
BACHELORARBEIT

**<Simulation des drehzahlgeregelten
Mähantriebes eines elektrifizierten Ra-
sentraktors >**

Herr PeiJun Le

Seminargruppe: ME18wA-B

Email: ple1@hs-mittweida.de

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

Mittweida, Sommersemester, 2021

Fakultät Ingenieurwissenschaften

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Tel. +49 3727 581661

Fax. +49 3727 5821661

rauchfus@hs-mittweida.de

Mittweida, 03.01.2022

Bacheloraufgabenstellung für

PeiJun Le

Thema: Simulation des drehzahlgeregelten Mähantriebes eines elektrifizierten Rasentraktors

Rasentraktoren ermöglichen die Pflege großer Grundstücke mit vertretbarem Zeiteinsatz, dabei entstehen Abgase und unangenehme Geräusche. Die Zuschaltung des Mähdecks und die Drehzahlregelung des Verbrennungsmotors darf als überholungsbedürftig eingestuft werden. Aus den genannten Gründen soll ein ausgedienter Rasentraktor vollständig elektrifiziert werden. Ein Akku wird dafür neu entwickelt. Das Mähdeck wird über einen Keilriemen mit der Welle des E-Motors verbunden und mit Hilfe der Leistungselektronik auf gezielte Drehzahl hochgefahren.

Arbeitspakete:

1. Auswahl geeigneter Komponenten für das drehzahlgeregelte Mähwerk mit dem Motor SHG 5kW
 - Auswahl des geeigneten Zwischenkreiskondensators zur Reduktion des Spannungsrippels im Bordnetz
 - Auswahl des geeigneten Mähwerk-Einschalters, unter Berücksichtigung einfacher Bedienung und maximaler Sicherheit
 - Wie muss die Sitzüberwachung in die Vorgabe des Drehzahlsollwertes eingebunden werden?

-
- Berechnung der Übersetzung des Keilriemenantriebes, um mit dem Mähwerk 1100 min^{-1} unter Volllast (75Nm) erreichen zu können
 - welches maximale Moment kann über den Keilriemen übertragen werden?
 - Temperaturmessung am Mähantrieb: um eine thermische Überlastung des Motors zu verhindern, soll eine Fehlermeldung im Display der VCU generiert werden.
2. Entwicklung der Drehzahlregelung für den Mähantrieb in der Simulation mit PORTUNUS
- Auswahl des geeigneten Drehzahlsollwertes (0...5V) für die Steuereinheit KBL des Motors SHG 5kW
 - Auslegung des Regelkreises mit einem PID-Drehzahlregler
 - Definition der Hochfahrrampe (FIR), um einen zügigen, komfortablen und stromsparenden Anlauf zu erreichen (biharmonische Anfahrfunktion)
 - Schnellstopp im Gefahrenfall (Sitzüberwachung): Welche minimale Auslaufzeit ist möglich, welcher maximale generatorisch erzeugte Bremsstrom darf dabei entstehen?
 - Aus der kurzzeitigen maximalen Last im Motor- und Generatorbetrieb soll eine sinnvolle Strombegrenzung programmiert werden und auf die Drehzahlregelung einwirke

Hochschulbetreuer:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
2 Rasentraktor	2
3 Auswahl der Motorarten bezüglich des Spannungsbereichs	4
4 Gleichstrommotor	6
4.1 <i>Prinzipieller Aufbau</i>	6
4.2 <i>Permanenterregter Gleichstrommotor</i>	8
4.3 <i>Drehzahlstellung</i>	10
4.3.1 <i>Ankerspannungsstellung</i>	10
4.3.2 <i>Ankerzusatzwiderstände</i>	11
4.3.3 <i>Feldschwächung</i>	12
4.4 <i>4-Quadranten-Betrieb des Gleichstrommotors</i>	13
4.5 <i>Modellierung</i>	14
4.5.1 <i>Gleichungssystem / Modell</i>	14
4.5.2 <i>Signalflussplan und Übertragungsfunktion</i>	17
5 Motoransteuerung mit H-Brücke	18
5.1 <i>Funktionsweise</i>	18
5.2 <i>Drehzahlsteuerung durch PWM</i>	19
6 Regler und Regelkreis	21
6.1 <i>Einleitung</i>	21
6.2 <i>Regelkreis</i>	22
6.3 <i>Regler</i>	23
7 PID-Regler	25

7.1	<i>Anteil</i>	25
7.2	<i>Übertragungsfunktion</i>	27
7.3	<i>Dimensionierung nach Einstellregel</i>	28
7.3.1	Streckenparameterbestimmung nach der Sprungantwort.....	28
7.3.2	Parametereinstellung nach Einstellregeln	29
8	Kaskadenregelung des Gleichstrommotors	30
8.1	<i>Einstellung nach dem Betragsoptimum</i>	31
8.2	<i>Einstellung nach dem symmetrischen Optimum</i>	32
9	Aufgabe-Komponenten für das drehzahlgeregelte Mähwerk	34
9.1	<i>Auswahl des geeigneten Zwischenkreiskondensators</i>	34
9.2	<i>Berechnung der Übersetzung des Keilriemenantriebes und des erforderlichen Drehmoments vom Mähmotor</i>	36
10	Aufgabe-Entwicklung der Drehzahlregelung für den Mähantrieb in der Simulation mit PORTUNUS	39
10.1	<i>Gleichstrommotor als Regelstrecke</i>	39
10.2	<i>Die Schaltung für H-Brücke</i>	40
10.3	<i>Entwurf von PWM</i>	43
10.4	<i>Auslegung des Regelkreises mit einem PID-Drehzahlregler</i>	46
10.4.1	Streckenparameterbestimmung nach der Sprungantwort.....	46
10.4.2	Parametereinstellung nach Einstellregel von Chien / Hrones und Reswick	47
10.4.3	PID-Regelkreis	50
10.5	<i>Definition der Hochfahrrampe</i>	53
10.5.1	Erzeugung der biharmonischen Funktion	53
10.5.2	Biharmonische Funktion als Führungsgröße.....	55
10.5.3	Passende Rampenzeit	57
10.5.4	Biharmonische Funktion als Führungsgröße mit Bremsen	61
10.5.5	Einbau der biharmonischen Funktion als Führungsgröße in System	65
10.6	<i>Begrenzungsregelung</i>	67
10.6.1	Strombegrenzung	68
10.7	<i>Drehzahlreglung mit Kaskadenreglung</i>	72
10.7.1	Parametereinstellung nach dem Betragsoptimum	72
10.7.2	Innerer Regelkreis - Stromregelkreis	75
10.7.3	Parametereinstellung nach dem symmetrischen Optimum.....	76
10.7.4	Äußerer Regelkreis – Drehzahlregelkreis.....	79
10.7.5	Kombinieren beider Regelkreise.....	79

Zusammenfassung	83
Quellverzeichnis	XIII
<i>Literaturverzeichnis</i>	<i>XIII</i>
<i>Internetquellen</i>	<i>XIV</i>
Anlagen	XV
Selbstständigkeitserklärung	XVI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: ETESIA Attila SKD Aufsitzmäher Gestrüppmäher (Börger Motorgeräte GmbH, 2021)	2
Abbildung 2: Spannungsbereich (itwissen, 2020)	4
Abbildung 3: Elektrisch erregte 2-polige Gleichstrommaschine (Hagl, 2015, S.80)	6
Abbildung 4: Einzelblech für eisenbehafteten Rotor (Hgal, 2015, S. 83)	7
Abbildung 5: Ankeraufbau (Hgal, 2015, S. 84)	7
Abbildung 6: Aufbau des Kommutators (Dowrueng, 1999, S. 2)	8
Abbildung 7: Prinzipieller Aufbau eines permanenterregten (Hagl, 2015, S. 93)	8
Abbildung 8: Ersatzschaltbild des Ankerkreises (Rauchfuß, 2011, S. 13)	9
Abbildung 9: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie (Dowrueng, 1999, S. 17)	11
Abbildung 10: Drehzahlstellung mit Ankerzusatzwiderständen (Rauchfuß, 2011, S. 16) ..	11
Abbildung 11: Drehzahlkennlinie mit Ankerzusatzwiderständen (Rauchfuß, 2011, S. 16)	11
Abbildung 12: Zusatzwiderstand im Erregerkreis bei Feldschwächung (Rauchfuß, 2011, S. 17)	12
Abbildung 13: Stationäre Kennlinien bei Feldschwächung; $\Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3$ (Dowrueng, 1999, S. 20)	13
Abbildung 14: Das Betriebsverhalten der Nebenschluß- und der fremderregten Maschine (Dowrueng, 1999, S. 20)	13
Abbildung 15: Vier-Quadranten-Betrieb (Pitter, 2009)	14
Abbildung 16: Bedingungen für Erstellung des Modells eines Gleichstrommotors (Rauchfuß, 2011, S. 7)	14
Abbildung 17: Mache des Ankerkreises (Rauchfuß, 2011, S. 7)	14

Abbildung 18: Signalflussplan der Gleichstrommaschine (Rauchfuß, 2011, S. 11).....	17
Abbildung 19: Prinzip der H-Brücke (Weisenhorn, 2016, S. 2)	18
Abbildung 20: Vierquadrantensteller des Gleichstrommotors (wikipedia,2017).....	19
Abbildung 21: Pulsweitenmodulation zur Steuerung der mittleren Motorspannung \bar{u}_M und der Drehrichtung (Weisenhorn, 2016, S. 3)	20
Abbildung 22: Prinzip der Regelung (RoboterNETZ, 2008)	21
Abbildung 23: Blockschaltbild eines Standardregelkreises (Boulet Bate, 2009).....	22
Abbildung 24: P-Regler (RoboterNETZ, 2008)	23
Abbildung 25: I-Regler (RoboterNETZ, 2008).....	23
Abbildung 26: PI-Regler (RoboterNETZ, 2008)	24
Abbildung 27: PID-Regler (RoboterNETZ, 2008).....	24
Abbildung 28: PID-Regler (studyflix, 2021)	25
Abbildung 29: Einstellregel nach der Sprungantwort (Kröber, O.J).....	28
Abbildung 30: prinzipieller Aufbau der Kaskadenregelung (Raisch, O.J, S. 1)	30
Abbildung 31: Aufbau des Kaskadenstruktur eines Gleichstrommotors (Rauchfuß, 2011, S. 7)	30
Abbildung 32: innerer Regelkreis (Rauchfuß, 2011, S. 13)	31
Abbildung 33: äußerer Regelkreis (Rauchfuß, 2011, S. 28).....	32
Abbildung 34: Schaltplan (mikrocontroller, O.J).....	34
Abbildung 35: Spitzenwert der Absorptionsspannung (elecfans, 2017).....	35
Abbildung 36: Datensheet SEMiX223GB12E4P (Semikorn, 2017)	36
Abbildung 37: Datensheet von SHG_5kW	36
Abbildung 38: Bode-Diagramm der Regelstrecke-SHG_5kW	40

Abbildungsverzeichnis	VI
Abbildung 39:H-Brücke ohne Drehzahlregelung.....	41
Abbildung 40: Kennlinien für Transistor und Diode.....	41
Abbildung 41: Parameter von Kennlinie	42
Abbildung 42: Parameter von Zwischenkondensator	42
Abbildung 43: Modell SHG_5kW	42
Abbildung 44: Zustandskreis von PWM	43
Abbildung 45: Deklaration für PWM	44
Abbildung 46: Wertzuweisung von PWM.....	44
Abbildung 47: Parameter des trapezförmigen Signals	45
Abbildung 48: Drehzahlverlauf ohne Regelung	45
Abbildung 49: Ableitung der Ist-Drehzahlkurve.....	46
Abbildung 50: H-Brücke über PWM mit Wendenpunkregler	46
Abbildung 51: Bestimmung des Wendenpunktes	47
Abbildung 52: Bode-Diagramm geregelter Regelstrecke mit PID-Regler	49
Abbildung 53: PID-Regelkreis	50
Abbildung 54: trapezförmiges Signal N_Soll.....	50
Abbildung 55: Deklaration-PID	51
Abbildung 56: Wertzuweisung von PWM über Regler.....	51
Abbildung 57: H-Brücke über PWM mit PID-Regelkreis.....	51
Abbildung 58: Drehzahl mit PID-Regelkreis mit Last.....	52
Abbildung 59: biharmonische Funktion	53
Abbildung 60: Wertzuweisung und Deklaration der biharmonischen Funktion	54
Abbildung 61: biharmonische Funktion in Portunus.....	54

Abbildung 62: Wertzuweisung für Anlauf	55
Abbildung 63: biharmonische Funktion für Anlauf mit Rampenzeit von 100ms	55
Abbildung 64: Deklaration und Wertzuweisung der biharmonischen Funktion mit beliebiger Sprungzeit	56
Abbildung 65: benutzerdefinierte Sprungzeit	56
Abbildung 66: biharmonischen Funktion mit Sprungzeit von 100ms	57
Abbildung 67: biharmonische Funktion mit Rampenzeit von 250ms	58
Abbildung 68: biharmonische Funktion mit Rampenzeit von 500ms	58
Abbildung 69: biharmonische Funktion mit Rampenzeit von 750ms	59
Abbildung 70: biharmonische Funktion mit Rampenzeit von 1000ms	59
Abbildung 71: biharmonische Funktion mit Rampenzeit von 1250ms	60
Abbildung 72: biharmonische Funktion mit Rampenzeit von 1500ms	60
Abbildung 73: Einstellung von Lookup-Signal: STEP1	61
Abbildung 74: Lookup-Signal: STEP1	61
Abbildung 75: Wertzuweisung für ganze Laufzeit	62
Abbildung 76: Mark1	62
Abbildung 77: Mark2	63
Abbildung 78: Mark3	64
Abbildung 79: Mark4	64
Abbildung 80: Vorgang der biharmonischen Funktion als Führungsgröße	65
Abbildung 81: Einbau der biharmonischen Funktion in System	65
Abbildung 82: Deklaration des Systems mit biharmonischer Funktion	66
Abbildung 83: Wertzuweisung des Systems mit biharmonischer Funktion	66

Abbildung 84: Drehzahlregelung von H-Brücke über PWM mit Anlauf und Bremsen durch biharmonische Funktion.....	67
Abbildung 85: Regelkreis mit Begrenzungsregelung (Schröder, 2015, S. 118).....	68
Abbildung 86: PID-Regelkreis mit Strombegrenzungsregelkreis.....	68
Abbildung 87: Deklaration der I_{\max}	69
Abbildung 88: Einstellung der Parameter des PI-Reglers	70
Abbildung 89: Simulationsschaltplan mit PID-Regelkreis und Strombegrenzungsregelkreis	71
Abbildung 90: Drehzahlreglung mit PID-Regelkreis und Strombegrenzungsregelkreis	71
Abbildung 91: Bode-Diagramm von Stromstrecke ohne Regelung.....	74
Abbildung 92: Bode-Diagramm der gegeregelten Stromstrecke nach dem Betragsoptimum	75
Abbildung 93: Innerer Regelkreis-Stromregelkreis	76
Abbildung 94: Bode-Diagramm der Drehzahlstrecke ohne Regelung.....	77
Abbildung 95: Bode-Diagramm von Drehzahlstrecke mit Regelung nach dem symmetrischen Optimum.....	78
Abbildung 96: Äußerer Regelkreis-Drehzahlregelkreis.....	79
Abbildung 97:Kaskadenregelkreis für Drehzahlreglung.....	80
Abbildung 98: Drehzahlregelung durch Kaskadenregelkreis mit Rampenzeit von 100ms	80
Abbildung 99: Drehzahlregelung durch Kaskadenregelkreis mit Rampenzeit von 500ms	81
Abbildung 100: Drehzahlregelung durch Kaskadenregelkreis mit Rampenzeit von 1000ms	82
Abbildung 101:Simulationsschaltplan mit Kaskadenregelkreis	82

Abkürzungsverzeichnis

Φ	<i>magnetischer Fluss</i>
\bar{u}_M	<i>mittlere Spannung</i>
ΔU_2	<i>Absorptionsspannung</i>
μC	<i>Microcontroller</i>
$\text{abs}(I_A)$	<i>absolute Wert von Ist-Strom</i>
AC	<i>Wechselspannung</i>
AC-Motor	<i>Wechselstrommotoren</i>
C1	<i>Zwischenkreiskondensator</i>
DC	<i>Gleichspannung</i>
DC-Motor	<i>Gleichstrommotor</i>
di/dt_{off}	<i>Slope des Einschaltstroms</i>
e	<i>Regelabweichung</i>
f_{Biharm}	<i>Frequenz der biharmonischen Funktion</i>
i_{ist}	<i>Ist-Strom</i>
I_A	<i>Ankerstrom</i>
I_E	<i>Erregerstrom</i>
I_{EN}	<i>Nennerergerstrom</i>
I_{max}	<i>max. Strom</i>
$k\Phi$	<i>Motorkonstante, Motorkonstante</i>
K_D	<i>Differentiationsfaktor</i>
K_i	<i>Verstärkungsfaktor der Strommessung</i>

K_p	<i>Proportionalfaktor</i>
K_{Si}	<i>Verstärkung der Strecke des Stromregelkreises</i>
K_{SR}	<i>Verstärkungsfaktor des Stromrichters</i>
K_{sw}	<i>Verstärkungsfaktor der Strecke des Drehzahlregelkreises</i>
K_T	<i>Verstärkungsfaktor des Tachometers bzw. des Drehzahlsensors</i>
L_A	<i>Ankerinduktivität</i>
L_s	<i>Streuinduktivität</i>
M_i	<i>Innere Motordrehmoment</i>
N_{Test}	<i>Testsignal für PWM</i>
ρ	<i>Tastverhältnis</i>
P_V	<i>Verlustleistung</i>
PWM	<i>Pulsweitenmodulation</i>
R_A	<i>Ankerwiderstand</i>
R_{EzUS}	<i>Zusatzwiderstand im Erregerkreis</i>
R_i	<i>Innerwiderstand vom Akku</i>
$SELV$	<i>Schutzkleinspannung</i>
t	<i>Systemzeit von Portunus</i>
T/T_{pwm}	<i>Periodendauer von PWM</i>
t_{ende}	<i>Endezeitpunkt</i>
t_{start}	<i>Anfangszeit von Funktion</i>
T_{Biharm}	<i>Periodenzeit der biharmonischen Funktion</i>
T_g	<i>Ausgleichszeit</i>
T_N	<i>Nachstellzeit</i>
T_{Ramp}	<i>Rampenzeit</i>
T_u	<i>Verzugszeit</i>

T_V	<i>Vorhaltzeit</i>
u	<i>Stellgröße</i>
U_A	<i>Ankerspannung</i>
U_m	<i>Motorspannung</i>
$U_M(t)$	<i>resultierender Spannungsverlauf</i>
U_q	<i>Induzierte Spannung</i>
U_{Regler}	<i>Ausgangsspannung von Regler</i>
$U_{\text{Regler_max}}$	<i>max.Ausgangsspannung von Regler</i>
w	<i>Führungsgröße</i>
$w(p)$	<i>Eingangsfunktion</i>
$x(p)$	<i>Ausgangsfunktion</i>
x_i	<i>Zwischengrößen</i>
y	<i>Regelgröße</i>
z	<i>Störgröße</i>
z_i	<i>Störgrößen</i>
$\tau \Sigma$	<i>kleinere Zeitkonstante</i>
$\tau \Sigma'$	<i>Summe der kleinen Zeitkonstanten in Drehzahlstrecke</i>
τ_1	<i>Vorhaltzeitkonstante, Vorhaltzeitkonstante, Vorhaltzeitkonstante</i>
τ_A	<i>größte Zeitkonstante in Strecke</i>
ω_d	<i>Durchtrittsfrequenz</i>
τ_M	<i>elektromechanische Zeitkonstante</i>
τ_A	<i>elektrische Zeitkonstante</i>

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einstellregel nach Ziegler/Nichols	29
Tabelle 2: Einstellregeln nach Chien / Hrones und Reswick	29
Tabelle 3: Parameter von PID-Regler	48

1 Einleitung

Diese Bachelorarbeit entstand im Rahmen des Projekts: Umrüstung eines Rasentraktors von hydraulischem auf elektrischen Antrieb im Sommersemester 2021 an der Hochschule Mittweida.

Rasentraktoren ermöglichen die Pflege großer Grundstücke mit vertretbarem Zeiteinsatz, dabei entstehen Abgase und unangenehme Geräusche. Die Zuschaltung des Mähdecks und die Drehzahlregelung des Verbrennungsmotors darf als überholungsbedürftig eingestuft werden. Aus den genannten Gründen soll ein ausgedienter Rasentraktor vollständig elektrifiziert werden. Ein Akku wird dafür neu entwickelt. Das Mähdeck wird über einen Keilriemen mit der Welle des Motors verbunden und mit Hilfe der Leistungselektronik auf gezielte Drehzahl hochgefahren.

Die Berechnungsaufgabe und Simulation wurden zuhause durchgeführt. Ich habe während des Projekts viel gelernt. Hier muss ich mich bei meinem Betreuer Prof. Rauchfuß für die großartige Unterstützung während meines Projekts bedanken.

2 Rasentraktor

- Modell: Etesia-Aufsitzmaeher-Gestrueppmaeher-Attila-SKD (siehe Abb.1)



Abbildung 1: ETESIA Attila SKD Aufsitzmäher Gestrüppmäher (Börger Motorgeräte GmbH, 2021)

- **Technische Daten**

Motor:

Zylinder Anzahl	2
Hubraum	603 cm ³
Motor Leistung	13 PS
Benzintankinhalt	10 L
Öltankinhalt	1.5 L
Kühlung	Luftgekühlter 2 zylinder
Kraftstoff	Super Bleifrei 95/ 98
Zündung	12V - 13A
Anlasser	elektrischer Anlasser
Motorisierungstyp	Kawasaki FH 541V

Fahrtrieb:

Antriebsart	5
Fahrgeschwindigkeit	10 km/stunde
Geschwindigkeit Rückwärts	7 km/stunde
Anzahl der Antriebsräder	2
Hänge	30 %
Schalldruck	85
Reifen	VO: 13x5.00-6 / RÜ: 18x8.5-8
Bremmung	Hydromechanisch
Fahrtrieb	Hydromechanisch

Abmaße / Gewicht:

Gewicht	300Kg
Höhe	99cm
Breite	97cm
Länge	201cm
Hänge	30 %

Mähwerk

Theoretische Flächenleistung	8500 m ² /stunde
Messeranzahl	1
Schnittbreite	85cm
Mähdeck	Mastershock
Schnitthöhe	von 44 bis 102 mm

Ausgangssituation:

Hydraulischer Antrieb ist laut Stadtverwaltung defekt und darf deswegen nicht mehr in Betrieb genommen werden.

3 Auswahl der Motorarten bezüglich des Spannungsbereichs

Die Dimensionierungen der Antriebe sind stark abhängig von der Wahl der Akku-Spannung. Die Spannung des Akkus muss vor der Auswahl des richtigen Elektromotorarten die Priorität haben. Mit Hilfe der Spannungsbereiche kann man die passende Spannung auswählen.

- Spannungsbereich

Spannungsbereich stellt gemäß Abb.2 verschiedene Grenzbereich elektrischer Spannungen dar.

Spannungsbez.	Spannungsbereiche
Kleinspannung	< 50 V(AC), < 120 V(DC)
Niederspannung	< 1 kV(AC), < 1,5 kV(DC)
Mittelspannung	3 kV, 6 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV, 30 kV
Hochspannung	60 kV, 110 kV
Höchstspannung	220 kV, 380 kV, 500 kV, 700 kV, 1.150 kV

Abbildung 2: Spannungsbereich (itwissen, 2020)

- Schutzkleinspannung (Safety Extra Low Voltage)

Schutzkleinspannung (SELV) bedeutet, dass die Spannung so niedrig ist, dass der Bediener bei der Benutzung kein Risiko vom Elektroschlag hat.¹ Wenn der Körper dieser Spannung ausgesetzt wird, ist nur ein leichtes Kribbeln zu spüren. Muskelkrämpfe und Verbrennungen treten bei Schutzkleinspannungen nicht auf.² Für Schutzkleinspannung dürfen die Werte für Wechselspannung (AC) 50V oder für die Gleichspannung (DC) 120V nicht übersteigen.³ Weil keine Teilnehmer an diesem Projekt die professionellen Ausbildungen als Elektriker sowie eine entsprechende Zertifizierung hatten, konnte nur Schutzkleinspannung verwendet werden.

¹ Vgl. leuchtenzentrale, 2017.

² Vgl. ebd.

³ Vgl. Müller, 2014, S. 3.

Wechselstrommotoren (AC-Motor) benötigen zum Antrieb eine Spannung zwischen 400V und einigen kV.⁴ Er erfüllt nicht die Schutzkleinspannung. Vergleich dazu kann Gleichstrommotor (DC-Motor) mit Akku-Spannung unter Schutzkleinspannung angetrieben wird.

In diesem Projekt wird **PERMANENTERREGTE GLEICHSTROMMOTOREN** mit Spannung von 48V eingesetzt.

⁴vgl. Spring, 2009, S. 228.

4 Gleichstrommotor

Gleichstrommaschine bezieht sich auf Motoren, die Gleichstrom in mechanische Energie umwandeln (DC-Motor) oder mechanische Energie in Gleichstrom umwandeln (DC-Generator).⁵ Obwohl DC-Motoren heute in den meisten Industrien nicht mehr eingesetzt werden, haben sie aufgrund ihrer geringeren Kosten und ihrer hervorragenden Regelbarkeit immer noch einen Platz in Kraftfahrzeugen. Im Vergleich zu AC-Motoren können DC-Motoren die Drehzahl durch Änderung der Spannungsamplitude variieren, während das Drehmoment konstant bleibt. Darüber hinaus können die Grundlagen der DC-Motoren als die Vorkenntnisse für Erlernen anderer Maschinen verwendet werden.⁶

4.1 Prinzipieller Aufbau

Der Aufbau eines Gleichstrommotors sollte aus zwei Hauptteilen bestehen: dem Stator und dem Rotor.

- Stator

Die Funktion des Stators ist die Erzeugung des Magnetfeldes. Auf Erregerpol sitzt gleichstromdurchflossene Erregerwicklungen, mit denen eine zeitlich konstante magnetische Flussdichte und damit einen konstanten Fluss erzeugt wird. Aufgrund der sehr hohen magnetischen Permeabilität von Eisen gegenüber Luft verlaufen die magnetischen Feldlinien nahezu radial durch den Luftspalt. Der magnetische Rückfluss wird durch das magnetische Joch gebildet (vgl. Abb.3). Der Stator kann entweder ein Permanentmagnet oder ein Elektromagnet sein.

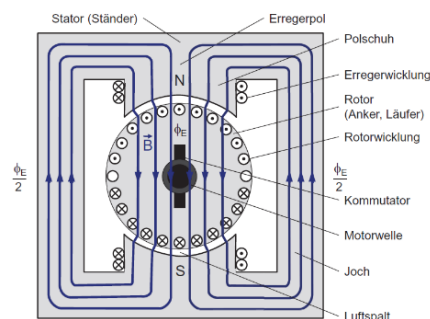


Abbildung 3: Elektrisch erregte 2-polige Gleichstrommaschine (Hagl, 2015, S.80)

⁵ Vgl. Hagl, 2015, S. 77.

⁶ Vgl. ebd.

- Rotor

Der Rotor, dessen Funktion die Erzeugung des elektromagnetischen Drehmoments und der induzierten elektrischen Spannung ist, ist der Dreh- und Angelpunkt der Energieumwandlung des Gleichstrommotors, daher wird er üblicherweise als Anker bezeichnet.⁷ Der Rotor besteht aus Rotorwelle, Ankerkern, Ankerwicklung, Kommutator und Lüfter usw.



Abbildung 4: Einzelblech für eisenbehafteten Rotor (Hgal, 2015, S. 83)

Im Allgemeinen besteht der Anker aus Blechen mit Dicken von 0.3mm-1mm (siehe Abb. 4), die übereinandergestapelt sind. Um Wirbelstromverluste und Hystereseverluste im Anker während des Motorbetriebs zu reduzieren, werden die Bleche zueinander isoliert. Der gestapelte Anker wird als Blechpaket bezeichnet und auf der Rotorwelle befestigt. Die Bleche des Ankers haben die Nuten, in denen die Wicklung eingebettet ist.⁸

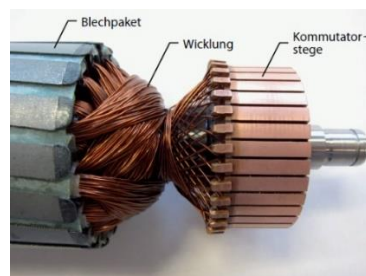


Abbildung 5: Ankerbau (Hgal, 2015, S. 84)

- Kommutator

Ein Kommutator besteht aus zwei voneinander isolierten Ringhälften, auf denen Bürstenschleifen. Über den Schleifring werden die Ankerspulen mit Strom in der richtigen Richtung versorgt. (siehe Abb. 6). An den Bürsten liegt eine pulsierende Gleichspannung an. Eine Glättung des Spannungsverlaufs kann durch mehrere Wicklungen erreicht werden.⁹

⁷ Vgl. conrad, o.J.

⁸ Vgl. Hagl, 2015, S. 83.

⁹ Vgl. Dowrueng, 1999, S. 2.

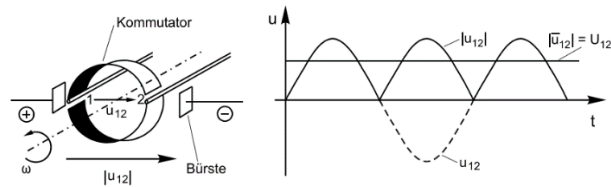


Abbildung 6: Aufbau des Kommutators (Dowrueng, 1999, S. 2)

4.2 Permanenterregter Gleichstrommotor

Bei großen Antrieben werden elektrisch erregte Motoren eingesetzt, um ausreichende Leistungen und Drehmomente zu gewährleisten. Sie verbrauchen jedoch ständig elektrische Energie zur Erzeugung des Magnetfeldes. Dadurch wird der Wirkungsgrad des Motors reduziert. Im Gegensatz dazu benötigen die permanenterregten Gleichstrommotoren aufgrund der Permanentmagnete im Stator keine elektrische Energie zur Erzeugung eines Magnetfeldes. Permanenterregte Gleichstrommotoren werden häufig in Kleinantrieben (typischerweise $\leq 750\text{W}$, häufig $\leq 500\text{W}$) eingesetzt.¹⁰

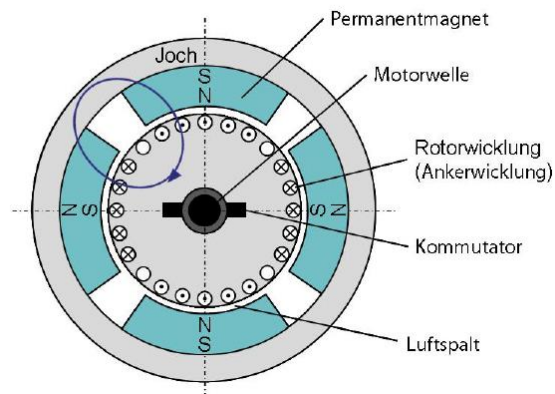


Abbildung 7: Prinzipieller Aufbau eines permanenterregten (Hagl, 2015, S. 93)

Abb.7 zeigt den schematischen Aufbau eines permanenterregten Gleichstrommotors mit eisenlosem Anker. Die Permanentmagnete sind im Inneren montiert. Dieser Aufbau zeichnet sich durch die kleinen Baugrößen und die relativ geringen Drehmomente aus.¹¹

Die Zusammenhänge und Konstanten für permanenterregte Gleichstrommotoren sind identisch wie für fremderregte Gleichstrommotoren.

¹⁰ Vgl. Hagl, 2015, S. 93.

¹¹ Vgl. ebd.

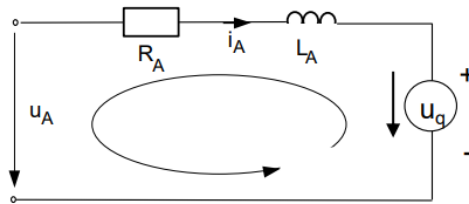


Abbildung 8: Ersatzschaltbild des Ankerkreises (Rauchfuß, 2011, S. 13)

Die Ankerwicklung hat einen Ankerwiderstand R_A und eine Ankerinduktivität L_A . (siehe Abb. 8)

Maschengleichung nach Abb. 8:

$$0 = u_A - u_q - i_A \cdot R_A - L_A \frac{d i_A}{dt}$$

Formel 1: Spannungsgleichung 1

für stationären Betrieb: Ankerspannung $U_A = \text{konst.}$; Ankerstrom $I_A = \text{konst.}$; magnetischer Fluss $\Phi = \Phi \delta = \text{konst.}$:

$$U_A = U_q + I_A \cdot R_A$$

Formel 2: Spannungsgleichung für stationären Betrieb

Induzierte Spannung U_q mit Motorkonstante $k\Phi$:

$$U_q = k \cdot \Phi \cdot \omega$$

Formel 3: Induzierte Spannung

Innere Motordrehmoment M_i mit Motorkonstante $k\Phi$:

$$M_i = k \cdot \Phi \cdot I_A$$

Formel 4: Innere Motordrehmoment

Drehzahl ω :

$$\omega = \frac{U_A}{k \cdot \Phi} - \frac{I_A \cdot R_A}{k \cdot \Phi}$$

Formel 5: Drehzahl

Mit Formel 4:

$$\omega = \frac{U_A}{k \cdot \Phi} - \frac{M_i \cdot R_A}{(k \cdot \Phi)^2}$$

Formel 6: Drehzahl mit Formel 4

Die Drehzahl= ideale Leerlaufdrehzahl (ω_0) - lastabhängiger Drehzahlabfall ($\Delta \omega$)

$$\omega_0 = \frac{U_A}{k \cdot \Phi} \quad \Delta \omega = \frac{M_1 \cdot R_A}{(k \cdot \Phi)^2}$$

Formel 6.1 ideale Leerlaufdrehzahl / Formel 6.2 lastabhängiger Drehzahlabfall

Im Permanentmagnet-Gleichstrommotor ist der Wert des Flusses konstant.

4.3 Drehzahlstellung

Die Drehzahlstellung kann mit Formel 6 bestimmt werden.

Die Drehzahl ω kann durch Änderung der Ankerspannung U_A , des Luftspaltflusses Φ und des Ankerkreiswiderstandes R_A geändert werden. Wenn die Ankerspannung oder die Erregerspannung umgepolt wird, wird die Drehrichtung vom Motor geändert.

4.3.1 Ankerspannungsstellung

Durch Änderung der Ankerspannung U_A bei konstantem Erregerstrom bzw. Fluss wird die Drehzahl des Motors stufenlos geregelt. Die eingestellte Spannung darf die Ankernennspannung U_{AN} nicht überschreiten.¹² Das heißt, dass sich der Ankerspannungsbereich zwischen U_{AN} und nahe $U_A=0$ befindet ($0 < U_A < U_{AN}$).

Bei konstantem Fluss kann die Drehzahl n etwa proportional zur Ankerspannung eingestellt werden.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_{A1} - R_A I_A}{U_{A2} - R_A I_A}$$

Formel 7: Verhältnis der Ankerspannung

Abb. 10 zeigt die Kennlinien der Drehzahl und des Drehmoments mit dem konstanten Fluss.

Die Ankerspannung ist Parameter.

¹² Vgl. Linse; Fischer, 2005, S. 230f.

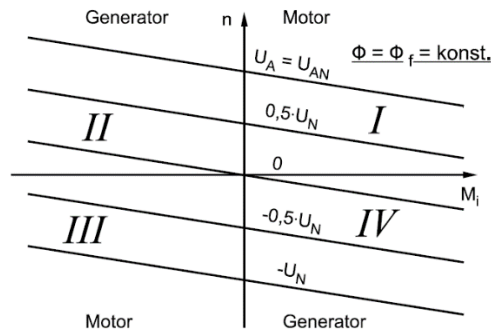


Abbildung 9: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie (Dowrueng, 1999, S. 17)

Die Ankerspannungsbereich wird durch Fliehkräfte und durch Lamellenspannung begrenzt.

4.3.2 Ankerzusatzwiderstände

Durch Einsatz der Ankerzusatzwiderstände wächst der Spannungsabfall (siehe Abb.10).

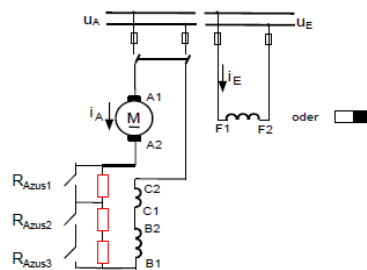


Abbildung 10: Drehzahlstellung mit Ankerzusatzwiderständen (Rauchfuß, 2011, S. 16)

Mit zunehmenden Werten der Vorwiderstände im Ankerkreis wird der Drehzahlverlauf gemäß Abb.11 immer steiler und damit lastabhängiger.

Formel 8 beschreibt den Anstieg/Reaktion der Maschinen-KL auf Last.

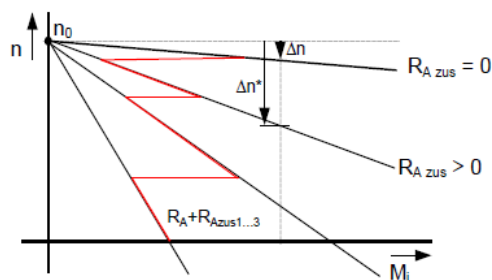


Abbildung 11: Drehzahlkennlinie mit Ankerzusatzwiderständen (Rauchfuß, 2011, S. 16)

$$\Delta\omega = \frac{(R_A + R_{A_{zus}})}{k\Phi^2} \cdot M_i$$

Formel 8: lastabhängiger Drehzahlabfall mit Ankerzusatzwiderstände

Die Vorwiderstände führt zu zusätzlichen Verlusten nach Formel 9. Deswegen das Verfahren ist energetisch unökonomisch. Und gleichzeitig wird Wirkungsgrad geringer.

$$P_V = I_A^2 \cdot R_V$$

Formel 9: Berechnung der Verlustleistung

Das Verfahren ist für Anlassmaßnahme oder nur kurzzeitig geeignet.

4.3.3 Feldschwächung

Gleichstrommotoren werden in der Regel mit Nennmagnetischem Fluss (Φ_N) betrieben. Deswegen ist die Vergrößerung des magnetischen Flusses wegen der Eisensättigung nicht möglich.¹³ Die Änderung des magnetischen Flusses zur Drehzahlstellung kann daher nur durch Reduzierung des magnetischen Flusses im Erregerkreis erfolgen. Solches Verfahren wird als Feldschwächung bezeichnet. Wenn Erregerstrom (I_E) kleiner als Nennerregerstrom (I_{EN}) ist, wird damit der Fluss in dem Motor schwächer.¹⁴ Um die Feldschwächung zu realisieren, wird Zusatzwiderstand ($R_{E_{zus}}$) im Erregerkreis eingesetzt. (siehe Abb. 12)

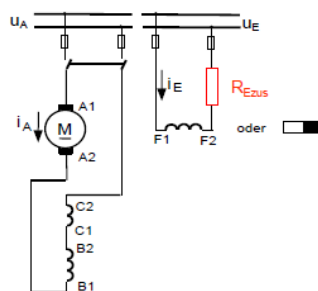


Abbildung 12: Zusatzwiderstand im Erregerkreis bei Feldschwächung (Rauchfuß, 2011, S. 17)

Mit abnehmendem Fluss sind die Kennlinien stärker geneigt. Und der Ankerstrom erhöht sich beim konstanten Motordrehmoment. (vgl. Abb. 13)

¹³ Vgl. Dowrueng, 1999, S. 19.

¹⁴ Vgl. Linse; Fischer, 2005, S. 231.

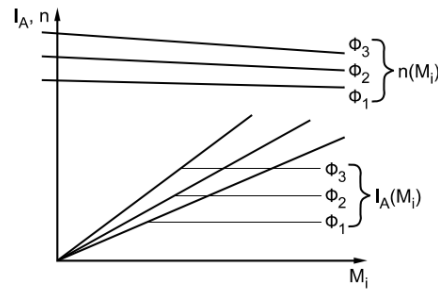


Abbildung 13: Stationäre Kennlinien bei Feldschwächung; $\Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3$ (Dowrueng, 1999, S. 20)

Die Maschine wird im Feldschwächbetrieb nicht mehr mit Nennmoment belastet, weil Die Erhöhung des Stroms im Anker nach Formel 9 zu erhöhten Verlustleistung (P_V) führt und ist ein Betrieb mit Nennstrom beim Dauerbetrieb zulässig.¹⁵

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Drehzahl des Motors durch Ankerspannungstellung und Einsatz der Ankerzusatzwiderstände des Motors reduziert wird, während sich die Drehzahl durch die Feldschwächung erhöhen lässt.

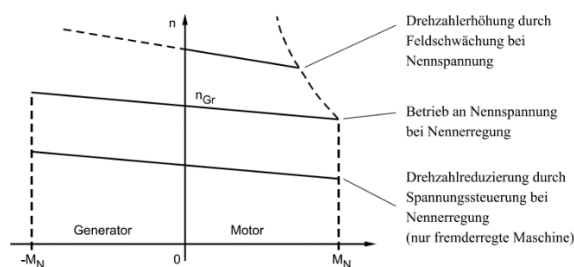


Abbildung 14: Das Betriebsverhalten der Nebenschluß- und der fremderregten Maschine (Dowrueng, 1999, S. 20)

Da ein Permanentmagnet-Gleichstrommotor keinen Erregerkreis hat und sein Magnetfeld durch seine eigenen Magnete gebildet wird, ist die Drehzahlregelung mit Feldschwächung für Permanentmagnet-Gleichstrommotoren nicht möglich.

4.4 4-Quadranten-Betrieb des Gleichstrommotors

Der Gleichstrommotor arbeitet in vier Quadranten: Vorwärtsbremsen, Vorwärtsfahren, Rückwärtsfahren und Rückwärtsbremsung. Ein Motor hat zwei Modi: Treiben und Bremsen. Ein Motorantrieb, der in beiden Drehrichtungen arbeiten kann und sowohl Motor als auch Regeneration erzeugen kann, wird als Vierquadranten-Frequenzumrichter bezeichnet (vgl. Abb.15).

¹⁵ Vgl. Dowrueng, 1999, S. 20.

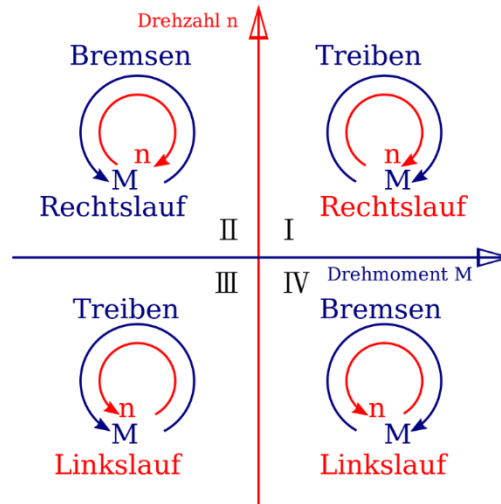


Abbildung 15: Vier-Quadranten-Betrieb (Pitter, 2009)

Im Treibmodus wandelt der Motor elektrische Energie in mechanische Energie um und treibt die Last an. Im Bremsenmodus wirkt der Motor wie ein Generator, der mechanische Energie in elektrische Energie umwandelt und sich dadurch der Bewegung widersetzt. Der Motor kann sowohl in Vorwärts- als auch in Rückwärtsrichtung arbeiten, d. H. In Motor- und Bremsvorgängen.

4.5 Modellierung

4.5.1 Gleichungssystem / Modell

- Modell der Gleichstrommaschine und Übergang im Zeit-Bereich mit folgenden Bedingungen:

$$1. \frac{dJ}{dt} = 0 \quad 2. m_{\text{Reib}} \text{ in } m_{\text{Last}}^* \text{ enthalten} \quad 3. k\Phi = \text{konst.} \quad 4. m_{\text{Last}}^* = \text{konst.}$$

Abbildung 16: Bedingungen für Erstellung des Modells eines Gleichstrommotors (Rauchfuß, 2011, S. 7)

Masche des Ankerkreises:

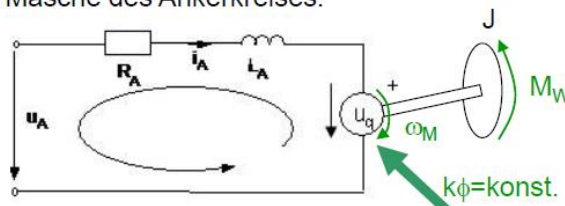


Abbildung 17: Masche des Ankerkreises (Rauchfuß, 2011, S. 7)

Die Formel 1 wird mit Formel 2, Formel 3, Formel 4 so umformuliert mit $R_A^* = R_{Netz} + R_A$ und $L_A^* = L_{Netz} + L_A$:

$$u_A = k\Phi \cdot \omega + \frac{R_A^*}{k\Phi} \cdot m_i + \frac{L_A^*}{k\Phi} \frac{dm_i}{dt}$$

Formel 10: Spannungsgleichung 2

Dann mit $m_i = J \frac{d\omega}{dt} + m_{Last}^*$ ergibt sich die Formel 11:

$$\frac{L_A^*}{k\Phi} \left(J \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{dm_{Last}^*}{dt} \right) + \frac{R_A^*}{k\Phi} \left(J \frac{d\omega}{dt} + m_{Last}^* \right) + k\Phi \cdot \omega = u_A$$

Formel 11: Spannungsgleichung 3

Beide Seiten gleichzeitig durch $k\Phi$ dividieren:

$$\frac{R_A^*}{R_A^*} \cdot \frac{L_A^* \cdot J}{k\Phi} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{R_A^* \cdot J}{k\Phi} \cdot \frac{d\omega}{dt} + k\Phi \cdot \omega = u_A - m_{Last}^* \cdot \frac{R_A^*}{k\Phi}$$

Formel 12: Spannungsgleichung 4

Aus Formel 12 bekommt man die elektrische Zeitkonstante τ_A und elektromechanische Zeitkonstante τ_M :

$$\frac{L_A^*}{R_A^*} = \tau_A$$

Formel 13: Elektrische Zeitkonstante τ_A

$$\frac{J \cdot R_A^*}{(k\Phi)^2} = \tau_M$$

Formel 14: Elektromechanische Zeitkonstante τ_M

- Modell der Gleichstrommaschine und Übergang vom Zeit- in den Laplace-Bereich

Nach Laplace-Transformation ergibt sich die Maschengleichung des Ankers in Laplace-Bereich:

$$u_A - u_q = i_A \cdot R_A^* + L_A^* \frac{di_A}{dt} = i_A \cdot R_A^* + pL_A^* i_A = i_A \cdot R_A^* \left(1 + p \frac{L_A^*}{R_A^*} \right)$$

Formel 15: Maschengleichung des Ankers in Laplace-Bereich

Nach der Zusammenfassung bekommt man die 5 Grundgleichungen der Gleichstrommaschine:

$$\begin{aligned} \text{I. } u_A - u_q &= i_A \cdot R_A^* (1 + p\tau_A) && \rightarrow \tau_A = \frac{L_A^*}{R_A^*} \\ \text{II. } m_i &= k\Phi \cdot i_A \\ \text{III. } m_i &= m_{\text{dyn}} + m_{\text{Last}}^* \\ \text{IV. } m_{\text{dyn}} &= pJ \cdot \omega_M = p \frac{\tau_M (k\Phi)^2}{R_A^*} \cdot \omega_M && \rightarrow \tau_M = \frac{J \cdot R_A^*}{(k\Phi)^2} \\ \text{V. } u_q &= k\Phi \cdot \omega_M \end{aligned}$$

Formel 16: 5 Grundgleichung der Gleichstrommaschine

Aus den 5 Grundgleichungen vom Modell der Gleichstrommaschine werden die regelungstechnischen Übertragungsglieder abgeleitet:

$$\begin{aligned} \text{I. } G(p) &= \frac{x_a}{x_e} = \frac{i_A}{u_A - u_q} = \frac{1}{R_A^* (1 + p\tau_A)} \\ \text{II. } G(p) &= \frac{x_a}{x_e} = \frac{m_i}{i_A} = k\Phi \\ \text{III. } & m_i = m_{\text{dyn}} + m_{\text{Last}}^* \\ \text{IV. } G(p) &= \frac{x_a}{x_e} = \frac{\omega_M}{m_{\text{dyn}}} = \frac{1}{pJ} = \frac{R_A^*}{p\tau_M (k\Phi)^2} \\ \text{V. } G(p) &= \frac{x_a}{x_e} = \frac{u_q}{\omega_M} = k\Phi \end{aligned}$$

Formel 17: Regelungstechnische Übertragungsglieder aus den 5 Grundgleichungen vom Modell der Gleichstrommaschine

4.5.2 Signalfussplan und Übertragungsfunktion

Werden die 5 Gleichungen in Formel 17 zusammengesetzt und die jeweiligen Ein und Ausgangsgrößen entsprechend miteinander verbunden, entsteht der Signalfussplan der Gleichstrommaschine aus Abb.18.

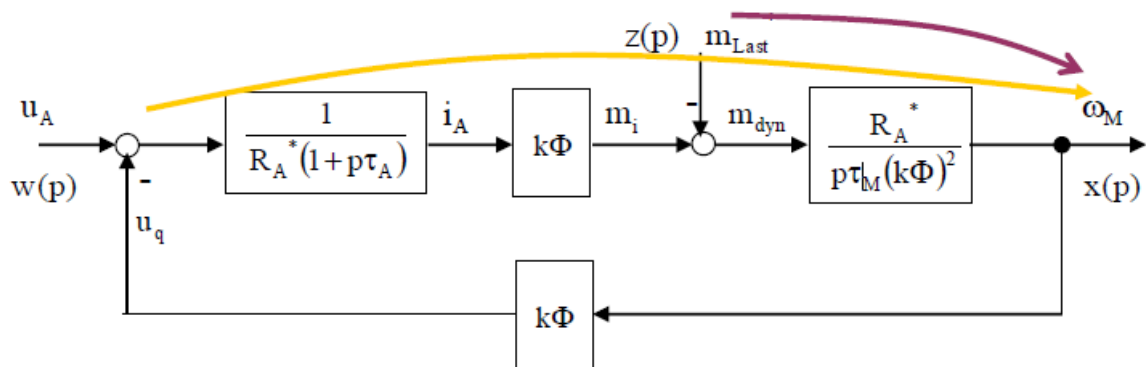


Abbildung 18: Signalfussplan der Gleichstrommaschine (Rauchfuß, 2011, S. 11)

Der Signalfussplan beschreibt das Übertragungsverhalten vom Anlegen einer Ankerspannung zum Entstehen einer Drehzahl.

Aus der Abb.18 sind Führungsgröße, Regelgröße und Störgröße zu erkennen:

Die Führungsgröße: U_A

Regelgröße: M_ω

Störgröße: m_{Last}

Die Führungsübertragungsfunktion mit Eingangsfunktion $w(p)$, Ausgangsfunktion $x(p)$ und alle Störgrößen $z_i=0$:

$$G_w(p) = \frac{x(p)}{w(p)} \Big|_{z=0} = \frac{S(p)}{1 + R(p) \cdot S(p)} = \frac{S(p)}{1 + G_0(p)}$$

Formel 18: Führungsübertragungsfunktion

Dann ergibt sich die Übertragungsfunktion vom Gleichstrommotor aus Formel 19:

$$\frac{\omega_M}{u_A} = \frac{1}{(1 + p\tau_A) \cdot p\tau_M \cdot k\Phi} \cdot \frac{(1 + p\tau_A) \cdot p\tau_M}{((1 + p\tau_A) \cdot p\tau_M + 1)} = \frac{1}{k\Phi(1 + p\tau_M + p^2\tau_A\tau_M)}$$

Formel 19: Übertragungsfunktion von Gleichstrommotor

5 Motoransteuerung mit H-Brücke

Eine H-Brücke ist eine elektronische Schaltung, Wenn das Vorzeichen der Spannung umgedreht wird, ändert sich auch die Drehrichtung des Motors. Mit PWM kann man sowohl die Drehrichtung als auch die Drehzahl des Motors steuern.

5.1 Funktionsweise

Abb. 15 zeigt das Schaltungsprinzip, bei dem auch das Vorzeichen der Motorspannung umschaltbar ist, so dass die Drehrichtung des Motors gesteuert werden kann.

Der Motor hat insgesamt drei Betriebsmöglichkeiten:

1. Stillstand

Wenn alle Schalter ausgeschaltet sind, leitet der Stromkreis nicht, so dass U_M gleich 0 ist. Der Motor läuft nicht (vgl. Abb. 19a).

2. Rechtslauf

Soll der Motor in Rechtslauf drehen, muss S1 und S4 geschlossen werden. Hierbei ist der Verlauf des Stroms: $U \rightarrow S1 \rightarrow M \rightarrow S4 \rightarrow U$ (vgl. Abb. 19b). Die Versorgungsspannung (U) hat die gleiche Richtung wie Motorspannung (U_M).

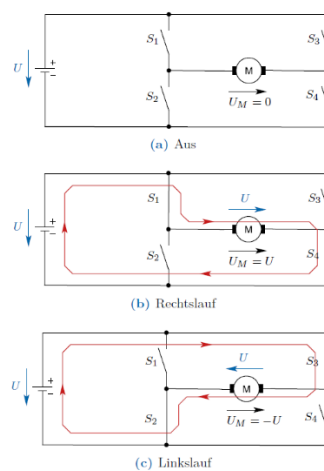


Abbildung 19: Prinzip der H-Brücke (Weisenhorn, 2016, S. 2)

3. Linkslauf

Wenn Schalter S3 und S2 geschlossen sind, fließt der Strom über S3 zum Motor und dann über S2 zurück zur Spannungsquelle (Verlauf des Stroms: $U \rightarrow S2 \rightarrow M \rightarrow S3 \rightarrow U$)

(Vgl. Abb. 19c). Der Motor dreht sich nach links. Die Richtung der U ist jedoch entgegengesetzt zur U_m also $U_m = -U$

Mit dieser Schaltung kann ein DC-Motor aus- und eingeschaltet werden und die Richtung gezielt gewählt werden.

5.2 Drehzahlsteuerung durch PWM

Um die Drehzahl des Motors zu steuern, wird Vierquadrantensteller eingesetzt.

Ein Vierquadrantensteller besteht gemäß Abb.20 aus einer elektronischen H-Brückenschaltung, die aus vier Transistoren besteht. Mit dem wird die Gleichspannung in die Wechselspannung mit variabler Frequenz und variabler Pulsbreite umgewandelt.

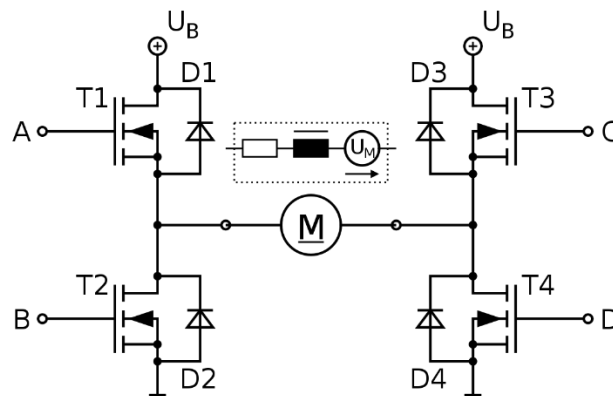


Abbildung 20: Vierquadrantensteller des Gleichstrommotors (wikipedia,2017)

Durch die Ansteuerung von T1/T4 oder T3/T2 wird der Motor angesteuert. Treiber wird an A, B, C, D angeschlossen, um die Transistoren zu treiben und die Schaltung zu schützen. Man muss auf jeden Fall vermeiden, dass T1 und T2 oder T3 und T4 gleichzeitig aktiv sind. Dies erzeugt einen Kurzschluss und führt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zur Zerstörung der Transistoren.

Einschaltung der Transistoren erfolgt nach der Methode der Pulsweitenmodulation (PWM).

Dazu werden zunächst die beiden Schalter T1 und T4 für eine bestimmte Zeit eingeschaltet, danach werden sie ausgeschaltet; Dann werden die Schalter T2 und T3 eingeschaltet und nach bestimmter Zeit ausgeschaltet. Dieser Ablauf wiederholt sich immer wieder. Eine solche Zeit wird als Periodendauer T bezeichnet.

Die Abb.21 zeigt den resultierenden Spannungsverlauf $U_M(t)$ und die mittlere Spannung u_M für zwei verschiedene Tastverhältnisse

Unterschiedliche Tastverhältnisse erzeugen unterschiedliche Spannungsverlauf $u_M(t)$ und auch die mittlere Spannung \bar{u}_M . Das Tastverhältnis p bestimmt die mittlere Motorspannung.

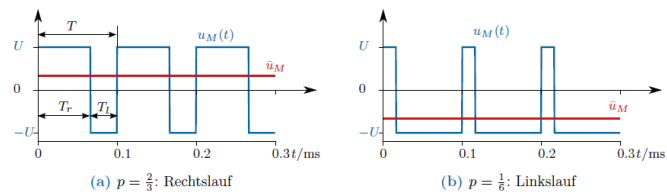


Abbildung 21: Pulsweitenmodulation zur Steuerung der mittleren Motorspannung \bar{u}_M und der Drehrichtung (Weisenhorn, 2016, S. 3)

Das Tastverhältnis p wird durch Formel 20 berechnet.

$$p = \frac{T_r}{T_l + T_r}$$

Formel 20: Berechnung des Tastverhältnisses

Berechnung der mittleren Spannung \bar{u}_M :

$$\begin{aligned} \bar{u}_M &= \frac{T_r U - T_l U}{T} \\ &= U(2p - 1) \end{aligned}$$

Formel 21: Berechnung der mittleren Spannung mit Tastverhältnis

Die PWM-Frequenz ist gleich dem Kehrwert der Periodendauer T des pulswertenmodulierten Rechtecksignals.

$$f := \frac{1}{T}$$

Formel 22: Berechnung der PWM-Frequenz

Zum Beispiel hat ein pulswertenmoduliertes Rechtecksignal mit einer Periodendauer von $10\mu s$ eine Frequenz von 100kHz.

6 Regler und Regelkreis

6.1 Einleitung

Bei der Steuerung ohne Rückkopplung werden die Ausgangsgrößen nicht kontrolliert und durch externe Störgrößen verändert. Ein Beispiel dazu ist das Regeln eines Motors, der mit einer einstellbaren Spannung hat. Wird externe Last ändern, lässt sich die Drehzahl des Motors beeinflussen. Wenn die Drehzahl konstant gehalten werden soll, ist eine Rückkopplung erforderlich, um die Drehzahl durch die Spannung anzupassen. Diese Rückkopplung bedeutet das Kennzeichen einer Regelung. In einem Vorgang vom Regeln, werden die Ausgangsgröße (Drehzahl) ständig überwacht und die Abweichung über die Stellgröße (Spannung) korrigiert wird. Solcher Wirkungsablauf in einem geschlossenen Kreis wird als der Regelkreis bezeichnet.

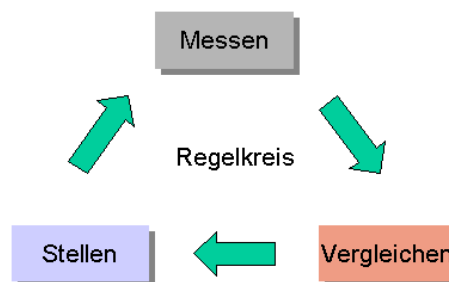


Abbildung 22: Prinzip der Regelung (RoboterNETZ, 2008)

Ein Regelkreis besteht aus Messen, Stellen und Vergleichen. (vgl. Abb. 22)

Die Regelgröße wird zuerst unmittelbar oder mittels Sensoren gemessen. Danach wird der Wert der Regelgröße mit dem Sollwert verglichen, wobei die Regelabweichung berechnet wird. Die Stellgröße wird aus der Regelabweichung nach den dynamischen Eigenschaften der Regler bestimmt.

6.2 Regelkreis

Die Abb.23 zeigt das Blockschaltbild eines Standardregelkreises.

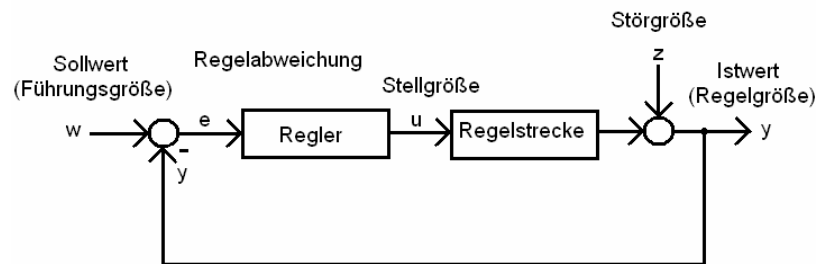


Abbildung 23: Blockschaltbild eines Standardregelkreises (Boulet Bate, 2009)

Ein Standardregelkreis besteht aus Regler, Führungsgröße (Sollwert) w , Regelgröße (Istwert) y , Regelabweichung e , Stellgröße u und Störgröße z . (vgl. Abb.23)

Die Regelstrecke ist der Teil des Regelkreises, der durch den Regler geregelt werden soll. Bekannte Regelgrößen sind z. B. Raumtemperatur, Drehzahl des Motors usw.

Regler machen die Vergleichen zwischen der Regelgröße und dem Sollwert. Ist die Abweichung aufgetreten, wird die Regelgröße so verändert, dass der Sollwert und der Istwert der Regelgröße wieder übereinstimmen oder die Differenz minimal wird.

Führungsgröße (Sollwert) w ist ein durch Bediener oder System vorgegebener Wert, auf dem die Regelgröße durch die Regelung gebracht werden soll.

Regelgröße (Istwert) y ist die Ausgangsgröße der Regelstrecke, die normalerweise von Sensor erfasst und mit Führungsgröße verglichen wird.

Regelabweichung zeigt die Differenz zwischen Führungsgröße und Regelgröße, ist die Eingangsgröße für Regler.

Die Stellgröße u ist die Ausgangsgröße des Reglers, dadurch wird die Regelstrecke gezielt eingegriffen.

Störgröße z ist ein von außen auf Regelkreis wirkender Faktor, der zur vorübergehenden Abweichung vom Sollwert führt.

6.3 Regler

Die Aufgaben der Regler werden im letzten Kapitel erklärt. Verschiedene Regler haben unterschiedlichen Eigenschaften. Die Wahl der bestimmten Reglerart hängt von dem erforderlichen Zeitverhalten und der Regelgenauigkeit ab, die das geregelte System erfordert. In diesem Kapitel werden einige der wichtigsten klassischen Reglerart zusammengefasst.

- P-Regler

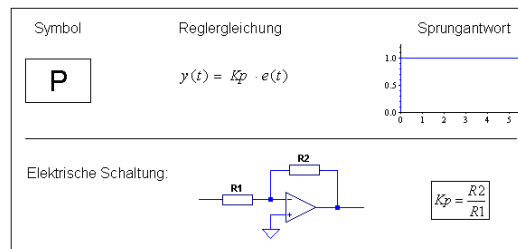


Abbildung 24: P-Regler (RoboterNETZ, 2008)

Der P-Regler ist ein stätiger Regler mit bleibender Regeldifferenz. Sein Eingangssignal eines P-Reglers verhält sich proportional zum Ausgangssignal. Der Vorteil vom P-Regler ist schnelle Reaktion auf Änderungen des Sollwerts (siehe Abb. 24)

- I-Regler

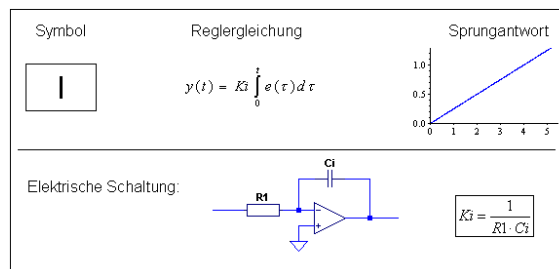


Abbildung 25: I-Regler (RoboterNETZ, 2008)

Der Integralregler bildet die Summe der Regelabweichungen über die Zeit und multipliziert die Summe (d. h. das Integral) mit einem Faktor K_I . Je länger eine Regelabweichung ansteht, desto größer wird die Stellgröße des I-Reglers. Der I-geregelte Kreis reagiert langsamer als andere Regler. Sein Vorteil ist Ausschluss einer dauerhaften Regelabweichung. (siehe Abb. 25)

- PI-Regler

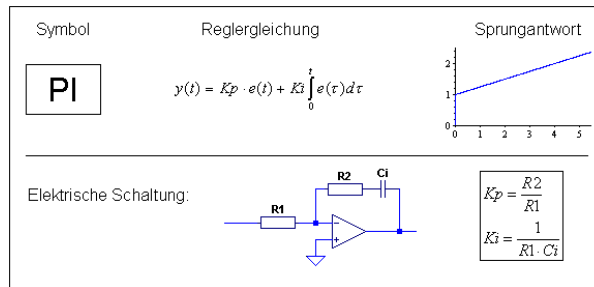


Abbildung 26: PI-Regler (RoboterNETZ, 2008)

Der PI-Regler kombiniert aus P- und I-Regler. Er vereint die Vorteile der beiden Regler. Das bedeutet, dass der PI-Regler schneller Reaktion hat, und gleichzeitig Soll- und Istwert der Regelgröße aufgrund I-Regler nach einiger Zeit übereinstimmen. (siehe Abb. 26)

- PID-Regler

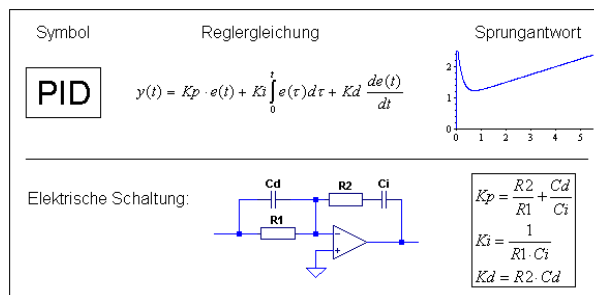


Abbildung 27: PID-Regler (RoboterNETZ, 2008)

Der PID-Regler ist der universellste der klassischen Regler. Er vereint die guten Eigenschaften von P-Glied, I-Glied und D-Glied. Der PID-Regelkreis ist genau und sehr schnell. Deshalb wird der PID-Regler häufig in Anwendungen eingesetzt. (siehe Abb. 27)

7 PID-Regler

7.1 Anteil

Ein PID-Regler besteht aus P-Glied, I-Glied und D-Glied. Das bedeutet, dass die Stellgröße $u(t)$ aus Proportional-, Integral- und Differenzial-Anteilen der Regelabweichung $e(t)$ gebildet wird. (vgl. Abb. 28)

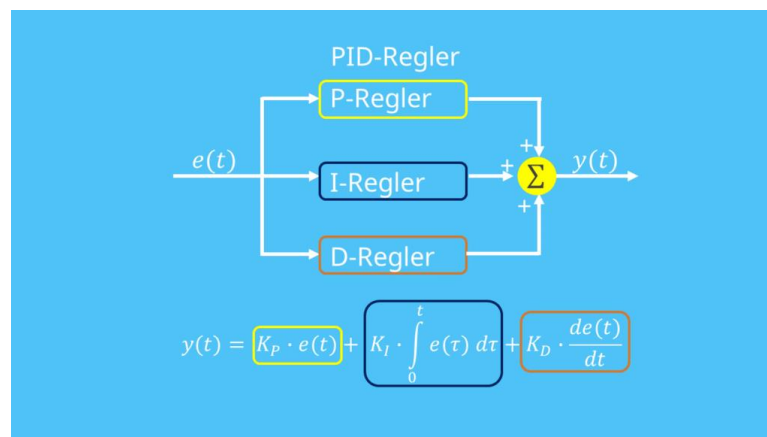


Abbildung 28: PID-Regler (studyflix, 2021)

P-Anteil

Der P-Regler ist eigentlich ein Verstärker mit einstellbarer Verstärkung K_P . Dabei ist $y(t)$ proportional zum Wert von $e(t)$.

$$y(t) = K_P \cdot e(t)$$

Formel 23: P-Anteil

Je größer K_P ist, desto schneller reagiert der Regler auf Änderungen des Sollwerts.

Ein wesentlicher Nachteil eines Reglers, der nur aus dem P-Anteil besteht, ist, dass die Regelabweichung $e(t)$ nicht beseitigt werden kann und somit Soll- und Istwert nicht übereinstimmen.

I-Anteil

Im Gegensatz zum P-Regler sammelt und summiert der I-Regler alle aktuellen und vergangenen Regelabweichungen. Der I-Anteil integriert dabei die Regelabweichung.

$$y(t) = K_I \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Formel 24: I-Anteil

Das heißt, dass der Anteil der Stellgröße, für den der I-Regler verantwortlich ist, solange steigt, bis die Regelabweichung zu 0 geworden ist. Die Stellgröße bleibt konstant, solange die Führungsgröße keine Veränderung hat.

Ein wichtiges Merkmal des I-Reglers ist daher, dass die Regelabweichung zu 0 gemacht werden kann, so dass der Sollwert und Istwert des Regelkreises übereinstimmen.

D-Anteil

Der D-Regler befasst sich nicht mit den tatsächlichen Werten der Regelabweichungen, sondern mit deren Veränderung im Laufe der Zeit. Der kann die aktuelle Tendenz der Regelabweichungen bestimmen und ihre zukünftigen Werte abschätzen. Das Ziel des D-Reglers ist es also nicht, die Regelabweichung auf 0 zu setzen, sondern dafür zu sorgen, dass sie sich nicht verändern.

$$y(t) = K_D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Formel 25: D-Anteil

Der Differentiationsfaktor K_D bestimmt wie viel Einfluss der D-Anteil auf die Stellgröße besitzt. Grundsätzlich wird der D-Anteil klein wegen des unvermeidbaren Rauschens gehalten, das zu kontinuierlichen Änderungen der Regelabweichungen führt.

7.2 Übertragungsfunktion

Werden nun drei Teile kombiniert, bekommt man die mathematische Gleichung der PID-Regler in Formel 26 im Zeitbereich.

$$y(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Formel 26: PID-Regler 1

Auch normalerweise wird in Form 27 angegeben:

$$y(t) = K_P \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_N} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + T_V \cdot \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Formel 27: PID-Regler 2

Dabei $K_I = \frac{K_P}{T_N}$ und $K_D = K_P \cdot T_V$

T_N wird als Nachstellzeit des Reglers bezeichnet. Die Nachstellzeit bezeichnet die Zeit, die verstreichen muss, damit der I-Anteil gleich dem P-Anteil ist. Gleichzeitig ist sie ein Maß dafür, wie stark der Einfluss des I-Anteils ist. Der I-Anteil ist umgekehrt proportional zur Nachstellzeit. Eine große Nachstellzeit bedeutet einen geringen Einfluss des I-Anteils und umgekehrt.

Die Vorhaltzeit T_V ist die Zeit, durch die die Intensität des D-Anteils bestimmt wird. Sie zeigt wie weit in die Zukunft der der aktuelle Trend (Steigung) der Regelgröße angenommen werden soll. Der D-Anteil "bremst" bei Annäherung an den Sollwert, so dass ein Überschwingen des Istwerts über Sollwert durch verhindert werden kann.

Die Reglergleichung wird durch Laplacetransformation transformiert, damit die Gleichung im Bildbereich aufgestellt werden kann. (Formel 28)

$$G(p) = \frac{Y(p)}{E(p)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{pT_N} + pT_V \right)$$

Formel 28: Übertragungsfunktion von PID-Regler

7.3 Dimensionierung nach Einstellregel

Die Dimensionierung nach Rezept ist eine praktische Methode, die keine umfangreichen Berechnungen und Hilfsmitteln erfordert. Die bekanntesten Einstellregeln sind von Ziegler/Nichols und von Chien/Hrones/Reswick. Aber bevor man die Einstellregeln benutzt, sind Streckenparameter zu bestimmen.

7.3.1 Streckenparameterbestimmung nach der Sprungantwort

Die Bestimmung der Streckenparameter basiert auf der Aufnahme der Sprungantwort der Regelstrecke. Der Regelkreis muss allerdings geöffnet werden, was bedeutet, dass zur Bestimmung der Streckenkennwerte Experimente am unregulierten Prozess durchführbar sein müssen, ohne dass dieser dadurch beschädigt wird.

Die Parameter der Regelstrecke kann man mit diesem Verfahren ermitteln. Die Eingangsgröße bei diesem Verfahren ist ein Sprungsignal, das in Stellgröße Y eingespeist wird. Der zeitliche Verlauf der Stellgröße und der zeitliche Verlauf der Regelgröße werden dann gleichzeitig erfasst. Der Verlauf der Regelgröße weist im ansteigenden Kurvenverlauf einen Wendepunkt auf (maximale Steigung), wo eine Tangente angelegt wird. Auf diese Weise werden die Verzugszeit T_u und die Ausgleichzeit T_g direkt abgelesen. (vgl. Abb. 29) Die stationäre Verstärkung berechnet man durch die Änderungen von Ausgangsgröße zu Eingangsgröße.

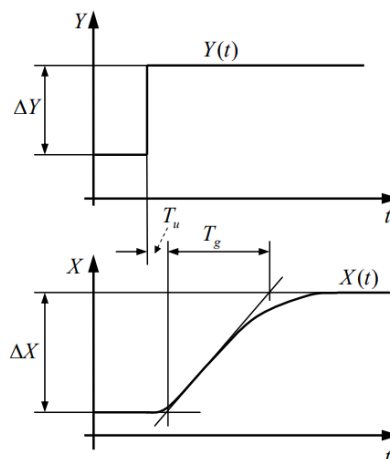


Abbildung 29: Einstellregel nach der Sprungantwort (Kröber, O.J)

7.3.2 Parametereinstellung nach Einstellregeln

Nachdem man nun die Streckenparameter bestimmt hat, kann man mit diesen festgestellten Werten die Reglerparameter gemäß gewünschter Einstellregel berechnen.

- **Einstellregeln nach Ziegler / Nichols:**

Regler	K_R	T_N	T_V
P	$(1 / K_S) * (T_1 / T_t)$		
PI	$(0,9 / K_S) * (T_1 / T_t)$	$3,3 * T_t$	
PID	$(0,9 / K_S) * (T_1 / T_t)$	$2 * T_t$	$0,5 * T_t$

mit $K_I = K_R / T_N$ und $K_D = K_R * T_V$

Tabelle 1: Einstellregel nach Ziegler/Nichols

- **Einstellregeln nach Chien / Hrones und Reswick:**

Regler		Aperiodischer Regelverlauf		Regelverlauf mit 20% Überschwingen		
		Störung	Führung	Störung	Führung	
P	K_p	$\frac{0,3 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,3 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,7 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,7 T_g}{K_S T_u}$	
PI	K_p	$\frac{0,6 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,35 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,7 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,6 T_g}{K_S T_u}$	
		T_n	$4T_u$	$1,2T_g$	$2,3T_u$	$1T_g$
PID	K_p	$\frac{0,95 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,6 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{1,2 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,95 T_g}{K_S T_u}$	
		T_n	$2,4T_u$	$1T_g$	$2T_u$	$1,35T_g$
		T_v	$0,42T_u$	$0,5T_u$	$0,42T_u$	$0,47T_u$

Tabelle 2: Einstellregeln nach Chien / Hrones und Reswick

In diesem Projekt wird die Parameter des PID-Reglers nach Einstellregel von Chien/Hrones/Reswick eingestellt.

8 Kaskadenregelung des Gleichstrommotors

Die Kaskadenregelung ist eine Kaskadierung mehrerer Regler, i.e. zugehörigen Regelkreise sind ineinandergeschachtelt. Die Stellgröße eines Reglers dient dabei als Führungsgröße für einen anderen. Die Gesamtregelstrecke wird dadurch in kleinere, besser regelbare Teilstrecken untergliedert, damit erhöht sich die Regelgenauigkeit in Gegensatz zu einem direkt wirkenden Regler.

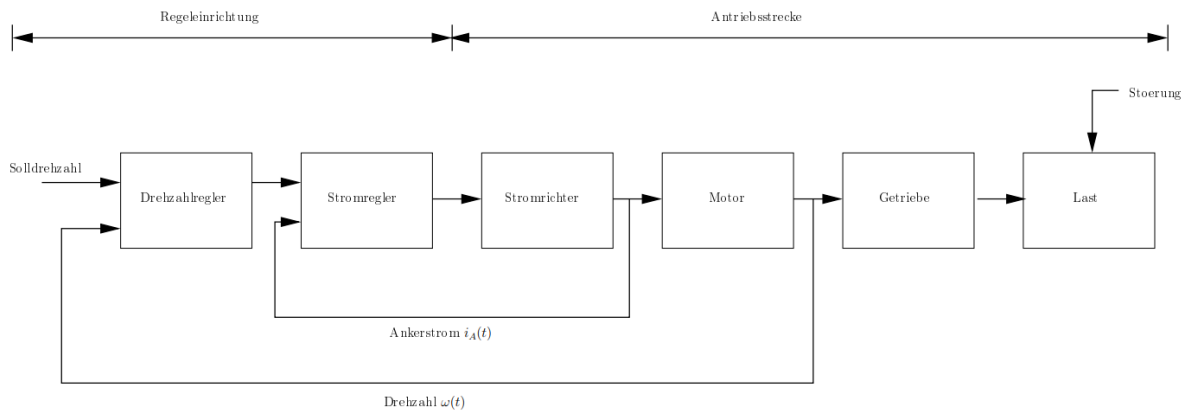


Abbildung 30: prinzipieller Aufbau der Kaskadenregelung (Raisch, O.J, S. 1)

Die Abb. 30 zeigt prinzipiellen Aufbau eines drehzahlgeregelten Gleichstrommotors, wie er in der Praxis häufig verwendet wird. Die Struktur wird als Kaskadenregelung bezeichnet. Es gibt den inneren und äußeren Regelkreis.

Der innere Regelkreis regelt den Ankerstrom, der zweite die Drehzahl. (siehe Abb. 31) Die Regler sind als PI-Regler gewählt.

→ Stromregelkreis

→ Drehzahlregelkreis

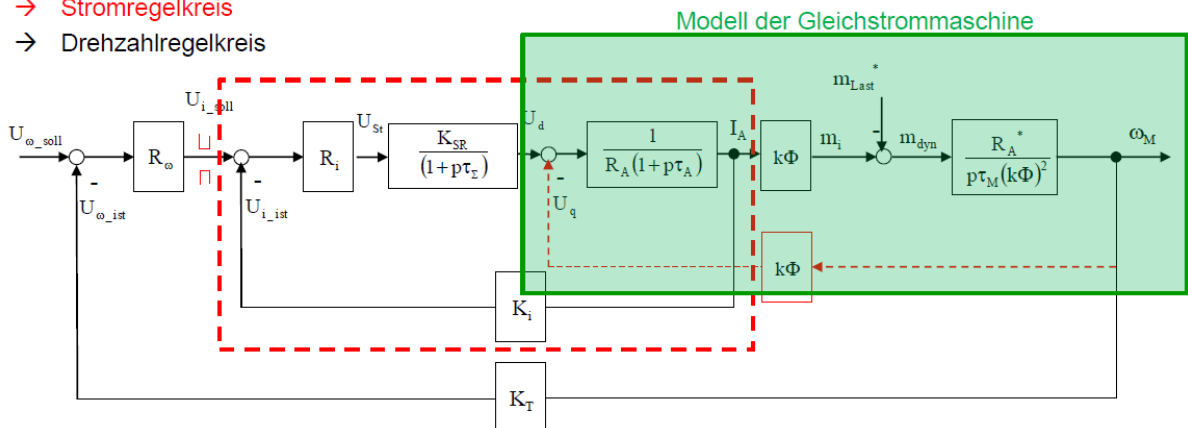


Abbildung 31: Aufbau des Kaskadenstruktur eines Gleichstrommotors (Rauchfuß, 2011, S. 7)

8.1 Einstellung nach dem Betragsoptimum

In technischen Systemen wird die Führungsgrößenregelung dann als optimal bezeichnet, wenn der Betrag des Frequenzganges für einen möglichst großen Frequenzbereich 1 ist.

Daraus ergibt sich eine möglichst hohe Grenzfrequenz, bei geringer Resonanzüberhöhung (im Frequenzbereich) und damit eine reduzierte Anregelzeit bei geringer Überschwingweite (im Zeitbereich).

Der Stromkreisregler wird nach Betragsoptimum eingestellt.

Für PI-Regler im Bildbereich nach Laplace-Transformation (vgl. Abb.26):

$$K_p + \frac{K_I}{p} = \frac{K_p \cdot p + K_I}{p} = \frac{K_p \cdot p + 1}{\frac{1}{K_I} \cdot p} \quad (29.1)$$

$$\text{Mit } \frac{K_p}{K_I} = \tau_1, \quad \frac{1}{K_I} = \tau_0 \quad (29.2)$$

Dann erhält man die Übertragungsfunktion der PI-Regler in Kaskadenregelung:

$$\frac{\tau_1 \cdot p + 1}{\tau_0 \cdot p}$$

Formel 29: Übertragungsfunktion des PI-Reglers in Kaskadenregelung

Nach Abb. 31 kann man den folgenden Regelkreis für die Stromregelung ableiten:

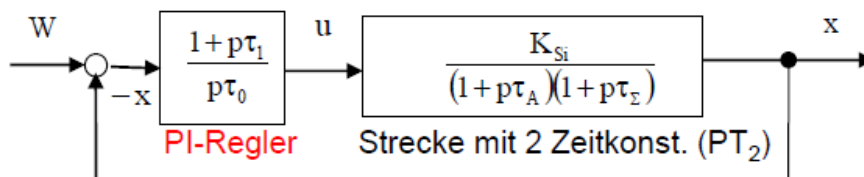


Abbildung 32: innerer Regelkreis (Rauchfuß, 2011, S. 13)

Mit Reglereinstellregel für PI-Regler:

$$K_{Si} = \frac{K_{SR} \cdot K_i}{R_A}$$

Formel 30: Verstärkung der Strecke des Stromregelkreises

K_{Si} - Verstärkungsfaktor der Strecke des Stromregelkreises

K_i - Verstärkungsfaktor der Strommessung

K_{SR} - Verstärkungsfaktor des Stromrichters

τ_A ist die Ankerzeitkonstante. Und die kleinere Zeitkonstante τ_Σ bezieht sich auf die Verzögerung durch das Stellglied und die Meßglättung.

Die Aufgabe des PI-Reglers in innerem Regelkreis ist, die größte Zeitkonstante τ_A der Regelstrecke zu kompensieren. Dabei wird die Vorhaltzeitkonstante τ_1 des PI-Reglers gleich dieser Zeitkonstante gesetzt, also $\tau_A = \tau_1$.

Für den Betrag des Frequenzganges für einen möglichst großen Frequenzbereich nahe 1:

$$\tau_0 = 2 \cdot \tau_\Sigma \cdot K_{Si}$$

Formel 31: Integrationszeitkonstante T_0 vom PI-Regler im Stromregelkreis

8.2 Einstellung nach dem symmetrischen Optimum

Das symmetrische Optimum weist im Gegensatz zum Betragsoptimum ein besseres Störübertragungsverhalten auf. Führungsgrößen-Regler parametriert nach dem Symmetrischen Optimum weisen geringe Anregelzeit, aber großes Überschwingen auf. Das Überschwingen kann durch einen Sollwertvorfilter reduziert werden. Bei der Gleichstrommaschine wird der Drehzahlregler nach dem symmetrischen Optimum eingestellt, um dem Sollwert bestmöglich folgen zu können und um Störungen besser als mit dem Betragsoptimum ausregeln zu können. Der Drehzahlregelkreis wird auch als der äußere Regelkreis genannt.

Der Drehzahlregelkreis lässt sich aus Abb.31 ableiten.

Die Abb.33 zeigt den äußeren Regelkreis also Drehzahlregelkreis von Kaskadenregelung:

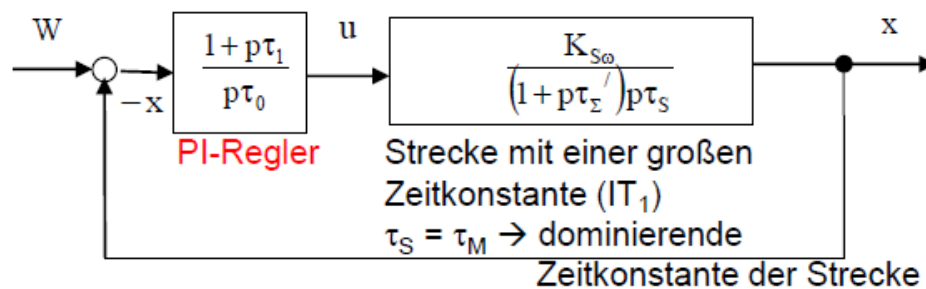


Abbildung 33: äußerer Regelkreis (Rauchfuß, 2011, S. 28)

Mit Reglereinstellregel für PI-Regler:

$$K_{s\omega} = \frac{R_A \cdot K_T}{K_I \cdot k\Phi} \quad (32.1)$$

$$\tau_1 = 4 \cdot \tau_\Sigma' \quad (32.2)$$

$$\tau_0 = 8 \cdot \frac{(\tau_\Sigma')^2}{\tau_s} \cdot K_{s\omega} \quad (32.3)$$

Formel 32: Reglereinstellregel für PI-Regler vom äußeren Regelkreis

$K_{s\omega}$ - Verstärkungsfaktor der Strecke des Drehzahlregelkreises

K_T - Verstärkungsfaktor des Tachometers bzw. des Drehzahlsensors

τ_Σ' - Summe der kleinen Zeitkonstanten in Drehzahlstrecke

τ_s - größte Zeitkonstante in Strecke

9 Aufgabe-Komponenten für das drehzahlgeregelte Mähwerk

9.1 Auswahl des geeigneten Zwischenkreiskondensators

Zwischenkreiskondensator (Pufferkondensator) spielt in einer Schaltung die ähnliche Rolle wie ein Tiefpassfilter und können Spannungsspitzen bzw. Spannungsrippels reduzieren. Sie werden in der Regel in Schaltung mit IGBT eingesetzt, um durch Streuinduktivität in der Stromschiene verursachte Spitzen zu eliminieren und Schäden am IGBT zu vermeiden. Die Auswahl des IGBT-Moduls wird als angenommen betrachtet und kann je nach Bedarf geändert werden. Das für die Berechnung verwendete IGBT-Modul ist SEMiX223GB12E4P aus Semikorn.

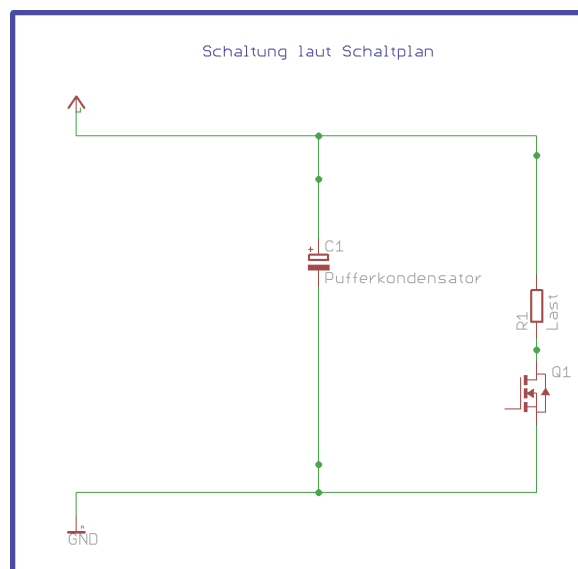


Abbildung 34: Schaltplan (mikrocontroller, O.J)

Die Berechnung des erforderlichen Zwischenkreiskondensators ist nach Formel 33:

$$C = \frac{(L_p + L_s) \cdot I_c^2}{\Delta U_2^2}$$

Formel 33: Berechnung des Zwischenkreiskondensators

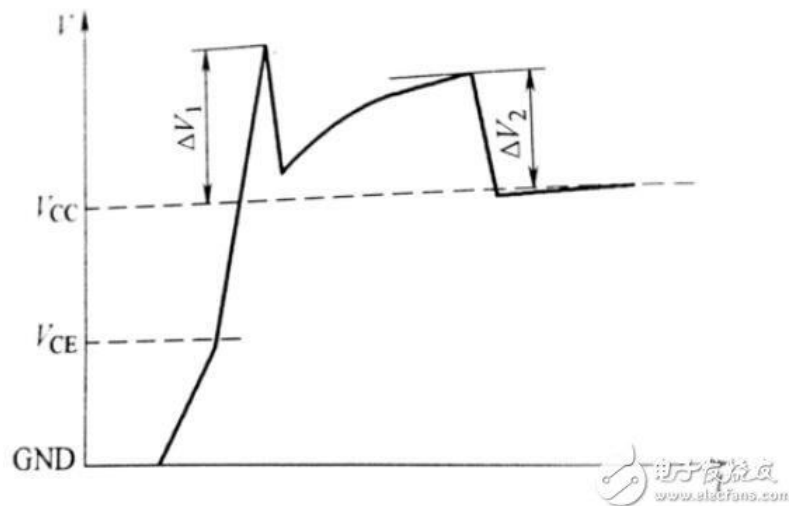


Abbildung 35: Spitzenwert der Absorptionsspannung (elecfans, 2017)

ΔU_2 : Spitzenwert der Absorptionsspannung

L_p : Stromschienen-Streuinduktivität

I_c : Nennstrom

L_s : Streuinduktivität vom IGBT

Wie in Abbildung 35 zu sehen ist, steigt die Spannung nach der anfänglichen Spannungsspitze ΔU_1 wieder an, wenn der Absorptionskondensator geladen wird. Die zweite ansteigende Spitze ΔU_2 ist abhängig von Streuinduktivität L_s und Slope des Ausschaltstroms di/dt_{off} im IGBT. Diese beide Werte werden im Datensheet von Hersteller Semikorn angegeben. (siehe Abb. 36)

Die Berechnung der Spitzenwert der Absorptionsspannung ΔU_2 berechnet nach Formel 34:

$$\Delta U_2 = L_s \cdot \frac{di}{dt_{off}}$$

Formel 34: Spitzenwert der Absorptionsspannung

$t_{d(on)}$	$V_{CC} = 600\text{ V}$	$T_j = 150\text{ °C}$	135	ns
t_r	$I_C = 225\text{ A}$	$T_j = 150\text{ °C}$	38	ns
E_{on}	$V_{GE} = +15/-15\text{ V}$	$T_j = 150\text{ °C}$	14.1	mJ
$t_{d(off)}$	$R_{G\ on} = 1\ \Omega$	$T_j = 150\text{ °C}$	400	ns
t_f	$R_{G\ off} = 1\ \Omega$	$T_j = 150\text{ °C}$	92	ns
E_{off}	$di/dt_{on} = 6700\text{ A}/\mu\text{s}$ $di/dt_{off} = 2100\text{ A}/\mu\text{s}$ $du/dt = 4000\text{ V}/\mu\text{s}$ $L_s = 21\text{ nH}$	$T_j = 150\text{ °C}$	26.4	mJ
$R_{th(j-c)}$	per IGBT		0.14	K/W
$R_{th(c-s)}$	per IGBT ($\lambda_{grease} = 0.81\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)		0.03	K/W
$R_{th(c-s)}$	per IGBT, pre-applied phase change material		0.021	K/W

Abbildung 36: Datensheet SEMiX223GB12E4P (Semikorn, 2017)

Nach Formel 34 wird der Spitzenwert der Absorptionsspannung mit den Parametern aus dem Datensheet berechnet.

$$\Delta U_2 = L_s \cdot \frac{di}{dt_{off}} = 21\text{ nH} * \frac{2100\text{ A}}{\mu\text{s}} = \mathbf{44,1\text{ V}}$$

Dann mit Formel 33 wird der erforderliche Zwischenkreiskondensator berechnet:

$$C = \frac{(L_p + L_s) \cdot I_C^2}{\Delta U_2^2} = \frac{21\text{ nH} * (225\text{ A})^2}{(44,1\text{ V})^2} = \mathbf{0,55\ \mu\text{F}}$$

Die Streuinduktivität der Stromschiene ist so klein, dass sie bei den Berechnungen vernachlässigt wird.

9.2 Berechnung der Übersetzung des Keilriemenantriebes und des erforderlichen Drehmoments vom Mähmotor

P_n	5000 W	P_{el_eta}	6000 W
P_{max}		P_{el}	6000 W
U	48 V	P_{el_max}	16800 W
I_{n_rech}	125 A		
I_{max}	350 A		
n_{max}	5000 min	w_{max}	523,598776
nN	3000 min	wN	314,159265
M_{n_rech}	15,9154943 Nm		16Nm
M_{max}	48 Nm	P_{max}	15079,6447
$eta_schätz$	0,83333333	M_{max}	40,25
k_{phi}	0,125 Vs		
M_i	14,375 Nm		
M_{Reib}			
R_A	0,0135 Ohm	tau_A	2,78 ms
L_A	0,00037 H	tau_M	12,05 ms
J	0,05 kgm ²		

Abbildung 37: Datensheet von SHG_5kW

Um mit dem Mähwerk 1100 min^{-1} unter Vollast (75 Nm) erreichen zu können, ist erforderliche Übersetzung des Keilriemenantriebes notwendig zu berechnen.

Gegeben sind nach Abb. 37: Die Leistung des Mähmotors: $5 \text{ kW} - 15 \text{ kW}$

Nenn Drehzahl $N_1 = N_{\text{nenn}} = 3000 \text{ min}^{-1}$

Laut den Anforderungen von Aufgabe ist die übersetzte Drehzahl $N_2 = 1100 \text{ min}^{-1}$, während das übersetzte Drehmoment auf Mähwerk 75 Nm ($M_2 = 75 \text{ Nm}$) zu erwarten ist.

Gesucht sind das Übersetzungsverhältnis von Keilriemen und das erforderliche Drehmoment vom Mähmotor M_1 und die erforderliche Motorleistung.

Die Berechnung vom erforderlichen Übersetzungsverhältnis kann man nach Formel 35 berechnen:

$$i_g = \frac{N_1}{N_2} = \frac{M_2}{M_1}$$

Formel 35: Berechnung vom Übersetzungsverhältnis

$$i_g = \frac{3000 \text{ min}^{-1}}{1100 \text{ min}^{-1}} = 2,7$$

Das erforderliche Übersetzungsverhältnis ist 2,7

Nach Berechnung vom erforderlichen Übersetzungsverhältnis lässt sich die erforderliche Motorleistung berechnen.

$$P = M \cdot \omega$$

Formel 36: Berechnung der Motorleistung

Angenommen: Motorleistung ist $x \text{ Nm}$:

Nach Formel 35 und Formel 36:

$$\frac{x}{\omega_1} * i_g = M_2$$

$$\Rightarrow \frac{x}{3000 * \frac{2\pi}{60}} * 2,7 = 72 \text{ Nm}$$

$$x = 8,37 \text{ kW} = P_{\text{erford}}$$

Die erforderliche Motorleistung ist 8,37kW

Das erforderliche Drehmoment vom Mähmotor wird nach Formel 36 bekommen:

$$M_1 = \frac{8,37kW}{3000 * \frac{2\pi}{60}} = 26,42Nm$$

Das erforderliche Drehmoment vom Mähmotor ist 26,42Nm.

10 Aufgabe-Entwicklung der Drehzahlregelung für den Mähantrieb in der Simulation mit PORTUNUS

Die Portunus ist eine Software zur Systemsimulation, die sich durch eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Beschreibung des zu untersuchenden Systems, eine komfortable Nutzeroberfläche, die Kombination leistungsfähiger numerischer Algorithmen und leistungsfähige Schnittstellen zur Programmierung, Automatisierung sowie den Import und Export von Daten auszeichnet.

Mögliche Anwendungen von Portunus reichen von Simulationen in der Elektro- und Elektroenergie-technik, Leistungselektronik und Antriebstechnik über thermische Berechnungen, Untersuchungen von Magnetkreisen bis hin zu Regelungen.

Die in Portunus vorhandenen Modelle und verfügbaren Beschreibungsformen erlauben eine einfache Kombination unterschiedlicher physikalischer Domains. So können beispielsweise elektrothermische Simulationen durchgeführt werden, um die Erwärmung von Leistungstransistoren oder elektrischer Maschinen im stationären Zustand oder bei Vorgabe eines Lastprofils zu bestimmen. Durch die Verbindung elektrischer, magnetischer und mechanischer Komponenten ist es möglich, Wechselwirkungen, wie sie beispielsweise in Aktuatoren auftreten, zu untersuchen. Die in den Systemen verwendeten Steuer- bzw. Regelalgorithmen lassen sich ebenfalls problemlos in die Simulationsmodelle integrieren.

10.1 Gleichstrommotor als Regelstrecke

Nach Datensheet (siehe Abb. 37) kann man die Übertragungsfunktion der Drehzahlregelung für DC-Motor SHG_5kW als Regelstrecke erstellen.

Nach Formel 13 und Formel 14 werden die elektrische Zeitkonstante und elektromechanische Zeitkonstante berechnet:

Die elektrische konstante τ_a :

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} = \frac{0,00037H}{0,0135\Omega} \approx \mathbf{27,4ms}$$

Die elektromechanische Zeitkonstante τ_m :

$$\tau_m = \frac{J \cdot R_a}{(K\varphi)^2} = \frac{0,05kgm^2 * 0,0135\Omega}{(0,125Vs)^2} = \mathbf{43,2ms}$$

Die Übertragungsfunktion der Drehzahlregelung von DC-Motor SHG_5kW nach Formel 19 mit Einsatz von beiden Zeitkonstanten:

$$G_S(p) = \frac{1}{k\varphi(\tau_a \cdot \tau_m \cdot p^2 + \tau_m \cdot p + 1)} = \frac{1}{0.125(0.00183p^2 + 0.0432p + 1)}$$

$$G_S(p) = \frac{8}{0.00183p^2 + 0.0432p + 1}$$

Mit Übertragungsfunktion wird das Bode-Diagramm der Regelstrecke in Matlab dargestellt. (siehe Abb. 38)

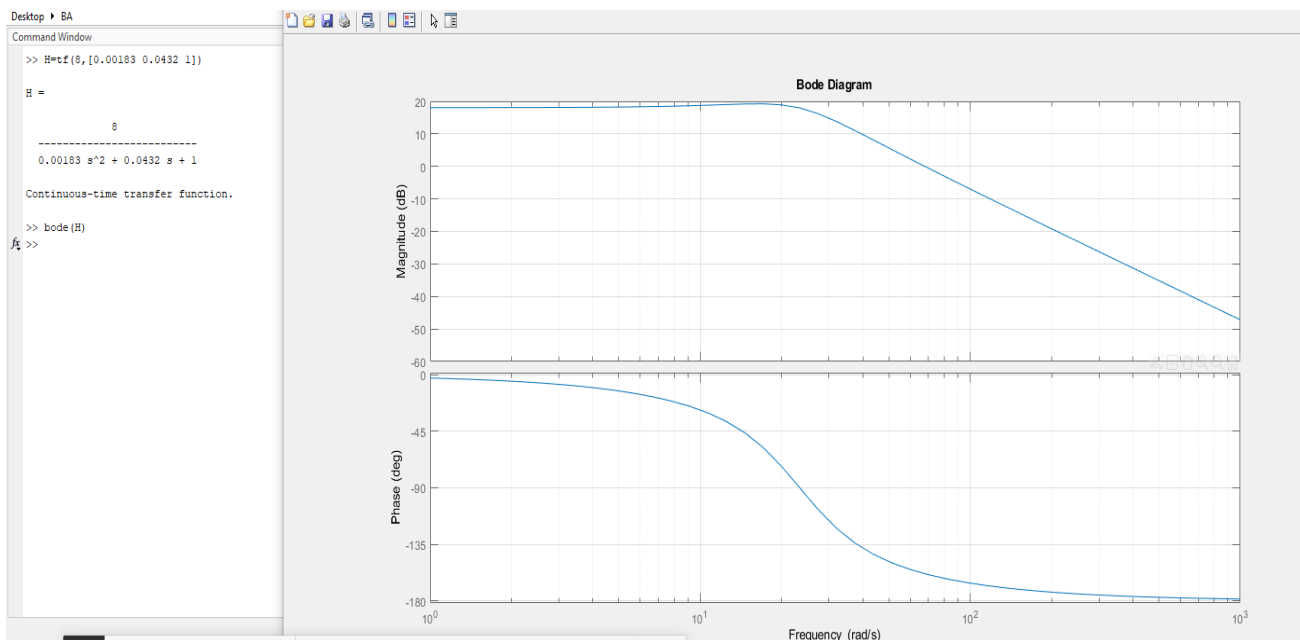


Abbildung 38: Bode-Diagramm der Regelstrecke-SHG_5kW

10.2 Die Schaltung für H-Brücke

Um die Drehzahlregelung für Mähmotor in Portunus zu simulieren, ist der erste Schritt Anbau eine Schaltung für DC-Motor SHG_5kW mit H-Brücke über PWM.

Abb. 39 zeigt die Schaltung mit H-Brücke in Portunus.

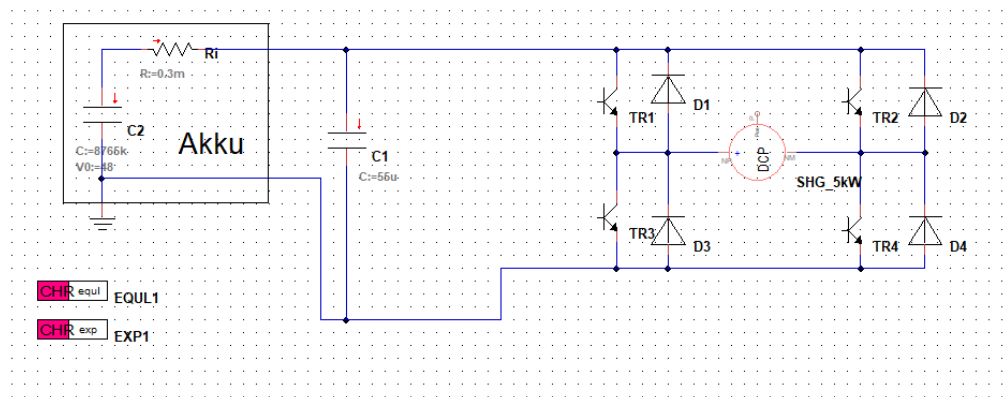


Abbildung 39:H-Brücke ohne Drehzahlregelung

Wie in Kapitel 5.2 erklärt, besteht die Vierquadrantensteller in Simulation aus 4 Transistoren und 4 Diode dazu.

Die Transistoren TR1-TR4 sind gleichartig und brauchen die Kennlinien zu arbeiten, die durch CHR EQU1 definiert werden. Die Dioden D1-D4 brauchen Kennlinie von CHR EXP1. (siehe Abb. 40)

Jeder Transistor (TR1-4) wird durch ein entsprechendes Signal (Z1-4) gesteuert, dadurch die PWM ihre Schaltvorgänge steuern kann.

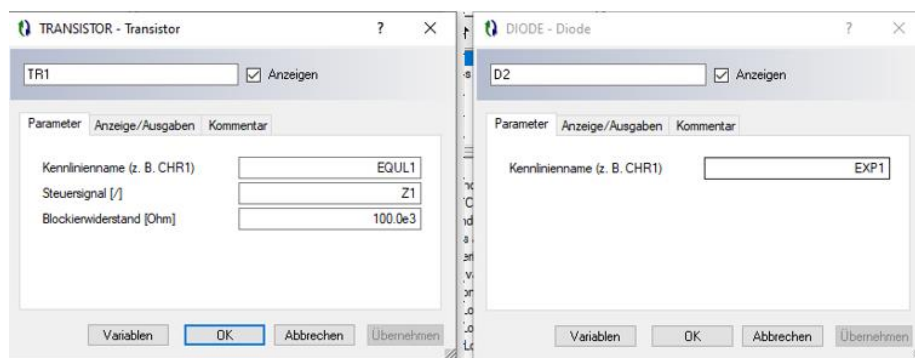


Abbildung 40: Kennlinien für Transistor und Diode

Die Parameter von CHR EQU1 und CHR EXP1 können von User definiert. Hier werden die Standartwerte von Protunus einfach eingesetzt. (siehe Abb. 41)

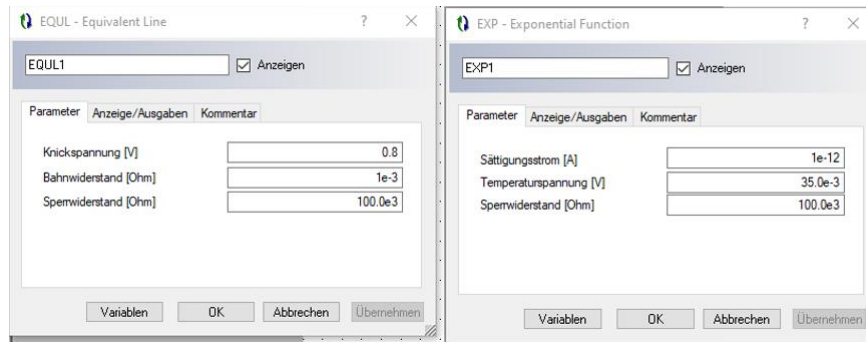


Abbildung 41: Parameter von Kennlinie

Die Spannungsquelle ist ein Akku mit 48V wegen der Schutzkleinspannung. R_i ist Innerwiderstand vom Akku.

C1 ist eine Zwischenkreiskondensator. Mit dem die Spannungsspitzen bzw. Spannungsrippels werden reduziert. Seine Kapazität wird schon im Kapitel 9.1 ausgerechnet also $55\mu\text{F}$ mit dem Anfangswert von 48V.

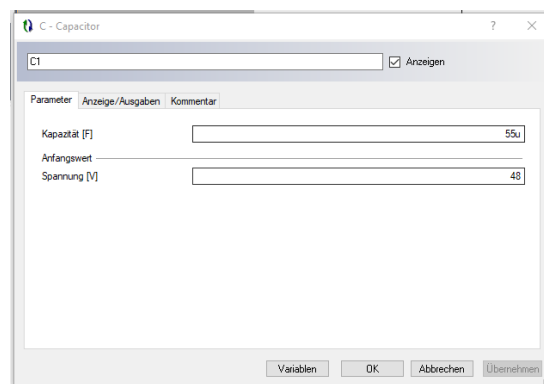


Abbildung 42: Parameter von Zwischenkondensator

Die bekannten Parameter werden in Modell vom DC-Motor SHG_5kW entsprechend eingetragen.

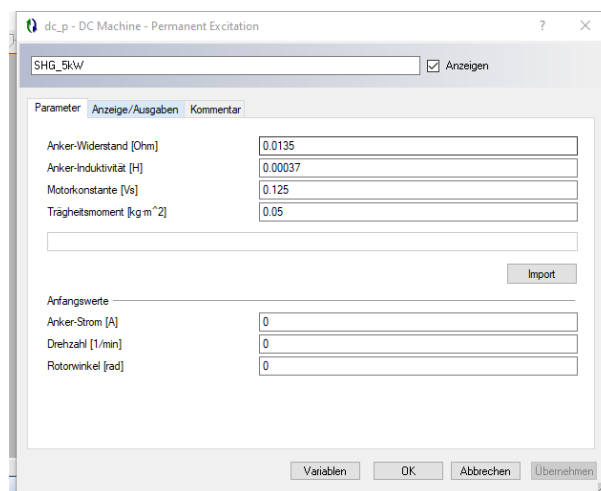


Abbildung 43: Modell SHG_5kW

10.3 Entwurf von PWM

Die Ansteuerungen der Transistoren werden über die PWM realisiert, die Einschaltzeiten der Transistoren berechnet.

Die Frequenz der PWM wird als $f_{PWM} = 10kHz$ angenommen. Nach Formel 22 ist die Periodendauer $T_{PWM} 100\mu s$.

Die Grundlage der PWM wird schon im Kapitel 5.2 erklärt. Durch Ein- und Ausschalten von TR1/TR4 und TR2/TR3 wird ein pulswidenmodulierte Rechtecksignal erzeugt. Das Tastverhältnis p wird durch die Einschaltzeit von TR1/TR4 bestimmt.

Nach diesem Prinzip kann man die Formel 37 erstellen:

$$T_{PWM} = T_{einTR14} + T_{einTR23}$$

Formel 37: Periodendauer von PWM

Das Vorgehen der PWM in Portunus ist, wenn die Einschaltzeit von TR1/TR4 abläuft (Obere Grenze), werden sie ausgeschaltet und gleichzeitig werden TR2/TR3 eingeschaltet. Die Einschaltzeit von TR2/TR3 wird durch die Formel 33 berechnet. Beim Ablauf der Einschaltzeit von TR2/TR3 (Untere Grenze) kommt es wieder zum Einschalten von TR1/TR4. So entsteht ein Kreislauf.

Die Abb.44 zeigt Zustandskreis. Es ist jedoch wichtig, dass die Einschaltzeit jedes Paar nicht länger als die Periodendauer T_{PWM} eingeschaltet bleiben muss.

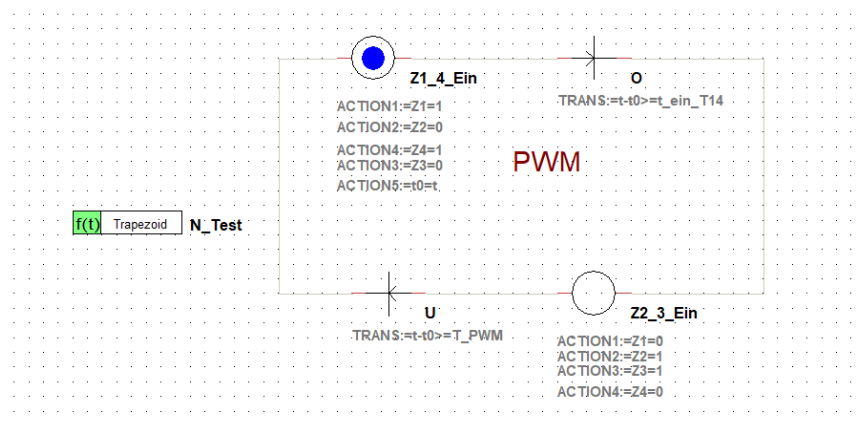


Abbildung 44: Zustandskreis von PWM

Danach werden Variable zum Zustandskreis initialisiert. (siehe Abb. 45)

```

Deklaration / Initialisierung (bei Simulationsstart)
1 double Z1=0;
2 double Z2=0;
3 double Z3=0;
4 double Z4=0;
5 double t0=0;
6 double T_PWM=0.0001;
7 double t_ein_T14=0;
8
    
```

Abbildung 45: Deklaration für PWM

Die Berechnung der Einschaltzeit von TR1/TR4 wird durch Formel 38 durchgeführt:

$$t_{\text{ein}_1} = \left(\frac{U_{\text{Regler}}}{U_{\text{Regler_max}}} + 1 \right) \cdot \frac{T_p}{2}$$

Formel 38: Berechnung der Einschaltzeit von TR1/TR4

Die max. Ausgangsspannung $U_{\text{Regler_max}}$ hier wird durch Spannung von C1 ersetzt, da die max. Spannung 48V ist.

U_{Regler} ist Ausgangsspannung von Regler. Denn in diesem Kapitel wird kein Regler eingesetzt, wird einfach ein Testsignal N_{Test} eintragen. Die Formel kann man wie in Abb.46 so umschreiben

```

Wertzuzuweisung (während der Simulation)
1 t_ein_T14=(N_Test.OUT/C1.V+1)*T_PWM/2;
2
    
```

Abbildung 46: Wertzuzuweisung von PWM

Das trapezförmige Eingangssignal N_{Test} ist ein Testsignal für die PWM, damit man überprüft, ob der Motor mit H-Brücke und PWM erwartet läuft. Mit dem trapezförmige Eingangssignal, wird nicht nur das Hochfahren der Drehzahl als auch ihr Bremsen beobachtet.

Die eingestellten Parameter des trapezförmigen Signals werden in Abb. 47 dargestellt:

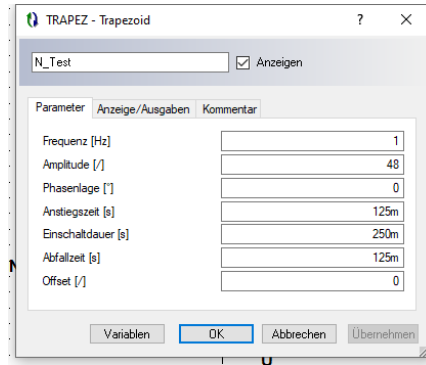


Abbildung 47: Parameter des trapezförmigen Signals

Die Abb. 48 zeigt das Ergebnis zum Drehzahlverlauf ohne Regelung.

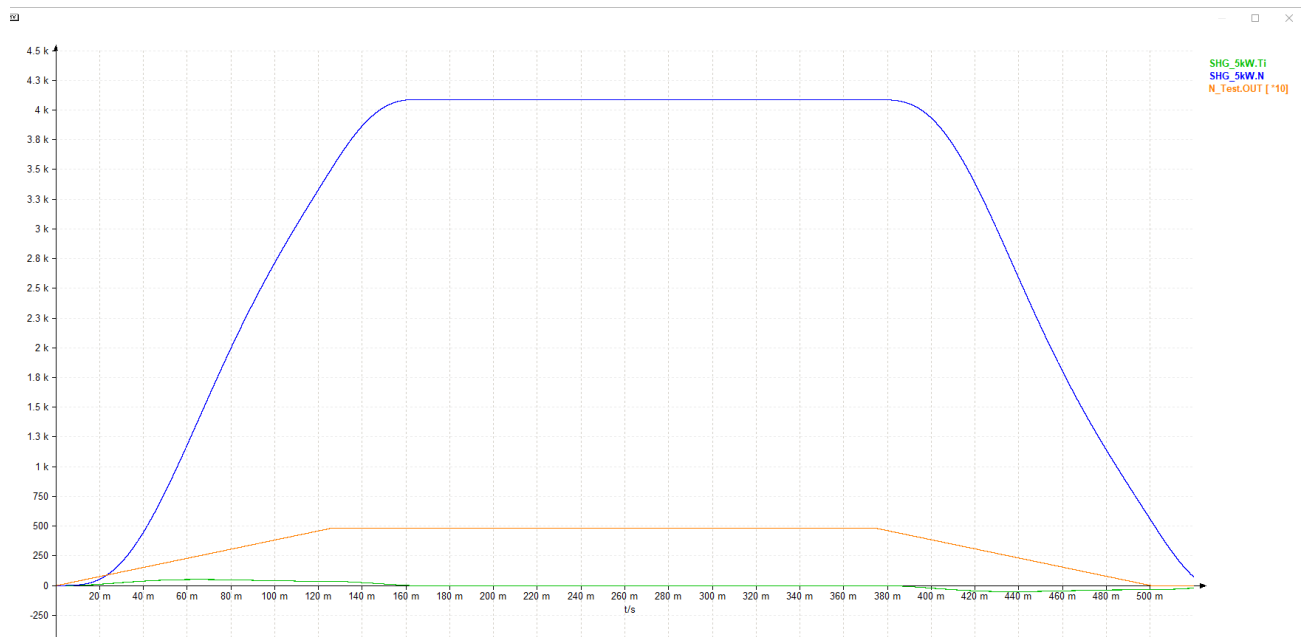


Abbildung 48: Drehzahlverlauf ohne Regelung

10.4 Auslegung des Regelkreises mit einem PID-Drehzahlregler

10.4.1 Streckenparameterbestimmung nach der Sprungantwort

Wie in Abschnitt 7.3.1 dargelegt, müssen die Streckenparameter zuerst nach der Sprungantwort ermittelt werden, bevor die Parameter von PID-Regler bestimmt werden.

Um den Wendepunkt von Ist-Drehzahl zu bestimmen, wird die Ist-Drehzahlkurve (W1) durch Anruf von Block „Differential“ (D_n_dt) abgeleitet. (siehe Abb. 49)



Abbildung 49: Ableitung der Ist-Drehzahlkurve

Danach wird das Sprungsignal STEP1 als Eingangsgröße mit dem Endwert von 48 und der Sprungzeit von 1ms angerufen. N_Test.OUT wird jetzt von STEP1.OUT ersetzt. Die Abb.50 zeigt die H-Brücke-Schaltung über PWM mit dem Wendepunktregler.

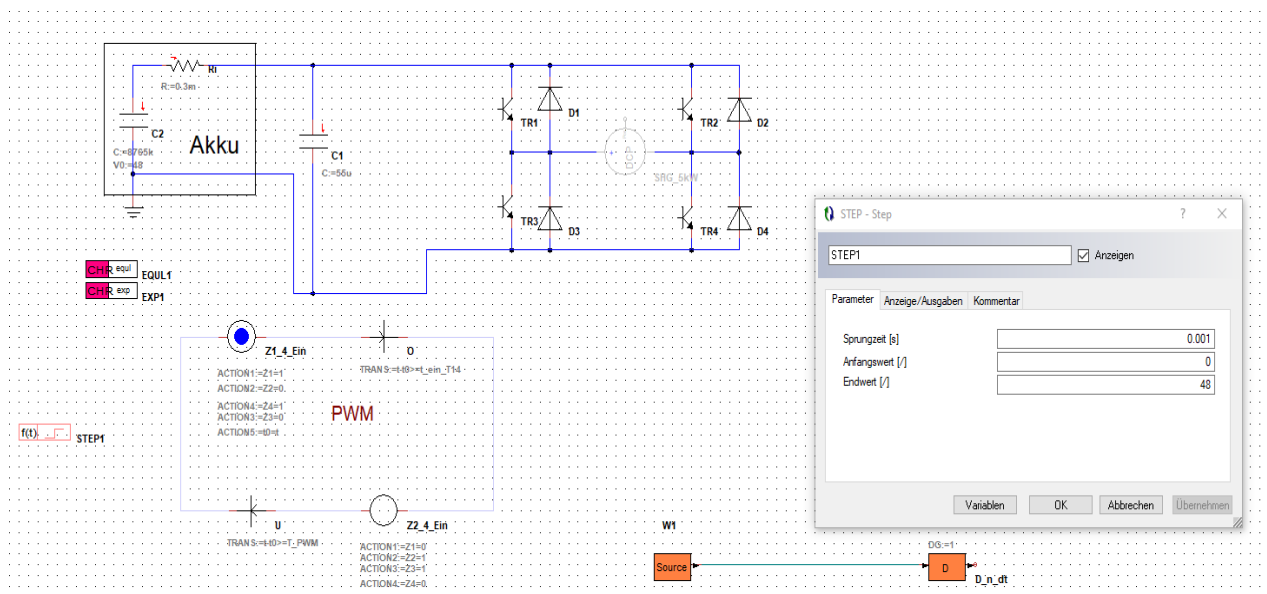


Abbildung 50: H-Brücke über PWM mit Wendepunktregler

Das Ergebnis der Simulation ist in Abb.51 dargestellt:

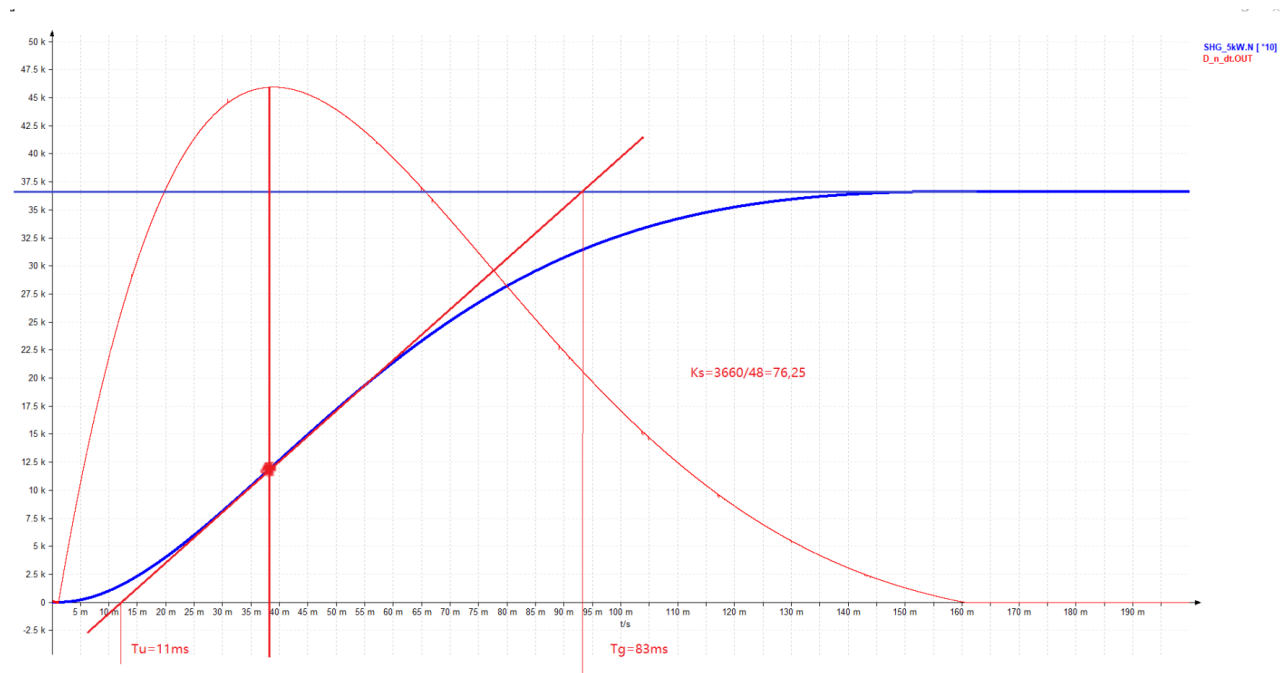


Abbildung 51: Bestimmung des Wendepunktes

Roter Punkt zeigt den Wendepunkt der Ist-Drehzahlkurve. Nach der Regel werden die Streckenparameter aus Abb.51 direkt abgelesen.

Verzugszeit T_u : 11ms

Ausgleichszeit T_g : 83ms

Stationäre Verstärkung: 76,25

10.4.2 Parametereinstellung nach Einstellregel von Chien / Hrones und Reswick

Nach Tabelle 2 kann man jetzt nach der Einstellregel von Chien / Hrones und Reswick die Parameter von PID-Regler ausrechnen.

Tabelle 3 zeigt die ausgerechneten Parameter:

Tu=0,011
Tg=0,083
Ks=76,25

	Führung		Störung	
	aperiodisch	20% überschwingen	aperiodisch	20% überschwingen
Kp	0,0593	0,042	0,042	0,053
Tn	0,083	0,0399	0,0196	0,0163
Tv	0,0055	0,0038305	0,003423	0,003423
Kp	0,0593	0,042	0,042	0,76
KI	0,714457831	1,052631579	2,142857143	3,251533742
KD	0,00032615	0,000160881	0,000143766	0,000181419

Tabelle 3: Parameter von PID-Regler

Die Parameter von der Führung mit dem aperiodischen Verlauf werden in PID-Regler eingesetzt, welche mit Grün markiert sind.

Nach Formel 28 wird nun die Übertragungsfunktion von PID-Regler mit den ausgerechneten Parametern erstellt:

$$G_R(p) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{pT_N} + pT_V \right) = 0,0593 \cdot \left(1 + \frac{1}{p0,083} + p0,00032615 \right)$$

$$G_R(p) = 0.0593 * \frac{(p + 12,1)(p + 3054)}{p0.083}$$

Die Übertragungsfunktion der geregelten Regelstrecke mit PID-Regler:

$$\begin{aligned}
 G_0(p) &= G_S(p) \cdot G_R(p) \\
 &= \frac{8}{0.00183p^2 + 0.0432p + 1} * 0.0593 * \frac{(p + 12,1)(p + 3054)}{p \cdot 0.083} \\
 &= \frac{1,284 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 + 0,03938 \cdot p + 0,4744}{0,0001519p^3 + 0,00356 \cdot p^2 + 0,083 \cdot p}
 \end{aligned}$$

Das Bode-Diagramm der geregelten Regelstrecke (SHG_5kW+PID-Regler) zeigt die Abb. 52:

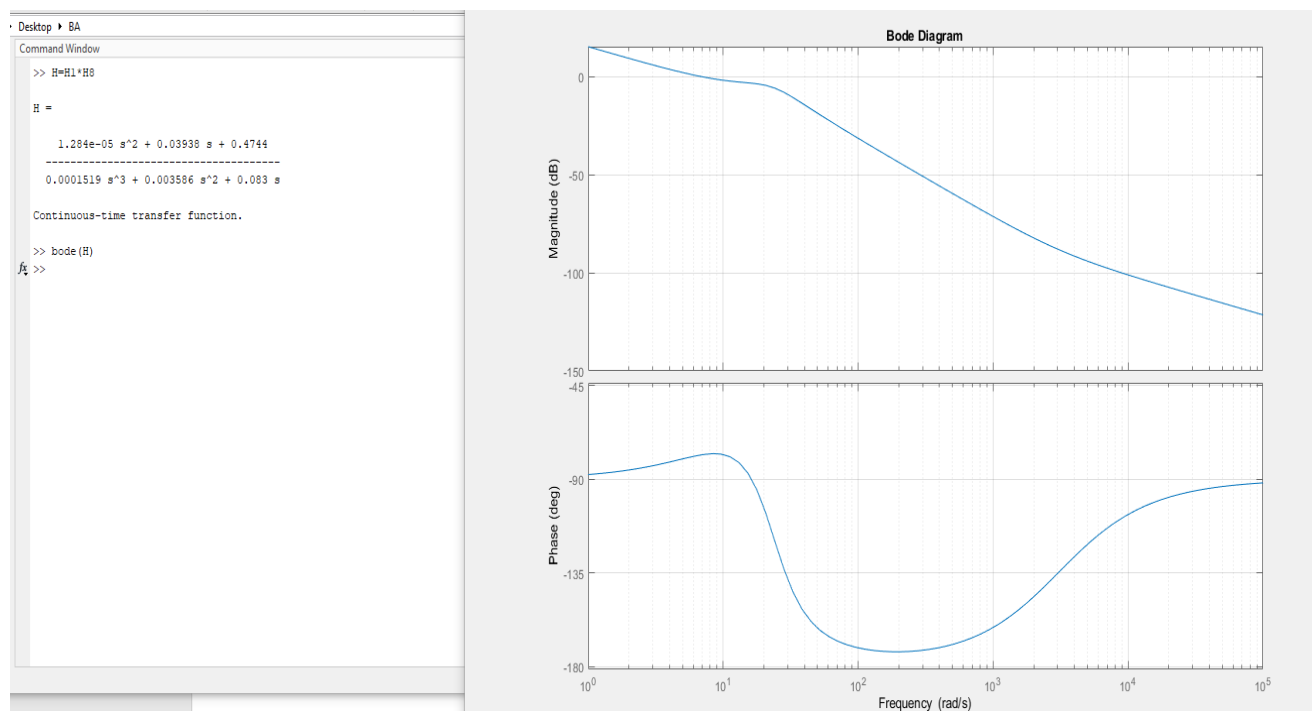


Abbildung 52: Bode-Diagramm geregelter Regelstrecke mit PID-Regler

10.4.3 PID-Regelkreis

Der Aufbau des PID-Regelkreises ist wie in Abb.53 dargestellt.

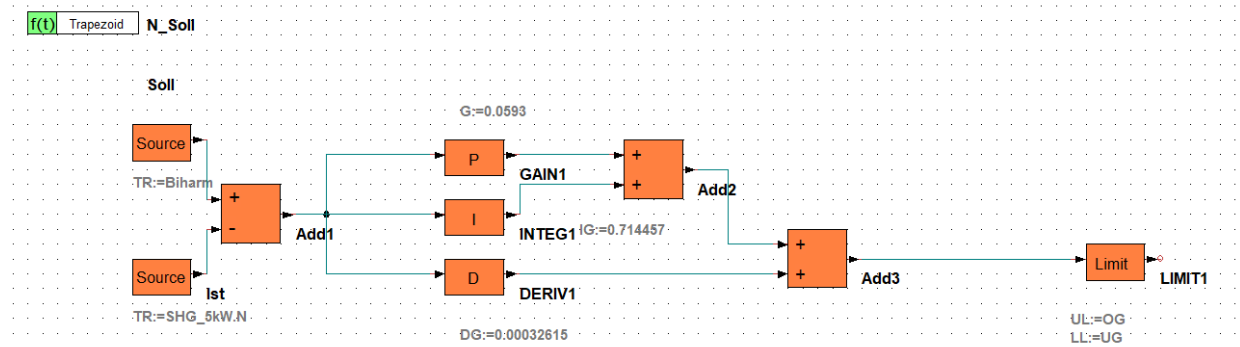


Abbildung 53: PID-Regelkreis

Der PID-Regler besteht aus P-Regler, I-Regler und D-Regler. Ihre Parameter werden schon in Tabelle 3 ausgerechnet, und in die entsprechenden Blöcke eingegeben.

Der Eingangswert vom Regelkreis ist die Differenz zwischen Regelgröße (SHG_5kW.N) und Führungsgröße (N_Soll.OUT), die vom trapezförmigen Signal definiert wird. (siehe Abb. 54) Hier wird die max. Drehzahl auf 2950min^{-1} eingestellt.

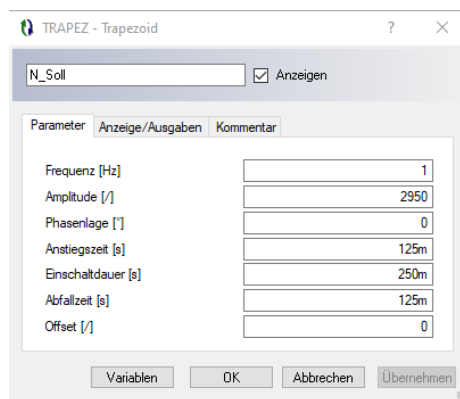


Abbildung 54: trapezförmiges Signal N_Soll

Die Regelabweichung wird über PID-Regler gesteuert. Nach der Steuerung wird Stellgröße am Ausgang von PID-Regler ausgegeben.

Aber der Ausgangswert wird wegen der PWM begrenzt. Weil die PWM tatsächlich ein Microcontroller ist, legen die Eingangs- und Ausgangsspannung von μC normalerweise max. -5V oder 5V . Daher wird ein Begrenzer (LIMITER 1) hinter PID-Regler eingebaut, mit dem die Stellgröße im Bereich von -5V bis 5V geregelt werden kann. Die Grenzwerte werden als UG und OG in Block „LIMITER 1“ eingetragen, und noch in Variable deklariert. (siehe Abb. 55)

```

Deklaration / Initialisierung (bei Simulationsstart)
1 double Z1=0;
2 double Z2=0;
3 double Z3=0;
4 double Z4=0;
5 double t0=0;
6 double T_PWM=0.0001;
7 double t_ein_T14=0;
8 double OG=5;
9 double UG=-5;
10
    
```

Abbildung 55: Deklaration-PID

Jetzt wird begrenzte Stellgröße im LIMITER1 gespeichert. Um der Regler Einfluss auf die PWM zu bekommen, wird der Ausgangswert von LIMITER1 in Formel eingesetzt, mit der die Einschaltzeit von TR1/TR4 berechnet wird. (siehe Abb. 56) 5 am Nenner bedeutet den max. absoluten Regelwert. $\frac{LIMIT1.OUT}{5}$ ist der digital Drehzahlsollwert für die Steuereinheit KBL des Motors SHG 5kW. Wenn die LIMIT1.OUT 5V ist, ergibt sich die Einschaltzeit von TR1/TR4 gleich wie T_{PWM} also 100µs, während Einschaltzeit von TR2/TR3 gleich 0 ist. Beim digitalen Drehzahlsollwert von -1 also LIMIT1.OUT = -5 wird Einschaltzeit von TR1/TR4 gleich 0, während Einschaltzeit von TR2/TR3 gleich T_{PWM} ist.

```

Wertzweisung (während der Simulation)
1 t_ein_T14=(LIMIT1.OUT/5)*T_PWM/2;
    
```

Abbildung 56: Wertzuweisung von PWM über Regler

Um festzustellen, ob der Regelkreis wie erwartet funktioniert, wird eine sinusförmige Last mit Amplitude von 20Nm und Frequenz von 5Hz am Motor eingebaut. (siehe Abb. 57)

Der Amper-Meter AM1 dient zur Messung des Ankerstrom.

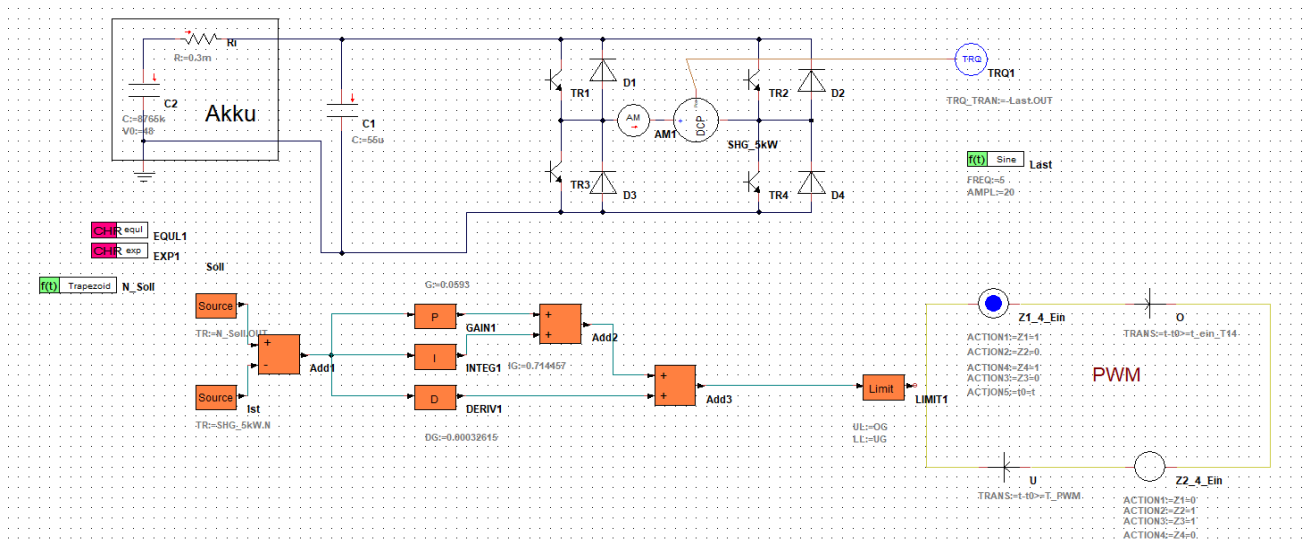


Abbildung 57: H-Brücke über PWM mit PID-Regelkreis

Das Ergebnis der Simulation wird in Abb.58 dargestellt:

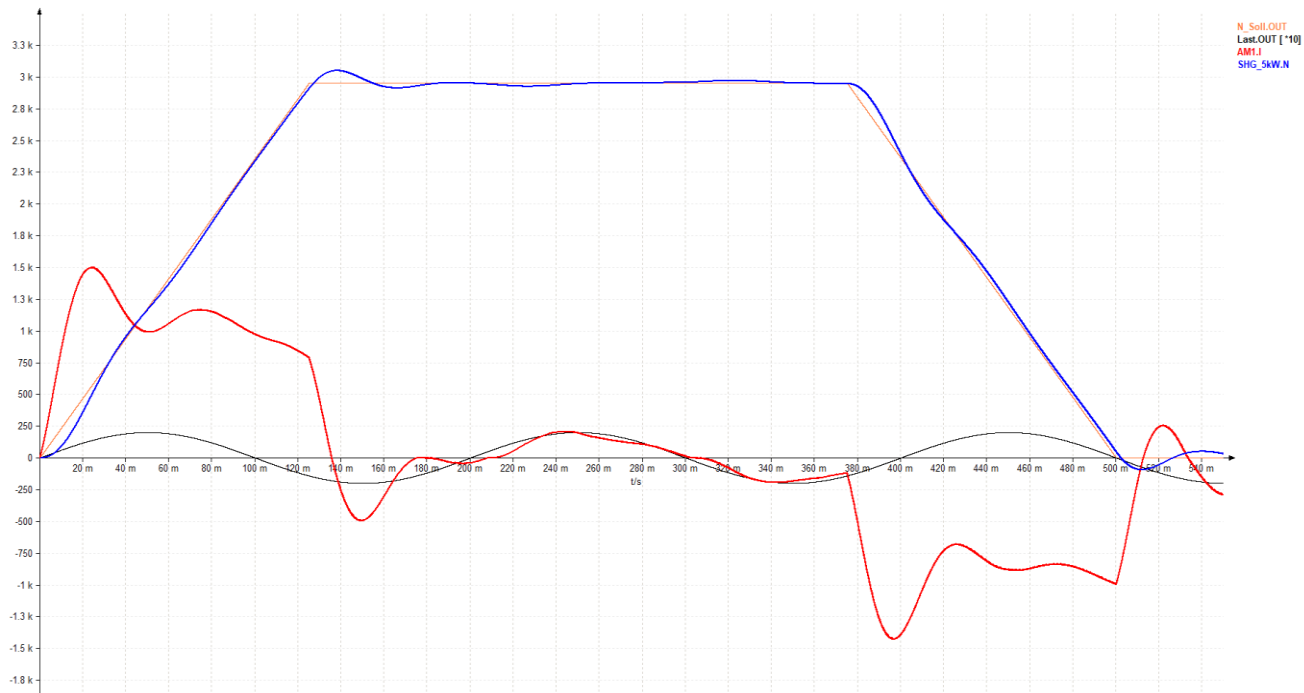


Abbildung 58: Drehzahl mit PID-Regelkreis mit Last

Die Drehzahl wird durch den Regelkreis nach dem trapezförmigen Signal wie erwartet geregelt. Aber der max. Strom liegt um 1500A, der über 10-fach größer als Nennstrom von 125A ist. (vgl. Abb. 58). Der Grund liegt darin, dass die Rampenzeit beim Anlauf zu klein ist. Deswegen ist eine passende Rampenzeit notwendig.

10.5 Definition der Hochfahrrampe

Trotz funktioniert der PID-Regelkreis, ist der dazu erzeugte Strom bei Hochfahren zu groß. Um einen zügigen, komfortablen und stromsparenden Anlauf zu erreichen, ist die Hochfahrrampe notwendig zu definieren.

10.5.1 Erzeugung der biharmonischen Funktion

Die Möglichkeit ist eine biharmonische Funktion von $\sin^2(x)$ (siehe Abb. 59) für Anfahren zu erzeugen.

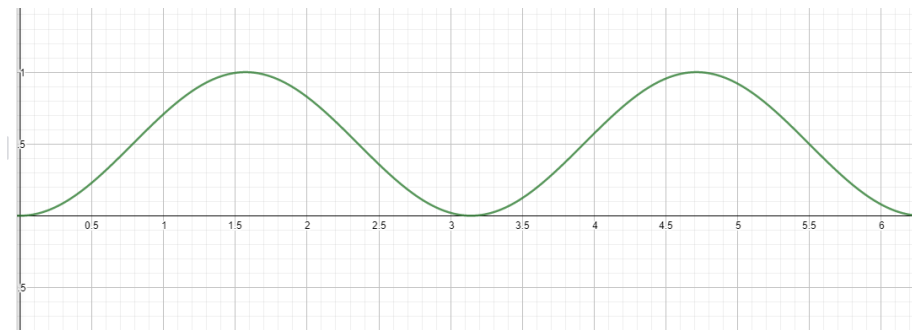


Abbildung 59: biharmonische Funktion

Durch $\sin^2(x)$ wird die Rampenzeit T_{Ramp} nach Wunsch definiert, dadurch wird der erzeugte Strom den Nennstrom nicht überschreiten.

Das Vorgehen zur Erzeugung der biharmonischen Funktion von $\sin^2(x)$:

Man kann die $\sin^2(x)$ so umformulieren:

$$\sin^2(x) = \sin^2(\omega \cdot t) = \sin^2(2 \cdot \pi \cdot f_{Biharm} \cdot t)$$

Formel 39: Umformulierung der biharmonischen Funktion

Mit $\frac{1}{f_{Biharm}} = T_{Biharm}$

f_{Biharm} ist die Frequenz der biharmonischen Funktion. T_{Biharm} beschreibt die Laufzeit der Funktion in einer Periode also von 0-360 Grad. Die Rampenzeit T_{Ramp} besitzt nur ein Viertel von ganzer Periode. Deswegen $T_{Biharm} = 4 \cdot T_{Ramp}$

Anschließend lassen sich die Zuweisungen und Variablen der biharmonischen Funktion in Portunus eingeben. (siehe Abb. 60)

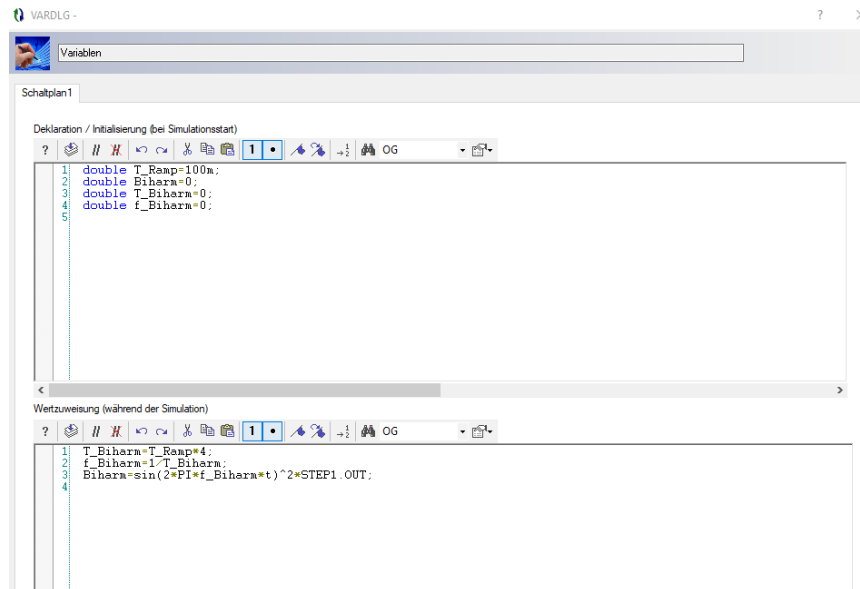


Abbildung 60: Wertzuweisung und Deklaration der biharmonischen Funktion

Das Sprungsignal STEP1 wirkt wie ein Verstärker für die Funktion, damit die Amplitude von Funktion auf den gezielten Wert erreichen kann. Der Wert der biharmonischen Funktion wird in „Biharm“ gespeichert.

Nach der Simulation bekommt man die biharmonische Funktion von $\sin^2(x)$ mit Rampenzeit von 100ms in Abb.61.

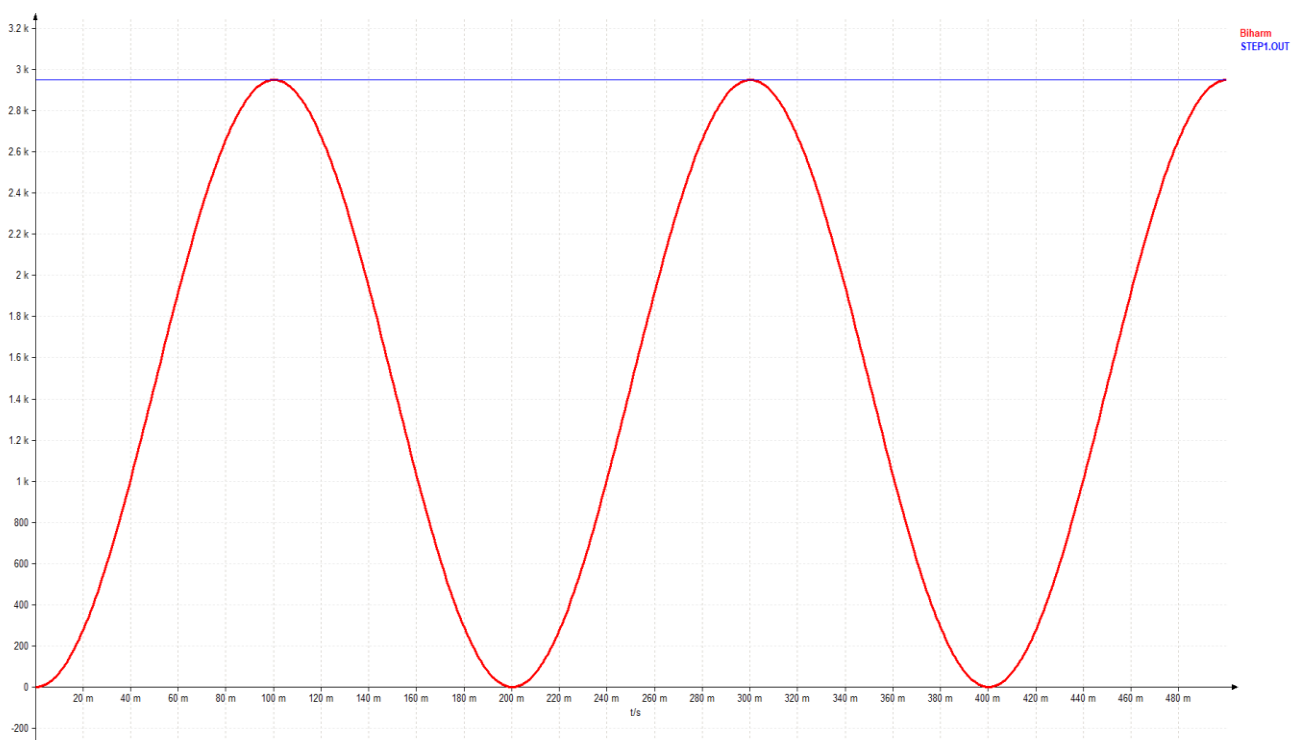


Abbildung 61: biharmonische Funktion in Portunus

10.5.2 Biharmonische Funktion als Führungsgröße

Die biharmonische Funktion soll nur für Anlauf und Bremsen angewendet werden, weil der Motor nach Anlauf eine konstante Drehzahl haben soll. Das heißt, dass der Wert der biharmonischen Funktion nach der Rampenzeit konstant bleiben muss. Und beim Bremsen wird Funktion wieder angerufen.

Die Lösung besteht darin: wenn die Rampenzeit zum Ende kommt, ist der Wert der Funktion gleich die Amplitude des Sprungsignals. In der Zuweisung kann man so programmieren wie in Abb.62 und das Ergebnis zeigt die Abb. 63.

```

Wertzweisung (während der Simulation)
1 t_ein_T14=(LIMIT1.OUT/5+1)*T_PWM/2;
2 t_ein_T23=T_PWM-t_ein_T14;
3 T_Biharm=T_Ramp*4;
4 f_Biharm=1/T_Biharm;
5 Biharm=sin(2*PI*f_Biharm*t)^2*STEP1.OUT;
6 if(t>=T_Ramp)
7 {
8   Biharm=STEP1.OUT;
9 }
    
```

Abbildung 62: Wertzweisung für Anlauf

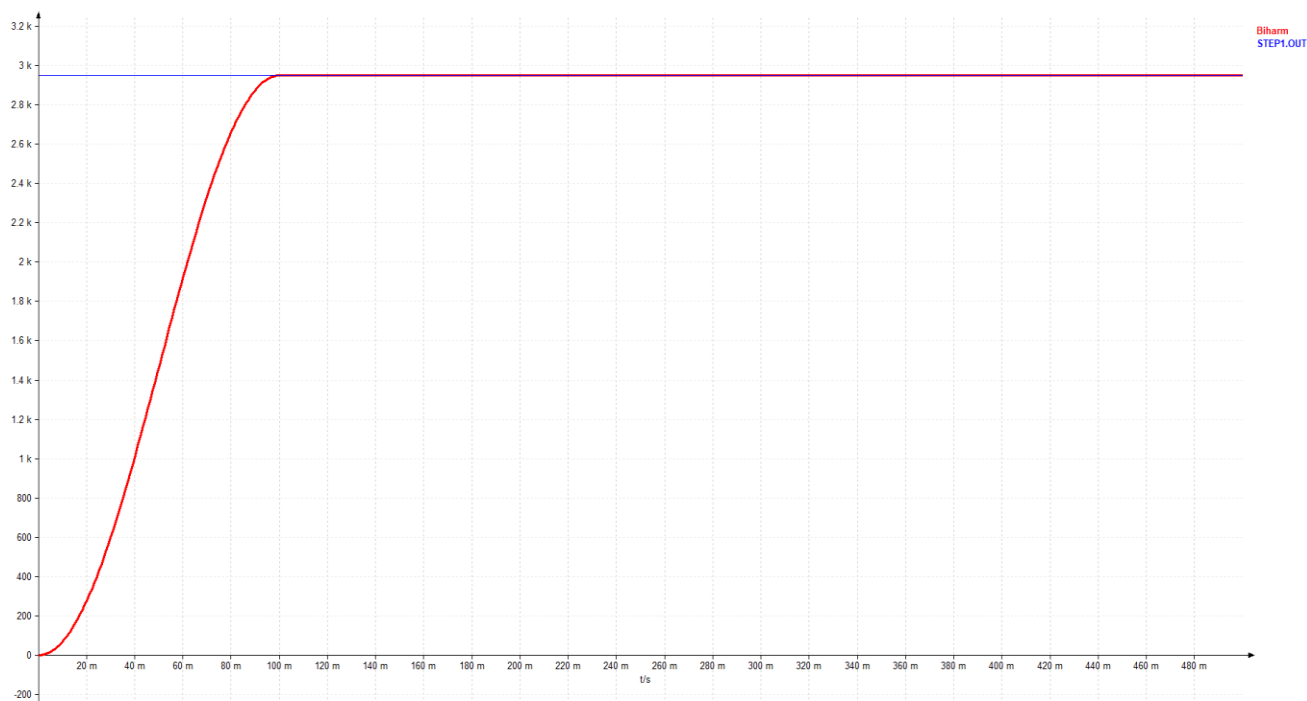


Abbildung 63: biharmonische Funktion für Anlauf mit Rampenzeit von 100ms

Da die Sprungzeit also Anfangszeit nicht immer von 0 beginnt. Der Benutzer kann nach Anforderung zu jeder Zeit den Motor starten.

The screenshot shows the VARULU software interface with two code editors. The top editor, titled 'Variablen', contains the following code for variable declarations and initialization:

```

1 double Z1=0;
2 double Z2=0;
3 double Z3=0;
4 double Z4=0;
5 double t0=0;
6 double T_PWM=0.0001;
7 double t_ein_T14=0;
8 double t_ein_T23=0;
9 double OG=5;
10 double UG=-5;
11 double T_Ramp=100m;
12 double Biharm=0;
13 double f_Biharm=0;
14 double t_start=0;
15 double mark1=0;
16 double Sprungzeit=100m;

```

The bottom editor, titled 'Wertzweisung (während der Simulation)', contains the following code for value assignments during simulation:

```

1 t_ein_T14=(LIMIT1.OUT/5+1)*T_PWM/2;
2 t_ein_T23=T_PWM-t_ein_T14;
3 T_Biharm=T_Ramp*4;
4 f_Biharm=1-T_Biharm;
5 if(STEP1.OUT>0&&mark1==0)
6 {
7   mark1=1;
8   t_start=t;
9 }
10 Biharm=sin(2*PI*f_Biharm*(t-t_start))^2*STEP1.OUT;
11 if(t>=T_Ramp+t_start)
12 {
13   Biharm=STEP1.OUT;
14 }

```

Abbildung 64: Deklaration und Wertzuweisung der biharmonischen Funktion mit beliebiger Sprungzeit

Die Sprungzeit wird jetzt in Variable auf 100ms deklariert. Und die Sprungzeit von STEP1 kann von Benutzer definiert werden. (siehe Abb.64 und 65)

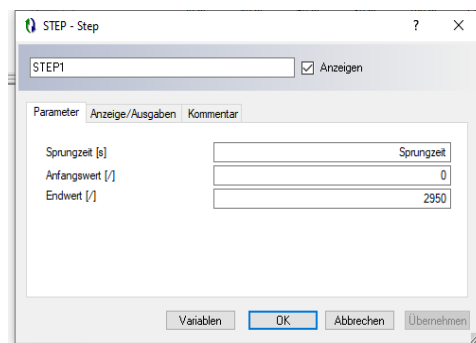


Abbildung 65: benutzerdefinierte Sprungzeit

Wenn der Motor von Benutzer gestartet wird, wird die aktuelle Zeit in Anfangszeit t_{start} gespeichert. Mark1 funktioniert als ein „Trigger“, mit dem die Anfangszeit nur einmal in einem Vorgang abgelesen wird. $t-t_{start}$ ist als ein „Offset“ zu verstehen, damit die Software die verschobene Anfangszeit erkennt. (vgl. Abb.64)

Die Abb.66 zeigt das Ergebnis der biharmonischen Funktion mit beliebiger Sprungzeit.

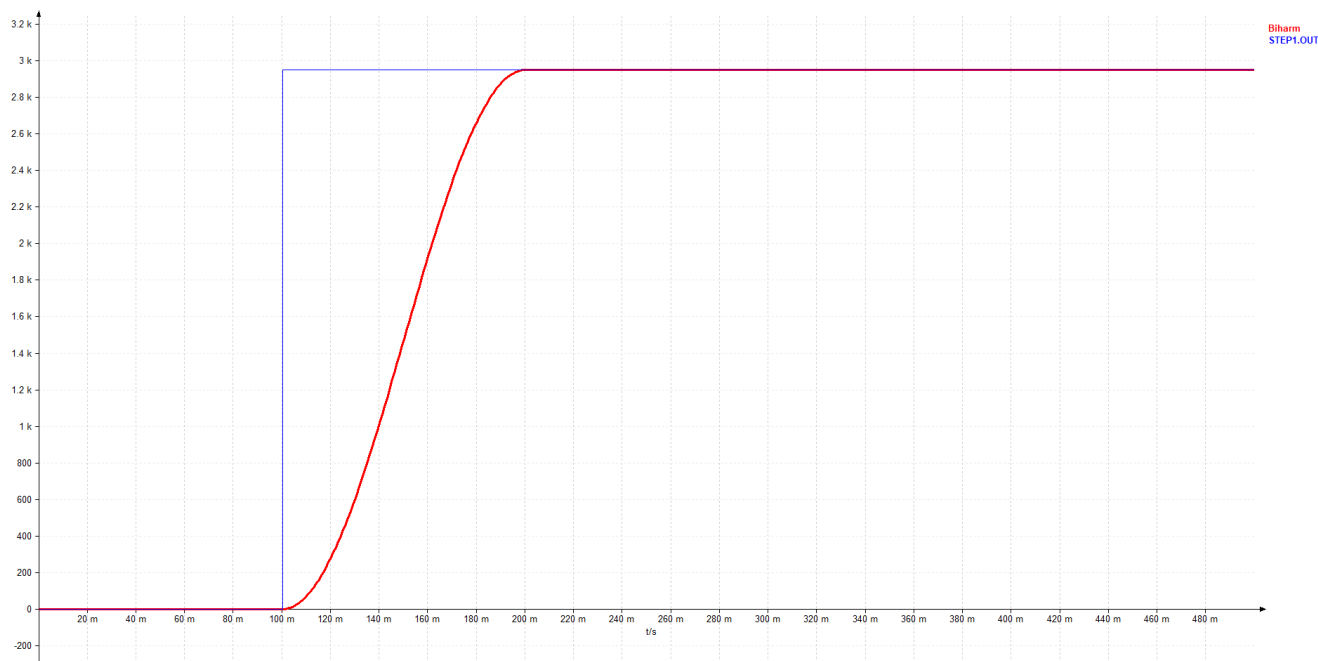


Abbildung 66: biharmonischen Funktion mit Sprungzeit von 100ms

10.5.3 Passende Rampenzeit

Um die passende Rampenzeit zu bestimmen, wird das System mit Einsätzen verschiedener Rampenzeiten ohne Last simuliert, wobei der erzeugte max. Strom den Nennstrom von 125A nicht überschreitet.

- Bei $T_{\text{Ramp}}=250\text{ms}$: $I_{a_max}=777\text{A}$

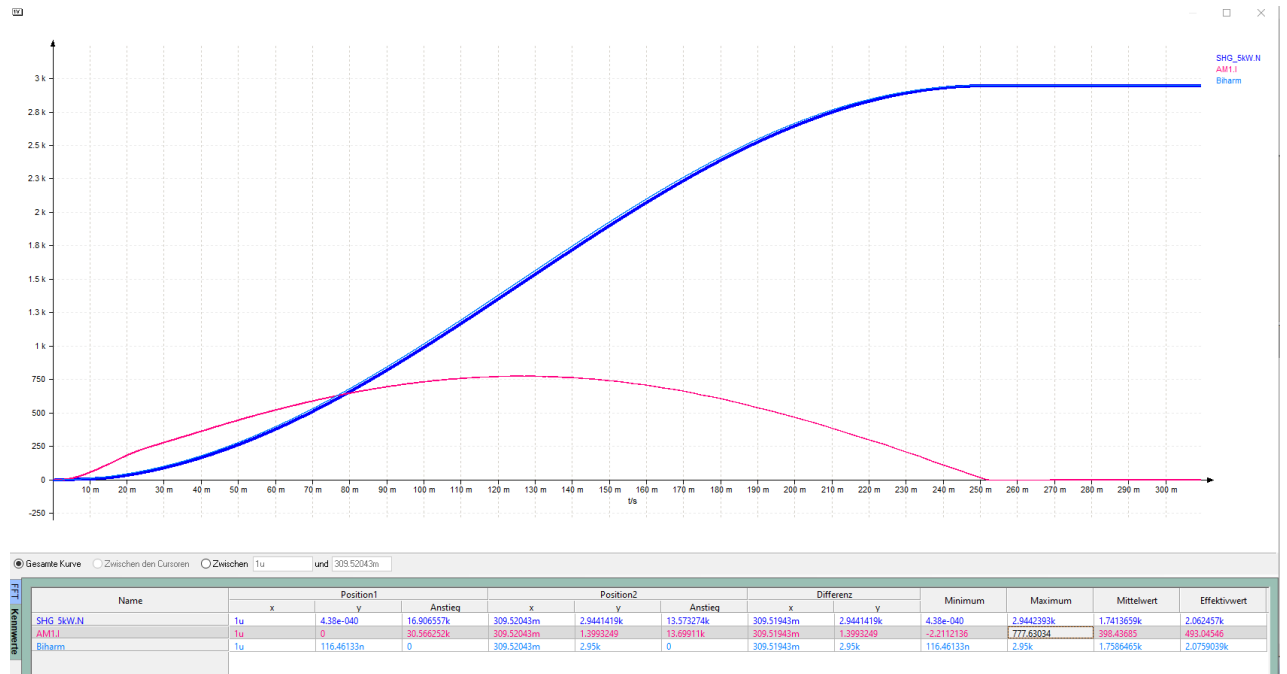


Abbildung 67: biharmonische Funktion mit Rampenzeit von 250ms

- Bei $T_{Ramp}=500ms$: $I_{a_max}=390,5A$

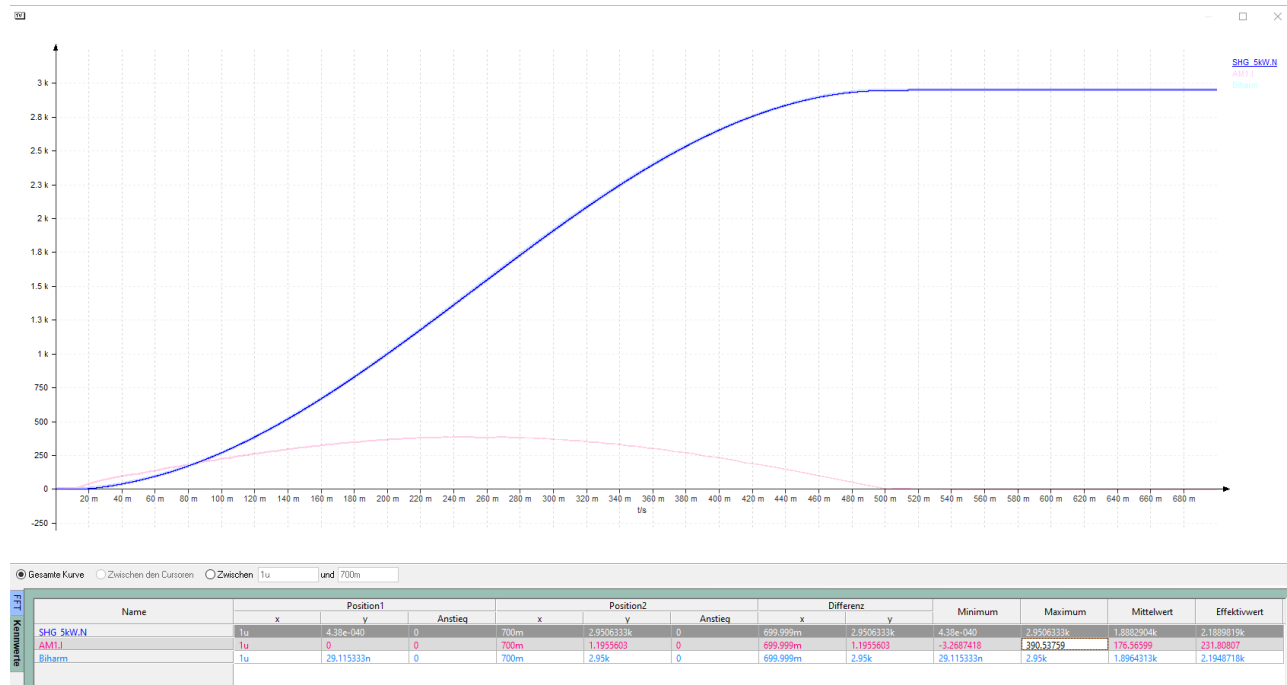


Abbildung 68: biharmonische Funktion mit Rampenzeit von 500ms

- Bei $T_{Ramp}=750ms$: $I_{a_max}=262,4A$

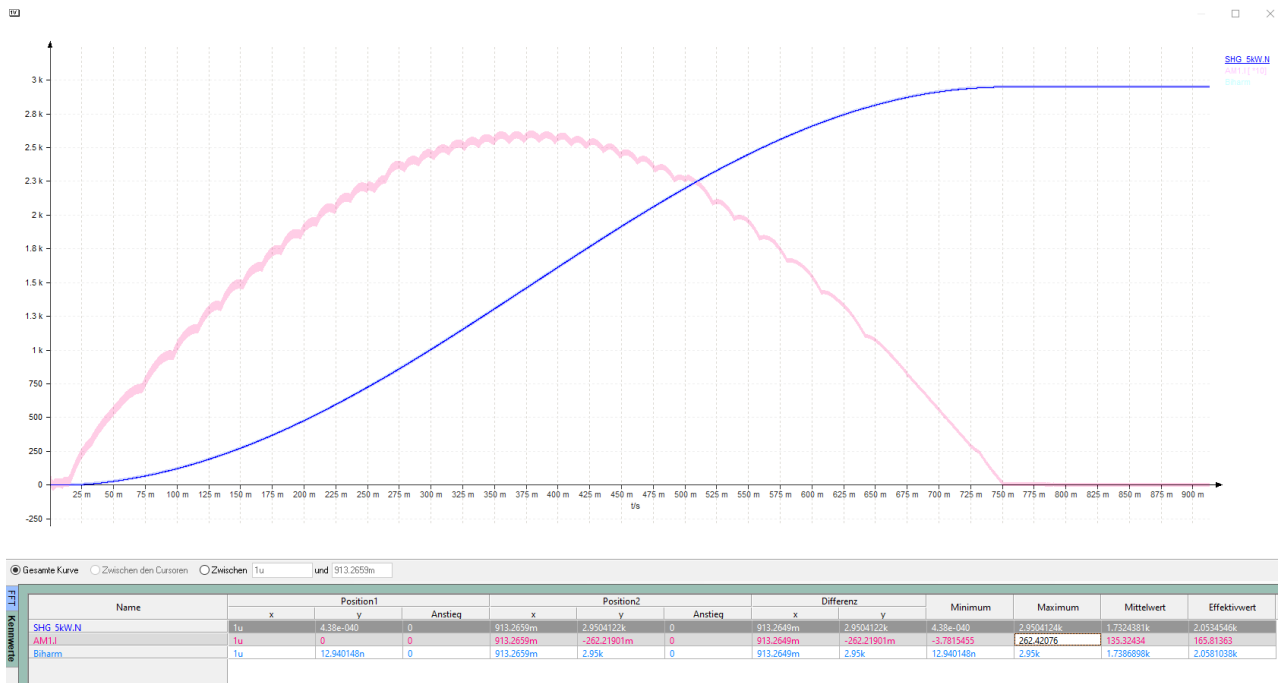


Abbildung 69: biharmonische Funktion mit Rampenzeit von 750ms

- Bei $T_{Ramp}=1000ms$: $I_{a_max}=200A$

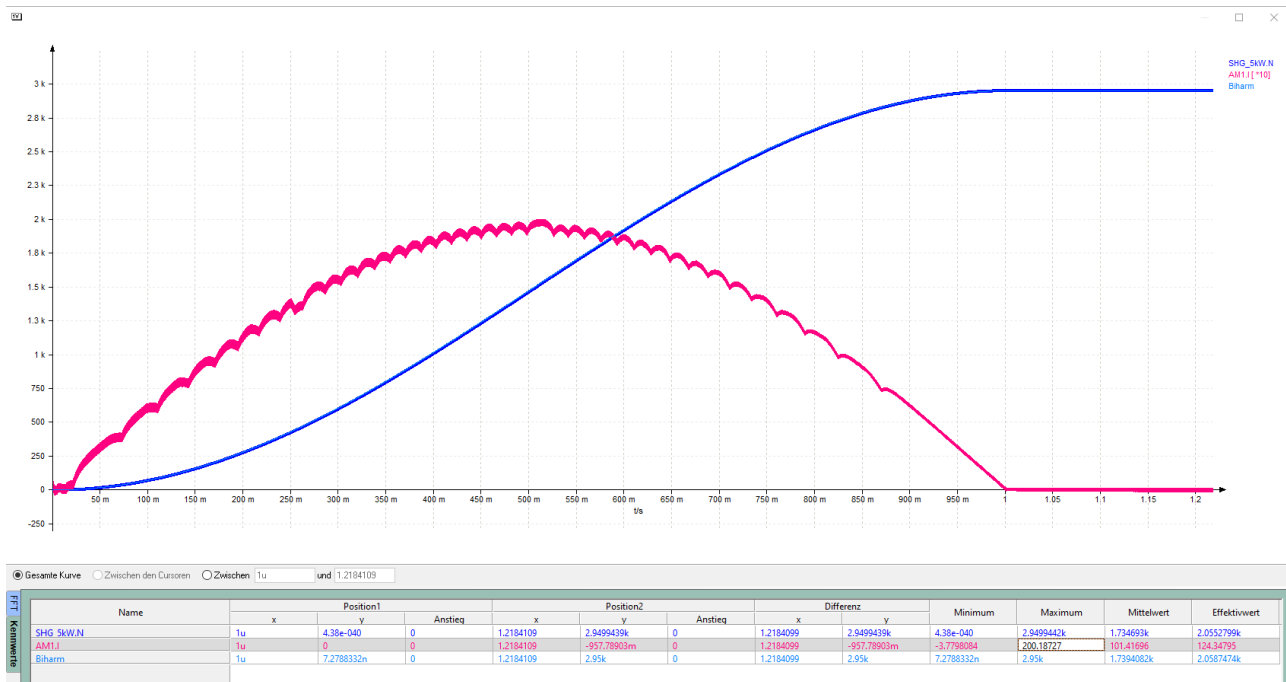


Abbildung 70: biharmonische Funktion mit Rampenzeit von 1000ms

- Bei $T_{Ramp}=1250ms$: $I_{a_max}=160A$

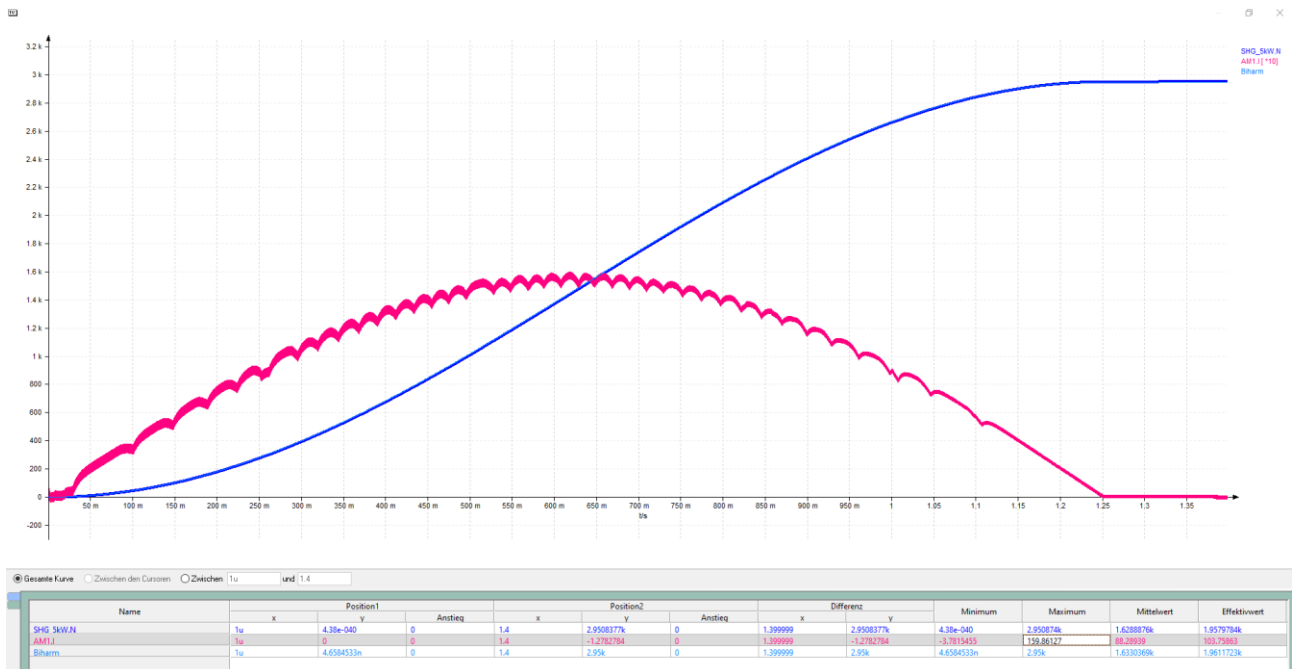


Abbildung 71: biharmonische Funktion mit Rampenzeit von 1250ms

- Bei $T_{Ramp}=1500ms$: $I_{a_max}=134A$

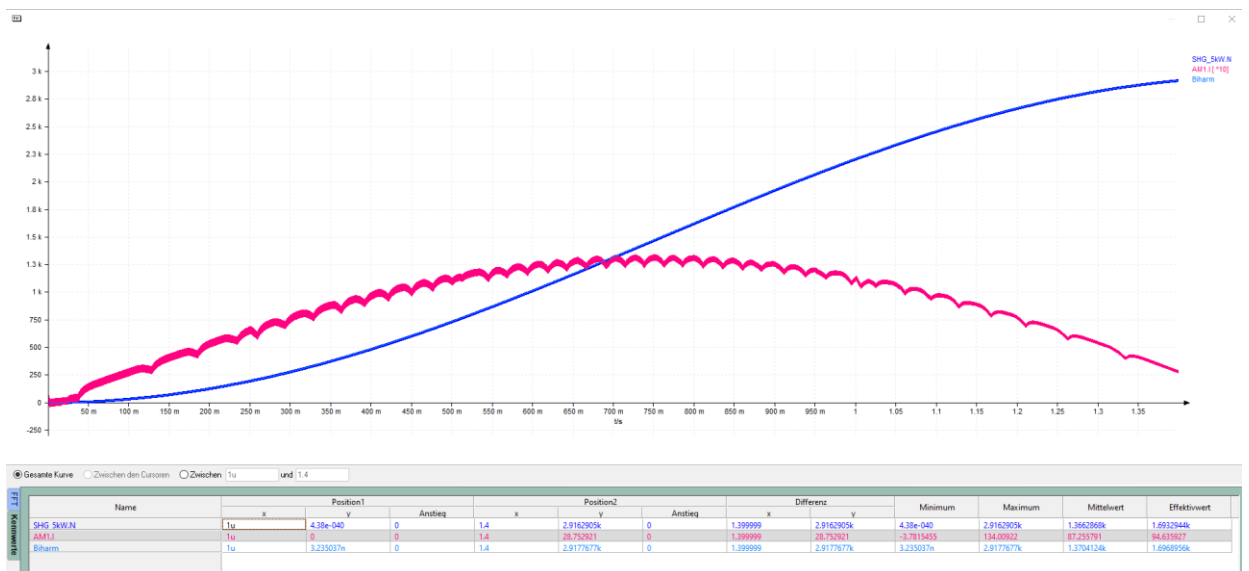


Abbildung 72: biharmonische Funktion mit Rampenzeit von 1500ms

Durch Simulationen kann man feststellen, wenn die Rampenzeit von 1500ms eingestellt wird, liegt der max. Strom um 134A. Und diese Rampenzeit ist am besten für die Anforderung geeignet. (vgl. Abb. 72)

10.5.4 Biharmonische Funktion als Führungsgröße mit Bremsen

Nach Einstellung der passenden Rampenzeit für Anlauf kommt nun das Thema zum Bremsen.

Da das Sprungsignal so zu einer beliebigen Zeit weggenommen werden soll, wird jetzt in der Simulation die Lookup-Funktion angerufen, mit der die Laufzeit von Motor von Benutzer definiert wird.

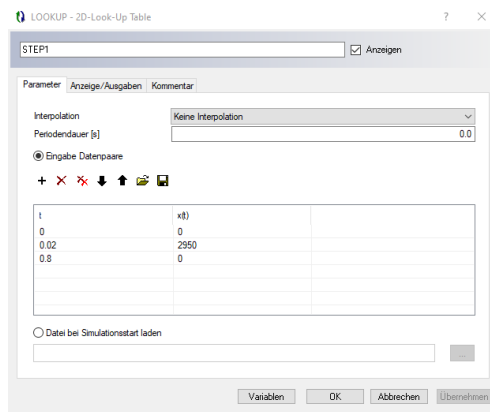


Abbildung 73: Einstellung von Lookup-Signal: STEP1

Die Abb.74 zeigt die Lookup-Signal STEP1 mit Anfangszeit von 20ms und den Einschalt-dauer von 780ms.

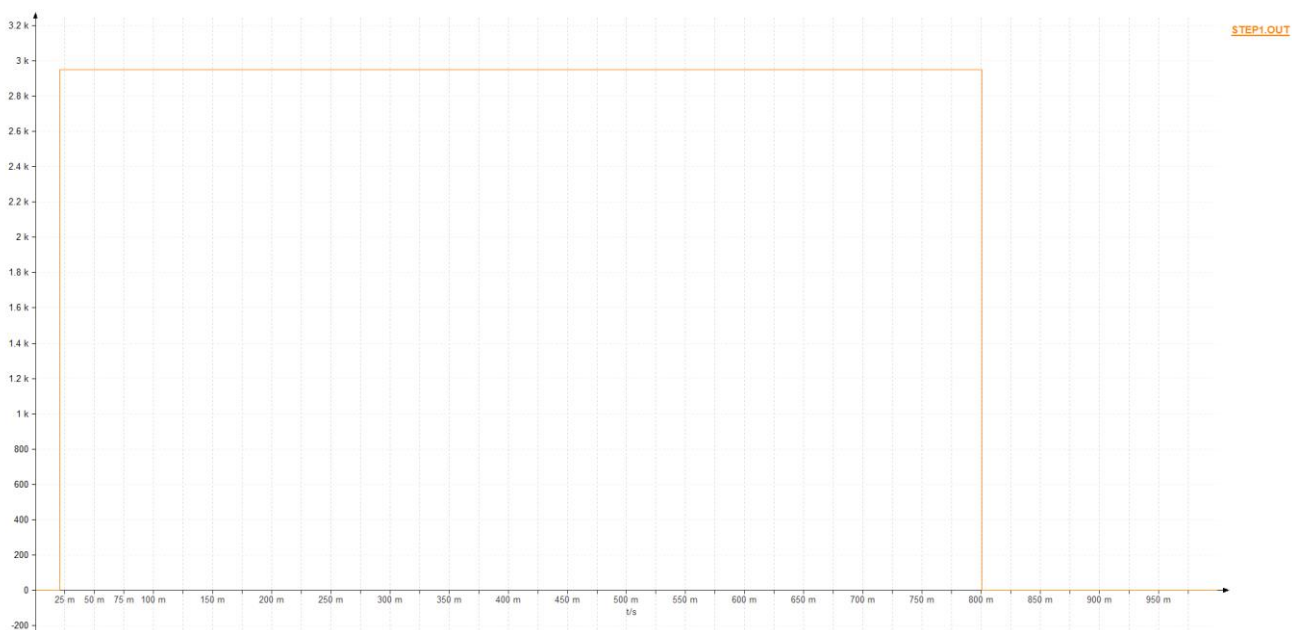


Abbildung 74: Lookup-Signal: STEP1

Der gesamte Vorgang besteht aus vier Phasen: Anlauf, Betriebsdauer, Bremsen und Stillstand. Deswegen benötigt man 4 Marks, jede Phase zu markieren, damit die Software erkennt, welche Phase jetzt ist, und entsprechende Befehle durchgeführt wird.

```

T_Biharm=T_Ramp*4;
f_Biharm=1/T_Biharm;

if(STEP1.OUT>0&&mark1==0)
{
mark1=1;
t_start=t;
}

if (mark1==1&&mark2==0)
{
Biharm=sin(2*PI*f_Biharm*(t-t_start))^2*STEP1.OUT;

if(t>=t_start+T_Ramp)
{
Biharm=STEP1.OUT;
mark2=1;
Biharm_max=STEP1.OUT;
mark3=0;
mark4=0;
}
}

if((STEP1.OUT==0)&&(t_start>0)&&(mark3==0))
{
mark3=1;
t_ende=t;
}

if (mark3==1&&mark2==1&&mark4==0)
{
Biharm=cos(2*PI*f_Biharm*(t-t_ende))^2*Biharm_max;

if(Biharm<=1)
{
Biharm=STEP1.OUT;
mark4=1;
mark1=0;
mark2=0;
}
}
}

```

Abbildung 75: Wertzuweisung für ganze Laufzeit

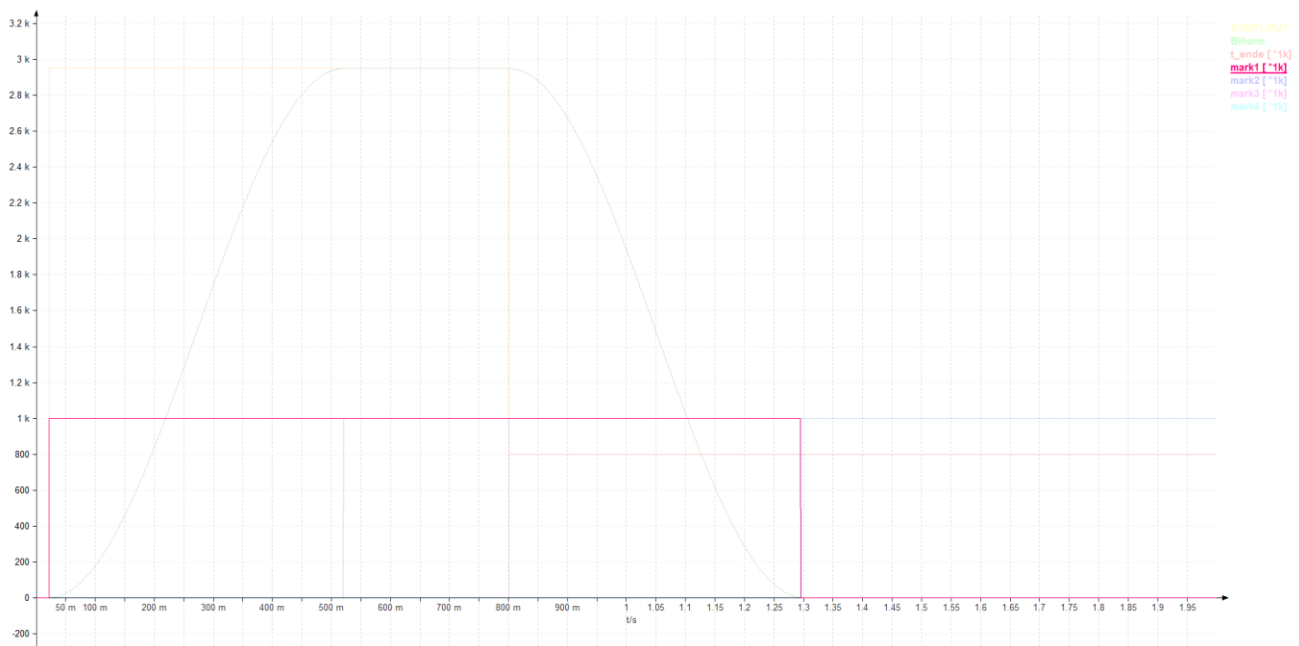


Abbildung 76: Mark1

Mark1 dient demselben Zweck wie in Kapitel 9.5.2. Wenn Mark1 gleich 1 und Mark2 gleich 0 sind, bedeutet das, dass der Motor startet, aber noch nicht beschleunigt. (vgl. Abb. 76)
 Nächster Schritt ist Anlauf mit der biharmonischen Funktion.

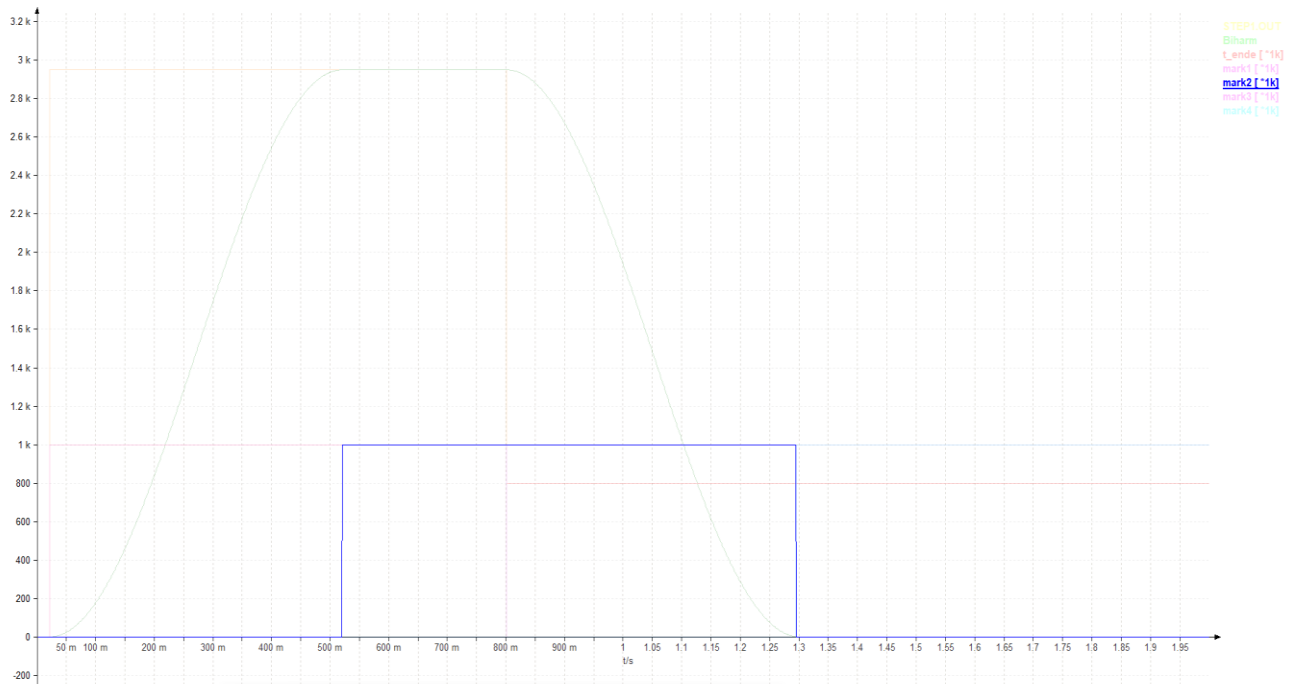


Abbildung 77: Mark2

Wenn die Anlaufzeit beendet, wird Mark2 (siehe Abb.77) auf 1 gesetzt, damit der Anlauf in einem Vorgang nicht wiederholt. Dann kommt es in der Phase vom Betriebsdauer.

Wenn das Signal auf 0 zurücksetzt, bedeutet das, dass die von Benutzer definierte Betriebszeit zum Ende gekommen ist. Dann erfasst man den Endezeitpunkt t_{ende} , und wird Mark3 auf 1 gesetzt. Der Endezeitpunkt wirkt als eine „Offset“ für Bremsenfunktion. Da das Signal zum Beginn ebenfalls 0 war, muss noch eine Bedingung mit der Anfangszeit größer als 0 hinzugefügt werden. (vgl. Abb. 78)

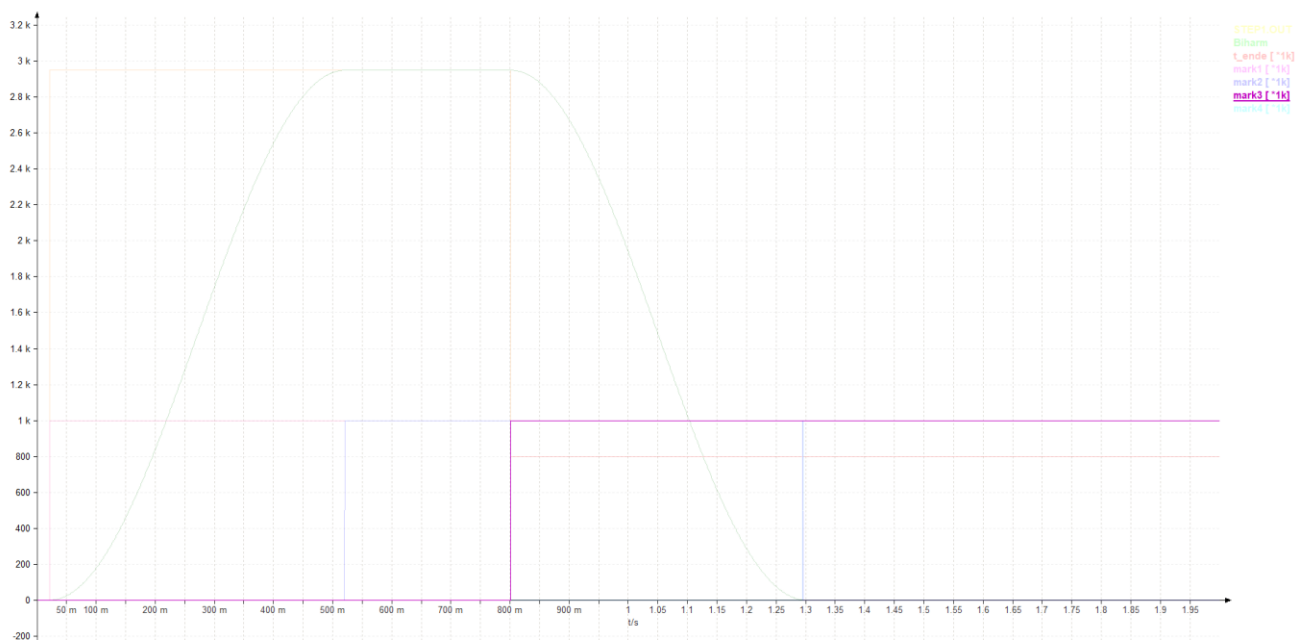


Abbildung 78: Mark3

Nach der Betriebszeit bremst der Motor über die biharmonische Funktion von $\cos^2(x)$.

Denn im Vergleich zur Sinus-Funktion hat die Cosinus-Funktion Wert von 1 bis 0 im Bereich von 0-90 Grad.

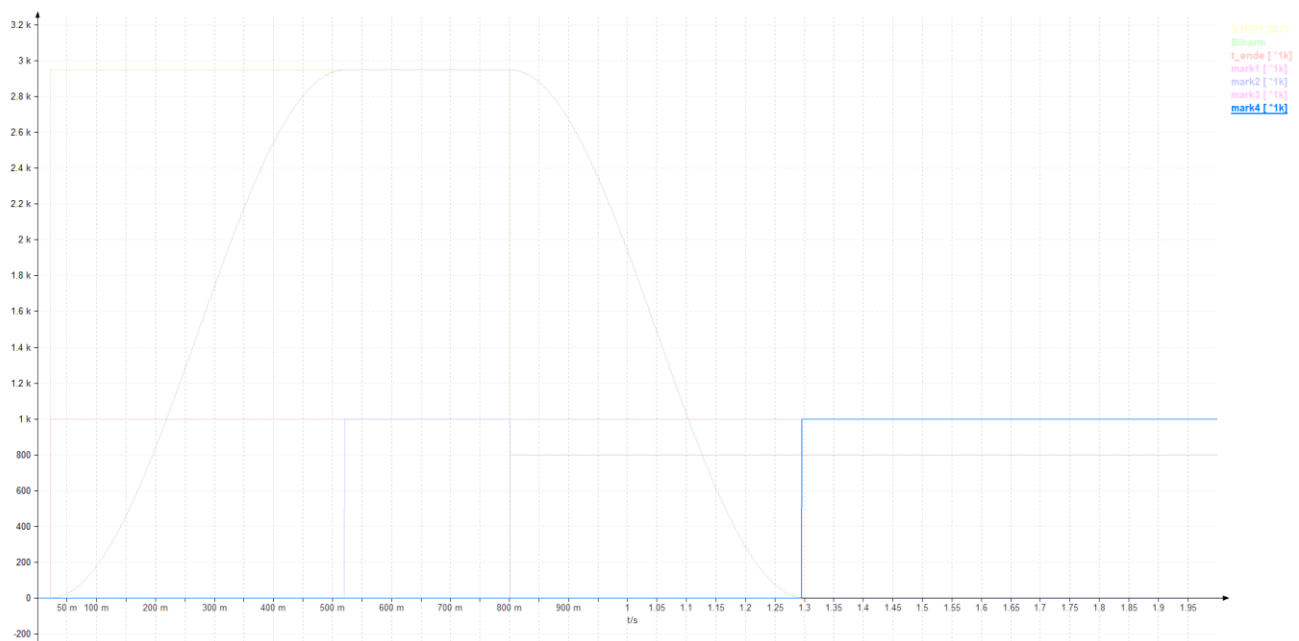


Abbildung 79: Mark4

Wenn der Motor zum Stillstand gekommen ist, wird Mark4 auf 1 gesetzt. (vgl. Abb.79) Das bedeutet, dass der ganze Vorgang beendet. Der Wert der biharmonischen Funktion soll

jetzt 0 sein genau wie Signalwert. Mark1 und 2 werden wieder auf 0 gesetzt. (siehe Abb. 75) Das System warte auf nächstes Starten.

Die Abb.80 zeigt das Ergebnis zum Vorgang. Die Rampenzeit ist gleich wie Bremszeit von 500ms. Und die Betriebszeit dauert 280ms für Test.

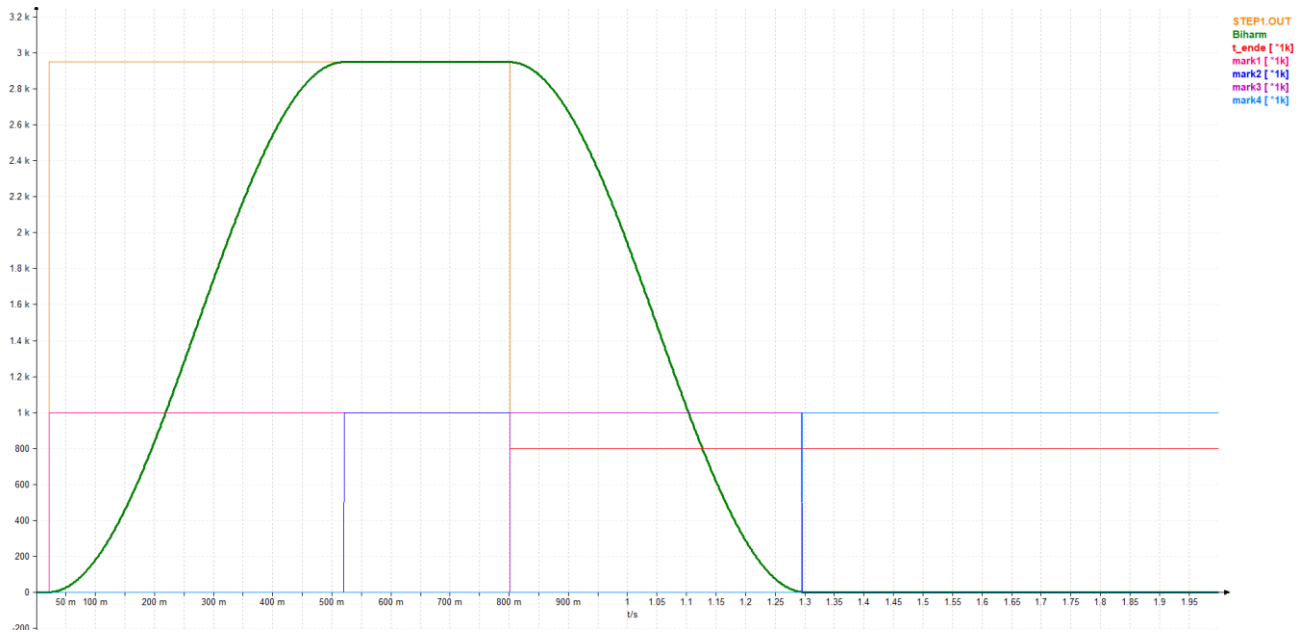


Abbildung 80: Vorgang der biharmonischen Funktion als Führungsgröße

10.5.5 Einbau der biharmonischen Funktion als Führungsgröße in System

Nun wird die biharmonische Funktion in System eingebaut. (siehe Abb. 81-83)

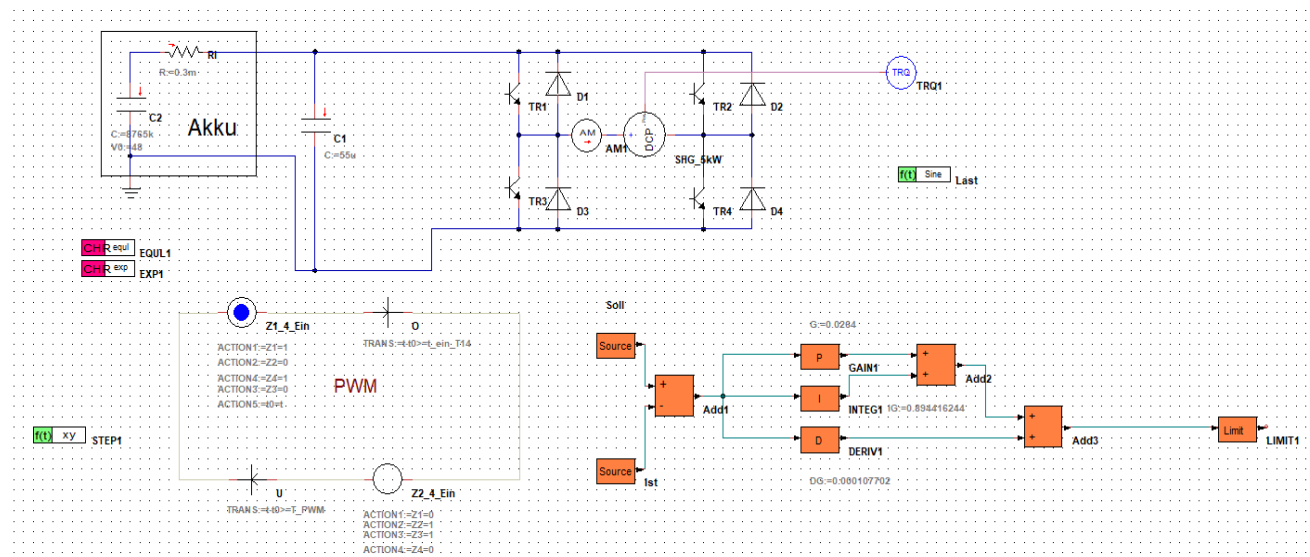


Abbildung 81: Einbau der biharmonischen Funktion in System

```

Deklaration / Initialisierung (bei Simulationsstart)
1 double Z1=0;
2 double Z2=0;
3 double Z3=0;
4 double Z4=0;
5 double t0=0;
6 double T_PWM=100u;
7 double t_ein_T14=0;
8 double t_ein_T23=0;
9 double OG=5;
10 double UG=-5;
11 double T_Ramp=500m;
12 double Biharm=0;
13 double T_Biharm=0;
14 double f_Biharm=0;
15 double t_start=0;
16 double mark1=0;
17 double t_ende=0;
18 double mark2=0;
19 double mark3=0;
20 double mark4=0;
21 double Biharm_max=0;
22

```

Abbildung 82: Deklaration des Systems mit biharmonischer Funktion

```

t_ein_T14=(LIMIT1.OUT/5+1)*T_PWM/2;
t_ein_T23=T_PWM-t_ein_T14;
T_Biharm=T_Ramp^4;
f_Biharm=1/T_Biharm;

if(STEP1.OUT>0&&mark1==0)
{
    mark1=1;
    t_start=t;
}

if (mark1==1&&mark2==0)
{
    Biharm=sin(2*PI*f_Biharm*(t-t_start))^2*STEP1.OUT;

    if(t>=t_start+T_Ramp)
    {
        Biharm=STEP1.OUT;
        mark2=1;
        Biharm_max=STEP1.OUT;
        mark3=0;
        mark4=0;
    }
}

if(STEP1.OUT==0)&&(t_start>0)&&(mark3==0)
{
    mark3=1;
    t_ende=t;
}

if (mark3==1&&mark2==1&&mark4==0)
{
    Biharm=cos(2*PI*f_Biharm*(t-t_ende))^2*Biharm_max;

    if(Biharm<=1)
    {
        Biharm=STEP1.OUT;
        mark4=1;
        mark1=0;
        mark2=0;
    }
}

```

Abbildung 83: Wertzuweisung des Systems mit biharmonischer Funktion

Die Abb. 84 zeigt das Ergebnis der Simulation der Drehzahlregelung von H-Brücke über PWM mit Anlauf und Bremsen durch biharmonische Funktion.

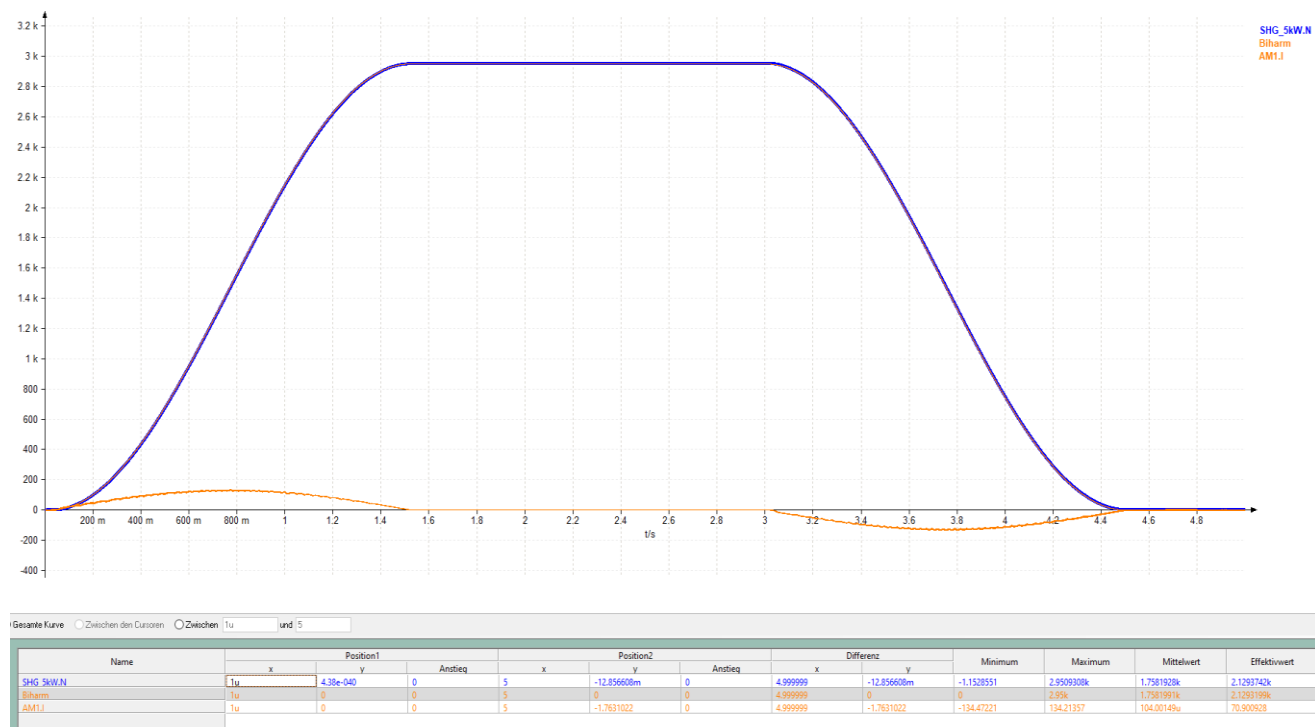


Abbildung 84: Drehzahlregelung von H-Brücke über PWM mit Anlauf und Bremsen durch biharmonische Funktion

10.6 Begrenzungsregelung

Bei vielen Anwendungen gibt es die Anforderung zu den Begrenzungen der Zwischengrößen x_i , damit die bestimmten Grenzwerte nicht über- oder unterschreiten dürfen.¹⁶ Bei der Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine darf der Ankerstrom den zulässigen max. Strom I_{max} nicht überschreiten. Dies liegt daran, dass zu hohe Ankerstrom zu einer thermischen Überlastung der Maschine führen könnte. Eine Lösung ist Begrenzungsregelung einzusetzen.¹⁷

¹⁶ vgl. Schröder, 2015, S. 117

¹⁷ Vgl. ebd.

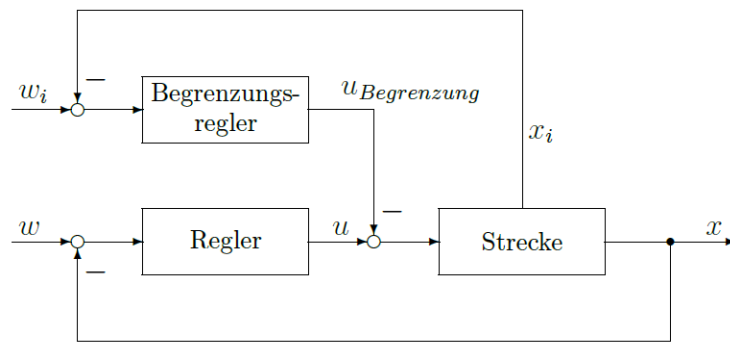


Abbildung 85: Regelkreis mit Begrenzungsregelung (Schröder, 2015, S. 118)

Zur Lösung von Begrenzungsaufgaben werden die Begrenzungsregler eingesetzt, die parallel zum Regler angebaut werden. Wird die Zwischengröße den zulässigen Grenzwert überschreiten, greifen die Begrenzungsregler ein.¹⁸ Der Aufbau des Regelkreises zeigt die Abb. 85.

10.6.1 Strombegrenzung

Der Strombegrenzungsregler wird nach der Abb. 85 zum Regelkreis parallel aufgebaut, damit der Ankerstrom unter dem zulässigen max. Strom begrenzt wird.

Die Abb.86 zeigt den PID-Regelkreis mit Strombegrenzungsregelkreis.

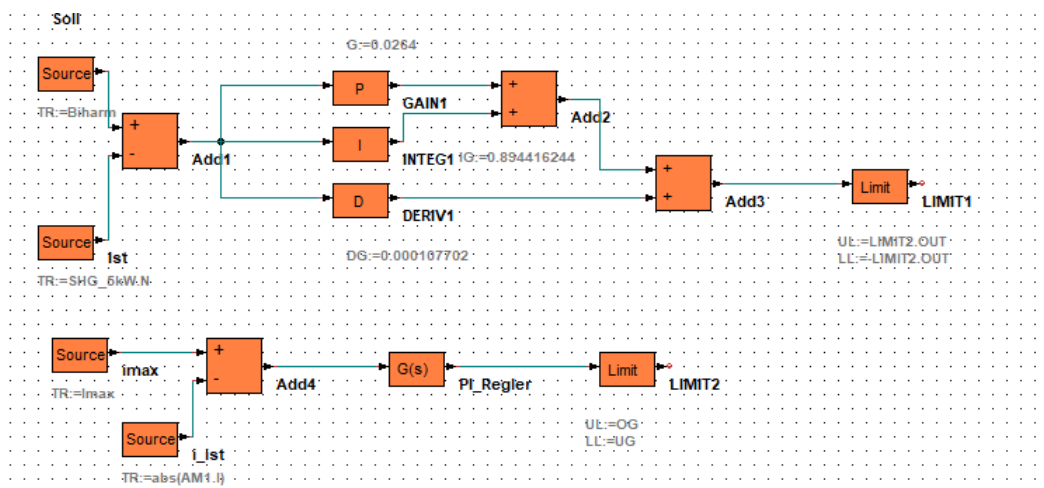


Abbildung 86: PID-Regelkreis mit Strombegrenzungsregelkreis

¹⁸ vgl. Schröder, 2015, S. 118

In Source Block „i_ist“ werden der vom Amper-Meter AM1 gemessenen absoluten Wert vom Ankerstrom gespeichert. I_{\max} ist der von Benutzer definierte max. zulässige Strom, der mit dem gemessenen Ankerstrom immer vergleicht. Hier wird der max. zulässige Strom von 325A eingestellt. (siehe Abb. 87).

```

5| double t0=0;
6| double T_PWM=100u;
7| double t_ein_T14=0;
8| double t_ein_T23=0;
9| double OG=5;
10| double UG=-5;
11| double T_Ramp=100m;
12| double Biharm=0;
13| double T_Biharm=0;
14| double f_Biharm=0;
15| double I_max=325;
16| double t_start=0;
17| double mark1=0;
18| double t_ende=0;
19| double mark2=0;
20| double mark3=0;
21| double mark4=0;
22| double Biharm_max=0;
23|

```

Abbildung 87: Deklaration der I_{\max}

Wenn absolute Wert von Ist-Strom $\text{abs}(I_A) < I_{\max}$ ist, wird der PI-Regler die positive Regeldifferenz aufintegrieren, und der Reglerausgang auch positiv angesteuert, wobei der Begrenzer nicht eingreift. Aber wegen der Ausgangsspannung von PWM wird die Stellgröße durch die Obergrenze von LIMIT 2 also 5V begrenzt.

Ist $\text{abs}(I_A) > I_{\max}$, dann wird es zur negativen Regeldifferenz führen. Dann greift der Begrenzer dabei ein. Die Stellgröße darf die Untergrenze also -5V nicht unterschreiten.

Die Parameter der PI-Regel werden nicht durch Berechnung eingestellt, sondern wird durch Versuche angegeben. Die Übertragungsfunktion vom PI-Regler wird nach Formel in Abb. 26 im Laplace-Bereich abgeleitet:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{E(p)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{pT_N} \right) = \frac{pK_pT_N + 1}{pT_N}$$

Formel 40: Übertragungsfunktion vom PI-Regler von Strombegrenzungsregelung

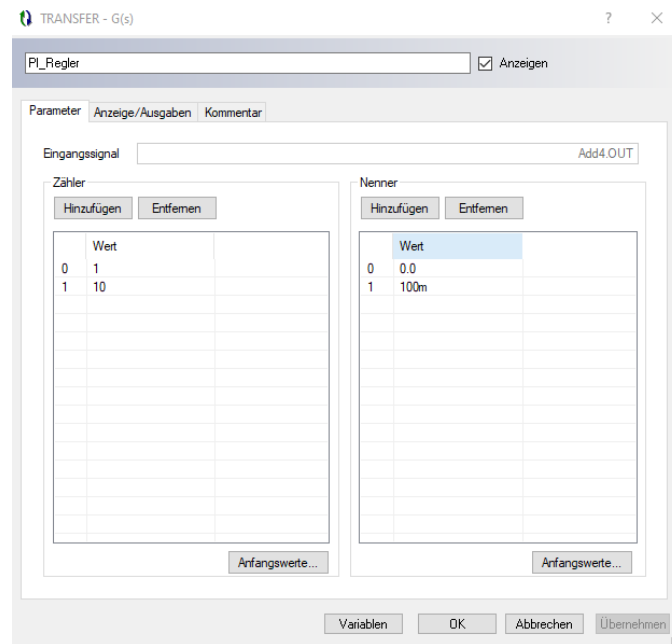


Abbildung 88: Einstellung der Parameter des PI-Reglers

Durch Versuche werden die Parameter für PI-Regler so eingestellt:

$$T_N = 100m$$

$$K_p \cdot T_N = 10$$

Um die Strombegrenzung für den Drehzahlregelkreis wirksam zu machen, wird der Ausgang der Drehzahlregelkreis von Ausgang des Strombegrenzungsregelkreises begrenzt. Das heißt, dass die Ober- und Untergrenze von LIMIT1 nun jeweils LIMIT2.OUT und -LIMIT2.OUT sind. (siehe Abb. 89)

Die Rampenzeit wird nun als 100ms und sinusförmige Last mit Amplitude von 5Nm eingestellt, damit wird es überprüft, ob der Ankerstrom durch den Begrenzungsregelkreis begrenzt wird.

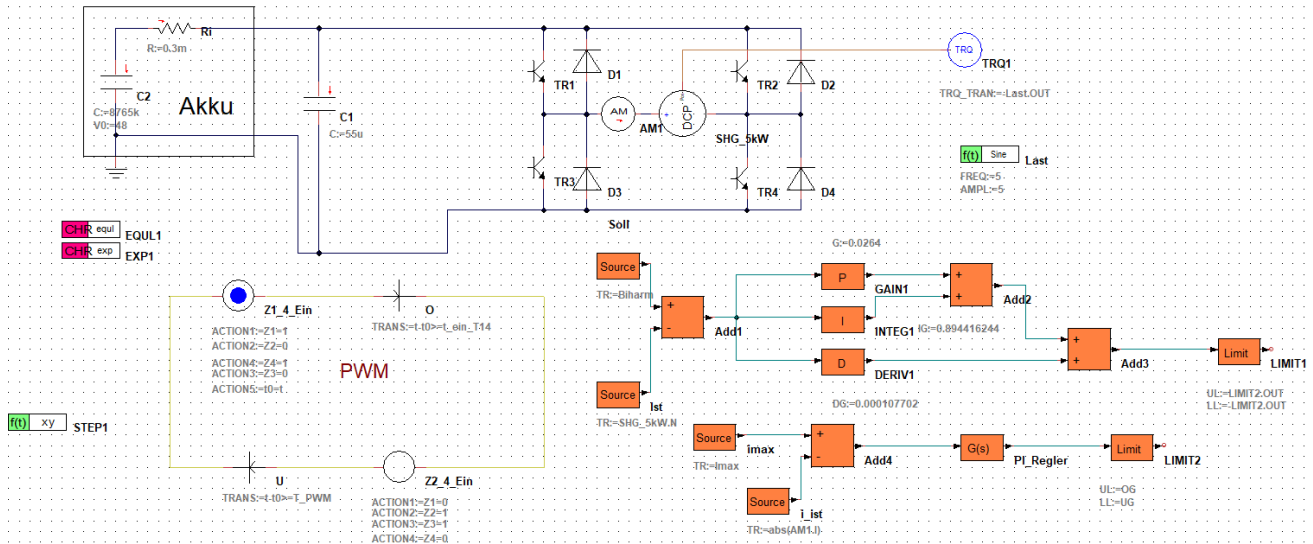


Abbildung 89: Simulationsschaltplan mit PID-Regelkreis und Strombegrenzungsregelkreis

Die Simulation ergibt sich ein unerwartetes Ergebnis. Trotzdem die Strombegrenzung beim Anlauf des Motors funktioniert, versagt die aber beim Bremsen. Die Drehzahl bei Bremsen wird nicht geregelt wie erwartet, sondern beschleunigt in die andere Drehrichtung. (siehe. Abb. 90)

Es ist also ein anderes Verfahren zur Regelung der Drehzahlen und gleichzeitigen Begrenzung des Stroms einzusetzen.

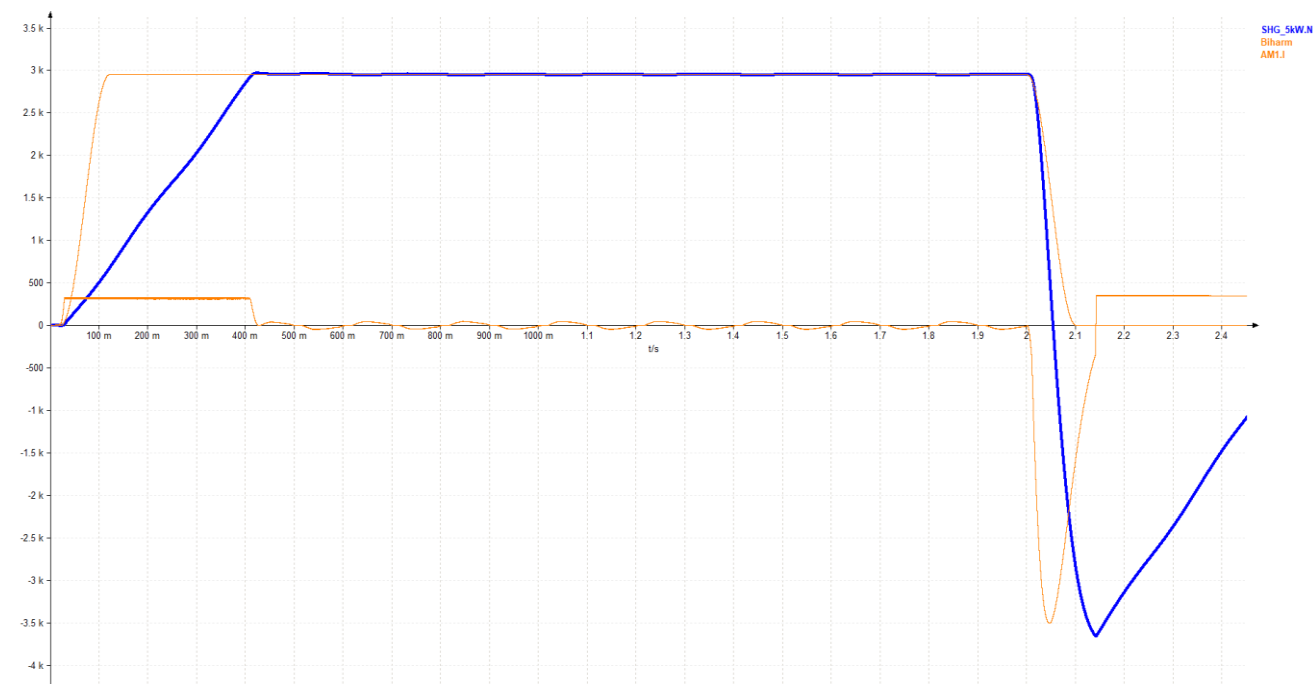


Abbildung 90: Drehzahlregelung mit PID-Regelkreis und Strombegrenzungsregelkreis

10.7 Drehzahlregelung mit Kaskadenregelung

Die andere Möglichkeit zur Drehzahlregelung ist Kaskadenregelung nach dem Kapitel 8, mit der die Drehzahl und Strom in einem Kaskadenregelkreis geregelt werden.

Der Kaskadenregelkreis zur Drehzahlregelung hat zwei Regelkreise. Ein davon ist der innere Regelkreis, der den Ankerstrom regelt.

10.7.1 Parametereinstellung nach dem Betragsoptimum

Nach dem Kapitel 8.1 wird der Stromkreisregler nach Betragsoptimum eingestellt.

Es gibt folgende Parameter zu bestimmen:

K_{Si} , K_i , K_{SR} , τ_1 und τ_0

- Bestimmung von K_i

K_i ist die Verstärkungsfaktor der Strommessung bzw. des Stromsensors. Da in Simulation wird Ankerstrom direkt von Amper-Meter abgelesen, ist K_i gleich 1 also ohne Verstärkung.

- Bestimmung von K_{SR}

Der Verstärkungsfaktor des Stromrichters K_{SR} ist abhängig von Zusammenhang zwischen Ankerstrom und Digitalwert der PWM. Das Tastverhältnis vom Ausgang des LIMIT1 gesteuert wird. Und der Ankerstrom ist vom Tastverhältnis abhängig. Dadurch kann man die Beziehung zwischen Ein- und Ausgangswert so feststellen:

$$K_{SR} = \frac{X_a}{X_e} = \frac{I_A}{\text{Digitalwert der PWM}}$$

Formel 41: Bestimmung der K_{SR}

Nach Maschengleichung von Ankerkreis ist der max. Ankerstrom (siehe Abb.1 und Formel 2):

$$|I_{Amax}| = \frac{|U_{Amax}|}{R_A} = \frac{\pm 48V}{0,0135\Omega} \approx \pm 3555,56A$$

Die PWM hat die max. Ausgangsdigitalwert zwischen -5V und 5V

Mit Formel 41:

$$K_{SR} = \left| \frac{X_a}{X_e} \right| = \frac{3555,56}{5} \approx \mathbf{711,11}$$

- Bestimmung von K_{Si}

Der Verstärkungsfaktor der Strecke des Stromregelkreises K_{Si} wird nach Formel 30 berechnet:

$$K_{Si} = \frac{K_{SR} \cdot K_i}{R_A} = \frac{711,11 \cdot 1}{0,0135} \approx \mathbf{52674,81}$$

- Bestimmung von τ_1 und τ_0

Nach der Regel wird die Vorhaltzeitkonstante τ_1 des PI-Reglers gleich dieser Zeitkonstante gesetzt, also:

$$\tau_A = \tau_1 = \mathbf{0,0274s}$$

Nach Formel 31 wird Integrationszeitkonstante τ_0 bestimmt:

$$\tau_0 = 2 \cdot \tau_\Sigma \cdot K_{Si} = 2 * 50\mu * 52674,81 \approx \mathbf{5,27s}$$

$$\text{Mit } \tau_\Sigma = \frac{T_{PWM}}{2} = \frac{100\mu s}{2} = 50\mu s$$

Die Übertragungsfunktion der PI-Regler in Kaskadenregelung für Stromkreis nach Formel 29:

$$G_{Ri}(p) = \frac{\tau_1 \cdot p + 1}{\tau_0 \cdot p} = \frac{\mathbf{0,0274 \cdot p + 1}}{\mathbf{5,27 \cdot p}}$$

Und für Stromstrecke:

$$G_{si}(p) = \frac{K_{Si}}{(1 + p\tau_A)(1 + p\tau_\Sigma)} = \frac{52674,81}{(1 + 0,0274p)(1 + 50\mu p)}$$

$$= \frac{\mathbf{52674,81}}{\mathbf{1,37 * 10^{-6} \cdot p^2 + 0,02745 \cdot p + 1}}$$

Die Abb.91 zeigt das Bode-Diagramm von Stromstrecke ohne Regelung:

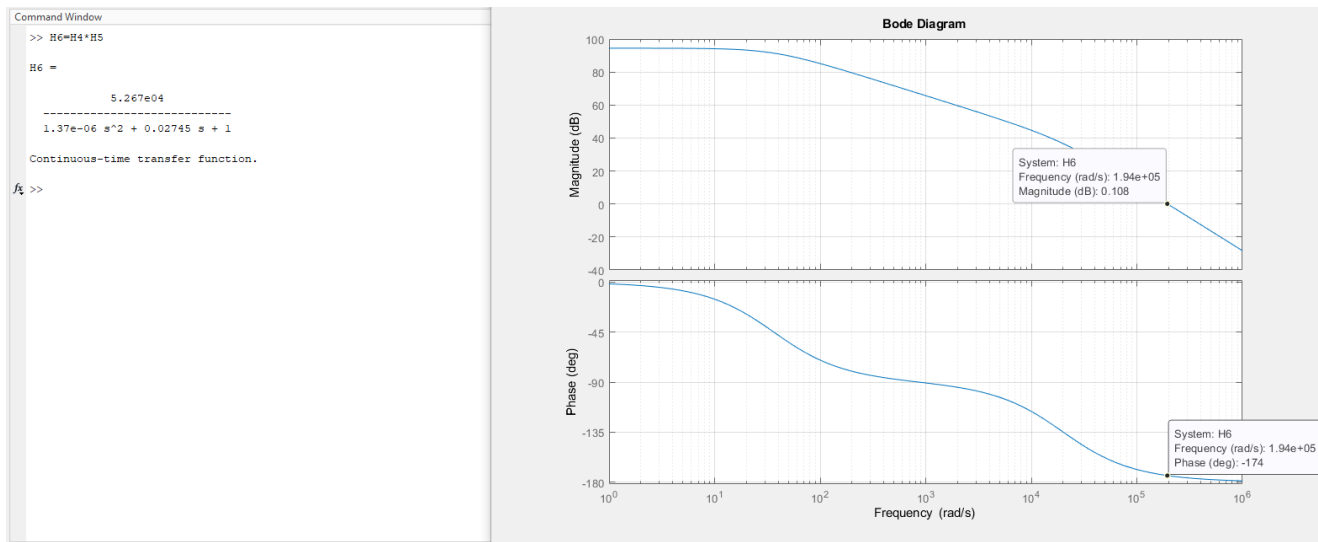


Abbildung 91: Bode-Diagramm von Stromstrecke ohne Regelung

Nach der Zusammensetzung bekommt man den optimierten Stromkreis nach dem Betragsoptimum:

$$G_{0i}(p) = G_{Ri}(p) \cdot G_{Si}(p) = \frac{\tau_1 \cdot p + 1}{\tau_0 \cdot p} \cdot \frac{K_{Si}}{(1 + p\tau_A)(1 + p\tau_\Sigma)}$$

$$= \frac{52674,81}{5,72 \cdot p(1 + 50\mu p)}$$

Die Abb.92 zeigt das Bode-Diagramm von Stromstrecke mit Regelung nach Betragsoptimum:

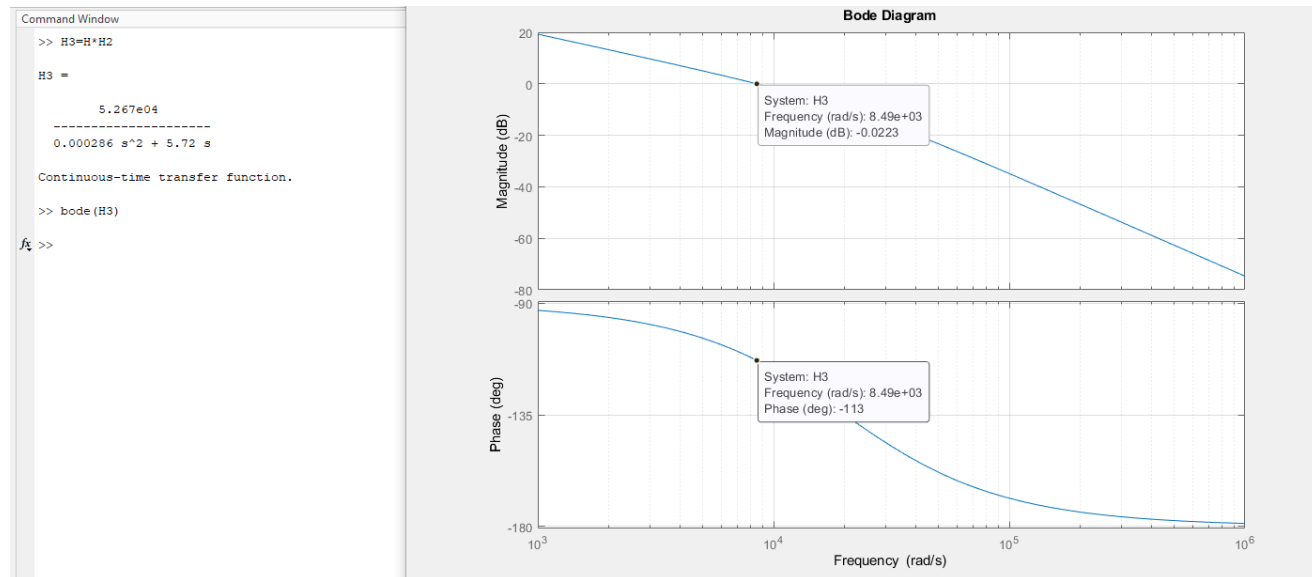


Abbildung 92: Bode-Diagramm der gegeregelten Stromstrecke nach dem Betragsoptimum

10.7.2 Innerer Regelkreis - Stromregelkreis

Der innere Regelkreis vergleicht den max. Strom I_{\max} mit dem Ist-Strom i_{ist} . Die Regelabweichung wird dann durch PI-Regler geregelt. Die Stellgröße wird durch LIMIT1 zwischen -5V und 5V wegen PWM begrenzt.

Mit Formel 29.2 werden die Parameter für Stromregler berechnet und dann in Blöcke P_Strom und I_Strom eingegeben:

$$\frac{1}{K_{Ii}} = \tau_0 \Rightarrow K_{Ii} = \frac{1}{\tau_0} = \frac{1}{5,27} \approx \mathbf{0,19}$$

$$\frac{K_{pi}}{K_{Ii}} = \tau_1 \Rightarrow K_{pi} = K_I \cdot \tau_1 = 0,19 \cdot 0,0274 \approx \mathbf{0,005}$$

Die Abb. 93 zeigt den Aufbau des inneren Regelkreises also Stromregelkreises von Kaskadenregelung mit dem Einsatz von Parametern in Portunus.

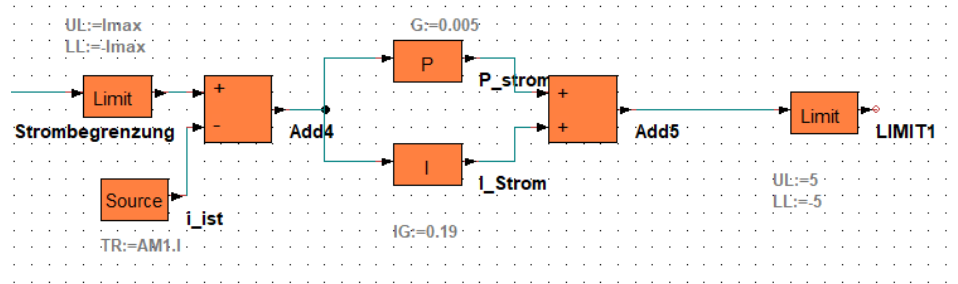


Abbildung 93: Innerer Regelkreis-Stromregelkreis

10.7.3 Parametereinstellung nach dem symmetrischen Optimum

Laut Kapitel 8.2 wird der Drehzahlregler nach dem symmetrischen Optimum eingestellt.

Es gibt folgende Parameter zu bestimmen:

K_{sw} , K_T , τ_Σ , τ_s , τ_1 und τ_0

- Bestimmung von K_T

Denn die Drehzahl wird mit Winkelgeschwindigkeit ω [rad/s] geregelt, während der Drehzahlsensor die Drehzahl n mit Einheit von [1/min] angibt. Nach Abb. 31 ist Winkelgeschwindigkeit als Eingangsgröße X_e für den Drehzahlsensor und Drehzahl als Ausgangsgröße X_a . Dann wird der Verstärkungsfaktor des Tachometers bzw. des Drehzahlsensors K_T ähnlich wie Formel 41 berechnet:

$$K_T = \frac{X_a}{X_e} = \frac{n}{\omega} = \frac{60}{2 \cdot \pi} \approx 9,55$$

- Bestimmung von K_{sw}

Der Verstärkungsfaktor der Strecke des Drehzahlregelkreises K_{sw} wird nach Formel 32.1 berechnet:

$$K_{sw} = \frac{R_A \cdot K_T}{K_i \cdot K\Phi} = \frac{0,0135 \cdot 9,55}{1 \cdot 0,125} \approx 1,03$$

- Bestimmung von τ_s

τ_s ist größte Zeitkonstante in Strecke. Nach Einstellregel ist τ_s gleich elektromechanische Zeitkonstante τ_M :

$$\tau_s = \tau_M = 0,0432s$$

- Bestimmung von τ_1

Nach Formel 32.2 wird die Vorhaltzeitkonstante τ_1 des PI-Reglers berechnet:

$$\tau_1 = 4 \cdot \tau'_\Sigma = 4 \cdot 100\mu\text{s} = \mathbf{0,0004\text{s}}$$

Mit $\tau'_\Sigma = 2 \cdot \tau_\Sigma = T_{PWM} = 100\mu\text{s}$

- Bestimmung von τ_0

Die Integrationszeitkonstante τ_0 wird nach Formel 32.3 berechnet:

$$\tau_0 = 8 \cdot \frac{(\tau'_\Sigma)^2}{\tau_s} \cdot K_{S\omega} = 8 \cdot \frac{100\mu\text{s}^2}{0,0432\text{s}} \cdot 1,03 = \mathbf{1,91\mu\text{s}}$$

Nach Abb.36 kann man die Übertragungsfunktion der Drehzahlstrecke einstellen:

$$G_{s\omega}(p) = \frac{K_{S\omega}}{p\tau_s(1 + \tau'_\Sigma p)} = \frac{1,03}{0,0432 \cdot p(1 + 100\mu p)}$$

$$= \frac{\mathbf{1,03}}{\mathbf{4,32 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 0,0432 \cdot p}}$$

Die Abb.94 zeigt das Bode-Diagramm von Drehzahlstrecke ohne Regelung:

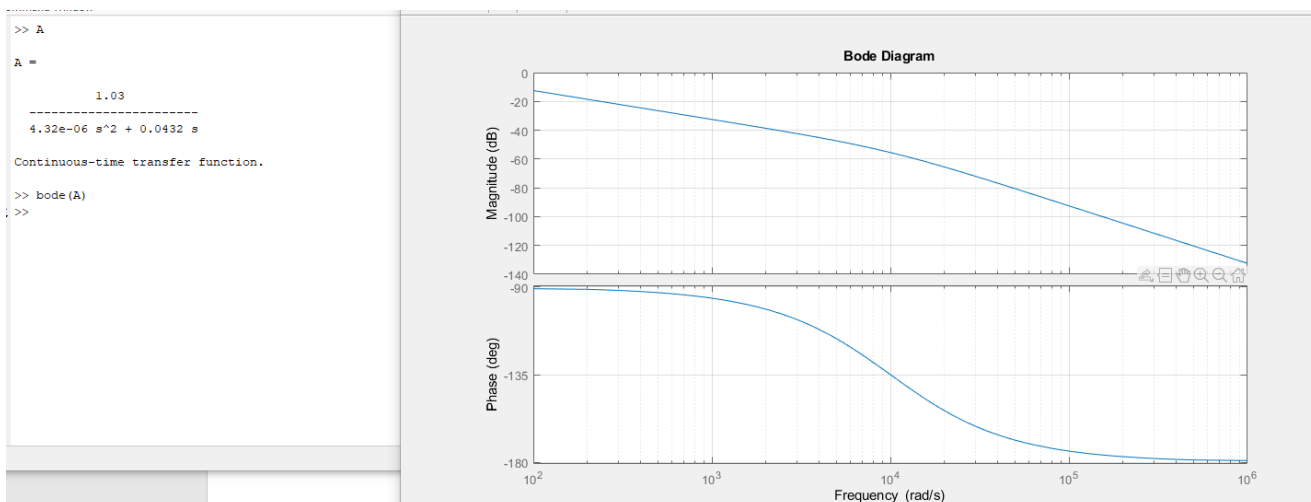


Abbildung 94: Bode-Diagramm der Drehzahlstrecke ohne Regelung

Die Übertragungsfunktion der PI-Regler in Kaskadenregelung für Drehzahlkreis nach Formel 29:

$$G_{R\omega}(p) = \frac{\tau_1 \cdot p + 1}{\tau_0 \cdot p} = \frac{0,0004s \cdot p + 1}{1,91\mu s \cdot p}$$

Nach der Zusammensetzung bekommt man den optimierten Drehzahlkreis nach dem symmetrischen Optimum:

$$\begin{aligned} G_{0\omega}(p) &= G_{S\omega}(p) \cdot G_{R\omega}(p) = \frac{\tau_1 \cdot p + 1}{\tau_0 \cdot p} \cdot \frac{K_{S\omega}}{(1 + \tau'_\Sigma p)p\tau_s} \\ &= \frac{0,0004s \cdot p + 1}{1,91\mu s \cdot p} * \frac{1,03}{4,32 * 10^{-6} \cdot p^2 + 0,0432 \cdot p} \\ &= \frac{0,000412 \cdot p + 1,03}{8,251 * 10^{-12} \cdot p^3 + 8,251 * 10^{-8} \cdot p^2} \end{aligned}$$

Die Abb. 95 zeigt das Bode-Diagramm der Drehzahlstrecke mit Regelung nach dem symmetrischen Optimum.

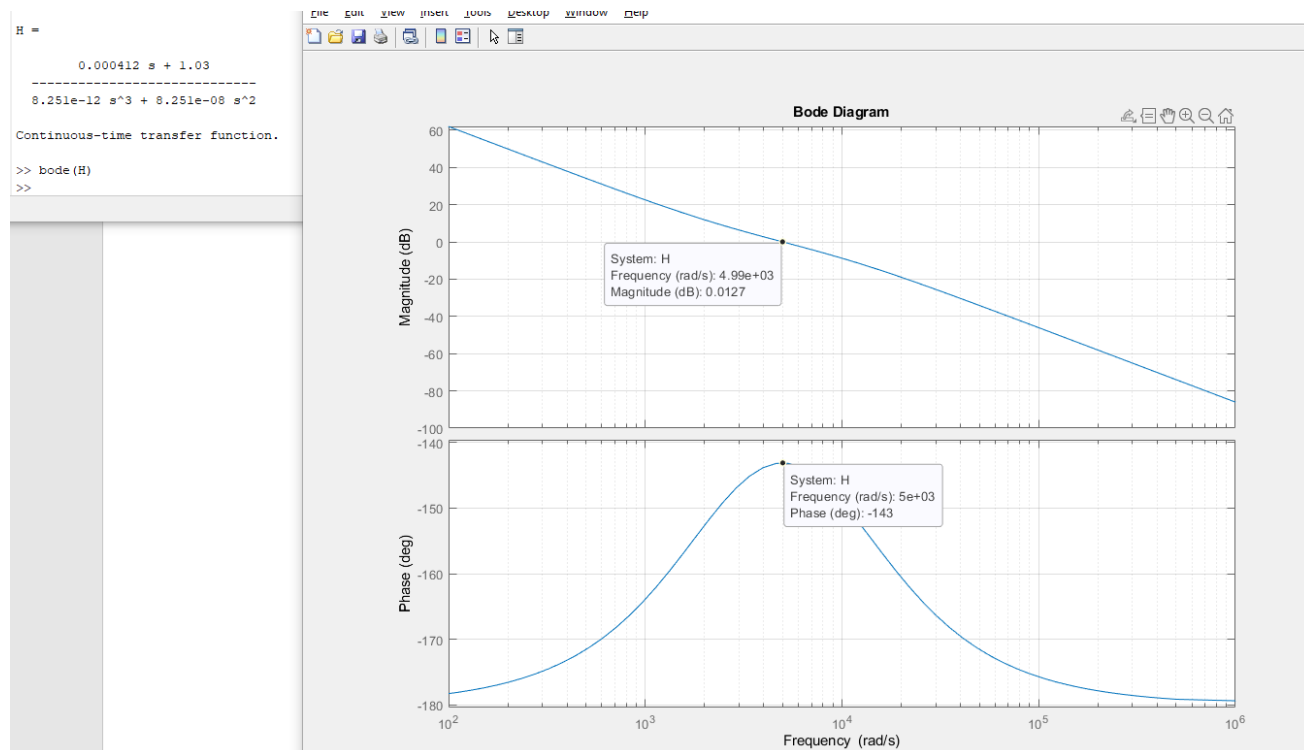


Abbildung 95: Bode-Diagramm von Drehzahlstrecke mit Regelung nach dem symmetrischen Optimum

10.7.4 Äußerer Regelkreis – Drehzahlregelkreis

Im Drehzahlregelkreis wird die Ist-Drehzahl mit Soll-Drehzahl in Form von Winkelgeschwindigkeit verglichen. Die Soll-Drehzahl also die Führungsgröße wird durch die biharmonische Funktion (siehe Kapitel 10.5.4 und 10.5.5) gesteuert.

Die Abb.96 zeigt den Aufbau des Drehzahlregelkreis in Portunus. Die Regelabweichung wird durch PI-Regler geregelt. Die Parameter des Drehzahlreglers kann man nach Formel 29.2 berechnen und werden in entsprechende Blöcke also P_omega und I_Omega eingegeben:

$$\frac{1}{K_I} = \tau_0 \Rightarrow K_{I\omega} = \frac{1}{\tau_0} = \frac{1}{1,91\mu s} \approx 523598,78$$

$$\frac{K_p}{K_I} = \tau_1 \Rightarrow K_{p\omega} = K_{I\omega} \cdot \tau_1 = 523598,78 \cdot 0,0004s \approx 209,44$$

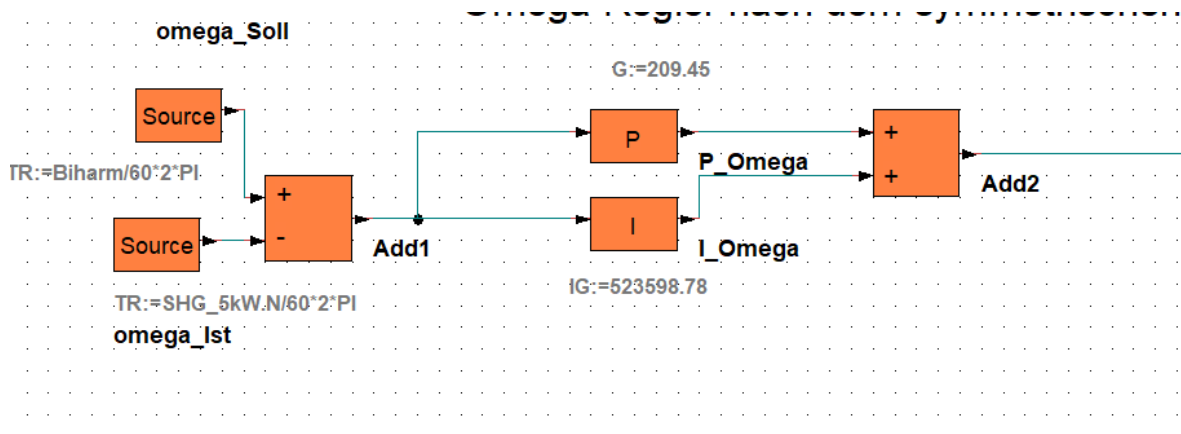


Abbildung 96: Äußerer Regelkreis-Drehzahlregelkreis

10.7.5 Kombinieren beider Regelkreise

Nun werden Drehzahlregelkreis und Stromregelkreis kombiniert.

Die Stellgröße von PI-Regler wird als Führungsgröße für Stromregelkreis angegeben und zwischen -Imax und Imax begrenzt, damit die Drehzahl durch den Stromregelkreis begrenzt wird. (siehe Abb. 97)

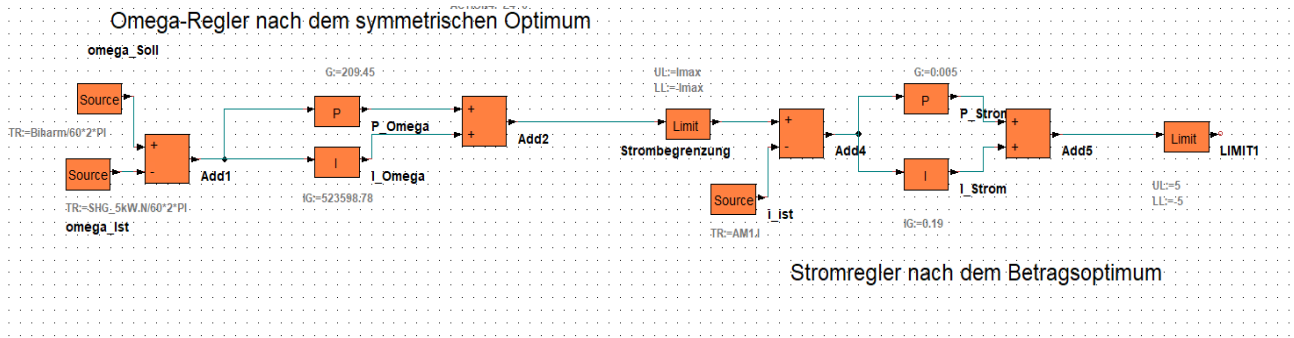


Abbildung 97:Kaskadenregelkreis für Drehzahlregelung

Die Abb.98 zeigt das Ergebnis zur Drehzahlregelung durch den Kaskadenregelkreis mit der Rampenzeit von 100ms.

Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, steigt die Drehzahl aufgrund der Strombegrenzung nur sehr langsam an. Der max. Strom wird auf etwa 300 A begrenzt, was die Erwartung erfüllt. Jedoch kann die Ist-Drehzahl dem Soll-Wert nicht folgen wegen der kleinen Rampenzeit.

Im Vergleich zum Ergebnis zur Drehzahlregelung mit PID-Regelkreis und Strombegrenzungsregelkreis (siehe Abb. 90) wirkt die Drehzahlregelung mit Kaskadenregelkreis auch beim Bremsen.

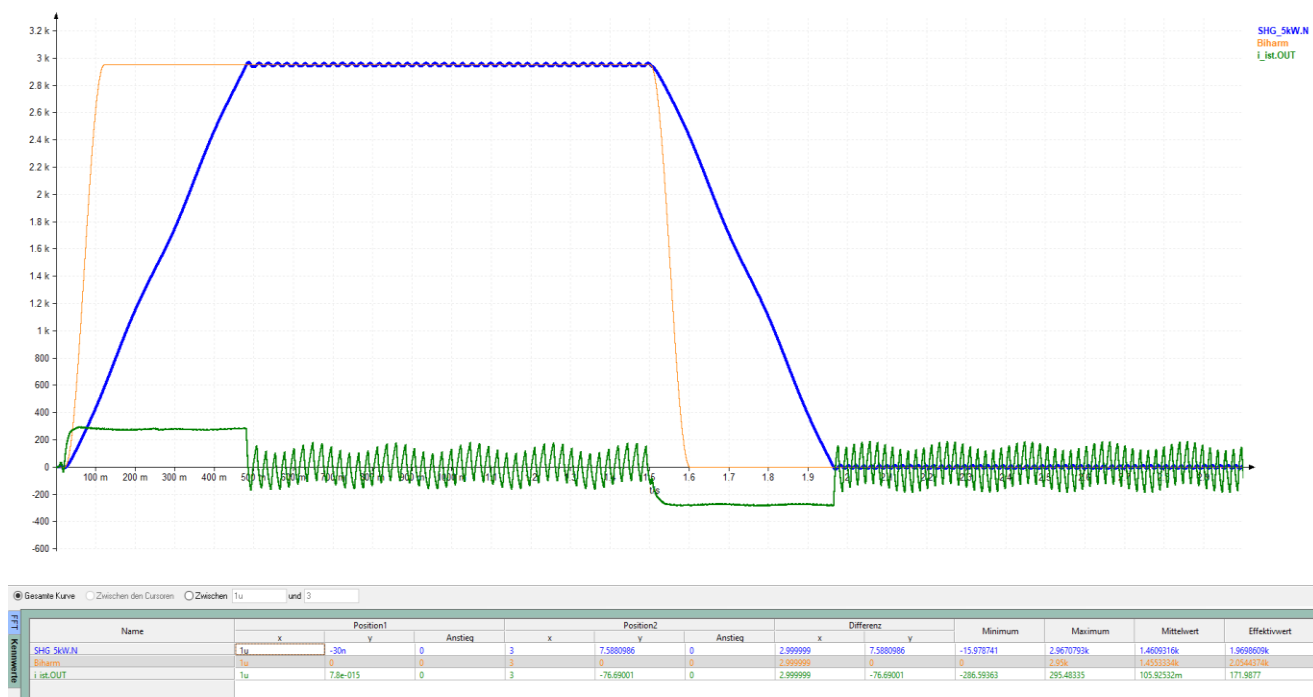


Abbildung 98: Drehzahlregelung durch Kaskadenregelkreis mit Rampenzeit von 100ms

Nun wird die Rampenzeit auf 500ms eingestellt, was noch zu dynamisch ist. (siehe Abb. 99) In der Realität sollte die Rampenzeit auf 1000ms oder 1500ms eingestellt werden.

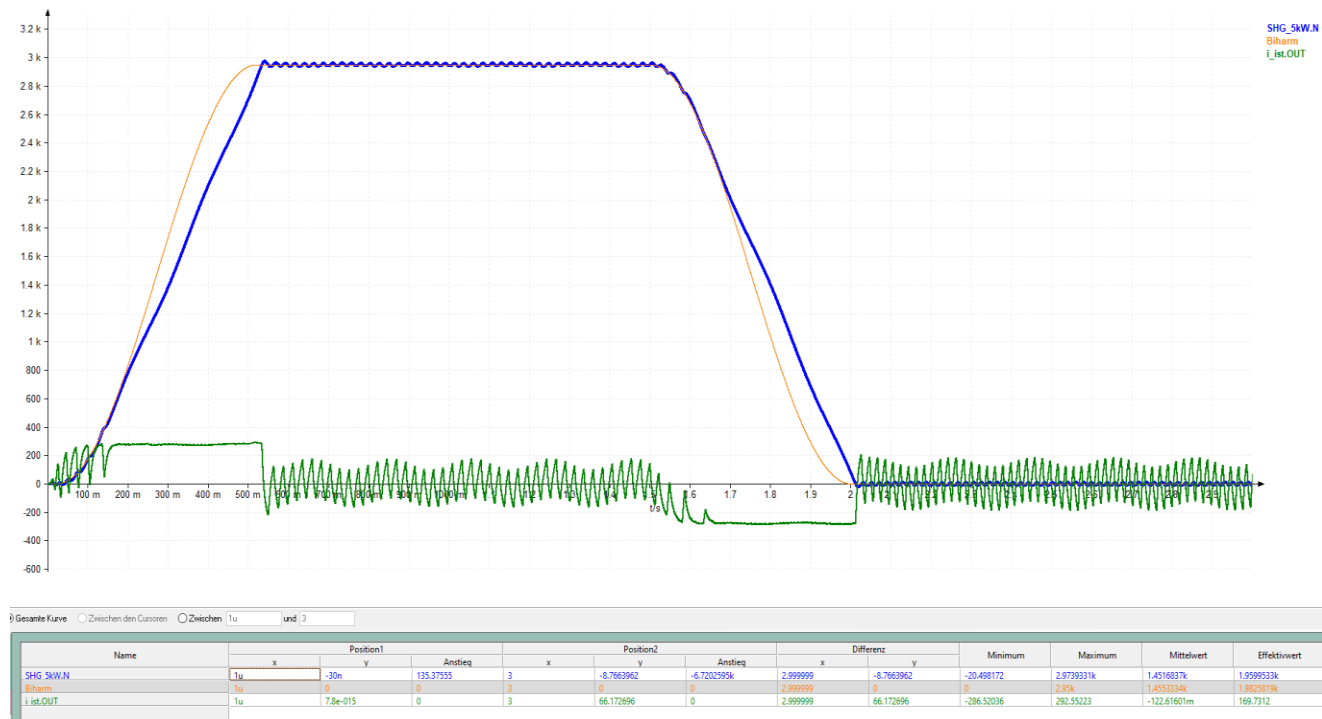


Abbildung 99: Drehzahlregelung durch Kaskadenregelkreis mit Rampenzeit von 500ms

Die Abb.100 zeigt das Ergebnis mit Rampenzeit von 1000ms, dabei die Ist-Drehzahl der Soll-Drehzahl gut folgt.

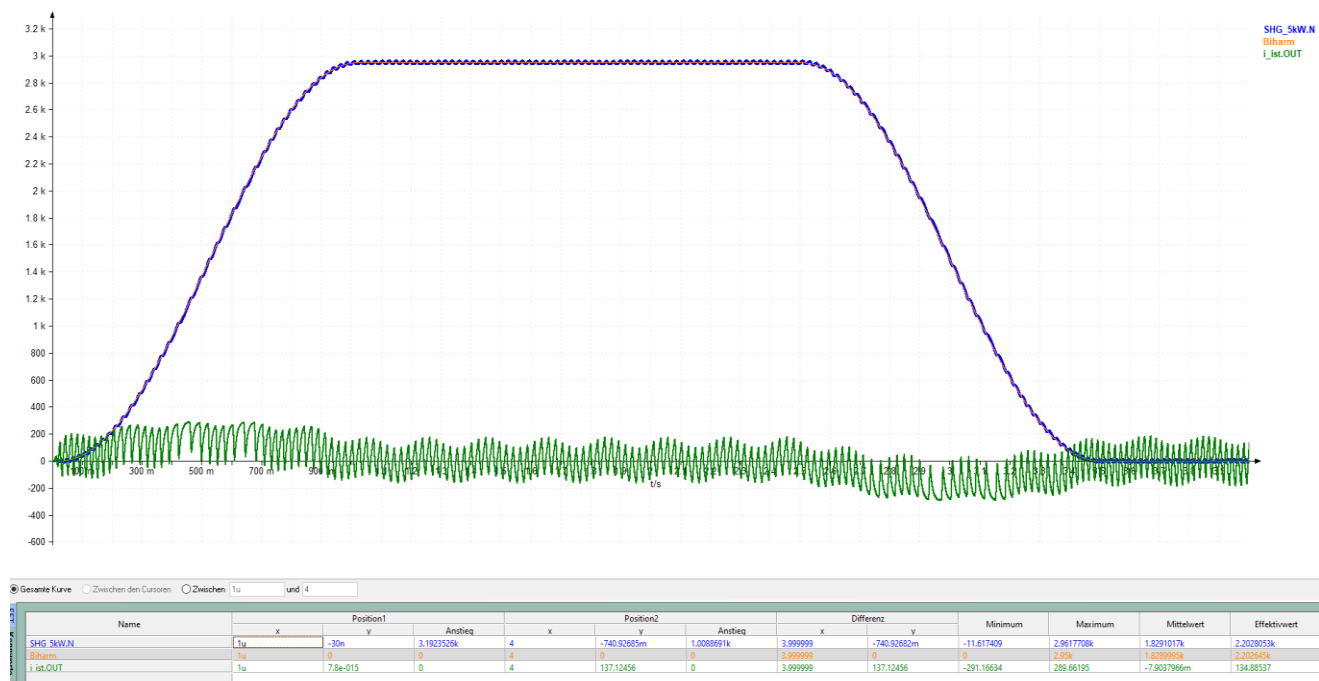


Abbildung 100: Drehzahlregelung durch Kaskadenregelkreis mit Rampenzeit von 1000ms

Die Abb. 101 zeigt den Simulationsschaltplan mit dem Kaskadenregelkreis.

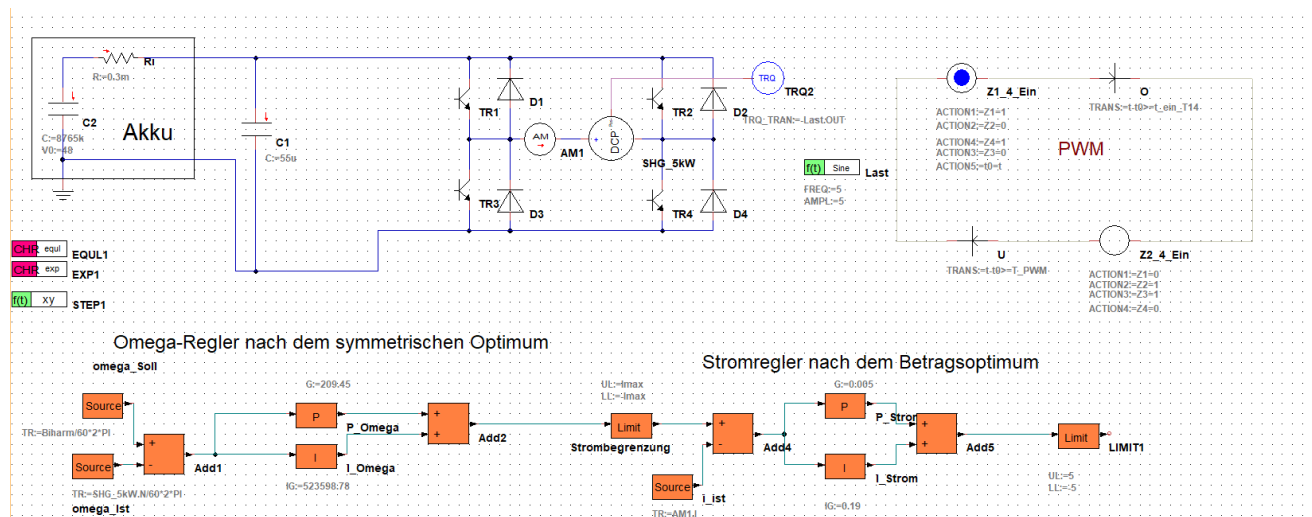


Abbildung 101: Simulationsschaltplan mit Kaskadenregelkreis

Zusammenfassung

Die Bachelor ist ein sehr wertvolles Erleben für meinen Studium. Die hat mir ermöglicht, das Gelernte mit den Kenntnissen aus Praxis zu kombinieren. Insbesondere bei der Regelung der Gleichstrommaschine mit Simulationssoftware „Portunus“.

Die Hauptpunkte:

1. Kenntnis von Simulationssoftware „Portunus“
2. Aufbau der H-Brücke über PWM
3. Modellierung der Gleichstrommaschine
4. Auslegung der verschiedenen Regler für Gleichstrommaschine (PID-Regelkreis und Kaskadenregelkreis)
5. sinnvolle und passende Entwürfe für Anwendung in Realität wie Rampenzeit

Vielen Dank für meinen Betreuer.

Quellverzeichnis

Literaturverzeichnis

Bate, Boulent (2009): PID – Einstellregeln. Dortmund, Deutschland.

Dowerueng, Arnuphap (1999): Elektrische Energietechnik, Clausthal, Deutschland: Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme.

Krüber, Wolfgang (O.J): Reglereinstellung nach der Sprungantwort, Koblenz, Deutschland.

Linse, Hermann/ Fischer, Rolf (2005): Elektrotechnik für Maschinenbauer, 12. Aufl., Wiesbaden, Deutschland: B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH.

Raisch, Jörg (O.J): Drehzahlregelung eines Gleichstrommotor, Berlin, Deutschland.

Rauchfuß, Lutz (2011): Elektrische Maschinen, Mittweida, Deutschland.

Rauchfuß, Lutz (2011): Geregelte Antriebe, Mittweida, Deutschland.

Rauchfuß, Lutz (2011): Grundlagen der elektrischen Antriebstechnik, Mittweida, Deutschland.

Schröder, Dierk (2015): Elektrische Antriebe-Regelung von Antriebssystemen 4.Auf., München, Deutschland: Springer-Verlag.

Spring, Eckhard (2009): Elektrische Maschinen. 2. Aufl., Berlin, Deutschland: Springer-Verlag.

Internetquellen

- Conrad (o. J): Elektromotoren-Aufbau, Funktionsweise und Arten einfach erklärt, online unter <https://www.conrad.de/de/ratgeber/technik-einfach-erklart/elektromotor.html>, zuletzt geprüft am 30,05,2021.
- Elecfans (2017): Spitzenwert der Absorptionsspannung, online unter <http://www.elecfans.com/yuanqijian/dianrongqi/20170602521049.html>, zuletzt geprüft am 04,01,2022.
- Kafader, Urs (2016): DC- oder BLDC-Motor? Die Unterschiede, online unter <https://www.all-electronics.de/automatisierung/dc-oder-blcd-motor-unterschiede.html>, zuletzt geprüft am 05,05,2021.
- Leuchtenzentrale (2017): Schutzkleinspannung, online unter <https://www.leuchtenzentrale.de/schutzkleinspannung>, zuletzt geprüft am 05,05,2021.
- Mikrocontroller (o. J): Zwischenkreiskapazität, online unter <https://www.mikrocontroller.net/articles/Zwischenkreiskapazit%C3%A4t>, zuletzt geprüft am 15,09,2021.
- Pitter, Kölscher (2009): Datei:Vierquadranten, online unter <https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Vierquadranten.svg>, zuletzt geprüft am 21,09,2021.
- RoboterNETZ (2008): Regelungstechnik, online unter https://webuser.hs-furtwangen.de/~hoenig/2016/Wiki/rt_s09/Literatur/Regelungstechnik%20-%20RN-Wissen.htm, zuletzt geprüft am 19,12,2021
- Studyflix (2021): Regelungstechnik-PID Regler, online unter <https://studyflix.de/informatik/pid-regler-1450>, zuletzt geprüft am 20,12,2021
- Weisenhorn, Martin (2016): Laborübung, H-Brücke für DC-Motor, online unter https://home.zhaw.ch/weie/EK1/Laboruebungen/H_Bruecke.pdf, zuletzt geprüft am 05,06,2021.
- Werner, Christian (1999): Elektromotoren- Gleichstrommotoren, online unter <http://free-web.dnet.it/motor/Kap3.htm>, zuletzt geprüft am 08,06,2021.
- Wikipedia (2017): Vierquadrantensteller, online unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Vierquadrantensteller>, zuletzt geprüft am 05,06,2021.
- Wöste, Michael (2015): Motorsteuerung mit H-Bridge, online unter <http://www.amateurfunkbasteln.de/hbridge1/>, zuletzt geprüft am 01,06,2021.

Anlagen

Teil1.....H_Bruecke_LePeiJun_gere-
gelter Motor_Biharm_Strombegrenzung_Bremsen.ecd

Teil2.....H_Bruecke__LePei
Jun_Kaskade_Drehzahlregler.ecd

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Bachelorarbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 02.01.2022

Le,PeiJun