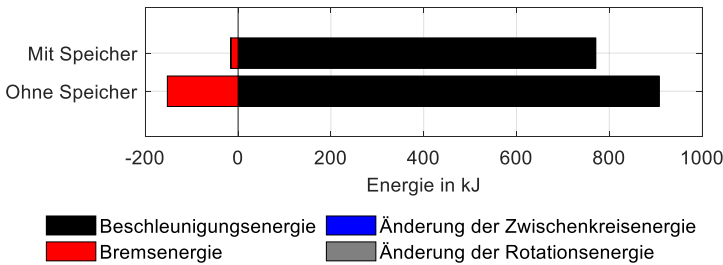


Abbildung 6.18: Energiebilanz der statischen Trajektorienvorgabe für eine Glättungszeit von 100 s und einen Zielladezustand von 70 % im ersten Fallbeispiel.

6.3.4 Speicherregelung

Tabelle 6.10 zeigt als Ergänzung zu Tabelle 6.7 die Variation der Vorausschau t_v , welche den mechanischen Speicher aufgrund seiner Trägheit vorsteuert. Die Vorausschau betrachtet dabei nicht die zusätzlich auftretende Verzögerung übergeordneter speicherprogrammierbarer Steuerungen (SPS) oder anderer Recheneinheiten, sondern allein die Elektromechanik und die kaskadierte Umrichterregelung des Schwungmassenspeichersystems. Die Vorausschau liegt im Bereich von 0 bis 90 ms, was den angegebenen Wertebereich des Speicherherstellers von 30 bis 40 ms umschließt.

Darüber hinaus prüft der Algorithmus den Einfluss des mittelfristigen Zielladezustands SOC_0 auf die energetischen Gütekriterien. Für die Variation der vier ersten Parameter in Tabelle 6.10 resultieren insgesamt 720 Simulationsläufe.

Tabelle 6.10: Parametervariation der Speicherregelung.

Parameter	Standard	Variation
Reibmoment M_r	0 Nm	Quadratisches Polynom
Glättungszeit t_g	10 s	0,1 s; 1 s; 100 s
Vorausschau t_v	0 ms	10 ms bis 90 ms
Startladezustand SOC_0	50 %	10 % bis 90 %

Die Wirkungsgrade des Simulationsmodells betragen 100 %, um die Ergebnisse im Nachhinein pauschal mit den Wandlungsverlusten beaufschlagen zu können. Das Reibmoment, welches auf einem quadratischen Polynom basiert, wird hingegen erst im zweiten Ergebnisteil aktiviert, um zu Beginn ideale Rahmenbedingungen zu garantieren.

Speicherregelung ohne Reibmoment

Zunächst ist die kontinuierliche Selbstentladung des Speichers in Form des Reibmoments im Modell deaktiviert. Tabelle 6.11 und Tabelle 6.12 fassen die besten und schlechtesten Parameterkombinationen hinsichtlich der Gütekriterien der relativen Leistungs- und Bremsenergiereduktion zusammen. Hierfür wird die Gleichrichterleistung ohne und mit Speicher evaluiert. Unter Vernachlässigung des Reibmoments erreicht der Speicher eine Leistungsreduktion von bis zu 64 % bei maximal möglichen 81 %. Eine ungenügende Parameterwahl bei der Trajektorienvorgabe kann bis zu 27 % höhere Leistungsspitzen verursachen. Die relative Bremsenergiereduktion beträgt zwischen -3 und 8 %. Dabei ist ein hoher Zielladezustand von 90 % in Kombination mit einer sehr großen Vorausschau nachteilig.

Tabelle 6.11: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Leistungsreduktion der Speicherregelung ohne Reibmoment im ersten Fallbeispiel.

Rang	t_g	t_v	SOC_0	$P_{r,sim}$
1	10 s	20 ms	50 %	64 %
2	10 s	20 ms	60 %	64 %
3	100 s	20 ms	60 %	63 %
...
358	1 s	70 ms	90 %	-25 %
359	1 s	90 ms	90 %	-27 %
360	1 s	80 ms	90 %	-27 %

Tabelle 6.12: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für der relativen Bremsenergiereduktion der Speicherregelung ohne Reibmoment im ersten Fallbeispiel.

Rang	t_g	t_v	SOC_0	$w_{e,sim}$
1	100 s	20 ms	50 %	8 %
2	10 s	20 ms	50 %	8 %
3	100 s	20 ms	60 %	7 %
...
358	1 s	90 ms	90 %	-2 %
359	100 s	90 ms	90 %	-3 %
360	10 s	90 ms	90 %	-3 %

Abbildung 6.19 visualisiert die Ergebnisse ohne Reibmoment im dreidimensionalen Raum für eine Glättungszeit von 10 s. Bei einer Vorausschau von 20 ms befindet sich bei der relativen Leistungsreduktion ein Plateau, wohingegen die Ebene bei größeren Werten für die Vorausschau und den Zielladezustand abfällt. Die relativen Bremsenergiereduktionen unterscheiden sich weniger stark voneinander, aber auch hier ergibt sich ein globales Maximum bei einer Vorausschau von 20 ms und einem Zielladezustand von 50 %.

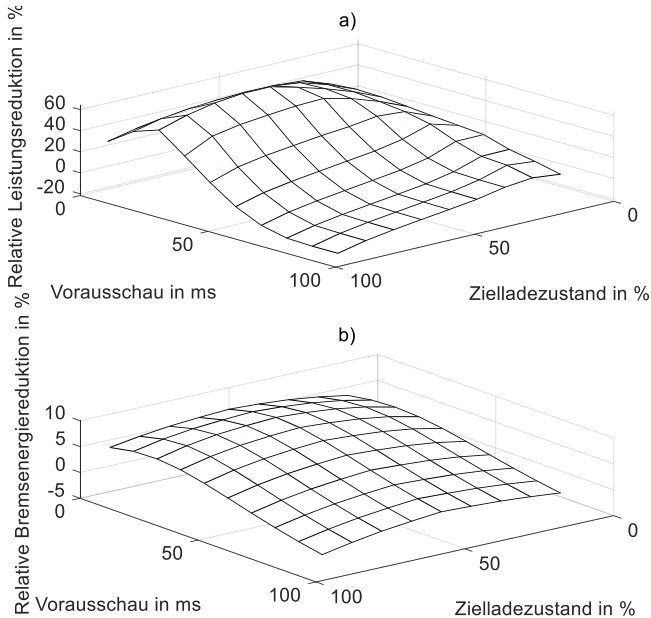


Abbildung 6.19: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion über der Vorausschau und dem Ladezustand für eine Glättungszeit von 10 s ohne Reibmoment im ersten Fallbeispiel.

Abbildung 6.20 vergleicht die relative Leistungs- und Bremsenergiereduktion für unterschiedliche Glättungszeiten und Zielladezustände. Die relative Leistungsreduktion beträgt maximal 64 %. Der Schwungmassenspeicher erreicht die höchste Bremsenergiereduktion von knapp 8 % bei einem Zielladezustand von 50 %, einer Glättungszeit von 100 s und einer Vorausschau von 20 ms (vgl. Tabelle 6.12). Dabei nimmt er 85 % der verfügbaren Bremsenergie des Prozesses auf. Eine Glättungszeit von 0,1 s ist unzureichend und motiviert Glättungszeiten oberhalb von einer Sekunde.

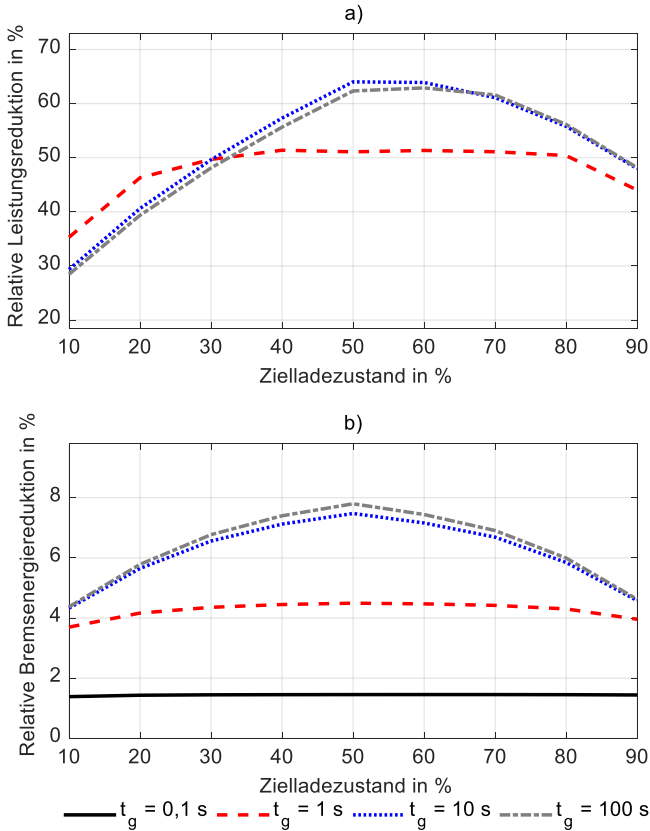


Abbildung 6.20: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und des Zielladezustands für eine Vorausschau von 20 ms ohne Reibmoment im ersten Fallbeispiel.

Abbildung 6.21 stellt die beiden Gütekriterien über der Vorausschau für die vier Glättungszeiten dar. Eine Vorausschau zwischen 10 und 30 ms ermöglicht nennenswerte Leistungsreduktionen bei gleichzeitiger Nutzung von Bremsenergie. Wird der zur Hälfte geladene Speicher bei einer einsekündigen Glättungszeit mit einer Vorausschau von mehr als 50 ms angesteuert, verursacht er allerdings eine Erhöhung der maximalen Gleichrichterleistung um 4 %.

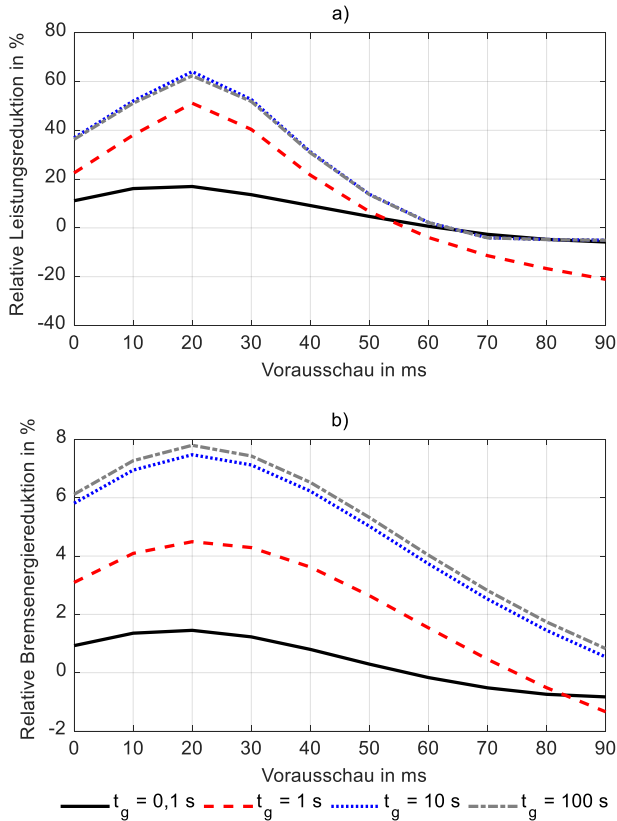


Abbildung 6.21: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und der Vorausschau für einen Zielladezustand von 50 % ohne Reibmoment im ersten Fallbeispiel.

In Abbildung 6.22 bedingt der Verlauf der Speicherleistung ohne Reibmoment einen Ladezustand zwischen 40 und 56 %. Der Zielladezustand von 50 % wieder mittelfristig immer wieder erreicht, sodass die Regelung keine Drehzahlgrenzen überschreitet. Die maximal verfügbare Speicherleistung hängt stets von der Drehzahl bzw. dem Ladezustand ab.

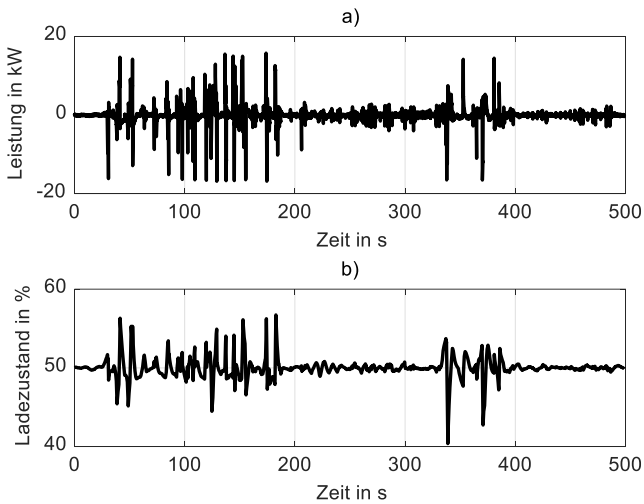


Abbildung 6.22: a) Leistung und b) Ladezustand des Speichers ohne Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladezustand von 50 % im ersten Fallbeispiel.

Abbildung 6.23 zeigt die Gleichrichterleistung vor und nach dem Speichereinsatz für die beste Parameterkombination aus Tabelle 6.11. Der Speichereinsatz führt neben der geringeren vom Versorgungsnetz bezogenen Leistung auch zu einer um 18 V kleineren maximalen Spannungsabweichung vom Sollwert 700 V.

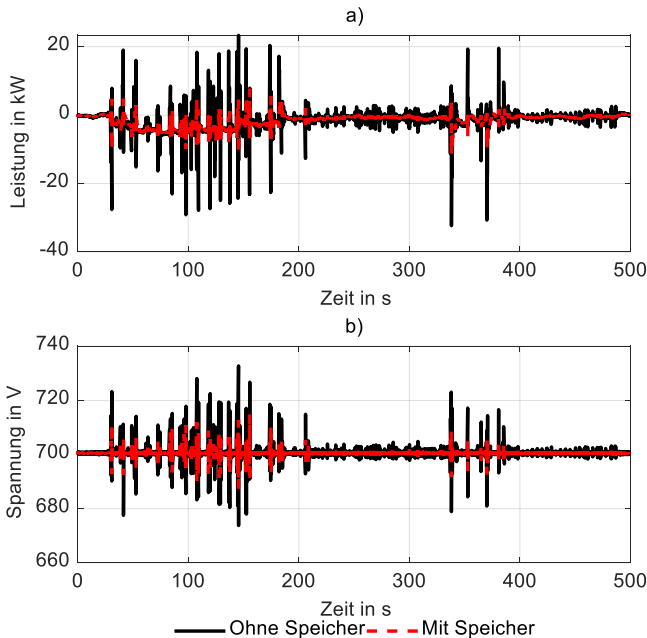


Abbildung 6.23: a) Gleichrichterleistung und b) Zwischenkreisspannung ohne und mit Speicher ohne Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladezustand von 50 % ohne Reibmoment im ersten Fallbeispiel.

Die Energiebilanz des Systems mit und ohne Speicher in Abbildung 6.24 verdeutlicht die Einsparung der Bremsenergie. Unter Vernachlässigung des Reibmoments und der Wirkungsgrade reduziert sich die benötigte Beschleunigungsenergie ungefähr um den Betrag der eingesparten Bremsenergie von knapp 8 %. Die Änderungen der Zwischenkreis- und der Rotationsenergie sind unbedeutend, da die Spannungen und Drehzahlen zu Beginn und Ende der Simulation ähnliche Werte aufweisen.

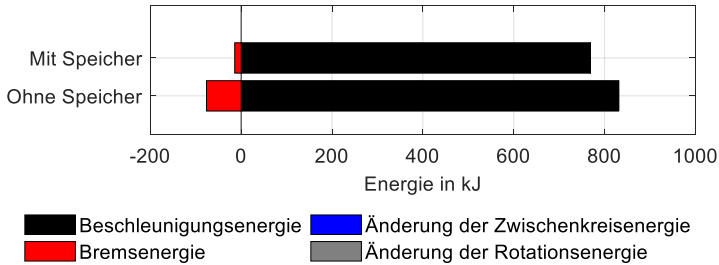


Abbildung 6.24: Energiebilanz der Speicherregelung ohne Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladezustand von 50 % im ersten Fallbeispiel.

Speicherregelung mit Reibmoment

Nun wird das gemessene Reibmoment aus Abschnitt 6.1 im Simulationsmodell aktiviert. Tabelle 6.13 und Tabelle 6.14 listen die besten und schlechtesten Parameterkombinationen für die beiden energetischen Gütekriterien auf. Das Reibmoment reduziert die maximale Leistungsreduktion um 3 % auf 61 %. Die ungünstigsten Parameterkombinationen führen zu Leistungserhöhungen von bis zu 32 %. Mit einer Bremsenergiereduktion von 9 % nutzt der Speicher im besten Fall rund 97 % der insgesamt verfügbaren Bremsenergie. Die leichte Erhöhung auf 1 % bei den untersten Rängen der Bremsenergiereduktion ist auf die kontinuierliche Selbstentladung des Speichers zurückzuführen.

Tabelle 6.13: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Leistungsreduktion der Speicherregelung mit Reibmoment im ersten Fallbeispiel.

Rang	t_g	t_v	SOC_0	$p_{r,stim}$
1	10 s	20 ms	50 %	61 %
2	10 s	20 ms	60 %	60 %
3	100 s	20 ms	50 %	60 %
...
358	1 s	70 ms	90 %	-30 %
359	1 s	90 ms	90 %	-32 %
360	1 s	80 ms	90 %	-32 %

Tabelle 6.14: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für der relativen Bremsenergiereduktion der Speicherregelung mit Reibmoment im ersten Fallbeispiel.

Rang	t_g	t_v	SOC_0	$w_{e,stim}$
1	100 s	20 ms	50 %	9 %
2	10 s	20 ms	50 %	9 %
3	100 s	20 ms	60 %	9%
...
358	0,1 s	80 ms	10 %	1 %
359	1 s	90 ms	10 %	1 %
360	0,1 s	90 ms	10 %	1 %

Im Vergleich zu Abbildung 6.19 weist Abbildung 6.25 vor allem in den Randbereichen nennenswerte Unterschiede auf. Im Allgemeinen ähneln sich die dreidimensionalen Flächen mit und ohne Reibmoment in einem hohen Maße.

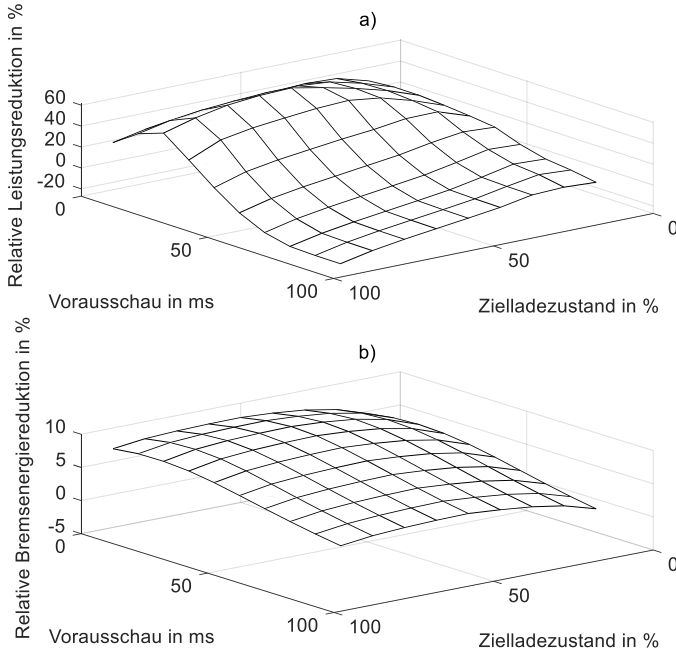


Abbildung 6.25: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion über der Vorausschau und dem Ladezustand für eine Glättungszeit von 10 s mit Reibmoment im ersten Fallbeispiel.

Abbildung 6.26 legt dar, dass ein Zielladezustand zwischen 50 und 60 % für die Leistungs- und Bremsenergiereduktion vorteilhaft ist. Bei höheren Zielladezuständen bzw. Zieldrehzahlen nimmt die Selbstentladung zu, was indirekt wiederum zur Aufnahme von Bremsenergie führt. Glättungszeiten oberhalb von einer Sekunde sind in diesem Fall grundsätzlich sinnvoll.

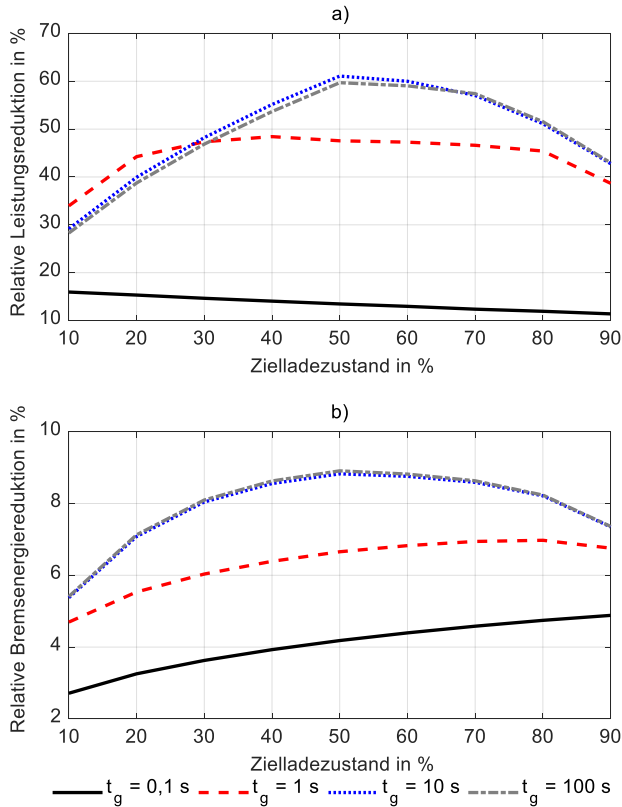


Abbildung 6.26: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und des Zielladezustands für eine Vorausschau von 20 ms mit Reibmoment im ersten Fallbeispiel.

In Abbildung 6.27 wird deutlich, dass eine Vorausschau von 20 ms bei einem Zielladezustand von 50 % die stärksten Reduktionen liefert. Eine Reduktion der Bremsenergie um 9 % und der Gleichrichterspitzenleistung um etwa 60 % gilt als bestes Ergebnis der Simulationen mit aktiviertem Reibmoment. Der Speicher reduziert in diesem Fall die maximale Spannungsabweichung von ihrem Sollwert um 19 V.

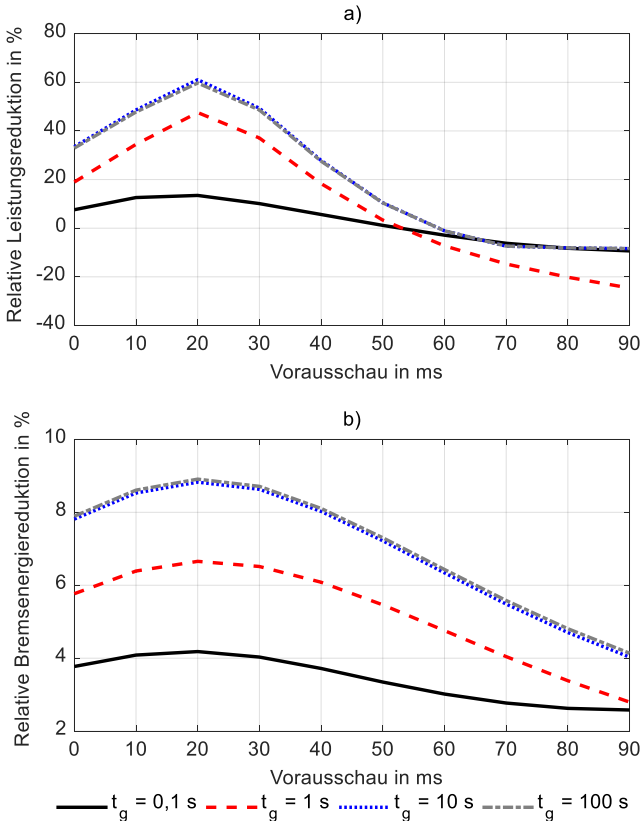


Abbildung 6.27: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und der Vorausschau für einen Zielladezustand von 50% mit Reibmoment im ersten Fallbeispiel.

An dieser Stelle wird auf die Darstellung der Speicherleistung, des Ladezustands, der Gleichrichterleistung und der Zwischenkreisspannung verzichtet, da die Verläufe mit Reibmoment fast identisch zu jenen in Abbildung 6.22 und Abbildung 6.23 sind.

Die Energiebilanz in Abbildung 6.28 ändert sich durch den Einfluss des Reibmoments jedoch in einem hohen Maße. Die Bremsenergie wird zwar fast vollständig durch den Speicher aufgenommen, aber die mittlere Verlustleistung durch Reibung von ca. 1,1 kW führt zu einer 58 % größeren Beschleunigungsenergie.

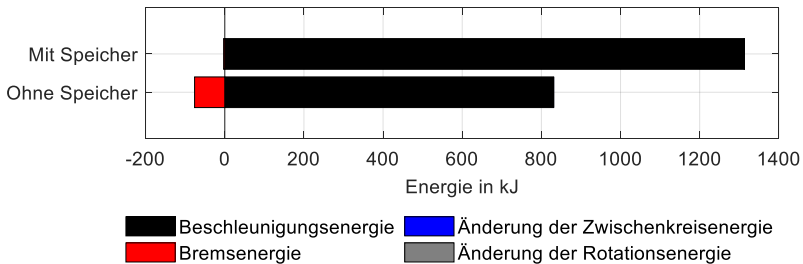


Abbildung 6.28: Energiebilanz der Speicherregelung mit Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladezustand von 50 % im ersten Fallbeispiel.

Der Speicherbetrieb ist hier wegen der Selbstentladung eindeutig unwirtschaftlich, falls nur die Rekuperation als Einsatzoption betrachtet wird. Insgesamt liegen die Erhöhungen der Beschleunigungsenergien bei den 360 Simulationen mit Reibmoment zwischen 13 und 104 %. Die geringste Zunahme der Beschleunigungsenergie von 13 % erfolgt bei einer gleichzeitigen relativen Bremsenergiereduktion von ca. 5 % sowie einer Leistungsreduktion von 28 %. Dies tritt bei einer Glättungszeit von 100 s, einer Vorausschau von 20 ms und einem Zielladezustand von 10 % ein. Der niedrige Zielladezustand bedingt dabei geringere Reibverluste. Der nächste Abschnitt resümiert die Kernergebnisse des ersten Fallbeispiels.

6.3.5 Fazit

Lastprofilerkennung

Sowohl die Anregungsüberwachung als auch die Suchmaschine funktionieren trotz des überlagerten Rauschens zuverlässig. Die Anzahl der erkannten Lastprofile und die Rechenzeit können über die vorab festgelegten Randbedingungen für die Generierung von Prüfsummen und die Unterteilung von Anregungsabschnitten bereits grob vorgegeben werden. Die Vertrauenswürdigkeit der Treffer beträgt im ersten Fallbeispiel nahezu 100 %.

Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters der Industriemaschine

Insgesamt stimmen das Simulationsmodell mit den identifizierten Parametern und das gemessene Verhalten des aktiven Gleichrichters und der Antriebslasten in einem hohen Maße überein. Zeitpuffer zwischen ± 50 ms und ± 500 ms um die Anregungsfenster führen stets zu

validen Ergebnissen. Die Wahl des Anregungsfensters ist für die genaue Identifikation der Zwischenkreiskapazität wichtiger als bei den Reglerparametern. Die Zwischenkreiskapazität wird zwar in einigen Fällen um bis zu 13 % überschätzt, kann jedoch ohnehin durch die Datenblattwerte nur approximiert werden. Verteilte Zwischenkreiskapazitäten der Übertragungselemente oder Kontaktierungsstellen sind nicht Teil des Modells und können für die tolerierbaren Abweichungen verantwortlich sein. Die Mediane der Parameterschätzwerte weichen jeweils stärker von dem Datenblattwert bzw. der tatsächlichen Reglereinstellung ab als bei dem Lösungsweg über die maximale Anpassungsgüte von knapp 90 %.

Reglerentwurf

Es ist ersichtlich, dass die Lastimpedanz Z_l einen stärkeren Einfluss auf die Phasenreserve hat als die Speicherimpedanz Z_s . Dies liegt vor allem an der größeren Kapazität der Antriebsumrichter gegenüber jener des Speichers. Liegt die Last auf dem Niveau der Bemessungsleistung des aktiven Gleichrichters fällt die Phasenreserve in manchen Fällen unter 30° , was das Stabilitätskriterium verletzt. Da die summierte Lastkapazität C_l von insgesamt 14 baugleichen Antriebsumrichtern zur Leistungswandlung von 80 kW durch die Einschränkung laut Datenblatt des aktiven Gleichrichters ohnehin nicht erlaubt wäre, sind diese Ergebnisse unkritisch für die Stabilität der Regelung. Die Trajektorienvorgabe basiert auf dem gemessenen Laststrom, was zur Überschätzung der Bremsenergiepotenziale führt. Die Lade- und Entladevorgänge des Zwischenkreises sind hier noch nicht Teil der energetischen Betrachtung. Die statischen Trajektorienvorgaben sind plausibel und ermöglichen das Einhalten der Ladezustandsgrenzen sowie der maximalen Speicherleistung.

Speicherregelung

Eine Vorausschau von 20 ms liefert die besten Ergebnisse unabhängig von dem Reibmoment des Speichers. Dieser Wert stimmt ungefähr mit den Dynamikinformationen des Speicherherstellers überein. Eine Glättungszeit oberhalb von einer Sekunde ist sinnvoll. Ein Zielladezustand von 50 % begünstigt die Glättung des eher symmetrischen Lastprofils durch den Speicher. Das Verhältnis aus hohen positiven und negativen Lastspitzen und einer niedrigen mittleren Last begünstigt den Speichereinsatz zur Lastkappung. Das Lastprofil offeriert ein Potenzial zur relativen Bremsenergiereduktion von 8 %. Aufgrund der immensen,

drehzahlabhängigen Reibverluste des Speichers kommt die singuläre Betrachtung der Einsatzoption „Rekuperation von Bremsenergie“ jedoch unter Realbedingungen nicht infrage.

Der nächste Abschnitt behandelt das zweite Fallbeispiel.

6.4 Fallbeispiel Holzbearbeitungsmaschine

Das Vorgehen aus Kapitel 5 wird analog zum ersten nun auch im zweiten Fallbeispiel mit Diodengleichrichter und Lastprofil einer Holzbearbeitungsmaschine angewandt. Zunächst erfolgt die Lastprofilerkennung.

6.4.1 Lastprofilerkennung

Das Lastprofil weist eine Länge von 70 s auf. Abbildung 6.29 zeigt die Auswirkungen der Savitzky-Golay-Filterung der um den Faktor zehn vereinfachten Messdaten mit einer Ordnung von 1 und einer halben Rahmenbreite von 49.

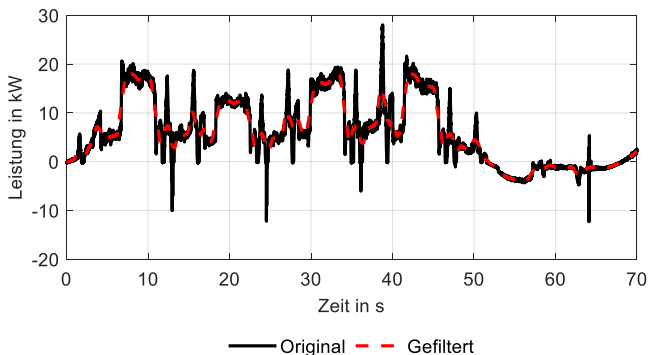


Abbildung 6.29: Originale und mit Savitzky-Golay-Filter geglättete Messdaten im zweiten Fallbeispiel.

Abbildung 6.30 illustriert die Zwischenkreisspannung, die binäre Anregung, die Inaktivitätszeit und das resultierende Auslösesignal. Die Bremsvorgänge der Antriebslasten bedingen in regelmäßigen Abständen die Anregung der Zwischenkreisspannung. Die kritische Inaktivitätszeit für die Anregungsüberwachung und das Hochsetzen des Auslösesignals beträgt selten mehr als zehn Sekunden. Deshalb wird die kritische Inaktivitätszeit im zweiten

Fallbeispiel auf diesen Grenzwert festgelegt. Auf das initiale Auslösesignal folgen acht weitere steigende Flanken.

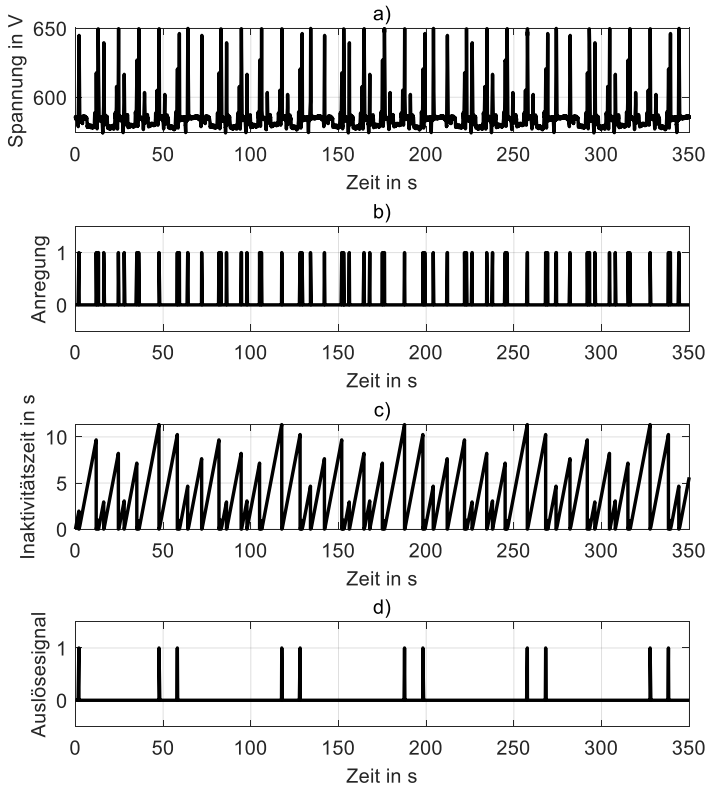


Abbildung 6.30: Lastprofilerkennung im zweiten Fallbeispiel. a) Zwischenkreisspannung am Gleichrichter, b) Anregung, c) Inaktivitätszeit, d) Auslösesignal.

Da im zweiten Fallbeispiel die Messtechnik identisch ist, werden die Grundeinstellung ohne Rauschen sowie die Variation mit 0,5 % Rauschen im Rahmen der Lastprofilerkennung untersucht. Abbildung 6.31 zeigt die elektrische Leistung, die erkannte Lastprofilnummer und die Vertrauenswürdigkeit der Suchmaschine. Im Fall ohne Rauschen wird ab dem zweiten Lastprofilzyklus eine Vertrauenswürdigkeit von durchgehend 100 % erreicht. Durch den Einfluss des addierten Rauschens sinkt die Vertrauenswürdigkeit auf ca. 83 %, liegt aber

weiterhin deutlich über den geforderten 10 %. Der Algorithmus erkennt nach dem Lastprofil mit der Nr. 1 generell für ca. 20 s kein Lastprofil und gibt daher eine null aus. In diesem Abschnitt weist das Lastprofil zu wenige Informationen für die Erkennung auf. Dies ist jedoch unkritisch, da die zuvor erkannte Lastprofilnummer durch den Algorithmus auch statisch gehalten werden könnte bis wiederum ein anderes Lastprofil erkannt wird.

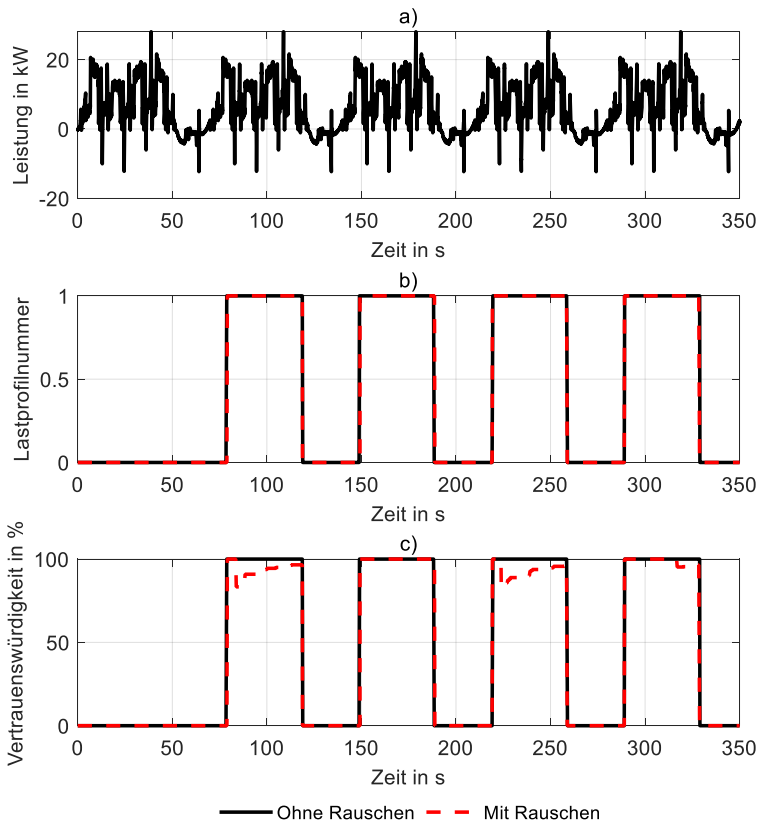


Abbildung 6.31: Lastprofilerkennung im zweiten Fallbeispiel. a) Leistung, b) erkannte Lastprofilnummer, c) Vertrauenswürdigkeit ohne und mit 0,5 % Rauschen.

Im nächsten Abschnitt folgt die Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters mit Diodengleichrichter.

6.4.2 Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters der Industriemaschine

Abbildung 6.32 stellt den Datensatz der Holzbearbeitungsmaschine dar. Die negativen Anteile des gemessenen Laststroms fließen in den Zwischenkreis zurück, wo sie die Kondensatoren laden und ab der Schwelle von 650 V im Bremswiderstand in Wärme gewandelt werden. Als Anregungsbereiche dienen alle Ausschnitte der Zwischenkreisspannung unterhalb der mittleren Spannung von ca. 585 V. Der statistische Ansatz mit drei Standardabweichungen aus dem ersten Fallbeispiel zur Bestimmung der Anregungsfenster ist hier aufgrund der Nichtlinearität der Dioden nicht zielführend.

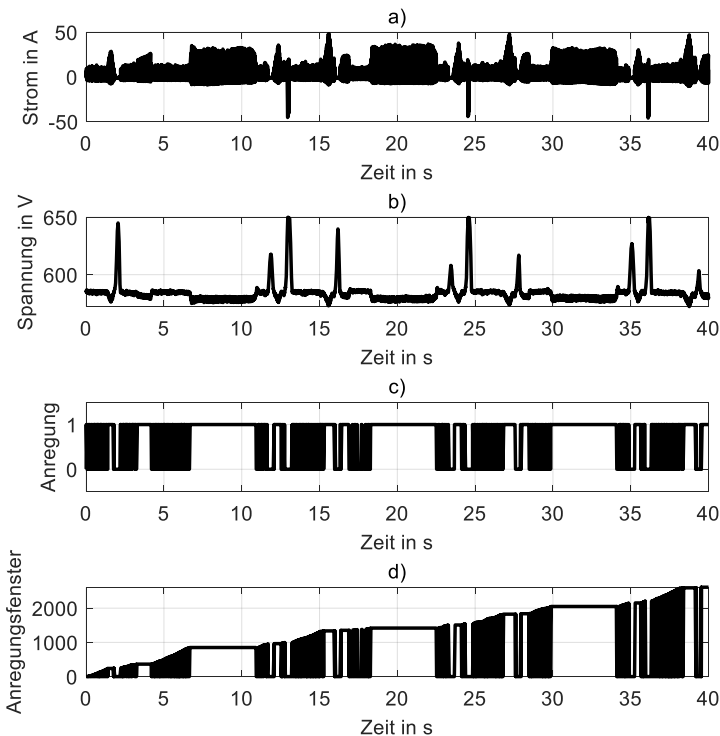


Abbildung 6.32: Skalierter Datensatz der Holzbearbeitungsmaschine mit a) gemessenem Laststrom, b) gemessener Zwischenkreisspannung, c) binärer Anregung und d) Anregungsfenstern.

Zunächst stellt Abbildung 6.33 die Anpassungsgüte über den Anregungsfenstern für die Grundeinstellung $t_{ex} = 50 \text{ ms}$ dar. Die Anpassungsgüte erreicht maximal 67,6 % im 2.144. von 2.612 Anregungsfenstern. Im Mittel beträgt sie 21,0 %.

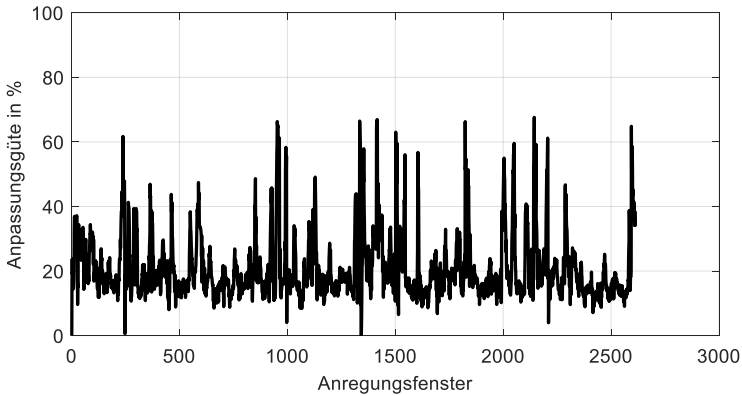


Abbildung 6.33: Anpassungsgüte der Parameterschätzung über den Anregungsfenstern für $t_{ex} = 50 \text{ ms}$ im zweiten Fallbeispiel.

In Tabelle 6.15 erfolgt die Gegenüberstellung der Parameterschätzwerte für die Zwischenkreiskapazitäten und die Quasistatikkonstante. Die Parameterschätzung auf Basis der Übertragungsfunktion über kleine Signalausschnitte mit ca. 100 Stützpunkten führt zu sehr guten Ergebnissen bei den Zwischenkreiskapazitäten bei relativen Abweichungen von ca. 20 %. Über die Medianlösung der Schätzparameter ergibt sich ein Fehler von ca. 46 %.

Tabelle 6.15: Relative Abweichungen x_r der Parameterschätzwerte \tilde{X} von den echten Parameterwerten X des Diodengleichrichters und der Antriebslasten für $t_{ex} = \pm 50 \text{ ms}$.

Parameter	X	\tilde{X}_{am}	x_{ram}	\tilde{X}_{med}	x_{rmed}
Zwischenkreiskapazität C	4,40 mF	5,29 mF	20,3 %	6,43 mF	46,4 %
Zwischenkreiskapazität C_g	0,50 mF*	0,60 mF	20,3 %	0,72 mF	46,4 %
Zwischenkreiskapazität C_l	3,90 mF*	4,69 mF	20,3 %	5,71 mF	46,4 %
Quasistatikkonstante K_d	-	0,69 A/V	-	1,10 A/V	-

*Datenblattwerte

Abbildung 6.34 vergleicht die Zeitverläufe der Messdaten und des simulierten Modells für den Medianansatz. Die relative Energieabweichung beläuft sich auf 0,1 % bzw. 132 J. Die maximale Spannungsabweichung von 60 V entsteht vor allem zu Beginn eines Bremsvorgangs, da die Zwischenkreiskapazitäten überschätzt werden. Wird der Lösungsweg der maximalen Anpassungsgüte zu Rate gezogen, ergeben sich Abweichungen von 61 V sowie -0,5 % bzw. -563 J. Die Medianlösung der Quasistatistikkonstante ist somit genauer als der Parameterschätzwert, welcher über die maximale Anpassungsgüte bestimmt worden ist.

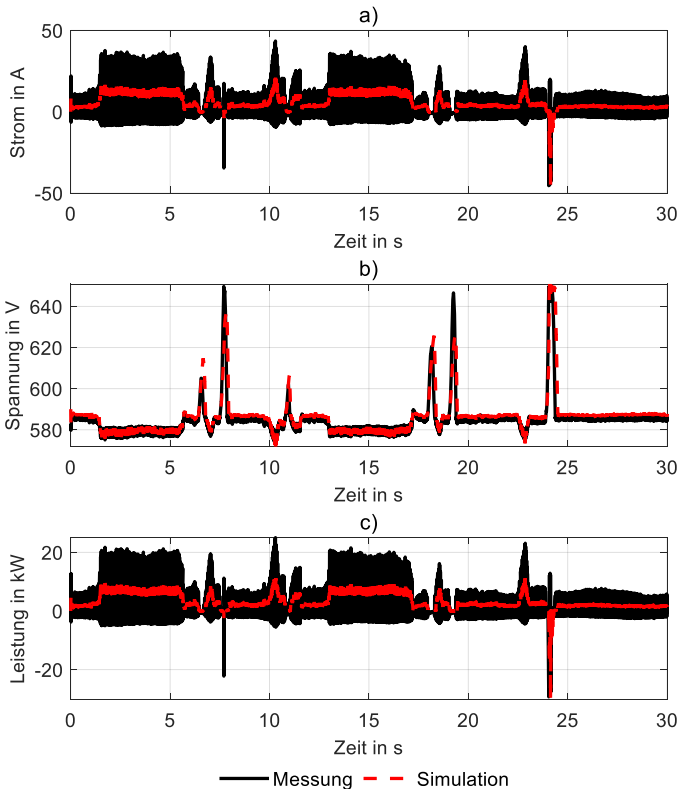


Abbildung 6.34: Vergleich der Testdaten der Messung und der Simulation a) des Stroms, b) der Spannung und c) der Leistung im Zeitbereich mit den Medianparameterwerten und $t_{ex} = 50 \text{ ms}$ im zweiten Fallbeispiel.

Abbildung 6.35 illustriert die Anpassungsgüte über den Anregungsfenstern bei einer beidseitigen Extrazeit um den Anregungszeitpunkt von 500 ms. Die maximale Anpassungsgüte von 80 % wird im 1.560. von 2612 Anregungsfenstern erreicht. Im Mittel liegt sie bei 47 %.

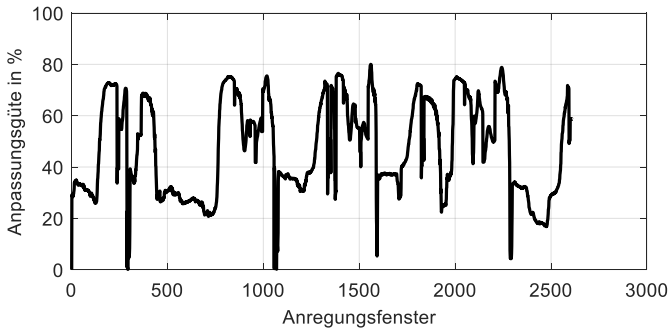


Abbildung 6.35: Anpassungsgüte der Parameterschätzung über den Anregungsfenstern für $t_{ex} = 500$ ms im zweiten Fallbeispiel.

Tabelle 6.16 veranschaulicht die relativen Abweichungen der Parameterschätzwerte von den echten Parameterwerten für die größte erzielte Anpassungsgüte sowie die Medianlösung. Die Kapazitäten der Umrichter werden bei beiden Lösungsvarianten überschätzt. Der Schätzwert der Quasistatistikkonstante aus der maximalen Anpassungsgüte führt dabei zu einer instabilen Simulation und wird daher verworfen. Über den Median der Schätzwerte resultiert für K_d ca. 1 A/V.

Tabelle 6.16: Relative Abweichungen x_r der Parameterschätzwerte \tilde{X} von den echten Parameterwerten X des Diodengleichrichters und der Antriebslasten für $t_{ex} = \pm 500$ ms.

Parameter	X	\tilde{X}_{am}	x_{ram}	\tilde{X}_{med}	x_{rmed}
Zwischenkreiskapazität C	4,40 mF	7,13 mF	62,2 %	6,43 mF	46,4 %
Zwischenkreiskapazität C_g	0,50 mF*	0,80 mF	62,2 %	0,72 mF	46,4 %
Zwischenkreiskapazität C_l	3,90 mF*	6,33 mF	62,2 %	5,71 mF	46,4 %
Quasistatistikkonstante K_d	-	0,12 A/V	-	1,06 A/V	-

*Datenblattwerte

Abbildung 6.36 legt die Testdaten der Messung und der Simulation auf Grundlage der Medianparameterwerte übereinander. Die Messdaten weisen erneut eine höhere Rauschamplitude als die Simulationsdaten auf. Dies liegt wiederum an der vereinfachten Modellhypothese der parallelgeschalteten Impedanz. Die energetische Abweichung zwischen Modell und Messung ist mit -8 J vernachlässigbar klein. Die maximale Spannungsabweichung beträgt aufgrund der zu hoch geschätzten Kapazität kurzzeitig bis zu 61 V . Der hohe Kapazitätswert bedingt zudem, dass die Bremschopperschwelle nicht jedes Mal erreicht wird. Insgesamt weist das bestimmte Modell eine ausreichende Genauigkeit auf.

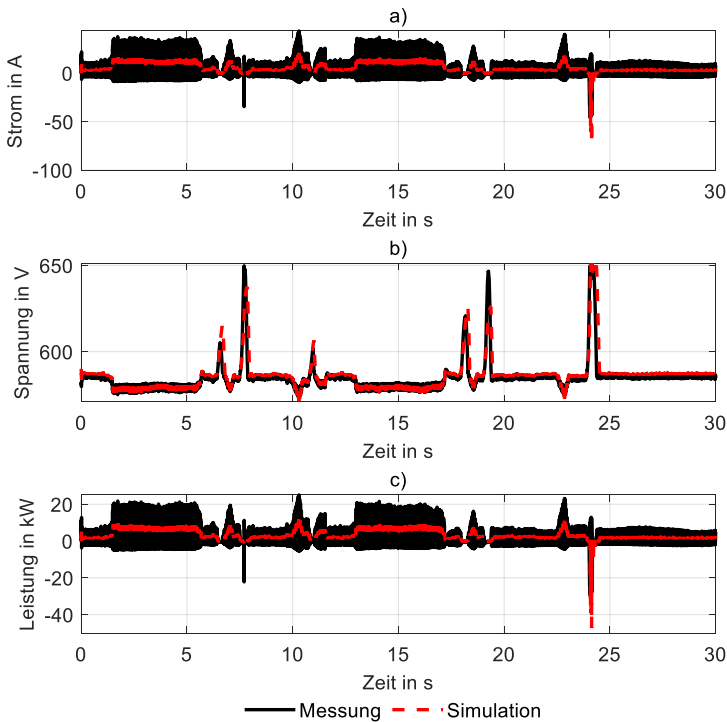


Abbildung 6.36: Vergleich der Testdaten der Messung und der Simulation a) des Stroms, b) der Spannung und c) der Leistung im Zeitbereich mit den Medianparameterwerten und $t_{ex} = 500 \text{ ms}$ im zweiten Fallbeispiel.

Im nächsten Abschnitt erfolgt der Reglerentwurf des zweiten Fallbeispiels.

6.4.3 Reglerentwurf

Die impedanzbasierte Stabilitätsprüfung und die Trajektorienvorgabe bilden gemeinsam den Reglerentwurf. Zunächst wird die Stabilität im zweiten Fallbeispiel geprüft.

Impedanzbasierte Stabilitätsprüfung

Tabelle 6.17 gibt Auskunft zu den untersuchten Parameterkombinationen im zweiten Fallbeispiel. Da der Diodengleichrichter kurzzeitig seine doppelte Bemessungsleistung aufbringen kann, werden 73 kW als obere Grenze der Prüfung definiert. Dies entspricht ca. dem 2,5-fachen der maximal gemessenen Leistung von knapp 30 kW. Das Datenblatt enthält im zweiten Fallbeispiel keine Informationen zur erlaubten Zwischenkreiskapazität der Antriebslasten.

Tabelle 6.17: Parametervariation der impedanzbasierten Stabilitätsprüfung im zweiten Fallbeispiel.

Parameter	Standard	Variation
Anzahl der Verbraucher l	1	2
Lastkapazität C_l	3,9 mF	7,8 mF
Verbraucherleistung P_l	30 kW	0 bis 73 kW in 1 kW Schritten
Speicherleistung P_s	-23 kW	-50 bis 50 kW in 1 kW Schritten

Zunächst wird wieder das Frequenzverhalten der Netzteilnehmer mittels Bode-Diagrammen analysiert. Der Schnittpunkt der Beträge von Z_{e1} und Z_{v1} in Abbildung 6.37 tritt bei 45,52 Hz und -1,04 dBΩ bzw. 0,89 Ω auf. Bei diesem Parameterpaar aus Speicher- und Verbraucherleistung beträgt die Phasenreserve 97,23°. Die Quasistatikkonstante ist der Grund dafür, dass das Frequenzverhalten des Diodengleichrichters jenem einer Konstantleistungslast (CPL) ähnelt.

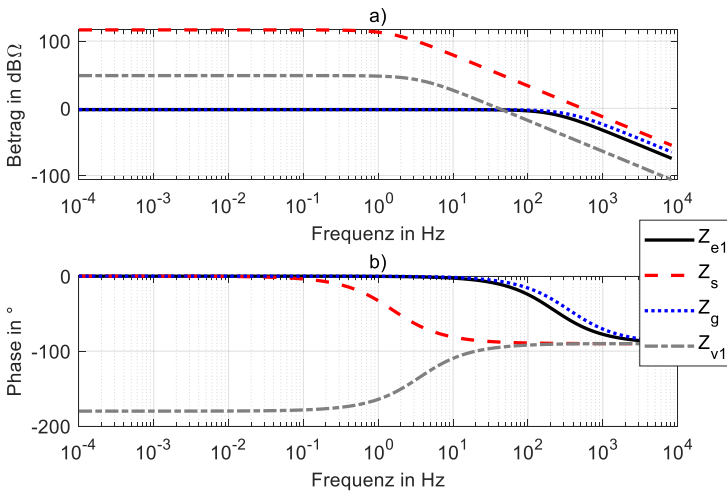


Abbildung 6.37: Einfluss der Parallelschaltung der Speicherimpedanz Z_s mit der Gleichrichterimpedanz Z_g auf a) den Betrag und b) die Phase der Erzeugerimpedanz Z_{e1} für das Entladen des Speichers ($P_s = -1 \text{ kW}$) und das Holzbearbeitungsmaschinenlastprofil ($P_l = 30 \text{ kW}$) im zweiten Fallbeispiel.

In Abbildung 6.38 bestätigt sich die große Stabilitätsreserve im Entlademodus. Die Phasenreserve nimmt Werte zwischen $97,02^\circ$ und $101,62^\circ$ an. Die hohe Phasenreserve resultiert aus dem vernachlässigbaren Zeitverhalten der Dioden und dem nicht vorhandenen Integralanteil des Spannungsreglers.

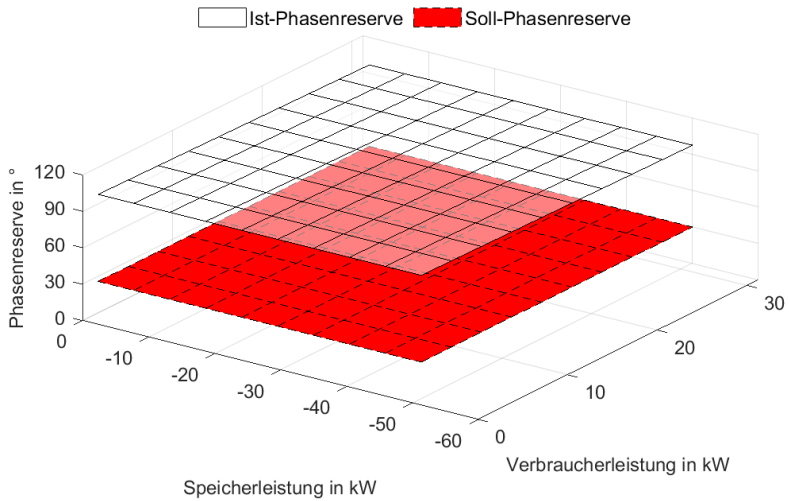


Abbildung 6.38: Ist-Phasenreserve PM und Soll-Phasenreserve PM^* als Stabilitätsebenen in Abhängigkeit der Verbraucherleistung P_t und der Speicherleistung P_s für das Entladen des Speichers und das Holzbearbeitungsmaschinenlastprofil im zweiten Fallbeispiel.

Abbildung 6.39 zeigt den Fall für das Laden des Speichers mit 50 kW unter Last. Die Phasenreserve beläuft sich auf $84,39^\circ$ und der Schnittpunkt wird bei 40,60 Hz und $-0,89 \text{ dB}\Omega$ bzw. $0,90 \Omega$ erreicht.

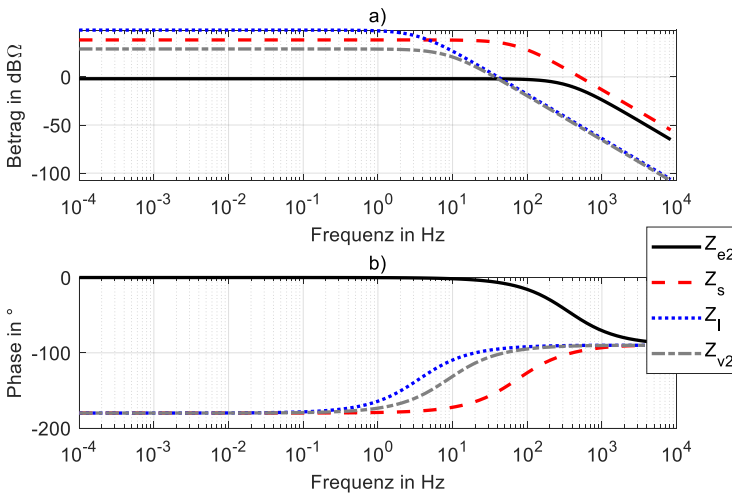


Abbildung 6.39: Einfluss der Parallelschaltung der Speicherimpedanz Z_s mit der Lastimpedanz Z_l auf a) den Betrag und b) die Phase der Verbraucherimpedanz Z_{v2} für das Laden des Speichers ($P_s = 50 \text{ kW}$) und das Holzbearbeitungsmaschinenlastprofil ($P_l = 30 \text{ kW}$) im zweiten Fallbeispiel.

Abbildung 6.40 spannt die Stabilitätsebene für das Laden des Speichers auf. Die Phasenreserven liegen zwischen $84,18^\circ$ und $96,47^\circ$.

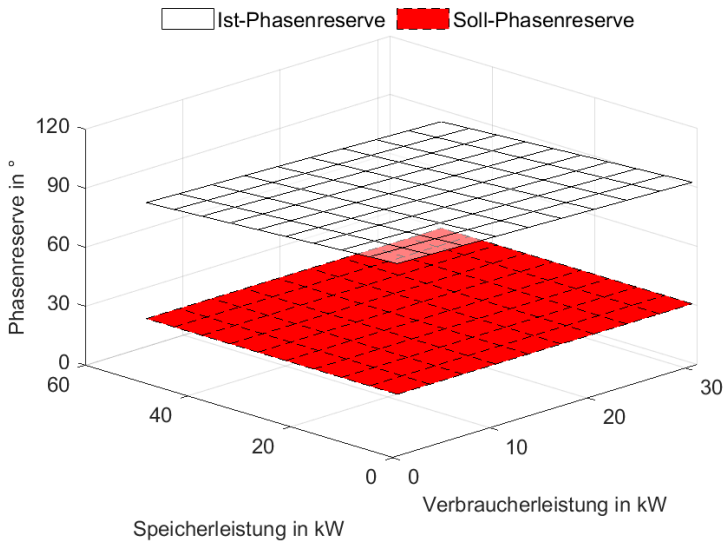


Abbildung 6.40: Ist-Phasenreserve PM und Soll-Phasenreserve PM^* als Stabilitätsebenen in Abhängigkeit der Verbraucherleistung P_l und der Speicherleistung P_s für das Laden des Speichers und das Holzbearbeitungsmaschinenlastprofil im zweiten Fallbeispiel.

Tabelle 6.18 fasst weitere Ergebnisse der impedanzbasierten Stabilitätsprüfung im zweiten Fallbeispiel zusammen. Der Diodengleichrichter garantiert hohe Phasenreserven oberhalb von 70° , obwohl seine Zwischenkreiskapazität niedrig ist. Das fehlende Zeitverhalten (vgl. aktiver Gleichrichter) kommt der Stabilität zugute.

Tabelle 6.18: Schnittpunktfrequenz f_x , Schnittpunktbetrag $|Z_x|_{dB}$ bzw. $|Z_x|$ und minimalen Phasenreserve PM_{min} für Kombinationen der Verbraucherleistung P_l und der Speicherleistung P_s im zweiten Fallbeispiel.

P_l	P_s	f_x$	|Z_x|_{dB}$	$|Z_x|$	PM_{min}
30 kW	0 kW	45,35 Hz	-1,01 dB Ω	0,89 Ω	97,20°
30 kW	-1 kW	45,52 Hz	-1,04 dB Ω	0,89 Ω	97,23°
30 kW	-23 kW	48,10 Hz	-1,52 dB Ω	0,84 Ω	97,34°
30 kW	-50 kW	51,40 Hz	-2,09 dB Ω	0,79 Ω	97,55°
30 kW	0 kW	41,59 Hz	-0,89 dB Ω	0,90 Ω	92,21°
30 kW	1 kW	41,51 Hz	-0,89 dB Ω	0,90 Ω	92,04°
30 kW	23 kW	41,21 Hz	-0,89 dB Ω	0,90 Ω	88,64°
30 kW	50 kW	40,60 Hz	-0,89 dB Ω	0,90 Ω	84,39°
73 kW	0 kW	21,94 Hz	-0,88 dB Ω	0,90 Ω	84,59°
73 kW	-1 kW	21,99 Hz	-0,90 dB Ω	0,90 Ω	84,60°
73 kW	-23 kW	23,32 Hz	-1,39 dB Ω	0,85 Ω	85,20°
73 kW	-50 kW	24,97 Hz	-1,96 dB Ω	0,80 Ω	85,84°
73 kW	0 kW	21,07 Hz	-0,85 dB Ω	0,91 Ω	82,27°
73 kW	1 kW	21,03 Hz	-0,85 dB Ω	0,91 Ω	82,10°
73 kW	23 kW	20,73 Hz	-0,84 dB Ω	0,91 Ω	78,61°
73 kW	50 kW	20,24 Hz	-0,84 dB Ω	0,91 Ω	74,23°

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass im zweiten Fallbeispiel ebenfalls keine Einschränkungen des Speicherbetriebs notwendig sind, da in allen relevanten Betriebspunkten eine große Stabilitätsreserve gegeben ist. Im nächsten Abschnitt folgt die Trajektorienvorgabe des zweiten Fallbeispiels.

Trajektorienvorgabe

Tabelle 6.19 und Tabelle 6.20 fassen die besten und schlechtesten Parameterkombinationen für die Gütekriterien der statischen Trajektorienvorgabe zusammen. Die Leistung kann statisch um bis zu 73 % reduziert werden, während die Bremsenergie ein Potenzial von über 14 % aufweist. Ein hoher Start- und Zielladezustand begünstigt die Gütekriterien. Zur

Erinnerung sei darauf hingewiesen, dass sich die Gütekriterien der statischen Trajektorienvorgabe auf die gemessene Verbraucherleistung beziehen und nicht auf die DC-Leistung des Gleichrichters. Die negativen Bremsleistungen interagieren zuerst mit dem Zwischenkreis, bevor sie in den Bremswiderstand oder Speicher gelangen können.

Tabelle 6.19: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Leistungsreduktion der statischen Trajektorienvorgabe im zweiten Fallbeispiel.

Rang	t_g	SOC_0	$p_{r,stat}$
1	10 s	90 %	73 %
2	100 s	90 %	73 %
3	1 s	90 %	73 %
...
34	100 s	10 %	26 %
35	1 s	10 %	25 %
36	0,1 s	10 %	25 %

Tabelle 6.20: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Bremsenergiereduktion der statischen Trajektorienvorgabe im zweiten Fallbeispiel.

Rang	t_g	SOC_0	$w_{e,stat}$
1	100 s	90 %	14 %
2	10 s	90 %	14 %
3	100 s	80 %	14 %
...
34	0,1 s	30 %	13 %
35	0,1 s	20 %	13 %
36	0,1 s	10 %	13 %

Abbildung 6.41 unterstreicht die Vorteilhaftigkeit hoher Ladezustände im Hinblick auf die Gütekriterien. Für eine Glättungszeit von 0,1 s fallen die Gütekriterien leicht ab.

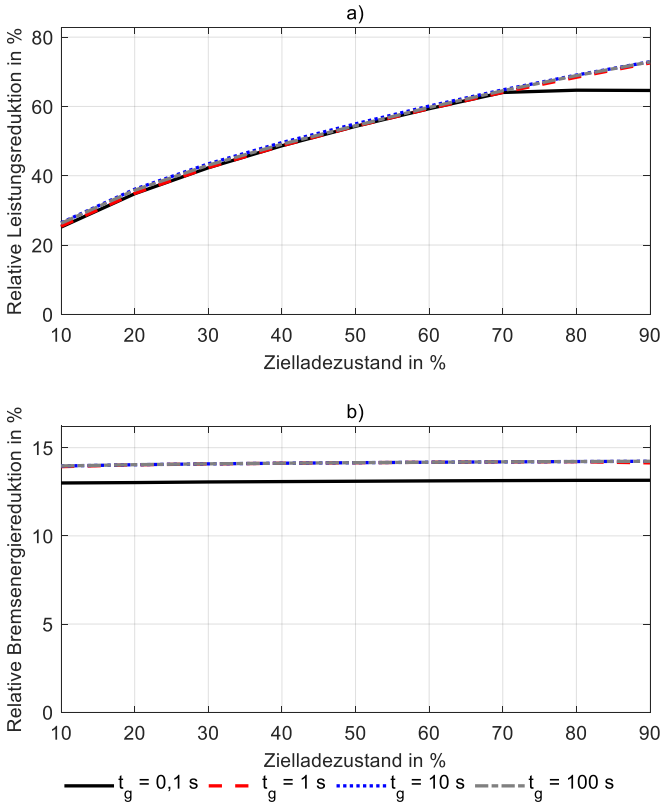


Abbildung 6.41: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion bei einer statischen Trajektorienvorgabe in Abhängigkeit der Glättungszeit und des Zielladezustands im zweiten Fallbeispiel.

Abbildung 6.42 verdeutlicht, dass der Speicher nur zu wenigen Zeitpunkten seine Maximalleistung aufbringen muss. Der Ladezustand schwankt um weniger als 2 % um den Sollwert. Die wiederkehrenden Fräsvorgänge der Holzbearbeitungsmaschine spiegeln sich im Ladezustandsverlauf des Speichers wider.

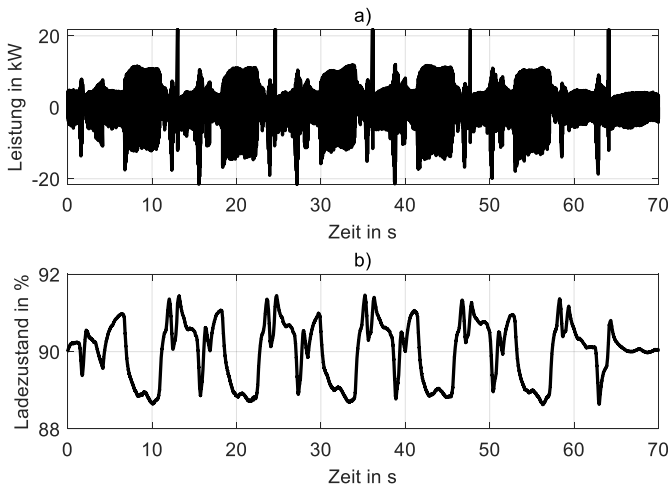


Abbildung 6.42: a) Leistung und b) Ladezustand des Speichers bei einer statischen Trajektorienvorgabe für eine Glättungszeit von 10 s und einen Zielladezustand von 90 % im zweiten Fallbeispiel.

In Abbildung 6.43 ist der Einfluss des Speichers auf die vom Netz bezogene Verbraucherleistung für eine Glättungszeit von 10 s und einen Zielladezustand von 90 % zu sehen. Die entworfene Speichertrajektorie sorgt dafür, dass Brems- und Beschleunigungsvorgänge der Last zum Netz hin abgedämpft werden. Abbildung 6.44 resümiert die Energiebilanz der statischen Trajektorienvorgabe für die beste Parameterkombination aus Tabelle 6.19. Die vom Speicher aufgenommene Bremsenergie reduziert die bezogene Beschleunigungsenergie im gleichen Maß. Im nächsten Abschnitt erfolgen dynamische Simulationen der Speicherregelung ohne und mit Reibmoment.

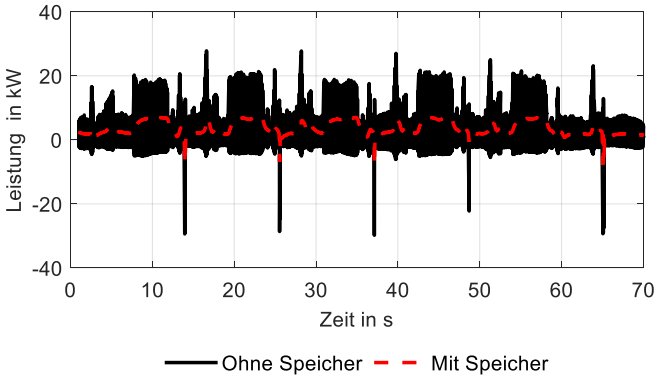


Abbildung 6.43: Verbraucherleistung ohne und mit Speicher auf Basis der statischen Trajektorienvorgabe für eine Glättungszeit von 10 s und einen Zielladezustand von 90 % ohne Vorausschau und Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.

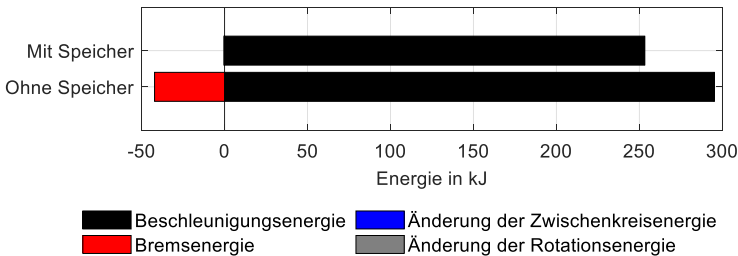


Abbildung 6.44: Energiebilanz der statischen Trajektorienvorgabe für eine Glättungszeit von 10 s und einen Zielladezustand von 90 % im zweiten Fallbeispiel.

6.4.4 Speicherregelung

Zunächst sind die Simulationen ohne Reibmoment an der Reihe.

Speicherregelung ohne Reibmoment

Laut Tabelle 6.21 reduziert der Speicher die Leistung um bis zu 38 %. Die maximale relative Bremsenergiereduktion in Tabelle 6.22 beträgt aufgrund weniger Bremsvorgänge und einer hohen Eingriffsschwelle (s. 650 V) des Bremschoppers nur ca. 1 %. Dies entspricht der verfügbaren Bremsenergie des Prozesses. Dieser Wert wird von mehr als drei

Parameterkombinationen erreicht. Eine hohe Vorausschau sowie eine niedrige Glättungszeit wirken sich negativ auf die Gütekriterien aus.

Tabelle 6.21: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Leistungsreduktion der Speicherregelung ohne Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.

Rang	t_g	t_v	SOC_0	$p_{r,sim}$
1	10 s	20 ms	50 %	38 %
2	10 s	10 ms	50 %	37 %
3	100 s	10 ms	50 %	37 %
...
358	0,1 s	60 ms	80 %	0 %
359	0,1 s	60 ms	90 %	0 %
360	0,1 s	80 ms	90 %	0 %

Tabelle 6.22: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für der relativen Bremsenergiereduktion der Speicherregelung ohne Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.

Rang	t_g	t_v	SOC_0	$w_{e,sim}$
1	10 s	20 ms	50 %	1 %
2	10 s	10 ms	50 %	1 %
3	100 s	10 ms	50 %	1 %
...
358	0,1 s	90 ms	50 %	0 %
359	0,1 s	90 ms	40 %	0 %
360	1 s	90 ms	90 %	0 %

Die dreidimensionalen Ebenen in Abbildung 6.45 zeigen die beiden Gütekriterien in Abhängigkeit der Vorausschau und des Zielladezustands bei einer Glättungszeit von 10 s. Der Lastkappungsalgorithmus weist bei 50 % Zielladezustand aufgrund der beidseitigen Flexibilität in Verbindung mit einer Vorausschau von 10 bis 20 ms die besten Ergebnisse auf (vgl. Tabelle 6.21).

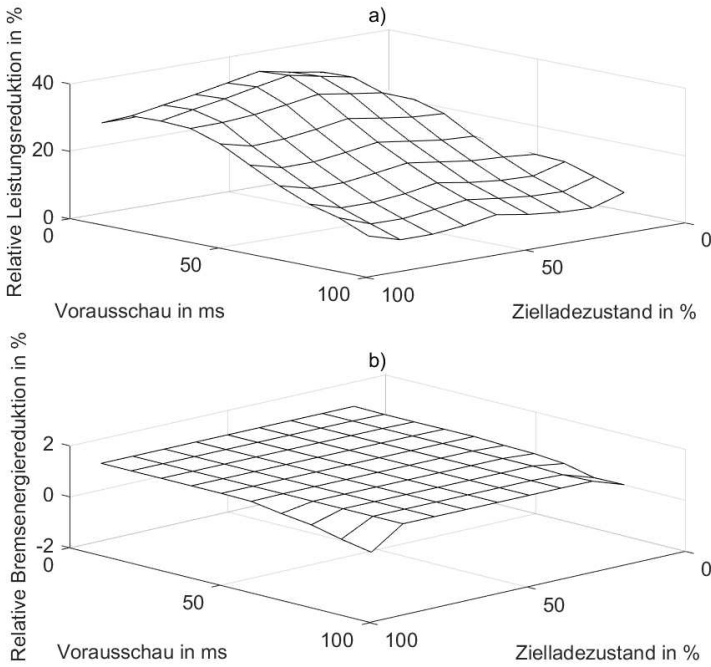


Abbildung 6.45: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion über der Vorausschau und dem Ladezustand für eine Glättungszeit von 10 s ohne Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.

Abbildung 6.46 und Abbildung 6.47 präsentieren den Schnitt entlang der Zielladezustands- und der Vorausschauachse für vier unterschiedliche Glättungszeiten. Eine Glättungszeit oberhalb von 1 s stellt sich als sinnvoll heraus. Es gibt nur eine geringe Abweichung zwischen den Ergebnissen bei Glättungszeiten von 10 s und 100 s.

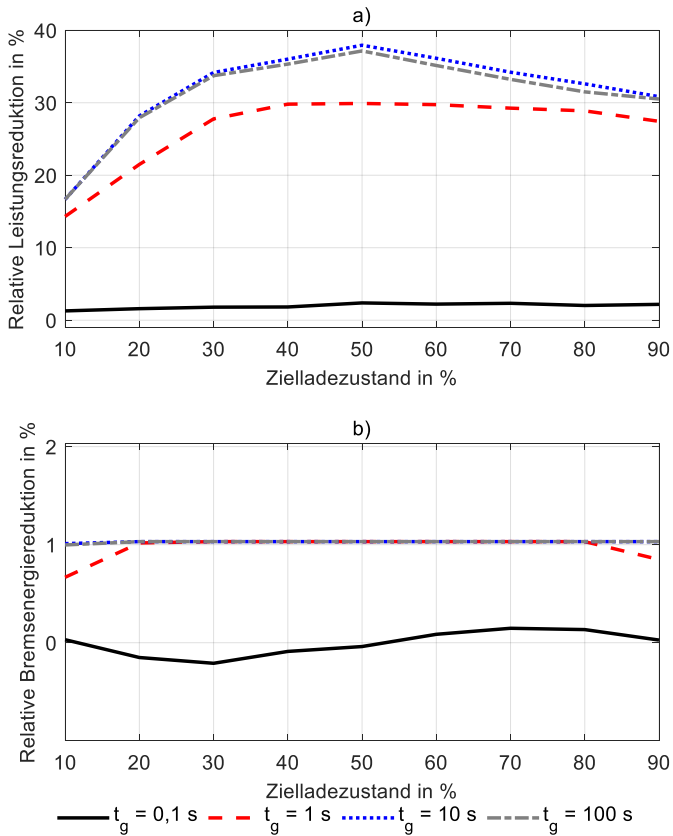


Abbildung 6.46: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und des Zielladezustands für eine Vorausschau von 20 ms ohne Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.

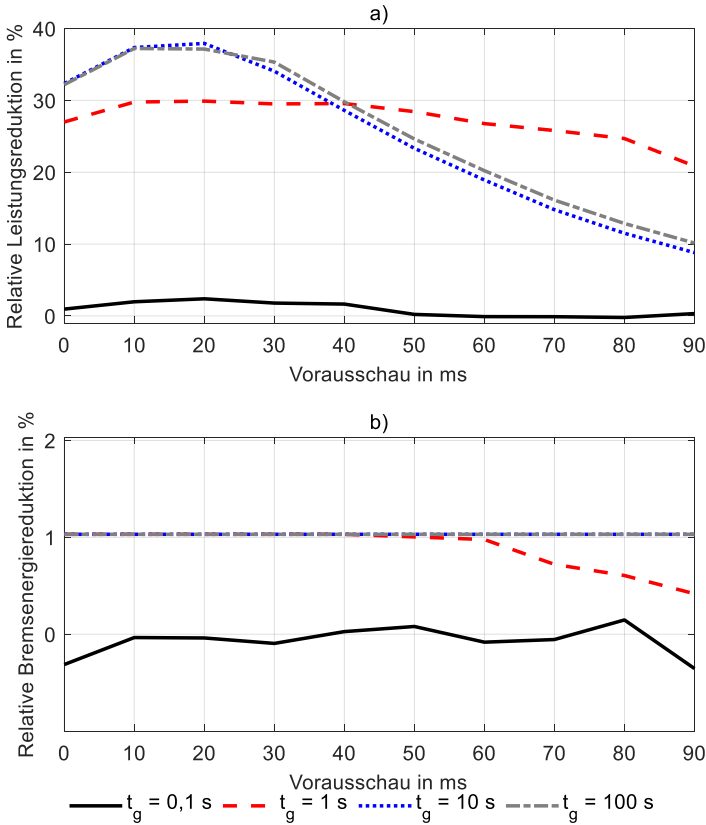


Abbildung 6.47: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und der Vorausschau für einen Zielladezustand von 50 % ohne Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.

Abbildung 6.48 verdeutlicht, mit welcher geringen Leistung der Speicher agiert, um die sporadischen Lastspitzen der Holzbearbeitungsmaschine zu glätten. Der Ladezustand variiert um weniger als ± 5 % um den Sollwert.

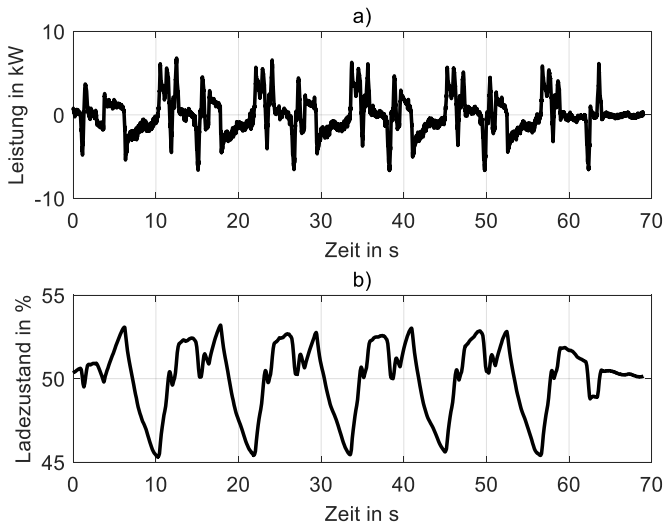


Abbildung 6.48: a) Leistung und b) Ladezustand des Speichers ohne Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladezustand von 50 % im zweiten Fallbeispiel.

In Abbildung 6.49 resultieren die Gleichrichterleistung und die Zwischenkreisspannung ohne und mit Speicher. Durch den Speichereinsatz liegt die maximale Zwischenkreisspannung um beinahe 60 V niedriger. Die Spannung variiert zwischen 577 V und 599 V.

Abbildung 6.50 bestätigt, dass die Energiebilanzen vor und nach dem Speichereinsatz fast identisch sind. Die Bremsenergie in der Größenordnung weniger Kilojoule kompensiert beim Speichereinsatz ohne Reibmoment nur einen kleinen Teil der Beschleunigungsenergie. Die Änderungen der Zwischenkreisenergie und der Rotationsenergie sind vernachlässigbar.

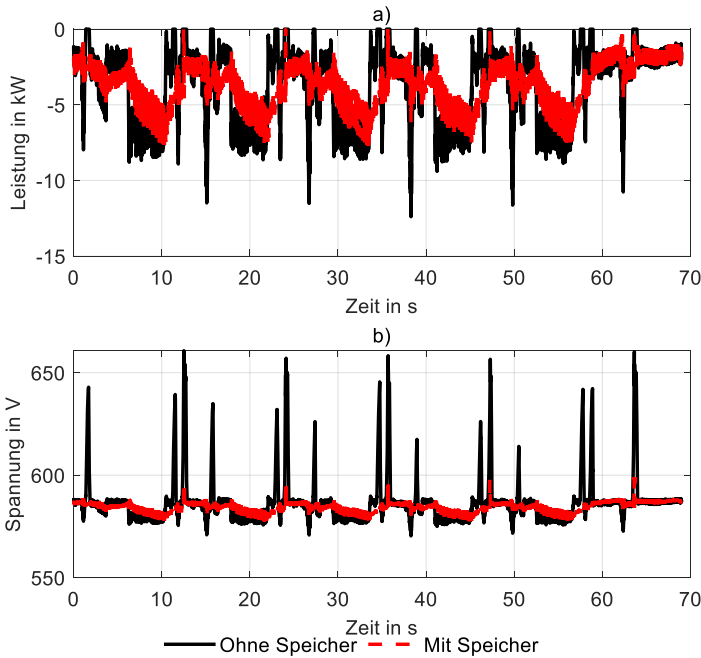


Abbildung 6.49: a) Gleichrichterleistung und b) Zwischenkreisspannung ohne und mit Speicher ohne Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladenzustand von 50 % ohne Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.

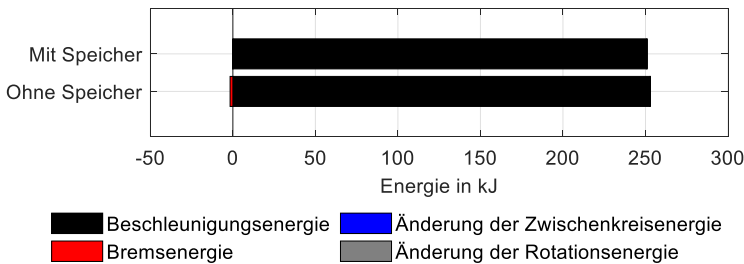


Abbildung 6.50: Energiebilanz der Speicherregelung ohne Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladenzustand von 50 % im zweiten Fallbeispiel.

Das zweite Fallbeispiel umfasst außerdem Simulationen mit Reibmoment.

Speicherregelung mit Reibmoment

Nach der Aktivierung des Reibmoments im Simulationsmodell folgen weitere Ergebnisse in Tabelle 6.23 und Tabelle 6.24. Die Leistung lässt sich um bis zu 30 % reduzieren, während die Bremsenergiereduktion maximal 1 % beträgt.

Tabelle 6.23: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für die relative Leistungsreduktion der Speicherregelung mit Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.

Rang	t_g	t_v	SOC_0	$p_{r,sim}$
1	10 s	20 ms	50 %	30 %
2	10 s	20 ms	40 %	29 %
3	10 s	10 ms	50 %	29 %
...
358	0,1 s	70 ms	90 %	-15 %
359	0,1 s	60 ms	90 %	-15 %
360	0,1 s	80 ms	90 %	-15 %

Tabelle 6.24: Beste und schlechteste Parameterkombinationen für der relativen Bremsenergiereduktion der Speicherregelung mit Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.

Rang	t_g	t_v	SOC_0	$w_{e,sim}$
1	10 s	20 ms	50 %	1 %
2	10 s	20 ms	40 %	1 %
3	10 s	20 ms	50 %	1 %
...
358	0,1 s	20 ms	10 %	0 %
359	0,1 s	70 ms	10 %	0 %
360	0,1 s	30 ms	10 %	0 %

Abbildung 6.51 spannt den Lösungsraum der Simulationen auf. Es ergibt sich ein lokales Maximum bei der relativen Leistungsreduktion. Die relative Bremsenergiereduktion weist weniger starke Abhängigkeiten von den Parametern auf. Dies liegt an den nur kurzen negativen Stromspitzen und der hohen Bremschopperschwelle von 650 V.

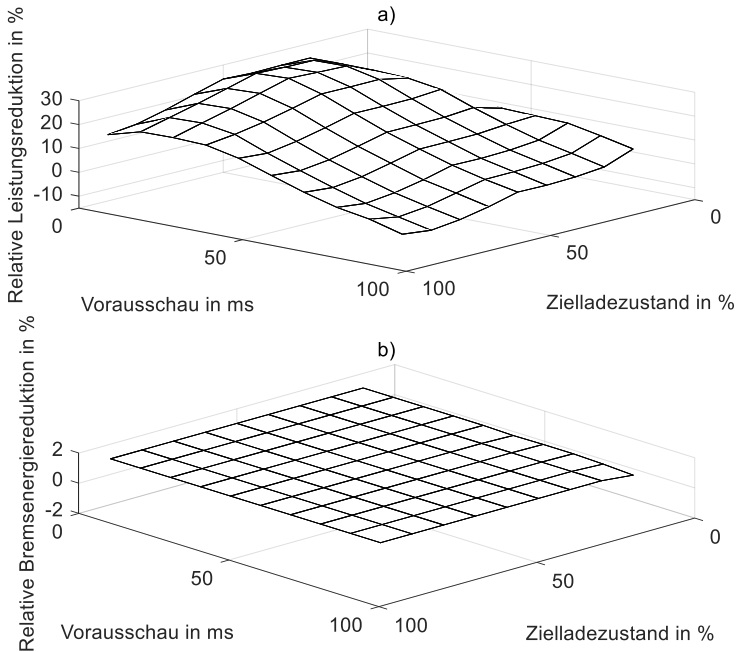


Abbildung 6.51: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion über der Vorausschau und dem Ladezustand für eine Glättungszeit von 10 s mit Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.

Abbildung 6.52 verdeutlicht, dass eine Vorausschau von 20 ms und ein Zielladezustand von 50 % die besten Ergebnisse hinsichtlich der relativen Leistungsreduktion liefern. Das Reibmoment sorgt in den meisten Fällen dafür, dass der Speicher vorhandene Bremsenergie zufällig aufnimmt. Bei einer Glättungszeit von 0,1 s beträgt die relative Bremsenergiereduktion weniger als 1 %.

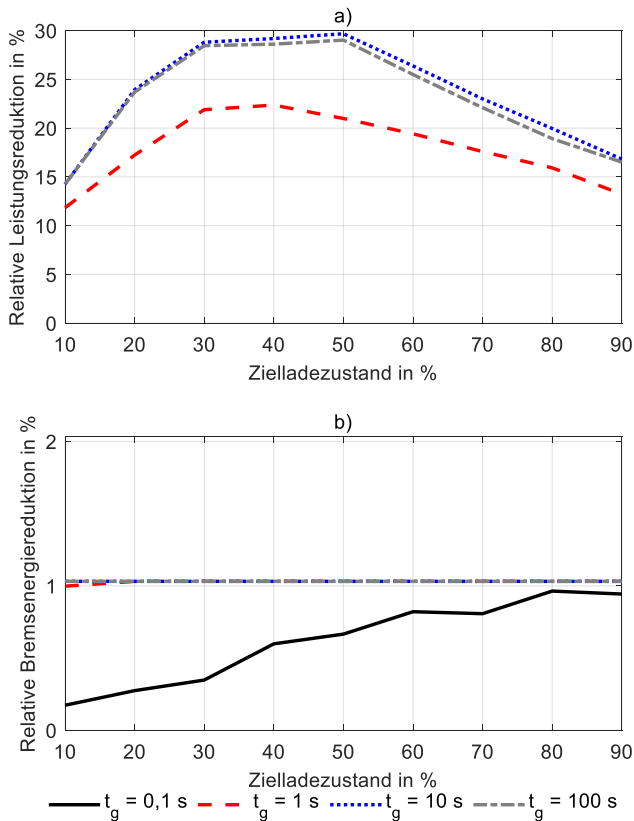


Abbildung 6.52: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und des Zielladezustands für eine Vorausschau von 20 ms mit Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.

Abbildung 6.53 bestätigt die Ergebnisse des ersten Fallbeispiels, da wiederum 20 ms Vorausschau zu den besten Resultaten führt. Zudem sind Glättungszeiten oberhalb von 1 s vorteilhaft. Die Energiebilanz in Abbildung 6.54 motiviert den Speichereinsatz erneut lediglich zur Lastkappung und Spannungsbandeindämmung. Das Reibmoment des Speichers steigert die Beschleunigungsenergie gleichzeitig um ca. 30 %. Die reine Aufnahme der Bremsenergie durch den Speicher ist keinesfalls wirtschaftlich attraktiv.

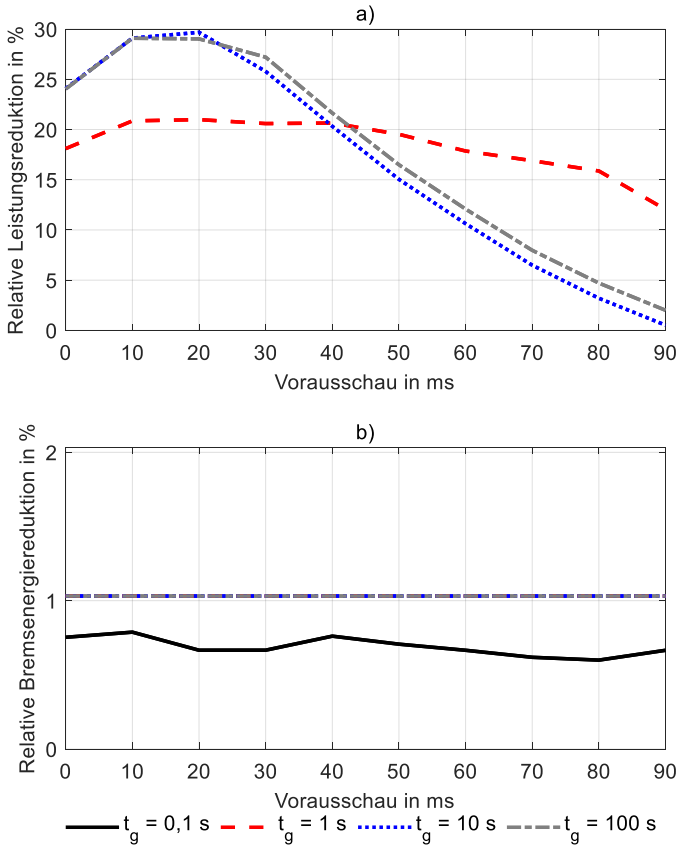


Abbildung 6.53: a) Relative Leistungsreduktion und b) relative Bremsenergiereduktion in Abhängigkeit der Glättungszeit und der Vorausschau für einen Zielladezustand von 50 % mit Reibmoment im zweiten Fallbeispiel.

Auf die Darstellung der Speicherleistung, des Ladezustands, der Gleichrichterleistung und der Zwischenkreisspannung wird aus Gründen der Ähnlichkeit zu Abbildung 6.48 und Abbildung 6.49 verzichtet.

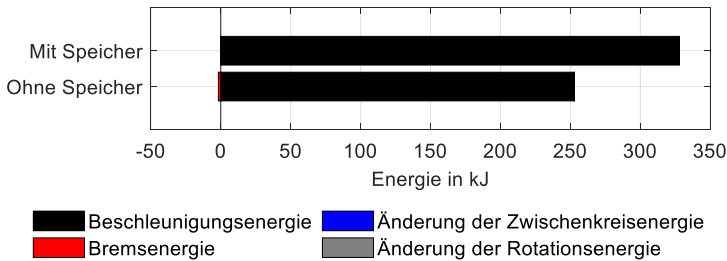


Abbildung 6.54: Energiebilanz der Speicherregelung mit Reibmoment für eine Glättungszeit von 10 s, eine Vorausschau von 20 ms und einen Zielladezustand von 50 % im zweiten Fallbeispiel.

Die geringe mechanische Last des zu fräsenden Werkstoffs und die gleichförmigen Bewegungen innerhalb der Holzbearbeitungsmaschine führen zu einem geringen Lastfaktor zwischen maximaler und mittlerer Leistung. Da die Bremsenergie erst ab dem Einsatz des Bremswiderstands als Verlust gewertet wird und nicht bereits die Ladung der Zwischenkreiskondensatoren in die Betrachtung miteinfließt, ist der Anteil der durch den Speicher erreichbaren relativen Bremsenergiereduktion verschwindend gering.

6.4.5 Fazit

Lastprofilerkennung

Aufgrund des deutlich kürzeren Lastprofils liegt die kritische Wartezeit zwischen zwei Auslösesignalen bei 10 s. Die Anregungsüberwachung und die Suchmaschine funktionieren wiederum zuverlässig, allerdings ist die Vertrauenswürdigkeit mit mindestens 83 % etwas kleiner als im ersten Fallbeispiel. Dies liegt daran, dass das Lastprofil weniger ausgeprägte Lastspitzen aufweist. Im Vergleich zur dynamischen Werkzeugmaschine im ersten Fallbeispiel sind die Fräsvorgänge des Lastprofils im zweiten Fallbeispiel eher gleichmäßig.

Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters der Industriemaschine

Der nichtlineare Spannungsregler des Diodengleichrichters erschwert die Parameterschätzung im zweiten Fallbeispiel. Die Schätzwerte sind zwar größtenteils sinnvoll, allerdings sollte die Medianlösung der Schätzungen gewählt werden, um das Modell abzusichern. Die Schätzung der Quasistatikkonstante in Verbindung mit den Kapazitäten des

Gleichrichters und der Antriebslast resultieren in einem ausreichend genauen Modell. Eine Überschätzung der Kapazitäten kann in Einzelfällen dazu führen, dass die Modellspannung in *SIMULINK* nicht die Bremschopperschwelle erreicht.

Reglerentwurf

Der fehlende Integralanteil im Spannungsregler des Diodengleichrichters bewirkt, dass die verfügbare Phasenreserve sehr groß ist und keine Stabilitätsprobleme auftreten. Die Trajektorienvorgabe gibt einen Hinweis darauf, wie viel Leistung der Speicher unter vereinfachten, statischen Annahmen kappen kann. Der Algorithmus stellt erneut sicher, dass der Ladezustand immer wieder zu seinem mittelfristigen Zielwert strebt ohne in die Randbereiche abzuriften.

Speicherregelung

Erneut bestätigt sich die geeignete Wahl einer Vorausschau von 20 ms, eines mittleren Ladezustands von 50 % und einer Glättungszeit von mindestens 10 s. Obwohl die statische Trajektorienvorgabe Lastkappungspotenziale von mehr als 70 % verspricht, liegt dieser Wert bei den dynamischen Simulationen bei maximal 30 bis 38 %. Dies ist angesichts des kleinen Verhältnisses aus Lastspitzen und mittlerer Last bei einer beschränkten Speicherleistung ein guter Wert.

Nun werden die Erkenntnisse der beiden Fallbeispiele zusammengefasst und verglichen.

6.5 Zusammenfassung der Fallbeispiele

Die beiden vorgestellten Fallbeispiele bestätigen die Funktionsfähigkeit der selbsteinstellenden Regelung von Schwungmassenspeichern in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen. Die vier Hauptbestandteile der Validierung werden nun in Form von Thesen diskutiert.

1. These: Die Erkennung von Lastprofilen zur Speicherregelung ist ohne Verbindung zur Steuerung einer Industriemaschine möglich.

Die Lastprofilerkennung funktioniert in beiden Fallbeispielen. Die Vertrauenswürdigkeiten übertreffen die Anforderung von 10 % bei Weitem. Auf der Grundlage weniger vorab

festgelegter Design-Parameter gelingt es dem Suchalgorithmus, die Rechenzeit niedrig und wiederkehrende Lastprofile trotz Rauschanteil zu erkennen. Eine Verbindung zur Steuerung der Industriemaschine ist dabei nicht vorhanden.

2. These: Für die nicht-invasive Systemidentifikation der Regler- und Streckenparameter von aktiven Gleichrichtern, Diodengleichrichtern und Antriebslasten genügen zwei bis drei Messgrößen und wenige Datenblattinformationen.

Die nicht-invasive Systemidentifikation der unbekannt Parameter der Werkzeugmaschine erreicht im ersten Fallbeispiel exzellente Genauigkeiten. Das symmetrische Verhalten des Spannungsreglers begünstigt die Bestimmung der Parameter über ein linearisiertes Modell mit impedanzbasierten Übertragungsfunktionen zweiten Grades.

Das nichtlineare Verhalten des Diodengleichrichters im zweiten Fallbeispiel verhindert den statistischen Ansatz zur Ausreißererkenntnis bzw. Anregungsfensteraufteilung aus dem ersten Fallbeispiel. Oberhalb der Scheitelspannung kann der Diodengleichrichter keine Energie aufnehmen und die Spannung steigt in Abhängigkeit der Last und der Zwischenkreiskapazität. Die maximale Anpassungsgüte liefert nicht ohne Weiteres die beste Parameterkombination. Aus diesem Grund sollte an dieser Stelle die Medianlösung der geschätzten Parameterwerte konsultiert werden. Die Abtastfrequenz von 1.000 Hz hat sich als ausreichend hoch erwiesen.

3. These: Die Nachrüstung eines Speichersystems in einem industriellen Zwischenkreis kann die Spannungsstabilität gefährden, wenn die entsprechenden Leistungs- und Kapazitätsverteilungen vorhanden sind.

Mit dem bei DC-Mikronetzen etablierten, impedanzbasierten Kriterium „GMPM“ ist es gelungen, in beiden Fallbeispielen die Spannungsstabilität trotz veränderter Topologie sicherzustellen. Die geringe Zwischenkreiskapazität des Speichers im Vergleich zur restlichen Kapazität des Gleichrichters und der Antriebslasten ist ein klares Indiz für einen unkritischen Betrieb nach der Nachrüstung des Speichers.

4. These: Die dynamische Programmierung von Speichertrajektorien ist eine geeignete Basis, um vor dem Einbau des Speichersystems eine quantitative Aussage zu energetischen Gütekriterien mithilfe von dynamischen Simulationen zu erhalten.

Die identifizierten Modelle des Gleichrichters, der Antriebslasten und des Speichersystems ermöglichen zahlreiche Simulationen mit unterschiedlichen Parameterkombinationen. Die Speicherregelung ist robust und stellt trotz statischer Auslegung sicher, dass die Lastspitzen der Antriebe zum Netz hin geglättet werden und das genutzte Spannungsband im Zwischenkreis deutlich schmaler wird. Die Lastprofile der beiden Fallbeispiele unterscheiden sich in ihren Eigenschaften in einem hohen Maße, was die Flexibilität des Algorithmus unterstreicht. Bei den Gütekriterien lassen sich klare Abhängigkeiten und Trends je nach Parameterkombination feststellen. Die Einsatzoption der Lastkappung mit einer relativen Lastreduktion von 61 und 30 % ist im Gegensatz zur Rekuperation für weitere Betrachtungen relevant. Das Reibmoment des betrachteten Speichers ist in diesen Fällen deutlich zu groß.

7 Reflexion und kritische Würdigung

Das siebte Kapitel prüft, inwiefern die vorliegende Arbeit die Anforderungen aus Abschnitt 4.1 erfüllt und ob die Forschungsfragen aus Abschnitt 1.3 beantwortet worden sind.

7.1 Bewertung der Anforderungserfüllung

Aus Kapitel 4 resultierten acht Anforderungen an die selbsteinstellende Regelung von Schwungmassenspeichersystemen in industriellen Gleichspannungsnetzen. Diese sollen nun auf ihren Erfüllungsgrad hin bewertet werden.

7.1.1 Erfüllung der Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich

Die Applikation der selbsteinstellenden Regelung im Gleichspannungszwischenkreis von zwei Industriemaschinen erfüllt die erste der drei Anforderungen des Bilanz- und Objektbereichs. Die Lösung ist zudem unabhängig von der Steuerung des Frequenzumrichters, da die rein auf elektrischen Signalen basierende automatische Lastprofilerkennung ohne weitere Informationen die Berechnung der notwendigen Speichertrajektorie ermöglicht. Zudem wurden keine Software-Anpassungen am Gleichrichter oder den Antriebssystemen vollzogen, was den Inbetriebnahmeaufwand reduziert.

7.1.2 Erfüllung der Anforderungen an die Regelung

Die Anforderungen an die Regelung umfassten fünf Aspekte. Die Spannungsstabilität des Zwischenkreises wurde vorab im Rahmen des Reglerentwurfs über einen impedanzbasierten Ansatz per GMPM-Kriterium über den gesamten Leistungsbereich der Netzteilnehmer erfolgreich sichergestellt. Die beschränkte Regelungsdynamik des Schwungmassenspeichersystems konnte durch eine geeignete Vorausschau kompensiert werden. Der Schwungmassenspeicher deckt trotz seiner geringen Kapazität die positiven und negativen Spitzenlasten der Verbraucher noch vor dem aktiven Gleichrichter. Die Genauigkeit und Sollwertfolge war speicherseitig bereits durch die stabile Drehzahlregelung gegeben. Die Zwischenkreisspannung verließ zudem in keinem der simulierten Fälle den erlaubten

Spannungsbereich und folgte stets ihrem Sollwert. Der Parameterbereich der Speichertrajektorie und das addierte Signalrauschen für eine robuste Regelung wurden erfolgreich variiert und validiert. In keinem der simulierten Fälle erreichte der Speicher einen kritischen Ladezustand von 0 oder 100 %. Dies lag an der korrekt dimensionierten Rückführleistung in Abhängigkeit des aktuellen Ladezustands. Die Regelung erfüllte darüber hinaus drei der vier Untieranforderungen an die Selbsteinstellung vollständig. Dazu gehörten die Systemidentifikation, die automatische Lastprofilerkennung mittels (Audio-) Suchalgorithmus und die Vorausschau. Die Adaption der Führungsgröße in Form einer Ladezustands- bzw. Speicherleistungstrajektorie wurde erfüllt. Die Adaption des Reglers auf dem Speicherumrichter dagegen war zwar im betrachteten Schwungmassenspeichersystem nicht möglich, bietet jedoch ein großes Potenzial für weitere Lösungsansätze. Aus diesem Grund wurde diese Anforderung nur teilweise erfüllt. Tabelle 7.1 fasst den Erfüllungsgrad der Anforderungen zusammen.

Tabelle 7.1: Bewertung der Anforderungserfüllung.

Anforderungsklasse	Anforderung	Erfüllungsgrad
Bilanz- und Objektbereich	Applikation in einem industriellen Zwischenkreis	●
	Unabhängigkeit von der Maschinensteuerung	●
	Keine Software-Anpassung	●
Regelung	Stabilität der Regelung	●
	Genauigkeit und Sollwertfolge der Regelung	●
	Dynamik der Regelung	●
	Robustheit der Regelung	●
	Systemidentifikation des Frequenzumrichters der Industriemaschine	●
	Automatische Lastprofilerkennung	●
	Vorausschauende Regelung	●
	Adaption des Reglers oder der Führungsgröße	◐

● Anforderungen erfüllt ◐ Anforderungen teilweise erfüllt ○ Anforderungen nicht erfüllt

7.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Dieser Abschnitt diskutiert, inwiefern die Forschungsfragen beantwortet wurden. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung und energetische Bewertung einer selbsteinstellenden Regelung für Schwungmassenspeichersysteme in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen zur Vergleichmäßigung des netzseitigen Leistungsbezugs und Aufnahme von Bremsenergie. Die Hauptforschungsfrage lautete:

„Wie kann eine selbsteinstellende Regelung für Schwungmassenspeichersysteme in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen entworfen und energetisch bewertet werden?“

Hinzu kamen fünf Unterforschungsfragen, welche die Hauptforschungsfrage ergänzen und in dedizierten Kapiteln beantwortet wurden.

1. Wie sind industrielle Gleichspannungszwischenkreise, Schwungmassenspeichersysteme und selbsteinstellende Regelungen definiert?

Das zweite Kapitel erläuterte die Komponenten, aus denen sich industrielle Gleichspannungszwischenkreise zusammensetzen und in welchen Anwendungen sie zum Einsatz kommen. Das Kapitel grenzte außerdem Zwischenkreise und DC-Mikronetze voneinander ab. Darüber hinaus ordnete es Schwungmassenspeichersysteme in die Welt der Energie-, Strom- und Leistungsspeicher ein und verglich techno-ökonomische Kennzahlen unterschiedlicher Technologien sowie deren Anwendungsfälle und Einsatzoptionen. Zudem leitete das Kapitel mathematische und elektromechanische Zusammenhänge der Regelung von permanentmagnetisch erregten Schwungmassenspeichern her. Die Erläuterung des Begriffs „selbsteinstellende Regelung“ war ebenfalls Teil des zweiten Kapitels, neben der Einordnung der verwandten „adaptiven“, „selbstoptimierenden“, „iterativ lernenden“ und „repetitiven“ Ansätze. Des Weiteren wurden Aspekte der virtuellen Inbetriebnahme und des maschinellen Lernens eingeführt.

2. Welche Lösungsansätze für die Regelung von Schwungmassenspeichersystemen in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen existieren bereits?

Das dritte Kapitel stellte den Stand der Wissenschaft und Technik vor. Die Lösungsansätze wurden im Rahmen der strukturierten Literaturrecherche in drei Gruppen aufgeteilt. Die erste Gruppe enthielt Ansätze zur Erkennung und Prognose von Lastprofilen. Die 13 identifizierten Ansätze umfassten klassische Regressionen, aber auch neuartige Ansätze, wie etwa tiefe neuronale Netze. Die zweite Gruppe konzentrierte sich auf die Lösungsansätze zur Modellbildung und Systemidentifikation von Umrichtersystemen. Die meisten Autoren setzten die PRBS-Methode ein, um Filter und Netzimpedanzen zu bestimmen und die Regelungen von aktiven Gleichrichtern darauf abzustimmen. Die Bestimmung von unbekanntem Parametern nach der Inbetriebnahme stand selten im Fokus. Die dritte Gruppe enthielt Ansätze zur Speicherregelung, wobei sich die dynamische Programmierung von Trajektorien als Lösungsansatz in dieser Arbeit qualifizierte.

3. Welche Anforderungen ergeben sich für die selbsteinstellende Regelung von Schwungmassenspeichersystemen in industriellen Gleichspannungsnetzen?

Im Bilanz- und Objektraum resultierten drei Anforderungen. Die meisten Autoren benötigten eine Verbindung zur Steuerung der Industriemaschine, um den Speicher gewinnbringend zu regeln. Zu den vier klassischen Anforderungen an Regelungen kamen aufgrund der Forderung nach „Selbsteinstellung“ vier weitere Aspekte hinzu. Dazu gehörten die Systemidentifikation, die automatische Lastprofilerkennung, die vorausschauende Regelung sowie die Adaption des Reglers oder der Führungsgröße.

4. Aus welchen Funktionsmodulen setzt sich die selbsteinstellende Regelung zusammen und wie interagieren diese miteinander?

Die Handlungsempfehlungen des vierten Kapitels motivierten die vier Funktionsmodule des fünften Kapitels, welche schrittweise in Form von Ablaufdiagrammen ineinandergriffen. Vorab wurden die Modellbildung und Systemidentifikation des Speichersystems sowie die Voranalyse erläutert, welche nicht unmittelbar zum Funktionsumfang der selbsteinstellenden Regelung gehören. Das erste Funktionsmodul umfasste sowohl die Anregungsüberwachung als auch die Suchmaschine der Lastprofilerkennung. Das zweite Funktionsmodul beschäftigte sich mit der Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters der Industriemaschine, bei der zunächst

die Daten aufgenommen und vorverarbeitet wurden. Dadurch konnten sie anschließend auf Grundlage einer Modellhypothese zur Schätzung von Unbekannten eingesetzt werden. Das dritte Funktionsmodul enthielt den Reglerentwurf, welcher die impedanzbasierte Stabilitätsprüfung und die statische Trajektorienvorgabe inkludierte. Das vierte Funktionsmodul wertete Gütekriterien der Speicherregelung in *SIMULINK*-Simulationen aus und verglich den Einfluss der Eingangsparameter auf die Ergebnisse.

5. Wie kann der Lösungsansatz für die selbsteinstellende Regelung validiert sowie energetisch bewertet werden und wo liegen dessen Einsatzgrenzen?

Im sechsten Kapitel dienten zwei Fallbeispiele dazu, die Funktionsfähigkeit der selbsteinstellenden Regelung zu prüfen. Das erste Fallbeispiel deckte den Fall eines skalierten Werkzeugmaschinenlastprofils in Kombination mit einem aktiven Gleichrichter ab. Das zweite Fallbeispiel fokussierte sich auf einen Diodengleichrichter, der durch das Lastprofil einer Holzbearbeitungsmaschine belastet wurde. Mithilfe zahlreicher Simulationen wurde ein großer Lösungsraum abgedeckt, der die Funktionsfähigkeit der selbsteinstellenden Regelung bestätigte. Die Einsatzgrenzen der selbsteinstellenden Regelung wurden speziell im Hinblick auf die erreichbare Genauigkeit von Parameterschätzungen sowie die energetischen Potenziale der Speicherregelung beleuchtet.

Insgesamt wurde die Hauptforschungsfrage erfolgreich beantwortet und eine Lösung aufgezeigt. Die vorliegende Arbeit ermöglicht Speicherherstellern und Anlagenbetreibern, noch vor der Nachrüstung eines Speichersystems mithilfe von Software-Artefakten in *MATLAB/SIMULINK* eine selbsteinstellende Speicherregelung zu entwerfen und eine energetische Bewertung vollziehen zu können. Die vorgestellten Fallbeispiele decken einen repräsentativen Lösungsraum innerhalb der Serienfertigung ab, da die aufgezeichneten Strom- und Spannungsdaten die Dynamik realer Industriemaschinen abbilden und es sich bei den untersuchten Umrichtern um handelsübliche Produkte aus den typischerweise in der Industrie auftretenden Leistungsklassen handelt. Die vorgestellten Funktionsmodule können somit in der Praxis eingesetzt werden. Das letzte Kapitel fasst die Arbeit zusammen, erläutert die Grenzen der selbsteinstellenden Regelung und motiviert zukünftige Weiterentwicklungen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im ersten Kapitel wurden der Hintergrund und die Motivation für die selbsteinstellende Regelung von Speichersystemen beschrieben. Besonders die Verringerung des Inbetriebnahmeaufwands des Speichersystems zur Nutzung der Lastkappung und Rekuperation standen hier im Fokus. Die Problemstellung enthielt mehrere Aspekte. Dazu zählten unbekannte Modellparameter und Lastprofile, eine unsichere Spannungsstabilität aufgrund der neuen Zwischenkreistopologie, veränderliche Speichergrößen, wie der Ladezustand und die verfügbare Leistung, sowie die eingeschränkte Dynamik des Speichers.

Das zweite Kapitel legte ausführlich die Grundlagen aus mehreren Fachdisziplinen der Elektrotechnik, Mechatronik und *Data Science* dar. Im zweiten Kapitel wurde vor allem Wissen zu industriellen Gleichspannungszwischenkreisen, Schwungmassenspeichersystemen und Regelungssystemen vermittelt.

Im dritten Kapitel standen die Lösungsansätze aus dem Stand der Wissenschaft und Technik im Fokus. Die strukturierte Literaturrecherche ordnete zunächst das Thema fachlich ein und gruppierte dann die Ansätze in drei Forschungsschwerpunkte. Mehr als zehn Ansätze zur Erkennung und Prognose von Lastprofilen, acht Ansätze zur Modellbildung und Systemidentifikation und weitere acht Speicherregelungsansätze resultieren aus dem dritten Kapitel.

Das vierte Kapitel nahm die Anforderungen aus dem ersten, zweiten und dritten Kapitel auf und nutzte sie zur qualitativen Bewertung der Ansätze aus der Literatur. Das vierte Kapitel zeigte die Forschungslücken auf und formulierte mehrere Handlungsempfehlungen für den weiteren Verlauf der Arbeit.

Im fünften Kapitel wurden die Software-Artefakte der selbsteinstellenden Regelung methodisch in Form von Ablaufdiagrammen, Tabellen, Formeln, Blockschaltbildern und Ergebnisgrafiken erläutert. Das fünfte Kapitel gab gleichzeitig die Struktur und das Vorgehen des sechsten Kapitels vor. Zu den Funktionsmodulen des fünften Kapitels zählten die

Lastprofilerkennung, die Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters der Industriemaschine, der Reglerentwurf sowie die Speicherregelung.

Das sechste Kapitel beinhaltet zwei Fallbeispiele, die durch ihre Unterschiede einen großen Lösungsraum abdeckten. Anhand von skalierten Lastprofilen einer Werkzeugmaschine und einer Holzbearbeitungsmaschine wurde der Einsatz eines Schwungmassenspeichers simulativ für verschiedene Parameterkombinationen überprüft und energetisch bewertet. Das betrachtete Speichersystem konnte erfolgreich zur Kappung negativer und positiver Lasten eingesetzt werden. Im ersten Fallbeispiel war das Speichersystem dazu in der Lage, die Gleichrichterleistung um mehr als die Hälfte zu reduzieren, wobei die Last in der gleichen Größenordnung wie die maximale Leistung des Speichers lag. Die Ladezustandsgrenzen und die maximale Speicherleistung wurden stets eingehalten. Der Speichereinsatz führte zu deutlich schmaleren Betriebsspannungsbändern im Zwischenkreis. Ein reiner Betrieb zur Aufnahme von Bremsenergie war jedoch aufgrund des Reibmoments unattraktiv. Die automatische Lastprofilerkennung funktionierte trotz addiertem Rauschen und die Systemidentifikation lieferte vor allem im ersten Fallbeispiel mit aktivem Gleichrichter sehr gute Ergebnisse.

Im siebten Kapitel wurden der Erfüllungsgrad der gestellten Anforderungen reflektiert und die erfolgreiche Beantwortung der Forschungsfrage *„Wie kann eine selbsteinstellende Regelung für Schwungmassenspeichersysteme in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen entworfen und energetisch bewertet werden?“* dokumentiert.

8.1 Grenzen der selbsteinstellenden Regelung

Da die selbsteinstellende Regelung von Schwungmassenspeichern in industriellen Gleichspannungszwischenkreisen nicht in jedem System zur Anwendung kommen kann, sollen an dieser Stelle die Grenzen der methodisch aufbereiteten Software-Artefakte aufgezeigt werden.

Zunächst sind die vereinfachten Annahmen bei der Messung von Strom- und Spannungssignalen als Einschränkung zu nennen. Die vorliegende Arbeit geht davon aus, dass die Messfehler in einem bestimmten Toleranzbereich liegen. Die Vertrauenswürdigkeit der

Lastprofilerkennung hängt wesentlich von dieser Annahme ab, da sowohl das verwendete Signalfilter als auch das Rauschen dementsprechend dimensioniert wurden. Für Messsysteme mit größeren Abweichungen kann die Lastprofilerkennung an ihre Grenzen stoßen oder zumindest weniger Treffer in der Suchmaschine aufweisen. Je nach Temperatur und Anzahl der gefahrenen Zyklen kann es bei Lastprofilen desselben Produktionsprozesses aufgrund der der Elektronik und der mechanischen Reibung der Achsen zu Leistungsabweichungen kommen. Die Bildung der Prüfsummen ist bisher auf einen Leistungsbereich unterhalb von 100 kW ausgelegt, kann allerdings mit einfachen Mitteln auf größere Anwendungen erweitert werden.

Im zweiten Fallbeispiel hängt die Zwischenkreisspannung des Diodengleichrichters unmittelbar von der Versorgungsspannung des AC-Netzes ab. Dieser Wert kann je nach Ort und Tageszeit um $\pm 10\%$ schwanken. Diese Abweichung kann die Systemidentifikation beeinflussen. Im ersten Fallbeispiel entkoppelt der aktive Gleichrichter die beiden Spannungen voneinander und dieses Problem tritt nicht auf.

Außerdem bleibt in beiden Fallbeispielen unklar, wie groß der Schätzfehler aufgrund von verteilten Kapazitäten im Zwischenkreis ist und welchen Einfluss längere Kabelstrecken auf die Schätzung haben können. Der Lösungsansatz zur Modellbildung und Systemidentifikation des Frequenzumrichters der Industriemaschine muss angepasst werden, falls er in einem DC-Mikronetz zum Einsatz kommen soll. Die Systemidentifikation in ausgedehnten Netzen stellt den bestehenden Lösungsansatz vor eine Herausforderung. Hier wären dann aufgrund des Spannungsabfalls und des Kabeleinflusses mehr als zwei bis drei Messgrößen notwendig. Sollte es sich zudem um sehr heterogene Verbraucher handeln, sind die getroffenen Modellannahmen der Konstantleistungslasten ggf. nicht mehr valide.

Bei stark nichtlinearen Systemen könnte das GMPM-Kriterium zur Stabilitätsbetrachtung an seine Grenzen stoßen. Dann müsste ein anderes Kriterium gewählt werden. Nicht alle Speicher können beliebig mit Gleichrichtern und Antriebslasten kombiniert werden. Dies ist im Einzelfall jeweils über alle möglichen Betriebspunkte zu prüfen.

Die Adaption der PI-Anteile des Drehzahlreglers während des Betriebs war bei dem betrachteten Schwungmassenspeichersystem nicht möglich. Diese Option würde auch andere

Lösungsansätze ermöglichen, z. B. schnelle Statikregler in Abhängigkeit der Zwischenkreisspannung. Das Ansprechverhalten der Speichertechnologie ist darüber hinaus eingeschränkt, da die Drehzahlkaskade bei dem sensorlosen Konzept nicht übergangen werden kann. Dies verlangsamt die Speicherregelung massiv. Eine direkte Drehmomentvorgabe am Stromregler inklusive Drehzahlklammerung wäre schneller, ist jedoch nur bei Schwungmassenspeichern mit Drehzahlgeber möglich.

8.2 Weiterentwicklungsmöglichkeiten

Im Allgemeinen sollten die Ansätze dieser Arbeit auf eine Steuerungshardware übertragen werden, um die Ergebnisse der Simulationen in einer realen Mehrachsmaschine zu evaluieren und den Einfluss von Wirkungsgraden und Totzeiten besser bewerten zu können.

Lastprofilerkennung

Für eine noch bessere Robustheit der Lastprofilerkennung können Lastprofile mehrmals aufgenommen werden und durch Ähnlichkeitsmaße in *Cluster* eingruppiert werden. Des Weiteren können exogene Messgrößen (z. B. Temperatur) und weitere generierte Merkmale aus den Strom- und Spannungsdaten zur Erkennbarkeit der Lastprofile beitragen. Darüber hinaus kann die exakte Prüfsummenbildung durch die Einführung von Distanzmaßen aufgeweicht werden, sodass der Einfluss von Rauschen verringert wird. Der Inhalt der Lastprofildatenbank kann eine Nachbereitung durchlaufen, um wiederkehrende Lastprofilmuster bzw. -Abfolgen zusammenzufassen.

Modellbildung und Systemidentifikation

Die Datenblattinformationen der Frequenzumrichter und Speichersysteme könnten zukünftig in einer Datenbank für eine Vielzahl von Herstellern hinterlegt werden. Ein Messsystem mit mehreren verteilten Messstellen wäre in ausgedehnten DC-Netzen sinnvoll, um die adaptive Regelung aktiver Netzteilnehmer je nach energetischem Zustand des Netzes zu ermöglichen. Dadurch können Systeme optimiert werden, auch wenn die Lasten langfristig durch Alterung oder kurzzeitig durch eine Topologieänderung variieren.

Reglerentwurf und Speicherregelung

Die selbststellende Regelung kann darüber hinaus zu einer iterativ lernenden oder repetitiven Regelung weiterentwickelt werden. Zugleich erfordert dies deutlich häufigere, wiederkehrende Produktionszyklen und die Aufnahme und Verarbeitung der Messdaten.

Um den Einsatz von Stromspeichern zur Lastkappung noch attraktiver zu machen, sollte die Verknüpfung von Zwischenkreisen zu einem DC-Mikronetz in der Serienfertigung forciert werden. Hier können verschiedene Speichertechnologien, wie Schwungmassenspeicher, Superkondensatoren oder Batterien einen Mehrwert für Lastkappungs- und Absicherungsoptionen liefern und systemisch die vorhandene Rekuperation nutzen. Die Übertragbarkeit der Regelung auf verschiedene Stromspeichertechnologien und Prozesse muss gegeben sein. Hieraus resultiert zukünftig die Anforderung an die Verallgemeinerbarkeit der Mess-, Stell- und Regelungsgrößen. Nach einigen Anpassungen könnten auch DC-DC-Wandler für Superkondensatoren oder Batterien von dieser Regelung profitieren. Hierbei sollte auch die Interaktion mit erneuerbaren Erzeugern untersucht werden, um ganze Produktionshallen zu versorgen. Aus energetischer und monetärer Sicht ist der Gleichzeitigkeitsfaktor von mehreren Industriemaschinen zu untersuchen und der Speicher ggf. auf einer höheren Ebene in der Produktion einzusetzen, was wiederum Netzentgelte einsparen kann.

9 Literaturverzeichnis

- Abdelrahem et al. 2018** Abdelrahem, Mohamed; Hackl, Christoph Michael; Kennel, Ralph, 2018.
Finite set model predictive control with on-line parameter estimation for active frond-end converters.
Electrical Engineering **100** (3), S. 1497–1507
DOI: 10.1007/s00202-017-0606-3
- Ackermann 2012** Ackermann, Carsten, 2012.
Optimale Regelung der permanentmagneterregten Synchronmaschine unter Nutzung des Reluktanzmoments.
Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2012, URN: urn:nbn:de:swb:90-411681
- Adamy 2014** Adamy, Jürgen, 2014.
Nichtlineare Systeme und Regelungen. 2. Auflage. Heidelberg: Springer Vieweg.
ISBN: 978-3-642-45013-6.
DOI: 10.1007/978-3-642-45013-6
- AG Energiebilanzen 2022** AG Energiebilanzen, 2022.
Endenergieverbrauch nach Sektoren.
Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren>
Zugriff am: 19.03.2023
- Agarwal et al. 2019** Agarwal, Apoorv; Iyer, Vishnu Mahadeva; Anurag, Anup; Bhattacharya, Subhashish, 2019.
Adaptive Control of a Hybrid Energy Storage System for Wave Energy Conversion Application: *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Baltimore, USA, 29.09.2019 - 03.10.2019, S. 4994-5001
DOI: 10.1109/ECCE.2019.8912897
- Agorreta et al. 2011** Agorreta, Juan Luis; Borrega, Mikel; López, Jesús; Marroyo, Luis, 2011.
Modeling and Control of N -Paralleled Grid-Connected Inverters With LCL Filter Coupled Due to Grid Impedance in PV Plants.
IEEE Transactions on Power Electronics **26** (3), S. 770–785
DOI: 10.1109/TPEL.2010.2095429

- Al-Nussari et al. 2017** Al-Nussari, Mohammed; Bayindir, Ramazan; Padmanaban, Sanjeevikumar; Mihet-Popa, Lucian; Siano, Pierluigi, 2017. Constant Power Loads (CPL) with Microgrids: Problem Definition, Stability Analysis and Compensation Techniques. *Energies* **10** (10), S. 1656
DOI: 10.3390/en10101656
- Appunn et al. 2018** Appunn, Rüdiger; Frantzheld, Jürgen; Jetter, Markus; Löser, Friedrich, 2018. MULTI® - rope-less elevator demonstrator at test tower Rottweil. *Transportation Systems and Technology* **4** (3), S. 80–89
DOI: 10.17816/transsyst20184380-89
- Araya & Espinoza 2005** Araya, E. & Espinoza, J. R., 2005. AC Filter Voltage Reconstruction in PWM~CSR: *IEEE 36th Conference on Power Electronics Specialists, 2005*, Aachen, Germany, 12.06.2005, S. 2005-2011.
ISBN: 0-7803-9033-4
DOI: 10.1109/PESC.2005.1581907
- Arif et al. 2015** Arif, Bilal; Tarisciotti, Luca; Zanchetta, Pericle; Clare, Jon C; Degano, Marco, 2015. Grid Parameter Estimation Using Model Predictive Direct Power Control. *IEEE Transactions on Industry Applications* **51** (6), S. 4614–4622
DOI: 10.1109/TIA.2015.2453132
- Arif et al. 2018** Arif, Anmar; Wang, Zhaoyu; Wang, Jianhui; Mather, Barry; Bashualdo, Hugo; Zhao, Dongbo, 2018. Load Modeling—A Review. *IEEE Transactions on Smart Grid* **9** (6), S. 5986–5999
DOI: 10.1109/TSG.2017.2700436
- Arimoto et al. 1984** Arimoto, S; Kawamura, S; Miyazaki, F., 1984. Bettering operation of dynamic systems by learning: A new control theory for servomechanism or mechatronics systems: *The 23rd IEEE Conference on Decision and Control*, Las Vegas, Nevada, USA, 12.12.1984 - 14.12.1984: IEEE, S. 1064-1069
DOI: 10.1109/CDC.1984.272176
- Arriagada et al. 2003** Arriagada, A. J; Espinoza, J. R; Rodriguez, J. R; Moran, L. A., 2003. On-line filtering reactance identification in voltage-source three-phase active-front-end rectifiers: *IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No.03CH37468)*, Roanoke, VA, USA, 02.11.2003 - 06.11.2003, S. 192-197.
ISBN: 0-7803-7906-3
DOI: 10.1109/IECON.2003.1279978

- Attaianese et al. 2004** Attaianese, C; Nardi, V; Tomasso, G., 2004.
High performances supercapacitor recovery system for industrial drive applications: *APEC 2004: Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition ; 22 - 26 February 2004, the Disneyland Hotel, Anaheim, California, Anaheim, CA, USA, 22.02.2004 - 26.02.2004*, S. 1635-1641.
ISBN: 0-7803-8269-2
DOI: 10.1109/APEC.2004.1296084
- Austermann 2018** Austermann, Johann, 2018.
Rückspeisestromrichter mit geregeltm Zwischenkreisstrom.
Düren: Shaker.
Braunschweig, Technische Universität, Dissertation, 2018.
ISBN: 978-3-8440-5885-7.
DOI: 10.2370/9783844058857
- Barcenas et al. 2006** Barcenas, Ernesto; Cardenas, Victor; Roffiel, Jaime, 2006.
Review of Power Factor Correction in Three-Phase Three Wire Systems. In: Alarcon-Aquino, Vicente (Hrsg.): *Proceedings / 10th IEEE International Power Electronics Congress: Cholula, Puebla, Mexico, 16 - 18 October 2006*, Puebla, Mexico, 16.10.2006 - 18.10.2006, S. 1-6.
ISBN: 1-4244-0545-9
DOI: 10.1109/CIEP.2006.312123
- Barreto et al. 2020** Barreto, Rúben; Faria, Pedro; Vale, Zita, 2020.
Determination of the typical load profile of industry tasks using fuzzy C-Means.
Energy Reports **6**, S. 155–160
DOI: 10.1016/j.egy.2020.11.094
- Bauernhansl 2020** Bauernhansl, Thomas, 2020.
Fabrikbetriebslehre 1. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-662-44537-2.
DOI: 10.1007/978-3-662-44538-9
- Bauernhansl et al. 2014** Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten; Vogel-Heuser, Birgit, 2014.
Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik.
Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-04681-1.
DOI: 10.1007/978-3-658-04682-8
- Bechouche et al. 2015** Bechouche, Ali; Seddiki, Hamid; Abdeslam, Djaffar Ould; Mesbah, Koussaila, 2015.
Adaptive ac filter parameters identification for voltage-oriented control of three-phase voltage-source rectifiers.
International Journal of Modelling, Identification and Control **24** (4), S. 319–331
DOI: 10.1504/IJMIC.2015.072985

- Ben Ali et al. 2020** Ben Ali, Ines; Naouar, Mohamed Wissem; Monmasson, Eric, 2020.
Design of an active front-end rectifier controller with an accurate estimation for the dynamic of its deadbeat current control loop.
SN Applied Sciences **2** (6), S. 1–8
DOI: 10.1007/s42452-020-2869-y
- Bernet 2012** Bernet, Steffen, 2012.
Selbstgeführte Stromrichter am Gleichspannungszwischenkreis. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-540-23656-6.
DOI: 10.1007/978-3-540-68861-7
- Berns et al. 2019** Berns, Karsten; Köpper, Alexander; Schürmann, Bernd, 2019.
Technische Grundlagen Eingebetteter Systeme: Elektronik, Systemtheorie, Komponenten und Analyse. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-26516-8.
DOI: 10.1007/978-3-658-26516-8
- Bessei 2011** Bessei, Herbert, 2011.
Sicherungshandbuch: Starkstromsicherungen ; das Handbuch für Anwender von Niederspannungs- und Hochspannungssicherungen. 5. Auflage. Lappersdorf: Kerschensteiner.
ISBN: 9783931954192
- Beucher 2015** Beucher, Ottmar, 2015.
Signale und Systeme: Theorie, Simulation, Anwendung: Eine beispielorientierte Einführung mit MATLAB. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
ISBN: 978-3-662-45964-5.
DOI: 10.1007/978-3-662-45965-2
- Bhingee et al. 2017** Bhingee, Raunak; Park, Jinkyoo; Law, Kincho H; Dornfeld, David A; Helu, Moneer; Rachuri, Sudarsan, 2017.
Towards a generalized energy prediction model for machine tools.
Journal of manufacturing science and engineering **139** (4), S. 1–12
DOI: 10.1115/1.4034933
- Bilbao et al. 2014** Bilbao, Endika; Barrade, Philippe; Etxeberria-Otadui, Ion; Rufer, Alfred; Luri, Sergio; Gil, Inigo, 2014.
Optimal Energy Management Strategy of an Improved Elevator With Energy Storage Capacity Based on Dynamic Programming.
IEEE Transactions on Industry Applications **50** (2), S. 1233–1244
DOI: 10.1109/TIA.2013.2276015

- Binder 2012** Binder, Andreas, 2012.
Elektrische Maschinen und Antriebe. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-540-71849-9.
DOI: 10.1007/978-3-540-71850-5
- Böcker 2016** Böcker, Joachim, 2016.
Geregelte Drehstromantriebe.
Paderborn, Universität, Vorlesungsskript, Wintersemester 2016
- Böcker 2019** Böcker, Joachim, 2019.
Leistungselektronik.
Paderborn, Universität, Vorlesungsskript, Sommersemester 2019
- Bohn & Unbehauen 2016** Bohn, Christian & Unbehauen, Heinz, 2016.
Identifikation dynamischer Systeme: Methoden zur experimentellen Modellbildung aus Messdaten. 1. Auflage.
Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-8348-2197-3.
DOI: 10.1007/978-3-8348-2197-3
- Böker et al. 2019** Böker, Andreas; Paerschke, Hartmuth; Boggasch, Ekkehard, 2019.
Elektrotechnik für Gebäudetechnik und Maschinenbau.
Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-20970-4.
DOI: 10.1007/978-3-658-20971-1
- Böttiger et al. 2018** Böttiger, Michael; Paulitschke, Martin; Beyer, Richard; Neumann, Lorin; Bocklisch, Thilo, 2018.
Modular hybrid battery storage system for peak-shaving and self-consumption optimization in industrial applications.
Energy Procedia **155**, S. 102–110
DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.064
- Brecher 2011** Brecher, Christian, 2011.
Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-642-20693-1.
DOI: 10.1007/978-3-642-20693-1
- Brillinger et al. 2021** Brillinger, Markus; Wuwer, Marcel; Abdul Hadi, Muaaz; Haas, Franz, 2021.
Energy prediction for CNC machining with machine learning.
CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology **35**, S. 715–723
DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.07.014

- Bristow et al. 2006** Bristow, Douglas A; Tharayil, Marina; Alleyne, Andrew G., 2006. A survey of iterative learning control. *IEEE Control Systems* **26** (3), S. 96–114
DOI: 10.1109/MCS.2006.1636313
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2016** Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2016. *Grünbuch Energieeffizienz*.
Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/gruenbuch-energieeffizienz-august-2016.html>
Zugriff am: 12.01.2022
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2019** Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2019. *Energieeffizienzstrategie 2050*, S. 1-76.
Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.html>
Zugriff am: 06.01.2023
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2021** Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2021. *Energieeffizienz in Zahlen 2021: Entwicklungen und Trends in Deutschland 2021*.
Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-entwicklungen-und-trends-in-deutschland-2021.html>
Zugriff am: 06.01.2023
- Canders et al. 2007** Canders, W. R; Hinrichsen, F; Hoffmann, J; Hoffmann, P; Koch, I; May, H; Tareilus, G., 2007. *DynaStore - Energiesparender Schwungmassenspeicher mit HTSL-Lagerung für den dezentralen Einsatz. Leitprojekt. Abschlussbericht. Laufzeit: 1.1.2000 - 31.10.2006*.
Verfügbar unter: <https://www.tib.eu/de/suchen/id/tema:TEMA20080205239/DynaStore-Energiesparender-Schwungmassenspeicher?cHash=c91ee3bbf37a7d30eb21226cf9750d23>
Zugriff am: 16.01.2022
- Carabin et al. 2017** Carabin, Giovanni; Wehrle, Erich; Vidoni, Renato, 2017. A Review on Energy-Saving Optimization Methods for Robotic and Automatic Systems. *Robotics* **6** (4), S. 39
DOI: 10.3390/robotics6040039

- Cavazzana 2018** Cavazzana, Francesco, 2018.
Impedance-Based Stability Analysis in Smart Grids with Large Penetration of Renewable Energy.
Padua, Italien, Università degli studi di Padova, Dissertation, 2018
- Cespedes et al. 2011** Cespedes, Mauricio; Xing, Lei; Sun, Jian, 2011.
Constant-Power Load System Stabilization by Passive Damping.
IEEE Transactions on Power Electronics **26** (7), S. 1832–1836
DOI: 10.1109/TPEL.2011.2151880
- Chen et al. 2019** Chen, Tao; Shang, Hai; Bi, Qingzhen, 2019.
A Prediction Method of Five-Axis Machine Tool Energy Consumption with GBRT Algorithm: *2019 IEEE 5th International Conference on Mechatronics System and Robots*, Singapore, 03.05.2019 - 05.05.2019, S. 34-39.
ISBN: 978-1-7281-2223-6/19
DOI: 10.1109/ICMSR.2019.8835459
- Cuiyan et al. 2004** Cuiyan, Li; Doagchun, Zhang; Xianyi, Zhuang, 2004.
A survey of repetitive control: *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Sendai, Japan, 28.09.2004 - 02.10.2004, S. 1160-1166.
ISBN: 0-7803-8463-6
DOI: 10.1109/IROS.2004.1389553
- Cupelli et al. 2015** Cupelli, Marco; Ponci, Ferdinanda; Sulligoi, Giorgio; Vicenzutti, Andrea; Edrington, Chris Shannon; El-Mezyani, Touria; Monti, Antonello, 2015.
Power Flow Control and Network Stability in an All-Electric Ship.
Proceedings of the IEEE **103** (12), S. 2355–2380
DOI: 10.1109/JPROC.2015.2496789
- Dajaku & Gerling 2007** Dajaku, Gurakuq & Gerling, Dieter, 2007.
The correct analytical expression for the phase inductance of salient pole machines: *2007 IEEE International Electric Machines and Drives Conference IEMDC*, Antalya, Turkey, 03.05.2007 - 05-05.2007, S. 992-996
DOI: 10.1109/IEMDC.2007.382811
- Díaz-González 2013** Díaz-González, Francisco, 2013.
Contributions of Flywheel Systems in Wind Power Plants.
Barcelona, Spain, Universitat Politècnica de Catalunya, Dissertation, 2013

- Dietrich et al. 2021** Dietrich, B; Walther, J; Chen, Y; Weigold, M., 2021.
A Deep Learning Approach to Electric Load Forecasting of Machine Tools.
MM Science Journal **2021** (5), S. 5283–5290
DOI: 10.17973/MMSJ.2021_11_2021146
- DIN 66001** DIN 66001:01.12.1983.
Informationsverarbeitung: Sinnbilder und ihre Anwendung
DOI: 10.31030/1300312
- DIN IEC 60050-351:2014-09** DIN IEC 60050-351:2014-09:01.09.2014.
Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351:2013).
- Döbel et al. 2018** Döbel, Inga; Leis, Miriam; Molina Vogelsang, Manuel; Neustroev, Dmitry; Petzka, Henning; Reiemer, Annamaria; Rüping, Stefan; Voss, Angelika; Wegele, Martin; Welz, Juliane, 2018.
Maschinelles Lernen: Eine Analyse zu Kompetenzen, Forschung und Anwendung. München: Fraunhofer.
Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/47f259bb-c191-4b17-84f4-2b3824cc3a0a/details>
Zugriff am: 18.04.2023
- Duerden et al. 2016** Duerden, Chris; Shark, Lik-Kwan; Hall, Geoff; Howe, Joe, 2016.
Prediction of granular time-series energy consumption for manufacturing jobs from analysis and learning of historical data: *2016 Annual Conference on Information Science and Systems (CISS)*, Princeton, NJ, USA, 16.03.2016 - 18.03.2016, S. 625-630.
ISBN: 978-1-4673-9457-4
DOI: 10.1109/CISS.2016.7460575
- Duriez et al. 2017** Duriez, Thomas; Brunton, Steven L; Noack, Bernd R., 2017.
Machine Learning Control – Taming Nonlinear Dynamics and Turbulence. Cham: Springer International Publishing 116.
ISBN: 978-3-319-40623-7.
DOI: 10.1007/978-3-319-40624-4
- Efimov et al. 2020** Efimov, Alexey; Gorkavyy, Michael; Gorkavyy, Alexander, 2020.
Predicting Power Consumption of Robotic Complex Based on Neuro-Fuzzy System: *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Sochi, Russia, 18.05.2020 - 22.05.2020, S. 1-5.
ISBN: 978-1-7281-4590-7
DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112066

- Eggers 2019** Eggers, Kai Benjamin, 2019.
Energieeffizienter Betrieb von Industrierobotern.
Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Dissertation, 2019
- Ellis 2009** Ellis, Dan, 2009.
Robust Landmark-Based Audio Fingerprinting: R2009a.
Verfügbar unter: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/23332-robust-landmark-based-audio-fingerprinting>
Zugriff am: 29.09.2022
- Emadi et al. 2006** Emadi, Ali; Khaligh, Alireza; Rivetta, Claudio Hector; Williamson, Geoffrey. A., 2006.
Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives.
IEEE Transactions on Vehicular Technology **55** (4), S. 1112–1125
DOI: 10.1109/TVT.2006.877483
- Erlinghagen 2019** Erlinghagen, Philipp, 2019.
Elektromechanische Modellierung aktiver Verteilungsnetze zur Analyse der transienten Systemstabilität.
Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Dissertation, 2019
- Esparza et al. 2019** Esparza, Miguel; Segundo, Juan; Gurrola-Corral, Carlos; Visairo-Cruz, Nancy; Barcenas, Ernesto; Barocio, Emilio, 2019.
Parameter Estimation of a Grid-Connected VSC Using the Extended Harmonic Domain.
IEEE Transactions on Industrial Electronics **66** (8), S. 6044–6054
DOI: 10.1109/TIE.2018.2870404
- Europäische Kommission 2017** Europäische Kommission, 2017.
Automation and Robotics for EUropean Sustainable manufacturing: Final Report Summary - AREUS (Automation and Robotics for EUropean Sustainable manufacturing).
Verfügbar unter: <https://cordis.europa.eu/project/id/609391/reporting/de>
Zugriff am: 16.01.2022
- Fabian 2009** Fabian, Dirk Harry, 2009.
Regelung periodischer Prozesse. Kassel: Cuvillier.
Kassel, Universität, Dissertation, 2009.
ISBN: 978-3-86727-945-1

- Förster & Förster 2018** Förster, Ralf & Förster, Anna, 2018.
Einführung in die Fertigungstechnik. Berlin, Heidelberg:
Springer.
ISBN: 978-3-662-54702-1.
DOI: 10.1007/978-3-662-54702-1
- Frank et al. 2004** Frank, Ursula; Giese, Holger; Klein, Florian; Oberschelp, Oliver;
Schmidt, Andreas; Schulz, Bernd; Vöcking, Henner; Witting,
Katrin, 2004.
*Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus: Definitionen
und Konzepte*, Sonderforschungsbericht. Paderborn, S. 3-14.
DOI: 10.1007/978-3-8349-9371-7_1
Zugriff am: 27.06.2021
- Fraunhofer IFF 2013** Fraunhofer IFF, 2013.
*Schlussbericht Energierückgewinnung für Mehrachsmaschinen
(ERMA)*.
Verfügbar unter: [https://www.worldcat.org/title/
energie-rueckgewinnung-fur-mehrachsmaschinen-akronym-
erma-bmbf-programm-kmu-innovativ-ressourcen-und-
energieeffizienz-schlussbericht-laufzeit-172011-30062013/
oclc/931899985DOI:10.2314/GBV:823227421](https://www.worldcat.org/title/energie-rueckgewinnung-fur-mehrachsmaschinen-akronym-erma-bmbf-programm-kmu-innovativ-ressourcen-und-energieeffizienz-schlussbericht-laufzeit-172011-30062013/oclc/931899985DOI:10.2314/GBV:823227421)
Zugriff am: 18.04.2023
- Fraunhofer IPA 2017** Fraunhofer IPA, 2017.
Fast Storage BW II: Energiespeicher der nächsten Generation.
Verfügbar unter: [https://www.ipa.fraunhofer.de/de/
referenzprojekte/Fast-Storage-BW-II.html](https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/Fast-Storage-BW-II.html)
Zugriff am: 22.01.2022
- Fraunhofer IPA 2021** Fraunhofer IPA, 2021.
*StEff-Control - Selbsteinstellende Energieeffizienzregelung für
intelligente Schwungmassenspeichersysteme*.
Stuttgart.
Verfügbar unter: [https://www.ipa.fraunhofer.de/de/
referenzprojekte/steff-control.html](https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/steff-control.html)
Zugriff am: 17.01.2022
- Gale et al. 2015** Gale, Serge; Eielsen, Arnfinn Aas; Gravdahl, Jan Tommy, 2015.
Modelling and simulation of a flywheel based energy storage
system for an industrial manipulator: *2015 IEEE International
Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Seville, 17.03.2015 -
19.03.2015, S. 332-337.
ISBN: 978-1-4799-7800-7
DOI: 10.1109/ICIT.2015.7125120

- Gan et al. 2018** Gan, Shiyu; Chrenko, Daniela; Kéromnès, Alan; Le Moyne, Luis, 2018.
Development of a Multi-Architecture and Multi-Application Hybrid Vehicle Design and Management Tool.
Energies **11** (11), S. 3185
DOI: 10.3390/en1113185
- Gerlach 2021** Gerlach, Andreas, 2021.
Regelung von direktangetriebenen elektrischen Maschinen für Verbrennungsmotoren.
Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität, Dissertation, 2021
- Gonçalves de Oliveira 2011** Gonçalves de Oliveira, Janaína, 2011.
Power Control Systems in a Flywheel based All-Electric Driveline.
Uppsala, Sweden, University, Dissertation, 2011, URN:
nbn:se:uu:diva-157074
- Gong et al. 2018** Gong, Hong; Yang, Dongsheng; Wang, Xiongfei, 2018.
Parametric Identification of DQ Impedance Model for Three-Phase Voltage-Source Converters: *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, Shenzhen, China, 04.11.2018 - 07.11.2018, S. 1-6
DOI: 10.1109/PEAC.2018.8590653
- Gonzalez-Espin et al. 2014** Gonzalez-Espin, Fran; Valdivia, Virgilio; Hogan, Diarmaid; Diaz, Daniel; Foley, Raymond F., 2014.
Operating modes of a commercial and industrial building microgrid with electrical generation and storage: *2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, Galway, Ireland, 24.06.2014 - 27.06.2014, S. 1-5.
ISBN: 978-1-4799-5115-4
DOI: 10.1109/PEDG.2014.6878647
- Grbović 2010** Grbović, Petar, 2010.
Ultra-capacitor based regenerative energy storage and power factor correction device for controlled electric drives.
Lille, France, Ecole Centrale de Lille, Dissertation, 2010
- Hansen et al. 2015** Hansen, Christian; Eggers, Kai; Jotlarski, Jens; Ortmaier, Tobias, 2015.
Comparative Evaluation of Energy Storage Application in Multi-Axis Servo Systems: *The 14th IFToMM World Congress*, Taipei, Taiwan, 25.10.2015 - 30.10.2015, S. 201-210
DOI: 10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS13.041

- He et al. 2011** He, Jinping; Mao, Chengxiang; Lu, Jiming; Yang, Jiawei, 2011. Design and Implementation of an Energy Feedback Digital Device Used in Elevator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **58** (10), S. 4636–4642
DOI: 10.1109/TIE.2011.2112311
- Hedlund 2017** Hedlund, Magnus, 2017. *Electrified Integrated Kinetic Energy Storage*. Uppsala, Sweden, Universitet, Dissertation, 2017, URN: nbn:se:uu:diva-319622
- Heinrich et al. 2017** Heinrich, Berthold; Linke, Petra; Glöckler, Michael, 2017. *Grundlagen Automatisierung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-17581-8.
DOI: 10.1007/978-3-658-17582-5
- Heisig 2016** Heisig, Peter, 2016. *Abstraktion verteilter Produktionsmaschinen in cyber-physischen Produktionssystemen*. Dresden, Technische Universität, Diplomarbeit, 2016
- Hellmich 2014** Hellmich, Arvid, 2014. *Nichtinvasive Identifikation von Regelstreckenparametern für elektromechanische Achsen*. Chemnitz, Technische Universität, Dissertation, 2014
- Hellmich et al. 2013** Hellmich, Arvid; Hofmann, Stefan; Hipp, Kevin; Schlegel, Holger; Drossel, Welf-Guntram, 2013. Identifikation von Regelstreckenparametern einer Werkzeugmaschine im laufenden Betrieb: *Internationales Forum Mechatronik*, Winterthur, Schweiz, 30.10.2013 - 31.10.2013, S. 1-21
- Hellmich et al. 2014** Hellmich, Arvid; Hofmann, Stefan; Hipp, Kevin; Schlegel, Holger; Drossel, Welf-Guntram, 2014. Nichtinvasive Identifikation von Regelstreckenparametern einer Werkzeugmaschine.
In: Neugebauer, Reimund; Drossel, Welf-Guntram (Hrsg.): *Innovations of sustainable production for green mobility*. Reports from the IWU, 80. Auerbach: Wissenschaftliche Scripten, S. 425-436.
ISBN: 978-3-95735-004-6
- Henri & Lu 2019** Henri, Gonzague & Lu, Ning, 2019. A Supervised Machine Learning Approach to Control Energy Storage Devices. *IEEE Transactions on Smart Grid* **10** (6), S. 5910–5919
DOI: 10.1109/TSG.2019.2892586

- Hijazi 2010** Hijazi, Alaa, 2010.
Modélisation électrothermique, commande et dimensionnement d'un système de stockage d'énergie par supercondensateurs avec prise en compte de son vieillissement : application à la récupération de l'énergie de freinage d'un trolleybus.
Lyon, Frankreich, Université Claude Bernard - Lyon I, Dissertation, 2010
- Hintz 2003** Hintz, Christian, 2003.
Identifikation nichtlinearer mechatronischer Systeme mit strukturierten rekurrenten Netzen.
München, Technische Universität, Dissertation, 2003
- Hirose 2018** Hirose, Keiichi, 2018.
DC powered data center with 200 kW PV panels: *IEEE International Power Electronics Conference*, Niigata, Japan, 20.05.2018 - 24.05.2018, S. 822-825
DOI: 10.23919/IPEC.2018.8507890
- Hoffmann & Fuchs 2014** Hoffmann, Nils & Fuchs, Friedrich Wilhelm, 2014.
Minimal Invasive Equivalent Grid Impedance Estimation in Inductive-Resistive Power Networks Using Extended Kalman Filter.
IEEE Transactions on Power Electronics **29** (2), S. 631-641
DOI: 10.1109/TPEL.2013.2259507
- Höning 2016** Höning, Nicolas, 2016.
Peak reduction in decentralised electricity systems - Markets and prices for flexible planning.
Delft, Netherlands, University of Technology, Dissertation, 2016
- Hossain 2016** Hossain, Eklas, 2016.
Addressing Instability Issues in Microgrids Caused By Constant Power Loads Using Energy Storage Systems.
Milwaukee, USA, University of Wisconsin-Milwaukee, Dissertation, 2016
- Hossain et al. 2018** Hossain, Eklas; Perez, Ron; Nasiri, Adel; Padmanaban, Sanjeevikumar, 2018.
A Comprehensive Review on Constant Power Loads Compensation Techniques.
IEEE Access **6**, S. 33285-33305
DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2849065

- Hou & Jin 2011** Hou, Zhongsheng & Jin, Shangtai, 2011.
A Novel Data-Driven Control Approach for a Class of Discrete-Time Nonlinear Systems.
IEEE Transactions on Control Systems Technology **19** (6), S. 1549–1558
DOI: 10.1109/TCST.2010.2093136
- Houari 2012** Houari, Azeddine, 2012.
Contribution à l'étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques.
Nancy, France, Université de Lorraine, Dissertation, 2012
- Hrycej 2018** Hrycej, Tomas, 2018.
Robuste Regelung. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-662-54168-5.
DOI: 10.1007/978-3-662-54168-5
- Huerta et al. 2010** Huerta, Francisco; Cóbreces, Santiago; Rodríguez, Francisco Javier; Pizarro, Daniel; Meca, Francisco Javier, 2010.
Black-box Identification for an auto-tuned current controller working with Voltage Source Converters connected to the grid through a LCL filter: *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Bari, Italy, 04.07.2010 - 07.07.2010, S. 96-101.
ISBN: 978-1-4244-6390-9
DOI: 10.1109/ISIE.2010.5637700
- Huerta et al. 2012** Huerta, Francisco; Cóbreces, Santiago; Rodríguez, Francisco Javier; Clancey, Christina; Sanz Inés, 2012.
Comparison of two black-box model identification methods applied on a VSC with LCL filter: *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, Canada, 25.10.2012 - 28.10.2012, S. 4648-4653
DOI: 10.1109/IECON.2012.6389497
- Illmer 2022** Illmer, Benjamin, 2022.
Vorgehensmodelle für die virtuelle Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen.
Saarbrücken, Hochschule des Saarlands, Dissertation, 2022
- Isermann & Münchhof 2011** Isermann, Rolf & Münchhof, Marco, 2011.
Identification of Dynamic Systems. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 10.1007/978-3-540-78879-9.
DOI: 10.1007/978-3-540-78879-9
- Jabbour & Mademlis 2016** Jabbour, Nikolaos & Mademlis, Christos, 2016.
Improved Control Strategy of a Supercapacitor-Based Energy Recovery System for Elevator Applications.
IEEE Transactions on Power Electronics (31), S. 8398–8408
DOI: 10.1109/TPEL.2016.2516104

- Joseph 2022** Joseph, V. Roshan, 2022.
Optimal ratio for data splitting.
Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal **15** (4), S. 531–538
DOI: 10.1002/sam.11583
- Juhász & Hein 2019** Juhász, Tamás & Hein, Michael, 2019.
Hochleistungsenergiespeicher für Servopressen unter
Verwendung eines innovativen Schwungmassenspeichers: 22.
Wissenschaftstage, Magdeburg, 04.06.2019 - 06.06.2019, S. 1-4
- Juhász et al. 2013** Juhász, Tamás; Franke, Marco; Lüdigg, Christian; Schmucker, Ulrich, 2013.
ERMA- Energierückgewinnung für Mehrachsmaschinen. In:
Schenk, Michael (Hrsg.): *10. Fachtagung Digital Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme: 16. IFF-Wissenschaftstage*, Magdeburg, 18.06.2013 - 20.06.2013, S. 49-55
- Juhász et al. 2014** Juhász, Tamás; Kennel, Matthias; Franke, Marco; Schmucker, Ulrich, 2014.
Model-Based Energy Recuperation of Multi-Axis Machines:
10th International Modelica Conference, Lund, Sweden,
10.03.2014 - 12.03.2014, S. 609-615
DOI: 10.3384/ECP14096609
- Kafalis & Karlis 2016** Kafalis, Konstantinos & Karlis, Athanasios D., 2016.
Comparison of flywheels and supercapacitors for energy saving
in elevators: *IEEE Industry Application Society 52nd Annual Meeting: October 2-6, 2016, Portland, OR : conference record*,
Portland, OR, USA, 02.10.2016 - 06.10.2016, S. 1-8.
ISBN: 978-1-4799-8397-1
DOI: 10.1109/IAS.2016.7731825
- Kant & Sangwan 2015** Kant, Girish & Sangwan, Kuldip Singh, 2015.
Predictive Modelling for Energy Consumption in Machining
Using Artificial Neural Network.
Procedia CIRP **37**, S. 205–210
DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.081
- Kapoor & Parveen 2013** Kapoor, Radhika & Parveen, C. Mallika, 2013.
Comparative Study on Various KERS: *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, United Kingdom, 03.07.2013 - 05.07.2013, S. 1-5

- Kavitha & Subramanian 2017** Kavitha, V. & Subramanian, K., 2017.
Review on DC link capacitor issues in variable frequency drives:
2017 International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT),
Coimbatore, 03.02.2017 - 04.02.2017, S. 216-218.
ISBN: 978-1-5090-4527-3
DOI: 10.1109/ICIEEIMT.2017.8116839
- Kaymakci et al. 2021** Kaymakci, Can; Laribi, Raoul; Sauer, Alexander, 2021.
Intelligente Regelung für Stromspeichersysteme.
wt Werkstattstechnik online **111** (3), S. 167–171
DOI: 10.37544/1436-4980-2021-03-75
- Kennel 2017** Kennel, Fabian, 2017.
Beitrag zu iterativ lernenden modellprädiktiven Regelungen.
Berlin: Logos.
Kaiserslautern, Technische Universität, Dissertation, 2017.
ISBN: 978-3-8325-4462-1
- Kenny & Kascak 2003** Kenny, Barbara H. & Kascak, Peter E., 2003.
DC Bus Regulation With a Flywheel Energy Storage System. In:
NASA (Hrsg.): *Power Systems Conference*, Coral Springs,
Florida, USA, 29.10.2002 - 31.10.2002, S. 1-11
- Khodaparastan & Mohamed 2019** Khodaparastan, Mahdiyeh & Mohamed, Ahmed, 2019.
Flywheel vs. Supercapacitor as Wayside Energy Storage for
Electric Rail Transit Systems.
Inventions **4** (4), S. 62
DOI: 10.3390/inventions4040062
- Kimmerle & Stroppel 2011** Kimmerle, Wolfgang & Stroppel, Markus, 2011.
Analysis für Ingenieure, Mathematiker und Physiker. 3. Auflage.
Deilingen: edition delkhofen.
ISBN: 978-3-936413-26-7
- KIT 2022** KIT, 2022.
ESiP - Energiespeicher in der Produktion.
Verfügbar unter: https://www.batterietechnikum.kit.edu/170_1204.php
Zugriff am: 11.01.2023
- Kolar et al. 2008** Kolar, Johann Walter; Friedli, Thomas; Krismer, Florian, Round, Simon, 2008.
The Essence of Three-Phase AC/AC Converter Systems:
Proceedings / EPE-PEMC 2008, 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, Poznań, Poland,
01.09.2008 - 03.09.2008, S. 27-42
DOI: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635241

- Kong et al. 2016** Kong, Xiangyu; Bai, Linquan; Hu, Qinran; Li, Fangxing, 2016. Day-ahead optimal scheduling method for grid-connected microgrid based on energy storage control strategy. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* **4** (4), S. 648–658
DOI: 10.1007/s40565-016-0245-0
- König et al. 2013** König, Oliver; Jakubek, Stefan; Prochart, Günter, 2013. Einschleifige Impedanzregelung für die Emulation von Traktionsbatterien auf Antriebsprüfständen. In: Muschick, Daniel; Hofer, Anton; Dourdoumas, Nicolaos (Hrsg.): *18. Steirisches Seminar über Regelungstechnik und Prozessautomatisierung*, Schloss Retzhof, Leibnitz, Österreich, 02.09 - 05.09.2013, S. 29-44.
ISBN: 978-3-901439-10-0
- König et al. 2015** König, Oliver; Hametner, Christoph; Jakubek, Stefan; Prochart, Günter, 2015. Datengetriebene Batteriemodelle zur Emulation des Impedanzverhaltens von Traktionsbatterien. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* **132** (8), S. 469–473
DOI: 10.1007/s00502-015-0373-7
- Konsortium DC-INDUSTRIE2 2022** Konsortium DC-INDUSTRIE2, 2022. *Systemkonzept DC-INDUSTRIE2*. Frankfurt am Main.
Verfügbar unter: <https://dc-industrie.zvei.org/publikationen/systemkonzept-fuer-dc-industrie2>
Zugriff am: 20.03.2023
- Koppinen et al. 2018** Koppinen, Jussi; Kukkola, Jarno; Hinkkanen, Marko, 2018. Plug-In Identification Method for an LCL Filter of a Grid Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **65** (8), S. 6270–6280
DOI: 10.1109/TIE.2017.2787546
- Kroll 2016** Kroll, Andreas, 2016. *Computational Intelligence: Probleme, Methoden und technische Anwendungen*. 2. Auflage. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg. De Gruyter Studium.
ISBN: 978-3-11-040066-3.
DOI: 10.1515/9783110401776
- Kubade et al. 2017** Kubade, Priyanka; Umathe, S. K; Tutakne, D. R., 2017. Regenerative Braking in an Elevator Using Supercapacitor. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science* **2** (2), S. 62–65

- Kühn 2018** Kühn, Christoph, 2018.
Simulation von Fahrspielen und Energieflüssen in Nahverkehrssystemen.
Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2017
- Kwak et al. 2014** Kwak, Sangshin; Moon, Un-Chul; Park, Jun-Cheol, 2014.
Predictive-Control-Based Direct Power Control With an Adaptive Parameter Identification Technique for Improved AFE Performance.
IEEE Transactions on Power Electronics **29** (11), S. 6178–6187
DOI: 10.1109/TPEL.2014.2298041
- Laptev 2017** Laptev, Igor, 2017.
Direct sliding-mode current control of traverse drive systems.
Stuttgart, University, Dissertation, 2017
- Laribi & Sauer 2022** Laribi, Raoul & Sauer, Alexander, 2022.
Bremsenergie ökonomisch nutzen.
Autonome Regelung macht's möglich.
Magazin des Stuttgarter Maschinenbaus (11), S. 39–41
- Laribi & Schaab 2019** Laribi, Raoul & Schaab, Darian Andreas, 2019.
Nutzenpotenziale von DC-Smart-Grids in der Industrie.
wt Werkstattstechnik online (5), S. 307–311
DOI: 10.37544/1436-4980-2019-05-9
- Laribi et al. 2020a** Laribi, Raoul; Schaab, Darian Andreas; Sauer, Alexander, 2020.
Adaptive State of Charge Control for Droop Controlled Industrial DC-Microgrids: *2020 IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, Setúbal, Portugal, 08.07.2020 - 10.07.2020, S. 187-193.
ISBN: 978-1-7281-4218-0
DOI: 10.1109/CPE-POWERENG48600.2020.9161557
- Laribi et al. 2020b** Laribi, Raoul; Lu, Yijun; Schaab, Darian Andreas; Dierolf, Christian; Sauer, Alexander, 2020.
Requirements Engineering and Morphological Analysis of Adaptive Control Strategies for Flywheel Energy Storage Systems in Industrial Applications: *ECEEE Industrial Summer Study Proceedings*, Gothenburg, Sweden, 14.09.2020 - 17.09.2020, S. 273-283.
ISBN: 978-91-983878-7-2

- Laribi et al. 2021** Laribi, Raoul; Schaab, Darian Andreas; Lu, Yijun; Sauer, Alexander, 2021.
Non-Invasive Closed-Loop System Identification of an Active Rectifier: *IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Toronto, ON, Canada, 13.10.2021 - 16.10.2021: IEEE, S. 1-7.
ISBN: 978-1-6654-3554-3
DOI: 10.1109/IECON48115.2021.9589954
- Laribi et al. 2023a** Laribi, Raoul; Harscher, Philipp; Knapp, Jonas; Birke, Kai Peter; Sauer, Alexander, 2023.
Autonomous Load Profile Recognition in Industrial DC-Link Using an Audio Search Algorithm: *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics*, Querétaro, Mexico, 28.02.2023 - 02.03.2023, S. 12-22
DOI: 10.15488/13418
- Laribi et al. 2023b** Laribi, Raoul; Kuhlmann, Timm; Sauer, Alexander, 2023.
Review on self-tuning control of energy storage systems in industrial DC grids: *WSED 2023: Young Energy Researchers Conference*, Wels, Austria, 28.02.2023, S. 1-15
- Li & Palazzolo 2021** Li, Xiaojun & Palazzolo, Alan, 2021.
A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities.
Journal of Energy Storage (46), S. 1–53
DOI: 10.1016/j.est.2021.103576
- Li & Ruan 2008** Li, Zheng & Ruan, Yi, 2008.
A Novel Energy Saving Control System for Elevator Based on Supercapacitor Bank Using Fuzzy Logic: *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, China, 17.10.2008 - 20.10.2008, S. 2717-2722.
ISBN: 978-1-4244-3826-6
- Li & Yan 2018** LI, Xiangjun & Yan, Heming, 2018.
Fuzzy logic-based coordinated control method for multi-type battery energy storage systems.
Artificial Intelligence Review 49 (2), S. 227–243
DOI: 10.1007/s10462-016-9523-5
- Li et al. 2019** Li, Kang; Dewar, David; Formentini, Andrea; Zanchetta, Pericle; Wheeler, Pat, 2019.
Grid Impedance Identification and Structured-h2 Optimization Based Controller Design of Active Front-end in Embedded AC Networks: *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Baltimore, USA, 29.09.2019 - 03.10.2019, S. 4840-4845
DOI: 10.1109/ECCE.2019.8912832

- Lin et al. 2019** Lin, Bing Hao; Tsai, Jin Tong; Lian, Kuo Lung, 2019.
A Non-Invasive Method for Estimating Circuit and Control Parameters of Voltage Source Converters.
IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers **66** (12), S. 4911–4921
DOI: 10.1109/TCSI.2019.2929783
- Lindenmaier 2010** Lindenmaier, Jochen, 2010.
Untersuchung eines von Doppelschichtkondensatoren unterstützten Zweispannungsbusnetzes für Mikro-Hybrid-Fahrzeuge.
Ulm, Universität, Dissertation, 2010
- Liu et al. 2017** Liu, Xing; Wang, Dan; Peng, Zhouhua, 2017.
Predictive direct power control for three-phase grid-connected converters with online parameter identification.
International Transactions on Electrical Energy Systems **27** (1), S. 1-21
DOI: 10.1002/etep.2240
- Ljung 1999** Ljung, Lennart, 1999.
System identification: Theory for the user. 2. Auflage. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. Prentice Hall information and system sciences series.
ISBN: 0-13-656-695-3
- Longman 2000** Longman, Richard W., 2000.
Iterative learning control and repetitive control for engineering practice.
International Journal of Control **73** (10), S. 930–954
DOI: 10.1080/002071700405905
- Lotichius 2017** Lotichius, Jan, 2017.
Modellbildung der Messunsicherheit resistiver Sensorsysteme.
Darmstadt, Technische Universität, Dissertation, 2017
- Lu et al. 2014** Lu, Xiaonan; Sun, Kai; Huang, Lipei; Guerrero, Josep Maria; Vasquez, Juan Carlos; Xing, Yan, 2014.
Virtual Impedance Based Stability Improvement for DC Microgrids with Constant Power Loads: 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2014), Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 14.09.2014 - 18.09.2014, S. 2670-2675
DOI: 10.1109/ECCE.2014.6953759
- Lu et al. 2015** Lu, Xiaonan; Sun, Kai; Guerrero, Josep Maria; Vasquez, Juan Carlos; Huang, Lipei; Wang, Jianhui, 2015.
Stability Enhancement Based on Virtual Impedance for DC Microgrids With Constant Power Loads.
IEEE Transactions on Smart Grid **6** (6), S. 2770–2783
DOI: 10.1109/TSG.2015.2455017

- Lu et al. 2021a** Lu, Yijun; Laribi, Raoul; Sauer, Alexander, 2021. Modeling and Control of an Energy Storage System for Peak Shaving in Industrial Pulsed Power Applications: *2021 Power System and Green Energy Conference (PSGEC)*, Shanghai, China, 20.08.2021 - 22.08.2021, S. 390-394. ISBN: 978-1-7281-9095-2 DOI: 10.1109/PSGEC51302.2021.9542104
- Lu et al. 2021b** Lu, Yijun; Laribi, Raoul; Sauer, Alexander, 2021. Modelling and Analysis of High-Speed Flywheel Energy Storage Control System and PLC Implementation: *2021 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT)*, Macau, Macao, 16.12.2021 - 18.12.2021, S. 55-60. ISBN: 978-1-6654-4041-7 DOI: 10.1109/CEECT53198.2021.9672638
- Lu et al. 2021c** Lu, Yijun; Laribi, Raoul; Schaab, Darian Andreas; Sauer, Alexander, 2021. Control Design and Stability Analysis of an Energy Storage System in a DC Link for Industrial Pulsed Power Applications: *2021 IEEE Fourth International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Arlington, VA, USA, 18.07.2021 - 21.07.2021: IEEE, S. 1-6. ISBN: 978-1-7281-8641-2 DOI: 10.1109/ICDCM50975.2021.9504624
- Lühn & Geldermann 2017** Lühn, Tobias & Geldermann, Jutta, 2017. Operating Strategies for Battery Storage Systems in Low-Voltage Grids to Limit the Feed-In Power of Solar Power Systems Using Fuzzy Control. *Zeitschrift für Energiewirtschaft* **41** (3), S. 169–186 DOI: 10.1007/s12398-017-0198-7
- Lunze 2016a** Lunze, Jan, 2016. *Regelungstechnik 2: Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung*. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-52676-7. DOI: 10.1007/978-3-662-52676-7
- Lunze 2016b** Lunze, Jan, 2016. *Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. 11. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-52678-1. DOI: 10.1007/978-3-662-52678-1

- Lv et al. 2013** Lv, Youran; Wang, Lei; Xiang, Jia Yi; Yang, Feng; Du, Xiao Qiang, 2013.
Study on Droop Control Strategy with Application to Flywheel Energy Storage System.
Applied Mechanics and Materials **448-453**, S. 2903–2907
DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.448-453.2903
- Ma et al. 2005** Ma, Hao; Mao, Xingyun; Zhang, Ni; Xu, Dehong, 2005.
Parameter Identification of Power Electronic Circuits Based on Hybrid Model: *IEEE 36th Conference on Power Electronics Specialists, 2005*, Aachen, Germany, 12.06.2005, S. 2855-2860.
ISBN: 0-7803-9033-4
DOI: 10.1109/PESC.2005.1582038
- Magne 2012** Magne, Pierre, 2012.
Contribution to the stability analysis and stabilization of DC microgrid with energy storage capability.
Nancy, France, Université de Lorraine, Dissertation, 2012
- Männel et al. 2020** Männel, Alexander; Müller, Kevin; Knöchelmann, Elias; Ortmaier, Tobias, 2020.
Load Profile Cycle Recognition for Industrial DC Microgrids with Energy Storage Systems: *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Delf, Netherlands, 17.06.2020 - 19.06.2020, S. 904-9011
DOI: 10.1109/ISIE45063.2020.9152432
- Mardani et al. 2019** Mardani, Mohammad Mehdi; Khooban, Mohammad Hassan; Masoudian, Ali; Dragicevic, Tomislav, 2019.
Model Predictive Control of DC–DC Converters to Mitigate the Effects of Pulsed Power Loads in Naval DC Microgrids.
IEEE Transactions on Industrial Electronics **66** (7), S. 5676–5685
DOI: 10.1109/TIE.2018.2877191
- Martin & Santi 2014** Martin, Daniel & Santi, Enrico, 2014.
Autotuning of Digital Deadbeat Current Controllers for Grid-Tie Inverters Using Wide Bandwidth Impedance Identification.
IEEE Transactions on Industry Applications **50** (1), S. 441–451
DOI: 10.1109/TIA.2013.2267708
- Meghni et al. 2017** Meghni, Billel; Dib, Djalel; Azar, Ahmad Taher, 2017.
A second-order sliding mode and fuzzy logic control to optimal energy management in wind turbine with battery storage.
Neural Computing and Applications **28** (6), S. 1417–1434
DOI: 10.1007/s00521-015-2161-z

- Meike & Rankis 2012** Meike, Davis & Rankis, Ivars, 2012.
New type of power converter for common-ground DC bus sharing to increase the energy efficiency in drive systems: *IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012*, Florence, Italy, 09.09.2012 - 12.09.2012, S. 225-230.
ISBN: 978-1-4673-1454-1
DOI: 10.1109/EnergyCon.2012.6347757
- Merkle 2002** Merkle, Michael, 2002.
Dynamische Modellierung von Verbrauchergruppen und statischer Blindleistungskompensatoren zur Untersuchung der Spannungsstabilität in Netzen.
Karlsruhe, Universität Fridericiana, Dissertation, 2002
- Mesemanolis et al. 2014** Mesemanolis, Athanasios; Mademlis, Christos; Kioskeridis, Iordanis, 2014.
Neuro-Fuzzy Energy Management System: *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD)*, Manchester, United Kingdom, 08.04.2014 - 10.04.2014, S. 1-6.
ISBN: 978-1-84919-815-8
DOI: 10.1049/cp.2014.0494
- Miao et al. 2005** Miao, B; Zane, R; Maksimovic, D., 2005.
System Identification of Power Converters With Digital Control Through Cross-Correlation Methods.
IEEE Transactions on Power Electronics **20** (5), S. 1093–1099
DOI: 10.1109/TPEL.2005.854035
- Michaelson & Jiang 2017** Michaelson, Dennis G. & Jiang, Jin, 2017.
Predictive Energy Management of Islanded Microgrids with Photovoltaics and Energy Storage.
IEEE Transactions on Industrial Electronics **64** (7), S. 5440–5448
DOI: 10.1109/TIE.2017.2677317
- Mir & Senroy 2019** Mir, Abdul Saleem & Senroy, Nilanjan, 2019.
Intelligently Controlled Flywheel Storage for Enhanced Dynamic Performance.
IEEE Transactions on Sustainable Energy **10** (4), S. 2163–2173
DOI: 10.1109/TSTE.2018.2881317
- Mitronikas et al. 2014** Mitronikas, E. D; Spyropoulos, D. V; Papanikolaou, N. P; Tatakis, E. C; Spyropoulos, N., 2014.
Energy saving during modern lift operation: *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM 2014)*, Berlin, Germany, 02.09.2014 - 05.09.2014, S. 756-761.
ISBN: 978-1-4799-4389-0
DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960266

- Mohammed et al. 2019** Mohammed, Nabil; Ciobotaru, Mihai; Town, Graham, 2019. Performance Evaluation of Wideband Binary Identification of Grid Impedance Using Grid-connected Inverters: *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe)*, Genova, Italy, 03.09.2019 - 05.09.2019, S. 1-10.
ISBN: 978-9-0758-1531-3
DOI: 10.23919/EPE.2019.8915509
- Mühlbauer et al. 2021** Mühlbauer, Matthias; Würschinger, Hubert; Polzer, Dominik; Hanenkamp, Nico, 2021. Energy Profile Prediction of Milling Processes Using Machine Learning Techniques.
In: Beyerer, Jürgen; Maier, Alexander; Niggemann, Oliver (Hrsg.): *Machine Learning for Cyber Physical Systems*. Technologien für die intelligente Automation. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1-11.
ISBN: 978-3-662-62745-7
DOI: 10.1007/978-3-662-62746-4_1
- Mukherjee et al. 2017** Mukherjee, Subhajyoti; Chowdhury, Vikram Roy; Shamsi, Pourya; Ferdowsi, Mehdi, 2017. Model Reference Adaptive Control Based Estimation of Equivalent Resistance and Reactance in Grid-Connected Inverters.
IEEE Transactions on Energy Conversion **32** (4), S. 1407–1417
DOI: 10.1109/TEC.2017.2710200
- Müller & Villegas 2014** Müller, Hausi & Villegas, Norha, 2014. Runtime Evolution of Highly Dynamic Software.
In: Tom Mens, Alexander; Serebrenik, Anthony C. (Hrsg.): *Evolving Software Systems*. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 229-264.
ISBN: 978-3-642-45397-7
DOI: 10.1007/978-3-642-45398-4_8
- Nelles 2018a** Nelles, Oliver, 2018. *Regelungstechnik*.
Siegen, Universität, Vorlesungsskript, Wintersemester 2018
- Nelles 2018b** Nelles, Oliver, 2018. *Zustandsraum und Digitale Regelung*.
Siegen, Universität, Vorlesungsskript, Sommersemester 2018
- Neshvad et al. 2015** Neshvad, Surena; Chatzinotas, Symeon; Sachau, Jurgen, 2015. Wideband Identification of Power Network Parameters Using Pseudo-Random Binary Sequences on Power Inverters.
IEEE Transactions on Smart Grid **6** (5), S. 2293–2301
DOI: 10.1109/TSG.2015.2397552

- Neugebauer 2012** Neugebauer, Reimund, 2012.
Werkzeugmaschinen. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-642-30077-6.
DOI: 10.1007/978-3-642-30078-3
- Neugebauer et al. 2011** Neugebauer, Reimund; Kolesnikov, Artem; Richter, Mark, 2011.
Energy efficient storage systems in the DC link for the drive unit of machine tools: *2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, Birmingham, United Kingdom, 30.08.2011 - 01.09.2011.
ISBN: 978-90-75815-15-3
- Noack 2018** Noack, René, 2018.
Beitrag zur selbsteinstellenden Ladedruckregelung von aufgeladenen Ottomotoren.
Rostock, Universität, Dissertation, 2018
- Ott 2019** Ott, Leopold, 2019.
Modellbasierte Stabilitätsuntersuchungen in Niederspannungs-DC-Verteilnetzen.
Erlangen-Nürnberg, Friedrich-Alexander Universität, Dissertation, 2019
- Oyarbide et al. 2011** Oyarbide, Estanis; Elizondo, Ivan; Martinez-Iturbe, Abelardo; Bernal, Carlos; Irisarri, Javier, 2011.
Ultracapacitor-based plug & play energy-recovery system for elevator retrofit: *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Gdansk, Poland, 27.06.2011 - 30.06.2011, S. 462-467
DOI: 10.1109/ISIE.2011.5984069
- Papanikolaou et al. 2013** Papanikolaou, Nick; Karatzafaris, John; Loupis, Michael; Tatakis, Emmanuel, 2013.
Theoretical and Experimental Investigation of Brake Energy Recovery in Industrial Loads.
Energy and Power Engineering **05** (07), S. 459–473
DOI: 10.4236/epe.2013.57050
- Park & Jeong 1999** Park, Poo Gyeon & Jeong, Seung Cheol, 1999.
Self-tuning Control Design based on Recursive Parameter Estimation and Robust Receding Horizon Control: *Proceedings of the 38th Conference on Decision & Control*, Phoenix, Arizona, USA, 07.12.1999 - 10.12.1999, S. 4607-4612
DOI: 10.1109/CDC.1999.833269

- Park et al. 2015** Park, Jinkyoo; Law, Kincho H; Bhinge, Raunak; Biswas, Nishant; Srinivasan, Amrita; Dornfeld, David A; Helu, Moneer; Rachuri, Sudarsan, 2015.
A Generalized Data-Driven Energy Prediction Model With Uncertainty for a Milling Machine Tool Using Gaussian Process: *Proceedings of the ASME 10th International Manufacturing Science and Engineering Conference - 2015*, Charlotte, North Carolina, USA, 08.06.2015 - 12.06.2015. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
ISBN: 978-0-7918-5683-3
DOI: 10.1115/MSEC2015-9354
- Parvez et al. 2015** Parvez, M; Mekhilef, Said; Tan, Nadia Mei Lin; Akagi, Hirofumi, 2015.
An Improved Active-Front-End Rectifier Using Model Predictive Control: *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2015)*, Charlotte, NC, USA, 15.03.2015 - 19.03.2015, S. 122-127
DOI: 10.1109/APEC.2015.7104341
- Pavlova & Grigorii 2018** Pavlova, Yuliya V. & Grigorii, Belskii V., 2018.
The synthesis of a control system of the active rectifier: *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, Moscow, 29.01.2018 - 01.02.2018, S. 941-944.
ISBN: 978-1-5386-4339-6
DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317244
- Perassi 2007** Perassi, Héctor Daniel, 2007.
Feldorientierte Regelung der permanenterregten Synchronmaschine ohne Lagegeber für den gesamten Drehzahlbereich bis zum Stillstand.
Illmenau, Technische Universität, Dissertation, 2007, URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2007000172
- Petruschke et al. 2021** Petruschke, Lars; Walther, Jessica; Burkhardt, Max; Luther, Max; Weigold, Matthias, 2021.
Machine learning based identification of energy states of metal cutting machine tools using load profiles.
Procedia CIRP **104**, S. 357–362
DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.060
- Pfeifroth 2015** Pfeifroth, Philipp Maria, 2015.
Modellierung der Einsatzplanung funktionaler Stromspeicher für Strom- und Regelleistungsmärkte.
München, Technische Universität, Dissertation, 2015

- Pikkarainen 2016** Pikkarainen, Jussi, 2016.
What's the Difference between an Ultracapacitor and a Supercapacitor?
Verfügbar unter: <https://www.skeletonotech.com/skeleton-blog/whats-the-difference-between-an-ultracapacitor-and-a-supercapacitor>
Zugriff am: 20.03.2023
- Putz et al. 2015** Putz, Matthias; Kolesnikov, Artem; Richter, Mark; Koch, Thomas, 2015.
The application of double-layer capacitor modules for energy storage devices in production machinery: *17th European Conference on Power Electronics and Applications*, Geneva, Switzerland, 08.09.2015 - 10.09.2015, S. 1-10
DOI: 10.1109/EPE.2015.7311774
- Putz et al. 2016** Putz, Matthias; Blau, Peter; Kolesnikov, Artem; Richter, Mark; Pierer, Alexander, 2016.
Energy storage in drive systems of servo presses for reduction of peak power and energy recovery: *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, Karlsruhe, Germany, 05.09.2016 - 09.09.2016, S. 1-10
DOI: 10.1109/EPE.2016.7695645
- Quang & Dittrich 2015** Quang, Nguyen Phung & Dittrich, Jörg-Andreas, 2015.
Vector Control of Three-Phase AC Machines. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-662-46914-9.
DOI: 10.1007/978-3-662-46915-6
- Reger et al. 2015** Reger, Arnim; Oette, Cedric; Aires, Ana Paula; Steinhilper, Rolf, 2015.
Pattern recognition in load profiles of electric drives in manufacturing plants: *2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, Nuremberg, Germany, 15.09.2015 - 16.09.2015, S. 1-10.
ISBN: 978-1-4673-7511-5
DOI: 10.1109/EDPC.2015.7323209
- Reichensdörfer et al. 2017** Reichensdörfer, Elias; Günther, Johannes; Diepold, Klaus, 2017.
Recurrent Neural Networks for PID Auto-tuning. Adaptive Control and Identification of Nonlinear Systems. München.
Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1381851/534530033346.pdf>
Zugriff am: 31.01.2021

- Riccobono & Santi 2014** Riccobono, Antonino & Santi, Enrico, 2014.
Comprehensive Review of Stability Criteria for DC Power Distribution Systems.
IEEE Transactions on Industry Applications **50** (5), S. 3525–3535
DOI: 10.1109/TIA.2014.2309800
- Riccobono et al. 2018** Riccobono, Antonino; Mirz, Markus; Monti, Antonello, 2018.
Noninvasive Online Parametric Identification of Three-Phase AC Power Impedances to Assess the Stability of Grid-Tied Power Electronic Inverters in LV Networks.
IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics **6** (2), S. 629–647
DOI: 10.1109/JESTPE.2017.2783042
- Richter 2016** Richter, Jan, 2016.
Modellbildung, Parameteridentifikation und Regelung hoch ausgenutzter Synchronmaschinen. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2016.
ISBN: 978-3-7315-0555-6.
DOI: 10.5445/KSP/1000057097
- Rodriguez et al. 2005** Rodriguez, José R; Dixon, Juan W; Espinoza, José R; Pontt, Jorge; Lezana, Pablo, 2005.
PWM regenerative rectifiers: state of the art.
IEEE Transactions on Industrial Electronics **52** (1), S. 5–22
DOI: 10.1109/TIE.2004.841149
- Rojas Fernández 2012** Rojas Fernández, José David, 2012.
Data-Driven Control: a new important field in control theory: *15th Latinamerican Control Conference*, Lima, Perú, S. 1-6
- Ropohl 2009a** Ropohl, Günter, 2009.
Signaturen der technischen Welt: Neue Beiträge zur Technikphilosophie. Berlin, Münster: Lit. Technikphilosophie 20.
ISBN: 978-3-643-10465-6
- Ropohl 2009b** Ropohl, Günter, 2009.
Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik. 3. Auflage. Karlsruhe: Universitätsverlag.
ISBN: 978-3-86644-374-7
- Rowell 2003** Rowell, Derek, 2003.
Impedance-Based Modeling Methods.
Cambridge, Massachusetts, USA, Massachusetts Institute of Technology, Vorlesungsskript,
<http://web.mit.edu/2.151/www/Handouts/Impedances.pdf>

- Rufer & Barrade 2002** Rufer, Alfred & Barrade, Philippe, 2002.
A supercapacitor-based energy-storage system for elevators with soft commutated interface.
IEEE Transactions on Industry Applications **38** (5), S. 1151–1159
DOI: 10.1109/TIA.2002.803021
- Russell & Norvig 2021** Russell, Stuart J. & Norvig, Peter, 2021.
Artificial intelligence: A modern approach. Fourth edition, global edition. Boston: Pearson. Always learning.
ISBN: 978-1-292-40113-3
- Sangwan & Kant 2017** Sangwan, Kuldip Singh & Kant, Girish, 2017.
Optimization of Machining Parameters for Improving Energy Efficiency using Integrated Response Surface Methodology and Genetic Algorithm Approach.
Procedia CIRP **61**, S. 517–522
DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.162
- Sankar & Vaideeswaran 2018** Sankar, N. & Vaideeswaran, V., 2018.
Control Techniques of Three Phase PWM Rectifier.
International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) **2018** (8), S. 148–152
- Sartorius 2019** Sartorius, Gerhard, 2019.
Erfassen, Verarbeiten und Zuordnen multivariater Messgrößen. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-23575-8.
DOI: 10.1007/978-3-658-23576-5
- Sauer 2021** Sauer, Alexander (Hrsg.), 2021.
The DC-Factory: Energy efficient. Robust. Forward-looking. München: Hanser.
ISBN: 978-3446471740
DOI: 10.3139/9783446471795
- Schaab 2023** Schaab, Darian Andreas, 2023.
Auslegung von Regelungssystemen industrieller Gleichspannungs-Mikronetze. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 151. Stuttgart, Universität, Dissertation, 2023.
DOI: 10.18419/opus-13019
- Schaab et al. 2018** Schaab, Darian Andreas; Laribi, Raoul; Zimmermann, Fabian; Sauer, Alexander, 2018.
Energiespeicher für Rekuperation in Industriemaschinen.
wt Werkstattstechnik online **108** (5), S. 1–7
DOI: 10.37544/1436-4980-2018-05-51

- Schaab et al. 2019** Schaab, Darian Andreas; Laribi, Raoul; Sauer, Alexander, 2019. Sizing Electric Storage Devices for Power Smoothing Applications in DC Microgrids: *IEEE 7th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, Oshawa, Canada, S. 150-155
DOI: 10.1109/SEGE.2019.8859859
- Schaade 2003** Schaade, Wolfgang, 2003. *Selbstgeführte Stromrichter und deren Stabilität an einem DC-Netz*. Illmenau, Technische Universität, Dissertation, 2003
- Schafer 2011** Schafer, Ronald, 2011. What Is a Savitzky-Golay Filter? [Lecture Notes]. *IEEE Signal Processing Magazine* **28** (4), S. 111–117
DOI: 10.1109/MSP.2011.941097
- Schärer 2012** Schärer, André, 2012. Effiziente Gleichstromversorgung im Rechenzentrum. Realisiertes Projekt zeigt Potenziale auf. *Bulletin.ch: Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse* **103** (8), S. 23–26
DOI: 10.5169/seals-857326
- Schmitt & Andres 2019** Schmitt, Thomas Lienhard & Andres, Markus, 2019. *Methoden zur Modellbildung und Simulation mechatronischer Systeme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-25089-8.
DOI: 10.1007/978-3-658-25089-8
- Schneider & Heinrich 2017** Schneider, Wolfgang & Heinrich, Berthold, 2017. *Praktische Regelungstechnik*. 4. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.
ISBN: 978-3-658-16993-0.
DOI: 10.1007/978-3-658-16993-0
- Schröder 2010** Schröder, Dierk, 2010. *Intelligente Verfahren: Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-662-55327-5.
DOI: 10.1007/978-3-642-11398-7
- Schröder 2012** Schröder, Dierk, 2012. *Leistungselektronische Schaltungen: Funktion, Auslegung und Anwendung*. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-642-30103-2.
DOI: 10.1007/978-3-642-30104-9

- Schröder 2015** Schröder, Dierk, 2015.
Elektrische Antriebe. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-642-30096-7.
DOI: 10.1007/978-3-642-30096-7
- Schulz et al. 2015** Schulz, Alexander; Hartl, Stefan; Sima, Harald; Hinterdorfer, Thomas; Wassermann, Johann, 2015.
Innovative Schwungradspeicher mit hoher Energieeffizienz und Zuverlässigkeit.
e & i Elektrotechnik und Informationstechnik **132** (8), S. 481–490
DOI: 10.1007/s00502-015-0378-2
- Schumacher & Maurer 2014** Schumacher, Walter & Maurer, Markus, 2014.
Grundlagen der Regelungstechnik.
Braunschweig, Technische Universität, Vorlesungsskript, Wintersemester 2014
- Schwab 2012** Schwab, Adolf Josef, 2012.
Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-642-21957-3.
DOI: 10.1007/978-3-642-21958-0
- Senfelds et al. 2015** Senfelds, Armands; Vorobjovs, Maksims; Meike, Davis; Bormanis, Oskars, 2015.
Power smoothing approach within industrial DC microgrid with supercapacitor storage for robotic manufacturing application: *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2015)*, Gothenburg, Sweden, 24.08.2015 - 28.08.2015, S. 1333-1338.
ISBN: 978-1-4673-8183-3
DOI: 10.1109/CoASE.2015.7294283
- Shen & Veldpaus 2004** Shen, Shuiwen & Veldpaus, Frans E., 2004.
Analysis and Control of a Flywheel Hybrid Vehicular Powertrain.
IEEE Transactions on Control Systems Technology **12** (5), S. 645–660
DOI: 10.1109/TCST.2004.824792
- Siciliano & Khatib 2016** Siciliano, Bruno & Khatib, Oussama, 2016.
Springer Handbook of Robotics. Cham: Springer International Publishing.
ISBN: 978-3-319-32550-7.
DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1

- Singh et al. 2017** Singh, Suresh; Gautam, Aditya R; Fulwani, Deepak, 2017. Constant power loads and their effects in DC distributed power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **72**, S. 407–421
DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.027
- Specovius 2011** Specovius, Joachim, 2011. *Grundkurs Leistungselektronik: Bauelemente, Schaltungen und Systeme*. 5. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
ISBN: 978-3-8348-8270-7.
DOI: 10.1007/978-3-8348-8270-7
- Stemmler 2020** Stemmler, Sebastian, 2020. *Intelligente Regelungsstrategien als Schlüsseltechnologie selbstoptimierender Fertigungssysteme*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Dissertation, 2020
- Sterner & Stadler 2017** Sterner, Michael & Stadler, Ingo, 2017. *Energiespeicher: Bedarf, Technologien, Integration*. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg.
ISBN: 978-3662488928.
DOI: 10.1007/978-3-662-48893-5
- Sterner & Stadler 2019** Sterner, Michael & Stadler, Ingo, 2019. *Handbook of Energy Storage*. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-662-55503-3.
DOI: 10.1007/978-3-662-55504-0
- Stoic et al. 2018** Stoic, Antun; Stojkov, Marinko; Samardzic, Ivan; Duspara, Miroslav, 2018. Energy Efficiency in Machine Tool: *Proceedings of International Conference on Smart Systems and Technologies 2018 (SST 2018)*, Osijek, Croatia, October, 10.10.2018 - 12.10.2018, S. 55-58.
ISBN: 978-1-5386-7189-4
DOI: 10.1109/SST.2018.8564733
- Sun 2017** Sun, Bo, 2017. *Control of Flywheel Energy Storage Systems in Electrical Vehicle Charging Stations*. Aalborg, University, Denmark, Dissertation, 2017

- Sun et al. 2015** Sun, Bo; Dragicevic, Tomislav; Vasquez, Juan C; Guerrero, Josep M; Savaghebi, Mehdi, 2015.
Distributed bus signaling control for a DC charging station with multi paralleled flywheel energy storage system: *2015 6th Power Electronics, Drives Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*, Tehran, Iran, 03.02.2015 - 04.02.2015, S. 65-70.
ISBN: 978-1-4799-7653-9
DOI: 10.1109/PEDSTC.2015.7093251
- Svaricek 2013** Svaricek, Ferdinand, 2013.
Steuer- und Regelungstechnik.
München, Universität der Bundeswehr, Vorlesungsskript, Wintersemester 2013
- Takeshita & Matsui 1992** Takeshita, T. & Matsui, N., 1992.
DSP-based current control of three-phase AC/DC PWM converter with model reference adaptive identifier: *PESC '92 Record. 23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Toledo, Spain, 29.06.1992 - 03.07.1992, S. 496-502.
ISBN: 0-7803-0695-3
DOI: 10.1109/PESC.1992.254840
- Talebi et al. 2008** Talebi, Salman; Nikbakhtian, Behrooz; Chakali, Anil Kumar; Toliyat, Hamid A., 2008.
Control design of an advanced high-speed FESS for pulsed power applications: *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Orlando, FL, USA, 10.11.2008 - 13.11.2008, S. 3358-3363.
ISBN: 978-1-4244-1767-4
DOI: 10.1109/IECON.2008.4758499
- Tan & Fah 2017** Tan, Kai Hou & Fah, Yap Fook, 2017.
Reducing Fuel Consumption Using Flywheel Battery Technology for Rubber Tyred Gantry Cranes in Container Terminals.
Journal of Power and Energy Engineering 5 (7), S. 15–33
DOI: 10.4236/jpee.2017.57002
- Teigelkötter 2013** Teigelkötter, Johannes, 2013.
Energieeffiziente elektrische Antriebe: Grundlagen, Leistungselektronik, Betriebsverhalten und Regelung von Drehstrommotoren. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
ISBN: 978-3-8348-2330-4.
DOI: 10.1007/978-3-8348-2330-4

- Teiwes et al. 2018** Teiwes, Hanno; Blume, Stefan; Herrmann, Christoph; Rössinger, Markus; Thiede, Sebastian, 2018. Energy Load Profile Analysis on Machine Level. *Procedia CIRP* **69**, S. 271–276
DOI: 10.1016/j.procir.2017.11.073
- Teo et al. 2018** Teo, Tiong T; Logenthiran, Thillainathan; Woo, Wai L; Abidi, Khalid, 2018. Near-Optimal Day-Ahead Scheduling of Energy Storage System in Grid-Connected Microgrid: 2018 *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, Singapore, 22.05.2018 - 25.05.2018, S. 1257-1261
DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2018.8467921
- Thatte et al. 2011** Thatte, Anupam A; Zhang, Fan; Xie, Le, 2011. Coordination of wind farms and flywheels for energy balancing and frequency regulation: 2011 *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, 24.07.2011 - 29.07.2011, S. 1-7.
ISBN: 978-1-4577-1000-1
DOI: 10.1109/PES.2011.6039118
- Tominaga et al. 2002** Tominaga, Shinji; Suga, Ikuro; Araki, Hiroshi; Ikejima, Hiroyuki; Kusuma, Makoto; Kobayashi, Kazuyuki, 2002. Development of Energy-Saving Elevator Using Regenerated Power Storage System: *Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002*, Osaka, Japan, S. 890-895
DOI: 10.1109/PCC.2002.997639
- Trächtler & Gausemeier 2018** Trächtler, Ansgar & Gausemeier, Jürgen, 2018. *Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme*. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-662-56392-2.
DOI: 10.1007/978-3-662-56392-2
- TU Darmstadt 2019a** TU Darmstadt, 2019. *Verbundprojekt: KoREV-SMS: Kostenreduktion bei gleichzeitiger Erhöhung der Verfügbarkeit - Schwungmassenspeicher in Außenläufer-Bauform : Schlussbericht Teilvorhaben*. Darmstadt.
Verfügbar unter: https://www.ims.tu-darmstadt.de/forschung_ims/energie_systeme/projekte_5/korev_sms_i/index.de.jsp DOI: 10.2314/KXP:171391834X
Zugriff am: 17.01.2022

- TU Darmstadt 2019b** TU Darmstadt, 2019.
ETA-Fabrik: Energieeffizienz weitergedacht.
Darmstadt.
Verfügbar unter: <https://eta-fabrik.de/forschung/projekt/eta-fabrik/>
Zugriff am: 17.01.2022
- TU Darmstadt 2022** TU Darmstadt, 2022.
KoREV-SMS II.
Darmstadt.
Verfügbar unter: https://www.ims.tu-darmstadt.de/forschung_ims/energie_systeme/projekte_5/korev_sms_ii/index.en.jsp
Zugriff am: 17.01.2022
- Ulrich & Hill 1979** Ulrich, Peter & Hill, Wilhelm, 1979.
Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil 1).
In: Raffée, Hans; Abel, Bodo (Hrsg.): *Wissenschaftstheoretische Grundfragen der Wirtschaftswissenschaft.* München, S. 304-309.
ISBN: 3-800-60772-7
- Ulrich 2001** Ulrich, Hans, 2001.
Systemorientiertes Management: das Werk von Hans Ulrich: Gekürzte Ausgabe für Studierende. Bern, Schweiz: Paul Haupt Verlag.
ISBN: 3-258-06359-1
- Unbehauen 2007** Unbehauen, Heinz, 2007.
Regelungstechnik II: Zustandsregelungen, digitale und nichtlineare Regelsysteme. 9. Auflage. Wiesbaden: Vieweg.
ISBN: 978-3-528-83348-0
- Unbehauen 2008** Unbehauen, Heinz, 2008.
Regelungstechnik I: Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme. 15. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
ISBN: 978-3-8348-0497-6
- VDI 4499-2:2011-05** VDI 4499-2:2011-05:2011-05.
VDI 4499 Blatt 2: Digitale Fabrik - Digitaler Fabrikbetrieb
- VDMA 2020** VDMA, 2020.
Leitfaden Virtuelle Inbetriebnahme: Handlungsempfehlungen zum wirtschaftlichen Einstieg. Frankfurt am Main.
Verfügbar unter: https://www.vdma.org/c/document_library/get_file?uuid=66118d8d-68fc-55a7-a25b-a90ffe89f1f2&groupId=34570
Zugriff am: 02.10.2022

- Venanzi 2016** Venanzi, Ilaria, 2016.
A Review on Adaptive Methods for Structural Control.
The Open Civil Engineering Journal **10** (1), S. 653–667
DOI: 10.2174/1874149501610010653
- Verne et al. 2017** Verne, Santiago A; Dragicevic, Tomislav; Rivera, Marco; Valla, Maria I; Blaabjerg, Frede, 2017.
Active Power Support of a Full-Scale Converter-based WECS Through Modular Flywheel Storage System with DC Bus Signaling: *European Conference on Power Electronics and Applications*, Warsaw, Poland, 11.09.2017-14.09.2017, S. 1-10.
ISBN: 978-9-075815-27-6
- Vidal et al. 2015** Vidal, Ana; Yepes, Alejandro G; Freijedo, Francisco D; Lopez, Oscar; Malvar, Jano; Baneira, Fernando; Doval-Gandoy, Jesus, 2015.
A Method for Identification of the Equivalent Inductance and Resistance in the Plant Model of Current-Controlled Grid-Tied Converters.
IEEE Transactions on Power Electronics **30** (12), S. 7245–7261
DOI: 10.1109/TPEL.2015.2395817
- Walther & Weigold 2021** Walther, Jessica & Weigold, Matthias, 2021.
A Systematic Review on Predicting and Forecasting the Electrical Energy Consumption in the Manufacturing Industry.
Energies **14** (4), S. 968
DOI: 10.3390/en14040968
- Wang & Zhang 2018** Wang, Hao & Zhang, Baosen, 2018.
Energy Storage Arbitrage in Real-Time Markets via Reinforcement Learning: *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Portland, OR, USA, 05.08.2018 - 10.08.2018, S. 1-5.
ISBN: 978-1-5386-7703-2
DOI: 10.1109/PESGM.2018.8586321
- Wang 2003** Wang, Avery Li-Chun, 2003.
An Industrial-Strength Audio Search Algorithm.
Verfügbar unter: https://www.ee.columbia.edu/~dpwe/papers/Wang03-shazam.pdf?utm_source=buffer
Zugriff am: 20.08.2022
- Weigel 2004** Weigel, Jan, 2004.
Modellbildung parameteradaptive hochdynamische Regelung eines permanenterregten Synchronlinearmotors.
Darmstadt, Technische Universität, Dissertation, 2004

- Wiendahl et al. 2007** Wiendahl, Hans-Peter; El Maraghy, Hoda A; Nyhuis, Peter; Zäh, Michael F; Wiendahl, Hans-Hermann; Duffie, Neil; Brieke, Michael, 2007.
Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation.
CIRP Annals **56** (2), S. 783–809
DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.003
- Wildrick et al. 1995** Wildrick, Carl M; Lee, Fred C; Cho, Byung H; Choi, Brian, 1995.
A method of defining the load impedance specification for a stable distributed power system.
IEEE Transactions on Power Electronics **10** (3), S. 280–285
DOI: 10.1109/63.387992
- Worthmann et al. 2015** Worthmann, Karl; Kellett, Christopjer M; Braun, Philipp; Grüne, Lars; Weller, Steven R., 2015.
Distributed and Decentralized Control of Residential Energy Systems Incorporating Battery Storage.
IEEE Transactions on Smart Grid **6** (4), S. 1914–1923
DOI: 10.1109/TSG.2015.2392081
- Wu 2013** Wu, Ding, 2013.
Control of a Super-capacitor Based Energy Storage System.
Manchester, England, University, Dissertation, 2013
- Wünsch 2008** Wünsch, Georg, 2008.
Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme. München: Herbert Utz.
München, Technische Universität, Dissertation, 2007.
ISBN: 978-3-8316-0795-2
- Zach 2010** Zach, Franz, 2010.
Leistungselektronik. 4. Auflage. Wien: Springer.
ISBN: 978-3-211-89213-8
- Zacher 2017** Zacher, Serge, 2017.
Übungsbuch Regelungstechnik: Klassische, modell- und wissensbasierte Verfahren. 6. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.
ISBN: 978-3-658-16303-7.
DOI: 10.1007/978-3-658-16303-7
- Zapf 2017** Zapf, Martin, 2017.
Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem.
Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-15072-3.
DOI: 10.1007/978-3-658-15073-0

- Zhang et al. 2012** Zhang, Damin; Wang, Lujun; Jin, Lixiang; Hong, Xiaoyuan; Jin, Linghui; Lu, Zhengyu, 2012.
A new method for dynamic energy management of energy-saving elevators based on super capacitors: *Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2012)*, Harbin, China, 02.06.2012 - 05.06.2012, S. 1403-1407.
ISBN: 978-1-4577-2085-7
DOI: 10.1109/IPEMC.2012.6259014
- Zhao et al. 2020** Zhao, Bin; Quan, Zhongyi; Li, Yun Wei; Quan, Long; Hao, Yunxiao; Ding, Li, 2020.
A Hybrid-Driven Elevator System With Energy Regeneration and Safety Enhancement.
IEEE Transactions on Industrial Electronics **67** (9), S. 7715–7726
DOI: 10.1109/TIE.2019.2941141
- Zhou et al. 2019** Zhou, Weihua; Wang, Yanbo; Chen, Zhe, 2019.
A Gray-Box Parameters Identification Method of Voltage Source Converter Using Vector Fitting Algorithm: *2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia)*, Busan, Korea (South), 27.05.2019 - 30.05.2019, S. 2948-2955.
ISBN: 978-89-5708-313-0
DOI: 10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8797250
- Zimmermann 2022** Zimmermann, Fabian, 2022.
Techno-ökonomische Auslegung von Stromspeichern für Fabriken. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag.
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 140. Stuttgart, Universität, Dissertation, 2022.
DOI: 10.18419/opus-12314
- Zimmermann et al. 2019** Zimmermann, Fabian; Emde, Alexander; Laribi, Raoul; Wang, Diana, 2019.
Energiespeicher in Produktionssystemen: Herausforderungen und Chancen für industrielle Einsatzoptionen. Stuttgart. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/8c8b6368-dee2-488d-9170-38a2883531c6/details> DOI: 10.24406/ipa-n-552073
Zugriff am: 03.01.2020
- ZVEI e. V. 2022** ZVEI e. V., 2022.
DC-INDUSTRIE: Energiewende trifft Industrie 4.0. Verfügbar unter: <https://dc-industrie.zvei.org/>
Zugriff am: 16.01.2022

10 Anhang

Der Anhang enthält Informationen zu Gleichrichtern, Speichersystemen, Regelungssystemen, Stabilitätskriterien, Modellbildung und Systemidentifikation sowie zu der virtuellen Inbetriebnahme und dem maschinellen Lernen. Neben der Definition von standardisierten Prozesselementen leitet der Anhang außerdem die Parallelschaltung von Impedanzen her. Er listet außerdem die technischen Eigenschaften der verwendeten Geräte auf. Zuletzt widmet er sich den betreuten studentischen Arbeiten und den Veröffentlichungen als Haupt- und Co-Autor.

10.1 Klassifikation von Gleichrichtern

Abbildung 10.1 klassifiziert Gleichrichter anhand ihrer Kommutierung, der Halbleiter und möglichen Stromflussrichtungen. Stromrichter mit natürlicher Kommutierung erhalten ihre Kommutierungsspannung von der Last (lastgeführt) oder dem speisenden Netz (netzgeführt) (Schröder 2012, S.4). Diese beiden Ausführungen zählen zu den fremdgeführten Stromrichtern. Stromrichter mit Zwangskommutierung nutzen meistens eine Hilfsspannung aus dem Zwischenkreiskondensator, um zu einem beliebigen Zeitpunkt die Kommutierung einzuleiten. Hierbei handelt es sich um selbstgeführte Stromrichter (Schröder 2012, S.4).

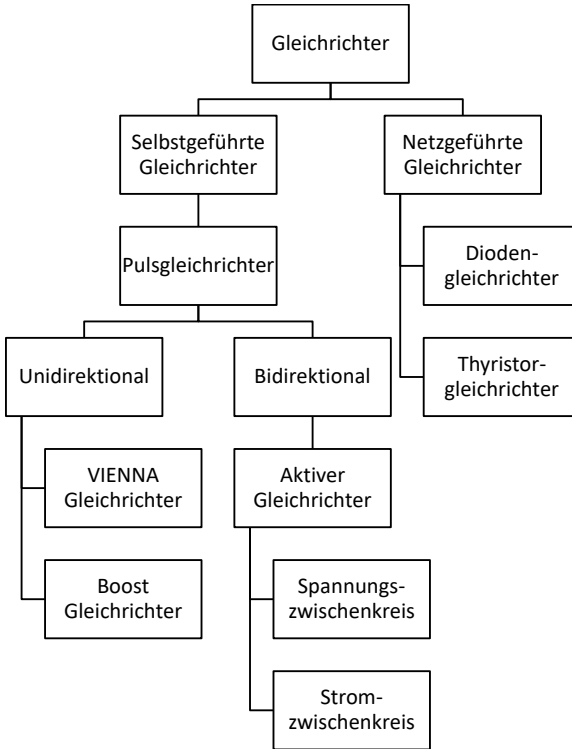


Abbildung 10.1: Klassifikation von Gleichrichtern anhand ihrer Eigenschaften, Zusammenstellung aus (Rodriguez et al. 2005, S.6).

10.2 Klassifikation von Speichersystemen

Abbildung 10.2 unterteilt Energiespeicher in elektrische, (elektro-) chemische, mechanische und thermische Technologien.

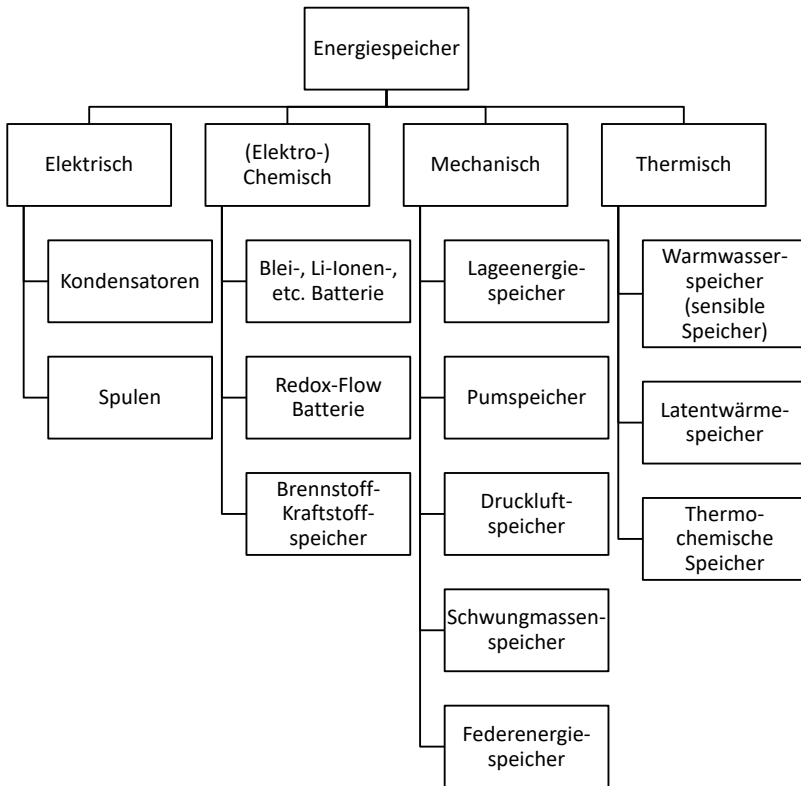


Abbildung 10.2: Energiespeicherübersicht in Anlehnung an (Böker et al. 2019, S.347).

10.3 Weitere Anwendungsfälle von Stromspeichern

In den folgenden Abschnitten werden weitere Anwendungsfälle von Stromspeichern aufgeführt.

Im Zuge der Energiewende rückt die Verwendung von Stromspeichern in Verbindung mit erneuerbaren Energieerzeugern im öffentlichen Stromnetz und in Gebäuden in den Mittelpunkt. Zur Glättung der fluktuierenden Windenergie werden u. a. Schwungmassenspeichersysteme (SMSP) eingesetzt (Thatte et al. 2011; Díaz-González 2013; Lv et al. 2013; Verne et al. 2017). Neuartige, intelligente Ansätze zur Regelung von SMSP

vereinen dabei neuronale Netze mit Fuzzy-Logik (Mir & Senroy 2019). Darüber hinaus sind Lilonen- (Li & Yan 2018) und Blei-Säure-Batteriespeicher (Meghni et al. 2017) bei der Windenergieerzeugung verbreitet. Zudem finden vor allem Batteriespeichersysteme in Kombination mit Photovoltaikanlagen ihre Verwendung, sowohl im Haushaltssektor (Worthmann et al. 2015; Lühn & Geldermann 2017; Henri & Lu 2019), als auch in Form von Mikronetzen in industriellen (ZVEI e. V. 2022) und gewerblichen Gebäuden (Gonzalez-Espin et al. 2014), Inselnetzen (Houari 2012; Michaelson & Jiang 2017) oder im öffentlichen Stromnetz unter dem Einfluss von Preissignalen der Energiemärkte (Pfeifroth 2015; Höning 2016; Kong et al. 2016; Teo et al. 2018; Wang & Zhang 2018). Hinzu kommen spezielle Anwendungsfälle, wie zum Beispiel die Nutzung von Wellenenergie mit einem hybriden Energiespeichersystem bestehend aus einer Batterie und einem Superkondensator (Agarwal et al. 2019). Des Weiteren befinden sich Rechenzentren auf Gleichstrombasis mit Batteriespeichern auf dem Vormarsch (Schärer 2012; Hirose 2018).

Im Automotive- und Transportbereich bzw. Verkehrssektor sind Stromspeicher ebenfalls weit verbreitet. Stromspeicher finden sich in Elektrofahrzeugen als Einzel- oder Hybridtechnologie wieder, beispielsweise bei der Integration eines Superkondensatorsystems (Lindenmaier 2010), eines Schwungrads (Shen & Veldpaus 2004; Hedlund 2017) oder einer Kombination aus SMSP und Batteriespeicher in einen Pkw-Antriebsstrang (Gonçalves de Oliveira 2011). Des Weiteren bieten Stromspeicher energetische Potenziale im öffentlichen Nahverkehr (Kühn 2018), wie etwa in elektrischen Zügen (Khodaparastan & Mohamed 2019), und Bussen (Hijazi 2010). In Schiffen (Talebi et al. 2008; Mardani et al. 2019), Flugzeugen (Wu 2013), Raumfahrzeugen (Kenny & Kascak 2003), Portalkränen in Containerterminals (Tan & Fah 2017) und Ladestationen von Elektrofahrzeugen (Sun et al. 2015; Sun 2017) sind sie ebenfalls zu finden. Eine populäre Anwendung moderner Systeme zur Rückgewinnung kinetischer Energie (engl. *kinetic energy recovery system*, KERS) liegt zudem im Motorsport (Kapoor & Parveen 2013, S.1).

10.4 Klassifikation von Regelungssystemen

Das Blockschaltbild in Abbildung 10.3 führt die einzelnen Bestandteile eines Regelungssystems grafisch zusammen. Die Zielgröße c ist der Eingang des Regelungssystems und wird im Führungsgrößenbildner in die Führungsgröße w übersetzt. Die Regeldifferenz e resultiert aus der Führungsgröße w und der Rückführgröße r . Sie entspricht der Abweichung, welche dem Regelglied zugeführt wird. Sobald der Regler durchlaufen ist, fungiert die Reglerausgangsgröße m als Eingang der Stelleinrichtung, welche den Steller und das Stellglied umfasst. Per Definition ist das Stellglied ein Teil der Regelstrecke, auf welche die Störgröße z als „unerwünschte, unabhängige und meistens unvorhersehbare“ (DIN IEC 60050-351:2014-09, S.190) Größe einwirkt. Der Ausgang der Regelstrecke wird als Regelgröße x bezeichnet. Die Aufgabengröße q gibt das Ziel der Regelung vor. Die Rückführgröße r folgt wiederum aus der Umsetzung der Regelgröße x in einem Messglied.

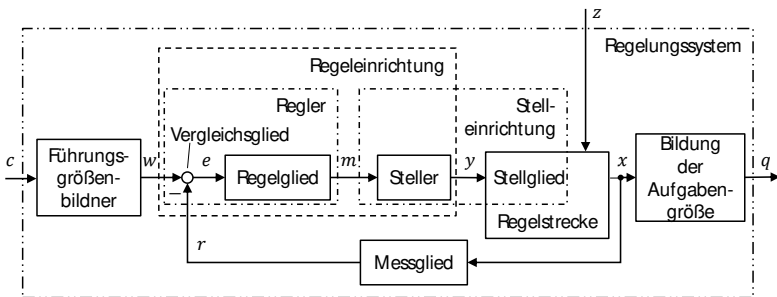


Abbildung 10.3: Blockschaltbild eines elementaren Regelungssystems, in Anlehnung an (DIN IEC 60050-351:2014-09, S.43).

Lineare zeitinvariante Systeme werden LTI-Systeme (engl. *linear time invariant system*) genannt (Beucher 2015, S.42). Zeitinvariante Systeme zeichnen sich also dadurch aus, dass sie unabhängig vom Startzeitpunkt der Beobachtung auf gleiche Eingangssignale mit gleichen Ausgangssignalen reagieren (Beucher 2015, S.40). Im Falle eines stabilen Systems ohne Störungen reicht eine Steuerung, um die Sollwertfolge zu garantieren (Schumacher & Maurer 2014, S.98). Darüber hinaus sind Steuerungen nicht verantwortlich für Stabilitätsprobleme (Schumacher & Maurer 2014, S.98). Ein Regler wird immer erst dann implementiert, wenn

Dynamikanforderungen vorliegen oder das System ohne Regler instabil ist (Schumacher & Maurer 2014, S.98).

Übersicht zu Reglerarten

Regler lassen sich anhand zahlreicher Eigenschaften klassifizieren (s. Abbildung 10.4). Dies gilt zunächst für das Zeitverhalten, d. h. beispielsweise durch den Einfluss eines Proportional-, Integral- oder Differenzialanteils (Schneider & Heinrich 2017, S.126). Daneben unterscheidet sich die verfügbare Hilfsenergie, welche z. B. elektrisch, pneumatisch oder hydraulisch ausgeführt werden kann (Schneider & Heinrich 2017, S.126). Zudem unterscheidet man stetiges, quasistetiges oder unstetiges Stellverhalten (Schneider & Heinrich 2017, S.126).

Gan et al. unterscheiden regelbasierte (engl. *rule-based*) und optimierungsbasierte (engl. *optimization-based*) Regelungsstrategien (Gan et al. 2018, S.4). Zu den regelbasierten Ansätzen zählt beispielsweise die Unschärfelogik (engl. *fuzzy logic*) (Gan et al. 2018, S.4). Die optimierungsbasierten Regler umfassen robuste, modellprädiktive und stochastische Regelungen sowie dynamische Programmierung, genetische Algorithmen und spieltheoretische Ansätze (Gan et al. 2018, S.4).

Abbildung 10.4 klassifiziert zahlreiche Reglerarten aus der Literatur. Einige der vorgestellten Regler lassen sich mehreren Klassen zuordnen, auf was aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet wird. In der folgenden Abschnitten werden die für diese Arbeit relevantesten Regler erläutert.

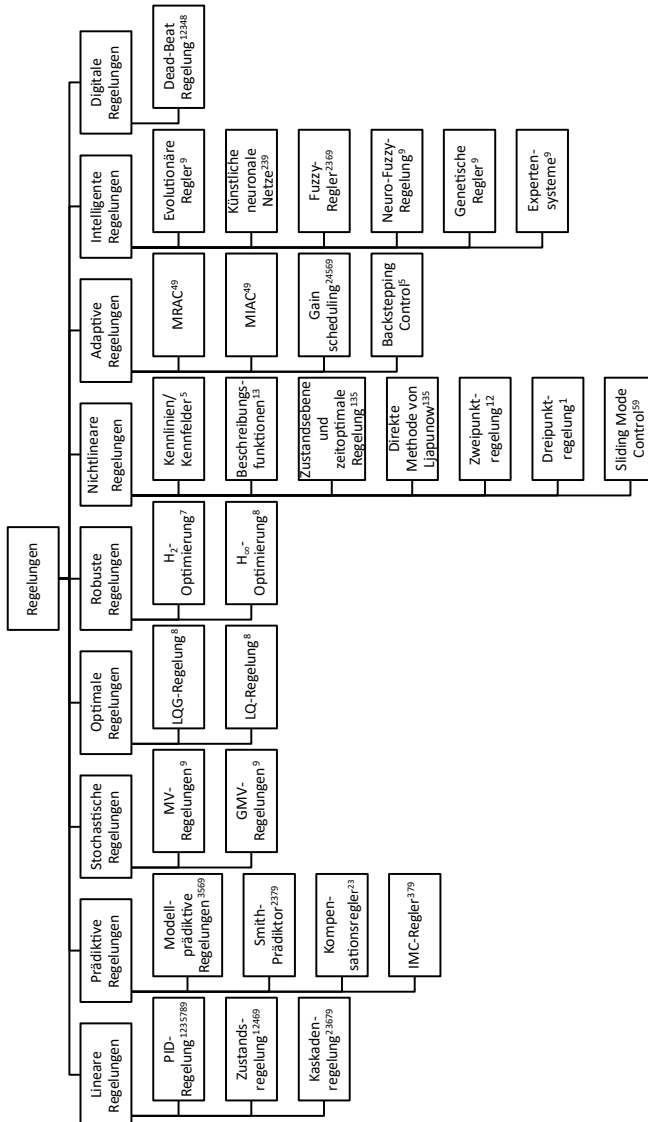


Abbildung 10.4: Klassifikation von Regelungen als Komposition mehrerer Literaturquellen, in Anlehnung an ¹(Unbehauen 2007), ²(Zacher 2017), ³(Nelles 2018a), ⁴(Nelles 2018b), ⁵(Adamy 2014), ⁶(Kroll 2016), ⁷(Lunze 2016b), ⁸(Lunze 2016a), ⁹(Unbehauen 2008).

Festwert- vs. Folgeregelung/ Nachlaufregelung

Unter einer Festwertregelung versteht man eine Regelung, deren Führungsgröße fest eingestellt ist (DIN IEC 60050-351:2014-09, S.146). Man bezeichnet die Festwertregelung auch als Störgrößenregelung, da ihre Hauptaufgabe in der Störkompensation bzw. Störunterdrückung liegt (Lunze 2016b, S.358).

Regelkreise mit veränderlicher Führungsgröße werden Folgeregelung genannt. Die Einstellung von Folgeregelungen ist im Allgemeinen anspruchsvoller als bei Festwertregelungen (Schneider & Heinrich 2017, S.162). Die Folgeregelung bzw. Nachlaufregelung zielt darauf ab, dass eine Regelgröße einer festgelegten Solltrajektorie $w(t)$ folgt. Die Festlegung der Solltrajektorie einer Folgeregelung kann in Abhängigkeit eines Zeitplans oder von externen Zustände bestimmt werden (Schneider & Heinrich 2017, S.162). In vielen Fällen lässt sich die Folgeregelung durch die Verknüpfung einer Vorsteuerung und einer Regelung realisieren (vgl. Abbildung 10.5). Die Vorsteuerung führt die Regelgröße x über die Stellgrößen u_v , u_r und u rapide an die Führungsgröße w heran, während der Regler über seine Rückführungsschleife auftretende Störungen ausgleicht (Lunze 2016b, S.358).

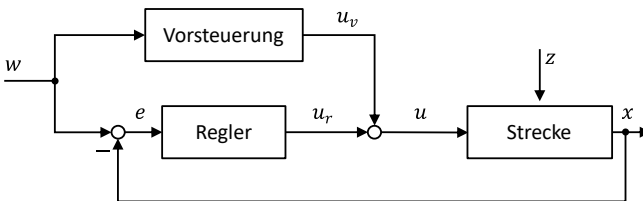


Abbildung 10.5: Kombination einer Vorsteuerung und eines Reglers, in Anlehnung an (Lunze 2016b, S.11).

PID-Regelung

Die Übertragungsfunktion G_{pid} des Proportional-Integral-Differential-Reglers (PID-Regler) mit der Laplace-Variable s in Gl. (10.1) besteht aus einem proportionalen P-Anteil K_p , einem integrierenden I-Anteil K_i und einem differenzierenden D-Anteil K_{diff} . Die Anteile des Reglers können beliebig miteinander kombiniert werden. Einzig der reine D-Anteil ist technisch nicht realisierbar, da er konstante Regelabweichungen nicht detektiert (Lunze 2016b, S.409; Schneider & Heinrich 2017, S.128). Mithilfe der Nachstellzeit T_n und der Vorhaltezeit T_d kann

der Regler ebenfalls beschrieben werden (Gl. (10.2), (10.3)). Die Stellgröße u in Gl. (10.4) ist abhängig von der Reglerabweichung e (Lunze 2016b, S.408).

$$G_{pid}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_{diff} \cdot s = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_n \cdot s} + T_d \cdot s\right) \quad (10.1)$$

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (10.2)$$

$$T_d = \frac{K_{diff}}{K_p} \quad (10.3)$$

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_n} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (10.4)$$

Kaskadenregelung

Kaskadenregelungen gehören zu den vermaschten Regelungen (Lunze 2016b, S.588). Bei elektrischen Antrieben besteht eine Kaskadenregelung aus dem inneren Stromregler, dem überlagerten Drehzahlregler und ggf. dem Lageregler in der äußersten Schleife (Schröder 2015, S.120f.). Die Kaskadenregelung elektrischer Antriebe hat den Vorteil, dass sie schrittweise von innen nach außen auch ohne genaue Kenntnis der Regelstrecke eingestellt werden kann (Teigelkötter 2013, S.138f.). Der Drehzahlregler ist der Führungsregler, während es sich bei dem Stromregler um den Folgeregler handelt. Beide Regler sind normalerweise als PI-Regler ausgeführt (Schneider & Heinrich 2017, S.249).

10.5 Klassifikation von Stabilitätskriterien

Zur Beurteilung der Stabilität von Regelungssystemen existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Kriterien. Tabelle 10.1 enthält eine Übersicht zu Stabilitätskriterien.

Tabelle 10.1: Übersicht zu Stabilitätskriterien ausgewählter Autoren.

Kriterium	(Schaade 2003, S.13ff.)	(Cespedes et al. 2011, S.1832ff.)	(Singh et al. 2017, S.407ff.)	(Riccobono & Santi 2014, S.3525ff.)	(Magne 2012, S.15ff.)	(Ott 2019, S.7ff.)	(Cavazzana 2018, S.4ff.)
Middlebrook	•		•	•	•		•
Opposing Argument	•		•	•			•
GMPM	•		•	•	•		•
Energy Source Analysis Criterion	•		•	•			•
Nyquist	•	•			•	•	•
Inverse Nyquist	•						
Verfahren nach Bode	•						
Routh-Hurwitz		•			•		
Ljapunow/ Lyapunov	•				•		
Drei-Schritt-Impedanz			•	•	•		
Eigenwertanalyse des linearisierten Systems			•		•		•
μ -Sensitivität			•				
Passivitätsbasiert			•	•		•	
Gemischte Potentialfunktion (Brayton-Moser-Theorem)			•		•		
Analyse der Phasenebene			•				
Bifurkationsanalyse	•		•				

10.6 Klassifikation der Modellbildung

Die theoretische Modellbildung beruht auf Integral-, Differenzial- und algebraischen Gleichungen (Kroll 2016, S.42). Dabei spricht man auch von „White-Box-Modellen“ (Schmitt & Andres 2019, S.5). Alle Modellparameter sind physikalisch interpretierbar. Für die axiomatische Modellbildung ist der Einsatz eines großen Fachwissens notwendig. Die Bestimmung unbekannter Parameter erfolgt mittels Parameterschätzverfahren. Linearisierungen und Modellordnungsreduktionen helfen im Laufe der Modellbildung dabei, bestimmte lineare Regelungsentwurfsverfahren anwenden zu können (Kroll 2016, S.42).

Die experimentelle Modellbildung zur Bestimmung von „Black-Box-Modellen“ ist auf Messungen von Ein- und Ausgangsgrößen im Rahmen von Beobachtungen und Experimenten angewiesen (Kroll 2016, S.41; Schmitt & Andres 2019, S.7). Die Modellparameter können nicht physikalisch gedeutet werden (Kroll 2016, S.43). Datengetriebene Methoden entwerfen Regler auf der Basis von Experimenten ohne vorab ein explizites Modell zu generieren (Rojas Fernández 2012, S.1). Ein experimentelles Modell kann zum Beispiel aus Messungen des Frequenzgangs gewonnen werden (Schumacher & Maurer 2014, S.95).

Methoden der erfahrungsbasierten Modellbildung fußen auf qualitativen Erfahrungen hinsichtlich Ursache-Wirkungszusammenhängen (Kroll 2016, S.45). Sie ist auch als wissens- oder expertenbasierte Modellbildung bekannt (Kroll 2016, S.45). Die erfahrungsbasierte Modellbildung nutzt klar definierte Regeln und verknüpft dadurch Ein- und Ausgangsgrößen mittels Boole'scher- oder Fuzzy-Logik (Kroll 2016, S.45). Tabelle 10.2 nimmt einen qualitativen Vergleich der drei grundlegenden Modellbildungskonzepte vor.

In der Praxis werden zumeist Ansätze der theoretischen und experimentellen Modellbildung gemeinsam eingesetzt (Schmitt & Andres 2019, S.7). Diese semi-empirischen Methoden, auch „Gray-Box-Modelle“ genannt, nutzen einerseits A-priori-Wissen und identifizieren andererseits unbekannte Parameter (Bohn & Unbehauen 2016, S.6). Dabei unterscheidet man zusätzlich Light-Gray-Box-Modelle mit inhaltlicher Nähe zur theoretischen Modellbildung sowie Dark-Gray-Box-Modelle, welche eher den Black-Box-Modellen zugewandt sind (Isermann & Münchhof 2011, S.6).

Tabelle 10.2: Qualitativer Vergleich der Modellbildungskonzepte, in Anlehnung an (Kroll 2016, S.46).

Modellbildungskonzept	Theoretisch	Identifikation	Erfahrungsbasiert
Voraussetzungen	Notwendige Naturgesetze und phänomenologische Gleichungen verfügbar	Ein- / Ausgangsmessdaten verfügbar	Experten mit Erfahrungswissen verfügbar
Erreichbare Approximationsgüte	Hoch	Sehr hoch	Niedrig/ mittel
Interpretierbarkeit	Hoch	Niedrig	Hoch
Erforderliche Parameteranzahl	Mittel	Hoch	Hoch
Methodenübertragbarkeit	Gering/ mittel	Hoch	Hoch
Extrapolierbarkeit	In Grenzen der genutzten Gesetze	In Grenzen der genutzten Daten	In Grenzen des genutzten Expertenwissens
Modellbildungsaufwand	Hoch	Mittel	Niedrig
Erforderliches Anwendungswissen	Viel	Wenig	Umfassend und detailliert
Einbringbarkeit von Vorwissen	Mittel	Gering	Einfach
Prozesslebenszyklusphasen, in denen das Modell erstellt wird	Planung, Entwurf, Inbetriebnahme, Betrieb, Außerbetriebnahme	Inbetriebnahme, Betrieb	Training, Betrieb

10.7 Klassifikation der Systemidentifikation

Die Einteilung von Identifikationsverfahren richtet sich nach mehreren Aspekten. Dazu gehören das zugrundeliegende mathematische Modell, die verwendeten Testsignale, die Berechnung des Fehlers zwischen Prozess und Modell, die Online- oder Offline-Durchführung der Experimente und der Gütebewertung sowie der gewählte Algorithmus für die Datenverarbeitung (Isermann & Münchhof 2011, S.12).

Das mathematische Modell kann entweder eine parametrische oder nicht-parametrische Gestalt besitzen. Parametrische Modelle nutzen Gleichungen mit einer festen Anzahl an Unbekannten zur Darstellung des Modells. Nicht-parametrische Modelle stellen lediglich die

Verbindung zwischen dem Eingangs- und Ausgangssignal her und verfügen über keine feste Struktur. Beide grundlegenden, mathematischen Modellklassen können entweder auf kontinuierlichen oder diskreten Zeitsignalen basieren (Isermann & Münchhof 2011, S.13). Der Fehler zwischen dem realen Prozess und dem Modell lässt sich am Eingang, am Ausgang oder über eine verallgemeinerte Gleichung bestimmen (Isermann & Münchhof 2011, S.13).

Wenn die aufgezeichneten Daten zunächst nur abgespeichert und nicht direkt verarbeitet werden, spricht man von Offline-Identifikation. Bei der Online-Identifikation hingegen werden die aufgezeichneten Daten direkt während der Messung weiterverarbeitet. Bei der Offline-Identifikation werden die Daten in der Regel stapelweise (engl. *batch processing*) behandelt, während die Online-Identifikation in Echtzeit (engl. *real-time processing*) abläuft. Im Fall einer Offline-Identifikation kommen nicht-rekursive Methoden zum Einsatz. Diese können wiederum entweder direkt oder iterativ angewandt werden. Bei der Online-Identifikation ermöglichen rekursive Methoden die kontinuierliche Verbesserung des Modells mit jedem neuen Datensatz. Gleichzeitig kann hierbei laufend die Modellgüte berechnet werden bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht ist (Isermann & Münchhof 2011, S.14f.). Generell sollte ein weit verbreitetes Schätzverfahren ausgewählt werden, welches keine Sonderlösung darstellt (Hellmich 2014, S.68).

Bohn und Unbehauen unterscheiden bei der Identifikation im geschlossenen Regelkreis drei mögliche Ansätze (Bohn & Unbehauen 2016, S.127):

- Direkter Ansatz der offenen Regelschleife
- Indirekter Ansatz
- Gemeinsamer Eingangs-Ausgangs-Ansatz

Die direkte Identifikation beruht auf Messungen des Streckeneingangs und des Streckenausgangs. Das System wird als offener Regelkreis betrachtet, sodass die Rückführung vernachlässigt wird (Bohn & Unbehauen 2016, S.129). Die Kenntnis des Reglers ist hierfür nicht erforderlich (Isermann & Münchhof 2011, S.353). Bei der indirekten Identifikation muss der Regler bekannt sein und nur die Strecke wird identifiziert. Die Parameter werden indirekt über den Umweg eines offenen Regelkreises geschätzt (Bohn & Unbehauen 2016, S.129). Für die gemeinsame Eingangs-Ausgangs-Identifikation muss der Regler nicht exakt bekannt sein. Das

Verfahren erfordert zwar mehr Rechenaufwand, liefert jedoch sowohl das Regelstrecken- als auch das Reglermodell. Hierbei werden die Übertragungsfunktionen von zwei offenen Systemen identifiziert, weshalb kein Störmodell aufgebaut werden muss (Bohn & Unbehauen 2016, S.132).

10.8 Rollenverständnis bei der virtuellen Inbetriebnahme

Bei der Zulieferung von Produktionssystemen interagieren mehrere Akteure (s. Abbildung 10.6). Im Hinblick auf die Nutzung der VIBN sind diese an dieser Stelle zu definieren. Der Betreiber des Produktionssystems, häufig ein sogenannter Erstausstatter (engl. *original equipment manufacturer*, OEM), erhält von dem Systemlieferant die beauftragte Maschine oder Anlage. Die Rolle des Systemlieferanten umfasst den Systemintegrator sowie den Maschinen- und Anlagelieferant. Der Betreiber kann Teillösungen auch direkt von den Komponenten-, Maschinen- und Anlagelieferanten beziehen, sofern der Betreiber die Integration selbst übernimmt. Die gesamte Zuliefererkette interagiert mit dem Software-Lieferant, der das Simulationswerkzeug bereitstellt (VDMA 2020, S.6).

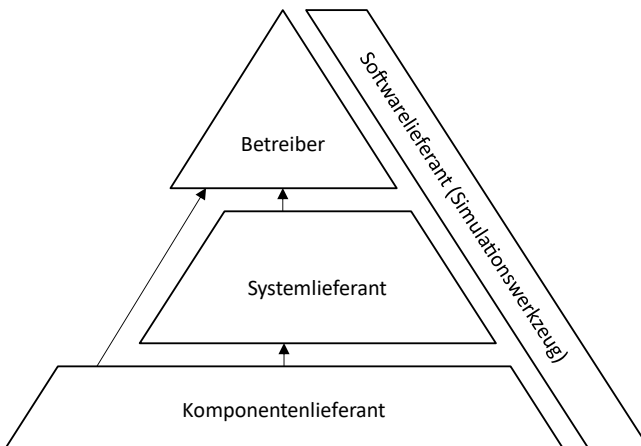


Abbildung 10.6: Interaktion der Akteure aus der Zuliefererkette im Maschinen- und Anlagenbau im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme in Anlehnung an (VDMA 2020, S.6).

10.9 Klassifikation des maschinellen Lernens

Abbildung 10.7 fasst die drei Lernstile und beispielhafte Lernverfahren zusammen.

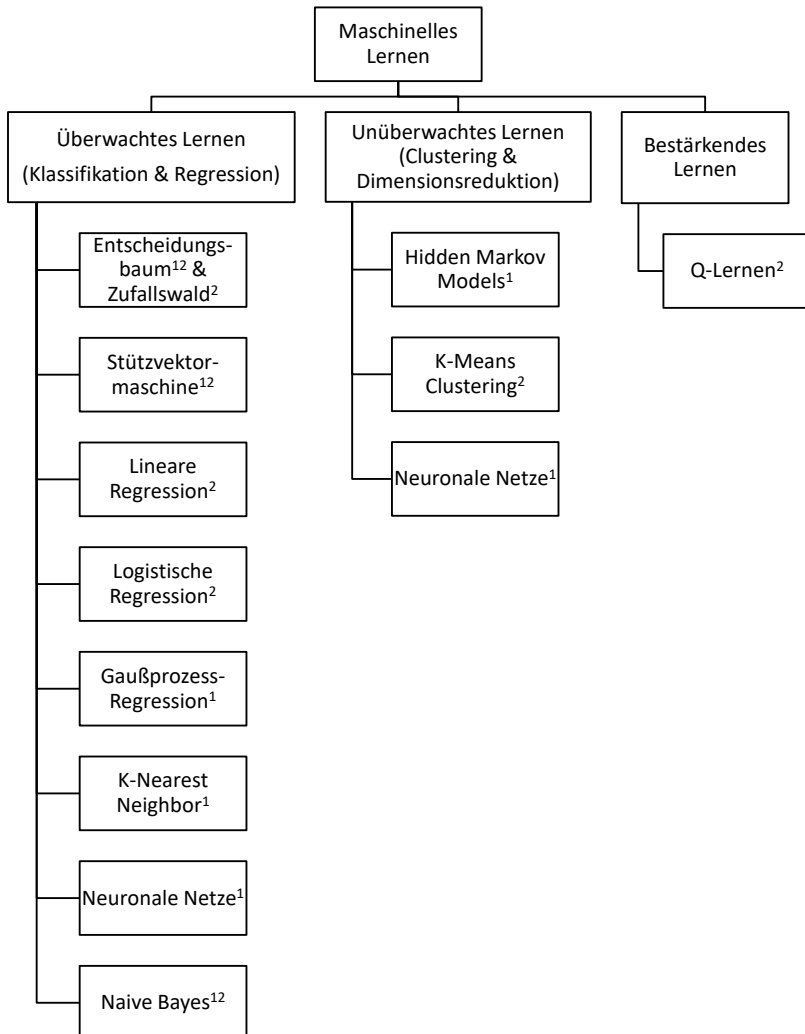


Abbildung 10.7: Übersicht zu Lernverfahren des maschinellen Lernens, in Anlehnung an ¹(Reichensdörfer et al. 2017, S. 11–14), ²(Döbel et al. 2018, S. 10–11).

10.10 Elemente laut DIN 66001

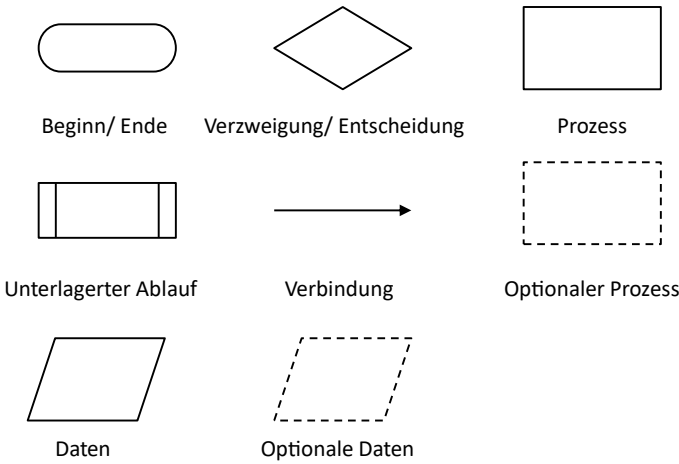


Abbildung 10.8: Elemente der Programmablaufpläne und Programmetze laut (DIN 66001).

10.11 Parallelschaltung von Impedanzen

Aktiver Gleichrichter

Die Parallelschaltung der beiden Impedanzen Z_g und Z_l führt zur Admittanz Y in Gl. (10.5) und (10.6). Dabei sind e_1 , f_1 und f_2 die zu bestimmenden Koeffizienten der Parameterschätzung.

$$Y(s) = \frac{s^2 + s \cdot f_1 + f_2}{s \cdot e_1} = \frac{1}{Z_g} + \frac{1}{Z_l} \quad (10.5)$$

$$Y(s) = \frac{s^2 + s \cdot \frac{K_{pvg} \cdot K_{bg}}{C_g} + \frac{K_{ivg} \cdot K_{bg}}{C_g}}{s \cdot \frac{1}{C_g}} + \frac{s + \frac{P_l}{v_0^2 \cdot C_l}}{\frac{1}{C_l}} \quad (10.6)$$

Die Zusammenfassung der beiden Summanden aus Gl. zu einem Bruch resultiert in Gl. (10.7). In Gl. (10.8) erfolgt die Normierung des Koeffizienten am quadratischen Laplace-Parameter auf den Wert 1.

$$Y(s) = \frac{s^2 \cdot \left(\frac{1}{C_g} + \frac{1}{C_l} \right) + s \cdot \left(\frac{K_{pvg} \cdot K_{bg}}{C_g \cdot C_l} + \frac{P_l}{C_g \cdot C_l \cdot v_0^2} \right) + \frac{K_{ivg} \cdot K_{bg}}{C_g \cdot C_l}}{s \cdot \frac{1}{C_g \cdot C_l}} \quad (10.7)$$

$$Y(s) = \frac{s^2 + s \cdot \frac{K_{pvg} \cdot K_{bg} + \frac{P_l}{v_0^2}}{C_g + C_l} + \frac{K_{ivg} \cdot K_{bg}}{C_g + C_l}}{s \cdot \frac{1}{C_g + C_l}} \quad (10.8)$$

In Gl. (10.9) wird der Kehrwert der Admittanz als Gesamtimpedanz Z dargestellt. Die Gleichungen (10.10) bis (10.16) nehmen schließlich den Koeffizientenvergleich vor.

$$Z(s) = \frac{s \cdot \frac{1}{C_g + C_l}}{s^2 + s \cdot \frac{K_{pvg} \cdot K_{bg} + \frac{P_l}{v_0^2}}{C_g + C_l} + \frac{K_{ivg} \cdot K_{bg}}{C_g + C_l}} \quad (10.9)$$

$$e_1 = \frac{1}{\tilde{C}_g + \tilde{C}_l} \quad (10.10)$$

$$\tilde{C} = \frac{1}{e_1} = \tilde{C}_g + \tilde{C}_l \quad (10.11)$$

$$f_1 = \frac{\tilde{K}_{pvg} \cdot K_{bg} + \frac{P_l}{v_0^2}}{\tilde{C}} \quad (10.12)$$

$$\tilde{K}_{pvg} = \frac{f_1 \cdot \tilde{C} - \frac{P_l}{v_0^2}}{K_{bg}} \quad (10.13)$$

$$f_2 = \frac{\tilde{K}_{ivg} \cdot K_{bg}}{\tilde{C}} \quad (10.14)$$

$$\tilde{K}_{ivg} = \frac{f_2 \cdot \tilde{C}}{K_{bg}} \quad (10.15)$$

$$\tilde{T}_{ng} = \frac{\tilde{K}_{pvg}}{\tilde{K}_{ivg}} \quad (10.16)$$

Diodengleichrichter

Die Gleichungen (10.17) bis (10.24) leiten die Parallelschaltung der Impedanzen eines Diodengleichrichters und einer Antriebslast für den Koeffizientenvergleich her.

$$Y(s) = \frac{s + f_1}{e_1} = \frac{1}{Z_g} + \frac{1}{Z_l} \quad (10.17)$$

$$Y(s) = \frac{s + \frac{K_d}{C_g}}{\frac{1}{C_g}} + \frac{s + \frac{P_l}{v_0^2 \cdot C_l}}{\frac{1}{C_l}} \quad (10.18)$$

$$Y(s) = \frac{\frac{1}{C_l} \cdot \left(s + \frac{K_d}{C_g} \right) + \frac{1}{C_g} \cdot \left(s + \frac{P_l}{v_0^2 \cdot C_l} \right)}{\frac{1}{C_g \cdot C_l}} \quad (10.19)$$

$$Y(s) = \frac{s \cdot \left(\frac{1}{C_g} + \frac{1}{C_l} \right) + \frac{K_d}{C_g \cdot C_l} + \frac{P_l}{v_0^2 \cdot C_g \cdot C_l}}{\frac{1}{C_g \cdot C_l}} \quad (10.20)$$

$$Y(s) = \frac{s + \frac{K_d}{C_g + C_l} + \frac{P_l}{v_0^2 \cdot (C_g + C_l)}}{\frac{1}{C_g + C_l}} \quad (10.21)$$

$$Z(s) = \frac{\frac{1}{C_g + C_l}}{s + \frac{K_d + \frac{P_l}{v_0^2}}{C_g + C_l}} \quad (10.22)$$

$$e_1 = \frac{1}{C_g + C_l} \quad (10.23)$$

$$f_1 = \frac{\tilde{K}_d + \frac{P_l}{v_0^2}}{\tilde{C}_g + \tilde{C}_l} = \frac{\tilde{K}_d + \frac{P_l}{v_0^2}}{\tilde{C}} \quad (10.24)$$

10.12 Technische Daten des Messsystems

Tabelle 10.3: Informationen zum verwendeten Messsystem imc CRONOSflex 400.

Messsystem	Hersteller	Modell	Kanäle	Toleranz
Hauptstation	imc	CRFX-400	-	-
Spannungsmessbox	imc	HV2-4U	4	1,5 %*
Strommessbox	imc	ISO2-8-BNC-SUPPLY-L	8	-
Stromzange	Amprobe	CT237B	-	1,5 %

*Annahme

10.13 Technische Daten des Schwungmassenspeichersystems

Das quadratische Polynom in Gl. (10.25) beschreibt das gemessene Reibmoment des Schwungmassenspeichers.

$$M_r(\omega_m) = -4,27 \cdot 10^{-9} \frac{Nm}{\left(\frac{rad}{s}\right)^2} \cdot \omega_m^2 + 8,32 \cdot 10^{-5} \frac{Nm}{\frac{rad}{s}} \cdot \omega_m + 0,05 Nm \quad (10.25)$$

Tabelle 10.4: Parameterwerte des Motors und des Umrichters.

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Nennstrom	i_s	105	A
Spitzenstrom	\hat{i}	147	A_{eff}
Geschwindigkeitsskalierung	n_{sk}	60.000	$\frac{1}{min}$
Minimale Drehzahl	n_{min}	5.000	$\frac{1}{min}$
Maximale Drehzahl	n_{max}	60.000	$\frac{1}{min}$
Polpaarzahl	p	2	-
Massenträgheitsmoment	J	0,00691415	$kg \cdot m^2$
Spannungskonstante (Phase – Phase)	k_v	4,00	$\frac{V_{eff}}{1000 \frac{1}{min}}$
Drehmomentkonstante	k_m	0,086	$\frac{Nm}{A_{eff}}$
Rampenzeit	t_r	10	s
Maximale Winkelbeschleunigung	$\dot{\omega}_{m,max}$	628,32	$\frac{1}{s^2}$
Maximales Drehmoment laut Datenblatt	$M_{DB,max}$	11,10	Nm
Maximales Drehmoment mit Rampe	$M_{i,max}$	4,34	Nm
Statorwiderstand (Phase – Phase)	R_s	0,150	Ω
Statorinduktivität (Phase – Phase)	L_s	0,142	mH
Externe Drosselinduktivität	L_{ext}	0,150	mH
Maximale mechanische Leistung laut Datenblatt	$P_{DB,max}$	55,00	kW
Maximale mechanische Leistung mit Rampe	$P_{m,max}$	22,72	kW
Verketteter magnetischer Fluss der Permanentmagnete	ψ_{PM}	0,0287	Vs

10.14 Technische Daten der Gleichrichter und Antriebslasten

Tabelle 10.5: Parameterwerte des aktiven Gleichrichters im ersten Fallbeispiel.

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Ausgangsbemessungsscheinleistung	S_N	80	kVA
Motorbemessungsleistung	P_{mot}	55	kW
Zwischenkreiskapazität	C_g	3,9	mF
Eingangsbemessungsstrom	i_{in}	126	A
Ausgangsbemessungsstrom	i_N	115	A
Schaltfrequenz	f_{sg}	4	kHz
Eingangsbemessungsspannung	v_n	400	V
Minimale Zwischenkreisspannung	$v_{g,min}$	650	V
Sollzwischenkreisspannung	v_g^*	700	V
Maximale Zwischenkreisspannung	$v_{g,max}$	800	V
Optimierungsfaktor	a	2	-
Proportionalanteil des Spannungsreglers	K_{pvg}	0,5057	A/V
Nachstellzeit des Spannungsreglers	T_{ng}	14,5	ms

Tabelle 10.6: Parameterwerte der elektronischen Last im ersten Fallbeispiel.

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Eingangsbemessungsspannung	v_n	400	V
Nennleistung	P_N	7,5	kW
Zwischenkreiskapazität	C_l	2,35	mF
Schaltfrequenz	f_{sl}	4	kHz
Minimale Zwischenkreisspannung	$v_{l,min}$	500	V
Maximale Zwischenkreisspannung	$v_{l,max}$	900	V

Tabelle 10.7: Parameterwerte des Diodengleichrichters im zweiten Fallbeispiel.

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Eingangsbemessungsspannung	v_n	400	V
Ausgangsbemessungswirkleistung	P_N	36,2	kW
Ausgangsbemessungsstrom	i_N	100	A
Zwischenkreiskapazität	C_g	0,495	mF
Bremswiderstand	R_b	25	Ω
Dauerleistung des Bremswiderstands	P_b	2,6	kW
Minimale Zwischenkreisspannung	$v_{g,min}$	ca. 565	V
Maximale Zwischenkreisspannung (Bremschopperschwelle)	$v_{g,max}$	650	V

Tabelle 10.8: Parameterwerte der elektromechanischen Last im zweiten Fallbeispiel.

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Eingangsbemessungsspannung	v_n	400	V
Motorbemessungsleistung	P_{mot}	55	kW
Zwischenkreiskapazität	C_l	3,9	mF
Schaltfrequenz	f_{sl}	4	kHz
Minimale Zwischenkreisspannung	$v_{g,min}$	650	V
Maximale Zwischenkreisspannung	$v_{g,max}$	800	V

10.15 Betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen der Dissertation erfolgte die wissenschaftliche Betreuung der nachfolgenden studentischen Arbeiten.

Felder, Lars	2020	Bachelorarbeit <i>„Entwicklung und Bewertung eines datengesteuerten Prognosetools zur Vorhersage von Lastspitzen eines DC-Mikronetzes“</i>
Kara, Jennifer	2020	Projektarbeit <i>„Modellierung eines Active Front End Konverters“</i>
Finke, Marius	2021	Bachelorarbeit <i>„Entwicklung und Anwendung einer Methodik zum Einsatz von Lastprognosemodellen in mechatronischen Antriebssystemen“</i>
Fernandez-Horlacher, Enrique	2022	Masterarbeit <i>„Reglerentwurf und Stabilitätsanalyse für Energiespeicher im DC-Mikronetz“</i>
Harscher, Philipp	2022	Masterarbeit <i>„Entwicklung einer selbsteinstellenden Laderegelung für ein Schwungmassenspeichersystem“</i>

10.16 Veröffentlichungen

Im Rahmen der Dissertation entstanden Veröffentlichungen als Haupt- und Co-Autor.

Veröffentlichungen als Hauptautor

- (Laribi & Schaab 2019) Laribi, Raoul & Schaab, Darian Andreas, 2019.
Nutzenpotenziale von DC-Smart-Grids in der Industrie. wt Werkstattstechnik online (5), S. 307–311.
DOI: 10.37544/1436-4980-2019-05-9
- (Laribi et al. 2020a) Laribi, Raoul; Schaab, Darian Andreas; Sauer, Alexander, 2020.
Adaptive State of Charge Control for Droop Controlled Industrial DC-Microgrids, Setubal, Portugal, 08.07.2020 - 10.07.2020, S. 187-193.
ISBN: 978-1-7281-4218-0
DOI: 10.1109/CPE-POWERENG48600.2020.9161557
- (Laribi et al. 2020b) Laribi, Raoul; Lu, Yijun; Schaab, Darian Andreas; Dierolf, Christian; Sauer, Alexander, 2020.
Requirements Engineering and Morphological Analysis of Adaptive Control Strategies for Flywheel Energy Storage Systems in Industrial Applications: ECEEE Industrial Summer Study Proceedings, Gothenburg, Sweden, 14.09.2020 - 17.09.2020, S. 273-283.
ISBN: 978-91-983878-7-2
- (Laribi et al. 2021) Laribi, Raoul; Schaab, Darian Andreas; Lu, Yijun; Sauer, Alexander, 2021.
Non-Invasive Closed-Loop System Identification of an Active Rectifier: IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Toronto, ON, Canada, 13.10.2021 - 16.10.2021: IEEE, S. 1-7.
ISBN: 978-1-6654-3554-3
DOI: 10.1109/IECON48115.2021.9589954

- (Laribi & Sauer 2022) Laribi, Raoul & Sauer, Alexander, 2022.
Bremsenergie ökonomisch nutzen. Autonome Regelung macht's möglich. *Magazin des Stuttgarter Maschinenbaus* (11), S. 39–41.
- (Laribi et al. 2023a) Laribi, Raoul; Harscher, Philipp; Knapp, Jonas; Birke, Kai Peter; Sauer, Alexander, 2023.
Autonomous Load Profile Recognition in Industrial DC-Link Using an Audio Search Algorithm. In: Herbege, David; Hübner, Marco (Hrsg.): *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics*, Querétaro, Mexico, 28.02.2023-02.03.2023, S. 1-959.
DOI: 10.15488/13420
- (Laribi et al. 2023b) Laribi, Raoul; Kuhlmann, Timm; Sauer, Alexander, 2023.
Review on self-tuning control of energy storage systems in industrial DC grids: Young Energy Efficiency Researchers Conference, Wels, Austria, 28.02.2023, S. 1-15.

Veröffentlichungen als Co-Autor

- (Schaab et al. 2018) Schaab, Darian Andreas; Laribi, Raoul; Zimmermann, Fabian; Sauer, Alexander, 2018.
Energiespeicher für Rekuperation in Industriemaschinen. *wt Werkstattstechnik online* 108 (5), S. 1–7.
DOI: 10.37544/1436-4980-2018-05-51
- (Schaab et al. 2019) Schaab, Darian Andreas; Laribi, Raoul; Sauer, Alexander, 2019.
Sizing Electric Storage Devices for Power Smoothing Applications in DC Microgrids: IEEE 7th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), Oshawa, Canada: IEEE, S. 150-155.
DOI: 10.1109/SEGE.2019.8859859

- (Zimmermann et al. 2019) Zimmermann, Fabian; Emde, Alexander; Laribi, Raoul; Wang, Diana, 2019.
Energiespeicher in Produktionssystemen: Herausforderungen und Chancen für industrielle Einsatzoptionen. Stuttgart.
Verfügbar unter:
[https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/8c8b6368-dee2-488d-9170-38a2883531c6/detailsDOI: 10.24406/ipa-n-552073](https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/8c8b6368-dee2-488d-9170-38a2883531c6/detailsDOI:10.24406/ipa-n-552073); Zugriff am: 03.01.2020
- (Kaymakci et al. 2021) Kaymakci, Can; Laribi, Raoul; Sauer, Alexander, 2021.
Intelligente Regelung für Stromspeichersysteme. wt Werkstattstechnik online 111 (3), S. 167–171.
DOI: 10.37544/1436-4980-2021-03-75
- (Lu et al. 2021a) Lu, Yijun; Laribi, Raoul; Sauer, Alexander, 2021.
Modeling and Control of an Energy Storage System for Peak Shaving in Industrial Pulsed Power Applications: 2021 Power System and Green Energy Conference (PSGEC), Shanghai, China, 20.08.2021 - 22.08.2021: IEEE, S. 390-394.
ISBN: 978-1-7281-9095-2
DOI: 10.1109/PSGEC51302.2021.9542104
- (Lu et al. 2021b) Lu, Yijun; Laribi, Raoul; Sauer, Alexander, 2021.
Modelling and Analysis of High-Speed Flywheel Energy Storage Control System and PLC Implementation: 2021 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT), Macau, Macao, 16.12.2021 - 18.12.2021: IEEE, S. 55-60.
ISBN: 978-1-6654-4041-7
DOI: 10.1109/CEECT53198.2021.9672638
- (Lu et al. 2021c) Lu, Yijun; Laribi, Raoul; Schaab, Darian Andreas; Sauer, Alexander, 2021.
Control Design and Stability Analysis of an Energy Storage System in a DC Link for Industrial Pulsed Power Applications: 2021 IEEE Fourth International Conference on DC Microgrids (ICDCM), Arlington, VA, USA, 18.07.2021 - 21.07.2021: IEEE, S. 1-6.
ISBN: 978-1-7281-8641-2
DOI: 10.1109/ICDCM50975.2021.9504624

