

Diplomarbeit

# Entwicklung einer Kaskadenregelung zur Positionsregelung von Gleichstrommotoren im Automobilbereich

ausgeführt zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplomingenieurs unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thilo Sauter  
mit  
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Friedrich Bauer

am

**Institut für Computertechnik (E384)**  
der Technischen Universität Wien

durch

Michael Eckel  
Matr.Nr. 1129027  
Lichtensteinstraße 22d/8, 2130 Mistelbach

24.04.2020

---

## Kurzfassung

Bei der Entwicklung von Motorsteuergeräten für Verbrennungskraftmaschinen müssen die unterschiedlichen Einsatzgebiete der Fahrzeuge und die daraus resultierenden Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden. Diese Vielfalt stellt sowohl an die Hardware als auch an die Software immer wieder neue Anforderungen.

Vor allem die Komplexität der Software steigt daher mehr und mehr an. So müssen zum Beispiel Alterungseffekte der Komponenten, welche für den Antrieb eines Fahrzeuges benötigt werden, ausgeglichen werden können. Nicht nur Hardwareschutz und Stabilität sind ein wichtiger Aspekt bei der Softwareentwicklung, auch das Haushalten mit den begrenzten Ressourcen des Steuergerätes wie Laufzeit oder Speicherkapazität spielen eine entscheidende Rolle.

Im Zuge dieser Arbeit wurde die Regelung der elektronischen Drosselklappe um einen Stromregelkreis als innere Kaskade der Lageregelung erweitert. Durch die Messung des Stromes soll auf Schwankungen der Regelparameter besser reagiert werden können. Dieses Konzept soll unter den Gesichtspunkten von Aufwand zum Nutzen mit bereits bestehenden Regelungskonzepten wie der Lageregelung als PID-Regler alleine, einer Temperaturkompensation der erwähnten PID-Regelung und einer selbstadaptierenden Regelung für H-Brücken gespeisten DC-Motoren untersucht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass sich durch die Anforderungen des Stromregelkreises an die Dynamik der Berechnung vor allem die Laufzeit erheblich ansteigt. Der wesentliche Anteil entfällt auf die Messung des Iststroms und nicht auf die neu eingeführte Kaskade. Auch anhand von Gütekriterien für die Regelungskenngrößen ist kein Vorteil durch die Regelung des Stroms zu erzielen. Die Stromregelung stellt somit keine sinnvolle Erweiterung für die Lageregelung der elektronischen Drosselklappe dar; auch unter dem Gesichtspunkt der Anpassungsfähigkeit für Parameterschwankungen ist kein Vorteil nachzuweisen. Für andere Steller, die mit dem Motorsteuergerät gesteuert werden, ist jedoch eine neue Bewertung aufgrund unterschiedlicher Rahmenbedingungen durchzuführen.

## Abstract

When developing engine control units for combustion engines, different areas of application of vehicles and the resulting environmental conditions should be taken into account. This variety leads to new demands on both the hardware and the software.

Especially the complexity of the software increases more and more. For example, aging effects of the components, required to drive a vehicle, shall be covered. Not only hardware protection and stability are an important aspect in software development, also handling limited resources of the control unit such as runtime or memory capacity play a decisive role.

The goal of the thesis is the extension of the control of the electrical throttle valve by a current control as an inner cascade of the position control. Impacts based on fluctuations in the control parameters shall be reduced, by measuring the current. Under the aspect of benefit-cost-analysis the concept shall be investigated with existing control concepts such as position control as PID-controller, a temperature compensation of the mentioned PID-control and a self-adapting control for H-bridge fed DC motors. The results show an increase of runtime. This is based on the dynamik needs of the current control loop. The main part is accounted by the measurement of the actual current and not by the newly introduced cascade. In respect of quality criteria for the control parameters, no advantage can be obtained by controlling the current. The current control is therefore not a useful extension for the position control of the electronic throttle valve; also under the aspect of adaptability to parameter fluctuations, no advantage can be proven. For other actuators, controlled by the engine control unit, a new evaluation must be carried out due to different conditions.

## Danksagung

Vorab möchte ich mich bei jene Personen bedanken, die mich bei der Durchführung der Diplomarbeit unterstützt haben. Einen besonderen Dank möchte ich meinem Betreuer Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Friedrich Bauer aussprechen, der mit jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand. Weiters möchte ich mich bei meinen Kollegen der Firma Robert Bosch AG, Josef Ernsthofer und Christian Fichtl, für die vielen fachlichen Gespräche und Unterstützung während der Durchführung der Arbeit bedanken. Ebenso Dank gilt meiner Schwester Raffaella Eckel, welche mir bei der Verbesserung meines Schreibstils und der Korrektur meiner Arbeit zur Seite stand.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung	1
1.2	Aufbau der Arbeit	2
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1	Regelungskonzepte im Motorsteuergerät	3
2.1.1	Selbstadaptierender Regler	4
2.1.2	PID-Regler	5
2.2	Regelungskonzepte für Gleichstrommotoren	7
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>9</b>
3.1	Drosselklappe	9
3.1.1	Aufbau	10
3.1.2	Arbeitsbereich und typische Kenngrößen	11
3.2	Leistungsendstufe	12
3.2.1	Schaltverhalten	13
3.2.2	Stromrücklesung	14
3.3	Motorsteuerung	16
3.3.1	Architektur	18
3.3.2	Device Encapsulation	21
<b>4</b>	<b>Implementierung</b>	<b>25</b>
4.1	Modellbildung	25
4.1.1	Modellierung des Gleichstrommotors	25
4.1.2	Modellierung der Leistungsendstufe	27
4.2	Regelkreis	28
4.2.1	Strombegrenzungsregelung	30
4.2.2	Windup-Maßnahme	31
4.3	Diagnosen	32
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>36</b>
5.1	Regelverhalten	36
5.2	Ressourcenverbrauch	42
5.2.1	Messaufbau	44
5.2.2	PID-Regler	46

5.2.3	PID-Regler mit Temperaturkompensation . . . . .	51
5.2.4	Kaskadierter Regler . . . . .	53
5.2.5	Selbstadaptierende Regler . . . . .	57
5.2.6	Gegenüberstellung der Regelungskonzepte . . . . .	58
<b>6</b>	<b>Conclusio</b>	<b>66</b>
	<b>Wissenschaftliche Literatur</b>	<b>72</b>
	<b>Internet Referenzen</b>	<b>74</b>

# Abkürzungen

ADC	Analog zu Digital Konverter
ASV	Anwendungssupervisor
ASW	Anwendersoftware
BSW	Basissoftware
CDrv	Complex Driver
CET	Core Execution Time
DE	Device Encapsulation
DS	Datensatz
ECU	Engine Control Unit
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EMK	Elektromotorische Kraft
GET	General Execution Time
HiL	Hardware in the Loop
HS	High-Side Schalter
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
LS	Low-Side Schalter
OEM	Original Equipment Manufacturer
PWM	Pulsweitenmodulation
ThrVlv	Throttle Valve

# Mathematische Symbole

$i_a$	Ankerstrom
$u$	Stellgröße
$u_a$	Ankerspannung
$u_i$	induzierte Spannung
$\varphi$	Drosselklappenwinkel
$\varphi^*$	Sollwinkel der Drosselklappe
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

„If you think good architecture is expensive, try bad architecture.“  
Brian Foote

Die Herausforderungen bei der Entwicklung von Kraftfahrzeugen werden immer vielfältiger, so stehen nicht nur Dynamik und Fahrkomfort im Vordergrund, sondern ein geringer Kraftstoffverbrauch, Einhaltung stets sinkender gesetzlicher Abgasemissionen, Langlebigkeit sowie die Senkung von Geräuschemissionen. Neben der eigentlichen Aufgabe des Motorsteuergeräts, der Steuerung des Verbrennungsprozesses, kommen wegen der steigenden und komplexen Anforderungen eine Vielzahl an elektronischen Geräten zum Einsatz.

Zur Steuerung des Verbrennungsprozesses, der Abgasnachbehandlung sowie von Diagnosen und Ähnlichem wird auch das Motorsteuergerät vor neue Aufgaben gestellt. So erhöht sich mit der Anzahl der eingesetzten elektronischen Komponenten nicht nur der Hardwarebedarf an Endstufen im Motorsteuergerät, sondern auch der Bedarf des Prozessors an Speicher und Laufzeit. Die Einhaltung der hohen Ansprüche an moderne effiziente Kraftfahrzeuge gehen einher mit der Steigerung der Leistungsfähigkeit dieser elektronischen Aktoren. Jener Teil der Software, welcher den Aktor ansteuert, wird dazu regelmäßig erweitert. Aufgrund der Vielzahl an Aktoren reduzieren diese Erweiterungen zunehmend die verfügbaren Ressourcen des Motorsteuergerätes.

In der Automobilindustrie kommen laufend neue Konzepte zur Überwachung und Regelung des Antriebsstranges und dessen Peripherie zum Einsatz. Um trotzdem die Entwicklungszeit kurz zu halten, wird versucht bestehende Konzepte, sei es der Aufbau der Steller und Sensoren oder die Ansteuerung und Regelung eben dieser, per Software wiederzuverwenden. Hinzu kommt, dass viele Fahrzeughersteller nicht nur Diesel- und Benzinmotoren entwickeln, sondern auch an elektrischen Antriebskonzepten bzw. der Brennstoffzelle arbeiten. Erste Ergebnisse in kurzer Zeit sind auch für solche Prozesse relevant, ergänzend kommen wiederverwendbare und leicht zu adaptierende Konstruktionen bzw. Algorithmen zum Einsatz. Dazu werden in der Software Bibliotheken eingesetzt, die je nach Steller oder Sensor einfach angepasst werden können. Da die Bibliotheken über unterschiedliche Motorengenerationen und Motorenmodelle hinweg eingesetzt werden, haben sie sich zu einem robusten und effizienten Werkzeug entwickelt.

Die elektromechanische Drosselklappe eines Verbrennungsmotors ist einer dieser Steller welcher

an das Motorsteuergerät angebunden und von einer Bibliotheksfunktion angesteuert wird. Ein Elektromotor stellt einen bestimmten Öffnungswinkel der Drosselklappe ein, über den die Luftzufuhr in den Verbrennungsraum reguliert werden kann. Zur Regelung des Klappenwinkels wird der Winkel gemessen und an das Motorsteuergerät zurück gesendet. Durch Erweiterungen der Hardware des Steuergeräts ist es zusätzlich möglich, den Strom des Elektromotors zu messen und durch entsprechende Aufbereitung des Signals zur weiteren Verarbeitung der Software zugänglich zu machen. Die eingesetzte Bibliotheksfunktion kann so um eine Stromregelung ergänzt werden, die Einsatzmöglichkeiten der Bibliothek werden daher vielfältiger, die Wiederverwendbarkeit erhöht und somit auch die Wahrscheinlichkeit Fehler in der Implementierung aufzudecken. Die Stromrücklesung kann dazu eingesetzt werden, die Steller dynamischer verfahren zu lassen, die Hardware vor thermischer Überlastung zu schützen und somit die Langlebigkeit zu erhöhen. Ein weiterer wichtiger Anwendungsfall sind Diagnosen, die den Betrieb der eingesetzten Komponenten überwachen. Das zusätzliche Eingangssignal erlaubt deren Erweiterung. Die Komponenten in der Automobilindustrie müssen in einem großen Temperaturbereich betrieben werden, durch die Strommessung soll ein robusterer Betrieb trotz der unterschiedlichen Temperaturen ermöglicht werden.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist eine Erweiterung einer Bibliothek für die Ansteuerung von Aktoren im Motorsteuergerät um eine Stromregelung, welche am Beispiel der Drosselklappe erarbeitet wird. Die Einsatzmöglichkeiten des Konzepts sollen so ausgelegt werden, dass auch andere Steller des Motorsteuergeräts damit bedient werden können. Die bestehende Software soll durch die Erweiterung so wenig wie möglich beeinflusst werden. Sind die Änderungen in der bestehenden Bibliothek gering, so bleibt der Testaufwand, welcher zum Einführen neuer Konzepte notwendig ist, niedrig und hält somit die Entwicklungszeit der Software gering. Zur Validierung und um die spezifischen Einsatzmöglichkeiten aufzuzeigen, wird das entworfene Konzept mit den bestehenden Reglern (Positionsregelung und selbstadaptierende Regelung) verglichen.

Dazu wird zunächst in Kapitel 2 auf den Stand der Technik eingegangen, bevor in Kapitel 3 mit der Analyse der Drosselklappe und der Architektur des Motorsteuergeräts begonnen wird. Die erarbeiteten Grundlagen werden in Kapitel 4 für die Modellbildung und das erweiterte Regelkonzept herangezogen. In Kapitel 5 werden Messaufbauten sowie Abläufe entwickelt, um eine Validierung des neuen Konzepts und mögliche Anwendungsfälle zu identifizieren. Im Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Arbeit beleuchtet sowie ein Ausblick auf mögliche Optimierungsmaßnahmen gegeben.

## 2 Stand der Technik

Dieses Kapitel stellt bestehende Lösungen zur Regelung von Gleichstrommotoren vor, die Bedeutung und Querverbindungen zur aktuellen Arbeit sollen dabei hervorgehoben werden. Die Arbeit wird im Kontext eines Motorsteuergerätes für Verbrennungsmotoren verfasst, daher werden in Abschnitt 2.1 vor allem jene Regelungskonzepte vorgestellt, die in Motormanagement-Systemen eingesetzt werden und auch für die Auswertung (siehe Kapitel 5) relevant sind. Bezugnehmend zum Stand der Technik für allgemeine Regelungen von Gleichstrommotoren im und außerhalb des Motorsteuergerätes werden weitere Methoden in Abschnitt 2.2 behandelt. Da die Stromregelung den Schwerpunkt der Arbeit bildet, sollen dabei vor allem jene Verfahren im Fokus stehen, die den Strom des Gleichstrommotors durch Messung im Regelungskonzept berücksichtigen.

Im Fokus dieser Arbeit steht nicht nur das Konzept zur Ansteuerung eines Gleichstrommotors, sondern vor allem der dafür notwendige Ressourcenverbrauch im Motorsteuergerät. Diese Thematik wird in Abschnitt 5.2 genauer untersucht.

### 2.1 Regelungskonzepte im Motorsteuergerät

Im Motorsteuergerät sind prinzipiell zwei unterschiedliche Regelungskonzepte für H-Brücken gespeiste Gleichstrommotoren (für die Grundlagen von H-Brücken bzw. Gleichstrommotoren sei auf die nachfolgenden Abschnitte verwiesen) im Einsatz. Zum einen ist das ein selbstadaptierende Regler, welcher in Abschnitt 2.1.1 beschrieben ist und zum anderen ein PID-Regler, (Abschnitt 2.1.2).

Im speziellen Fall der Drosselklappe kann eine dieser Varianten dazu eingesetzt werden, die Klappe auf einen bestimmten Winkel zu regeln, um so einen definierten Luftmassenstrom zu erreichen. Zur Regelung steht der Winkel der Klappe als Eingangssignal zur Verfügung. Als Ausgangssignal wird in beiden Fällen ein PWM<sup>1</sup>-Signal an eine hardwarenahe Treiberfunktion innerhalb des Motorsteuergerätes übergeben. Dieser pulsweitenmodulierter Wert wird anschließend durch die vom Gleichstrommotor versorgte H-Brücke in eine Spannung umgewandelt, im Motor wird so ein Moment erzeugt, welches die Klappe in die gewünschte Position bringt. Wegen der Rückstellfeder in der Drosselklappe muss dieses Moment aufrecht erhalten werden, andernfalls würde die Klappe in die Ruhelage zurückfallen.

---

<sup>1</sup>PWM ... Pulsweitenmodulation, siehe Abbildung 3.3

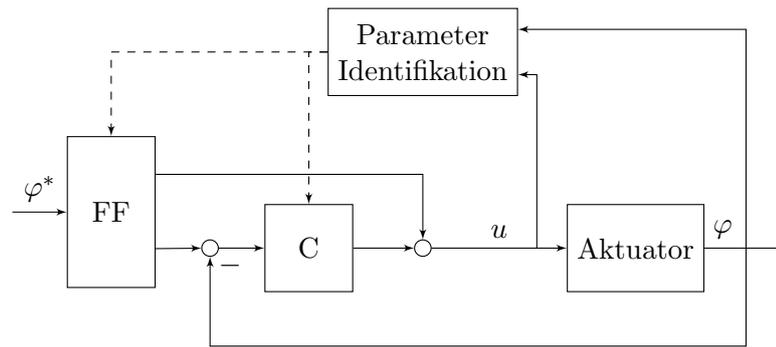


Abbildung 2.1: Regelstruktur des selbstadaptierenden Konzepts.

Der Rahmen in dem die beiden Konzepte agieren ist zwar identisch, jedoch ergeben sich hinsichtlich Implementierung, Konfiguration und Applikationsaufwand erhebliche Unterschiede. Die erste Methode basiert auf einem modellbasierten Ansatz, für diesen ist eine genaue Beschreibung der vorhandenen Regelstrecke erforderlich. Die zweite Methode nutzt zur Regelung des Klappenwinkels einen PID-Regler für den keine Modellbeschreibungen notwendig ist und daher universeller eingesetzt werden kann.

Ist es bei der zweiten Variante zusätzlich möglich den Strom durch den Gleichstrommotor zu messen, kann in der Software des Motorsteuergerätes per Konfiguration diese Information genutzt werden, um Störgrößen wie Temperaturänderungen zu kompensieren. Der PID-Regler lässt sich somit bei Verfügbarkeit eines Stromsensors um die Temperaturkompensation erweitern. Hierdurch sollen Schlüsse auf die Charakteristika der Stromregelung erstellt werden, zumal beide zur Berechnung des Ausgabewertes an die hardwarenahe Treiberfunktion den Strom des Gleichstrommotors als zusätzliche Eingangsgröße heranziehen.

Die erwähnten Konzepte bilden auch die Grundlage für die in Kapitel 5 durchgeführte Validierung der entworfenen Stromregelung.

### 2.1.1 Selbstadaptierender Regler

Über die Lebensdauer der Drosselklappe können sich die Kenngrößen durch Verschmutzung, Alterung, Überbeanspruchung und Ähnliches ändern. Zusätzlich können unterschiedliche Bedingungen beim Kaltstart<sup>2</sup> des Motors eintreten, welche einen Einfluss auf die Parameter der Drosselklappe haben. Beim gegebenen Beispiel des Widerstandes kann sich dieser von  $2\Omega$  hin zu  $4,3\Omega$  durch Alterung, Temperaturschwankungen usw. ändern.

Diesen Umstand versucht der selbstadaptierende Regler aus Abbildung 2.1 auszugleichen. Der Unterschied zum PID-Regler aus dem nächsten Abschnitt ist, dass nicht nur die Differenz zwischen Soll- und Istwinkel zur Berechnung des Ansteuerwertes  $u$  herangezogen wird (Block **C** - Control), sondern anhand eines zweiten Reglers im Vorwärtszweig (Block **FF** - FeedForward) berechnet wird. Anhand des Modells der Regelstrecke soll dieser das Verzögerungsverhalten kompensieren [Wec13].

<sup>2</sup>Kaltstart bezeichnet ein Starten des Motors bei dem der Abkühlprozess eines vorherigen Fahrzykluses bereits abgeschlossen ist.

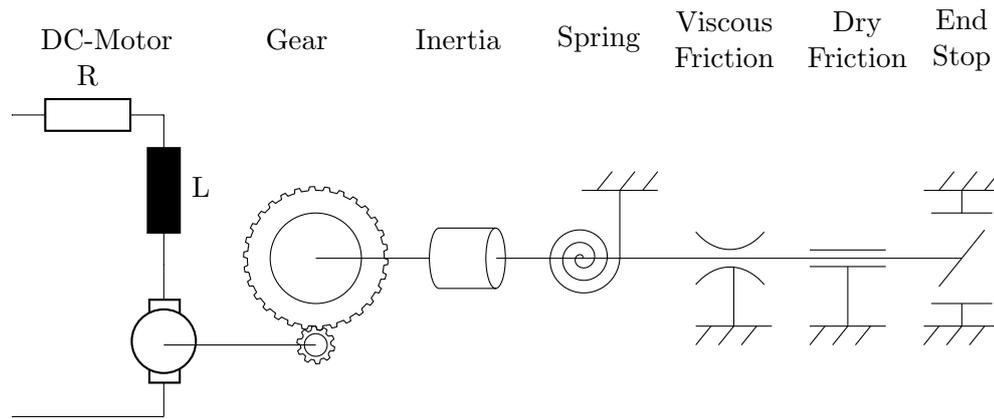


Abbildung 2.2: Drosselklappenmodell für den selbstadaptierenden Regler.

Dazu wird ein Modell des zu regelnden Systems eingesetzt, welches von Aktuator zu Aktuator je nach Aufbau unterschiedlich sein kann. Das für die Drosselklappe zugrundeliegende Modell ist in Abbildung 2.2 zu sehen.

Auf Basis des Modells lässt sich das notwendige Ansteuersignal  $u$  aus Abbildung 2.1, welches für die Regelung der Führungsgröße  $\varphi^*$  notwendig ist, berechnen. Wie eingangs bereits erwähnt, können sich die Parameter der Drosselklappe verändern. Ein Vergleich des vom Modell berechneten und des gemessenen Klappenwinkels  $\varphi$  wird benutzt, um die Parameter für die Berechnung des Ansteuerwertes  $u$  anpassen zu können. Liegen keine Parameterschwankungen vor, so stimmt der Winkel des Referenzmodells mit jenem des geregelten Systems, abgesehen von Rechenungenauigkeiten, überein. Andernfalls gleicht die Rückführung mit Block **C** diese Abweichungen aus. Für die Grundlagen der Regelkreisstruktur sei beispielsweise auf [WK16] und [Kug14] verwiesen.

### 2.1.2 PID-Regler

Diese Variante beruht auf Regelung der Drosselklappenstellung ohne *a-priori*-Wissen über die vorhandene Stecke. Der Winkel der Klappe  $\varphi$  wird gemessen und gemeinsam mit der Führungsgröße  $\varphi^*$  verglichen, um daraus die nötige Stellgröße errechnen zu können. Abbildung 2.3 zeigt die Struktur des Regelkreises. Es wird vorausgesetzt, dass die Sensordynamik keinen Einfluss auf die Streckendynamik hat, da diese aufgrund ihrer Schnelligkeit vernachlässigt werden kann [Sch15].

Die Blöcke Vorsteuerung,  $\varphi$ -Regler sowie Sensoraufbereitung  $G_s$  in Abbildung 2.3 bilden eine architektonische Einheit im Steuergerät welche in Abschnitt 3.3.2 beschrieben ist.

Die Vorsteuerung wird einerseits benötigt, um die Verfahrensgeschwindigkeit der Drosselklappe beeinflussen zu können. Damit die Klappe nicht mit zu hoher Geschwindigkeit in die Endanschläge verfährt, wird diese anhand der Vorsteuerung limitiert. Andererseits wird die Vorsteuerung eingesetzt, um unter definierten Umständen bestimmte Bewegungsabläufe, ungeachtet des Sollwerts, vorgeben zu können.

Obwohl die Erfassung des Klappenwinkels als verzögerungsfrei angenommen wird, ist die Rückführung nicht als Einheitsrückführung dargestellt. Der Block  $G_s$  dient vielmehr dazu, die Sensor-nichtlinearität, den Sensorfehler (z.B. Übertragungsfehler) etc. auszugleichen bzw. zu überwachen. Aufgrund dessen sind  $\bar{\varphi}$  und  $\varphi$  im Allgemeinen nicht gleich.

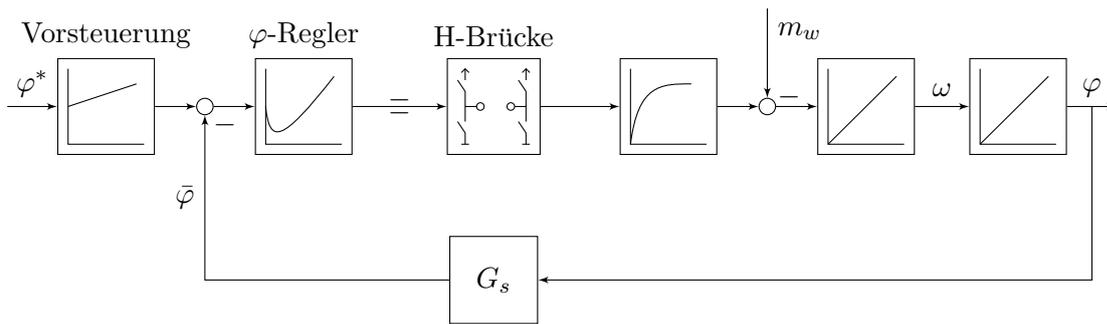


Abbildung 2.3: PID-Regelkreis der Drosselklappe.

Die Schnittstelle zwischen Hardware und Software stellt die Ansteuerung der vier IGBTs der H-Brücke mittels PWM-Signal dar. Die IGBTs sind in Abbildung 2.3 als Schalter eingezeichnet. Die H-Brücke ist auf der Platine des Motorsteuergerätes integriert.

Die beiden Blöcke nach der H-Brücke repräsentieren den elektrischen und mechanischen Teil des Gleichstrommotors, die sogenannte Strecke des Regelkreises. Eine mathematische Beschreibung der erwähnten Blöcke findet sich in Abschnitt 4.1.1.

Eine in der Drosselklappe integrierte Sensoreinheit misst den aktuellen Klappenwinkel  $\varphi$  und überträgt die Information an das Steuergerät.

Im Allgemeinen wirken auf die Strecke externe Störungen, welche nicht einfach gemessen werden können [Kug14]. So hat zum Beispiel die Temperatur einen Einfluss auf den elektrischen Widerstand des Gleichstrommotors und führt daher zu veränderten Parametern der Strecke.

### PID-Regelung mit Temperaturkompensation

Anhand des gemessenen Stromes des Gleichstrommotors  $i_a$  und der angelegten Spannung über die H-Brücke kann auf die Spulentemperatur geschlossen werden. Daraus kann der Korrekturfaktor  $T_{coilkomp}$  aus Abbildung 2.4 berechnet und die Stellgröße angepasst werden. Diese Methode der Korrektur ist jedoch sehr ressourcenintensiv, da nicht nur das Modell, sondern auch etwaige Fehler bzw. bekannte Ungenauigkeiten zum Beispiel der Strommessung in bestimmten Betriebspunkten beachtet und kompensiert werden müssen. Die Einschränkungen werden im Block **Signal Check** überwacht und wenn nötig Maßnahmen eingeleitet. Ein Großteil der genutzten Ressourcen, die zur Bestimmung des Korrekturfaktors notwendig sind, werden dafür benötigt.

Im Steuergerät werden sowohl PID-Regler mit, als auch PID-Regler ohne Kompensation von Temperaturschwankungen eingesetzt. Voraussetzung für die Berechnung des Korrekturfaktors ist die Möglichkeit der Strommessung, welche nicht für alle Steller im Motorsteuergerät zur Verfügung steht. Möglich macht das die variable Struktur der erwähnten architektonischen Einheit in der Bibliotheksfunktion, bei der die einzelnen Blöcke aktiviert, deaktiviert oder auch individuell angepasst werden können.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit sollen der PID-Regler mit als auch ohne Temperaturkompensation als zwei unterschiedliche Konzepte aufgefasst werden. Der Grund für die getrennte Betrachtung ist, dass der entwickelte Stromregler als zusätzliches Element des PID-Reglers ohne die Korrektur von Temperaturänderungen aufgebaut ist. Daher ist es möglich, einen Vergleich zwischen den erwähnten Regelungskonzepten herzustellen.

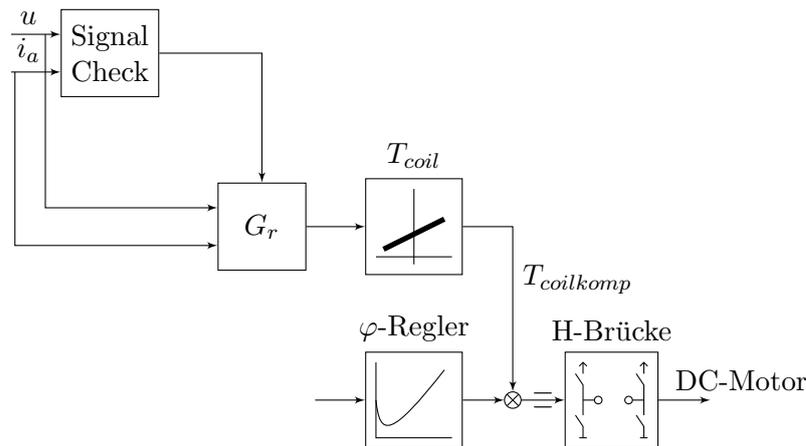


Abbildung 2.4: Temperaturkompensation.

## 2.2 Regelungskonzepte für Gleichstrommotoren

Für die Regelung von Gleichstrommotoren werden die unterschiedlichsten Konzepte eingesetzt. Zum Beispiel werden in [Mü15] vorwärtsgekoppelte Neuronale Netze für die Lageregelung einer Drosselklappe eingesetzt. Zur Berechnung der Ausgangsspannung benötigt das Neuronale Netz vier Zeitschritte. Zuerst wird eine Prädikation der Klappenposition durchgeführt. Danach lernt das Netz mit Backpropagation anhand der letzten vier Werte der Ausgangsspannung sowie des gemessenen Winkels. Im dritten Schritt wird die Prädikation dem Regler hinzugefügt. Zum Schluss wird der Sollwert des Klappenwinkels aus einem PT1-Glied und dem Referenzsignal berechnet [Mü15].

In [MH08] wird eine *Sliding-Mode*-Regelung für Drosselklappen entworfen. Der Regelungsentwurf beruht auf der Tatsache, dass sich die Strecke in einen linearen und in einen nichtlinearen Streckenabschnitt aufteilen lässt. In einem ersten Schritt wird der lineare Anteil durch eine zusätzliche aber fiktive Eingangsgröße  $\epsilon_2$  stabilisiert, dazu wird folgender Ansatz verwendet:

$$\epsilon_2 = -\lambda\epsilon_1 \quad (2.1)$$

Die beiden Variablen  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$  sind Teil eines Fehlervektors, welcher sich aus der Differenz des Zustandsvektors zu einem Referenzvektors ergibt.

Nun wird versucht den Verlauf der Stellgröße  $u$  so zu ermitteln, dass eine skalare Größe  $\sigma$

$$\sigma(t) := \epsilon_2(t) + \lambda\epsilon_1(t) \quad (2.2)$$

innerhalb einer endlichen Zeit  $T$  verschwindet. Aufgrund der Trajektorie, die sich in der  $\epsilon_1, \epsilon_2$ -Ebene in Richtung des Ursprungs bewegt, spricht man vom „Sliding-mode“.

Im Zusammenhang mit dieser Arbeit ist vor allem die kaskadierte Regelung für Gleichstrommotoren zu erwähnen. Prinzipiell ist bereits der PID-Regler aus dem vorherigen Abschnitt Teil einer Kaskadenregelung, da der Sollwert für die Klappenposition aus der Luftmassenregelung stammt, wie in Abbildung 3.1 zu sehen ist. Dies soll aber im Zuge der Arbeit vernachlässigt werden, da insbesondere die Regelung des Gleichstrommotors und nicht des Antriebsstranges im Vordergrund steht.

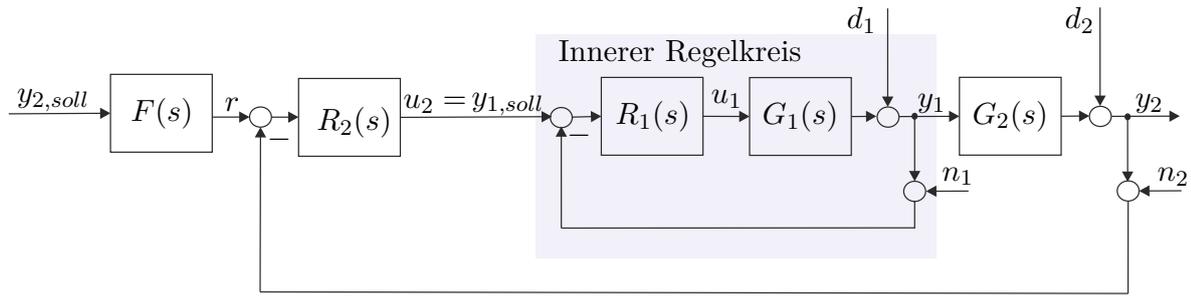


Abbildung 2.5: Kaskadenregelkreis. Quelle: [Kug14]

Abbildung 2.5 zeigt die Struktur einer zweischleifigen Kaskadenregelung. In diesem Fall müssen die beiden Größen  $y_1$  sowie  $y_2$  gemessen und dem System zurückgeführt werden. Es entstehen so zwei Teilstrecken  $G_1(s)$  und  $G_2(s)$ . Der innere Kreis bestehend aus dem Regler  $R_1(s)$  und der Strecke  $G_1(s)$  muss eine höhere Bandbreite aufweisen als der äußere Kreis [Kug14]. Im Falle des Gleichstrommotors handelt es sich beim inneren Regelkreis um die Stromregelung,  $y_1 = i_a$ ; der äußere Kreis regelt die Drehwinkelgeschwindigkeit  $y_2 = \omega$ . Um eine bestimmte Position anfahren zu können, ist zusätzlich ein dritter Kreis für die Regelung des Position notwendig [5, 3].

## 3 Grundlagen

Neben der Drosselklappe gibt es noch weitere Steller welche für den Betrieb des Verbrennungsmotors benötigt werden und in Bezug auf Aufbau und Funktion ähnlich zur Drosselklappe sind. Die in dieser Arbeit untersuchte Regelungsstruktur ist anhand der Drosselklappe ausgeführt, daher wird deren elektrisches sowie mechanisches Verhalten in den nachfolgenden Abschnitten näher untersucht. Dazu ist eine Untersuchung des hardwareseitigen Aufbaus notwendig.

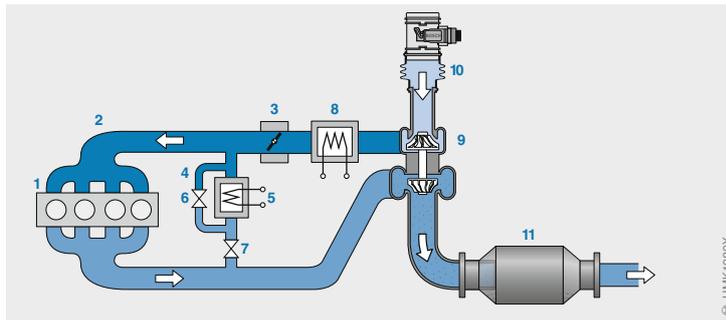
Für eine ressourcensparende Implementierung der Regelung ist die Softwarearchitektur des Motorsteuergeräts, vor allem aber der Aufbau der eingangs erwähnten Bibliotheksfunktionen wichtig. Unter anderem werden die Ressourcen des Prozessors im Motorsteuergerät immer knapper, deswegen gilt es auch diese für den Entwurf zu berücksichtigen. Die genannten Aspekte werden in diesem Kapitel näher betrachtet, um auf deren Basis im nächsten Abschnitt den Regelkreis entwerfen zu können.

### 3.1 Drosselklappe

Beim Ottomotor erfolgt die Leistungsregelung quantitativ über die Menge des Luftkraftstoffgemisches. Das Verbrennungsverhältnis von Luft und Kraftstoffmenge muss immer exakt abgestimmt werden, um eine effiziente Kraftstoffverbrennung gewährleisten zu können. Die Bereitstellung der korrekten Luftmenge und des Druckniveaus geschieht mithilfe der Drosselklappe, welche entsprechend im Ansaugtrakt des Verbrennungsmotors verbaut ist. Die Drosselklappe ist ein elektromechanischer Aktor mit einer drehbar gelagerten Klappe. Anhand des Klappenwinkels  $\varphi_{min} \leq \varphi \leq \varphi_{max}$  kann die geforderte Luftmenge eingestellt werden [Rei15, 4].

Die Drosselklappe ist Teil der Komponenten der Luftsysteme. Abbildung 3.1 zeigt einen Ausschnitt der Systeme, die für die Regelung eines Dieselmotors benötigt werden.

Die Bildung der Soll-Klappenposition ist nicht Teil dieser Arbeit, soll aber der Vollständigkeit wegen erwähnt werden. Die in dieser Arbeit verwendete Drosselklappe kommt bei Dieselmotoren zum Einsatz. Beim Ottomotor sind die Berechnungsschritte anschaulicher und sollen deshalb für diesen Motortyp gezeigt werden. Ausgangspunkt für die Berechnung des Drosselklappensollwerts ist der Momentenwunsch, z.B. des Fahrers anhand des Gaspedals oder zusätzlich eines Assistenzsystems, wie z.B. durch einen Bremsengriff des Antiblockiersystems oder einer eingeschalteten Klimaanlage [Rei17]. Die einzelnen Schritte zur Ermittlung des Sollwerts sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Zur Modellierung des Luftmassenstroms wird die Funktion einer kompressiblen Dros-



**Abbildung 3.1:** Übersicht der Komponenten bei einem Dieselmotor. 1 Motor, 2 Saugrohr, 3 Drossel, 4 Bypass, 5 AGR-Kühler, 6 Bypass-Ventil, 7 AGR-Ventil, 8 Ladeluftkühler, 9 Abgasturbolader, 10 Luftmassenmesser, 11 Oxidationskatalysator. Quelle: [Rei14]

Berechnung des:	Als Funktion aus:
Momentensollwert	Pedalwert, EGS, ASR, ...
Füllungssollwert	Drehzahl, Moment
Saugrohrdurchsollwert	volumetrischen Effizienz
Druckquotient über Drosselklappe	Umgebungsdruck
Sollwert für Durchfluss der Drosselklappe	Druckquotient
Sollwert des reduzierten Drosselklappenquerschnitts	Luftmassensollwert, Durchfluss an der Drosselklappe
Drosselklappenwinkel-Sollwert	red. Drosselklappenquerschnitt

**Tabelle 3.1:** Entstehung des Drosselklappensollwerts. Quelle: [BS14]

selbstströmung angesetzt.

$$\dot{m}_{ThrVlv} = A_{red} \cdot p_{ThrVlv} \cdot C_1 \cdot \Psi \tag{3.1}$$

Die wirksame Drosselklappenfläche  $A_{red}$  ist eine Funktion des Klappenwinkels  $f(\varphi)$ , dabei steht  $p_{ThrVlv}$  für den Druck vor der Drosselklappe, dieser wird in den meisten Systemen gemessen.  $C_1$  steht für den Temperatur-Term,  $\Psi$  bezeichnet den Durchfluss welcher abhängig vom Druckverhältnis ist [BS14].

Anhand des benötigten Öffnungsquerschnittes des Luftkanals kann auf die nötige Sollposition der Klappe geschlossen werden, welche die Eingangsgröße für alle vorgestellten Regelungskonzepte der Drosselklappe in Kapitel 2 darstellt.

### 3.1.1 Aufbau

Abbildung 3.2 zeigt den Aufbau einer Drosselklappe. Diese besteht aus mehreren Komponenten, welche alle in einem Gehäuse integriert sind. Der Steller ist Teil des Luftkanals, in diesem befindet sich auch die Klappe, welche drehbar um ihre eigene Achse gelagert ist, vergleiche dazu 3.1.

Durch den Klappenwinkel  $\varphi$  kann die vorbeiströmende Luftmenge anhand der wirksamen Drosselklappenfläche  $A_{red}$  reguliert werden. Eine Drehung der Klappe um mehr als  $90^\circ$  würde wieder

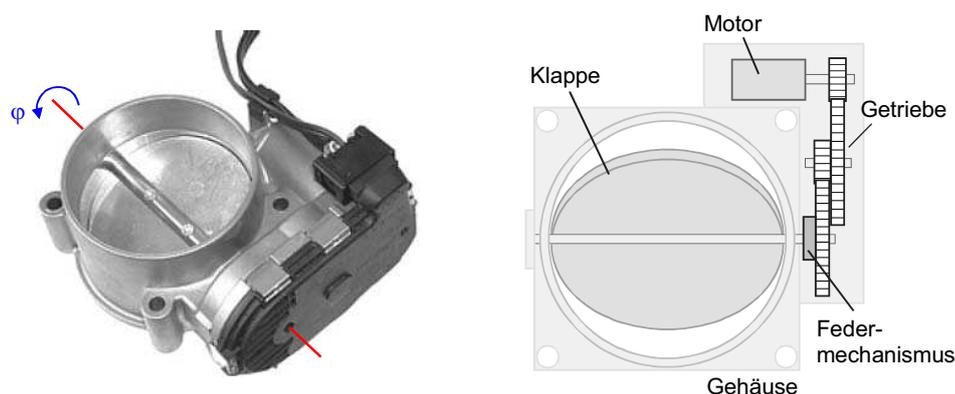


Abbildung 3.2: Aufbau der Drosselklappe. Quelle: [MH08]

zu einer Verengung des Luftkanals führen, die Drehung der Klappe ist daher über zwei Anschläge auf einen minimalen und maximalen Winkel ( $\varphi_{min}$ ,  $\varphi_{max}$ ) begrenzt.

Beim dargestellten Federmechanismus handelt es sich um eine Rückstellfeder. Deren Aufgabe ist es, im Fall eines Fehlers einen gesicherten Zustand des Klappenwinkels herzustellen. Bei Dieselmotoren ist das der vollständig geöffnete Zustand, dieser wird auch als oberer Anschlag bezeichnet [Bü14]. Bei Ottomotoren drückt die Rückstellfeder die Klappe in jene Position, die eine langsame Weiterfahrt bei eingeschränktem Motorbetrieb ermöglicht [Rei17, MH08].

Durch einen Gleichstrommotor mit Getriebe wird die Klappe in die gewünschte Position gebracht. Zusätzlich zum gezeigten Querschnitt der Drosselklappe verfügt der Steller noch über eine integrierte Sensoreinheit, die zur Regelung des Klappenwinkels benötigt wird. Die Position wird über einen Winkelsensor erfasst und dem Steuergerät zurückgemeldet. Zur Positionsmessung wird ein berührungsfreier magneto-resistiver Sensor verwendet. Dazu ist an der Welle ein Permanentmagnet angebracht, welcher von der Magnetfeldrichtung das Sensorsignal erzeugt [Bü14, Rei17, Rei15].

Wird eine bestimmte Position gefordert und für einige Zeit nicht verändert, sollte der Regler in der Lage sein die Klappe möglichst ohne Schwankungen auf dieser Position zu halten. Kommt es nämlich zum sogenannten Zittern, wird das integrierte Getriebe durch die Hin- und Herbewegungen unnötig belastet und so die Lebensdauer des kompletten Stellers reduziert.

### 3.1.2 Arbeitsbereich und typische Kenngrößen

Eine wichtige Kenngröße für die Regelung ist die maximale Verfahrensgeschwindigkeit der Klappe. Diese ist vor allem beim Anfahren in die Anschläge zu beachten, da es ansonsten zum Bruch eben dieser kommen kann.

Betriebsbereiche bei denen die Drosselklappe vollkommen geöffnet ist, stellen eine besondere Herausforderung an die Regelung dar, da hier die Klappe in den oberen Anschlag drückt.

Um einen Eindruck von den Dimensionen der Drosselklappe zu bekommen, sind die relevanten

Kenngröße	Variable	Wert/Wertebereich
Betriebsspannung	$U_{range}$	9 V...17 V
Nennspannung	$U_N$	14 V
Betriebstemperatur	$T_{range}$	-40 °C...140 °C
Saugrohrdruck	$\Delta p$	0,8 bar...2,5 bar
Ladedruck	$p_{lade}$	4,5 bar (abs.)

**Tabelle 3.2:** Eigenschaften der verwendeten Drosselklappe.

Kenngröße	min. Wert	durschn. Wert	max. Wert
Sensor Wert oberer Anschlag	83,5 % $U_{Sensor}$	85 % $U_{Sensor}$	86,5 % $U_{Sensor}$
Sensor Wert unterer Anschlag	7,4 % $U_{Sensor}$	10,7 % $U_{Sensor}$	13,9 % $U_{Sensor}$
Maximaler Verfahrensweg des Sensors		82 °	
Hysterese			0,1 °
Aktualisierungszeit		320 $\mu s$	420 $\mu s$

**Tabelle 3.3:** Eigenschaften des Drosselklappensensors.

Kenngrößen für die in dieser Arbeit verwendeten Klappe in Tabelle 3.2 aufgelistet. Die sensor-spezifischen Parameter bei Raumtemperatur (23 °C) für die Rücklesung der Winkelposition sind in Tabelle 3.3 enthalten. Wie in der Tabelle zu erkennen ist, sind die Endanschläge fertigungsbedingten Toleranzen unterworfen. Zusätzlich können Verschmutzungen oder Alterungseffekte zu veränderten Anschlagpositionen führen. Dies muss in einem Regelungskonzept der Drosselklappe berücksichtigt werden, andernfalls kann es bei einem verkleinerten Stellbereich zu Brüchen der Anschläge kommen.

Die Drosselklappe verfügt über eine Rückstellfeder die dazu dient, im Fehlerfall eine Notfallposition einzunehmen. Der Gleichstrommotor der Klappe muss daher zum Verbleib auf einer bestimmen Position ein Moment aufbringen, welches der Federkraft entgegenwirkt, andernfalls würde die Klappe in diese Notfallposition fallen. Bei einem Dieselmotor öffnet sich die Klappe komplett, und befindet sich auch nach dem Hochfahren des Steuergerätes in dieser Position (Betriebszustände des Motorsteuergerätes siehe 3.11).

### 3.2 Leistungsendstufe

Zum Erreichen einer definierten Winkelposition der Drosselklappe wird mit dem Gleichstrommotor ein bestimmtes Moment eingestellt. Dafür ist eine Umwandlung zwischen dem digitalen Signal der Regeleinheit und der analogen Versorgungsspannung des Gleichstrommotors notwendig. Zur Erzeugung des gewünschten Momentes steht eine maximale Spannung (Batteriespannung  $U_{Batt} \sim 12 V$ ) zur Verfügung. Mittels Pulsweitenmodulation (PWM) wird eine zum digitalen Signal proportionale Spannung erzeugt. Durch periodisches Ein- und Ausschalten der Versorgungs-

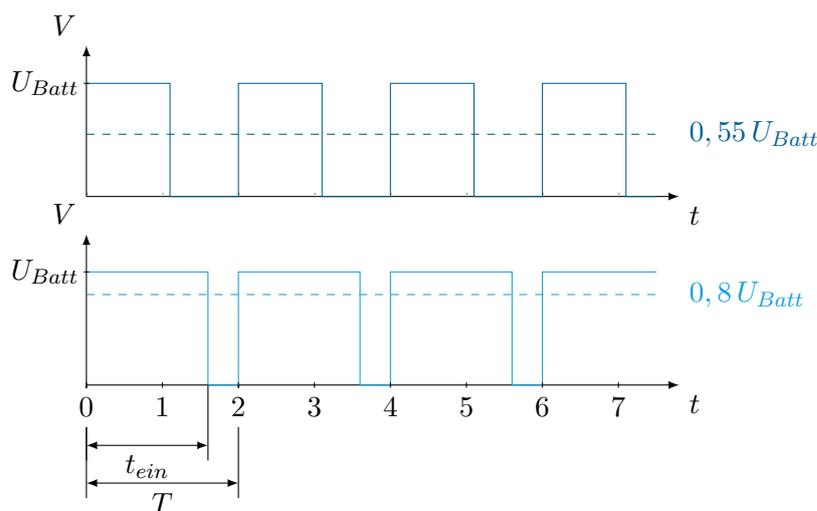


Abbildung 3.3: PWM mit 55% und 80% Duty cycle.

spannung können so die gewünschten Spannungswerte ausgegeben werden:

$$U_{Motor} = U_{Batt} \frac{t_{ein}}{T} \quad (3.2)$$

Dabei bezeichnet  $T$  die Periodendauer des PWM-Signals, diese wirkt sich unter anderem auch auf die Akustik beim Verstellen des Gleichstrommotors aus. Das Verhältnis von Einschaltzeit  $t_{ein}$  und Periodendauer  $T$  wird als Duty cycle bezeichnet und wird in Prozent angegeben. Durch das Tiefpassverhalten der Drosselklappe entsteht aus dem gepulsten Ausgangssignal ein geglättetes Signal [RK15, Ker08]. Abbildung 3.3 zeigt den Verlauf verschiedener Duty cycles bei gleicher Periodendauer.

Der Gleichstrommotor wird von einer H-Brücke<sup>1</sup> versorgt, die über eine PWM angesteuert wird. In Abbildung 3.4 bilden die vier „Schalter“ die beiden vertikalen Linien und der Gleichstrommotor die horizontale Linie. Die oberen Transistoren werden als High-Side Schalter (HS1, HS2) bezeichnet – angebunden an die Versorgungsspannung – und die unteren als Low-Side Schalter (LS1, LS2) – verbunden mit Masse – bezeichnet [RK15, BS14, Ker08, BST10].

### 3.2.1 Schaltverhalten

Die verwendete H-Brücke verfügt über zwei Betriebszustände, welche von der darüberliegenden Softwarestruktur vorgegeben werden können:

- PWM-Betrieb, keine Änderung der Stromrichtung
- Richtungstausch, Änderung der Stromrichtung

Der Zugriff auf dem im Motorsteuergerät integrierten Treiberbaustein erfolgt über die beiden Register DIR und PWM. Diese dienen dazu den Stromfluss durch die H-Brücke einzustellen. DIR

<sup>1</sup>Der Name der H-Brücke stammt vom H-förmigen Aussehen des Schaltbildes.

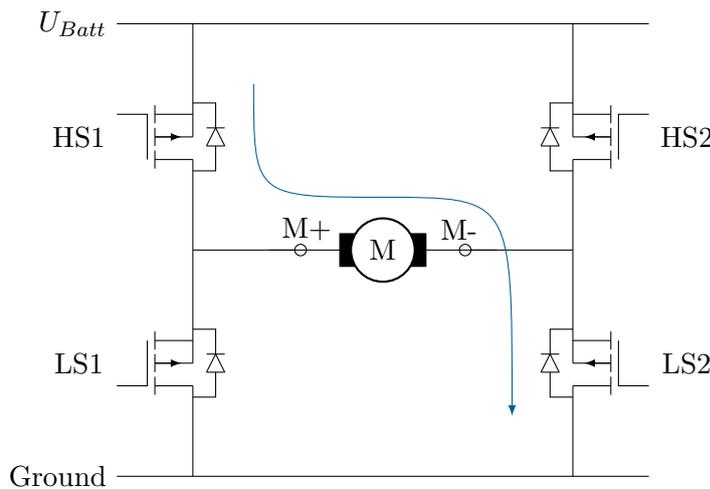


Abbildung 3.4: H-Brücke mit möglichem Stromfluss bei unterschiedlichen Schaltzuständen.

PWM	DIR	OUT1	OUT2	Verhalten
L	L	L	L	Kein aktiver Stromfluss
L	H	L	L	Kein aktiver Stromfluss
H	L	H	L	Stromfluss von HS1 nach LS2
H	H	L	H	Stromfluss von HS2 nach LS1

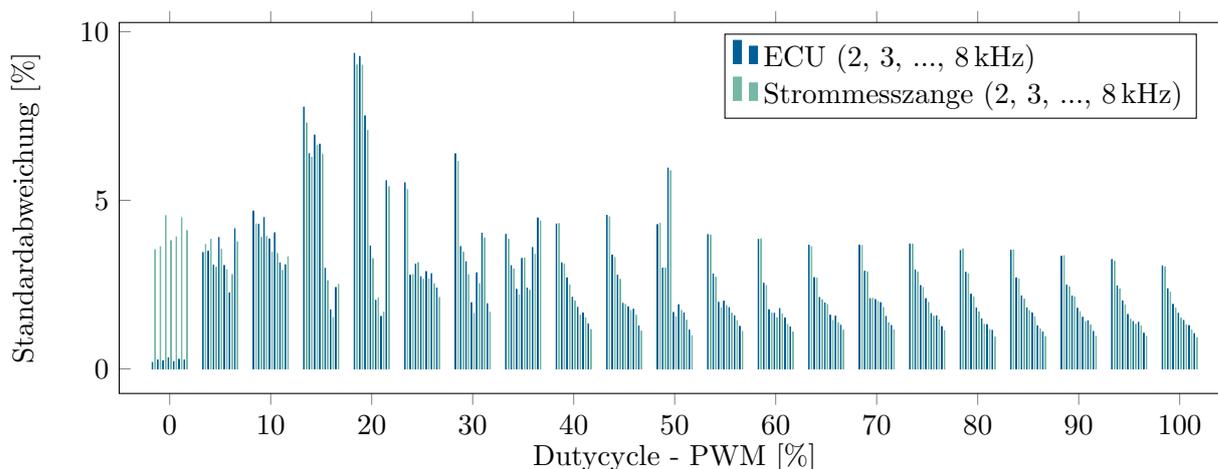
Tabelle 3.4: Kombinationen und Verhalten anhand der Register DIR und PWM der Leistungsendstufe.

(0,1) gibt die Stromrichtung vor, PWM (0% bis 100%) die Stromstärke, in Tabelle 3.4 sind die möglichen Kombinationen der beiden Register aufgelistet. Das Register DIR gibt vor, welche der High- und Low-Side Schalter durch die PWM angesteuert werden. Daher ist eine Vorwärts- und Rückwärtsbewegung der Drosselklappe möglich.

Die Ansteuerung der High- und Low-Side Schalter, also das Auslesen und Verarbeiten der Informationen aus den beiden Registern, übernimmt die sogenannte Basissoftware (siehe Abschnitt 3.3.1). Die Schnittstelle der übergeordneten Software zur Basissoftware sind die beiden Register PWM und DIR, anhand derer der gewünschte Strom eingestellt werden kann. Eine weitere Schnittstelle zur Basissoftware ist die Frequenz der PWM, diese ist jedoch nicht relevant für die Stromregelung. Sie hat unter anderem einen Einfluss auf die entstehenden Geräusche während des Betriebs [RK15, BS14, Col].

### 3.2.2 Stromrücklesung

Das zentrale Element dieser Arbeit ist die Stromregelung. Dafür wird im Regelkreis, welcher in Abschnitt 4.2 beschrieben wird, der Ist-Strom der Regelstrecke benötigt. Der Ist-Strom wird von der Leistungsendstufe bereitgestellt und ist proportional zum positiven Strom durch die H-Brücke. Der Strom wird an jenem Low-Side Schalter gemessen, welcher nicht durch das PWM-Register geschaltet wird, LS2 im Beispiel von Abbildung 3.4.



**Abbildung 3.5:** Vergleich der internen Strommessung mit einer Strommesszange anhand der Standardabweichung bei verschiedenen Ansteuerfrequenzen.

Dabei stellt sich die Frage wie genau die Strommessung durch den eingebauten Chip des Motorsteuergeräts ist. Dazu wurde die Drosselklappe mit unterschiedlichen Tastverhältnissen angesteuert und sowohl der gemessene Strom des internen Chips als auch eine Strommesszange als Referenz aufgezeichnet. Beginnend bei 0% wurde das Tastverhältnis in fünf Prozent Schritten auf 100% erhöht. Nachdem die transienten Vorgänge abgeschlossen waren, wurde ein Mittelwert über mehrere Messpunkte gebildet und das Ergebnis des internen Stromsensors, als auch der Strommesszange abgespeichert.

Nachdem der komplette Bereich von 0% bis 100% 30 mal durchlaufen war, wurde das Experiment mit einer anderen Ansteuerfrequenz der PWM wiederholt. Die hohe Anzahl an Wiederholungen ergibt sich zum einen daher, dass ein Skript geschrieben wurde, welches die Messung sowie Auswertung durchführte, und zum anderen um Erwärmungseffekte, vor allem durch den oberen PWM-Bereich, ausgleichen zu können. Für diesen Bereich sind hohe Ströme zu erwarten und infolgedessen eine Erwärmung der Komponenten eintritt, was die Messung verfälschen kann. Die Frequenzen wurden beginnend bei 2 kHz bis 8 kHz in Abstand von einem Kiloherz getestet. Zwischen den einzelnen PWM-Schritten wurde auf das Ausgangstastverhältnis von 0% zurück gewechselt, um nicht zu lange mit einem hohen Tastverhältnis gegen den Anschlag der Drosselklappe zu drücken. Daher sollen Beschädigungen am Steller, vor allem der Anschläge, verhindert werden.

In Abbildung 3.5 ist das Ergebnis des Experiments anhand der Standardabweichungen jedes einzelnen PWM-Schritts für die Strommesszange, als auch der internen Strommessung dargestellt. Die unterschiedlichen Frequenzen sind separat bei jedem PWM-Schritt abgebildet, beginnend bei 2 kHz bis 8 kHz, sowie abwechselnd für die Strommesszange und der internen Strommessung. Auffällig sind vor allem jene Werte bei 15% und 20%. Die im Vergleich zu den übrigen Tastverhältnissen hohen Standardabweichungen lassen sich daher erklären, dass in diesem Bereich des Tastverhältnisses die Kraft des Motors groß genug ist, um die Reibungen sowie Federkraft zu überwinden, sodass die Klappe beginnt in die geschlossen Position zu verfahren. Außerdem ist festzustellen, dass bei höherer Ansteuerfrequenz die Wiederholgenauigkeit des eingeschwungenen Stromwerts zunimmt. Für die Genauigkeit der Strommessung kann jedoch keine Aussage getroffen werden, da sowohl der interne Chip, also auch die Strommesszange gleichermaßen betroffen sind.

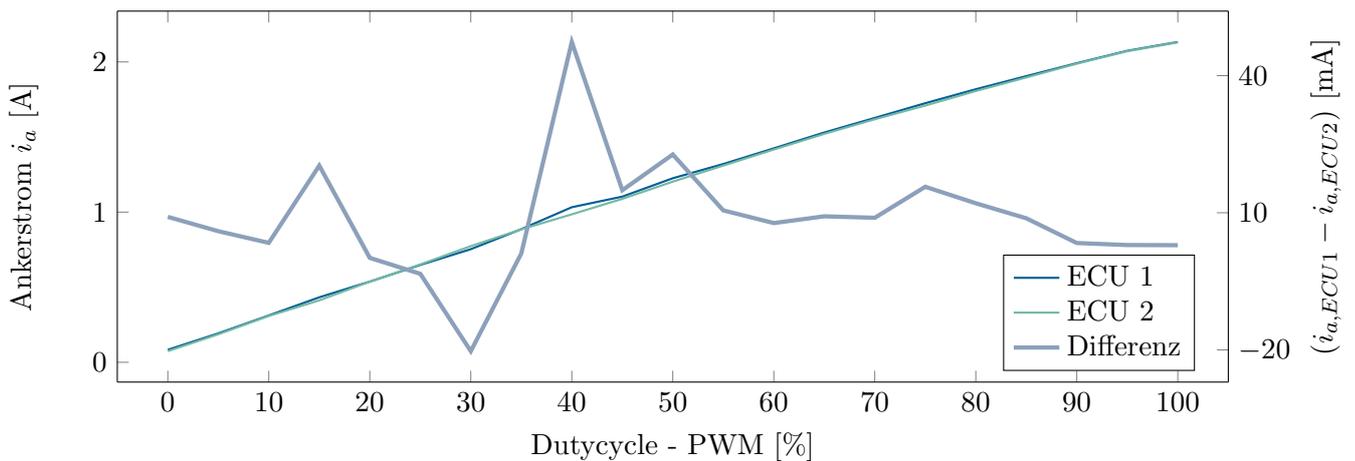


Abbildung 3.6: Vergleich der Strommessung zweier Steuergeräte.

In Abbildung 3.6 wurde der Ablauf des vorangegangene Experiment mit einem zweiten, baugleichen Steuergerät aber gleicher Drosselklappe wiederholt. Diesmal wurden nicht die Standardabweichungen sondern die Mittelwerte der internen Strommessung bei einer Ansteuerfrequenz von 2 kHz ausgewertet. Zusätzlich eingezeichnet ist die Differenz der Mittelwerte in mA. Wie zu erkennen, sind die Messwerte im Mittel um bis zu 40 mA unterschiedlich, das sind ca. 2% des gesamten positiven Strombereichs. Die Frage die sich daraus stellt ist, wie groß die Streuung der Strommessung innerhalb einer Steuergerätegeneration ist und wie diese kompensiert werden kann. Im Kapitel 6 soll auf diesen Sachverhalt näher eingegangen werden.

### 3.3 Motorsteuerung

Aufgrund der stetig steigenden Anforderungen an die Motorsteuerungen eines Verbrennungsmotors hat in den letzten Jahren bzw. sogar Jahrzehnten die Software immer mehr an Bedeutung gewonnen. So wurde im Jahr 1995 noch ein 16 Bit Prozessor mit einem Speicher von 0,25 MByte, sowie einer Software die 44.000 Zeilen Programmcode umfasste, eingesetzt. Im Jahr 2005 war schon ein 32 Bit TriCore Prozessor mit bis zu 6 MByte Speicher und 690.000 Zeilen Programmcode im Einsatz. Die Zahl der Applikationslabels, also jene Parameter mit denen die Einstellungen für den jeweiligen Motor vorgenommen werden können, stieg in den Jahren 1995 bis 2005 von 1800 auf 7200 an [Ise10].

Im Vergleich der Leistungsfähigkeit zur Apollo 13 übertreffen moderne Motorsteuerungen diese bei Weitem [Rei11].

Abbildung 3.7 sowie 3.8 zeigen den Anstieg des Ressourcenverbrauches eines aktuellen Dieselsteuergeräts über einem Entwicklungszeitraum von ca. drei Jahren. Dargestellt sind die Anteile am Speicherverbrauch des Zulieferers des Motorsteuergerätes (Supplier), der die Basisfunktionen zur Verfügung stellt, sowie für den Motorenhersteller (OEM), der die übergeordneten Funktionalitäten zur Motorsteuerung integriert. Des Weiteren wird zwischen der Software – in diesem Fall zusammengefasst zur ASW – und dem Datensatz (DS) unterschieden. Mit dem Datensatz können die Funktionalitäten an den jeweiligen Motor angepasst werden. In der zweiten Abbildung ist der

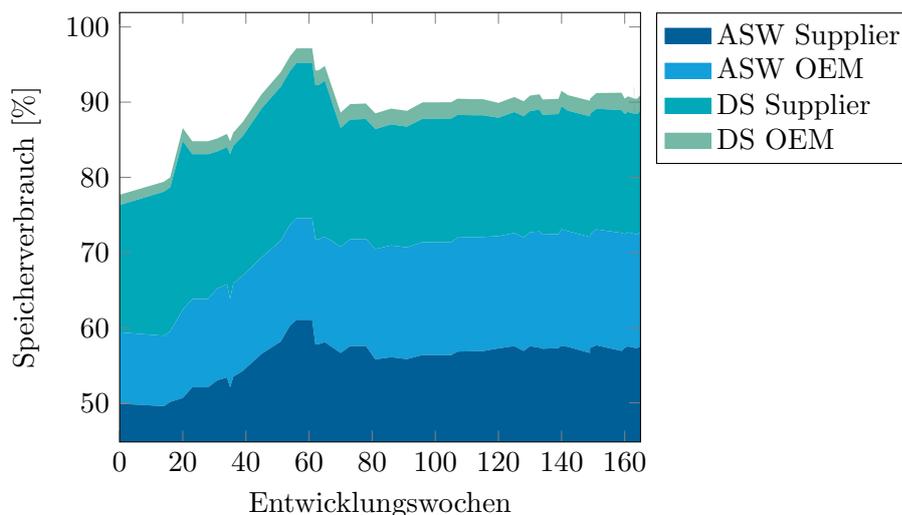


Abbildung 3.7: Entwicklung Flash-Verbrauch.

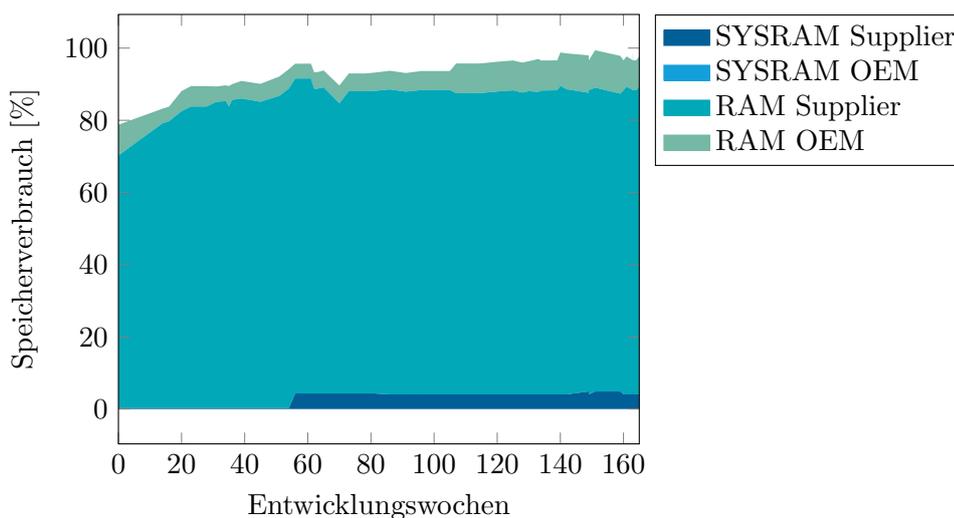


Abbildung 3.8: Entwicklung RAM Verbrauch.

Speicherbedarf des Arbeitsspeichers dargestellt.

Die Abbildungen bilden die Grundlage für den ressourcenoptimierten Ansatz einer Regelungsstruktur für Aktoren welche über das Motorsteuergerät angesteuert werden. Ohne Einsparungsmaßnahme in etwa der fünfzigsten Entwicklungswoche hätte der rasante Anstieg des Speicher- verbrauchs zu erheblichen Problemen während der Entwicklung führen können. Die Abbildungen sollen verdeutlichen wie wichtig es ist, die Ressourcen des Motorsteuergerätes im Blick zu be- halten und neu entwickelte Funktionen auch hinsichtlich ihres Speicher- und Laufzeitbedarfs zu bewerten.

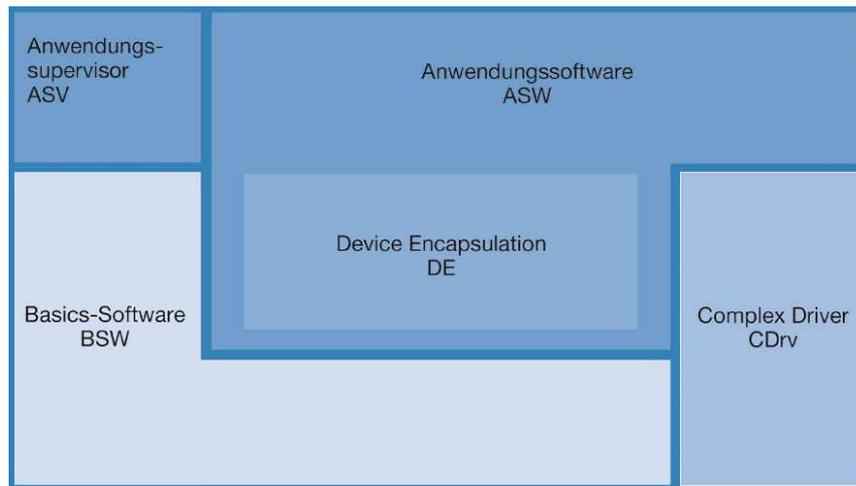


Abbildung 3.9: Statische Sicht der Softwarearchitektur. Quelle: [Ise10]

### 3.3.1 Architektur

Die Software im Motorsteuergerät setzt sich aus einzelnen Komponenten zusammen, um die Anforderungen zur Regelung eines Verbrennungsmotors erfüllen zu können. Der Schnitt in der Software orientiert sich an den unterschiedlichen funktionalen Einheiten wie etwa dem Luftsystem (hierzu zählt zum Beispiel die Sollwertberechnung für den Drosselklappenwinkel), dem Abgas-system, der Einspritzung aber auch verschiedene Systemfunktionen wie Überwachungsmodule oder Kommunikationsmodule. Die erwähnten Funktionen bzw. Module bilden eine eigenständige Einheit im Motorsteuergerät. Die Aufteilung soll die ganzheitliche Komplexität und die unterschiedlichen Anforderungen an das Motorsteuergerät reduzieren bzw. aufteilen [Rei17].

Die Architektur hingegen betrachtet unterschiedliche Aspekte, welche auch Sichten genannt werden, damit die unterschiedlichen Anforderungen an die Software dargestellt werden können. Die statische Sicht beschreibt die Anordnung der einzelnen Komponenten und deren Verbindungen untereinander. Die dynamische Sicht beschreibt die zeitliche Abhängigkeiten der Komponenten. Die physikalischen Zusammenhänge sind Teil der funktionalen Sicht. Zusammengefasst lassen sich damit drei Fragen beantworten: Was? Wann? Wie? [Ise10].

#### 3.3.1.1 Statische Sicht

Die statische Sicht besteht aus verschiedenen Komponenten und beschreibt die hierarchische Anordnung wie in Abbildung 3.9 zu sehen ist.

Die Schnittstelle zur Hardware wird durch die Basissoftware (BSW) bereitgestellt. Diese stellt für die darüberliegenden Strukturen Funktionen für den Hardwarezugriff zur Verfügung. Abhängigkeiten von der Hardware eines konkreten Steuergeräts werden so von der restlichen Software abstrahiert. Die einzelnen Steller und Sensoren werden in der Device Encapsulation (DE) abgebildet, gemeinsam mit der Anwendersoftware (ASW) übernehmen sie die Aufgaben der Steuerung und Regelung der für die Motorsteuerung relevanten Aufgaben. Die DEs werden weiterführend in Abschnitt 3.3.2 behandelt. Für spezielle Anforderungen oder jene mit echtzeitkritischen Funktionen, welche über die Funktionalitäten der DEs und der BSW hinaus gehen, werden sogenannte

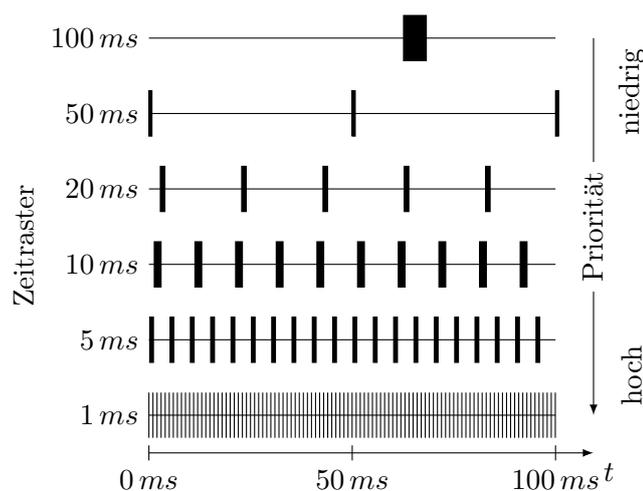


Abbildung 3.10: Abarbeitung der Funktionen innerhalb der verschiedenen Zeitraster.

Komplextreiber CDrv<sup>2</sup> eingesetzt. Daneben gibt es noch weitere Softwarekomponenten wie den Anwendungssupervisor (ASV), welcher für die Überwachung der Funktionen zuständig ist [Rei17].

### 3.3.1.2 Dynamische Sicht

Zeitliche Abläufe und deren Zuordnungen innerhalb des Motormanagement-Systems werden in der dynamischen Sicht beschrieben. Wie oben bereits erwähnt, gibt es echtzeitfähige Funktionen, welche garantiert innerhalb einer Zeit ein Ergebnis liefern müssen. Abweichungen können zum Beispiel Auswirkungen auf die Motorleistung oder erhöhten Schadstoffausstoß zur Folge haben.

Da der Mikrocontroller nur einen Befehl nach dem anderen ausführen kann, werden den Programmteilen unterschiedliche Prioritäten zugeordnet. Jene mit höherer Priorität können Teile mit niedrigerer Priorität unterbrechen, daher kann die Echtzeitfähigkeit gewährleistet werden. Die Berechnung einer Temperatur hat zum Beispiel eine niedrigere Priorität als die Berechnung der Einspritzmenge. Zusätzlich gibt es Funktionen die nicht zeitsynchron sondern abhängig von der Drehzahl berechnet werden müssen. Bei hohen Drehzahlen werden diese Funktionen, zu denen zum Beispiel die Berechnung der Einspritzmenge zählt, wesentlich öfter aufgerufen als bei niedrigen Drehzahlen. Das führt dazu, dass der Mikrocontroller weniger Zeit zur Ausführung von Programmteilen mit niedrigen Prioritäten hat.

Um die verschiedenen Prioritäten abbilden zu können und um Prozesslaufzeiten einzusparen, werden den einzelnen Programmteilen unterschiedliche Rechenraster zugeteilt. Abbildung 3.10 veranschaulicht die Abarbeitung der unterschiedlichen Funktionen anhand der Zeitraster. Dabei sind nicht alle vorhandenen Zeitraster abgebildet, auch die angedeutete Rechenzeit der jeweiligen Raster stimmt nicht mit der tatsächlichen Rechenzeit überein. Des Weiteren wurden Unterbrechungen durch die unterschiedlichen Prioritäten nicht berücksichtigt, da diese erst in einem späteren Abschnitt näher betrachtet werden sollen.

Die Zuordnung der Funktionen zu dem jeweiligen Zeitfenster erfolgt anhand der physikalischen

<sup>2</sup>Die Abkürzung CDrv kommt vom englischen Begriff Complex Driver

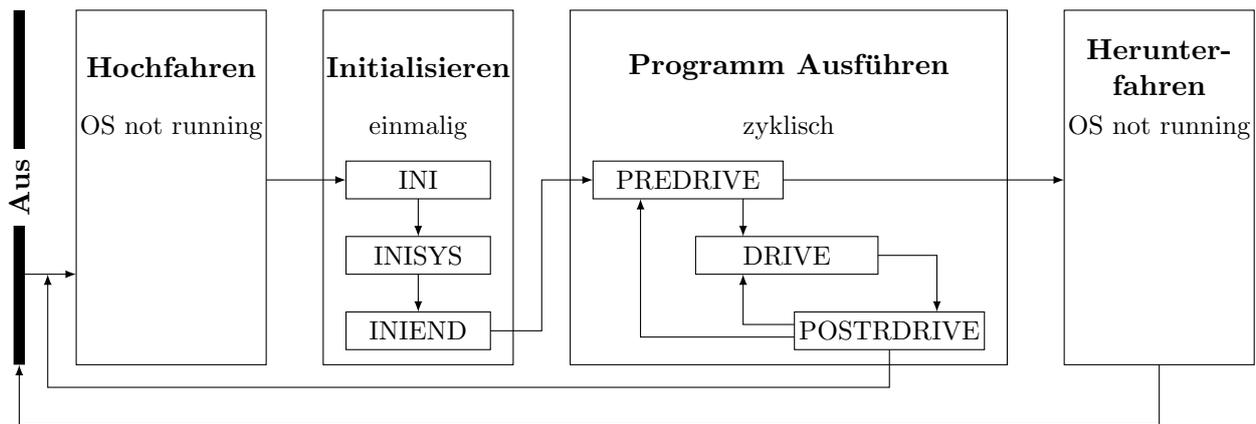


Abbildung 3.11: Betriebszustände des Motorsteuergeräts.

Eigenschaften. Die Berechnung der Temperatur kann zum Beispiel im 1000 ms-Raster ausgeführt werden. Die Berechnung eines Druckwertes kann im 10 ms-Raster notwendig sein. Die drehzahl-abhängigen Funktionen sind davon ausgenommen. Ausnahmen sind Funktionalitäten, die auch beim Motorstillstand gerechnet werden müssen, aber bei Motorbetrieb abhängig von der Einspritzung sind [Rei17].

Die unterschiedlichen Rechenraster sind in dieser Arbeit unter anderem bei der kaskadierten Regelstruktur aus Abschnitt 4.2 relevant, da die unterschiedlichen Kaskaden die zeitlichen physikalischen Abläufe widerspiegeln. So ist es nicht notwendig, den Positionsregler im selben Rechenraster aufzurufen wie den Stromregler.

Zur dynamischen Sicht gehören ebenfalls die Betriebszustände der Motorsteuerung. Zu diesen Zuständen zählen:

- Hochfahren:  
Erster Zustand nach dem Einschalten – das Betriebssystem wird gestartet (Controller initialisieren, Checksummen berechnen, Hardware-Tests durchführen etc.).
- Initialisieren:  
Spezifische Initialisierungsschritte der Software werden durchgeführt.
- Programm Ausführen:  
Abarbeiten der Funktionen in den einzelnen Zeitrastern (1 ms Tasks, 2 ms Tasks, 5 ms Tasks, segmentsynchrone Berechnungen usw.).
- Herunterfahren:  
Fixer Ablauf, welcher nach dem Abschalten des Motors durchgeführt werden muss.

Abbildung 3.11 zeigt den Zusammenhang der einzelnen Betriebszustände und deren Unterzustände. Die Betriebszustände sind unter anderem für die Aktivierung und Deaktivierung bzw. als Trigger für bestimmte Funktionalitäten oder Komponenten relevant. Zum Beispiel sollen Ventile mit Rückstellfedern in eine definierte Position gebracht werden, bevor die Versorgungsspannung nach dem Herunterfahren nicht mehr zur Verfügung steht. Andernfalls kann es durch wiederholtes

Zurückfallen in die Ruheposition rein durch die Federkraft zum Bruch der Anschläge kommen (vgl. Abschnitt 3.1).

Wird für die Regelung eines Stellers die in Abschnitt 3.3.2 verwendete Architekturkomponente verwendet – wie auch die in dieser Arbeit untersuchte Drosselklappe – so stammt der Sollwert meist aus einer darüberliegenden Softwarefunktion. Werden alle Prozesse im zyklischen Raster gerechnet und ist bei der Regelung zusätzlich ein I-Anteil vorhanden, so muss bei Deaktivierung bzw. Aktivierung des Stellers, z.B. durch den Übergang in einen bestimmten Betriebszustand, auch die Regelung initialisiert werden. Andernfalls kann eine eventuell vorhandene Abweichung zwischen Soll- und Istwert, z.B. durch einen Temperaturdrift in der Messung, zyklisch aufintegriert werden. Bei anschließender Aktivierung kann daher ein ungewollt hoher Ausgangswert der Regelung entstehen. Auch bei Deaktivierung der Komponente in bestimmten Betriebszuständen – gewisse Aktoren sind nur im Pre- und Postdrive aktiv – muss die Berechnung des Reglers unterbrochen werden. Andernfalls kann so eine Abweichung von Sollwert zu Istwert zu einem Regelabweichungsfehler führen, welcher gesetzt wird, wenn eine Regelabweichung über einen definierten Zeitraum vorhanden ist.

### 3.3.1.3 Funktionale Sicht

In der funktionalen Sicht werden Signalabläufe, Zustände sowie Übergänge zwischen Zuständen auf Funktionsebene beschrieben. Eine derartige Wirkkette kann vereinfacht auf eine Regelungsstruktur heruntergebrochen werden und beschreibt die Schritte:

Sens - Think - Act

Darunter wird der Ablauf verschiedener Software-Funktionen vom Einlesen einer oder mehrerer Systemgrößen, über Informationsverarbeitung hin zur Bereitstellung erforderlicher Ausgangsgrößen oder etwaiger Fehlerreaktionen verstanden. Ein wichtiger Baustein dieser Sicht ist die Darstellung des Verhaltens unter bestimmten Betriebszuständen.

### 3.3.2 Device Encapsulation

Die Device Encapsulation oder kurz DE dient zur Abbildung verschiedener Aktoren und Sensoren und ist im Schichtenmodell aus Abbildung 3.9 (vergleiche dazu Abschnitt 3.3.1.1) zwischen Anwendersoftware (ASW) und Hardwareschicht angeordnet [Rei17].

Sie ist als Bibliothek für die unterschiedlichen Steller und Sensoren im Motorsteuergerät zu sehen. Ihre Aufgabe ist es, die Schnittstellen der ASW unabhängig von der jeweilig angeschlossenen Hardware zu bedienen. So soll es für die Anwendersoftware nicht relevant sein, welcher Stellertyp die an ihm übergebene Ansteuergröße verarbeitet. Ein angeschlossener Aktor kann zum Beispiel digital, über eine PWM oder über eine H-Brücke angesteuert werden (für PWM und H-Brücke siehe 3.2). Die sich ergebenden unterschiedlichen Anforderungen an der Signalverarbeitung soll für die Anwenderschicht weitestgehend unbeachtet bleiben können. Daher kann die Komplexität in der ASW deutlich reduziert werden. Die Bibliotheksfunktion übernimmt die Sollwerte – im Falle eines Aktors – und kümmert sich zugleich um deren Verarbeitung als auch um Diagnosefunktionen. Der Softwareanteil der Anwendersoftware kann daher stark reduziert werden.

Zur Erfüllung der regelungstechnischen Aufgaben des Motorsteuergerätes müssen beispielsweise verschiedene physikalische Größen in der Software eingelesen werden. Durch die Bibliotheksfunktion ist es unter anderem nicht nötig, für Temperatur- oder Drucksensoren eigene Softwarekomponenten zu entwickeln. Das würde nur die Pflege der Software wesentlich erhöhen und wäre anfälliger für Fehler. Die Anforderungen an die Informationsverarbeitung kann jedoch in der Software für Temperatur- und Drucksensoren ganz unterschiedlich sein, so ist es für einen Temperatursensor nicht notwendig, alle zehn Millisekunden einen neuen Wert zur Verfügung zu stellen, da sich in der Zwischenzeit der Temperaturwert nicht wesentlich geändert haben wird. Ein Druckwert kann sich hingegen innerhalb zehn Millisekunden maßgeblich ändern. Das zeitliche Verhalten kann, wie in der dynamischen Sicht der Software angesprochen, durch unterschiedliche Rechenraster berücksichtigt werden. Die Bibliotheksfunktion bieten durch einen Variantenmechanismus eine einfache Möglichkeit all diesen Anforderungen gerecht zu werden.

Ein Variantenmechanismus dient dazu, die Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten abzubilden. Hierfür werden Funktionen eingesetzt, die es ermöglichen, die Software der DE an den jeweiligen Steller oder Aktor anzupassen. Um nicht für jede an das Motorsteuergerät angeschlossene Peripherie eine eigene Softwarefunktion schreiben zu müssen, kann das Programm der Softwarekomponente per Schalter vervielfältigt und angepasst werden [Rei17].

Zur Verdeutlichung der Varianten dieser Softwarekomponente zeigt Abbildung 3.12 einen Ausschnitt der DE.

Neben dem Aufbereiten der Sensorsignale hat die DE zusätzlich die Aufgabe elektrische Fehler wie Leitungsbrüche, Kurzschlüsse gegen Batteriespannung, Kurzschlüsse gegen Masse oder andere elektrische Fehler zu erkennen sowie eine bestimmte Signalqualität zur Verfügung zu stellen. Ist das Sensorsignal fehlerhaft oder unplausibel, so kann der Sensorwert z.B. eingefroren, ein modellierter Wert zur Verfügung gestellt oder eine andere Maßnahme durchgeführt werden. Das jeweilige Vorgehen wird über die Signalqualität an den sogenannten Diagnose-Manager versendet [Rei17]. Die für den Stromregler relevanten Diagnosen bzw. Schnittstellen zum Diagnose-Manager werden in Abschnitt 4.3 behandelt.

Abbildung 3.13 zeigt die statische Sicht eines Aktormoduls. Neben dem gezeigten geregelten Aktor ist bei gesteuerten Aktoren kein Istwert der Regelgröße vorhanden, auch dieser Umstand soll für die ASW durch die Verwendung der Bibliothek irrelevant sein.

Bei der in dieser Arbeit implementierenden Stromregelung wird ein Aktormodul der DE zur Regelung verwendet. Der Stromwert des Gleichstrommotors, welcher für die Regelung benötigt wird, wird ebenfalls über ein Sensormodul der DE eingelesen. Daher ist es notwendig, die Informationen des Diagnose-Managers des Stromsensors im Aktormodul und der Regelung zu berücksichtigen. Bei einem ungültigen Eingangssignal muss ein sicherer Zustand der Klappe gewährleistet werden können. Um sowohl den Steller zu schützen, als auch ungewollte Auswirkungen auf das gesamte System zu minimieren.

In dieser Arbeit wird eine Stromregelung für die Drosselklappe entwickelt. Da die Drosselklappe Teil der DE ist, beschränkt sich der Einsatz nicht auf die Drosselklappe, sondern soll für alle über H-Brücken versorgte Gleichstrommotoren, die Teil der DE sind, eingesetzt werden können. Daher ist es notwendig, die Voraussetzungen für die Wiederverwendbarkeit in anderen Modulen der DE zu erfüllen.

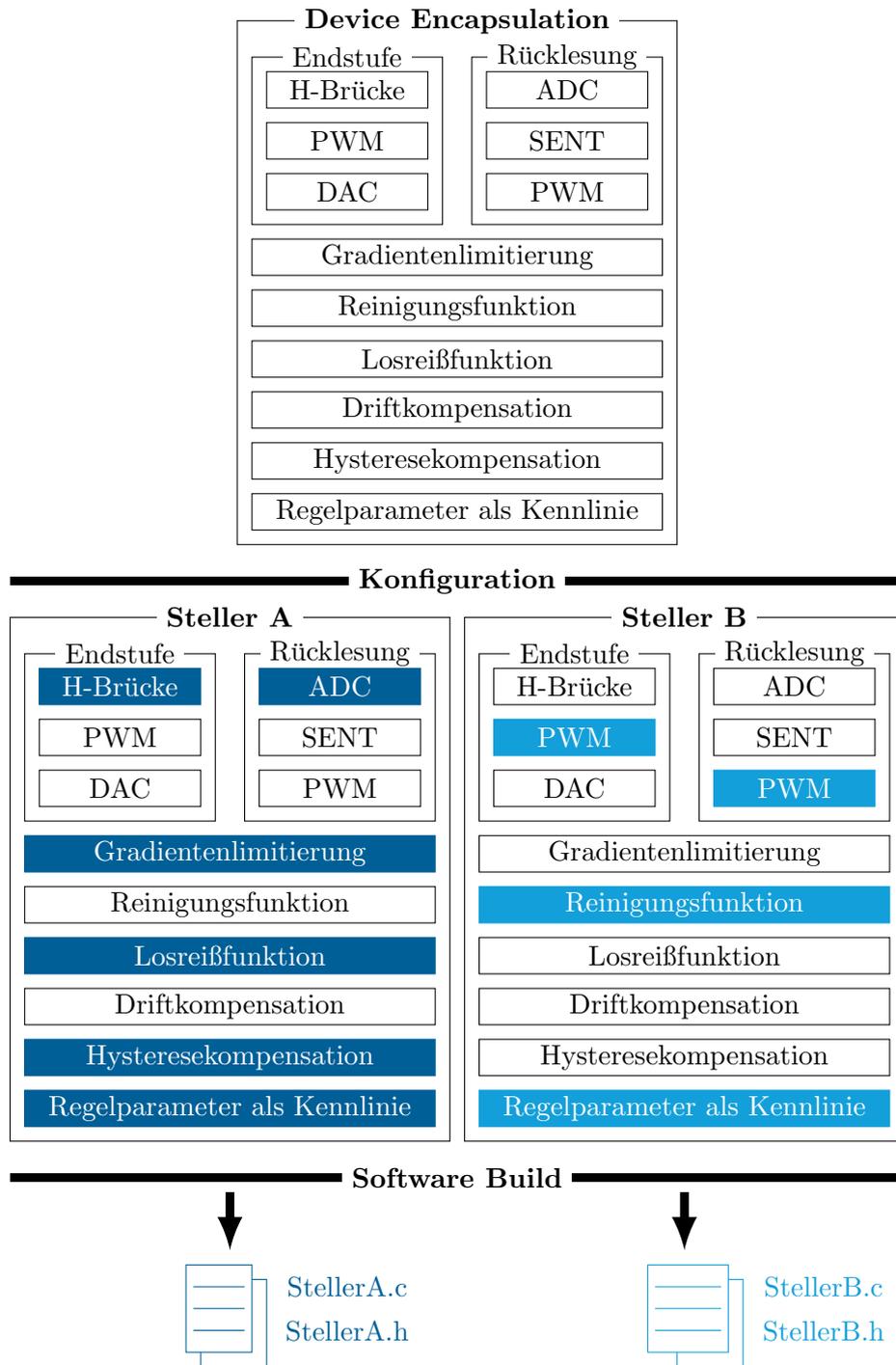


Abbildung 3.12: Variantenmechanismus sowie Konfiguration der Device Encapsulation.

k

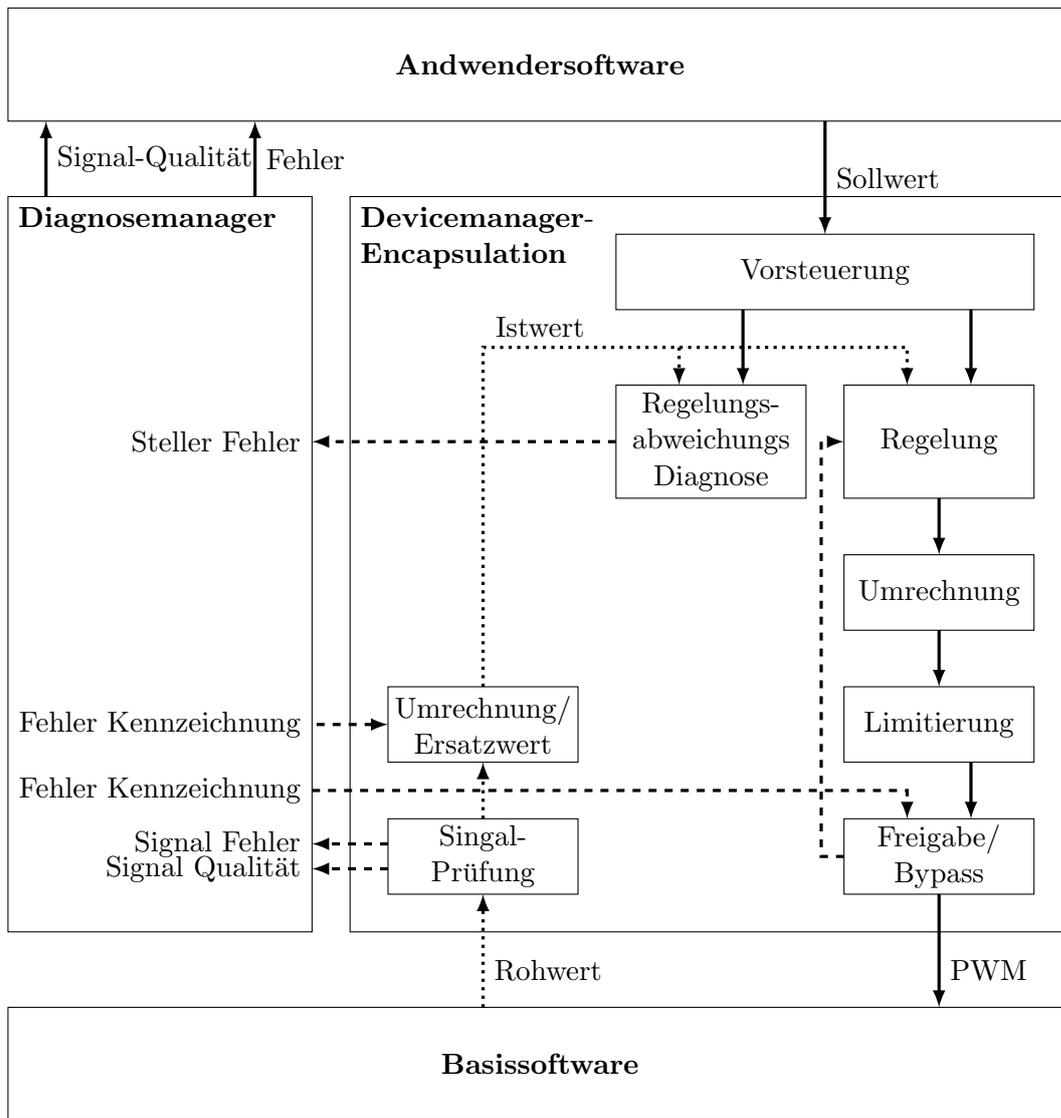


Abbildung 3.13: Statische Sicht der Device Encapsulation eines geregelten Aktors.

## 4 Implementierung

In diesem Kapitel wird ein mathematisches Modell der Drosselklappe hergeleitet. Die Modellierung beschränkt sich dabei auf die Teilkomponenten des Gleichstrommotors sowie der H-Brücke, welche in den Abschnitten 3.1 und 3.2 vorgestellt wurden. Zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Drosselklappe gehören prinzipiell die mechanischen Anschläge, die Rückstellfeder, die Reibung sowie das Getriebe. Diese sind jedoch Teil der bestehenden Regelung und somit nicht Teil dieser Arbeit. In [Bü14] wird ein Gesamtmodell einer Dieseldrosselklappe bestehend aus allen eingangs erwähnten Komponenten hergeleitet.

Das mathematische Modell wird im zweiten Abschnitt dieses Kapitels als Basis für den neuen Regelentwurf herangezogen.

### 4.1 Modellbildung

Für die Darstellung der für den Stromregler relevanten Regelstrecke wird zunächst auf ein Modell eines Gleichstrommotors eingegangen und danach auf jenes der Leistungsendstufe.

#### 4.1.1 Modellierung des Gleichstrommotors

Das dynamische Verhalten des untersuchten Gleichstrommotors besteht aus einem elektromagnetischen und einem mechanischen Teil. Anhand folgender Grundgleichungen können die dynamischen Zusammenhänge einer Gleichstrommaschine hergeleitet werden [Kug17, RK15]:

$$u_a = R_a i_a + L \frac{di}{dt} + u_i \quad (4.1a)$$

$$u_i = k_1 \Phi_e \omega \quad (4.1b)$$

$$M_M = k_1 \Phi_e i_a \quad (4.1c)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_M - M_L) \quad (4.1d)$$

$$\Phi_e = f(i_e) \quad (4.1e)$$

Dabei bezeichnet  $u_a$  die Ankerspannung,  $i_a$  den Ankerstrom,  $R_a$  den Wicklungswiderstand sowie  $L$  die Ankerinduktivität. Der Ankerspannung wirkt die induzierte Spannung  $u_i$  entgegen, diese wird auch elektromotorische Kraft (EMK) genannt. Sie entsteht sobald sich der Rotor zu drehen

beginnt und eine Spannung induziert, wodurch sich die wirksame Spannung reduziert. Die induzierte Spannung ist somit eine Störgröße, die proportional der Drehzahl ist.

In den Laplace-Bereich transformiert kann die Spannungsgleichung wie folgt angegeben werden:

$$U_a(s) - U_i(s) = R_a I_a(s) + sL_a I_a(s) \quad (4.2)$$

Definiert man den Ankerstrom  $I_a(s)$  als Eingangsgröße und die tatsächlich wirksame Spannung  $U_a(s) - U_i(s)$  als Ausgangsgröße, ergibt sich eine Übertragungsfunktion, die die Form eines PT1-Gliedes (Verzögerungsglied erster Ordnung) mit der Zeitkonstante  $T_a$ , hat:

$$G(s) = \frac{I_a(s)}{U_a(s) - U_i(s)} = \frac{1}{R_a} \frac{1}{1 + sT_a}, \text{ mit } T_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (4.3)$$

Die Gleichung 4.3 kann in das Ersatzschaltbild der Abbildung 4.1 zusammengefasst werden.

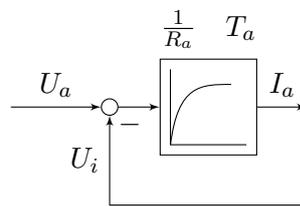


Abbildung 4.1: Ersatzschaltbild der Ankerspannung.

Der Quotient aus Ankerinduktivität und Ankerwiderstand ergibt die sogenannte Ankerzeitkonstante  $T_a$  und ist ein Maß für die Änderung des Stroms bei Änderung der Klemmenspannung.

Aufgrund der Rotationsträgheit im mechanischen System wird aus dem Drehmoment eine Bewegung erzeugt. Zusätzlich zum Motordrehmoment aus der Grundgleichung 4.1c ist das Lastdrehmoment  $M_L$  zu berücksichtigen, wodurch sich das wirksame Drehmoment zu 4.1d reduziert [RK15, 2]. Das Lastmoment setzt sich im Fall der Drosselklappe aus drei Momenten zusammen: aus dem Reibmoment  $M_R$ , dem Federmoment der Rückstellfeder  $M_F$  sowie dem Moment  $M_A$ , welches durch den Luftfluss entsteht [Bü14, GGB15].

Ähnlich der Abbildung 4.1 kann ein Ersatzschaltbild der mechanischen Zusammenhänge angegeben werden (Abbildung 4.2).

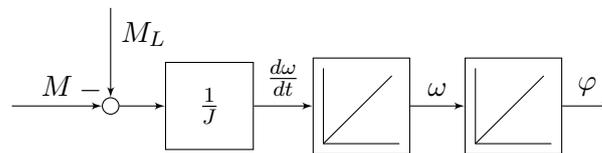


Abbildung 4.2: Ersatzschaltbild der Mechanik des Gleichstrommotors.

Die mechanische Zeitkonstante  $T_m$  berechnet sich zu:

$$T_m = \frac{R_a J}{k^2}. \quad (4.4)$$

Sie ist ein Maß für die Änderung der Drehzahl bei Änderung der Klemmenspannung.

Ein Vergleich der Ankerzeitkonstante und der mechanischen Zeitkonstante für den in dieser Arbeit verwendeten Steller zeigt, dass ein unterlagerter Stromregler durchaus sinnvoll ist:

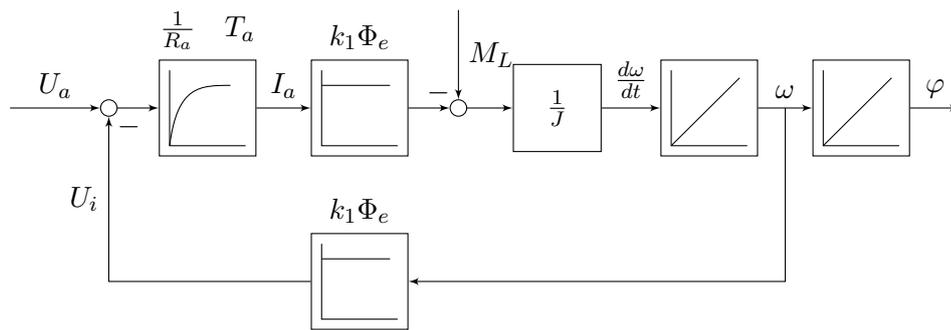


Abbildung 4.3: Ersatzschaltbild des Gleichstrommotors.

$$T_a = 0,54 \text{ ms}$$

$$T_m = 12,8 \text{ ms}$$

Das Drehmoment kann über den Ankerstrom schon vor einer merklichen Änderung der Drehzahl eingepreßt werden.

Zusammengefasst kann das Ersatzschaltbild des Gleichstrommotors in Abbildung 4.3 angegeben werden.

#### 4.1.2 Modellierung der Leistungsendstufe

Die Device Encapsulation (DE) verfügt über die Möglichkeit, die Ansteuerfrequenz der H-Brücke abhängig von gewissen Systemparametern anpassen zu können. Damit die Modellbildung der Leistungsendstufe nicht zu komplex wird, wird die Ansteuerfrequenz als konstant angenommen. Eine Änderung des Spannungsniveaus wird über das Verhältnis der Einschaltzeit  $t_{ein}$  zur Periodendauer  $T = \text{konstant}$  verändert (vergleiche Abbildung 3.3).

Der Ansteuerwert wird von der DE berechnet und in ein bestimmtes Register im Motorsteuergerät geschrieben. Die Basissoftware (BSW) liest dieses Register und gibt den dort hinterlegten Wert als Tastverhältnis zur Ansteuerung der Leistungsendstufe aus. Erst nach einer vollendeten Periodendauer  $T$  liest die BSW einen neuen Wert des Registers, Änderungen werden also erst bis zu einer Periodendauer wirksam. Das Stellglied kann so als Totzeitglied gesehen werden.

Für die Berechnung der Zeitkonstante des Totzeitglieds kann unter Voraussetzung nicht korrelierter Zusammenhänge zwischen Berechnung des Ansteuerwertes der DE und Abtastung des Registers der BSW ein gleichverteilter Erwartungswert angegeben werden, der dem statistischen Mittelwert entspricht [Sch13]:

$$T_{tot} = 0,5T \quad (4.5)$$

Die Übertragungsfunktion kann wie folgt approximiert werden:

$$G_{sg} = V_{sg} \cdot e^{-sT_{tot}} \quad (4.6)$$

mit einem allgemeinen Verstärkungsfaktor  $V_{sg}$ .

## 4.2 Regelkreis

Im vorherigen Abschnitt wurde auf das dynamische Verhalten der Regelstrecke eingegangen. Darauf aufbauend soll nun ein Regelungskonzept für das zugrunde liegende System erarbeitet werden. Zur Wiederverwendung des vorhandenen Konzepts der Lageregelung in der Bibliotheksfunktion wird eine Kaskadenregelung eingesetzt. Daher bleibt die bestehende Funktionalität im Motorsteuergerät weitgehend unberührt, es muss lediglich der Stromregler als zusätzliche Funktion hinzugefügt werden. Dieser Ansatz passt zur modularen Stellerkonfiguration, wodurch das neue Konzept bei Bedarf verwendet werden kann. So kann entweder ein Steller mit der kaskadierten Regelung oder mit der Stromregelung alleine je nach Anwendungsfall konfiguriert werden. Die Konfiguration der Bibliotheksfunktion wurde in Abbildung 3.12 erörtert. Das bestehende Regelungskonzept ist nicht Teil dieser Arbeit, deshalb wird darauf auch nicht näher eingegangen.

Abbildung 4.1 zeigt das für den Stromregler zu regelnde System, welches aus den Übertragungsfunktionen des elektrischen Teils des Gleichstrommotors besteht, siehe Gleichung 4.3. Dabei handelt es sich um ein Verzögerungsglied erster Ordnung, welches durch  $u_a$  gesteuert werden kann und von  $u_i$  beeinflusst wird. Für dieses System wird in der Anwendung ein PI-Regler empfohlen [RK15, Sch13]. Durch den I-Anteil kann eine bleibende Regelabweichung vermieden werden.

Der Einfluss über die induzierte Spannung ist für große Massenträgheitsmomente vernachlässigbar:

$$T_a \ll T_m \quad (4.7)$$

Ist die Bedingung erfüllt, kann der Strom bereits eingeregelt werden, bevor sich die Drehzahl  $\omega$  ändert [Sch15].

Die induzierte Spannung  $u_i$  ist entsprechend Gleichung 4.1b von der Drehzahl  $\omega$  abhängig. Um den Einfluss durch Aufschaltung von  $u_i$  zu kompensieren, muss  $\omega$  dem System zur Verfügung stehen. Da die Drosselklappe über eine Positionsrückmeldung aber keine Drehzahlmessung verfügt, kann durch Ableitung der Winkelposition auf die Drehzahl  $\omega$  geschlossen werden. Abbildung 4.4 zeigt die Stromregelstrecke, die zugleich der innere Regelkreis der Kaskadenregelung ist, vergleiche Abbildung 2.5.

Der innere Stromregelkreis nach Abbildung 4.4 wird um den bestehenden Lageregelkreis aus der Bibliotheksfunktion (vergleiche Abbildung 2.3) ergänzt. Für die Lageregelung wird ein PID-Regler verwendet. Für eine bessere Übersicht wurde der Anteil des Gleichstrommotors sowie des Sensors zur Positionserfassung der Klappe im Block **ThrVlv** (englisch für Throttle Valve) zusammengefasst und der Block für die Vorsteuerung weggelassen.

Die Kaskadenregelung besteht somit aus mehreren in sich verschachtelten Regelkreisen. Wichtig ist, dass die Dynamik der inneren Kreise höher ist als jene der äußeren Kreise. Ein Vergleich der beiden Zeitkonstanten des Gleichstrommotors  $T_a$  und  $T_m$  zeigt, dass die elektrische Zeitkonstante kleiner ist als jene des mechanischen Teils, wodurch die oben genannte Forderung erfüllt ist. Die Kaskadenregelung hat folgende Vorteile [Sch13]:

- Begrenzung der geregelten Größen
- Reduzierung der Komplexität durch Trennung der Strecke
- Stufenweise Inbetriebnahme, beginnend beim innersten Kreis

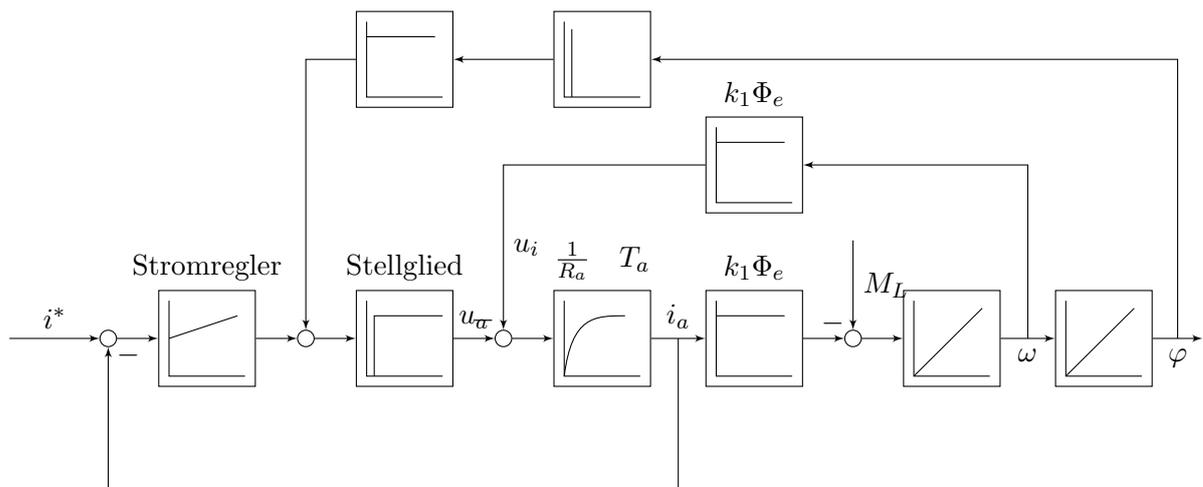


Abbildung 4.4: Stromregelkreis.

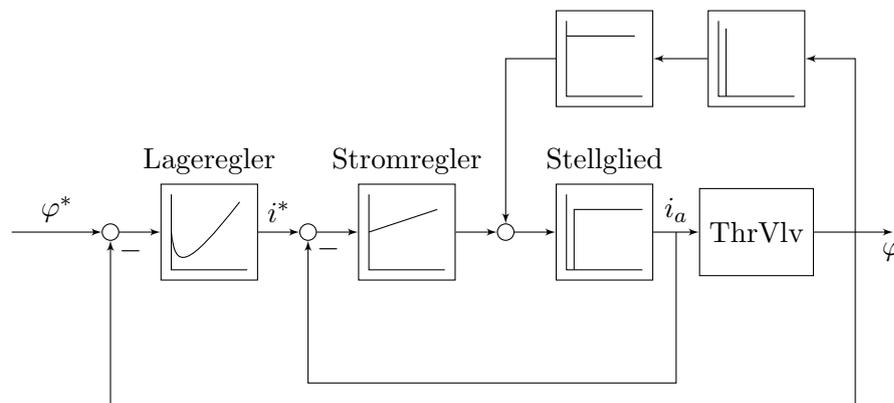


Abbildung 4.5: Ersatzschaltbild des Lageregelung mit unterlagelter Stromregelung.

Durch die Implementierung des Stromsensors in ein bestehendes Regelungskonzept stellt sich die Frage des richtigen Eingriffpunktes, zumal zwischen dem Ausgang des Lagereglers und dem Schreiben des Ausgabewertes in die zugehörigen Register weitere Funktionen berechnet werden. Da die diversen Steller und auch die Drosselklappe komplexe und nichtlineare Strecken darstellen, wurde für die Bibliotheksfunktion über die Jahre etliche zusätzlichen Funktionen entwickelt, um den Anforderungen an die Regelgüte und Ähnliches gerecht zu werden. Neben der Berechnung des Ansteuerwertes sind auch die Eingriffe von Diagnosen sowie deren Ersatzreaktionen im Berechnungspfad bei der Integration des Stromreglers zu berücksichtigen.

Wird der Stromregler nach dem Lageregler und nachfolgenden Diagnosen integriert, also direkt vor dem Beschreiben des Registers, hat das neue Regelungskonzept einen direkten Einfluss auf alle diese Berechnungen. Ebenso kann sich deren Verhalten unter Umständen daher ändern. Das hat eine Neubewertung aller betroffenen Funktionen zur Folge, etwaige spezifische Applikationen können daher zu korrigieren sein.

Wird der Stromregler nach dem Lageregler und vor den dahinter liegenden Funktionen integriert, so ist die Auswirkung auf bestehende Funktionalitäten wesentlich geringer.

Es kann aber auch durchaus Vorteile für einige Funktionen mit sich bringen, wenn der Strom-

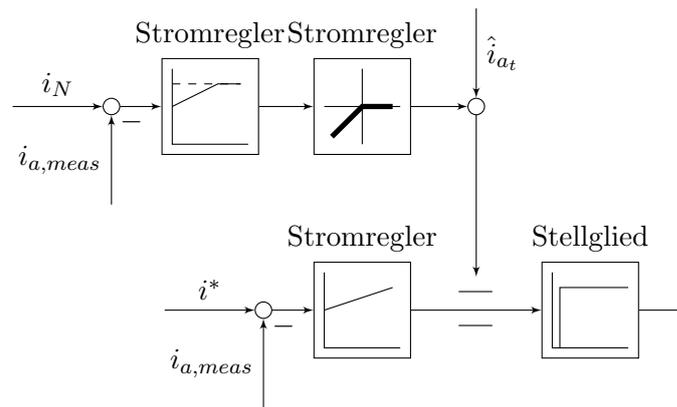


Abbildung 4.6: Stromregelkreis mit Begrenzungsfunktion.

regler zum Schluss des Berechnungspfades eingreift. Zum Beispiel unter Berücksichtigung der zusätzlichen Schutzfunktion wie der Limitierung des Stromes.

In dieser Arbeit steht die Regelung im Vordergrund. Bei einer Implementierung der Kaskadenregelung in die Bibliotheksfunktion muss der Eingriffspunkt und die damit verbundenen Auswirkungen untersucht werden, dies würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten. Um die Software, bzw. die bestehende Applikation für die im Kapitel 5 durchgeführten Tests so wenig wie nötig anpassen zu müssen, wurde der Stromregler nach dem Lageregler und vor den weiteren Funktionen der Bibliotheksfunktion integriert.

#### 4.2.1 Strombegrenzungsregelung

Zum Schutz des Gleichstrommotors sowie der Endstufe und um einen weiteren Vorteil der Kaskadenregelung ausnützen zu können, soll wie in Abbildungen 4.4 sowie 4.5 angedeutet das Regelungskonzept um einen Begrenzungsregler erweitert werden.

Eine Anforderung an die Software ist es, den Strom durch den Gleichstrommotor mit einem maximalen Wert zu begrenzen. Eine einfache und auch oft angewandte Möglichkeit in der Software des Motorsteuergerätes diese Aufgabe zu erfüllen, ist den zu begrenzenden Wert durch eine fix applizierte Grenze zu beschränken. Der in dieser Arbeit verwendete Gleichstrommotor kann allerdings für kurze Zeit Spitzenströme aufnehmen, ohne dabei thermische Beschädigungen davonzutragen. Solche kurzzeitigen Spitzen sollen ausgenutzt werden, um den Steller dynamischer agieren zu lassen. Die möglichen Belastungsgrenzen des Motors werden somit optimal ausgenutzt. Die Dauer und Höhe der Stromspitzen sind dabei durch den Hersteller des Gleichstrommotors vorgegeben.

Für solche Anwendungen eignen sich sogenannte Begrenzungsregler, in Abbildung 4.6 wurde eine derartige Begrenzungsfunktion für den beschriebenen Fall implementiert. Die Umsetzung ist an den Begrenzungsregler von [Sch15] aufgebaut.

Die Aufgabe der Begrenzung ist es, die kurzzeitigen maximal zulässigen Werte einzuhalten und rasch in den Nennbereich des Motors zurückzukehren.

Im Signalfussplan ist zu erkennen, wie es die Restriktion ermöglicht, durch den Einsatz einer Hilfsgröße und eines weiteren Reglers das Systemverhalten an die geforderten Gegebenheiten an-

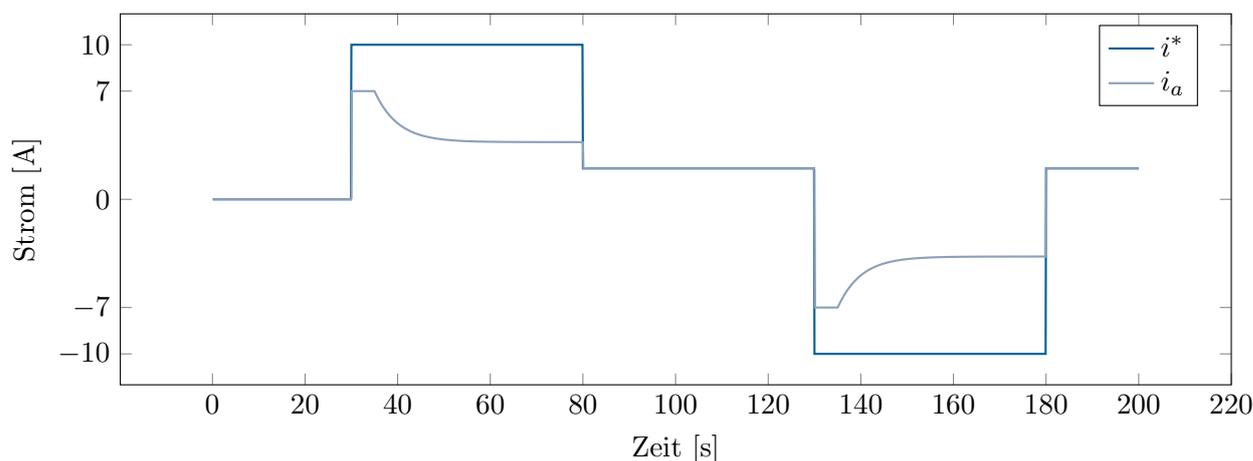
zupassen. Der neu eingeführte Block besteht aus einem PI-Glied und einem Kennfeld. Als Eingang dient die Differenz des zulässigen thermischen Nennstroms  $i_N$  und des gemessenen Ankerstroms  $i_a$ .

Wird der Motor aus dem Stillstand beschleunigt, ist der zurückgelesene Strom noch kleiner als der zulässige Nennstrom und das PI-Glied liefert ein positives Ausgangssignal. Wie in der Abbildung 4.6 zu sehen ist, setzt die Kennlinie das Ausgangssignal für positive Eingänge auf Null. Negative Eingangssignale sollen einen Wert ungleich Null liefern. Übersteigt der gemessene Strom den Nennstrom, also  $i_a > i_N$ , so wird abhängig von der Auslegung des PI-Reglers und der Applikation der Kennlinie der Sollstrom  $i^*$  auf den thermisch zulässigen Nennstrom  $i_N$  reduziert. Wie oben bereits erwähnt, sollte sich dieses dynamische Verhalten nach den Angaben des Herstellers richten und diese nicht verletzen.

Unter Berücksichtigung der induzierten Gegenspannung errechnet sich die maximal zulässige Spannung der Endstufe  $\hat{u}$  zu

$$\hat{u} = u_e + r_a \hat{i}_{a_t} \quad (4.8)$$

In Abbildung 4.7 ist ein simulierter Verlauf des Ankerstroms zu sehen, welcher durch den Einsatz des Begrenzungsreglers eingestellt wird.



**Abbildung 4.7:** Simulierter Verlauf des Ankerstroms mit Strombegrenzungsregelung.

### 4.2.2 Windup-Maßnahme

Wie im vorherigen Abschnitt bereits erwähnt, ist die Regelung der Drosselklappe in gewissen Bereichen der Regelstrecke beschränkt. Diese Einschränkungen können sowohl der bereits erwähnte Schutz vor Überbeanspruchung aufgrund zu hoher Ströme sein, als auch die maximale Geschwindigkeit mit der die Klappe in den Anschlag verfährt, um einen Bruch der Anschläge zu vermeiden.

Fordert der Regler ein Stellsignal an welches die zulässigen Grenzen übersteigt – sei es eine Beschränkung durch thermische Schutzmaßnahmen oder mechanische Gegebenheiten – kann dies erhebliche ungewollte Effekte im Regelkreis nach sich ziehen. Vor allem bei Strukturen mit I-Gliedern sind die Auswirkungen durch geeignete Mittel einzudämmen. Liegt eine Beschränkung vor, so integriert der I-Anteil die Differenz zwischen Soll- und Istwert weiter auf und liefert somit

ein ungewollt hohes Ausgangssignal. Dieses Phänomen wird als Windup des Integrators bezeichnet. Erst nach einer Umkehrung des Vorzeichens der Regeldifferenz wird der mitgeschleppte I-Anteil reduziert [Sch15]. In diesem Abschnitt soll die Auswirkung untersucht und eine geeignete Maßnahme zur Vermeidung des Effekts ausgearbeitet werden.

Da auf den Regelkreis nicht nur die vorgegebenen Sollgrößen sondern auch Störgrößen einwirken, tragen auch sie einen Teil zu den Windup-Problemen bei.

Die Abbildung 4.8 soll verdeutlichen welchen Einfluss eine Begrenzung für die Regelung hat. Für die nachfolgenden Messungen wird nur der Stromregler aus Abbildung 4.4 betrachtet, der Lageregelkreis wurde für die Messung entkoppelt und hat daher keinen Einfluss auf die Messungen. Für den Versuch wird der Ansteuerwert so begrenzt, dass dem Stromregler nicht der volle Bereich des Stromes zur Verfügung steht, den er benötigen würde, um den Sollwertsprung schnellstmöglich auszuregeln.

Die obere Abbildung aus 4.8 zeigt dabei den begrenzten Sprung des Sollwerts von 0,1 A auf 0,5 A. Bereits kurz nach dem Beginn des Regelungsvorganges kann der gewünschte Strom des Regelkreises nicht mehr eingestellt werden, da die Begrenzung aktiv ist. Eine weitere Erhöhung des Ausgabewertes durch das Stellsignal hat somit keine Auswirkung. Solange die Regeldifferenz des Stromreglers positiv ist, also  $i^* - i_a > 0$  gilt, integriert der I-Anteil des PI-Reglers die positive Differenz weiter auf. Erst wenn  $i^* - i_a < 0$  gilt, kann durch den integralen Anteil das Stellsignals aus der Begrenzung geführt werden. Ein erhöhtes Überschwingen des Ankerstroms  $i_a$  so wie eine längere Einregelzeit kann die Folge solch einer Begrenzung sein.

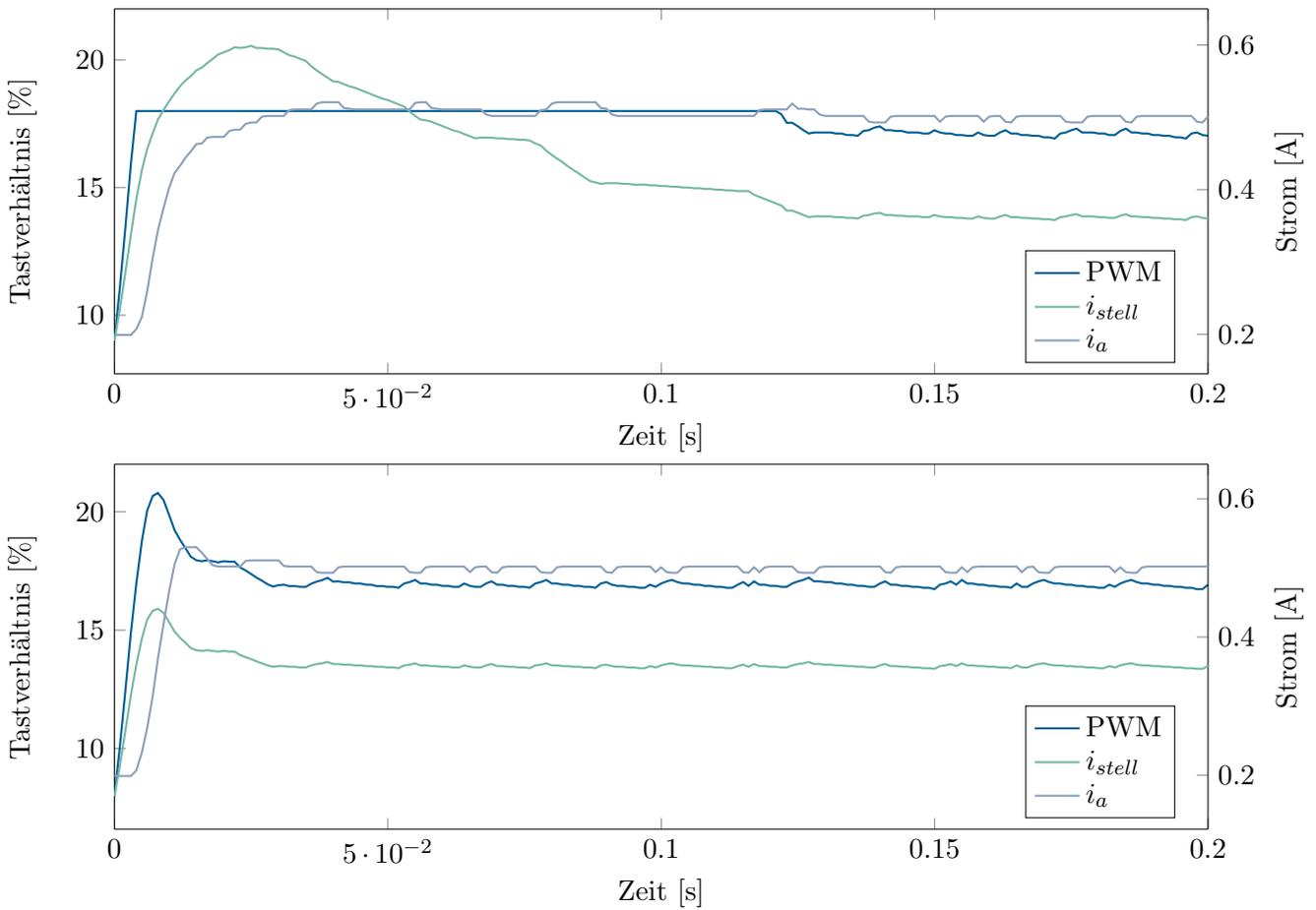
Im Vergleich zum begrenzten Regelungsvorgang ist in Abbildung 4.8 unten der selbe Sollwertsprung ohne Begrenzung dargestellt. Der Ausgabewert kann ungehindert vom Stromregler vorgegeben werden und so der Sprung schneller ausgeregelt werden.

Abbildung 4.9 zeigt eine Möglichkeit diesen unerwünschten Effekt zu minimieren. Dargestellt ist der P-Anteil und I-Anteil des Stromreglers. Überschreitet das Stellsignal des Stromreglers  $i_{stell}$  gewisse Grenzen soll der Block ein weiteres Erhöhen des Stellsignals durch den Integrator verhindern. Dazu wird dessen Eingangssignal in dieser Zeit auf Null gesetzt. Da der Integrator dennoch zyklisch berechnet wird, bleibt der Ausgang konstant, das Stellsignal hängt somit alleine von der Regeldifferenz und dem P-Glied ab.

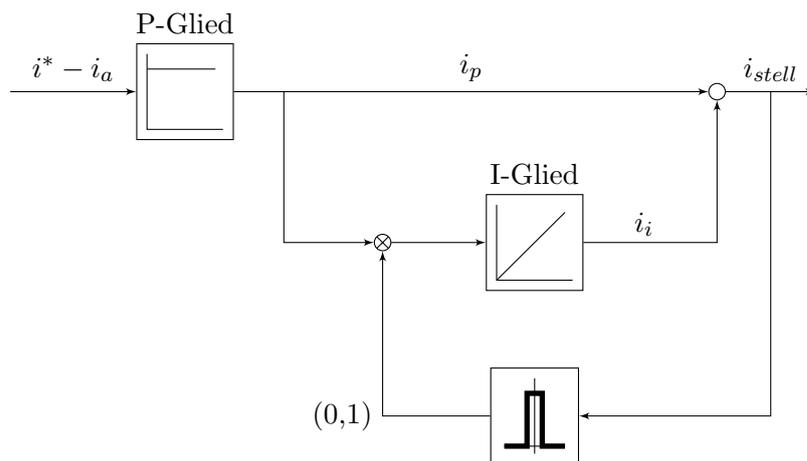
Das Problem des Windup kann auch beim Lageregelkreis auftreten, wenn zum Beispiel der geforderte Stromwert, welcher für die Ausregelung des Positionsprungs nötig wäre, nicht eingestellt werden kann. Tritt Windup beim Lageregelkreis auf, kann dies neben einer längeren Einregelzeit auch zu einem Überschwingen der Klappenposition führen und somit zu einer Zerstörung der Anschläge. Wie die späteren Messungen in Abschnitt 5.1 noch zeigen werden ist dies für die Drosselklappe nicht der Fall und soll daher im Rahmen dieser Arbeit auch nicht näher betrachtet werden. Da der Regler jedoch Teil einer Bibliotheksfunktion ist, muss dies beim einem Einsatz in einem anderen Steller mit anderen Anforderungen neu bewertet werden.

### 4.3 Diagnosen

Störungen des Antriebstrangs sollen durch Diagnosen der dazugehörigen Softwarefunktionalitäten abgefangen werden. Treten Probleme auf, können anhand der Diagnosen gegebenenfalls Ersatzre-



**Abbildung 4.8:** Abbildung oben: Stellvorgang der Stromregelung mit Begrenzung;  
 Abbildung unten: Stellvorgang der Stromregelung ohne Begrenzung.



**Abbildung 4.9:** Windup-Maßnahme.

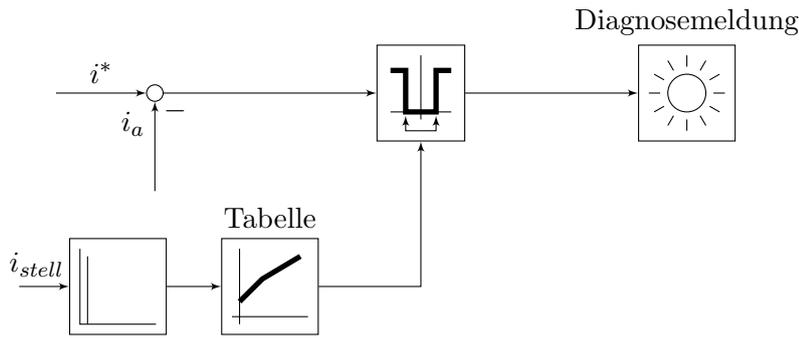


Abbildung 4.10: Diagnosefunktion des Stromregelkreises.

aktionen zum Schutz des Systems oder für eine Weiterfahrt bis zur nächsten Werkstätte eingeleitet werden [Rei17].

Die Überwachung für den Stromregelkreis ist in Form einer Regelungsabweichungsdiagnose umgesetzt. Dazu wird der Ist-Wert mit dem Soll-Wert verglichen. Ist die Differenz  $i^* - i_a$  für eine applizierbare Zeit größer einer applizierbaren Schwelle, kann von einem Fehler in der Regelstrecke ausgegangen werden. Dieser Fehler wird dem Diagnosemanager aus Abbildung 3.13 gemeldet, um Ersatzreaktionen einleiten zu können. Abbildung 4.10 zeigt den dazugehörigen Signalflussplan.

Während der Regler versucht eine Sollwertänderung auszuregeln, sind die Differenzen zwischen Soll- und Istwert kurzzeitig wesentlich größer als in einem stationären Betriebspunkt. Dennoch soll es zu keinen falschen Diagnosemeldungen kommen. Dazu kann anhand der eingezeichneten Umrechnungstabelle, dessen Eingang die Ableitung des Stellglieds ist, die Schwelle, ab der eine Regelungsabweichung erkannt wird, während der Laufzeit des Programms angepasst werden.

Wird anstelle der Ableitung des Regelungsausgangs jene des Ankerstroms  $i_a$  verwendet, kann es zu falschen Diagnosemeldungen aufgrund zu strenger Grenzwerte kommen. Ebenfalls ist es nicht zielführend den Sollstrom  $i^*$  als Bezugsgröße für die Diagnoseschwellen heranzuziehen. Denkbar wäre es eine dieser Größen als Erweiterung der Diagnose, um Bereiche in denen die Strommessung ungenaue Werte liefert, wie es die Abbildung 3.5 verdeutlicht, zu berücksichtigen. Dies könnte beispielsweise in Form einer zweidimensionalen Umrechnungstabelle realisiert werden.

Die Verläufe in Abbildung 4.11 zeigen eine Auswertung der Diagnose während eines Sollwert-sprungs des Stromreglers um 0,4 A. Die Regeldifferenz muss dabei unterhalb der strichliert eingezeichneten Grenze für eine Diagnosemeldung bleiben. Wie zu erkennen ist, erfüllen die beiden unteren Verläufe ( $i_a, i^*$ ) diese Anforderungen nicht.

Ein gemeldeter Fehler kann zum Beispiel auf eine Leitungsunterbrechung zwischen H-Brücken Ausgang und Drosselklappe hindeuten. Wird ein solcher Fehler nicht erkannt, könnte bei Kontakt der offenen Leitung mit einem anderen Bauteil ein unerwünschter Strom fließen und so zu Beschädigungen anderer Komponenten führen. Deshalb ist es wichtig nicht nur Fehler erkennen zu können, sondern darauf auch passend zu reagieren.

Dieselbe Diagnose eine Kaskade höher, also der Lageregelung, kann unter anderem auf eine verklemmte Klappe hindeuten. Der tatsächliche Winkel ist dann größer oder kleiner als der Sollwinkel und kann nicht ausgeregelt werden. k

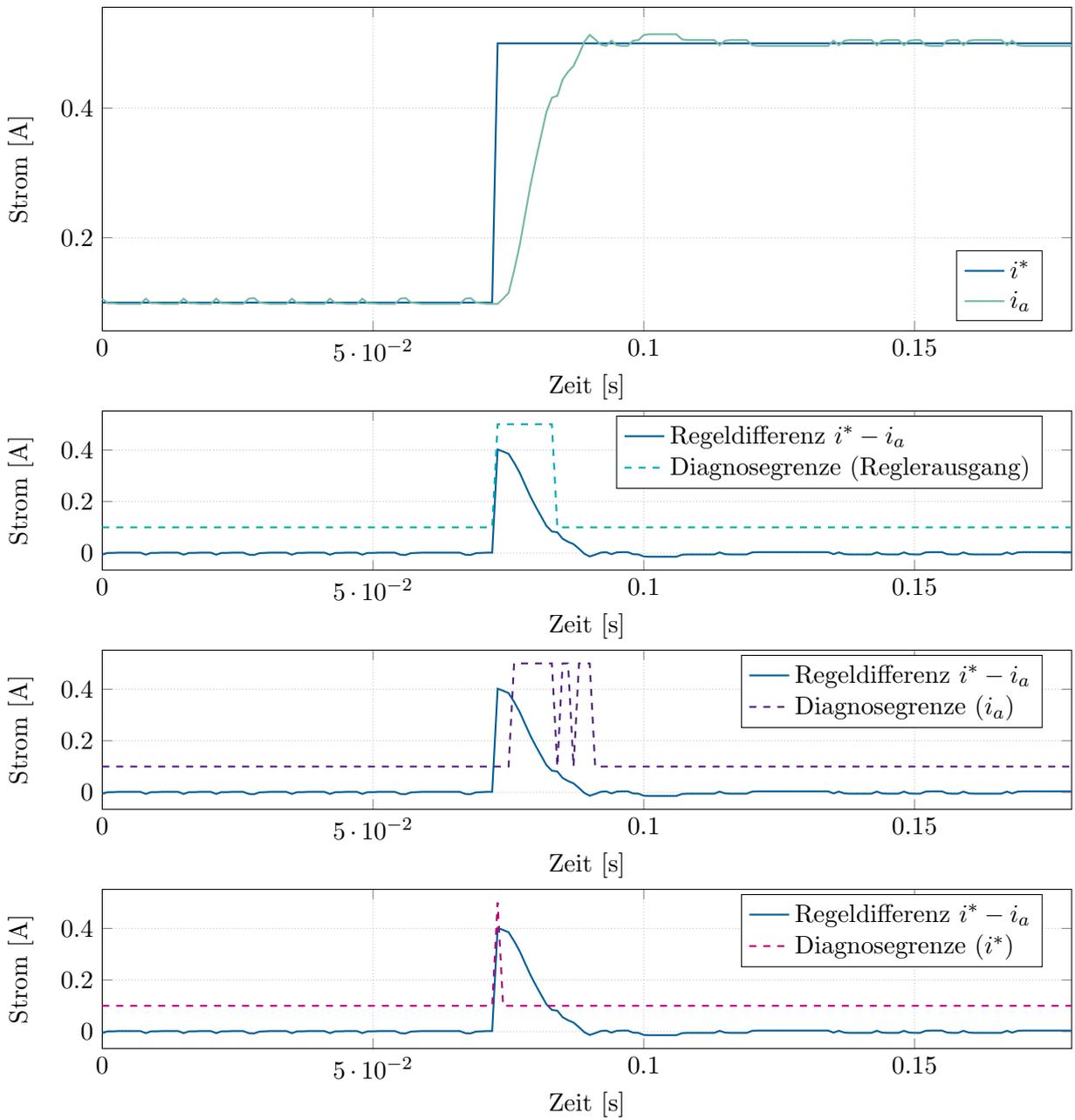


Abbildung 4.11: Diagnoseauswertung des Stromregelkreises.

## 5 Auswertung

In diesem Kapitel wird die ausgearbeitete Stromregelung als Teil einer Kaskadenregelung mit den anderen Regelungskonzepten verglichen. Die Implementierung ist Teil einer Softwarebibliothek, deshalb werden zum Vergleich jene Regelungskonzepte herangezogen, die ebenfalls aus dieser Bibliothek konfiguriert und für die Drosselklappe eingesetzt werden können. Dazu zählen der selbstadaptierende Regler, der PID-Regler ohne Temperaturkompensation sowie der PID-Regler mit Temperaturkompensation. Die folgenden Abschnitte sind ebenfalls nach diesen Konzepten gegliedert.

In Abschnitt 5.1 werden zunächst die regelungstechnischen Eigenschaften der erwähnten Varianten verglichen. Für den Vergleich der unterschiedlichen Regelungsstrategien werden zuvor Gütekriterien vorgestellt.

Wie zu Beginn dieser Arbeit erwähnt, sind die verfügbaren Ressourcen im Motorsteuergerät mit Bedacht einzusetzen. Sie spielen daher eine wichtige Rolle bei der Betrachtung eines Regelungskonzeptes im Automobilssektor und auch darüber hinaus. In Abschnitt 5.2 werden daher die unterschiedlichen Implementierungsmöglichkeiten hinsichtlich Ressourcenverbrauch untersucht. Zu Beginn des Abschnittes wird dabei geklärt, was unter dem Begriff der Ressource im Kontext eines Motorsteuergerätes zu verstehen ist.

Zusammen sollen die Gegenüberstellungen als Entscheidungsgrundlage für die Wahl eines Regelungskonzeptes von Aktoren dienen, im speziellen Fall für H-Brücken-gespeiste Gleichstrommotoren.

### 5.1 Regelverhalten

Für die Bewertung der Regelungsverfahren werden die Kennwerte der Sprungantwort aus Abbildung 5.1 als Basis herangezogen. Die Bewertung wird hinsichtlich der Überschwingweite  $M_P$  der Anstiegszeit  $t_r$  und der Einschwingzeit  $t_s$  durchgeführt. Die Überschwingweite  $M_P$  ist als absoluter Wert zu sehen, also unabhängig von der gewählten Sprungweite und wird daher auf den kompletten Stellbereich bezogen. Sie gibt die Differenz von Endwert zum maximalen Überschwingen beim Verstellvorgang an. Die Anstiegszeit  $t_r$  gibt jenes Zeitintervall an, in der die Klappe 90% des Endwertes des Sprungs erreicht hat. Für die Definition der Einschwingzeit  $t_s$  muss ein weiterer Parameter definiert werden. Die Toleranz  $\delta$  ist die prozentuale Abweichung zum Endwert des Sprungs der durch Rundungsfehler, Messungenauigkeiten etc. erreicht werden kann und wird

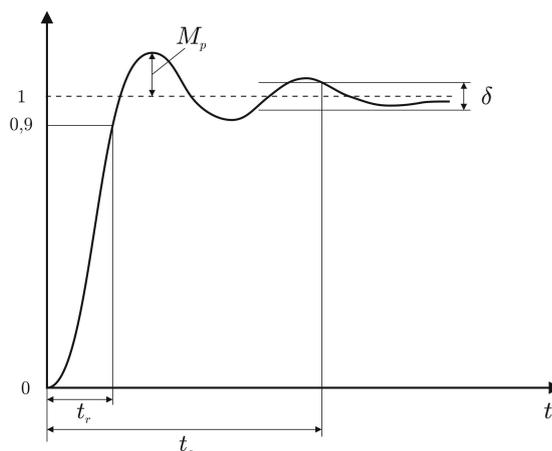


Abbildung 5.1: Kennwerte für den Reglervergleich. Quelle: [Hel]

ebenfalls wie die Überschwingweite  $M_P$  auf den kompletten Verstellbereich bezogen. Die Einschwingzeit  $t_s$  gibt jenes Zeitintervall an, bis die Klappe nur mehr innerhalb der Toleranz  $\delta$  verfährt.

Für den Vergleich werden Sprünge in beide Verstellrichtungen der Drosselklappe herangezogen. Beim Öffnen der Klappe muss gegen und beim Schließen mit der Federkraft gedrückt werden, daher ändert sich das Verhalten der Regelstrecke.

Die Regelung muss auch unter veränderten Streckenparametern noch stabil die Sollpositionen anfahren können. Um dies zu testen, und um die Auswirkungen auf den Regelvorgang untersuchen zu können, wird die Drosselklappe gegenüber dem Motorsteuergerät in einem Klimaschrank auf eine definierte Temperatur erwärmt bzw. gekühlt und die selben Tests wie bei Raumtemperatur (23 °C) nochmals durchgeführt. Abbildung 5.2 zeigt den verwendeten Testaufbau.

Der Simulator hat für die Durchführung der Tests in diesem Abschnitt nur eine untergeordnete Rolle, da er nur für die Spannungsversorgung und die Kommunikation zwischen dem Arbeitsplatzrechner und Motorsteuergerät benötigt wird. In Abschnitt 5.2.1 kommt dem Simulator eine weitaus wichtigere Rolle zugute und wird daher erst bei den Tests zum Ressourcenverbrauch beschrieben. Abbildung 5.3 zeigt einen Sprung von 15% auf 85% des Drosselklappenwinkels. Die Sprungantworten wurden bei Raumtemperatur aufgenommen. In der Abbildung nicht enthalten ist der PID-Regler mit Temperaturkompensation, da dieser bei Raumtemperatur durch die Applikation keine signifikanten Unterschiede aufweist wie der gewöhnliche PID-Regler und daher der Übersicht halber nicht eingezeichnet wurde.

Wie im Verlauf des Klappenwinkels  $\varphi$  in Abbildung 5.3 zu sehen ist, weist keines der drei Konzepte für den Regelungsvorgang ein Überschwingen auf. Während der PID-Regler und der selbstadaptierende Regler zu Beginn mit 100% Tastverhältnis versuchen die Regeldifferenz auszugleichen, steigt beim kaskadierten Regler das Tastverhältnis erst an und nimmt kurz vor dem Ende des Regelungsvorgangs seinen höchsten Wert an. Daher ist es dem PID-Regler sowie dem selbstadaptierenden Regler möglich die Zeit  $t_r$  relativ gering zu halten. Durch Sprunghafte Verläufe der Ansteuerungen wird das Getriebe der Drosselklappe erhöhten Belastungen ausgesetzt und können so die Lebensdauer des kompletten Stellers verkürzen. Beim PID-Regler treten sogar mehrerer solche

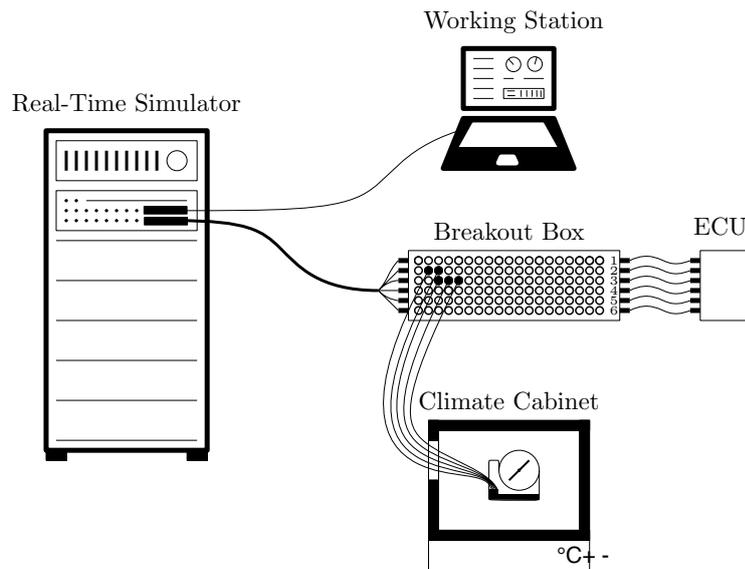


Abbildung 5.2: Testaufbau.

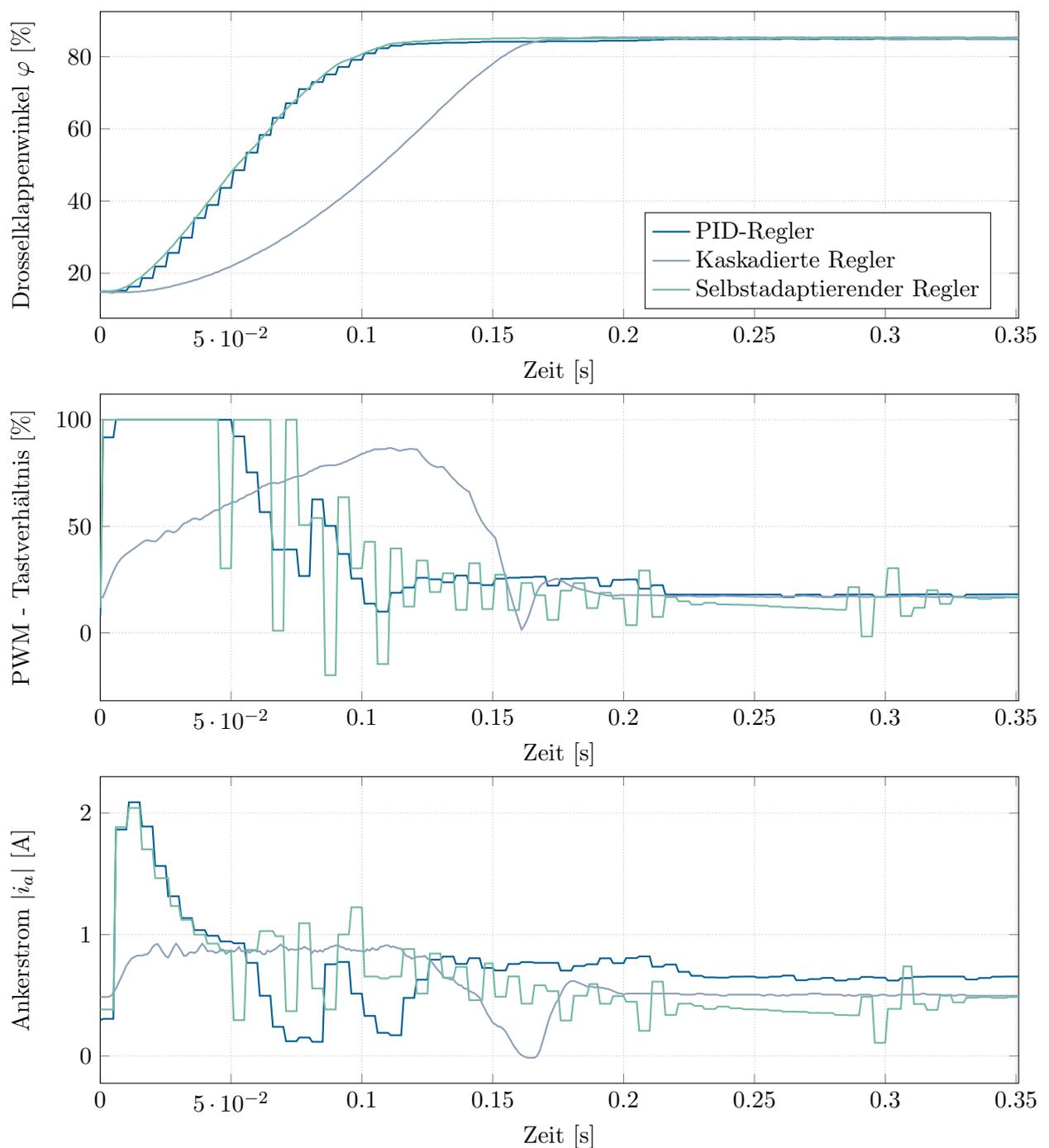
Sprünge von bis zu 100% Tastverhältnis während des Regelungsvorganges auf. Daher und wegen dem verwendeten Rechenraster von 5 ms kommt der stufenförmige Verlauf des Klappenwinkels während des Verstellvorganges zustande. Dies kann natürlich Auswirkungen auf die Lebensdauer der Drosselklappe haben. Eine Analyse der Auswirkungen dieser Sprünge auf die Lebensdauer geht über den Fokus dieser Arbeit hinaus und sei nur aus Gründen der Vollständigkeit erwähnt.

Ein ähnliches Verhalten der Regelungsvorgänge ist bei Sprüngen in entgegengesetzter Richtung, also von 85% auf 15% in Abbildung 5.4 zu sehen. Auch diese Aufnahmen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Im Gegensatz zur vorherigen Abbildung ist der Betrag des Ankerstroms eingezeichnet. Der Grund dafür ist, dass es durch die Motorsteuergerät interne Strommessung nur möglich ist die positiven Ströme zu messen. Zu sehen ist der direkt gemessene, und um den Offset korrigierte Strom der H-Brücke.

Die Kennwerte für den Reglervergleich sind in Tabelle 5.1 für Sprünge Richtung geschlossener Klappenstellung sowie in Tabelle 5.2 für Sprünge Richtung offener Klappenstellung gelistet. Um die Auswirkungen von Parameterschwankungen auf das Regelungsverhalten zu untersuchen wurde die Umgebungstemperatur der Drosselklappe nach Abbildung 5.2 verändert. Die Sprünge wurde bei Temperaturen von  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  sowie  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  erneut durchgeführt.

Die Auswertung zeigt, dass Parameterveränderungen bei der selbstadaptierenden Regelung keine Auswirkung auf den Regelungsvorgang haben. So konnten die selben Kennwerte wie der Anstiegszeit  $t_r$  sowie der Einschwingzeit  $t_s$  gemessen werden. Als Toleranz  $\delta$  wurde  $1^{\circ}$  Drosselklappenwinkel gewählt. Dieser Wert stammt nicht aus dem Datenblatt des Stellers sondern wurde auf Basis der ersten Messergebnisse gewählt, es hat sich gezeigt dass die Verstellvorgänge, unabhängig des Regelungskonzeptes in diesem Bereich durchgeführt werden können.

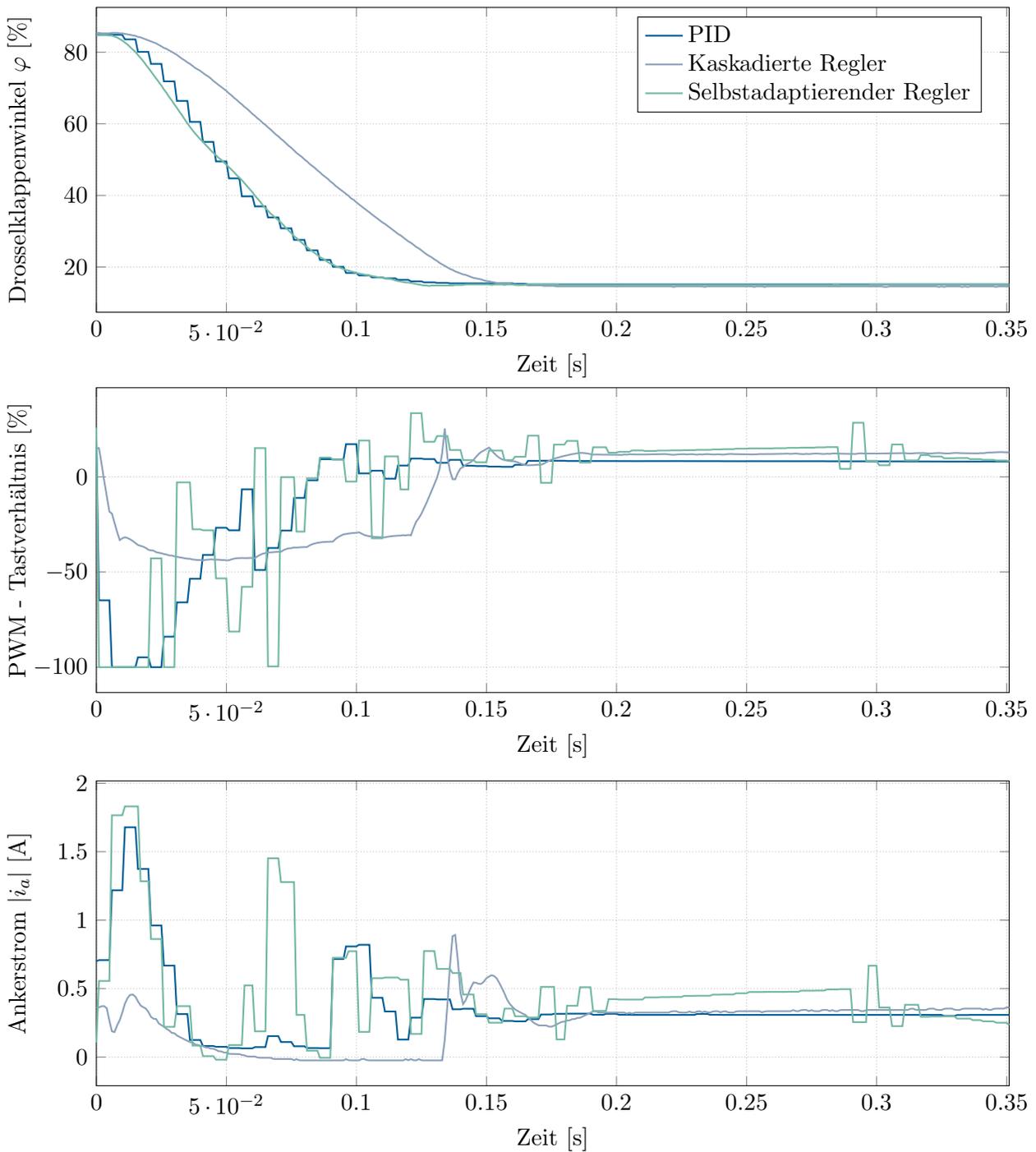
Wie schon bei den Messungen zuvor, kam es auch durch die veränderten Umgebungsbedingungen zu keinem Überschwingen des Drosselklappenwinkels, die Überschwingweite  $M_p$  von  $0,5^{\circ}$  Drosselklappenwinkel wird nicht überschritten. Die Wahl von  $M_p$  basierend dem Toleranzband von  $\delta$



**Abbildung 5.3:** Vergleich der Sprungantworten (15%-85%) bei Raumtemperatur.

stammt aus der Forderung keine Überschwingungen zuzulassen. Die PID-Regelung mit Temperaturkompensation weist ein leicht verbessertes Regelverhalten bei Parameterschwankungen als der gewöhnliche PID-Regler auf.

Obwohl die Kaskadenregelung in der Anstiegszeit  $t_r$  gegenüber der anderen Regelungskonzepte das Nachsehen hat, kann diese Methode bei der Einschwingzeit  $t_s$  sowohl die PID-Regelung mit,



**Abbildung 5.4:** Vergleich der Sprungantworten entgegen der Rückstellfeder (85%-15%) bei Raumtemperatur.

als auch ohne Temperaturkompensation übertreffen.

Die Auswertung der Regelungskennwerte kommt bei Sprüngen in Richtung geschlossener Drosselklappe auf ähnliche Ergebnisse, mit dem Unterschied, dass die untersuchten Zeiten im Durchschnitt geringer ausfallen, der Regelungsvorgang ist somit schneller abgeschlossen.

Regelungskonzept	Temperatur [°C]	$t_r$ [ms]	$t_s$ [ms]
PID-Regelung	-20	95,98	195,96
PID-Regelung	23	95,98	205,98
PID-Regelung	100	91,02	216,00
PID-Regelung mit Temp. Kompensation	-20	95,98	191,00
PID-Regelung mit Temp. Kompensation	100	91,02	206,99
Kaskadenregelung	-20	155,99	187,97
Kaskadenregelung	23	149,97	168,99
Kaskadenregelung	100	151,03	166,01
Selbstadaptierende Regelung	-20	91,98	111,97
Selbstadaptierende Regelung	23	91,99	127
Selbstadaptierende Regelung	100	91,98	119

**Tabelle 5.1:** Kennwerte der Regelungen bei Parameterschwankungen, Sprünge Richtung geschlossener Drosselklappe.

Regelungskonzept	Temperatur [°C]	$t_r$ [ms]	$t_s$ [ms]
PID-Regelung	-20	91,02	151,03
PID-Regelung	23	90,97	135,95
PID-Regelung	100	85,96	136,97
PID-Regelung mit Temp. Kompensation	-20	91,02	146,98
PID-Regelung mit Temp. Kompensation	100	81,00	136,00
Kaskadenregelung	-20	128,02	153,97
Kaskadenregelung	23	129,98	154,98
Kaskadenregelung	100	119,96	150,98
Selbstadaptierende Regelung	-20	89,00	129,98
Selbstadaptierende Regelung	23	89,00	121,99
Selbstadaptierende Regelung	100	85,00	125,02

**Tabelle 5.2:** Kennwerte der Regelungen bei Parameterschwankungen, Sprünge Richtung offener Drosselklappe.

Ein wichtiges Kriterium für ein Regelungskonzept der Drosselklappe ist das Moment, mit dem die Klappe in den Anschlag drückt. Ist das Moment im Anschlag zu groß, kann die Lebensdauer des Stellers verringert werden. Für die Untersuchung wurden erneut Tests mit unterschiedlichen Umgebungstemperaturen durchgeführt. Nach Gleichung 4.1c ist der Ankerstrom  $i_a$  proportional zum Moment des Motors und wird daher für den Vergleich als Messgröße herangezogen. Abbildung 5.5 stellt den gemessenen Ankerstrom der Regelungskonzepte gegenüber, in Bereichen in denen der Sollwert eine geschlossene Drosselklappe fordert. Zur Messung wurde der Ankerstrom über ein Zeitraum von einer Sekunde gemessen und der Mittelwert für die Abbildung herangezogen. Die selbstadaptierende Regelung benötigt bei -20 °C Umgebungstemperatur mit Abstand den geringsten Strom, um die Klappe im geschlossenen Zustand zu halten. Bei Raumtemperatur hingegen haben die drei übrigen Regelungskonzepte einen deutlich geringeren Ankerstrom. Außerdem sind

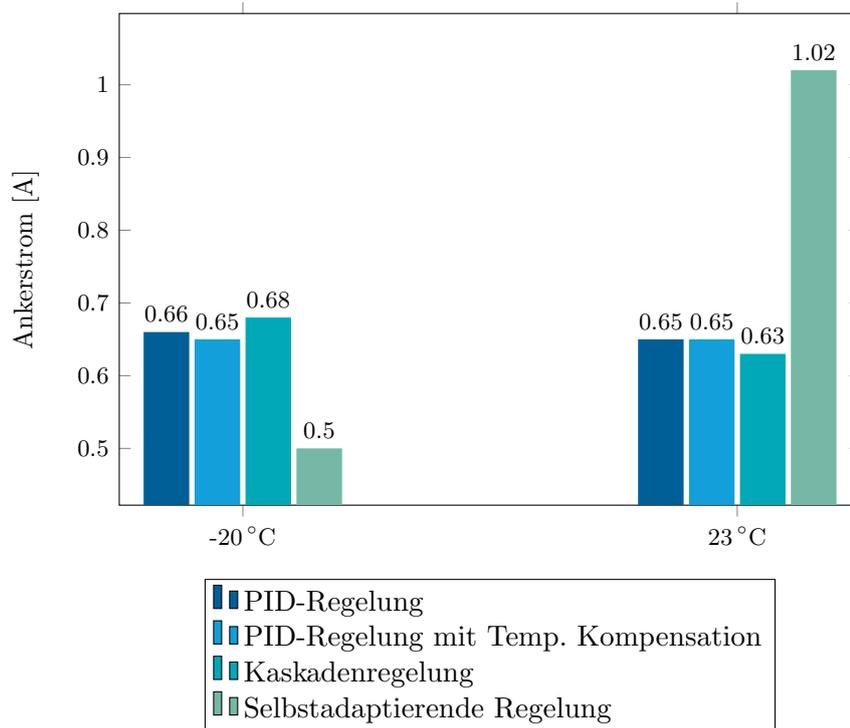


Abbildung 5.5: Gemittelter Ankerstrom bei vollständig geschlossener Drosselklappe.

diese nahezu konstant über den vorgegebenen Temperaturbereich hinweg und unterscheiden sich nicht wesentlich voneinander.

## 5.2 Ressourcenverbrauch

Spricht man von den Ressourcen eines Steuergeräts können damit viele verschiedene Bereiche gemeint sein. Abbildung 5.6 gibt einen Überblick aus welchen Teilen sich die Ressourcen im Motorsteuergerät zusammensetzen.

Zur Peripherie zählen Eingänge wie Analog-zu-Digital Konverter (ADC), wie jener für den Stromsensor, oder wie das SENT-Interface, welches für die Rücklesung der Winkelposition eingesetzt wird. Des Weiteren gehören der Peripherie PWM-Ausgänge, H-Brücken oder Ähnliches an. Diese sind in einem eigenen Baustein auf der Platine des Motorsteuergerätes integriert. Die erwähnten Ein- und Ausgänge sind einem Pin des Steuergeräts zugeordnet, um so externe Schnittstellen anbinden zu können.

Der Leistungsverbrauch der elektrischen Komponenten im Motorsteuergeräts zählt ebenfalls zu den Ressourcen. Ist das Motorsteuergerät aktiv, ohne dass der Verbrennungsmotor läuft (vergleiche dazu die Betriebszustände aus Abbildung 3.11) wird die benötigte Energie aus der Batterie entnommen. In diesem Zustand darf das Motorsteuergerät nur begrenzt Energie verbrauchen, damit noch genügend Reserven für einen Motorstart vorhanden sind. Ebenso muss während des Motorbetriebs die thermische Belastungsgrenze des Motorsteuergeräts beachtet werden, andernfalls wird mehr Wärme erzeugt als über das Gehäuse abgeführt werden kann. Die Analyse der

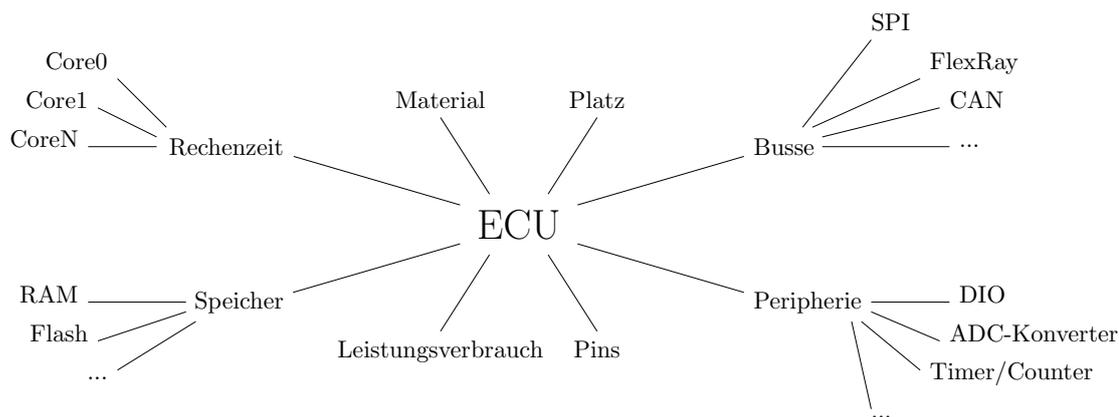


Abbildung 5.6: Ressourcen eines Motorsteuergerätes.

Leistungsentnahme steht besonders bei neuen Komponenten im Vordergrund. Da die Drosselklappe jedoch keinen neuen Aktuator darstellt sondern, über das Motorsteuergerät versorgt ist, wird in dieser Arbeit auf die Berechnung des Leistungsverbrauchs verzichtet.

Busse sind wie Analog-zu-Digital-Konverter nur im begrenzten Ausmaß vorhanden. Nicht nur die Anzahl der Busse an sich ist begrenzt, sondern bei CAN muss zum Beispiel auf die maximal mögliche Anzahl an Nachrichten, die übertragen werden können, geachtet werden.

Material und Platz zählen zu jenen Ressourcen, die bei einer Neuentwicklung der Hardware zu berücksichtigen sind. Da ein Motorsteuergerät in hoher Stückzahl hergestellt und verkauft wird, ist der Preis und somit die verwendeten Materialien (z.B. beim Gehäuse) ausschlaggebend. Dieses muss sowohl den thermischen Beanspruchungen von außen als auch von innen, welche aus einer Leistungsberechnung bzw. -vorhersage entstehen, standhalten. Neben den thermischen treten auch mechanische Beanspruchungen auf, die auf die Wahl des Materials einen Einfluss haben. Der Platzbedarf ist im Motorraum, in dem das Motorsteuergerät üblicherweise untergebracht ist, ebenfalls begrenzt. Die Hardware des Steuergeräts kann daher nicht beliebig groß ausfallen. Dennoch muss genügend Platz vorhanden sein, um die benötigten elektrischen Komponenten unterbringen zu können. Da zu Beginn der Entwicklung eines Motorsteuergerätes nicht im Detail fest steht, welche Ein- und Ausgänge im weiteren Verlauf der Entwicklung benötigt werden, müssen unter Berücksichtigung des begrenzten Platzangebotes und der entstehenden Mehrkosten genügend Reserven für mögliche Erweiterungen vorgehalten werden. Es ist zwar möglich über verschiedene Bestückungsvarianten der Platine einzelne Bauteile während des Entwicklungsprozesses zu tauschen, jedoch ist das bei ganzen Chips oder Treiberstufen nicht so einfach bzw. nur mit erheblichen Mehraufwand möglich.

Die Ressourcen Rechenzeit und Auslastung der Prozesse sowie dem verfügbaren Speicher werden durch das eingeführte Regelungskonzept direkt beansprucht und stehen daher im Fokus dieser Arbeit, sie werden in den nachfolgenden Abschnitten näher untersucht.

Wie in Abbildung 3.7 und 3.8 gezeigt, ist der verfügbare Speicher des Motorsteuergerätes stark begrenzt. Ohne ständige Optimierungsmaßnahmen wären in dem veranschaulichten Entwicklungszeitraum die zur Verfügung stehenden Kapazitäten bald überschritten worden. Daher ist es bei Neu- bzw. Weiterentwicklungen von Funktionalitäten der Software im Motorsteuergerät besonders wichtig ein Augenmerk auf die zu verbrauchenden Ressourcen zu legen.

Es stellt sich die Frage, ob der Gewinn an Funktionalität die dafür aufgebrauchten Ressour-

cen rechtfertigt. Vor allem bei der Weiterentwicklung des Reglers in der Bibliotheksfunktion ist diese Gegenüberstellung Teil des Entwicklungsprozesses. Ist der Nutzen durch die notwendigen Aufwände nicht gegeben, wird die Kaskadenregelung keinen Einsatz finden. Es werden dann nicht nur Ressourcen im Motorsteuergerät blockiert, sondern es erhöht sich auch der Applikationsaufwand. Der zusätzliche Aufwand verlängert wiederum die Entwicklungszeit bis zur Serienreife.

Beim Vergleich der Ressourcen werden prinzipiell dynamische und statische Ressourcen unterschieden. Für die Messung des dynamischen Anteils ist ein besonderer Messaufbau nötig, dieser soll zunächst in Abschnitt 5.2.1 dargestellt werden. Zur besseren Vergleichbarkeit werden in den darauffolgenden Abschnitten die Besonderheiten der Regelungskonzepte für sich analysiert, um zum Schluss eine Gegenüberstellung aller Konzepte zu ermöglichen. Es werden zuerst die statischen Anteile und danach die dynamischen betrachtet.

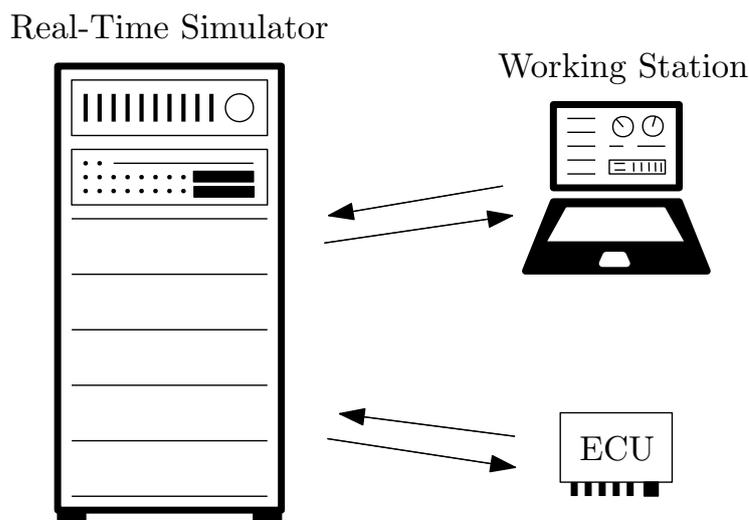
### 5.2.1 Messaufbau

Neben den zeitsynchronen Prozessen existieren auch Interrupt-gesteuerte sowie drehzahlabhängige Prozesse. Zur Messung der dynamischen Ressourcen ist es notwendig diese anhand verschiedener Betriebspunkte zu untersuchen. Um sowohl Auswirkungen auf die Laufzeit im niedrigen Drehzahlbereich als auch unter maximaler Belastung, also bei hohen Drehzahlen, bewerten zu können, werden zwei verschiedene Motordrehzahlen als Arbeitspunkte ausgewählt. Da Benzin- und Dieselmotoren unterschiedliche maximale Drehzahlbereiche besitzen, muss ein Kompromiss für die beiden Antriebsmöglichkeiten gefunden werden. Nur so können Vergleiche über Antriebskonzepte hinweg durchgeführt werden.

Für die Positionsregelung der Drosselklappe sind keine drehzahlabhängigen Berechnungen notwendig, deswegen wird in den Auswertungen der nachfolgenden Abschnitte auf eine Untersuchung mit zwei verschiedenen Drehzahlwerten, wie sonst für die dynamische Ressourcenmessung üblich, verzichtet. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit ist es ausreichend, wenn zur Analyse jene Drehzahl für die maximale Last herangezogen wird, die in diesem Bereich die größten Auswirkungen durch Interrupts bzw. der drehzahlabhängigen Prozesse auf das 1-ms-Rechenraster haben.

Zur besseren Reproduzierbarkeit werden die Messungen an einem Testplatz mit echter Steuergerätehardware und simuliertem Motor bzw. dessen Peripherie durchgeführt. Abbildung 5.7 zeigt den zugrundeliegenden Testaufbau der auch als *Hardware in the Loop* (HiL) bezeichnet wird. Die Ein- und Ausgänge der ECU müssen vom Simulator so zur Verfügung gestellt werden, dass die korrekte Funktionsweise für den jeweiligen Testfall gewährleistet ist. Für die Messung muss auf dem Arbeitsplatzrechner zunächst das passende Modell ausgewählt werden, welches abhängig von der Hardware sowie der verwendeten Software des Motorsteuergerätes ist. Dazu zählen Informationen wie Zylinderanzahl, Piezo- oder elektromagnetische Einspritzung, Pinbelegung etc. Das gewünschte Modell wird anschließend in den Simulator geladen. Daher ist es möglich, beliebige Umweltbedingungen bzw. Systemzustände für das Motorsteuergerät vorzugeben. Durch den Aufbau kann der oben erwähnte Betriebszustand für die Messung der dynamischen Ressourcen im Simulator eingestellt werden. Ziel des Aufbaues ist es, die Ein- und Ausgänge der ECU so zu bedienen, dass dieselben Funktionen der Software wie in einer realen Umgebung durchlaufen werden.

Das Motorsteuergerät führt für Aktoren Diagnosen wie Kurzschluss zu Batterie, Kurzschluss zu Masse, Leitungsunterbrechung und Ähnliches durch. Werden solche Defekte von der Software



**Abbildung 5.7:** Testaufbau für die dynamische Ressourcenmessung im Motorsteuergerät.

erkannt, können Ersatzreaktionen durchgeführt werden. Dies kann so weit führen, dass das Steuergerät in einen Notlauf des Motors wechselt.

Sind Ersatzreaktionen anstelle der normalen Funktionalitäten aktiv, kann die Messung der dynamischen Ressourcen verfälscht sein. Zum Beispiel verfahren bestimmte Steller in eine Art Notposition anstatt die gewünschte Position für den Fahrbetrieb zu regeln.

Im Falle von geschlossenen Regelschleifen mit zurückgelesenen Sensorwerten, wie zum Beispiel dem Stellwinkel der Drosselklappe, sind die Anforderungen an dem Simulator weitaus komplexer. Es genügt nicht mehr den Gleichstrommotor der Drosselklappe als Ersatzlast zur Verfügung zu stellen, zusätzlich muss noch ein passender Rücklesewert als Stellwinkel bereitgestellt werden.

Wie oben erwähnt wird für die Messung der dynamischen Ressourcen eine Drehzahl benötigt. Das bedingt, dass im realen Motor eine Einspritzung und zusätzlich bei Benzinmotoren eine Zündung erfolgen. Für die Einspritzung wird ein bestimmtes Brennstoff-Luft-Gemisch benötigt, siehe Abschnitt 3.1, welches unter anderem durch den Drosselklappenwinkel bestimmt wird. Somit ist die Aufgabe der ECU einen bestimmten Winkel über ein PWM-Signal für die benötigte Luftmenge einzuregulieren. Dazu benötigt der geschlossene Regelkreis für die Berechnung des Ansteuerwertes einen passenden Rücklesewert. Die Anforderung an den Simulator besteht nun zusätzlich darin, aus dem empfangenen PWM-Signal der Ersatzlast einen gültigen Rücklesewert der ECU zu übergeben. Dieser wird wie erwähnt für die Regelung benötigt. Wie bei der H-Brücke gibt es auch hier Diagnosen, die zum Beispiel den eingelesenen Sensorwert mit dem gewünschtem Sollwert plausibilisieren. Wie die elektrischen Diagnosen führen auch diese zu Ersatzreaktionen und somit bei Eintreten eines unplausiblen Verhaltens zu einer Verfälschung der Laufzeitmessung.

Die Beschreibung der Drosselklappe im Verbund der HiL wie in Abbildung 5.2 zu sehen, soll verdeutlichen wie aufwändig eine funktionsfähige Simulation sein kann, da neben der benötigten Ersatzlast und dem berechneten Winkel Dutzende teils weitaus aufwändigere Modellierungen notwendig sind, um den Betrieb eines Motors für das angeschlossene Motorsteuergerät simulieren zu können. Dabei kommt die Frage auf, warum für die Laufzeitmessung keine Untersuchungen an einem realen Motor oder in einem Auto vorgenommen werden. Das Problem hierbei ist unter anderem, dass die Software über einen längeren Zeitraum entwickelt wird und vor allem zu Be-

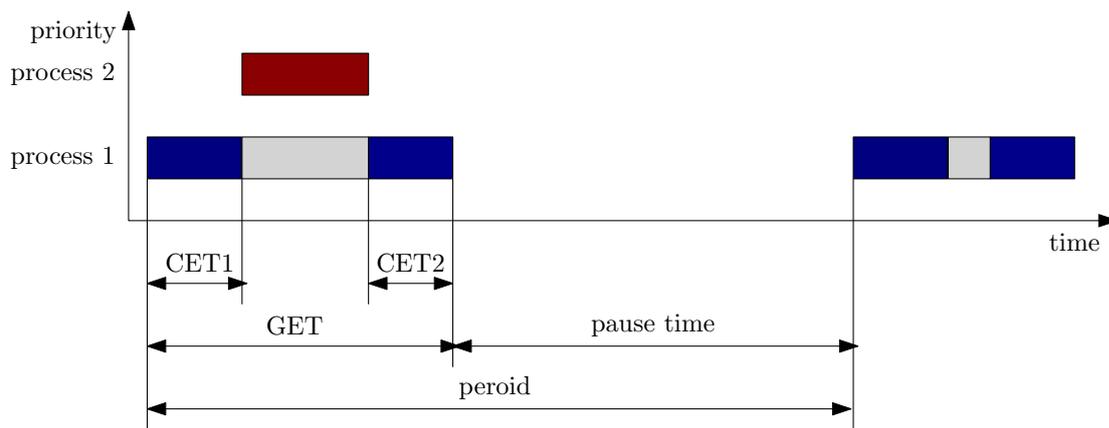


Abbildung 5.8: Parameter für die Berechnung der Prozesslaufzeit.

ginn noch keine passende Umgebung, also ein Motor am Motorprüfstand oder verbaut in einem Fahrzeug, zur Verfügung steht. Außerdem kann es unter Umständen unmöglich sein, bestimmte Tests an einem Motorprüfstand oder, in einem realen Fahrzeug zu reproduzieren. Ein Großteil der Sensoren des Motorsteuergerätes messen die verschiedensten Drücke und Temperaturen, diese sind in einem Simulator einfach zu reproduzieren. Geringste Abweichungen dieser Messgrößen können bereits andere Reaktionen in der Software hervorrufen, welche wiederum einen Einfluss auf die Laufzeiten einzelner Funktionen haben und somit diverse Messungen verfälschen können. Wie anhand der Abbildungen 3.7 und 3.8 zu erkennen ist, müssen die Ressourcen jedoch über den kompletten Entwicklungszeitraum beobachtet werden, um Tendenzen früh erkennen und Abhilfemaßnahmen einleiten zu können.

Zusätzlich zum Modell der ECU und dessen Peripherie, welches in Abbildung 5.7 in den Simulator geladen werden muss, wird am Arbeitsplatzrechner ein Programm benötigt, das die einzelnen Prozesse nach Abbildung 5.8 misst.

Betrachtet man den Prozess 1, so kann dieser von einem beliebigen Prozess höherer Priorität unterbrochen werden, sofern sich dieser am selben Prozessor befindet. Die tatsächliche Laufzeit eines Prozesses setzt sich aus der Summe der einzelnen ununterbrochenen Abschnitte CET1 bis CETN zusammen. CET steht für *Core Execution Time* und gibt jene Dauer an, die der Prozessor mit der Abarbeitung des Prozesses beschäftigt ist. Die gesamte Zeit, welche für die Abarbeitung der Funktionalität in einem Rechenzyklus benötigt wird, ist über GET, der *General Execution Time* angegeben. Die GET kann von Periode zu Periode durch die Unterbrechungen anderer Tasks variieren. Zusätzlich ist auch die Messung selbst Toleranzen unterworfen. Diese beiden Effekte können bis zu einem gewissen Grad vermindert werden, indem eine Mittelung der GET über einen längeren Zeitraum durchgeführt wird.

### 5.2.2 PID-Regler

Der PID-Regler für die Drosselklappenposition dient als Ausgangspunkt zum Vergleich der beiden nachfolgenden Regelungen. Sowohl der PID-Regler mit Temperaturkompensation, welcher in Abschnitt 5.2.3 analysiert wird, als auch der kaskadierte Regler, aus Abschnitt 5.2.4, sind Erweiterungen des nachfolgend vorgestellten Konzeptes.

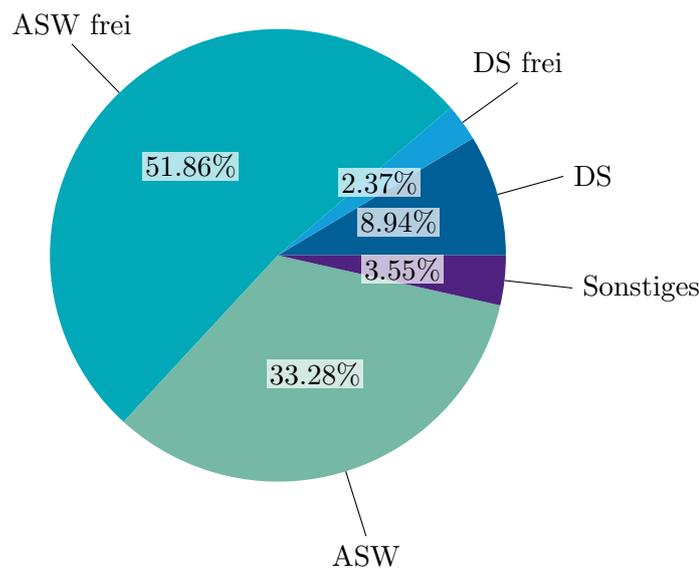


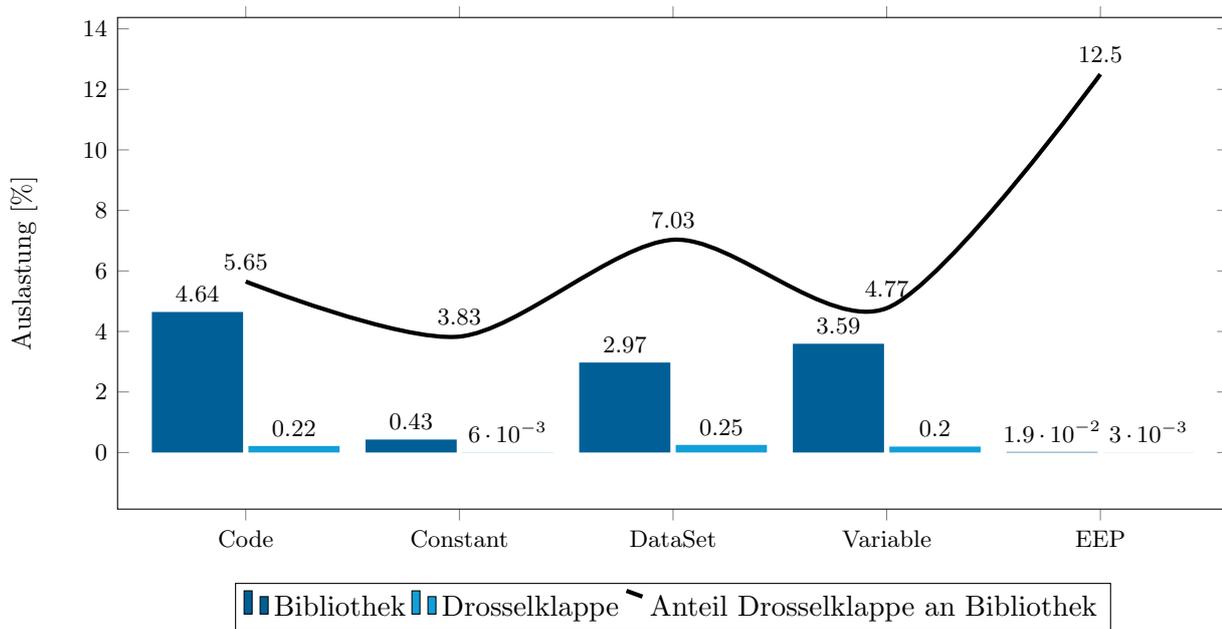
Abbildung 5.9: Flash-Verbrauch der ECU.

Der Flash-Speicher des in dieser Arbeit betrachteten Steuergeräts beträgt 16 MB und ist unterteilt in die Bereiche für die Anwendersoftware (ASW), den Datensatz (DS) sowie die sonstigen kleineren Bereiche. Diesen Speicherbereichen ist eine bestimmte Anzahl an Bytes zugeteilt, deren prozentuale Aufteilung, gegliedert in belegten sowie freien Speicherbereich, ist in [Abbildung 5.9](#) dargestellt. Wie zu erkennen ist, nimmt der ausführbare Programmcode mit ca. 85% einen Großteil des Speicherbereichs ein. Die Daten, welche für den eingesetzten Motor sowie dessen Peripherie spezifisch sind, betragen etwa 10% des gesamten Flash-Speichers und sind bereits zu zwei Drittel belegt. Da nicht einmal die Hälfte der verfügbaren Ressourcen im Flash-Speicher verbraucht sind, ist es naheliegend anzunehmen, dass im Motorsteuergerät ausreichend Kapazität vorhanden ist und eine Analyse bzw. ressourcenoptimierte Implementierung einer Funktion überflüssig wäre. Es ist zu beachten, dass das gewählte Projekt am Beginn des Entwicklungsprozesses steht und deshalb genügend Reserven vorhanden sind. Wie [Abbildung 3.7](#) zeigt, können während der Entwicklung der Software die freien Ressourcen so stark abnehmen, dass Reduzierungsmaßnahmen notwendig sind. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass andere Antriebskonzepte aufgrund der nötigen Funktionalitäten unterschiedliche Aufteilungen der Ressourcen haben und die angeführten Vergleiche stark abweichende Ergebnisse liefern können.

Für die Auswertung des Speicherbedarfs in Bezug auf die Regelungsstrategie ist vor allem der Anteil an der Bibliotheksfunktion interessant aus der der Treiber generiert wird. Aus dieser Bibliothek, welche in [Abschnitt 3.3.2](#) beschrieben ist, werden insgesamt 27 Steller und 28 Sensoren generiert.

In [Abbildung 5.10](#) sind die Anteile der Bibliotheksfunktion sowie der Drosselklappe im Vergleich zum genutzten gesamten Speicher des Programmes gelistet.

Die Drosselklappe nimmt nur einen kleinen Teil der zur Verfügung stehenden Ressourcen ein. In Bezug zur Bibliotheksfunktion jedoch im Schnitt etwa 5%, dies ist gemessen an der Anzahl der konfigurierten Steller und Sensoren (insgesamt 55) relativ hoch. Zur Verdeutlichung der Anteile ist im beigefügten Liniendiagramm der Prozentsatz der Drosselklappe an der Bibliotheksfunktion

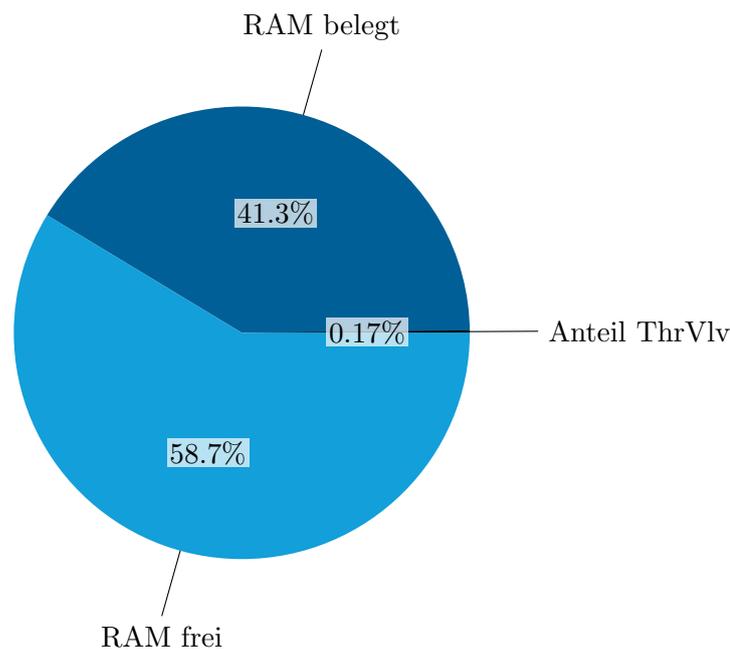


**Abbildung 5.10:** Prozentuale Nutzung aller Steller und Sensoren der Bibliotheksfunktion, der Drosselklappe sowie der Drosselklappe anteilmäßig an der Bibliotheksfunktion. Werte bezogen auf die verwendeten Ressourcen der ECU.

ergänzt. Streng genommen liegt der Prozentsatz etwas höher, da noch weitere Funktionalitäten für den Betrieb des Aktors notwendig sind. Diese sind jedoch nicht speziell einem Steller oder Sensor zugeordnet, sondern stehen allen Komponenten innerhalb der Bibliothek zur Verfügung.

Verglichen werden in diesem Diagramm, sowie im weiteren Verlauf der Auswertung, die Anteile des Programmcodes, hierzu zählen die Funktionalitäten, die für die Treiberstufen benötigt werden. Ein weiteres Maß für den Vergleich ist die Anzahl der verwendeten Konstanten. Zu diesen gehören jene Daten, die nach Fertigstellung des Programmes nicht verändert werden können. Zum DataSet zählen alle kalibrierbaren Daten, welche für den Motor und seine Peripherie spezifisch angepasst werden können. Verglichen mit den Konstanten kommen wesentlich mehr frei wählbare Daten zum Einsatz. Dies hat zum einen damit zu tun, dass die generierten Steller und Sensoren für die unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt werden. Es werden zum Beispiel variable Daten genutzt, um das Zeitverhalten bestimmter Aktoren auf das jeweilige Datenblatt anzupassen. Außerdem werden die applizierbaren Daten dazu eingesetzt, bestimmte Funktionalitäten zu aktivieren oder zu deaktivieren. Abbildung 3.12 veranschaulicht die Vielfalt an Möglichkeiten, welche durch den Einsatz der Applikationslabel aus der Bibliothek entstehen können. Dennoch führt diese freie Konfigurierbarkeit, welche durch die große Anzahl der zur Verfügung stehenden Funktionalitäten entsteht, zu einem nicht zu vernachlässigen Mehraufwand für die Inbetriebnahme einer gewünschten Treiberstufe.

Ein weiteres Kriterium zur Analyse der Softwareressourcen sind Variablen. Dazu zu zählen lokale Variablen, die innerhalb einer Funktion verwendet werden, aber auch jene, die über Rechenraster bzw. sogar Module, also außerhalb der Bibliotheksfunktion, verwendet werden. Sind Variablen über mehrere Rechenraster im Einsatz, ist vor allem auf die Aktualität der Informationen beim Lesen und Schreiben zu achten.



**Abbildung 5.11:** RAM Verbrauch der ECU.

Werden Variablen über Modulgrenzen gelesen bzw. geschrieben, ist nach erstmaligem Hinzufügen darauf zu achten, dass eine Veränderung der Variable auf alle Funktionen, die deren Informationen nutzen, einen Einfluss haben. Deshalb sollten Variablen, welche eine Kommunikation außerhalb dieser funktionalen Einheiten benötigen, möglichst auf ein Minimum beschränkt werden.

Die letzte Kategorie listet den Anteil am Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (EEPROM). Das EEPROM ist ein elektrisch löschbarer, programmierbarer Nur-Lese-Speicher, der zur Speicherung von Informationen auch nach Entfernen der Versorgungsspannung eingesetzt wird. Die Drosselklappe besitzt zwei Klappenstellungen bei denen der zurückgelesene Spannungswert für weitere Berechnungen benötigt wird, dies sind der obere und untere Anschlag. Es gibt eine Funktion, die diese beiden Positionen anfährt und für spätere Fahrzyklen in das EEPROM schreibt. Die beiden Werte müssen daher nicht jedes mal neu gelernt werden, sondern nur bei Bedarf, z.B. beim Tausch des Stellers in der Werkstätte.

Ein Vergleich des beschriebenen Treibers mit einem konventionellen Treiber, also spezifisch codiert und nicht aus der Bibliotheksfunktion geniert, soll hier nicht durchgeführt werden. Eine Gegenüberstellung wäre aufgrund der unterschiedlichen Funktionsumfänge nicht aussagekräftig.

Beim RAM sieht die Verteilung, wie in Abbildung 5.11 dargestellt, ähnlich zum Flash aus. Knapp 59% des RAM sind noch unbenutzt. Die Software zur Ansteuerung Drosselklappe benötigt lediglich einen Anteil von 0,17% des gesamten verbrauchten RAMs.

Bei der dynamischen Ressourcenbewertung sind vor allem die Auslastungen der einzelnen Prozessoren von Interesse. Die verschiedenen Rechenraster (1 ms, 2 ms, 5 ms, usw.) sind zum Ausgleich der Auslastung auf die Prozessoren aufgeteilt. Wie im weiteren Verlauf der Auswertung zu sehen sein wird, sind einige Rechenraster mit wesentlich mehr Prozessen der Drosselklappe versehen als

andere.

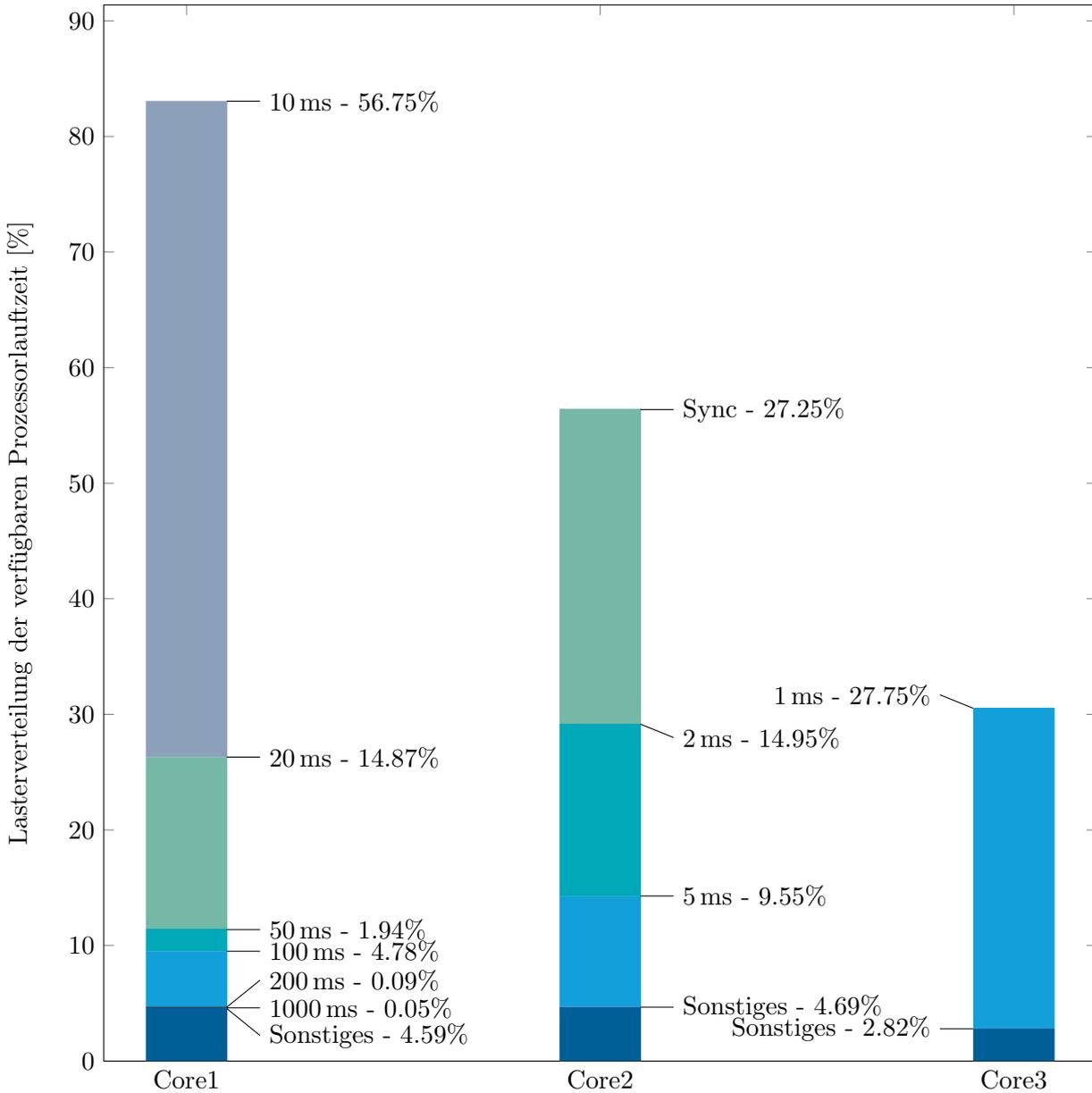


Abbildung 5.12: Auslastung und Aufteilung der Prozessoren des Motorsteuergerätes.

Die Auslastung der Prozessoren ist in Abbildung 5.12 zu sehen. Außerdem sind die Anteile der Rechenraster an der Prozessorauslastung angeführt. Dargestellt sind nur jene Rechenraster, die von der Drosselklappe verwendet werden. Auffällig ist hier der generell hohe Anteil des 10-ms-Rechenraster von Core 1. Durch den Einsatz der strombasierten Regelung wird das 10-ms-Rechenraster zusätzlich belastet, da es durch den Einsatz der Kaskadenstruktur zu Verschiebungen bestehender Prozesse kommt.

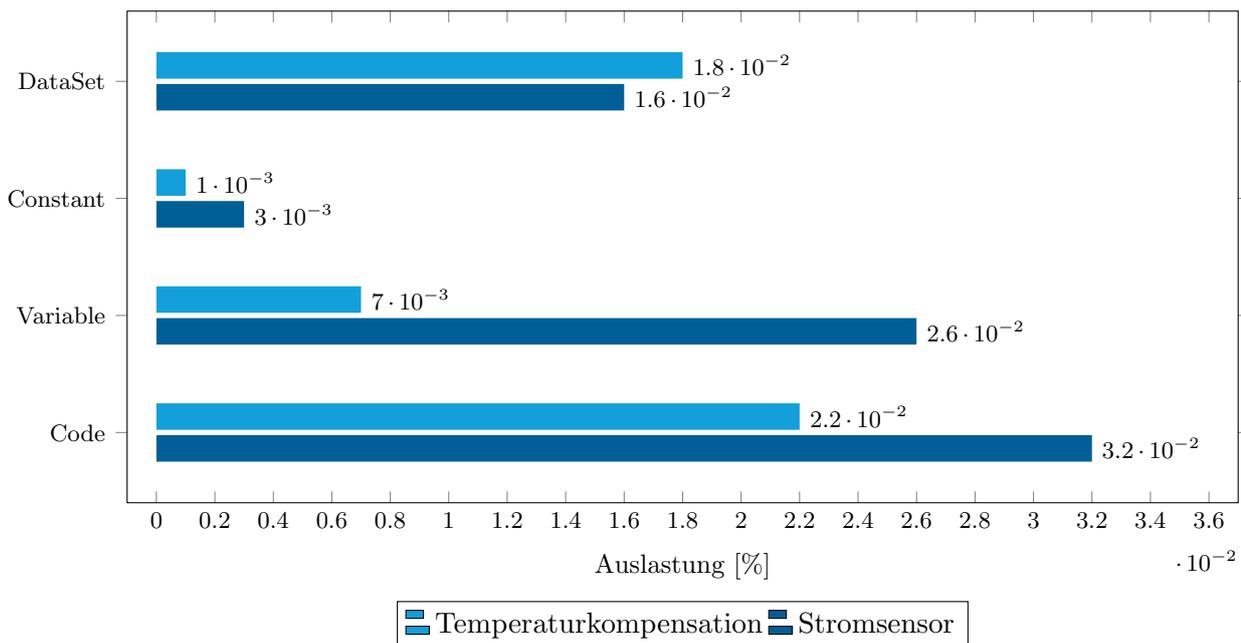
Für die Berechnung des Ansteuerwertes sowie für die Diagnose und sonstigen Funktionen, die für den Treiber der Drosselklappe in der Bibliotheksfunktion relevant sind, werden zwölf Prozesse (exklusive zweier Initialisierungsprozesse) benötigt. Diese sind aufgrund der Anforderungen an die Funktionalitäten auf unterschiedliche Rechenraster und somit auch auf unterschiedliche Prozessoren verteilt. Im Folgenden werden die verwendeten Rechenraster bzw. die dafür vorgesehenen Prozessoren untersucht. Dies dient dazu, ein Verständnis für die Auswirkungen einer Verschiebung von Funktionalitäten über Rechenraster hinweg, wie es für die kaskadierte Regelung in Abschnitt 5.2.4 notwendig ist, aufzubauen. Die zwölf Prozesse der Drosselklappe teilen sich wie folgt auf:

- 50 ms  
Anzahl Prozesse: 2  
Funktionalität: Diagnose
- 20 ms  
Anzahl Prozesse: 2  
Funktionalität: Koordinator, Rücklesung
- 10 ms  
Anzahl Prozesse: 1  
Funktionalität: Diagnose
- 5 ms  
Anzahl Prozesse: 7  
Funktionalität: Vorsteuerung, Regelung, Filterung, Diagnose

Zunächst soll eine Analyse der Prozesse für die Drosselklappe durchgeführt werden, um dann die Auswirkung auf das gesamte Steuergerät darstellen zu können. Dabei entfallen 0,243% der Last von Core 1 sowie 1,402% der Last von Core 2 auf die zwölf Prozesse des Treibers. Die Aufteilung der Rechenraster auf die Prozessoren ist Abbildung 5.12 zu entnehmen. Die Positionsregelung sowie die notwendige Filterung und Vorsteuerung der Drosselklappe wird im 5-ms-Raster des Steuergerätes berechnet. Da die Berechnungen im Vergleich zu den restlichen Funktionalitäten der Drosselklappe sehr aufwändig sind, lässt sich auch die hohe Auslastung des Cores 2 begründen, da das 5-ms-Raster in diesem gerechnet wird.

### 5.2.3 PID-Regler mit Temperaturkompensation

Der PID-Regler mit Temperaturkompensation baut auf dem Regler des vorherigen Abschnitts auf und berechnet einen zusätzlich Faktor, um den Widerstandswert des Motors der Drosselklappe bei unterschiedlichen Temperaturen ausgleichen zu können. Zu dessen Berechnung wird unter anderem der Strom des Gleichstrommotors der Drosselklappe benötigt. Damit dieser in der Software für diverse Berechnungen im Motorsteuergerät zur Verfügung steht, muss ein zusätzlicher Treiber zum Auslesen eines ADCs in der Bibliotheksfunktion hinzugefügt werden. Für dieses Modul werden vier Prozesse (exklusive einem Initialisierungsprozess) benötigt. Die Aufgaben der Signalaufbereitung, wie zum Beispiel der Filterung oder Umrechnung des Spannungswertes in Strom, werden durch drei Prozesse im 5-ms-Rechenraster durchgeführt. Der vierte Prozess dient zur Überwachung der Komponente und ist Teil des 50-ms-Rechenrasters. Zur Berechnung der Temperatur anhand des Stromes sowie der wirksamen Spannung des Gleichstrommotors wird ein



**Abbildung 5.13:** Gegenüberstellung der Ressourcen für Stromsensor sowie der Temperaturkompensation, Werte bezogen auf die verwendeten Ressourcen der ECU.

weiterer Prozess, ebenfalls im 5-ms-Raster, benötigt.

Um den hohen Aufwand für die Berechnung der Spulentemperatur zu verdeutlichen, wird dessen Funktionalität jener für die Aufbereitung des Stromsensors der Drosselklappe gegenübergestellt. In Abbildung 5.13 ist zu sehen, dass der Ressourcenverbrauch für die Temperaturkompensation sowie für die Strommessung in etwa gleich hoch sind.

Auffallend bei dem Vergleich ist, dass der Anteil an Applikationsparametern bei beiden Funktionen sehr ähnlich ist. Dies täuscht jedoch ein wenig, da für den Stromsensor mehr als doppelt so viele Parameter berücksichtigt werden müssen. Die Anzahl der Bytes bzw. der Anteil gemessen am Ressourcenverbrauch kommt daher zu Stande, dass für die Temperaturberechnung drei mal so viele Umrechnungstabellen zu berücksichtigen sind. Ein Vergleich der Konstanten macht für die beiden Funktionalitäten wenig Sinn und ist nur aus Gründen der Vollständigkeit in der Abbildung angeführt.

Für das Modul zur Messung des Stromes der Drosselklappe werden lediglich um 0,032% zusätzlich Code sowie 0,026% Variablen im gesamten Programmstand benötigt. Das Stromsensormodul liegt damit deutlich unter dem Durchschnitt eines Sensors aus der Bibliotheksfunktion mit 0,045% Code und 0,044% der Variablen. Die Werte sind bezogen auf den kompletten Programmstand. Ein Grund für den niedrigen Durchschnittswert ist, dass für die Strommessung eine Verarbeitung eines ADC-Eingangs ohne aufwändige Filterung oder Ähnliches konfiguriert werden kann, wohingegen bei anderen Sensoren erheblich mehr Funktionalität benötigt wird.

Für die Kompensation der Temperatur werden, abgesehen vom Aufwand für das Sensor-Modul, zusätzlich 0,022% mehr Code sowie 0,007% mehr Variablen im gesamten Programmstand benötigt.

Wie im vorherigen Abschnitt bereits erwähnt, sollte bei einer Aufstellung der Variablen zwischen jenen unterschieden werden, die über Modulgrenzen hinweg oder sogar außerhalb des Prozes-

sors benötigt werden. Die Unterscheidung bringt für den Vergleich zwischen Stromsensor und Temperaturberechnung keinen Mehrwert, jedoch wird die Aufstellung im letzten Abschnitt dieses Kapitels für alle Konzepte durchgeführt.

Die Laufzeit im 5-ms-Rechenraster erhöht sich durch den Stromsensor um 0,81% und für die Berechnung des Temperaturwertes um 0,72%.

Da die Berechnung der Spulentemperatur unter anderem den Strom des Gleichstrommotor der Drosselklappe benötigt, müssen die genannten Anteile zusammen betrachtet werden, um die komplette Funktionalität abdecken zu können. Da der kaskadierte Regler den Strom zur Berechnung benötigt, wurde der Aufwand für einen besseren Vergleich der Konzepte getrennt ausgearbeitet. So können die Implementierungen ohne Gleichanteil gegenüber gestellt werden.

#### 5.2.4 Kaskadierter Regler

Während es für den PID-Regler mit Temperaturkompensation aus dem vorherigen Abschnitt ausreichend ist einen zusätzlichen Sensor zu konfigurieren und einen weiteren Prozess einzubinden, gestaltet sich der Einbau des kaskadierten Reglers aufwändiger. Der Grund dafür ist, dass bestehende Prozesse aufgeteilt und in unterschiedliche Rechenraster verlegt werden müssen. Durch den aktuell vorhandenen Schnitt der Prozesse in der Bibliotheksfunktion ist es nicht möglich, eine kaskadierte Regelungsstruktur zu implementieren.

Die Aufteilung des Prozesses hat nicht nur Auswirkungen auf die Ressourcen des Motorsteuergerätes, sondern auch auf die zu Beginn des Kapitels erwähnte Entwicklungszeit. Aufgrund dieser umfassenden Änderung in der Struktur der Bibliotheksfunktion ist neben dem Änderungsaufwand auch mit einem erhöhten Testaufwand im Vergleich zum PID-Regler mit Temperaturkompensation zu rechnen. Nicht nur der kaskadierte Regler muss getestet werden, sondern durch die Aufteilung des Prozesses werden Abhängigkeit zu anderen Funktionalitäten beeinflusst und müssen daher getestet werden.

Bei der Ausarbeitung des Ressourcenverbrauchs für den kaskadierten Regler soll dessen Aufteilung auf folgende Komponenten berücksichtigt werden:

- Diagnose der Stromregelung:  
Die Diagnose der Regelung kann auf mehrere Arten umgesetzt werden, die hier implementierte ist lediglich ein Beispiel und aufgrund der Vollständigkeit des Konzeptes enthalten.
- Strombegrenzungsregelung:  
Die Strombegrenzungsregelung ist für die kaskadierte Regelungsstruktur grundsätzlich nicht notwendig, stellt jedoch eine thematisch sinnvolle Erweiterung des Gesamtkonzeptes dar. Sie soll daher getrennt betrachtet werden, um die Anteile der Stromregelung separiert vergleichen zu können. Die dazugehörigen Implementierungsdetails sind in Abschnitt [4.2.1](#) ausgeführt.
- Auswirkung auf Bibliotheksfunktion:  
Da Änderungen in der Bibliotheksfunktion vorgenommen werden, wirkt sich die Aufteilung des Prozesses nicht nur auf den Treiber für die Drosselklappe aus, sondern auch auf alle anderen Regler, die über die Bibliothek generiert werden.

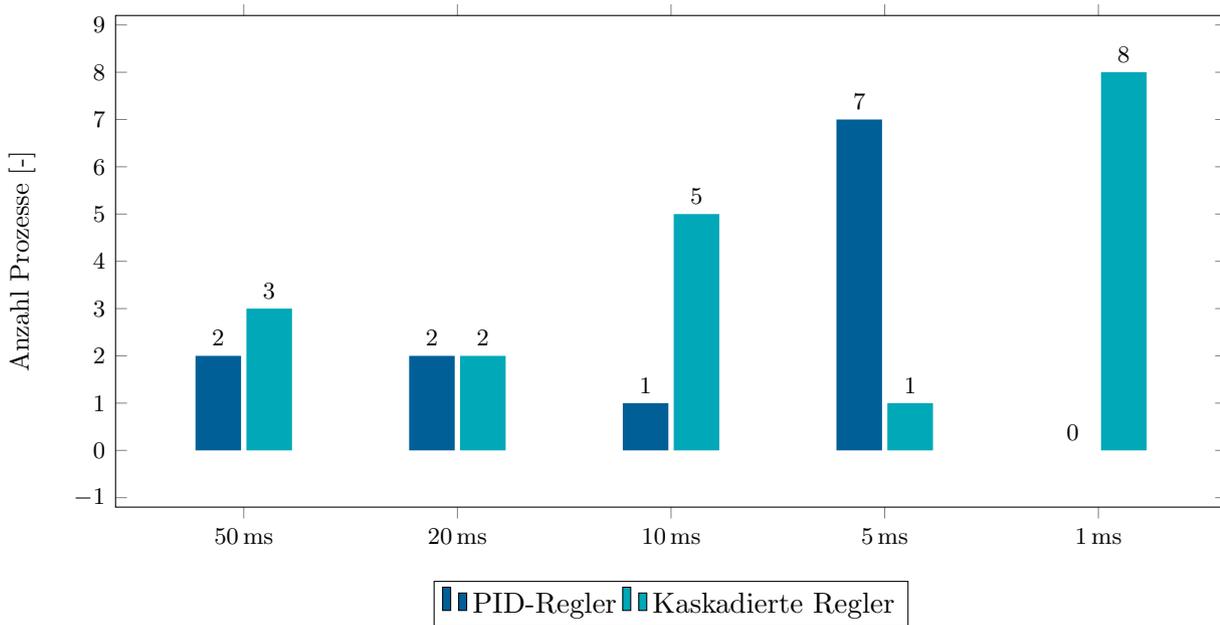


Abbildung 5.14: Aufteilung und Verschiebung der Prozesse für die kaskadierte Regelung.

Damit die innere Kaskade für die äußere als Durchschaltung betrachtet werden kann, muss mindestens ein Faktor zehn in der Bandbreite eingehalten werden. Daher wird der innere Kreis um diesen Faktor schneller gerechnet als der äußere [Kug14].

Wie in den vorherigen beiden Abschnitten erwähnt, wird der PID-Regler alle 5 ms gerechnet. Daher muss zur Erfüllung der genannten Bedingung der bestehende PID-Regler in ein langsames Raster verschoben werden. Für den betrachteten Steller wurde der Positionsregler vom 5-ms in das 10-ms-Raster verschoben und der Stromregler im 1-ms-Raster hinzugefügt, so ist die oben erwähnte Bedingung erfüllt. Die Verschiebung des PID-Reglers in das 10-ms-Rechenraster verschlechtert allerdings die Auslastung des bereits vollen 10-ms-Rasters wie Abbildung 5.12 zeigt. Zur Einhaltung des geforderten Faktors zehn bei der Wiederholrate der Funktionsaufrufe besteht grundsätzlich die Möglichkeit über Interrupts eine schnellere Zykluszeit als 1 ms einzustellen. Die Gefahr bei solch einer Wahl ist ein Überlauf des Rechenrasters. Ein Überlauf bedeutet eine längere Rechenzeit als die Zykluszeit, der Prozessor hat in diesem Fall die Berechnung noch nicht abgeschlossen und müsste die Funktion daher erneut ausführen. Wie die weiteren Analysen noch zeigen werden, besteht für die Berechnung des Stromwertes sowie für die weiteren Funktionalitäten zur Berechnung des Ausgabewerts für die Drosselklappe diese Gefahr nicht. Jedoch bleibt ein kleines Risiko bestehen, da auch andere Aktoren diese Funktionalitäten konfigurieren können und somit ein Überlauf durch mehrere Aktoren möglich ist.

Zur besseren Darstellung der Umstrukturierung der Prozesse bzw. der Auswirkungen auf die Laufzeiten ist in Abbildung 5.14 sowie 5.15 eine Übersicht dargestellt. Bei der Anzahl der Prozesse bzw. deren Laufzeiten der kaskadierten Regelung ist zu berücksichtigen, dass die Anteile des Stromsensormoduls bereits eingerechnet wurden. Die Anteile des 10-ms-Rechenrasters sind zur Gänze dem Strombegrenzungsregler zuzuordnen.

Bei der Laufzeit von circa 40 ms/s für das 1-ms-Raster im kaskadierten Regler handelt es sich nicht um den erwähnten Überlauf. Diese Angabe bezieht sich auf die Summe der Laufzeiten innerhalb einer Sekunde. Für einen Vergleich der Rechenzeiten wurden die benötigten Laufzeiten

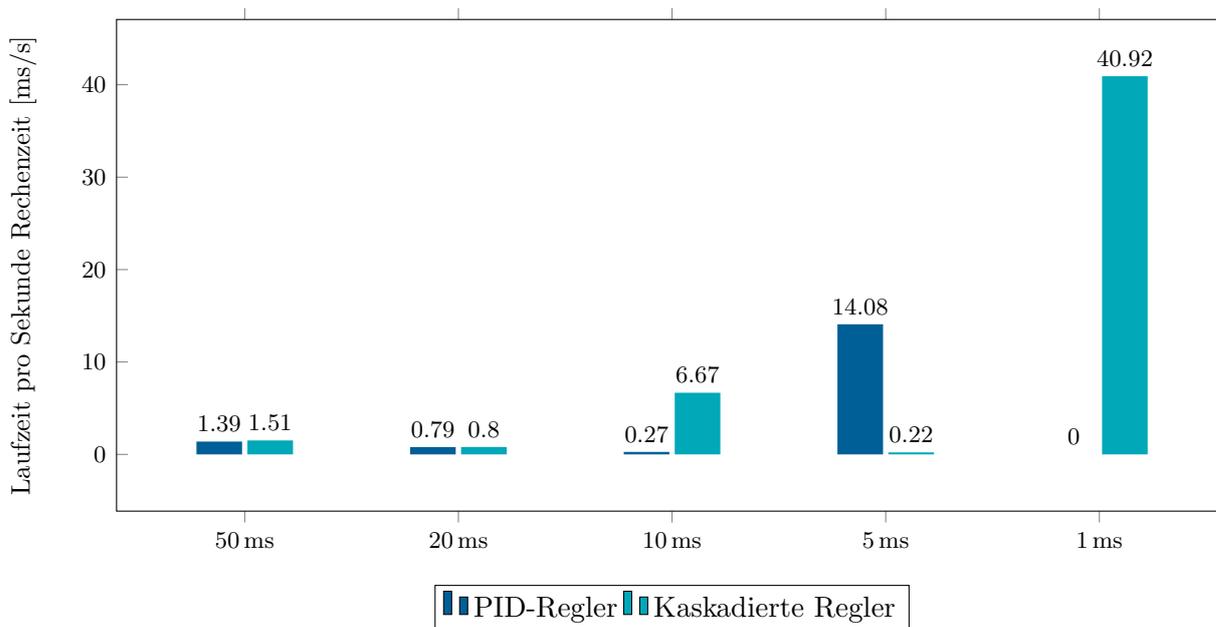


Abbildung 5.15: Aufteilung und Verschiebung der Laufzeiten für die kaskadierte Regelung.

der einzelnen Raster auf Basis ihrer Aufrufe auf eine Sekunde hochgerechnet. Prozesse im 50-ms-Raster werden 20 Mal pro Sekunde aufgerufen, Prozesse im 5-ms-Raster jedoch bereits 200 Mal. Aufgrund von sogenannten Unterbrechungen einzelner Prozesse kann es vorkommen, dass das 50-ms-Raster auch nur 19 Mal pro Sekunde aufgerufen wird. Für den Vergleich der Laufzeiten in Abbildung 5.15 wurden ideale Verhältnisse angenommen, also ein Faktor 1000 für Laufzeiten im 1-ms-Raster, ein Faktor 100 für Laufzeiten im 10-ms-Raster usw.

Die gesamte Laufzeit für den kaskadierten Regler, aufgerechnet auf eine Sekunde, erhöht sich von 16,53 ms auf 50,12 ms im Vergleich zum PID-Regler ohne Temperaturkompensation. Der große Unterschied kommt durch die neuen bzw. verschobenen Tasks im 1-ms-Rechenraster zustande. Der Prozessor ist mit der Berechnung der Funktionalitäten für die Drosselklappe somit dreimal so solange beschäftigt, da wie in Abbildung 5.12 gezeigt die betroffenen Rechenraster auf dem selben Prozessor ausgeführt werden.

Durch ein schlechtes Design, welches zusätzlich in einem schnelleren Rechenraster implementiert ist, wird das Motorsteuergerät erheblich belastet. Aufgrund der Forderung eines stabilen Regelkreises muss die Berechnung des Tastverhältnisses mindestens jede Millisekunde durchgeführt werden. In weiterer Folge ist es besonders wichtig, die Auswirkungen auf die Ressourcen zu kennen und bewerten zu können. Nicht nur für die erste Implementierung ist die Ressourcenbewertung wichtig, sondern auch für zukünftige Erweiterungen des Reglers, die aufgrund des geforderten schnellen Rechenrasters das Motorsteuergerät massiv belasten.

Die abgebildeten acht Prozesse des 1-ms-Rechenrasters werden nicht alleine vom Stromregler beansprucht, drei weitere Prozesse entfallen auf den Stromsensor, welcher bereits ausführlich in Abschnitt 5.2.3 diskutiert wurde. Ein vierter Prozess wird für die Diagnose des Stromsensors benötigt. Dieser kann im 50-ms-Raster gerechnet werden und so Ressourcen einsparen.

Zur Berechnung des Tastverhältnisses muss ebenfalls die Rücklesung des Positionssensors im 1-ms-

Steller	Laufzeit alt [ $\mu\text{s}$ ]	Laufzeit neu [ $\mu\text{s}$ ]	Differenz [%]
Abgasrückführventil	56,121	55,983	-0,25
Turbolader Hochdruck Bypass	53,101	57,478	8,24
Turbolader Niederdruck	47,564	46,927	-1,34
Drallklappe	45,613	47,494	4,12

**Tabelle 5.3:** Auswirkung der Prozessaufteilung für die kaskadierte Regelung auf die restlichen Aktoren der Bibliotheksfunktion.

Rechenraster implementiert sein, da aus dieser Sensorgröße die induzierte Spannung  $u_i$ , aufgrund des fehlenden Geschwindigkeitssensors (siehe  $\omega$  in Abschnitt 4.2), berechnet wird. Hier gilt es auf die Spezifikation der Drosselklappe zu achten, die maximale Abtastrate des Positionssensors muss mit dem Rechenraster kompatibel sein.

Die erwähnte Auswirkung der Aufteilung des Prozesses für die PID-Regelung, ist in Tabelle 5.3 für die restlichen über H-Brücken gespeisten Aktoren angeführt. Durch die Aufteilung erhöht sich die Rechenzeit um durchschnittlich 2,69%. Aufgrund der unterschiedlich konfigurierten Funktionalitäten der einzelnen Aktoren, wie Abbildung 3.12 veranschaulicht, kommt es infolgedessen zu den unterschiedlichen Laufzeiten. Einige Steller haben durch die neue Struktur eine kürzere Gesamtlaufzeit. Dies veranlasst zu glauben, es könne durch die Umstrukturierung die Laufzeit reduziert werden. Bei der Aufteilung wurden jedoch keine Optimierungen der Prozesse vorgenommen, um die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Ansätze zu wahren. Eine negative Differenz ist daher bestenfalls auf Ungenauigkeiten in der Messung zurückzuführen.

Beim anschließenden Vergleich in Abschnitt 5.2.6 muss berücksichtigt werden, dass nicht nur der strombasierte Regler, sondern auch der Strombegrenzungsregler sowie eine Diagnose des Reglers implementiert wurden. Da diese nicht zwingend für den Stromregler notwendig sind, müssen sie separat betrachtet werden. Abbildung 5.16 zeigt die Aufteilung auf die einzelnen Komponenten der zusätzlichen Ressourcen.

Durch die getrennte Aufteilung ist der hohe Anteil des Stromsensors deutlich zu erkennen. Um den Aufwände einordnen zu können kann folgender Vergleich aufgestellt werden: Der Stromregler ohne Diagnose und Begrenzungsregelung benötigt lediglich so viele Ressourcen wie die Diagnose des Stromsensors alleine.

Insgesamt zehn Prozentpunkte der zusätzlichen Applikationslabels entfallen auf den Strombegrenzungsregler. An dieser Stelle ist es wichtig, die Spezifikationen aus dem Datenblatt des Gleichstrommotors zu berücksichtigen. Dazu zählen für die Begrenzung notwendige Angaben wie maximaler Dauerstrom, kurzzeitige Überbelastbarkeit, Zeitverhalten oder Ähnliches. Da die Bibliothek nicht nur für einen Steller entwickelt wird, sondern unzählige verschiedene Gleichstrommotoren eingesetzt werden können, soll dieser Abschnitt des Programmes an die unterschiedlichen Anforderungen der einzelnen Hardwarekomponenten adaptierbar sein. Das ist auch der Grund für den hohen Anteil an applizierbaren Größen.

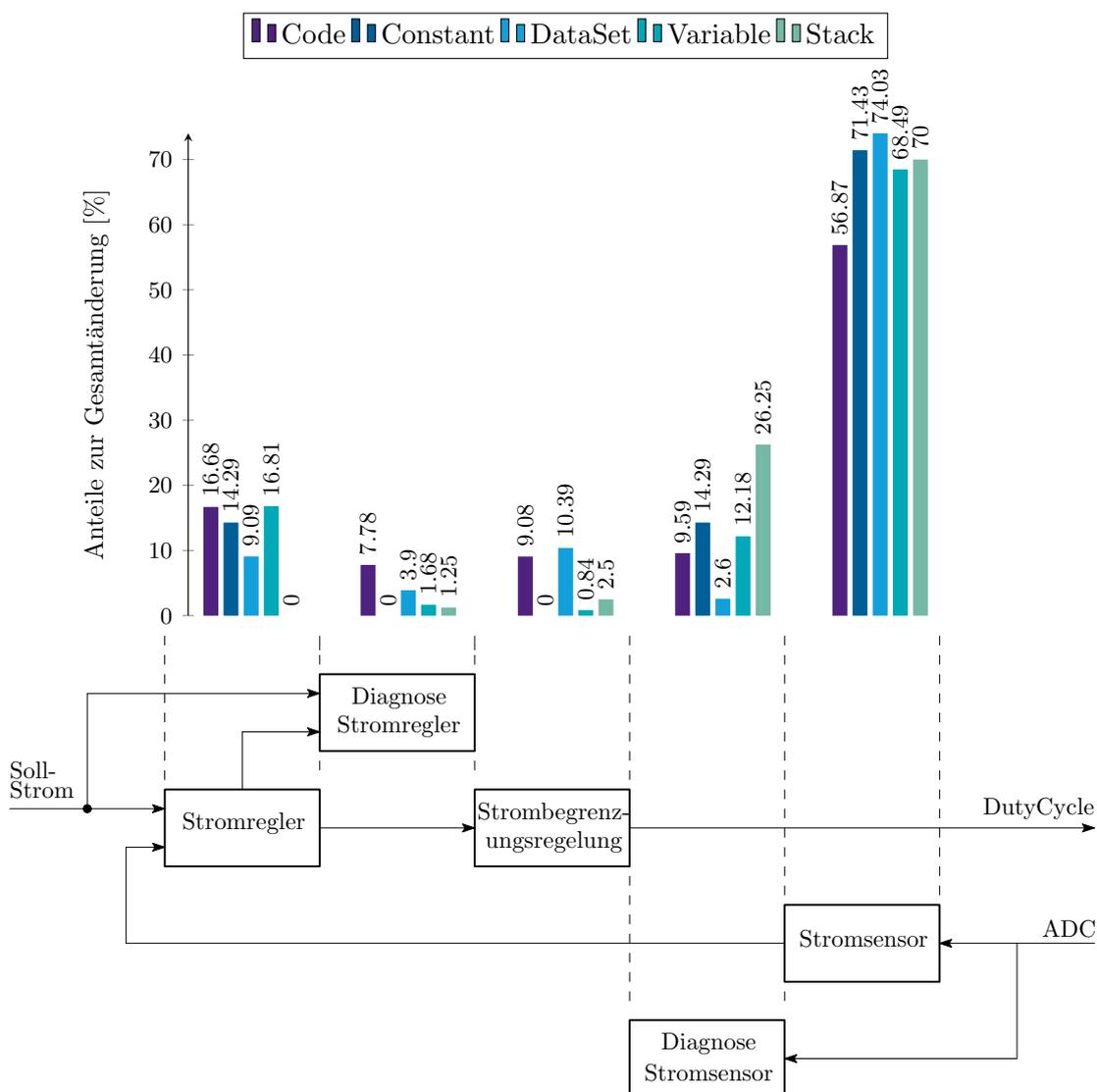
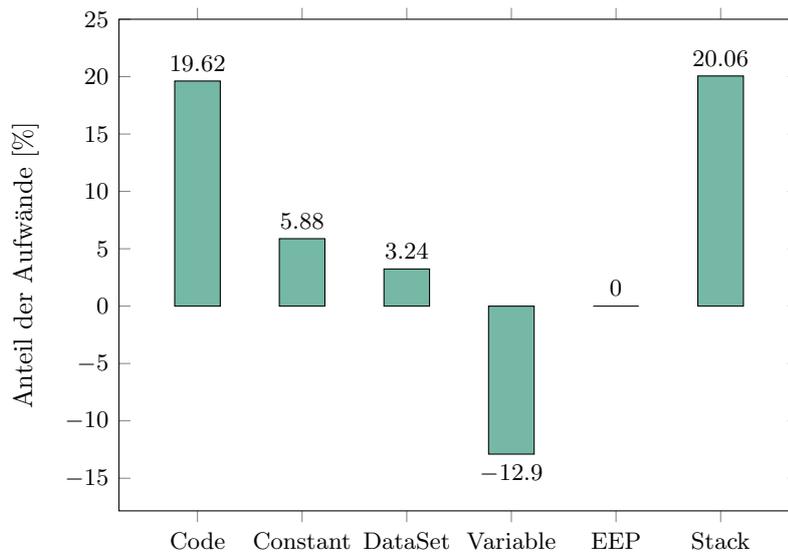


Abbildung 5.16: Aufteilung der Ressourcen für Stromregler, Strombegrenzungsregler und Stromsensor.

### 5.2.5 Selbstadaptierende Regler

Anders als bei den beiden vorherigen Konzepten kommt der selbstadaptierende Regler ohne Stromsensor aus. Zur Bestimmung der Parameter für den Ausgabewert wird als Messgröße lediglich der Ist-Winkel der Drosselklappe benötigt. Da dieser Messwert sowohl im PID-Regler aus Abschnitt 5.2.2 verwendet wird, welcher als Basis für den Vergleich dient, als auch in den beiden vorherigen Konzepten, stellt die Bereitstellung des Ist-Winkels keinen zusätzlichen Aufwand im Rahmen des Vergleiches dar.

Zur Berechnung des Tastverhältnisses werden im Vergleich zu PID-Reglern mehr Informationen über die Eigenschaften der verwendeten Drosselklappe benötigt. Genügte es bislang die Regelparameter des PID-Reglers bzw. des PI-Reglers im Falle des kaskadierten Konzepts zu bestimmen, müssen nun die Charakteristika der eingesetzten Klappe im Datensatz des Motorsteuergeräts hin-



**Abbildung 5.17:** Ressourcenverbrauch des selbstadaptierenden Reglers bezogen auf den PID-Regler.

terlegt werden. Dieser Umstand ist auch in Abbildung 5.17 ersichtlich. Abgebildet ist der Aufwand des selbstadaptierenden Reglers im Vergleich zum PID-Regler aus Abschnitt 5.2.2. Zu erkennen ist, dass mehr Applikationslabels für die Ansteuerung der Drosselklappe nötig sind.

Außerdem ist der Anteil des Programmcodes für den selbstadaptierenden Regler um 20% höher als beim PID-Regler. Beim PID-Regler wird der Sollwert aus der Summe der einzelnen Regelparameter berechnet.

Beim selbstadaptierenden Regler müssen hingegen die einzelnen Parameter der Drosselklappe bzw. allgemeiner des verwendeten Stellers berechnet und für die Ausgabe des Sollwerts berücksichtigt werden.

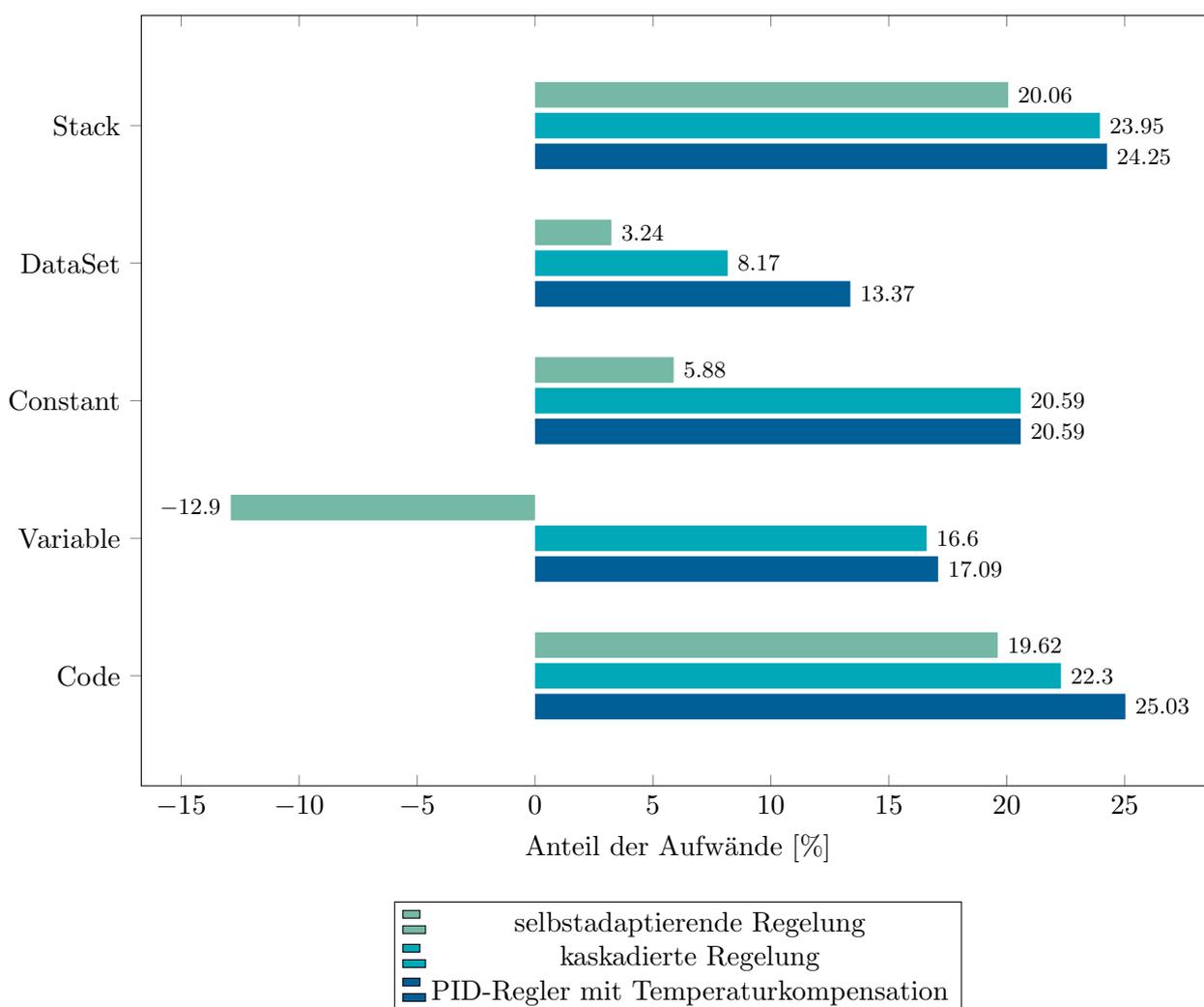
Außerdem verändert sich auch der Programmcode, wenn unterschiedliche Steller mit abweichenden physikalischen Eigenschaften eingesetzt werden. Beim PID-Regler bleiben hingegen die Formeln bestehen. Dies hat zwar nur eine vernachlässigbare Auswirkung auf die Ressourcen der ECU, jedoch erhöht sich durch den geänderten Code der Testaufwand und somit der Entwicklungsaufwand des Steuergeräts.

Wie sich der erhöhte Rechenaufwand auf die Laufzeit auswirkt, wird gemeinsam mit den anderen Konzepten im nächsten Abschnitt untersucht.

## 5.2.6 Gegenüberstellung der Regelungskonzepte

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die einzelnen Regelungskonzepte für sich betrachtet, um deren Besonderheiten getrennt aufzeigen zu können. Für eine Bewertung der Ressourcen sollen nun die verschiedenen Methoden miteinander verglichen werden. Basis für die Gegenüberstellung soll dabei weiter der PID-Regler ohne etwaige Erweiterungen aus Abschnitt 5.2.2 sein.

In Abbildung 5.18 sind die statischen Ressourcen der Konzepte zu sehen. Ein negativer Prozentwert beim selbstadaptierenden Regler kommt nicht durch Einsparungsmaßnahmen zustande. Da der PID-Regler mit Temperaturkompensation und auch die kaskadierte Regelung auf den



**Abbildung 5.18:** Gegenüberstellung der Ressourcen im Bezug zum PID-Regler.

PID-Regler aufbauen, ist es im Vergleich zum PID-Regler nur beim selbstadaptierenden Regler möglich weniger Ressourcen zu verwenden. Wie das Schema aus [Abbildung 3.12](#) veranschaulicht, wurden die nicht benötigten Funktionalitäten der Bibliotheksfunktion deaktiviert und die offenen Schnittstellen bei Deaktivierung des PID-Reglers mit den jeweiligen Funktionalitäten der selbstadaptierenden Regelung ersetzt. Wie aus den vorherigen Abschnitten ersichtlich ist, nimmt das Modul zur Messung und Aufbereitung des Spulenstroms einen erheblichen Anteil der zusätzlichen Aufwände ein. Daher ist es auch nicht verwunderlich, dass der selbstadaptierende Regler in allen Abschnitten besser abschneidet als die beiden übrigen Konzepte.

Ein interessantes Ergebnis ist, dass sowohl die kaskadierte Regelungsstruktur als auch die Temperaturkompensation ähnlich viele Ressourcen benötigen. Die Auswertungen wurden lediglich für die Drosselklappe durchgeführt, in der ECU sind noch drei weitere Aktoren verbaut bei denen es möglich wäre die Konzepte zu konfigurieren. Die zusätzlich Ressourcen werden somit nicht nur bei der Drosselklappe benötigt, sondern bei allen Stellern, die eines dieser Konzepte konfigurieren würden.

In der Abbildung ausgenommen sind Variablen, die in das EEPROM gespeichert werden müssen, da keiner der Methoden zusätzliche Informationen im EEPROM speichern muss.

Ein wichtiges Bewertungskriterium bei der Verwendung von einzelnen Prozessen sind die Nachrichten, die zwischen Prozessen ausgetauscht werden. Die selbstadaptierende Regelung ist hier klar im Vorteil, benötigt sie im Vergleich zur PID-Regelung, die als Basis für sämtliche Gegenüberstellungen dient, als einziges Konzept weniger Datenaustausch zwischen den Prozessen. In den Abbildungen 5.20, 5.21 sowie 5.22 ist die Kommunikation der unterschiedlichen Konzepte dargestellt. Dabei handelt es sich bei den Darstellungen nicht um den kompletten Komponententreiber für die Drosselklappe. Würde dieser vollständig in die Abbildungen integriert werden, so ist es nicht mehr möglich die Unterschiede der Konzepte im Detail herauszulesen. Beim PID-Regler mit Temperaturkompensation sind nur jene Funktionen berücksichtigt worden, die zur Berechnung und Kompensation des Ansteuerwertes benötigt werden, der PID-Regler ist auch nicht Teil der Abbildung. Beim Stromregler wurde ebenfalls auf die Darstellung der äußeren Kaskade, also dem PID-Regler für den Drosselklappenwinkel, verzichtet. Bei einem Vergleich der beiden Konzepte mit dem selbstadaptierenden Regler muss also der PID-Regler berücksichtigt werden.

Wie in Abbildung 5.12 zu sehen ist, befinden sich nicht alle Rechenraster am selben Prozessor. Daher entsteht ein zusätzlicher Aufwand für das Motorsteuergerät, da auch über Prozessorgrenzen hinweg Nachrichten ausgetauscht werden müssen. Probleme können auftreten, wenn ein Prozess von einem anderen Prozess mit höherer Priorität unterbrochen wird.

Gibt es Abhängigkeiten zwischen den beiden Prozessen, muss auf die Konsistenz der Daten geachtet werden. Dazu werden Kopien von jenen Nachrichten angelegt, die über Funktionalitäten hinweg ausgetauscht werden. Daher wiederum erhöht sich die Auslastung der Prozessoren, da zusätzliche Schritte zur Gewährleistung der Konsistenz notwendig sind. Infolge dessen entsteht auch ein erhöhter Verbrauch an RAM, da lokale Kopien der Daten angelegt werden müssen. Im Flash werden außerdem mehr Instruktionen für das Kopieren der Daten benötigt. Abbildung 5.19 soll das Problem ohne diese Kopien an einem einfachen Beispiel erörtern. Die Variable  $x$  wird in zwei Prozessen verarbeitet: im 10-ms-Rechenraster wird sie beschrieben, im 100-ms-Rechenraster wird sie gelesen und für eine Berechnung verwendet. Das 10-ms-Raster hat eine höhere Priorität als das 100-ms-Raster und kann diesen somit unterbrechen, vergleiche Abbildung 3.10. Wird das 10-ms-Rechenraster in Zeile elf des 100-ms-Rechenrasters, also zwischen der If-Abfrage und der Berechnung der Wurzel, aufgerufen, so kann die Berechnung zu einem Fehler führen falls die Variable in der Zwischenzeit einen negativen Wert angenommen hat.

Außerdem kann es zu Inkonsistenzen kommen, wenn eine Variable mehrfach in einem Raster mit niedriger Priorität geschrieben wird und von einem schnelleren Raster mit höherer Priorität gelesen wird. Zum Beispiel bei Berechnungen von Statusnachrichten in Diagnosefunktionen die üblicherweise in langsamen und in Raster mit niedriger Priorität implementiert werden.

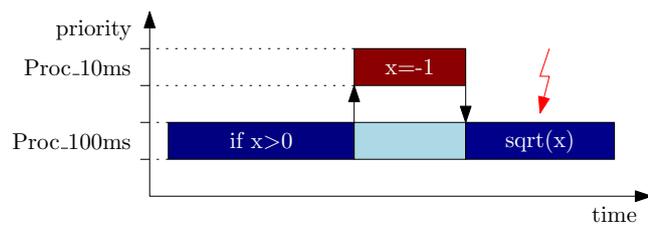
Das angeführte Beispiel soll verdeutlichen, dass nicht nur jede ausgetauschte Nachricht zusätzliche Ressourcen bindet, sondern auch zu inkonsistenten zwischen Funktionen führen kann. Deswegen sollte der Austausch von Nachrichten auf ein Minimum beschränkt werden.

In Abbildung 5.23 sind die Laufzeiten der Rechenraster für die betrachteten Strategien dargestellt. Das 5-ms-Raster für die Temperaturkompensation sowie der selbstadaptierende Regler sind jene mit den längsten Ausführungszeiten. Berücksichtigt man jedoch die Periodizität mit dem die einzelnen Raster aufgerufen werden, belegen die 1-ms-Prozesse der Kaskadenregelung den jeweiligen Prozessor insgesamt am längsten.

```

1 extern uint8 x;
2
3 void Proc_10ms()
4 {
5     x = GetSomeRandomNumber();
6 }
7
8 void Proc_100ms()
9 {
10     if (x>0)
11     {
12         uint8 y = sqrt(x);
13     }
14 }

```



**Abbildung 5.19:** Links: Pseudo Code; Rechts: Zeitlicher Ablauf für Inkonsistenzen zwischen Funktionen unterschiedlicher Priorität.

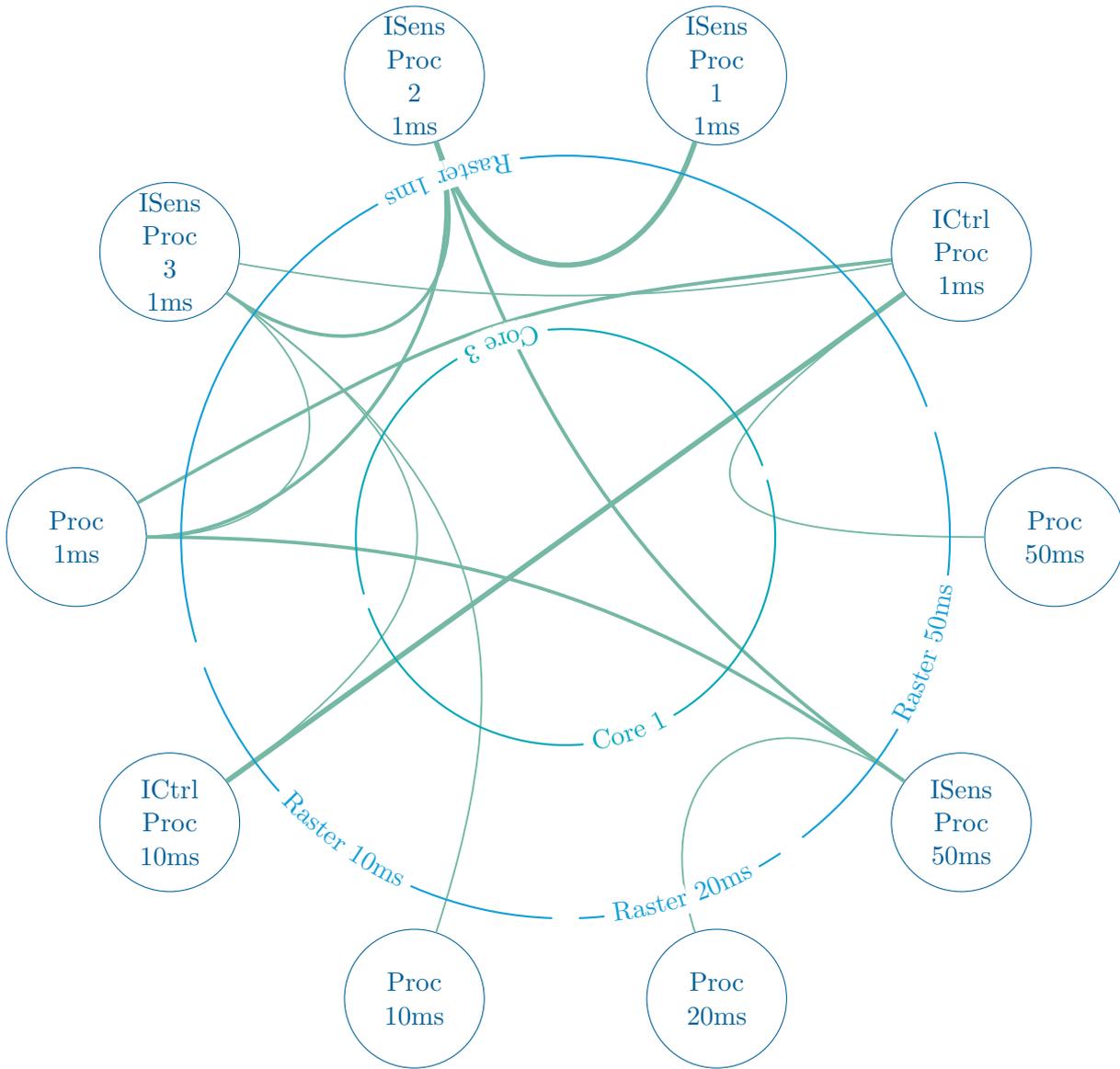
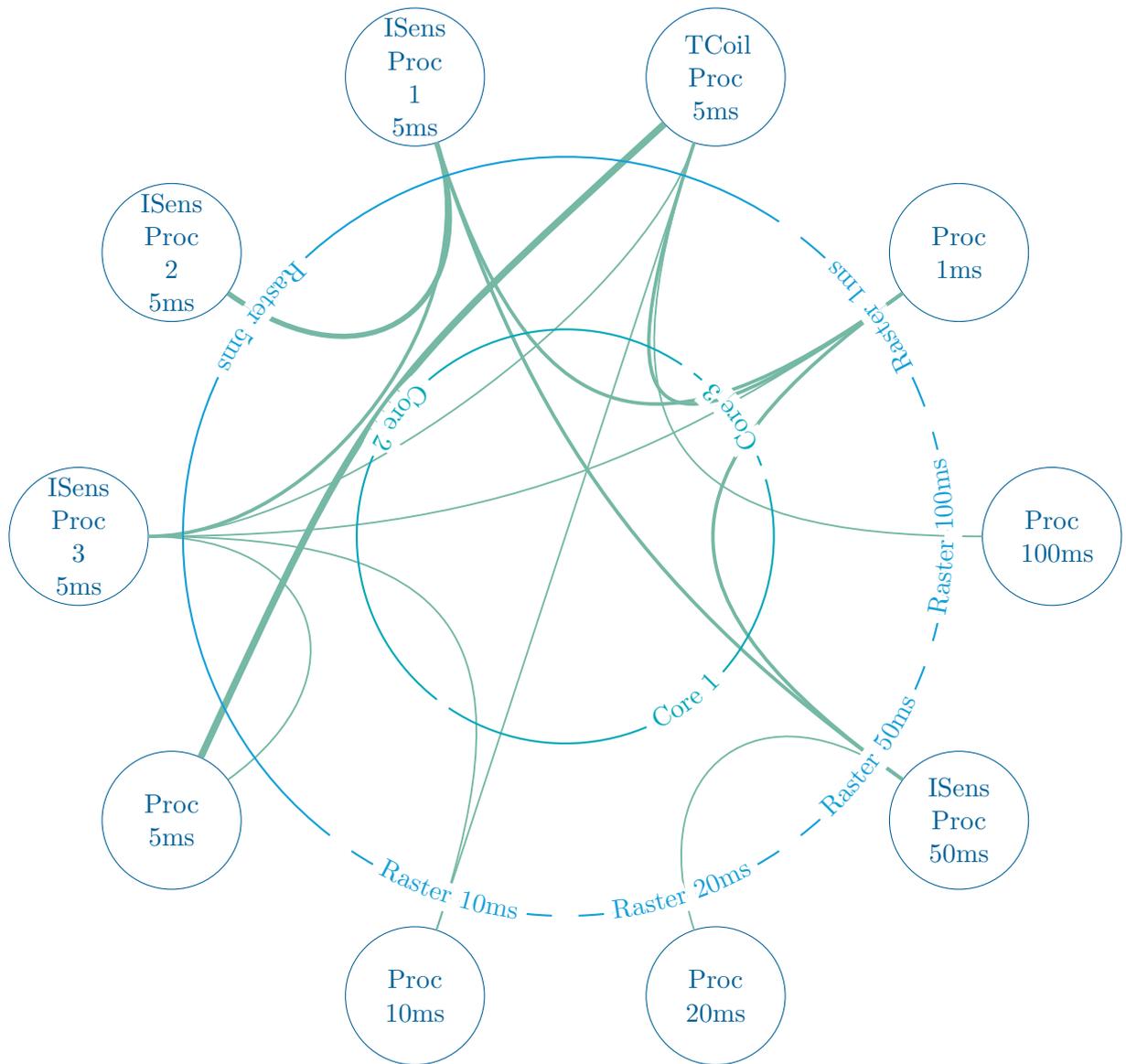


Abbildung 5.20: Kommunikationsabhängigkeiten des Stromreglers, inklusive Sensormodul, Begrenzungsregelung sowie Diagnose.



**Abbildung 5.21:** Kommunikationsabhängigkeiten der Temperaturkompensation, inklusive Stromsensor und Diagnose.

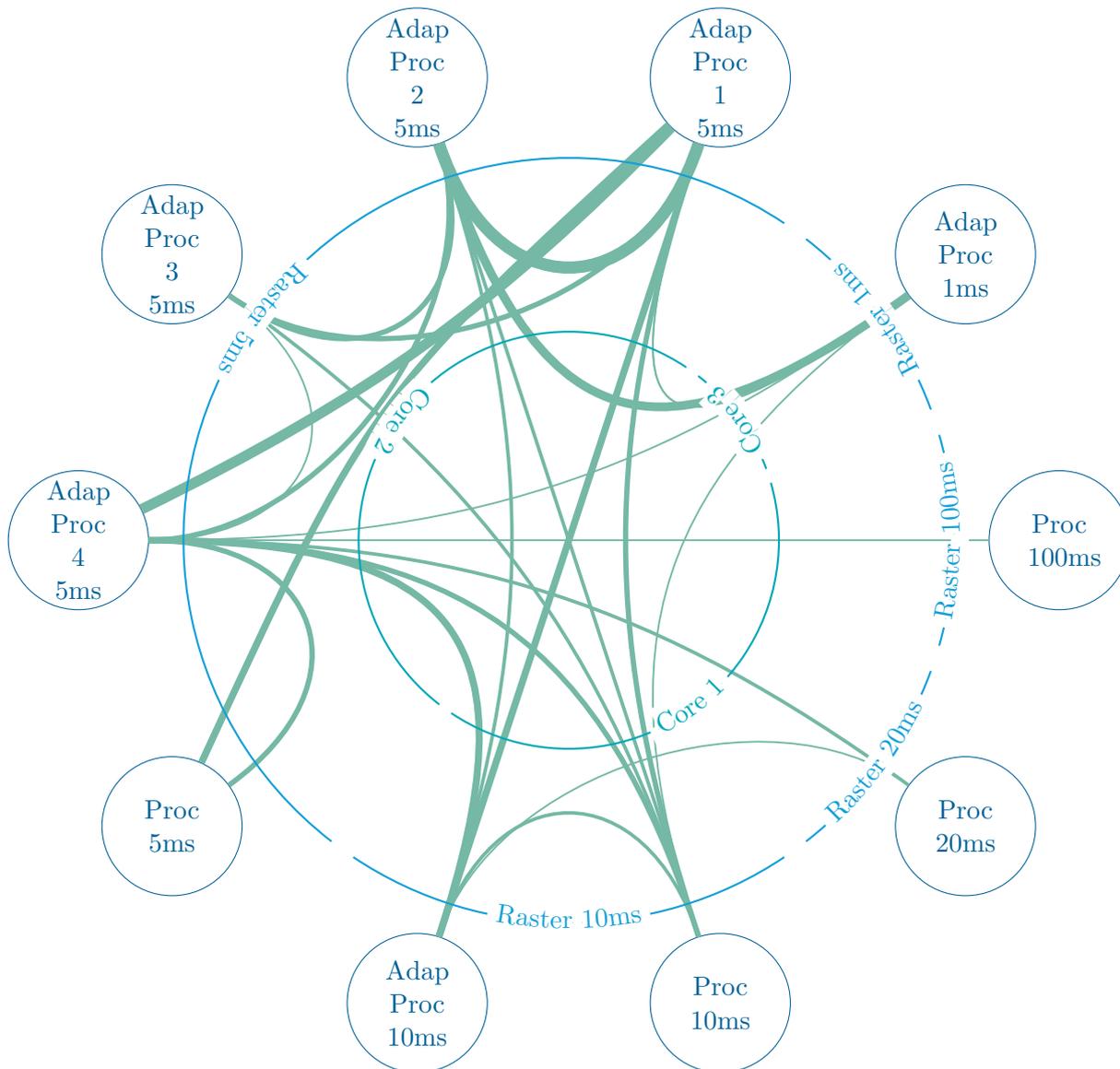
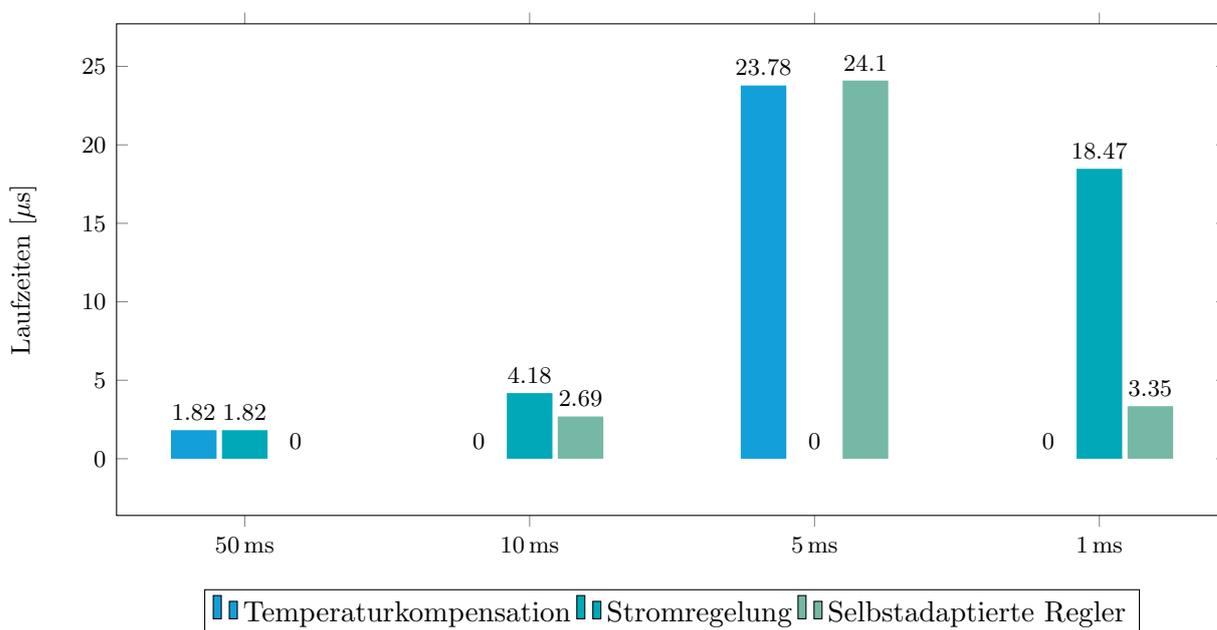


Abbildung 5.22: Kommunikationsabhängigkeiten des selbstadaptierenden Reglers.



**Abbildung 5.23:** Gegenüberstellung der Tasklaufzeiten für Temperaturkompensation (inklusive Stromsensor), Stromregelung (inklusive Stromsensor) und selbstadaptierender Regelung.

## 6 Conclusio

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Anwendbarkeit einer Stromregelung als unterlagerter Regler einer Positionsregelung untersucht. Da der Regler Teil der Softwarebibliothek für Sensoren und Aktoren ist, soll das Regelungskonzept dabei so konzipiert sein, dass eine Wiederverwendung in anderen Aktoren im Motorsteuergerät gegeben ist.

Ausgehend von einer allgemeinen Betrachtung der Regelstrecke wurden die Besonderheiten im Automotive-Bereich vorgestellt. Für die Bewertung des ausgearbeiteten Designs wurden nicht nur regelungstechnische Kennwerte herangezogen, sondern auch die beanspruchten Ressourcen untersucht. Als Basis des Vergleichs dient der PID-Regler der Softwarebibliothek, da die PID-Regelung mit Temperaturkompensation und die Kaskadenregelung auf diesen aufbauen.

Anhand der PID-Regelung mit Temperaturkompensation kann eine Verbesserung des Regelungsvorgangs unter geänderten Parametern der Regelstrecke in Bezug der gestellten Gütekriterien erzielt werden. Durch die Anpassungen der Software an den jeweiligen Steller werden eine Vielzahl neuer Parameter benötigt, um Berechnungen an den jeweiligen Steller anzupassen. Die Verbesserung der regelungstechnischen Eigenschaften ist allerdings im Vergleich zu den Aufwänden für die dynamischen sowie statischen Ressourcen gering.

Die Berechnung der Kompensation des Tastverhältnisses benötigt als Eingangsgröße den Spulenstrom der Drosselklappe, dazu muss ein Sensormodul der Softwarebibliothek konfiguriert werden. Wird dieses Sensormodul zur Erfassung des Ankerstroms nur für die Berechnung der Kompensation des Tastverhältnisses benötigt, so ist die Temperaturkompensation als keine effektive Maßnahme zu betrachten, um das Regelverhalten des PID-Reglers zu verbessern. Ist jedoch das Sensormodul aufgrund anderer Funktionalitäten in der Software des Motorsteuergerätes vorhanden, z.B. um bestimmte Diagnosen durchführen zu können, so sind die dynamischen sowie statischen Ressourcen nicht zur Gänze der Temperaturkompensation zuzuschreiben. Daher kann die Kompensation geänderter Spulentemperaturen in diesem Falle als sinnvolle Erweiterung betrachtet werden.

Die selbstadaptierende Regelung berechnet laufend die Parameter der zugrundeliegende Strecke. Bei Schwankungen der Parameter können so die Gütekriterien konstant erfüllt werden.

Anzumerken ist, dass der selbstadaptierende Regler zum Zeitpunkt der Arbeitsdurchführung nur die gemessene Winkelposition zur Berechnung der Parameter nutzt und nicht wie der PID-Regler mit Temperaturkompensation sowie der Kaskadenregler zusätzlich den Spulenstrom.

Der Vorteil von PID-Regelstrukturen ist, dass bei strukturellen Änderungen der Strecke nur eine Adaption der Parameter notwendig ist. Der selbstadaptierende Regler ist jedoch so aufgebaut,

dass unter Umständen die Software aufgrund geänderter Anforderungen angepasst werden muss. Bezieht der Motorenhersteller seine Software von einem Zulieferer, muss dieser daher mit einer Änderung beauftragt werden.

Anhand der Gütekriterien konnte festgestellt werden, dass die Kaskadenregelung, mit dem entworfenen Stromregler als innerste Kaskade, einen Nachteil hinsichtlich Dynamik im Vergleich zu den anderen Konzepten hat. Aufgrund des gewählten Rechenrasters für den Ansteuerwert wird das Steuergerät durch die Laufzeit des Stromreglers erheblich belastet. Auch die Tatsache, dass die Positionsregelung in eine langsameres Rechenraster verlegt wurde, konnte den Mehraufwand an Rechenzeit des Stromreglers nicht wesentlich verbessern. Die Stromregelung stellt somit keine sinnvolle Erweiterung für die Positionsregelung der Drosselklappe dar.

Ein Vorteil der Stromregelung ist, dass die Regelung an die thermischen Grenzen des Stellers angepasst werden kann. Zum Schutz der für die Auswertung eingesetzte Drosselklappe wurden die Ergebnisse dafür lediglich modelliert.

Die Bewertung wurde anhand eines einzigen Stellers durchgeführt. Da prinzipiell mehrere Steller mit dem Konzept über das Motorsteuergerät geregelt werden können, ist es durchaus möglich, dass die untersuchten Kriterien zu anderen Ergebnissen führen. Eine Neubewertung der Untersuchungen ist daher erforderlich.

Somit steht nach Abschluss der Arbeit eine Stromregelung integriert in eine Bibliotheksfunktion zur Verfügung, die bei Bedarf für die Regelung verschiedener Steller zum Einsatz kommen kann.

Der selbstadaptierende Regler nutzt im Gegensatz zu den beiden anderen Konzepten nur die gemessene Winkelposition zur Berechnung der Parameter. Eine Erweiterung der Berechnungen auf den Spulenstrom ist denkbar, wodurch eine Verkleinerung des Modellfehlers möglich ist. Dies kann allerdings zu einer noch größeren Abhängigkeit an die vorliegende Regelstrecke führen.

Zu erwähnen ist, dass es im Vergleich zur Methodik der Temperaturkompensation bei der Stromregelung möglich ist, eine Systemgröße zu regeln. So kann den Stromregler ohne der äußeren Kaskade der Positionsregelung in der Softwarebibliothek eingesetzt werden. Wodurch die Einsatzmöglichkeit wesentlich erweitert wird.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Regelstruktur des selbstadaptierenden Konzepts. . . . .	4
2.2	Drosselklappenmodell für den selbstadaptierenden Regler. . . . .	5
2.3	PID-Regelkreis der Drosselklappe. . . . .	6
2.4	Temperaturkompensation. . . . .	7
2.5	Kaskadenregelkreis. Quelle: [Kug14] . . . . .	8
3.1	Übersicht der Komponenten bei einem Dieselmotor. Quelle: [Rei14] . . . . .	10
3.2	Aufbau der Drosselklappe. Quelle: [MH08] . . . . .	11
3.3	PWM mit 55% und 80% Duty-cycle. . . . .	13
3.4	H-Brücke mit möglichem Stromfluss bei unterschiedlichen Schaltzuständen. . . . .	14
3.5	Vergleich der internen Strommessung mit einer Strommesszange anhand der Standardabweichung bei verschiedenen Ansteuerfrequenzen. . . . .	15
3.6	Vergleich der Strommessung zweier Steuergeräte. . . . .	16
3.7	Entwicklung Flash-Verbrauch. . . . .	17
3.8	Entwicklung RAM Verbrauch. . . . .	17
3.9	Statische Sicht der Softwarearchitektur. Quelle: [Ise10] . . . . .	18
3.10	Abarbeitung der Funktionen innerhalb der verschiedenen Zeitraster. . . . .	19
3.11	Betriebszustände des Motorsteuergeräts. . . . .	20
3.12	Variantenmechanismus sowie Konfiguration der Device Encapsulation. . . . .	23
3.13	Statische Sicht der Device Encapsulation eines geregelten Aktors. . . . .	24
4.1	Ersatzschaltbild der Ankerspannung. . . . .	26
4.2	Ersatzschaltbild der Mechanik des Gleichstrommotors. . . . .	26
4.3	Ersatzschaltbild des Gleichstrommotors. . . . .	27

4.4 Stromregelkreis. . . . . 29

4.5 Ersatzschaltbild des Lageregelung mit unterlagerter Stromregelung. . . . . 29

4.6 Stromregelkreis mit Begrenzungsfunktion. . . . . 30

4.7 Simulierter Verlauf des Ankerstroms mit Strombegrenzungsregelung. . . . . 31

4.8 Abbildung oben: Stellvorgang der Stromregelung mit Begrenzung; Abbildung unten: Stellvorgang der Stromregelung ohne Begrenzung. . . . . 33

4.9 Windup-Maßnahme. . . . . 33

4.10 Diagnosefunktion des Stromregelkreises. . . . . 34

4.11 Diagnoseauswertung des Stromregelkreises. . . . . 35

5.1 Kennwerte für den Reglervergleich. Quelle: [Hel] . . . . . 37

5.2 Testaufbau. . . . . 38

5.3 Vergleich der Sprungantworten (15%-85%) bei Raumtemperatur. . . . . 39

5.4 Vergleich der Sprungantworten entgegen der Rückstellfeder (85%-15%) bei Raumtemperatur. . . . . 40

5.5 Gemittelter Ankerstrom bei vollständig geschlossener Drosselklappe. . . . . 42

5.6 Ressourcen eines Motorsteuergerätes. . . . . 43

5.7 Testaufbau für die dynamische Ressourcenmessung im Motorsteuergerät. . . . . 45

5.8 Parameter für die Berechnung der Prozesslaufzeit. . . . . 46

5.9 Flash-Verbrauch der ECU. . . . . 47

5.10 Prozentuale Nutzung aller Steller und Sensoren der Bibliotheksfunktion, der Drosselklappe sowie der Drosselklappe anteilmäßig an der Bibliotheksfunktion. Werte bezogen auf die verwendeten Ressourcen der ECU. . . . . 48

5.11 RAM Verbrauch der ECU. . . . . 49

5.12 Auslastung und Aufteilung der Prozessoren des Motorsteuergerätes. . . . . 50

5.13 Gegenüberstellung der Ressourcen für Stromsensor sowie der Temperaturkompensation, Werte bezogen auf die verwendeten Ressourcen der ECU. . . . . 52

5.14 Aufteilung und Verschiebung der Prozesse für die kaskadierte Regelung. . . . . 54

5.15 Aufteilung und Verschiebung der Laufzeiten für die kaskadierte Regelung. . . . . 55

5.16 Aufteilung der Ressourcen für Stromregler, Strombegrenzungsregler und Stromsensor. . . . . 57

5.17 Ressourcenverbrauch des selbstadaptierenden Reglers bezogen auf den PID-Regler. 58

5.18 Gegenüberstellung der Ressourcen im Bezug zum PID-Regler. . . . . 59

5.19 Links: Pseudo Code; Rechts: Zeitlicher Ablauf für Inkonsistenzen zwischen Funktionen unterschiedlicher Priorität. . . . . 61

5.20 Kommunikationsabhängigkeiten des Stromreglers, inklusive Sensormodul, Begren-  
zungsregelung sowie Diagnose. . . . . 62

5.21 Kommunikationsabhängigkeiten der Temperaturkompensation, inklusive Strom-  
sensor und Diagnose. . . . . 63

5.22 Kommunikationsabhängigkeiten des selbstadaptierenden Reglers. . . . . 64

5.23 Gegenüberstellung der Tasklaufzeiten für Temperaturkompensation (inklusive Strom-  
sensor), Stromregelung (inklusive Stromsensor) und selbstadaptierender Regelung. 65

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



# Tabellenverzeichnis

3.1	Entstehung des Drosselklappensollwerts. Quelle: [BS14]	10
3.2	Eigenschaften der verwendeten Drosselklappe.	12
3.3	Eigenschaften des Drosselklappensensors.	12
3.4	Kombinationen und Verhalten anhand der Register DIR und PWM der Leistungs- endstufe.	14
5.1	Kennwerte der Regelungen bei Parameterschwankungen, Sprünge Richtung ge- schlossener Drosselklappe.	41
5.2	Kennwerte der Regelungen bei Parameterschwankungen, Sprünge Richtung offener Drosselklappe.	41
5.3	Auswirkung der Prozessaufteilung für die kaskadierte Regelung auf die restlichen Aktoren der Bibliotheksfunktion.	56

## Wissenschaftliche Literatur

- [BS14] BASSHUYSEN, Richard v. ; SCHÄFER, Fred: *Handbuch Verbrennungsmotor - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. 7. vollst. überarb. u. erw. Aufl. 2015. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. – ISBN 978–3–658–04677–4
- [BST10] BERNS, K. ; SCHÜRMAN, B. ; TRAPP, M.: *Eingebettete Systeme: Systemgrundlagen und Entwicklung eingebetteter Software*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010 (Technische und Ingenieurinformatik). – ISBN 9783834804228
- [Bü14] BÜCHNER, Steffen. *Modellierung und Identifikation elektromechanischer Aktoren am Beispiel einer Dieselregelklappe*. 2014
- [Col] COLTON, Shane. *Simple Modular Half-Bridge*
- [GGB15] GRITLI, W. ; GHARSALLAOUI, H. ; BENREJEB, M.: A PID-type Fuzzy Logic Controller based on flatness for Electronic Throttle Valve. In: *2015 7th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, 2015. – ISSN null, S. 1–5
- [Hel] HELLBERG, Tobias. *Modellierung und Regelung einer elektronischen Drosselklappe mit Methoden für stückweise affine Systeme*
- [Ise10] ISERMANN, R.: *Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe: Elektronik, Modellbildung, Regelung und Diagnose für Verbrennungsmotoren, Getriebe und Elektroantriebe*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010 (ATZ/MTZ-Fachbuch). – ISBN 9783834893895
- [Ker08] KERN, T.A.: *Entwicklung Haptischer Geräte: Ein Einstieg für Ingenieure*. Springer, 2008. – ISBN 9783540876434
- [Kug14] KUGI, A.: *Automatisierung*. TU Wien Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik Gruppe für komplexe dynamische Systeme, 2014
- [Kug17] KUGI, A.: *Regelungssysteme 2*. TU Wien Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik Gruppe für komplexe dynamische Systeme, 2017
- [MH08] MARTIN HORN, Markus R.: *International Journal Automation Austria, IFAC-Beirat Österreich*, Peter Kopacek, Alexander Weinmann, 2008. – ISSN 1562–2703
- [Mü15] MÜLLER, Rainer O.: *Modernes Motormanagement mit Neuronalen Netzen*, Prof. Dr. P. Tran-Gia, Universität Würzburg Institut für Informatik Lehrstuhl für Verteilte Systeme, 2015. – ISSN 1432–8801
- [Rei11] REIF, K.: *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik: Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme*. Vieweg+Teubner Verlag, 2011 (Bosch Fachinformation Automobil). – ISBN 9783834899026
- [Rei14] REIF, K.: *Dieselmotor-Management im Überblick*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014 (Bosch Fachinformation Automobil). – ISBN 9783658065546
- [Rei15] REIF, K.: *Ottomotor-Management: Steuerung, Regelung und Überwachung*. Sprin-

- ger Fachmedien Wiesbaden, 2015 (Bosch Fachinformation Automobil). – ISBN 9783834814166
- [Rei17] REIF, K.: *Grundlagen Fahrzeug- und Motorentchnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017 (Bosch Fachinformation Automobil). – ISBN 9783658126360
- [RK15] RALPH KENNEL, Florian B.: *Antriebsregelung für Elektrofahrzeuge*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Elektrische Antriebe und Leistungselektronik, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2015
- [Sch13] SCHRÖDER, D.: *Elektrische Antriebe - Grundlagen: Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben*. Springer Berlin Heidelberg, 2013 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 9783642304712
- [Sch15] SCHRÖDER, D.: *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen*. Springer Berlin Heidelberg, 2015. – ISBN 9783642300967
- [Wec13] WECK, M.: *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3: Mechatronische Systeme: Vorschubantriebe und Prozessdiagnose*. Springer Berlin Heidelberg, 2013 (VDI-Buch). – ISBN 9783662109168
- [WK16] W. KEMMETMÜLLER, A. K.: *Regelungssysteme 1*. TU Wien Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik Gruppe für komplexe dynamische Systeme, 2016

## Internet Referenzen

- [1] AAMPACT e.V. *Drosselklappe*. <https://www.mein-autolexikon.de/elektronik/drosselklappe.html>, accessed: Dezember 2019.
- [2] Hochschule Augsburg. *Simulink Regelkreise*. [http://www.hs-augsburg.de/~wohlfart/download/fohlen\\_simulink\\_regelkreise](http://www.hs-augsburg.de/~wohlfart/download/fohlen_simulink_regelkreise), accessed: Dezember 2019.
- [3] Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme und Leistungselektronik, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität München. *Elektrische Antriebe Grundlagen und Anwendungen, Übung 3: Dynamisches Betriebsverhalten und Regelung der Gleichstrommaschine*. <https://www.eal.ei.tum.de/fileadmin/tueieal/www/courses/EAGUA/tutorial/UEbung3.pdf>, accessed: Dezember 2019.
- [4] Pierburg GmbH. *Elektromotorische Drossel- und Regelklappen, Flexibles Luftmanagement*. [https://www.rheinmetall-automotive.com/fileadmin/media/kspg/Broschueren/Produktbroschueren/Pierburg/Aktuatoren/pb\\_drosselklappen\\_d.pdf](https://www.rheinmetall-automotive.com/fileadmin/media/kspg/Broschueren/Produktbroschueren/Pierburg/Aktuatoren/pb_drosselklappen_d.pdf), accessed: Dezember 2019.
- [5] w-tech. *Regelkreise bei elektrischen Antrieben*. [http://www.servotechnik.de/fachwissen/regelung/f\\_beitr\\_00\\_602.htm](http://www.servotechnik.de/fachwissen/regelung/f_beitr_00_602.htm), accessed: Dezember 2019.

## Erklärung

*Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.*

*Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.*

Wien, am 24.04.2020

---

Michael Eckel