

DIPLOMARBEIT

Entwicklung eines Feature-Koordinators für Motorsteuergeräte

ausgeführt zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hermann Kaindl

am

Institut für Computertechnik (E384)

der Technischen Universität Wien

eingereicht von

Dominik Wagner

Matr. Nr. 0925659

Wien, 22.09.2015

(Unterschrift Verfasser/in)

(Unterschrift Betreuer/in)

Zusammenfassung

Zur Steuerung eines modernen Verbrennungsmotors werden Software-Features eingesetzt. Da deren Anzahl stetig zunimmt, gewinnt die Berücksichtigung von Feature-Interaktionen immer mehr an Bedeutung. Ungewollte oder unbekannte Interaktionen können zu einem Fehlverhalten des Motors führen. Ein optimierter Einsatz der Features könnte jedoch gewollte Feature-Interaktionen fördern und helfen, CO₂-Emissionen weiter zu reduzieren.

In der vorliegenden Diplomarbeit wird ein neues Konzept für einen zentralen Feature-Koordinator zur Feature-Auswahl und zur Koordinierung von Feature-Interaktionen einer Motorsteuergeräte-Software vorgestellt. Die Feature-Auswahl erfolgt iterativ zur Laufzeit und ermöglicht die Berücksichtigung von Hard und Soft Constraints bei gleichzeitiger Minimierung des CO₂-Ausstoßes. Das Auswahlverfahren arbeitet nach dem Prinzip eines Hill-Climbers, eine heuristische Nutzenfunktion wird zur Berücksichtigung der Feature-Interaktionen dynamisch angepasst. Gewollte Interaktionen werden so gefördert, ungewollte abgeschwächt.

Das Konzept wurde prototypisch implementiert und Features für den Probetrieb angepasst. Die Ergebnisse der Evaluierung zeigen, dass der Einsatzbereich der Features vergrößert wurde. Dadurch kann das System öfter und länger von ihren Vorteilen profitieren. Wechselwirkungen zwischen den Features, die hart codiert waren, wurden entfernt, sie werden nun vom Feature-Koordinator berücksichtigt. Entwicklung und Wartung der Features werden so vereinfacht.

Abstract

Software features are used to control modern combustion engines. Since the number of features is increasing, considering of feature interactions is getting more and more important. Undesired or unknown interactions can lead to a malfunction of the engine, but an optimized use of the features could promote desired feature interactions and help to reduce CO₂ emissions.

In this diploma thesis, a new concept for a central feature-coordinator which selects and coordinates features for an engine control unit is proposed. The feature selection is taken iteratively at runtime and allows consideration of hard and soft constraints while minimizing CO₂ emissions. The selection procedure works in the course of hill-climbing, a heuristically objective function is adopted dynamically to take feature interactions into account. Desired interactions are reinforced, undesired are attenuated.

The concept was implemented prototypically and some features were adopted for trial operation. The evaluation results show that the operation range of the features has been increased. In effect, the system can profit from their benefits more often and longer. Hard coded feature interactions were removed and are now controlled by the central feature-coordinator. This simplifies development and maintenance of features.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen bedanken, die mich bei dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Besonders gilt dieser Dank Michael Dübner und der Firma Robert Bosch, welche die themenspezifischen Arbeits- und Forschungsbedingungen zur Verfügung gestellt haben. Dr. Sven Dominka hat mich während meiner Tätigkeit bei Robert Bosch betreut und mich bei der Entwicklung und Erarbeitung der physikalischen Grundlagen unterstützt. Ohne seine hilfreichen Hinweise und Ratschläge hätte sich die Fertigstellung dieser Arbeit wohl sehr verzögert. Univ.Prof. Dipl.-Ing Dr. Hermann Kaindl bin ich für das Korrigieren und seine thematischen Ratschläge bzw. hilfreichen Hinweise zur Verfassung dieser Diplomarbeit dankbar. Mag. Susanne Schönbrunner hat durch Anregungen und Korrekturen am Stil gefeilt und letzte Fehler verbessert. Meiner Freundin Ina bin ich besonders für ihre Geduld und ihre seelische Stütze dankbar. Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Eltern Martha und Wilfried Wagner bedanken, die mir das Studium durch ihre fortwährende Unterstützung ermöglicht haben.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1.	Problembeschreibung	1
1.2.	Aufgabenstellung.....	2
1.3.	Übersicht	2
2.	Features und Feature-Interaktionen	4
2.1.	Features.....	4
2.2.	Feature-Interaktionen	5
2.2.1.	Auffinden von Feature-Interaktionen	7
2.2.2.	Feature-Interaktionen koordinieren	7
3.	Grundlagen des Ottomotors	10
3.1.	Aufbau und Funktion des Ottomotors	10
3.1.1.	Motorkomponenten.....	10
3.1.2.	Viertaktbetrieb	12
3.1.3.	Luftverhältnis und Abgasemission	13
3.1.4.	Gemischbildung.....	13
3.2.	Systemüberblick	14
3.2.1.	Luftsystem	15
3.2.2.	Kraftstoffsystem	16
3.2.3.	Zündsystem	18
3.2.4.	Abgassystem.....	18
3.3.	Motorsteuerung.....	20
3.3.1.	Allgemein.....	20
3.3.2.	System-Features.....	21
3.3.3.	Feature-Interaktionen	27
4.	Methoden zur Koordinierung von Feature-Interaktionen	32
4.1.	Kontrollmodell für Feature-Interaktionen.....	32
4.2.	Einsatz eines Vermittlers für automatisches Fahren.....	33
4.3.	Feature-Komposition durch zentral gesteuerte Reihung.....	34
4.4.	Feature-Auswahl durch Greedy-Algorithmus.....	35
4.5.	Feature-Interaktion in Gebäudeautomatisierungsanlagen.....	36
4.6.	Koordinierter Zugriff auf Variablen	37
4.7.	Diskussion der vorgestellten Methoden	38
5.	Entwicklung des Feature-Koordinators	40

5.1.	Anforderungen an den Koordinator	40
5.2.	Konzept des Feature-Koordinators	41
5.2.1.	Entwurf des Koordinators.....	41
5.2.2.	Diskussion der Anforderungen	47
5.3.	Prototypische Umsetzung des Feature-Koordinators	49
5.3.1.	Anwendungsszenarien	49
5.3.2.	Implementierung des Feature-Koordinators.....	50
5.4.	Anpassung der Features und Abweichungen vom Konzept.....	59
5.4.1.	Abweichungen vom Konzept.....	59
5.4.2.	Anpassungen der Features	59
6.	Evaluierung des Feature-Koordinators.....	61
7.	Diskussion.....	66
7.1.	Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten des Konzepts	66
7.2.	Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten der Umsetzung.....	69
8.	Conclusio und Ausblick.....	71
	Anhang A: ASCET-Blockschaltbilder	73
	Anhang B: Applikation	83
	Abkürzungsverzeichnis	86
	Tabellenverzeichnis	86
	Abbildungsverzeichnis.....	87
	Literaturverzeichnis.....	88

1. Einleitung

Inhalt dieses Kapitels sind Problembeschreibung und Aufgabenstellung. Die Beweggründe für die vorliegende Diplomarbeit werden beschrieben und der Inhalt überblicksmäßig zusammengefasst.

1.1. Problembeschreibung

Ein moderner Verbrennungsmotor besteht aus einer Vielzahl von Komponenten. Neben Basiselementen wie Ein- und Auslassventilen oder Kolben und Pleuelstangen, die für den Betrieb unbedingt notwendig sind, werden auch viele Zusatzelemente, wie Turbolader, Abgasrückführung oder Partikelfilter, eingesetzt. Diese Zusatzelemente sind für den Betrieb des Motors nicht zwingend erforderlich, werden aber benötigt, um die verschiedenen Anforderungen, die an einen modernen Verbrennungsmotor gestellt werden, zu erfüllen. Aufgrund steigender Erwartungen der Kunden bezüglich Verbrauch und Komfort, strengeren Vorgaben des Gesetzgebers hinsichtlich neuer Abgasnormen und Sicherheitsvorschriften und des Drucks durch Mitbewerber, möglichst schnell neue Innovationen umzusetzen und auf den Markt zu bringen, ändern sich diese Anforderungen häufig und es kommen ständig neue hinzu.

Um neue Anforderungen zu erfüllen und das Motorsystem weiter zu optimieren, werden moderne Technologien, wie beispielsweise variabler Ventiltrieb, Partikelfilter oder Halbmotorbetrieb, eingesetzt. Die Realisierung dieser technischen Neuerungen erfolgt meistens durch Kombination von mechanischen-, elektronischen- und Software-Komponenten.

Verschiedene Technologien haben in der Regel verschiedene Ziele. Diese Ziele können zum Beispiel Leistungssteigerung, Sicherheit (Safety) oder Reduzierung der Emissionen sein. Eine Technologie kann sich auch auf mehrere Ziele auswirken, wobei nicht jede Auswirkung positiv sein muss. Die Verwendung einer Abgasrückführung beim Dieselmotor kann beispielsweise den Ausstoß von Stickoxiden reduzieren, aber zugleich die Emission von Kohlenwasserstoff erhöhen. Die Verwendung eines Abgasturboladers ermöglicht, bei gleichbleibendem Hubraum, die Leistung des Motors zu erhöhen oder, bei verringertem Hubraum, den Treibstoffverbrauch zu senken. Eine Technologie kann abhängig vom Systemzustand unterschiedliche Auswirkungen auf das System haben. Wird zum Beispiel eine Benzindirekteinspritzung verwendet, so kann die Kohlenwasserstoffemission bei niedriger Motortemperatur und geringer Drehzahl ansteigen. Bei sehr hoher Motortemperatur und hoher Drehzahl kann aber die Kohlenwasserstoffemission verringert werden.

Die Technologien können in Wechselwirkung zueinander stehen. Sie können einander hinsichtlich eines Zieles verstärken, abschwächen oder gegenseitig aufheben. Durch Scavenging kann beispielsweise das Ansprechverhalten des Abgasturboladers verbessert werden, in Kombination mit Abgasrückführung können sich die positiven Effekte jedoch neutralisieren. Zusätzlich kann der Einsatz einer Technologie den Einsatz einer anderen erfordern oder verhindern. Ist z.B. Start/Stop aktiv, so ist der gleichzeitige Einsatz sehr vieler Technologien wie Abgasturbolader oder Halbmotorbetrieb ausgeschlossen.

Die Steuerung einer Technologie wird meist durch Software-Funktionen realisiert, welche in Fahrzeugsteuergeräten implementiert sind. Viele dieser Funktionen sind dem Motorsteuergerät zugeord-

net. Die Software hat die Aufgabe, die Steuerung einer Funktion so zu gestalten, dass aus ihr der maximale Nutzen gezogen werden kann und Interaktionen mit anderen entsprechend berücksichtigt werden. Die Wechselwirkungen zwischen den Funktionen können bekannt, und somit in der Software abgebildet sein. Das Zusammenarbeiten der einzelnen Software-Funktionen wird dann entweder ermöglicht oder verhindert. Ein großes Problem stellen aber Interaktionen dar, welche zur Design Zeit übersehen, nicht bekannt oder nicht berücksichtigt wurden. Diese können später, oft in seltenen, speziellen Betriebszuständen, zu ungewollten Wechselwirkungen führen, welche das Systemverhalten negativ beeinflussen.

Aufgrund der Komplexität des Verbrennungsmotorsystems einerseits und der Größe und Komplexität der Motorsteuergeräte-Software andererseits, ist es sehr schwierig, alle Interaktionen zu erfassen und zu berücksichtigen. Auch das Einbeziehen der Wechselwirkungen in die Software gestaltet sich schwierig, da mit jeder neuen Technologie alte Softwareteile geändert und anschließend durch Tests abgesichert werden müssen.

1.2. Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden Features einer Motorsteuergeräte-Software identifiziert und deren Interaktionen analysiert. Bestehende Methoden zur zentralen Koordinierung von Feature-Interaktionen wurden untersucht. Um die oben beschriebenen Wechselwirkungen der Software-Funktionen zu lösen, wurde das Konzept eines zentralen Feature-Koordinators, aufbauend auf den zuvor untersuchten Methoden, entworfen. Der Koordinator entscheidet in letzter Instanz, unter Berücksichtigung bestimmter Systemparameter und der in diesem Betriebszustand zur Verfügung stehenden Software-Funktionen, welche Features aktiv werden dürfen. Dadurch wird eine Optimierung des Softwareverhaltens über mehrere Technologieziele erreicht. Positive Wechselwirkungen zwischen den Software-Funktionen werden dabei verstärkt, negative, wenn möglich, verhindert. Dies trägt zur Optimierung des Gesamtsystems hinsichtlich verschiedener Systemziele bei. Außerdem erleichtert es die Integration neuer Features. Nach dem Entwurf des Konzepts, wurden der Koordinator prototypisch umgesetzt und die zuvor gewählten Features für den Probetrieb angepasst. Abschließend waren die Funktion des Koordinators zu evaluieren und mögliche bzw. notwendige Änderungen des Koordinator-Konzepts und der Umsetzung auszuarbeiten.

1.3. Übersicht

Da die Motorsteuerung eines modernen Verbrennungsmotors von sehr vielen Einflussfaktoren abhängt, ist die zugehörige Software äußerst komplex. Bevor man beginnen kann, den Koordinator zu entwerfen, muss der Begriff „Feature“ im Zusammenhang mit Motorsteuerungen geklärt werden. Nachdem definiert wurde, was im Kontext dieser Arbeit ein Feature ist, wird auf das Thema „Feature-Interaktion“ eingegangen, und es werden die verschiedenen Arten der Interaktionen angeführt. All dies ist in Kapitel 2 beschrieben.

Zum besseren Verständnis der Anforderungen an den Koordinator und der einzelnen Features, wird in Kapitel 3 näher auf den Ottomotor und die Motorsteuerung eingegangen. Erst werden der Aufbau des Ottomotors mit seinen wichtigsten Komponenten und dann sein Funktionsprinzip erklärt. Anschließend wird etwas näher auf die Motorsteuerung eingegangen. Als Abschluss zu den Grundlagen des Ottomotors werden unterschiedliche Features der Motorsteuergeräte-Software kurz beschrei-

ben und deren Abhängigkeiten dargestellt. Dies soll die Komplexität der Steuergeräte-Software verdeutlichen, und in weiterer Folge die Auswahl der Features, welche der Koordinator im Rahmen der prototypischen Umsetzung koordinieren soll, erleichtern.

Kapitel 4 handelt von unterschiedlichen Methoden aus Forschung und Praxis zur Koordinierung von Feature-Interaktionen, die auf ihre Verwendbarkeit im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden.

In Kapitel 5 ist die Entwicklung des Feature-Koordinators beschrieben. Zuerst wird auf die Anforderungen an den Koordinator eingegangen, dann das entwickelte Konzept vorgestellt. Es folgen zwei Anwendungsszenarien und die prototypische Umsetzung. Den Abschluss dieses Kapitels bilden die Beschreibung der notwendigen Anpassungen der Features und der Abweichungen in der Umsetzung vom Konzept.

Das Ergebnis der Evaluierung des Feature-Koordinators ist in Kapitel 6 beschrieben.

Im Anschluss daran folgt in Kapitel 7 die Diskussion der Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten des Konzepts und der Umsetzung.

Den Abschluss der Arbeit bildet das Kapitel 8. Es enthält die Conclusio und Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Koordinators.

Die prototypische Umsetzung erfolgte in ASCET, die damit erstellten Diagramme sind in Anhang A zu finden. Die Applikation der kalibrierbaren Größen (Kennlinien und Parameter) ist Anhang B zu entnehmen.

2. Features und Feature-Interaktionen

In diesem Kapitel wird zu Beginn der Begriff „Feature“ geklärt. Danach wird auf Feature-Interaktionen näher eingegangen und erläutert, was diese sind, wie sie gefunden werden können und wie man sie berücksichtigen kann. Als Quelle für dieses Kapitel diene [1], für weitere Details sei auf dieses Buch verwiesen.

2.1. Features

Der Begriff „Feature“ wird sehr häufig verwendet, jedoch gibt es für ihn keine eindeutige Definition. Es ist somit nicht allgemein gültig festgelegt, was er genau beschreibt. Übersetzt bedeutet Feature Merkmal, Eigenschaft oder Charakterzug. Für den Begriff existieren viele Definitionen, einige sind hier angeführt:

“A logical unit of behavior specified by a set of functional and non-functional requirements” ([2] S. 194)

“A distinctively identifiable functional abstraction that must be implemented, tested, delivered and maintained” ([3] S. 2)

“An optional or incremental unit of functionality” ([4] S. 353)

“A structure that extends and modifies the structure of a given program in order to satisfy a stakeholder’s requirements, to implement and encapsulate a design decision, and to offer a configuration option” ([5] S. 3)

“A feature is a characteristic or end-user-visible behavior of a software system. Features are used in product-line engineering to specify and communicate commonalities and differences of the products between stakeholders, and to guide structure, reuse, and variation across all phases of the software life cycle.” ([1] S. 18)

Schwierig bei der Definition ist, dass verschiedene Anwender ein Feature unterschiedlich wahrnehmen können. Ein Entwickler wird unter Umständen etwas Anderes unter einem Feature verstehen als sein Manager oder der Kunde, der schlussendlich das Produkt erwirbt. Das Antiblockiersystem eines Fahrzeuges kann vom Kunden beispielsweise als Feature betrachtet werden, der Entwickler könnte es aber als eigenständiges System betrachten, da es von einem eigenen Steuergerät gesteuert wird. Ein Manager könnte darin eine Funktion sehen, welche für die Zulassung eines neuen Fahrzeugmodells notwendig ist.

Wie aus den angeführten Definitionen hervorgeht, wird der Begriff „Feature“ je nach Anwendungsfall spezifiziert. Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll unter einem Feature Folgendes verstanden werden:

Ein Feature umfasst alle Software-Funktionen, die die Steuerung oder Realisierung einer Technologie ermöglichen. Unter Technologie verstehen wir eine Funktionalität, welche für den normalen Motorbetrieb nicht notwendig ist, jedoch zur Einhaltung von gesetzlichen Rahmenbedingungen, Komfort Steigerung, Leistungserhöhung und dergleichen, benötigt wird.

Die Art und Weise der Einbettung eines Features in die Software ist nicht festgelegt. Eine gute Gliederung der Softwarefunktionen ermöglicht aber, dass ganze Softwareteile (nämlich die Features) einfacher in verschiedenen Produktschienen verwendet werden können. Im Idealfall müssen nur mehr die einzelnen Features gemeinsam mit der Basissoftware in eine Produktschiene integriert werden. Das Entwickeln, Testen und Warten einer einzelnen Funktion ist somit nur einmal, und nicht in jeder Produktschiene, notwendig. Sieht man beispielsweise die Funktionen eines Taschenrechners (+, -, *, / usw.) als dessen Features an, so kann man jede beliebige Kombination der Rechenfunktionen in unterschiedliche Rechner integrieren und so auf einfache Weise unterschiedliche Produkte bilden.

2.2. Feature-Interaktionen

Ein Feature wird meistens in Isolation, daher ohne andere Funktionen zu berücksichtigen, entwickelt. Doch egal wie gut es alleine funktioniert, in Verbindung mit anderen kann sich sein Verhalten ändern. Diese Beeinflussung durch Kombination mehrerer Features nennt man *Feature-Interaktion*.

Features werden kombiniert, da man sich davon einen Mehrwert für das System und ein verbessertes Systemverhalten erhofft. Dadurch können aber ungewollte Interaktionen auftreten, welche ein Fehlverhalten verursachen. Um unerwartetes oder ungewolltes Verhalten zu verhindern, erfordert das Kombinieren von Features eine Koordinierung, welche die Wechselwirkungen berücksichtigt.

Features können auf unterschiedliche Arten miteinander interagieren. Sie können widersprüchliche Anforderungen haben, direkt voneinander abhängig sein, indem das Ausgangssignal eines Features das Eingangssignal des anderen beeinflusst oder Einfluss auf dieselbe Stellgröße nehmen. Zusätzlich können sie auch über nichtfunktionale Anforderungen, wie den Ressourcenverbrauch eines Systems, in Wechselwirkung stehen.

Anhand der folgenden Beispiele soll das Problem der Feature-Interaktionen verdeutlicht werden.

Beispiel 1: Rufumleitung (Call Forwarding, CF) und Anklopfen (Call Waiting, CW)

Dieses häufig beschriebene Beispiel stammt aus der Telekommunikationstechnik. Das Feature Rufumleitung erlaubt es, Anrufe zu einer anderen Nummer weiterzuleiten, falls die angerufene Leitung besetzt ist. Durch das Feature Anklopfen wird der angerufene Teilnehmer, welcher sich gerade in einem Gespräch befindet, darüber informiert, dass er von einem anderen Teilnehmer angerufen wird. Er hat dann die Möglichkeit, den aktiven Anruf in die Warteschleife zu legen und den neuen anzunehmen. In Isolation arbeiten beide Features korrekt. Kombiniert man sie, entsteht ein undefinierter Systemzustand, bei dem nicht klar ist, ob nun CF oder CW durchgeführt werden soll. Die Interaktion lässt sich relativ einfach auflösen, indem man entweder einem Feature immer den Vortritt gegenüber dem anderen gibt, oder es nicht zulässt, dass beide gleichzeitig aktiv sind.

Beispiel 2: Feuer- und Wasseralarmsystem

Gebäudesteuerungen bieten die Möglichkeit, ein Feueralarmsystem (FAS) und ein Wasseralarmsystem (WAS) in einem Gebäude zu verbauen. Das FAS erkennt über Rauchmelder, ob es in dem Gebäude brennt, und schaltet gegebenenfalls die Sprinkleranlage in dem vom Brand betroffenen Gebäudebereich ein. Das WAS hat die Aufgabe Wasserrohrbrüche zu erkennen. Dazu wird erkannt, ob am Fußboden eine gewisse Wassermenge steht. Ist dies der Fall, wird die Wasserzufuhr für das Gebäude

unterbrochen. Erkennt nun das FAS einen Brand, so wird die Sprinkleranlage aktiviert. Nach kurzer Zeit wird das WAS annehmen, einen Wasserrohrbruch zu erkennen und die Wasserzufuhr kappen, mit dem möglichen Effekt, dass das Gebäude abbrennt. Nur wenn die Interaktion während der Planungsphase erkannt wird, kann diese ungewollte Interaktion verhindert werden. Die Lösung des Problems ist dann recht einfach, indem das WAS nicht aktiv werden darf, wenn das FAS aktiv ist.

Beispiel 3: Unfallerkennung und automatische Türverriegelung

Moderne Fahrzeuge können, zum Beispiel über die Information, dass der Airbag ausgelöst wurde, erkennen, ob sie in einen Unfall verwickelt sind. Auch bieten viele Fahrzeuge die Möglichkeit, die Fahrzeurtüren beim Anfahren automatisch zu verriegeln. Ist nun das Fahrzeug in einen Unfall verwickelt und die automatische Türverriegelung aktiv, so wird es Ersthelfern erschwert, zu den verunglückten Fahrzeuginsassen zu gelangen. Das Feature *Automatische Türverriegelung*, welches eigentlich die Sicherheit der Fahrzeuginsassen erhöhen soll, wirkt sich in diesem Fall negativ aus. Wie in den Beispielen zuvor lässt sich auch hier die ungewollte Interaktion einfach auflösen, wenn sie zuvor erkannt wurde.

Die obigen Beispiele zeigen, dass Interaktionen zwischen Features in allen Anwendungsbereichen möglich sind. Auch zeigen sie, dass manche Wechselwirkungen nur sehr schwer in der Planungsphase des Systems zu erkennen sind. Außerdem sind nur Wechselwirkungen zwischen zwei Features dargestellt. Es können auch Interaktionen zwischen drei und mehr Features auftreten. Diese werden Interaktionen höherer Ordnung genannt. Interaktionen zwischen zwei Features haben die Ordnung 1, zwischen drei Ordnung 2 usw. Abbildung 2.1 stellt die Interaktionen dar, welche durch Kombination von drei Features entstehen können. Die Features A, B und C sind als Kreise dargestellt. Es treten drei Wechselwirkungen der Ordnung 1 und eine der Ordnung 2 auf. Durch Kombination von n Features kann es, zumindest theoretisch, zu Interaktionen $(n-1)$ -ter Ordnung kommen.

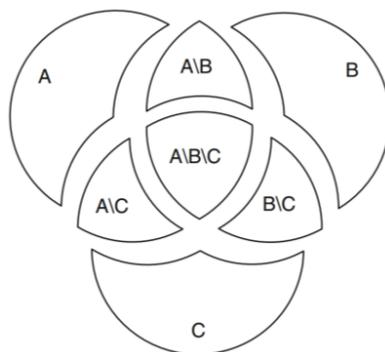


Abbildung 2.1 Mögliche Feature-Interaktionen zwischen drei Features [Kopie aus [1] S. 216]

Wechselwirkungen höherer Ordnung treten im Vergleich zu jenen zwischen zwei Features sehr selten auf. Somit treten auch die meisten Fehlfunktionen, welche durch Wechselwirkungen zwischen Features entstehen, zwischen zwei Features auf. Möchte man eine Software auf Feature-Interaktionen untersuchen, sollte man sich also primär auf das Entdecken und Verhindern von Interaktionen der Ordnung 1 konzentrieren.

In [6] wurden 94 Features auf Abhängigkeiten untersucht, wobei nur direkte, funktionelle Abhängigkeiten der Software-Module berücksichtigt wurden. Physikalische Wechselwirkungen der Funktionen blieben unbeachtet. Jede Abhängigkeit kann- muss aber nicht zu einer Feature-Interaktion führen. Es wurden insgesamt 1451 Abhängigkeiten zwischen den Features entdeckt, lediglich 9 arbeiten völlig

unabhängig von allen anderen. Im Mittel ist jedes Feature von 3 anderen abhängig und hat Auswirkungen auf 11 weitere Features. Nachdem die automatische Auswertung abgeschlossen war, wurden 100 Abhängigkeiten ausgewählt und mit den jeweiligen Fachexperten, wobei jeder Experte für ein oder mehrere Features zuständig ist, besprochen. 89% der Abhängigkeiten wurden als plausibel angesehen. Die übrigen sind von den Experten entweder angezweifelt worden oder konnten nicht erklärt werden. Insgesamt waren 42% der Abhängigkeiten bekannt, 58% waren vor der Untersuchung unbekannt.

Die oben genannten Zahlen zeigen, wie wichtig das Erkennen von Interaktionen und die Koordinierung der Abläufe zwischen den Features sind. Außerdem wird deutlich, dass man auf das Problem der Feature-Interaktion gezielt zugehen muss, um ungewollte Wechselwirkungen zu entdecken und zu verhindern.

2.2.1. Auffinden von Feature-Interaktionen

Das Auffinden von Feature-Interaktionen ist eine herausfordernde Aufgabe. Es gibt verschiedene Strategien, jedoch keine, die generell anwendbar ist. Ein großes Problem besteht darin, dass ungewollte Wechselwirkungen bei jeder möglichen Feature-Kombination auftreten können. Werden n Features gemeinsam verwendet, kann dies zu $\binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2}$ Interaktionen zweiter und $\binom{n}{k}$ Interaktionen k -ter Ordnung führen. Nicht berücksichtigt ist hier, dass zwischen zwei Features mehr als nur eine Abhängigkeit existieren kann. Eine typische Methode um Wechselwirkungen aufzuspüren besteht darin, die Anforderungen der Features zu analysieren. Typischerweise wird dann nach Ressourcen gesucht, welche von mehreren verwendet werden. Jede Mehrfachverwendung stellt eine potentielle Wechselwirkung dar. Für das Beispiel 2 wäre dies die Ressource Wasserzufuhr. Genau so kann das Reagieren auf Ereignisse zur Suche nach Interaktionen herangezogen werden. Reagieren mehrere Features auf dasselbe Ereignis, liegt eine mögliche Interaktion vor. Diese Methode würde die Abhängigkeit in Beispiel 1 ausfindig machen. Beide Methoden erfordern eine genaue Untersuchung der potentiellen Wechselwirkungen, was sehr zeitaufwendig ist. Eine weitere Möglichkeit zum Auffinden ungewollter Interaktionen ist ausgiebiges Testen. Durch passende Testfälle, welche viele verschiedene Kombinationen der Eingangsvariablen erlauben, können sie entdeckt werden. Auch Model-Checking kann man zum Auffinden von Interaktionen einsetzen. Dabei wird die Systembeschreibung (Modell) gegen die Spezifikation geprüft. Ein automatisches Überprüfen ist so möglich, als Ergebnis werden Verletzungen der Spezifikation geliefert. Diese müssen dann anschließend von einem Entwickler untersucht werden.

2.2.2. Feature-Interaktionen koordinieren

Nachdem die Interaktionen zwischen den Features aufgefunden wurden, muss eine Strategie erarbeitet werden, wie man diese berücksichtigen kann. In der Praxis muss man dem Programm zusätzlichen Code beifügen, den sogenannten Koordinierungscode. Dieser hat die Aufgabe, die Wechselwirkungen zwischen den Features zu koordinieren. Betrachtet man noch einmal Abbildung 2.1, so stellen die Blöcke mit dem Inhalt A, B und C die Features selbst dar. Die Ausschnitte mit mehr als einem Buchstaben stellen den Programmteil (Koordinierungscode) dar, welcher für die Koordinierung der betroffenen Features benötigt wird. Je nachdem, welche Features ausgewählt werden, muss dann der entsprechende Koordinierungscode mit ausgewählt werden. Es stellt sich nun die Frage, wie

dieser in die Softwarearchitektur integriert und welche Strategie der Koordinierung verfolgt werden soll. Auf diese Fragen gibt es noch keine allgemeingültigen Antworten.

An den Koordinierungscode werden einige Anforderungen gestellt:

- **Variabilität:** Die Implementierung sollte es erlauben, dass die Features unabhängig voneinander wählbar sind. Die Auswahl der Features soll also je nach Anwendungsfall getroffen werden. Der Koordinierungscode darf keine Kombination verhindern oder weitere erfordern.
- **Aufwand:** Die Implementierung darf keinen zu großen Mehraufwand verursachen. Eine Koordinierungsmethode, die aufwendiger zu implementieren ist als die zu koordinierenden Features, wäre ohnehin für eine Umsetzung nicht attraktiv.
- **Ressourcenverbrauch und Leistung:** Der Koordinierungscode sollte den Ressourcenverbrauch der Software nicht übermäßig erhöhen und sich außerdem auf das Verhalten der Software nicht negativ auswirken.

Neben den genannten Anforderungen bestehen noch weitere, die, je nach System, unterschiedlich sein können. Es werden nun einige Strategien zur Implementierung des Koordinierungscode in ihren Grundzügen vorgestellt. Methoden, wie man Features zentral koordinieren kann, sind in Kapitel 4 beschrieben und werden daher hier nicht angeführt.

Anpassung des Feature-Modells

Diese ist die wohl einfachste Strategie zur Feature-Koordinierung. Features, zwischen denen Wechselwirkungen bestehen, können nicht gleichzeitig aktiv werden, Interaktionen sind also ausgeschlossen. So könnte man beispielsweise im Beispiel 1 verhindern, dass CF und CW gleichzeitig vom Benutzer aktiviert werden. Ein solches Vorgehen ist aber nicht immer möglich und sinnvoll, denn sehr oft möchte man, dass der Betrieb mehrere Features gleichzeitig möglich ist.

Mehrfachimplementierung

Eine weitere einfache Methode besteht darin, problematische Features mehrfach zu implementieren, einmal mit und einmal ohne Koordinierungscode. In Anlehnung an Beispiel 2 könnte das WAS einmal einfach bei Aktivwerden die Wasserzufuhr unterbrechen, bei der anderen Implementierung würde erst das FAS gefragt werden, ob es die Wasserzufuhr unterbrechen darf. Je nachdem, ob beide Funktionen oder nur eine im System verwendet werden, wird die entsprechende Variante des Features ausgewählt. Diese Methode bewirkt, dass ein und dasselbe Feature mehrmals implementiert, weiterentwickelt und getestet werden muss, was zu einem deutlichen Mehraufwand bei der Entwicklung führt. Sie ist also nicht empfehlenswert.

Präprozessorabfragen

Durch Verwendung von Präprozessorabfragen kann der Koordinierungscode, je nach Bedarf, relativ einfach ein- und wieder ausgebaut werden. Dies hat den Vorteil, dass der Code nur dann in der Software enthalten ist und Ressourcen in Anspruch nimmt, wenn die betroffenen Features ebenfalls vorhanden sind. Die Wartbarkeit der Software wird dadurch aber verschlechtert.

Koordinierungsmodul

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Wechselwirkungen zwischen den Features durch eigene Software-Module zu koordinieren. Es wird für jede Feature-Kombination mit Wechselwirkungen ein Modul benötigt, bei zwei Features eines, bei drei können es bereits vier sein. Diese Methode wird

häufig eingesetzt und ist auch für Interaktionen höherer Ordnung geeignet. Ein Nachteil besteht darin, dass die Anzahl der benötigten Module stark ansteigen kann, wenn viele Interaktionen zwischen unterschiedlichen Features auftreten. Durch Zusammenfassen der vielen Module in einem, kann viel Aufwand bei der Entwicklung eingespart werden. Ein Beispiel für ein zentrales Modul ist hier angeführt: [7].

benhub (s) und dem Innendurchmesser des Zylinders, lässt sich das Hubvolumen (V_h) berechnen. Der Hubraum des Motors entspricht V_h mal der Anzahl der Zylinder. Da bei der Verbrennung des Kraftstoffes sehr hohe Temperaturen erreicht werden und dies zu Schäden an den Komponenten führen kann, muss der Motor gekühlt werden. Um dies zu bewerkstelligen, werden die Zylinder mit einem Wasserraum (in Abbildung 3.1 nicht dargestellt), dem sogenannten Wassermantel umgeben. Durch diesen zirkuliert dann Kühlwasser, welches die überschüssige Wärme abtransportiert. Bei Motorrädern und Kleinmotoren (Motorsäge, Rasenmäher) kommt häufig eine Luftkühlung zum Einsatz. Dabei wird die überschüssige Motorwärme über Kühlrippen an die Umgebung abgegeben, der Wassermantel entfällt. Beide Methoden verhindern das Überhitzen des Motors, führen aber zu einer längeren Warmlaufphase, was sich negativ auf die Emissionen auswirkt.

Kolben

Der Kolben hat die Aufgabe, die Druckkräfte, welche bei der Verbrennung des Kraftstoffs in der Brennkammer entstehen, aufzunehmen und über die Pleuelstange an die Kurbelwelle abzugeben. Für den Betrieb ist es erforderlich, dass der Raum zwischen Kolben und Zylinder abgedichtet wird, dies wird über spezielle Dichtungen erreicht, welche am Kolben angebracht sind. An den Kolben werden hohe mechanische Ansprüche gestellt. Um diesen gerecht zu werden, wird er an den jeweiligen Motortyp angepasst, wodurch sich viele unterschiedliche Bauformen und Materialkombinationen für ihn ergeben.

Pleuelstange

Die Pleuelstange verbindet den Kolben mit der Kurbelwelle. Durch sie wird die lineare Bewegung des Kolbens in eine Rotationsbewegung der Kurbelwelle umgewandelt. Mit dem Kolben ist sie über den Pleuelbolzen verbunden.

Kurbelwelle

Die Kurbelwelle wird von den Kolben angetrieben und führt eine Drehbewegung durch. Das Drehmoment der Welle wird in weiterer Folge über die Kupplung an das Getriebe und weiter an die Reifen übertragen. Die Herstellung erfolgt durch Schmieden oder Gießen, wobei, bedingt durch die höher werdende Aufladung der Motoren und dem dadurch ansteigenden Moment an der Kurbelwelle, ersteres Verfahren an Bedeutung gewinnt. Über die Kurbelwelle werden nicht nur die Reifen, sondern auch die Nockenwellen, welche mittels Zahnriemen oder Zahnrad mit der Kurbelwelle verbunden sind, und weitere Verbraucher wie die Lichtmaschine angetrieben.

Ein- und Auslassnockenwelle

Die Hauptaufgabe der Nockenwellen ist das Ansteuern der Ein- und Auslassventile. Da das Öffnen und Schließen der Ventile exakt mit der Position der Kurbelwelle synchronisiert sein muss, sind die Nockenwellen über einen Zahnriemen oder eine Steuerkette mit der Kurbelwelle verbunden, wobei beim Viertaktmotor die Nockenwellendrehzahl der halben Kurbelwellendrehzahl entspricht. Über die Nockenwellen werden auch einige Nebenaggregate wie die Vakuumpumpe, Hydraulikpumpe oder Kraftstoffpumpe, betrieben. Bei Nutzfahrzeugen kann sie zur Erzeugung eines Schlepptoments verwendet werden, wodurch die Motorbremswirkung im Schubbetrieb vergrößert werden kann.

Ein- und Auslassventil

Diese Ventile dienen zur Steuerung des Gasaustausches zwischen Zylinder und Luft- bzw. Abgassystem. Dabei ist es wichtig, dass die Ventile, welche in der Regel als Tellerventile ausgeführt sind, den

Zylinder vollständig abdichten. Das Öffnen und Schließen wird über die Nocken der Nockenwellen gesteuert. Neuere Technologien erfordern aber eine variable Ansteuerung der Ventile. Es wird daher an elektromagnetischen, elektrohydraulischen und elektromechanischen Systemen zur Steuerung gearbeitet.

Einspritzventil

Aufgabe des Einspritzventils ist es, den Kraftstoff für das Luft-Kraftstoff-Gemisch zur Verfügung zu stellen. Wichtig dabei sind die exakte Kraftstoffmenge, welche für jeden Zylinder separat vom Motorsteuergerät berechnet wird, und dessen Zerstäubung.

Zündkerze

Wie eingangs schon erwähnt, wird das Luft-Kraftstoff-Gemisch beim Ottomotor durch Fremdzündung entzündet. Um dies zu bewerkstelligen werden Zündkerzen verwendet. Diese haben die Aufgabe einen Zündfunken zu erzeugen, der den Kraftstoff entzündet. Der Zündzeitpunkt hat großen Einfluss auf die Motorleistung und die Emissionen, er muss daher genau an die geforderte Last und die Motordrehzahl angepasst werden. Der Zündzeitpunkt kann nicht willkürlich gewählt werden, ein zu frühes Zünden kann bewirken, dass es zur Selbstentzündung des Kraftstoffs (Klopfen) kommt, was dem Motor schadet. Ein später Zündwinkel bewirkt eine Verschlechterung des Wirkungsgrades, ist aber manchmal gewollt, damit schnell auf Laständerungen reagiert werden kann. An die Zündkerze werden hohe mechanische Ansprüche gestellt. Zu Verschleiß der Zündkerze führen die thermischen Beanspruchungen, Oxidation der Elektroden und Erosion durch den Funken. Durch den Einsatz optimierter Werkstoffe ist eine Laufleistung von 60.000km und mehr möglich.

Brennraum

Im Brennraum wird das Luft-Kraftstoff-Gemisch gezündet. Begrenzt wird er von Zylinder, Einlassventil, Auslassventil und Kolben, wobei das Volumen durch die Bauform des Zylinders stark beeinflusst werden kann.

3.1.2. Viertaktbetrieb

Die meisten Verbrennungsmotoren, welche in Kraftfahrzeugen eingesetzt werden, arbeiten nach dem Viertakt-Verfahren. Dieses besteht aus den Arbeitsschritten Ansaugtakt (a), Verdichtungstakt (b), Arbeitstakt (c) und Ausstoßtakt (d) und ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Hier soll das Prinzip anhand eines Saugmotors erklärt werden.

Zu Beginn des Ansaugtaktes befindet sich der Kolben am oberen Totpunkt (OT), das Auslassventil ist geschlossen und das Einlassventil ist geöffnet. Der Kolben bewegt sich in Richtung unterer Totpunkt (UT) und das Luft-Kraftstoff-Gemisch wird durch den entstehenden Unterdruck in den Zylinder gesaugt. Ist der Kolben am UT angekommen wird das Einlassventil geschlossen, es beginnt der Verdichtungstakt. In diesem wird das Gemisch im Zylinder durch den sich nach oben bewegenden Kolben verdichtet. Vor Erreichen des OT wird das Gemisch von der Zündkerze entzündet, der Arbeitstakt beginnt. Um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen, sollte die Verbrennung bereits kurz nach dem OT abgeschlossen sein. Die durch die Verbrennung freigesetzte Energie beschleunigt den Kolben nach unten und über die Pleuelstange wird die Kurbelwelle angetrieben, nur in diesem Arbeitstakt wird der Motor angetrieben. Hat der Kolben den UT erreicht beginnt der Ausstoßtakt. Das Auslass-

ventil wird geöffnet und die Abgase im Zylinder gelangen in den Abgastrakt. Sobald der Kolben wieder den OT erreicht, wird das Auslassventil geschlossen und ein neuer Arbeitszyklus beginnt.

3.1.3. Luftverhältnis und Abgasemission

Eine wichtige Kenngröße für die Motorsteuerung ist das Luftverhältnis λ . Dieses lässt sich aus angesaugter, im Brennraum befindlicher Luftmasse m_L und der für eine stöchiometrische Verbrennung des Kraftstoffs notwendigen Luftmasse m_{LS} errechnen:

$$\lambda = \frac{m_L}{m_{LS}}$$

Für das Luftverhältnis können nicht beliebige Werte angenommen werden, da die Flammgeschwindigkeit mit steigendem λ abnimmt. Für Ottomotoren mit homogener Gemischbildung kann λ Werte in einem Bereich von 0,8 (Luftmangel oder „fettes“ Gemisch) bis 1,4 (Luftüberschuss oder „mageres“ Gemisch) annehmen. Der beste Motorwirkungsgrad wird zwischen 1,3 und 1,4 erreicht, die größte Motorlast ist aber zwischen 0,9 und 0,95 erreichbar, da hier die Verbrennung am schnellsten erfolgt.

Das Luftverhältnis wirkt sich nicht nur auf die Leistung und den Wirkungsgrad des Motors aus, sondern auch auf die Emissionen. Herrscht Luftmangel, sind im Abgas hohe Werte von Kohlenwasserstoff (HC) und Kohlenmonoxid (CO) enthalten. Mit steigendem λ nehmen die CO- und HC-Emissionen ab, wobei die HC-Emissionen ab einem Luftverhältnis von ca. 1,2 wieder steigen. Ab einem λ von 1 nehmen zudem die Stickoxid (NO_x) Emissionen sehr stark zu. Zur Einhaltung der Abgasgrenzwerte wird ein Dreiwegekatalysator eingesetzt. Dieser erfordert, um optimal arbeiten zu können, dass $\lambda = 1$ ist, was durch die sogenannte Lambdaeegelung erreicht wird.

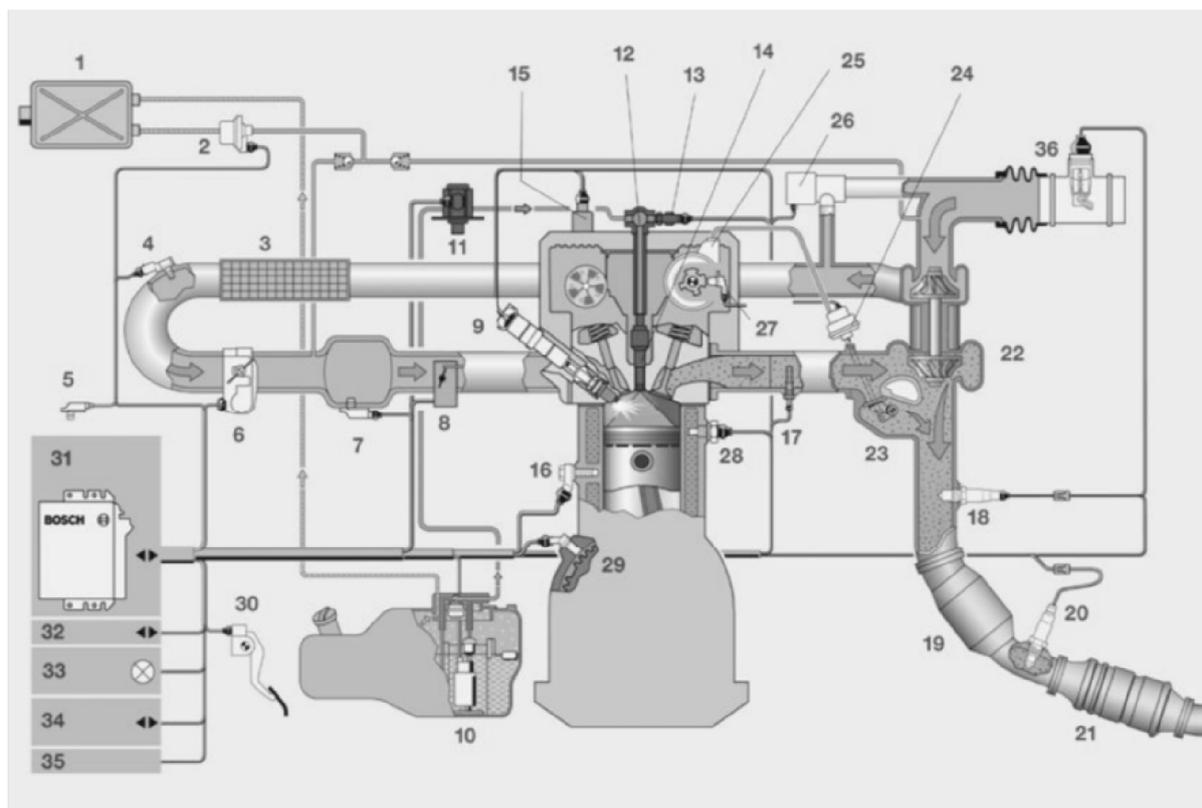
3.1.4. Gemischbildung

Es gibt zwei Arten der Gemischbildung, die innere und die äußere. Bei der äußeren, der Saugrohrein-spritzung, welche in Abbildung 3.1 dargestellt ist, befindet sich vor jedem Zylinder ein Einspritzventil, das eine zuvor berechnete Kraftstoffmenge, üblicherweise bei noch geschlossenem Einlassventil, in den Luft-Ansaugtrakt abgibt. Von dort gelangt dann das Luft-Kraftstoff-Gemisch nach dem Öffnen des Einlassventils in den Brennraum. Dies hat den Vorteil, dass der Kraftstoff homogen im Gemisch verteilt ist, im gesamten Brennraum herrscht somit ein konstantes Luftverhältnis λ .

Bei den meisten heute verkauften PKW wird die innere Gemischbildung, die Benzindirekteinspritzung, verwendet. Hierbei erfolgt die Gemischbildung, wie auch beim Dieselmotor, im Brennraum. Es besteht nun die Möglichkeit, den Treibstoff während dem Verdichtungstakt in den Brennraum einzubringen. Dies führt zu einem homogenen Gemisch wie bei der Saugrohrein-spritzung. Die Direkteinspritzung ermöglicht es aber auch, eine brennfähige Schichtwolke mit $\lambda \approx 1$, welche von Luft oder einem sehr mageren, im Idealfall nicht zündfähigen Luft-Kraftstoff-Gemisch umgeben ist, zu erzeugen. Dies führt zu einer Kühlung des Zylinderinnenraums, wodurch höher verdichtet werden kann, und dadurch zu einer Steigerung des Wirkungsgrades des Motors. Zukünftige Abgasnormen lassen sich aus heutiger Sicht nicht ohne direkte Einspritzung realisieren.

3.2. Systemüberblick

Nachdem die Grundlagen des Ottomotors und sein Funktionsprinzip erklärt wurden, soll nun ein typisches Motorsystem betrachtet werden. Abbildung 3.2 zeigt das Strukturbild eines Ottomotors mit Direkteinspritzung. Das Gesamtsystem wird, zum leichteren Verständnis, in vier Teilsysteme zerlegt, das Luftsystem, das Kraftstoffsystem, das Zündsystem und das Abgassystem. Die Beschreibung der Komponenten erfolgt in jenem Teilsystem, dem man sie zuordnet.



- | | |
|--|---|
| 1 Aktivkohlebehälter | 19 Vorkatalysator |
| 2 Tankentlüftungsventil | 20 λ -Sonde |
| 3 Ladeluftkühler | 21 Hauptkatalysator |
| 4 kombinierter Ladedruck- und Ansauglufttemperatursensor | 22 Abgasturbolader |
| 5 Umgebungssensor | 23 Waste-Gate |
| 6 Drosselvorrichtung (EGAS) | 24 Waste-Gate-Steller |
| 7 Saugrohrdrucksensor | 25 Vakuumpumpe |
| 8 Ladungsbewegungsklappe | 26 Schubumluftventil |
| 9 Zündspule mit Zündkerze | 27 Nockenwellen-Phasensensor |
| 10 Kraftstofffördermodul mit Elektrokraftstoffpumpe | 28 Motortemperatursensor |
| 11 Hochdruckpumpe | 29 Drehzahlsensor |
| 12 Kraftstoff-Verteilerrohr | 30 Fahrpedalmodul |
| 13 Hochdrucksensor | 31 Motorsteuergerät |
| 14 Hochdruck-Einspritzventil | 32 CAN-Schnittstelle |
| 15 Nockenwellenversteller | 33 Motorkontrollleuchte |
| 16 Klopfsensor | 34 Diagnoseschnittstelle |
| 17 Abgastemperatursensor | 35 Schnittstelle zum Immobilizer-Steuergerät (Wegfahrsperr) |
| 18 λ -Sonde | 36 Heißfilm-Luftmassenmesser |

Abbildung 3.2 Strukturbild eines aufgeladenen Ottomotors mit Direkteinspritzung und Komponenten für elektronische Steuerung [Kopie aus [8] S. 19]

3.2.1. Luftsysteem

Bei einem Ottomotor, welcher homogen betrieben wird (nicht homogene Betriebsmodi werden hier nicht berücksichtigt, da diese eher die Ausnahme als den Regelfall bilden), hängen das Drehmoment und die Leistung von der zugeführten Luftmasse ab. Den für die Verbrennung notwendigen Sauerstoff erhält der Motor über das Luftsysteem. Die angesaugte Luft wird erst in einem Luftfilter gefiltert und dann der aktuelle Wert der angesaugten Luftmasse vom Luftmassensensor (36) gemessen. Anschließend gelangt die Luft über den Ladeluftkühler (3) und die Drosselklappe (6) in den Zylinder. Zusätzlich zur Frischluft kann noch Abgas zur angesaugten Luft hinzugefügt werden, um die Emissionen zu reduzieren. Durch Erhöhen des Luftdrucks im Ansaugtrakt kann die Motorleistung gesteigert werden. Die benötigte Luftmasse wird aus der Stellung des Gaspedals, welche elektronisch erfasst und anschließend in ein Wunschmoment umgesetzt wird, berechnet. Die Drosselklappe wird dann entsprechend angesteuert. Die Ansaugluftmasse lässt sich von einer Reihe von Aktuatoren beeinflussen, einige von ihnen werden nun vorgestellt.

Luftmassensensor

Er dient zur Bestimmung des Luftmassenstroms. Der Messwert dient zur Berechnung der Einspritzmenge und der Abgasrückführrate. Zur Messung wird meist das Heißfilm-Anemometrie-Verfahren eingesetzt.

Drosselklappe

Diese dient zur Steuerung der Luftzufuhr für den Motor und zum Einstellen des Luftdrucks im Ansaugtrakt. Die Stellung der Drosselklappe wird in Abhängigkeit des gewünschten Motormoments gesteuert, wobei sie bei Vollast ganz geöffnet ist. Früher war die Klappe direkt mit dem Gaspedal mechanisch verbunden, heute wird die Stellung des Gaspedals elektronisch ausgewertet und die Klappenstellung vom Motorsteuergerät eingestellt. Ist die Klappe nicht ganz geöffnet, entstehen Ladungswechselverluste (Pumpverluste und Verluste beim Ladungswechsel), sogenannte Drosselverluste. Es wird daher angestrebt, die Drosselklappe so weit wie möglich zu öffnen um diese Verluste gering zu halten. Da zur Abgasnachbehandlung aber ein λ von 1 erforderlich ist, kann die Klappe nur durch den Einsatz spezieller Technologien weiter geöffnet werden.

Abgasturbolader

Der Abgasturbolader ist eine weit verbreitete Möglichkeit, um den Ladedruck zu erhöhen. Ein höherer Ladedruck ermöglicht eine höhere Motorleistung bzw. eine kleinere Motorbauweise bei gleicher Leistung, was aufgrund geringerer mechanischer Verluste zu einer CO₂-Reduktion führt. Der Abgasturbolader ist dem Luftsysteem zugeordnet, er verfügt aber auch im Abgassysteem über mechanische Komponenten. In beiden Teilsystemen befindet sich jeweils eine Turbine. Die beiden sind über eine Welle gekoppelt.

Werden die Auslassventile geöffnet, verlässt das heiße, unter Druck stehende Gas den Zylinder und entweicht in das Abgassysteem. Dieser Abgasmassenstrom treibt die Turbine des Turboladers im Abgassysteem an. Über die Welle wird die Energie an die Turbine im Luftsysteem abgegeben. Dies hat zur Folge, dass der Ladedruck im Luftsysteem ansteigt. Da sich die Luft bei der Verdichtung erwärmt und dadurch die Dichte der Luft sinkt, wird die Luft nach der Verdichtung im Ladeluftkühler wieder gekühlt. Optional kann der Turbolader ein Waste-Gate besitzen. Dieses ermöglicht eine kleinere Bauweise des Turboladers und somit ein besseres Ansprechen bei kleineren Abgasmassenströmen.

Wird das Waste-Gate geöffnet, strömt ein Teil des Abgases am Lader vorbei und steht dem Turbolader nicht mehr als Antrieb zur Verfügung. Somit kann verhindert werden, dass die Drehzahl des Abgasturboladers zu hoch wird und das Bauteil Schaden nimmt.

Abgasrückführung

Beim Ausstoßen des Gasgemisches aus dem Zylinder, nach der Verbrennung des Kraftstoffes, bleibt ein geringer Anteil an Restgas im Brennraum zurück. Zusätzlich kann die Restgasmenge durch gezielte Abgasrückführung (AGR) beeinflusst werden, wobei zwischen innerer und äußerer AGR unterschieden wird. Bei der inneren AGR werden die Auslassventile während des Ausstoßtakts früher geschlossen, dadurch bleibt mehr Restgas im Zylinder zurück. Bei äußerer AGR wird ein Teil des Abgases aus dem Abgastrakt über ein Ventil in den Ansaugtrakt geleitet. Dazu muss im Abgastrakt ein höherer Druck herrschen als im Ansaugtrakt. Das AGR-Ventil wird vom Motorsteuergerät, abhängig von der aktuellen Motorlast, angesteuert. Das Abgas im Brennraum bewirkt, dass der Druck im Ansaugtrakt steigen muss, um die gewünschte Sauerstoffmenge in den Zylinder zu bekommen. Dadurch sinken die Drosselverluste, der Wirkungsgrad des Motors steigt, und infolge dessen sinkt der Kraftstoffverbrauch. Außerdem bewirkt das rückgeführte Abgas, dass die Maximaltemperatur beim Verbrennen des Luft-Kraftstoff-Gemisches sinkt. Dadurch kann die stark temperaturabhängige Stickoxidbildung verringert werden, was sich vor allem im Magerbetrieb positiv auf die Emissionen auswirkt.

Variabler Ventiltrieb

Im Abschnitt Motorkomponenten wurde bereits auf das Zusammenspiel von Nockenwellen sowie Ein- und Auslassventilen eingegangen, wobei auf einen starren Zusammenhang zwischen Öffnen und Schließen der Ventile und der Nockenwellenposition hingewiesen wurde. Es wäre aber vorteilhaft, das Öffnen und Schließen der Ventile unabhängig, oder zumindest zu einem gewissen Grad unabhängig, von der Nockenwellenposition zu steuern, da dadurch der Wirkungsgrad des Motors stark erhöht und die Emissionen gesenkt werden könnten. Technologien, welche dies ermöglichen, werden als variabler Ventiltrieb bezeichnet. Diese Steuerungsmöglichkeit erlaubt es, über die Ventile den Luftinhalt im Zylinder zu beeinflussen. Es existieren unterschiedliche Realisierungsmöglichkeiten, wobei zwischen diskreten und kontinuierlichen Systemen unterschieden wird.

3.2.2. Kraftstoffsystem

Das Kraftstoffsystem hat die Aufgabe, den Treibstoff vom Tank zum Einspritzventil und in weiterer Folge in den Brennraum zu befördern. Dabei muss der Treibstoff in bestimmter Menge und Druck zur Verfügung gestellt werden. Es werden nun zuerst das System für Saugrohr-Motoren und anschließend jenes für Motoren mit Direkteinspritzung vorgestellt.

Bei Verwendung einer Saugrohreinspritzung wird der Kraftstoff von der Elektrokraftstoffpumpe aus dem Tank angesaugt und über Druckleitungen erst durch den Kraftstofffilter und dann zum Kraftstoffverteiler (Rail) befördert. Der Kraftstoffdruck beträgt üblicherweise zwischen 3 und 4 bar. Die Förderung kann vollfördernd oder bedarfsorientiert erfolgen. Bei der Vollförderung fördert die Kraftstoffpumpe immer die gleiche Menge Treibstoff. Die Rückleitung des überschüssigen Kraftstoffes kann auf zwei Arten erfolgen. Der nicht benötigte Kraftstoff wird vom Rail über Rücklaufleitungen zum Tank geleitet. Dies hat den Nachteil, dass sich der Kraftstoff im Rail und in weiterer Folge im Tank erwärmt und somit verstärkt verdunstet. Vorteilhaft ist aber, dass der Differenzdruck zwischen

Saugrohr und Kraftstoffverteiler, unabhängig von der Motorleistung, konstant gehalten werden kann. Die Kraftstoffdämpfe werden über ein Tankentlüftungssystem in einem Aktivkohlefilter gespeichert und später an das Saugrohr abgegeben. Die andere Art der Rückleitung erfolgt direkt im Kraftstoffbehälter. Hier wird nicht der Druck im Rail konstant gehalten, sondern jener der Kraftstoffleitung. Dadurch kann der Differenzdruck von Saugrohr und Kraftstoffverteiler nicht konstant gehalten werden, der Treibstoff erhitzt sich aber weniger stark und seine Verdunstung wird reduziert. Bei bedarfsgeregelten Systemen wird nur die aktuell benötigte Kraftstoffmenge gefördert. Die Fördermenge wird vom Motorsteuergerät eingestellt und kann je nach Motorbelastung variieren. Bei dieser Art der Regelung kann die Pumpenleistung im zeitlichen Mittel gesenkt werden, was eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs zur Folge hat. Der Kraftstoffdruck kann, in gewissen Grenzen, variabel eingestellt werden, was eine Anpassung an die aktuell benötigte Motorleistung erlaubt.

Bei der Kraftstoffförderung für Motoren mit Direkteinspritzung wird das System in einen Niederdruck- und einen Hochdruckkreislauf unterteilt. Der Niederdruckkreislauf ist hier ähnlich der bedarfsorientierten Förderung, welche zuvor beschrieben wurde. Der Kraftstoffdruck für den Hochdruckkreislauf wird von einer Hochdruckpumpe erzeugt und beträgt üblicherweise zwischen 50 und 200 bar. Von der Hochdruckpumpe gelangt der Treibstoff in das Rail, wo er zwischengespeichert wird, und von dort über die Einspritzventile in den Brennraum. Zur Steuerung des Drucks wird ein Hochdrucksensor benötigt, welcher am Rail angebracht ist. Im Anschluss werden die wichtigsten Komponenten des Kraftstoffsystems näher beschrieben.

Elektrokraftstoffpumpe

Sie stellt dem Motor den benötigten Kraftstoff aus dem Tank zur Verfügung. Übliche Fördermengen liegen zwischen 60 und 300 l/h bei einer Verdichtung von 3 bis 5 bar. Die Pumpe wird auch zur Vorförderung des Treibstoffes für den Niederdruckkreislauf bei Direkteinspritzungssystemen eingesetzt.

Benzinfilter

Der Benzinfilter hat die Aufgabe, Schmutzpartikel aus dem Kraftstoff zu filtern, um das Einspritzsystem vor Partikelerosion zu schützen. Der Filter muss in regelmäßigen Abständen gereinigt oder getauscht werden.

Aktivkohlebehälter und Tankentlüftungsventil

Der Kraftstoff im Tank kann zum Beispiel aufgrund erhöhter Außentemperatur, durch Kraftstoffrücklauf oder durch benachbarte, heiße Bauelemente verdunsten. Diese Abgasdämpfe gelangen über ein Entlüftungssystem aus dem Tank zum Aktivkohlebehälter. Dieser muss regelmäßig regeneriert werden. Dazu wird das Tankentlüftungsventil geöffnet und der Kraftstoffdampf gelangt in das Saugrohr, aus dem er gemeinsam mit der angesaugten Luft in den Brennraum kommt und verbrannt wird.

Kraftstoffverteilerrohr (Rail)

Das Rail dient als Zwischenspeicher für den Kraftstoff und verteilt diesen an die Einspritzventile, außerdem ermöglicht es bei Direkteinspritzung die Reduktion der Druckschwankungen im Hochdruckkreis. Die Menge des Inhaltes hängt von der Bauform und dem Treibstoffdruck ab und kann je nach Betriebspunkt und verwendetem Kraftstoffsystemaufbau variieren. Am Rail ist neben den Einspritzventilen auch ein Drucksensor oder das Rücklaufventil angebracht.

Hochdruckpumpe

Diese ist eine bedarfsgesteuerte Pumpe, welche den Kraftstoffdruck aus dem Niederdruckkreis anhebt und an den Hochdruckkreis abgibt. Angetrieben wird sie von der Nockenwelle, die Fördermenge ist also von der Motordrehzahl abhängig.

3.2.3. Zündsystem

Das Zündsystem muss sicherstellen, dass das Luft-Kraftstoff-Gemisch in der Brennkammer entzündet wird. Es gibt viele verschiedene Zündsysteme, allerdings haben sich bis heute nur zwei in größerem Umfang am Markt etablieren können, die Magnetzündung und die Batteriezündung. Die erste Magnetzündung wurde im Jahr 1902 eingeführt. Dabei wird Bewegungsenergie (entweder dreht sich ein Magnet um einen Anker oder umgekehrt) durch Induktion in elektrische Energie umgewandelt. Bei der Batteriezündung wird die für die Zündung benötigte Energie aus der Autobatterie bezogen und in einer Spule gespeichert. Wird die Versorgung der Spule unterbrochen, entsteht auf der Sekundärseite eine Hochspannung, welche an der Zündkerze zu einem Funken führt. Der Zeitpunkt der Zündung hängt im Wesentlichen von der Motordrehzahl und der Motorlast ab, wird durch Applikation festgelegt und in Tabellen gespeichert. Zur Laufzeit wird der Zündzeitpunkt dann anhand der Tabelleneinträge gewählt. Der Zündzeitpunkt kann auch zur Laufzeit verändert werden. Damit wird eine Reaktion auf schnelle Momentenänderungen, zum Beispiel, wenn die Klimaanlage zugeschaltet wird, möglich, ohne dass der Fahrer dies bemerkt. Da in modernen Fahrzeugen hauptsächlich die Batteriezündung zum Einsatz kommt, werden deren Komponenten nun genauer beschrieben. Weitere Zündsysteme sind die Hochspannungskondensatorzündung, welche im Motorrennsport eingesetzt wird, die Plasmazündung und die Laserzündung.

Zündspule

Die Zündspule erzeugt aus der niedrigen Batteriespannung eine Hochspannung. Die Spule dient sowohl zur Erzeugung der Hochspannung als auch zur Energiespeicherung. Wird die Versorgung der Spule unterbrochen, so wird diese über den Sekundärkreis entladen, dabei entsteht der Zündfunke. Wichtig ist, dass das Gemisch im Brennraum auf alle Fälle entzündet wird, da sonst erhöhte Abgasemissionen entstehen. Die Zündspule muss daher über ihre gesamte Lebensdauer, welche der Fahrzeuglebensdauer entspricht, ausreichend Energie zur Verfügung stellen. Typische Betriebsbedingungen sind:

- Einsatztemperaturbereich von -40°C bis 150°C
- Sekundärspannungen von bis zu 40kV
- Primärstrom bis zu 15A
- Dynamische Beschleunigungen bis zu $50g$

Zündkerze

Die Zündkerze ist in Abschnitt 3.1.1 beschrieben.

3.2.4. Abgassystem

Das Abgassystem ist für die Abgasnachbehandlung zuständig. Bei der Verbrennung von Kraftstoff im Motor entstehen unterschiedliche Emissionen. Bei idealer Verbrennung würden nur Wasserdampf (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2) entstehen. Da die Verbrennung nicht ideal verläuft und der Kraftstoff nicht in reiner Form vorliegt, er kann beispielsweise Schwefel enthalten, entstehen, teils toxische,

Nebenprodukte. Der Ausstoß der, bei der Verbrennung entstehenden, Produkte ist durch die Abgasgesetzgebung geregelt. Diese legt obere Limits für den Ausstoß fest. Möchte ein Fahrzeughersteller ein neues Modell auf den Markt bringen, wird erst überprüft, ob dieses die aktuell gültige Abgasnorm erfüllt.

Die Hauptbestandteile des Abgases sind Stickstoff (N_2), Kohlendioxid, Wasser und Schadstoffe, wobei der prozentuelle Anteil vom Betriebspunkt des Motors abhängt. Bei $\lambda = 1$ besteht das Abgas vor der Abgasnachbehandlung zu etwa 71% aus Stickstoff, zu 14% aus Kohlendioxid, zu 13% aus Wasserdampf und zu jeweils 1% aus Edelgasen und Schadstoffen. Der CO_2 -Ausstoß entspricht dem verbrannten Treibstoff und lässt sich nur durch ein Senken des Treibstoffverbrauches reduzieren. Der, im Treibstoff enthaltene, Wasserstoff wird bei der Verbrennung zu Wasser umgesetzt und dann dampfförmig an die Umwelt abgegeben. Luft besteht zu 78% aus Stickstoff. Dieser gelangt somit beim Ansaugen in die Brennkammer und wird danach wieder abgegeben, er ist an der Leistungserzeugung unbeteiligt.

Die wichtigsten Schadstoffe im Abgas sind Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoff (HC) und Stickoxide (NO_x). Durch Abgasnachbehandlung können diese Schadstoffe bis zu 99% reduziert und in unschädliche Stoffe, wie Wasserstoff oder Stickstoff, umgewandelt werden. Kohlenwasserstoffe entstehen bei unvollständiger Verbrennung eines fetten Luft-Kraftstoff-Gemisches und gelten bei längerer Einwirkung als krebserregend. Stickoxide bilden sich bei der Verbrennung durch Nebenreaktion mit Stickstoff. NO_x kann zu Schleimhautreizungen führen und ist mitverantwortlich für die Bildung von saurem Regen und Smog. Kohlenmonoxid entsteht vor allem, wie Kohlenwasserstoff, bei unvollständiger Verbrennung eines fetten Luft-Kraftstoff-Gemisches, kann aber auch bei mageren Gemischen, dann aber in geringerem Ausmaß, entstehen. Kohlenmonoxid verringert die Sauerstoffaufnahme-fähigkeit des Blutes beim Menschen. Außer diesen Stoffen sind noch Feststoffe, sogenannte Partikel, im Abgas enthalten. Diese entstehen vor allem bei Motoren mit Direkteinspritzung aufgrund des hohen Verdichtungsverhältnisses. Für den Menschen sind Partikel von sehr kleiner Größe, Nanopartikel oder Feinstaub genannt, schädlich. Diese gelangen bis in die Lunge und können dort nur sehr langsam oder gar nicht vom Körper abgebaut werden.

Die Abgasemission kann steuerungstechnisch durch die Wahl des Zündzeitpunktes und des Luftverhältnisses beeinflusst werden. Auch der Fahrer hat großen Einfluss auf die Emissionen durch Wahl von Drehzahl und Motorlast. Da die Einhaltung der Abgasgrenzwerte nicht allein durch motorische Maßnahmen ausreichend gesenkt werden kann, werden im Abgassystem spezielle Bauelemente eingesetzt. Hier sollen der Dreiwegekatalysator und der NO_x -Speicherkatalysator vorgestellt werden.

Dreiwegekatalysator

Der Dreiwegekatalysator verringert die Emission giftiger Stoffe. In ihm werden Kohlenwasserstoff, Kohlenmonoxid und Stickoxide in Wasserdampf, Kohlendioxid und Stickstoff umgewandelt. Für die Oxidation von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoff wird Sauerstoff benötigt, welcher entweder dem Abgas oder den Stickoxiden entnommen wird. Beträgt $\lambda = 1$, werden Kohlenwasserstoff und Kohlenmonoxid vollständig oxidiert. Der benötigte Sauerstoff wird dem Abgas und den Stickoxiden entnommen, letztere werden dadurch reduziert. Die Einhaltung von $\lambda = 1$ ist also zur Verringerung der Abgasemissionen wichtig. Im Katalysator kann Sauerstoff gespeichert und bei Bedarf abgegeben werden, Schwankungen des Luftverhältnisses können somit in gewissen Grenzen ausgeglichen werden. Bei $\lambda < 1$ werden vermehrt Kohlenwasserstoff und Kohlenmonoxid freigesetzt, bei $\lambda > 1$ steigt

die Stickoxidemission. Die Betriebstemperatur des Dreiwegekatalysators liegt zwischen 300 und 600°C. Darunter ist er nicht betriebsfähig und der Schadstoffausstoß wird erhöht, darüber wird die thermische Alterung beschleunigt, was sich auf die Lebensdauer des Bauteils negativ auswirkt.

NO_x-Speicherkatalysator

Der Motorwirkungsgrad kann erhöht werden, indem man den Motor in einer mageren Betriebsart ($\lambda > 1$) betreibt. Um zu verhindern, dass die Stickoxid-Emissionen dadurch ansteigen, wird der NO_x-Speicherkatalysator verbaut. In diesem werden Stickoxide, welche vom Dreiwegekatalysator nicht reduziert wurden, eingelagert. Ist der Speicherkatalysator zu einem bestimmten Grad beladen, wird eine NO_x-Regenerierung eingeleitet. Dazu ist ein Luftverhältnis $\lambda > 1$ erforderlich. Die Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoff Emissionen steigen dadurch und reduzieren die Stickoxide im NO_x-Speicherkatalysator. Die Regenerierung dauert nur wenige Sekunden, die Einlagerungsdauer beträgt zwischen 60 und 90 Sekunden. Neben NO_x wird auch Schwefeldioxid eingelagert, was zu einer Verringerung der Speicherkapazität führt. Dieses wird bei einer normalen Regeneration nicht abgebaut. Ist zu viel Schwefeldioxid eingelagert, wird eine spezielle Regenerierung eingeleitet, bei der die Temperatur des NO_x-Speicherkatalysators von typisch 300-400°C auf über 600°C angehoben und über längere Zeit gehalten wird.

3.3. Motorsteuerung

In diesem Unterkapitel wird eine kurze Einführung in die Motorsteuergeräte-Software gegeben. Anschließend werden einige Features der Steuergeräte-Software und deren Interaktionen beschrieben. Als Quelle für dieses Unterkapitel dienen [9], [8] und [10]. Für weitere Informationen zu den einzelnen Features und zur Motorsteuergeräte-Software sei auf diese Bücher verwiesen.

3.3.1. Allgemein

In einem modernen Fahrzeug werden bis zu 80 Steuergeräte verbaut. Für die Steuerung des Motorsystems ist das Motorsteuergerät zuständig. Das Steuergerät wertet die Signale der Sensoren aus und berechnet daraus die Steuersignale für die Aktuatoren. Ohne elektronische Steuerung wären das Einhalten aktueller Abgasnormen und das Erreichen niedriger Verbrauchswerte nicht möglich. Da eine Fehlfunktion des Motorsteuergerätes schwerwiegende Folgen haben kann (man stelle sich vor, bei hoher Geschwindigkeit fallen der Motor und damit auch Brems- und Lenkkraftverstärker aus) werden hohe Ansprüche an dessen Qualität gestellt. Typischerweise liegt die Lebensdauer des Steuergerätes bei über 15 Jahren und es muss ständig, auch unter widrigen Betriebsbedingungen (extremen Außentemperaturen, EMV-Belastung, chemischer und mechanischer Belastung), einsatzbereit sein und korrekt funktionieren. Eine zentrale Rolle kommt der Motorsteuergeräte-Software zu, welche es erlaubt, verschiedenste Motorfunktionen und neue Technologien zu implementieren und zu kombinieren.

Die statische Ansicht der Softwarearchitektur beinhaltet folgende Software-Komponenten:

- Anwendungssoftware (beinhaltet Steuerungs- und Regelungsfunktionen)
- Anwendungssupervisor (umfasst überwachende und zentrale Software-Funktionen)
- Device Encapsulation (enthält Funktionen zur Auswertung von Sensoren und Ansteuerung von Aktuatoren ohne echtzeitkritische Anforderungen)
- Complex Driver (zuständig für echtzeitkritische Funktionen)

- Basis-Software (enthält hardwarenahe Funktionen)

Die zeitliche Abarbeitung der Software-Funktionen wird während der Entwicklung festgelegt. Viele Regelungen müssen echtzeitfähig sein. Die Reaktion auf ein bestimmtes Ereignis muss also innerhalb einer definierten Maximalzeit erfolgen und abgeschlossen sein. Zum Beispiel müssen die Zündvorgänge im gesamten Drehzahlbereich des Motors exakt erfolgen. Eine Abweichung des Zündzeitpunkts kann zu gesteigertem Verbrauch sowie erhöhter Geräusch- und Abgasemission führen.

Für die Abarbeitung werden den einzelnen Software-Funktionen Interrupts und Prioritäten zugeteilt. Die Interrupts können entweder durch externe Signale, wie dem Kurbelwinkelsignal, oder durch einen intern generierten Zeitraster ausgelöst werden. Ein Interrupt kann einen anderen unterbrechen. Die Entscheidung, ob eine Interrupt-Routine unterbrochen wird, trifft die Prioritätssteuerung, welche die Priorität der einzelnen Funktionen auswertet. Software-Funktionen, welche nicht von externen Ereignissen abhängig sind, wird eine Zeitscheibe zugewiesen. Diese Zeitscheibe legt fest, mit welcher zeitlichen Periodizität sie, zum Beispiel alle 10ms, ausgeführt werden. Um die zeitlichen Anforderungen zu erfüllen, können sich die Funktionen gegenseitig unterbrechen.

3.3.2. System-Features

Im Rahmen dieser Arbeit wurden einige Features der Motorsteuergeräte-Software identifiziert.

Jedes Feature erfüllt bestimmte Aufgaben. Aufgaben können sein: Erhöhung der Sicherheit der Insassen, Kraftstoffeinsparung, Bauteilschutz, Komfort, Emissionsreduktion und Leistungserhöhung. Was unter einem Feature im Rahmen dieser Diplomarbeit verstanden wird, wurde in Unterkapitel 2.1 beschrieben. Die identifizierten Features sollen nun kurz beschrieben werden. In der Motorsteuergeräte-Software existieren weit mehr als die hier angeführten, alle zu beschreiben würde aber den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Im Anschluss an die Beschreibung werden die Wechselwirkungen der Features nur aus physikalischer Sicht diskutiert.

Start/Stopp

Bei fast jeder Autofahrt treten Haltezeiten, zum Beispiel bei Bahnübergängen oder an roten Ampeln, auf. Während dieser Haltezeiten läuft der Verbrennungsmotor im Leerlauf und verbraucht Kraftstoff. Das Feature Start/Stopp ermöglicht es, den Motor in solchen Situationen abzustellen und so den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen zu senken. Die Fahrzeughersteller verwenden verschiedene Strategien zur Steuerung dieses Features. Einige Grundlagen sind aber weitgehend ident. Die Aktivierung des Features ist nur möglich, wenn das Fahrzeug steht, der Batterieladezustand über und der Stromverbrauch des Fahrzeuges unter einem gewissen Limit liegen. Dies soll verhindern, dass die Batterie zu tief entladen wird, was sich einerseits negativ auf ihre Lebensdauer auswirkt und andererseits dazu führen könnte, dass der Motor nach dem Abstellen nicht mehr gestartet werden kann. Für die Abgasnachbehandlung ist eine bestimmte Betriebstemperatur erforderlich, unterhalb welcher die Abgase nicht richtig gefiltert werden können. Start/Stopp ist also nur dann möglich, wenn die Motor- und die Abgastrakttemperatur über einer bestimmten Schwelle liegen. Die Kontrolle, ob Start/Stopp tatsächlich aktiv werden darf, liegt beim Fahrer. Bei Fahrzeugen mit manueller Gangschaltung kann das Feature nur aktiv werden, wenn der Fahrer den Leerlauf einlegt und die Kupplung loslässt. Durch erneutes Betätigen des Kupplungspedals wird Start/Stopp wieder deaktiviert. Bei Fahrzeugen mit automatischer Gangschaltung wird das Feature durch Betätigen und Halten des

Bremspedals aktiviert. Wird das Bremspedal losgelassen, so startet der Motor wieder. In beiden Fällen signalisiert der Fahrer, dass er das Feature nutzen möchte, es wird aber nur dann aktiviert, wenn die oben genannten Bedingungen erfüllt sind. Ist Start/Stop aktiv (Motor steht) und wird eine der oben genannten Bedingungen nicht mehr erfüllt, so wird der Motor, ohne Beeinflussung des Fahrers, wieder gestartet.

Segeln

Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Start/Stop Systems, die Bedingungen für die Aktivierung sind ähnlich. Durch Fahrerwunsch kann der Verbrennungsmotor während der Fahrt deaktiviert und aktiviert werden. Die Funktion von Segeln soll anhand eines kleinen Beispiels erklärt werden.

Wir fahren mit einem Fahrzeug ohne Segeln auf der Freilandstraße mit Tempo 100km/h, und in Kürze erreichen wir ein Ortsgebiet mit erlaubtem Tempo 50km/h. Ohne Segeln würden wir rechtzeitig vom Gaspedal gehen und das Fahrzeug ausrollen lassen, um beim Einfahren in das Ortsgebiet das Tempolimit nicht zu überschreiten. Der Spritverbrauch und die Emissionen sind während des Ausrollens sehr gering, der Motor müsste aber weiter angetrieben werden, was zu einer Bremswirkung (Motorbremse) führt. Segeln ermöglicht es, den Motor abzustellen und auszukuppeln. Das Fahrzeug wird also beim Ausrollen nicht durch die Motorbremse verlangsamt. Dadurch können die Strecke des Ausrollens vergrößert und somit die Abgasemissionen und der Verbrauch reduziert werden. Bei Fahrzeugen mit Hybridantrieb ist Segeln bereits weit verbreitet, es kann aber auch bei solchen mit konventionellem Antrieb eingesetzt werden. Die Kraftstoffersparnis kann in Abhängigkeit vom Fahrstil und der Strecke bis zu 10% betragen.

Halbmotorbetrieb (HMB)

Der Kraftstoffverbrauch eines Ottomotors kann bei niedrigen Motordrehmomenten und geringem Verdichtungsverhältnis im Zylinder bis zu doppelt so hoch sein wie bei hohen Verdichtungsverhältnissen. Dieser Nachteil kommt durch niedrige Gasströmungsgeschwindigkeiten und hohe Drossel- und Wärmeverluste zustande. Vor allem bei Motoren mit großem Hubraum wird meist nur ein kleiner Teil der Maximalleistung vom Motor angefordert. Die Idee des Halbmotorbetriebs ist es, die Hälfte der Zylinder, bei 12 Zylindern 6, bei 8 Zylindern 4, abzuschalten. Die Last pro Zylinder wird dadurch erhöht, die Drosselverluste werden verringert, jedoch sinkt auch die maximale Leistung des Motors. Die Ein- und Auslassventile der abgeschalteten Zylinder müssen, wenn HMB aktiv ist, immer geschlossen sein, was eine variable Ventilsteuerung erfordert. Die Umschaltung von Vollmotorbetrieb (VMB) in HMB und zurück verlangt den Einsatz von Regelalgorithmen, um keine Komforteinbußen, etwa durch sprungartige Momentenänderungen, zu verursachen. Der Einsatz des Features ermöglicht eine Kraftstoffeinsparung von bis zu 20% (siehe dazu [10] S. 204).

Abgasturbolader (ATL)

Die Funktion des ATL ist in Abschnitt 3.2.1 erklärt. Unter dem Feature versteht man die Softwarefunktion, welche ihn ansteuert.

Miller / Atkinson

Unter dem Miller-Verfahren versteht man ein frühes Schließen der Einlassventile im Ansaugtakt. Die Ventile werden also geschlossen, noch bevor der Kolben den unteren Totpunkt erreicht hat. Dadurch expandiert das Gas im Zylinder und kühlt diesen. Schaltet man nun von Normalbetrieb auf das Miller-

Verfahren um und fordert das gleiche Moment vom Motor, so muss dieselbe Gasmenge wie zuvor im Zylinder enthalten sein. Aufgrund der verkürzten Ansaugzeit muss das Gas schneller in den Zylinder einströmen. Dies führt zu einer Entdrosselung und somit zu einem besseren Wirkungsgrad des Motors.

Beim Atkinson-Verfahren werden die Einlassventile später, wenn der Kolben den unteren Totpunkt bereits überschritten hat, geschlossen. Dadurch strömt ein Teil des bereits in den Zylinder gesaugten Gases wieder in den Ansaugtrakt zurück, hier entfällt also der kühlende Effekt des Miller-Verfahrens. Die Gasmenge im Zylinder muss dabei genauso hoch sein wie im Normalbetrieb. Das Gas muss also schneller in den Zylinder einströmen. Auch dieses Verfahren führt zu einer Entdrosselung des Motors.

Beide Verfahren erfordern den Einsatz von variablem Ventiltrieb, um die Umschaltung des Betriebs zu realisieren.

Abgasrückführung (AGR)

Die Funktion der AGR ist in Abschnitt 3.2.1 erklärt. Unter dem Feature versteht man dessen Ansteuerung. Das Feature kann selbst entscheiden, welche Methode zur Abgasrückführung (innere oder äußere Methode oder beide) eingesetzt wird.

Hybridantrieb

Ein Antriebssystem, welches aus einem Verbrennungsmotor und mindestens einem Elektromotor besteht, wird als Hybridantrieb bezeichnet. Der Einsatz ermöglicht eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen sowie eine Erhöhung der Leistung. Der Verbrennungsmotor kann kleiner ausgeführt werden, da er nur einen Teil der maximalen Antriebsleistung erbringen muss und im Bereich seines besten Wirkungsgrades betrieben werden kann. Als Energiespeicher für den elektrischen Antrieb dient eine Batterie. Diese kann über den Verbrennungsmotor, durch Rückgewinnung der Bremsenergie oder durch Anschluss an das Stromnetz geladen werden. Unter dem Feature „Hybridantrieb“ versteht man jene Softwarefunktionalität, welche das geforderte Moment auf Verbrennungs- und Elektromotor aufteilt und das Laden und Entladen der Batterie steuert. Es existieren viele unterschiedliche Strategien, wie die beiden Motoren zusammenarbeiten können. Das Fahrzeug kann auch rein elektrisch betrieben werden. Dabei wird der Verbrennungsmotor abgeschaltet und ausgekuppelt, die Energie für den Antrieb und für die elektrischen Verbraucher wird von der Batterie geliefert. Die benötigte Leistung kann auch von beiden Motoren gemeinsam bereitgestellt werden. Der Verbrennungsmotor kann hier als Generator dient zur Ladung der Batterie, er gibt also mehr Leistung ab als für den Antrieb gefordert. Er kann aber auch weniger als die geforderte Leistung liefern, die Differenz wird dann vom Elektroantrieb bereitgestellt, wodurch die Batterie entladen wird. Fahrzeuge mit Hybridantrieb sind bereits weit verbreitet. Im Vergleich zu einem rein kalorischen Antrieb ermöglicht der Einsatz eines Hybridantriebs eine starke Reduktion des Kraftstoffverbrauchs.

Intelligente Generatorregelung

Die Energie für die elektrischen Verbraucher eines Fahrzeuges wird von der sogenannten Lichtmaschine, einem elektrischen Generator, bereitgestellt, welche vom Verbrennungsmotor angetrieben wird. Die Lichtmaschine fordert also vom Motor ein bestimmtes Drehmoment an. Die intelligente Generatorregelung ermöglicht es, das von der Lichtmaschine geforderte Moment zu reduzieren. Die

dadurch entstehende elektrische Energiedifferenz aus benötigter Energie der Verbraucher und von der Lichtmaschine bereitgestellt wird dann von der Autobatterie geliefert, welche in günstigen Betriebspunkten, wie Schubtrieb (Gang ist eingelegt, Fahrzeug wird nicht beschleunigt) oder durch Bremsenergieerückgewinnung, geladen werden kann. Der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors kann also in gewissen Grenzen erhöht und der Kraftstoffverbrauch somit reduziert werden. Vor allem im unteren, wirkungsgrad- und leistungsschwachen Drehzahlbereich wirkt sich das Feature positiv aus.

Schichtbetrieb

Wird bei der Direkteinspritzung des Kraftstoffes eine Schichtwolke erzeugt, so spricht man von Schichtbetrieb. Dieser ist nur bei kleinen Motorlasten und Drehzahlen möglich. Der Kraftstoff wird während des Verdichtungsaktes in den Brennraum eingespritzt. Dadurch soll eine Schichtwolke mit fettem Gemisch erzeugt werden, welche von einem mageren, nicht zündfähigen Gemisch umgeben ist. Gemittelt über den gesamten Brennraum liegt ein mageres Gemisch vor. Im Schichtbetrieb werden die Drossel- und thermischen Verluste verringert, was zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades führt. Die Schichtwolke ist in Abbildung 3.3 als helle Wolke im Brennraum dargestellt. Die Zündkerze befindet sich sehr nahe am Einspritzventil, damit das Gemisch sicher gezündet wird.

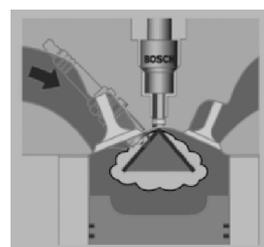


Abbildung 3.3 Kraftstoffwolke bei Schichtbetrieb [Kopie aus [8] S. 117]

KAT-Heizen

Die Funktion des Dreiwegekatalysators wurde bereits erklärt. Dabei wurde auch erwähnt, dass er, um die Abgase zu filtern, eine gewisse Betriebstemperatur haben muss, die bei etwa 300°C – 600°C liegt. Da die Schadstoffmission möglichst gering sein soll, muss der Katalysator schnell auf die notwendige Temperatur aufgeheizt und auf dieser gehalten werden. Diese Aufgabe erfüllt das Feature KAT-Heizen. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, um den KAT schnell aufzuheizen. Durch einen späteren Zündzeitpunkt wird der Wirkungsgrad des Motors verschlechtert, die Einspritzmenge und somit auch die Abgastemperatur aber erhöht. Durch Verringerung der Abgasrückführrate kann die Temperatur ebenfalls erhöht werden, da mehr heißes Abgas zum Heizen zur Verfügung steht und die Brenntemperatur des Luft-Kraftstoff-Gemisches mit rückgeführtem Abgas sinkt. Durch früheres Öffnen des Auslassventils kann ein Teil der Verbrennung in den Abgastrakt wirken und diesen dadurch aufheizen, allerdings erfordert dies variablen Ventiltrieb. Im Leerlauf wird die Leerlaufdrehzahl erhöht, was den Abgasmassenstrom erhöht und so das Abgassystem stärker aufheizt.

NO_x-Speicherkatalysator Regenerieren (NO_x-KAT)

Die Funktion des NO_x-Speicherkatalysators ist in Abschnitt 3.2.4 beschrieben. Das Feature NO_x-Speicherkatalysator Regenerieren hat die Aufgabe, den Füllstand des Katalysators zu überwachen und gegebenenfalls eine Regeneration einzuleiten. Würde man ihn nicht regenerieren, so verschlechtert sich ab einem bestimmten Füllstand die weitere NO_x Aufnahme. Die Aufnahme aller Stickoxide ist also nicht mehr möglich, die überschüssigen werden ungefiltert an die Umgebung abgegeben.

Rußpartikelfilter Regenerieren (PFLT-Regenerieren)

Die Partikelemission ist bei Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung sehr gering und bedarf keiner weiteren Nachbehandlung. Durch den Einsatz von Motoren mit Direkteinspritzung wird diese aber erforderlich. Ursache für die Entstehung der Partikel ist die unzureichende Kraftstoffzerstäubung beim Einspritzen des Kraftstoffes in den Brennraum und die damit verbundene unvollständige

Verbrennung des Gemisches. Erreicht der Füllstand des Filters ein bestimmtes Niveau, muss er regeneriert werden. Dazu wird die Temperatur im Abgastrakt erhöht. Anders als der Dieselmotor erreicht der Ottomotor die notwendige Temperatur auch im normalen Fahrbetrieb, es können aber Fahrsituationen auftreten, in denen eine Regeneration von selbst nicht möglich ist und daher vom Steuergerät eingeleitet werden muss. Das Feature *Rußpartikelfilter Regenerieren* hat die Aufgabe, den Füllstand zu überwachen und gegebenenfalls eine Regeneration einzuleiten. Weitere Informationen über Anwendung und Funktion des Partikelfilters sind in [11] zu finden.

Unterdruck Bereitstellen

Zur Unterstützung des Fahrers beim Bremsen kommt ein Bremskraftverstärker (BKV) zum Einsatz. Dieser benötigt für eine korrekte Funktion einen Unterdruck (im Vergleich zum Atmosphärendruck), welcher beim Bremsen verbraucht wird. Der benötigte Unterdruck wird im Ansaugtrakt nach der Drosselklappe durch Schließen derselben erzeugt. Dieses Feature hat sehr hohe Priorität und muss immer richtig funktionieren, da ein Ausfall des Bremskraftverstärkers aus Sicherheitsgründen sehr kritisch ist. Es hat die Aufgabe, den für den BKV notwendigen Unterdruck durch entsprechende Ansteuerung der Drosselklappe bereitzustellen.

Scavenging

Dieses Feature wird bei Motoren mit Direkteinspritzung und ATL verwendet. Nach dem Ausstoßtakt bleibt ein geringer Anteil des Abgases im Brennraum zurück. Dieses Gas kann durch gleichzeitiges Öffnen der Ein- und Auslassventile in den Abgastrakt befördert werden. Der Zylinder ist dann zu einem höheren Anteil mit Frischluft gefüllt als normal. Der Einsatz von Scavenging bewirkt ein besseres Ansprechen des Turboladers im unteren Drehzahlbereich und somit eine Leistungssteigerung. Außerdem fördert dieses Feature die Nachverbrennung der Abgase, was zu besseren Abgaswerten führt. Erforderlich für den Einsatz ist variabler Ventiltrieb.

Externe Eingriffe

Darunter sind Momenteneingriffe zu verstehen, welche nicht vom Motorsteuergerät oder vom Fahrer verursacht werden, zum Beispiel Getriebe- und ESP-Eingriffe. Das Feature *externe Eingriffe* sorgt dafür, dass diese richtig berücksichtigt werden und in das Moment, welches vom Motor gefordert wird, entsprechend eingehen.

Fahrbarkeitsfilter

Durch dieses Feature wird das Wunschmoment des Fahrers gefiltert. Dies verhindert einen Ruck des Fahrzeuges bei Lastwechsel (wenn der Fahrer das Gaspedal betätigt und das Fahrzeug vom Schubbetrieb in den Beschleunigungsbetrieb wechselt). Es wird langsam eine Momentenreserve durch Spätverstellen des Zündwinkels aufgebaut, gleichzeitig steigt der Luftdruck im Ansaugtrakt. Dies ist erforderlich, da das Luftsystem sehr viel träger ist als das Zündsystem und auf sprunghafte Momentenänderungen nicht schnell genug reagieren kann. Der Zündwinkel wird dann in Einklang mit dem zusätzlichen Moment nach früh verstellt.

Tempomat / ACC / Limiter

Der Tempomat ermöglicht es dem Fahrer, eine gewünschte Geschwindigkeit einzustellen, welche dann vom Fahrzeug automatisch angefahren und gehalten wird. Je nach Fahrzeughersteller gibt es bestimmte Bedingungen, wann er aktiv werden darf und wann nicht. Dies kann beispielsweise eine Mindest- oder Maximalgeschwindigkeit sein oder eine Freigabe ab einem bestimmten Gang.

Durch den Limiter kann der Fahrer eine Maximalgeschwindigkeit einstellen, welche er nicht überschreiten möchte, zum Beispiel 50km/h im Ortsgebiet. Die Geschwindigkeit wird nach wie vor vom Fahrer über das Gaspedal gesteuert, ab dem eingestellten Wert wird aber das Moment begrenzt. Betätigt der Fahrer das Gaspedal sehr stark, kann die Momentenbegrenzung aufgehoben und die eingestellte Maximalgeschwindigkeit überschritten werden.

Genau wie der Tempomat und der Limiter dient die ACC (Adaptive Cruise Control) dem Fahrkomfort. Wie beim Tempomat wird die gewünschte Fahrgeschwindigkeit eingestellt, welche das Fahrzeug anfahren und halten soll. Die ACC verfügt über einen Radarsensor, mit Hilfe dessen andere Fahrzeuge erkannt werden können. Dadurch kann das Fahrzeug selbstständig die eigene Geschwindigkeit drosseln, falls ein langsames Fahrzeug vor einem erkannt wird, und diesem, in einem bestimmten Abstand, folgen. Verschwindet das langsamere Fahrzeug, wird wieder automatisch auf die eingestellte Geschwindigkeit beschleunigt.

Vorausschauendes Fahren (VF)

Vorausschauendes Fahren ist eine sehr neue Entwicklung. Es stellt kein Feature im Sinne dieser Arbeit dar. Da die Funktionalität aber in der prototypischen Umsetzung verwendet wurde, wird sie hier beschrieben. Die Aufgabe von VF besteht darin, anderen Features Informationen zu liefern, es hat keine direkte Auswirkung auf eine Technologie. Die Erwartungen an diese Funktionalität sind sehr hoch und sie ermöglicht viele Neuerungen. VF soll anderen Features die Möglichkeit bieten, einen Blick in die wahrscheinliche Zukunft der Streckengegebenheiten, maximale Geschwindigkeit und Streckenprofil, zu werfen. Verschiedene Informationsquellen stehen dem Feature zur Verfügung. Es könnte die Informationen über ein eingebautes Navigationssystem und das darin enthaltene Kartenmaterial, durch Kommunikation mit anderen Fahrzeugen, durch Verkehrsfunk, Erkennen von Verkehrsschildern oder aufgezeichnete Strecken, zum Beispiel den täglichen Weg zur Arbeit, erhalten. Ein Fahrzeug mit Hybridantrieb könnte auf diesen Informationen basierend entscheiden, wann die Batterie geladen oder wann rein elektrisch gefahren werden soll. Zusätzliche Informationen über VF sind in [12] zu finden.

Feature-Übersicht

Features \ Aufgaben	Verbrauch reduzieren	Emission reduzieren	Sicherheit gewährleisten	Motorleistung erhöhen	Komfort steigern
Start/Stopp	■				
Segeln	■				
Halbmotorbetrieb	■				
Abgasturbolader					
Miller / Atkinson					
Abgasrückführung					
Hybrid					
intelligente Generatorregelung					
Schichtbetrieb					
Kat-Heizen		■			
NO _x -Speicherkatalysator		■			
Regenerieren		■			
Rußpartikelfilter Regenerieren		■			
Unterdruck Bereitstellung			■		
Scavenging			■		
Externe Eingriffe				■	
Fahrbarkeitsfilter					■
Tempomat / ACC / Limiter					■
Vorausschauendes Fahren					■

Tabelle 3.1 Übersicht der Features und deren Hauptaufgabe

Tabelle 3.1 zeigt die oben beschriebenen Features und deren jeweilige Hauptaufgabe. Jeder Funktionalität ist genau eine zugeordnet, manche erfüllen aber auch noch Nebenaufgaben. Bei Erfüllung ihrer Aufgaben können sie aber in Wechselwirkung mit anderen Features stehen. Sie können also bewirken, dass ein anderes Feature in seiner Aufgabenbewältigung gefördert oder behindert wird.

3.3.3. Feature-Interaktionen

Die Interaktionen oder Wechselwirkungen der Features miteinander sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Diese werden eingeteilt in:

- keine Interaktion
- positive Beeinflussung (der Gesamtnutzen der Features in Kombination steigt, wenn beide aktiv sind)
- negative Interaktion (Features unterbinden sich gegenseitig oder haben negative Auswirkungen aufeinander)
- keine eindeutige Beeinflussung (es können sowohl negative als auch positive Beeinflussungen bestehen, welche aber je nach Betriebszustand variieren)
- irrelevante oder neutrale Interaktion (Features interagieren miteinander, die Auswirkung ist aber vernachlässigbar)

Die hier beschriebenen Feature-Interaktionen basieren auf Überlegungen, in denen das physikalische Verhalten der Features berücksichtigt wurde. Es können außer den durch diese Überlegungen gefundenen, hier angeführten Interaktionen auch weitere zwischen den Features bestehen.

Die Wechselwirkungen der Features sind kommutativ. Um sie nicht wiederholen zu müssen, sind pro Feature nur die Interaktionen in der jeweils nebenstehenden Zeile (beginnend mit der untersten von Tabelle 3.2) beschrieben.

Start/Stopp

Gemeinsam mit Hybrid kommt Start/Stopp häufig zum Einsatz. Sind die Verbraucher elektrifiziert, so ist der Betrieb des Motors weniger oft erforderlich, da sie über die Batterie versorgt werden können. Die Batterie verfügt bei einem Fahrzeug mit Hybridantrieb über eine größere Kapazität als eine herkömmliche Autobatterie.

Da bei Motorstillstand der Motor und das Abgassystem auskühlen, bestehen negative Wechselwirkungen mit den Features *KAT-Heizen*, *NO_x-KAT Regenerieren* und *PFLT-Regenerieren*. Möchte man den Dreiwegekatalysator möglichst schnell auf Betriebstemperatur bringen, um den Schadstoffausstoß zu verringern, so wird Kat-Heizen aktiv. Start/Stopp würde diesen Aufheizvorgang verzögern. Für das Regenerieren des NO_x-KAT und des PFLT sind höhere Abgastemperaturen erforderlich. Während des Aufheizens und dem Halten der Temperatur für einen Regenerationsvorgang wirkt sich Start/Stopp also negativ auf die genannten Features aus.

Segeln

Da das Feature Segeln eine Weiterentwicklung von Start/Stopp ist, sind die Wechselwirkungen mit den anderen Features weitgehend ident. Zusätzlich bewirkt Segeln, dass HMB oder Schichtbetrieb unterbrochen wird. Da durch Segeln aber mehr CO₂ eingespart werden kann als in den genannten Betriebszuständen (Wenn es länger durchgehend aktiv ist, häufiges Starten und Abstellen des Motors

Durch gemeinsamen Einsatz mit intelligenter Generatorregelung kann das geforderte Motormoment reduziert und HMB so länger aktiv sein.

Bei aktivem HMB sinkt der Abgasmassenstrom leicht ab. Dadurch sinkt die Temperatur im Abgasstrakt, was ein Aufheizen des KAT verzögert. Auch die für die Regeneration von PFLT und NO_x -KAT benötigte Temperatur ist so unter Umständen nicht oder erst nach längerer Zeit erreichbar. Bei Motoren mit 6 und mehr Zylindern kann der Abgastrakt zweiflutig ausgelegt sein, es existieren dann also zwei Katalysatoren, in jedem Trakt einer. Wird HMB aktiviert, bewirkt dies, dass kein frisches Abgas durch einen gesamten Trakt strömt. Es besteht nun die Gefahr, dass sich die Komponenten so stark abkühlen, dass diese beim Wechsel in den VMB nicht betriebsbereit sind und die Schadstoffemission dadurch ansteigt.

HMB bewirkt eine Entdrosselung, was zu einem höheren Luftdruck im Ansaugtrakt führt. Es wird mehr Zeit benötigt um diesen abzubauen und den notwendigen Unterdruck für das Feature Unterdruck Bereitstellen zur Verfügung zu stellen.

Eine interessante Interaktion besteht mit ACC. ACC fordert vom Motor ein bestimmtes Moment an. Ist dieses höher als jenes, das HMB bereitstellen kann, so ist ein Wechsel vom kraftstoff-effizienten HMB zu VMB erforderlich. Ist das von ACC geforderte Moment während der Beschleunigung des Fahrzeuges geringfügig zu hoch um in HMB bereitgestellt zu werden, so könnte man dieses leicht reduzieren. Die Beschleunigungsphase würde zwar verlängert werden, HMB könnte aber länger aktiv sein, wodurch der Kraftstoffverbrauch verringert wird.

Abgasturbolader

Durch den Turbolader wird der Druck im Ansaugtrakt erhöht. In Verbindung mit dem Miller-Verfahren kann die Brennraumtemperatur verringert werden. In Kombination mit einem früheren Zündzeitpunkt ist eine Kraftstoffeinsparung möglich.

AGR und ATL stehen in starker Wechselwirkung miteinander. Das Abgas kann nur dann rückgeführt werden, wenn der Gasdruck im Ansaugtrakt niedriger als im Abgastrakt ist. Der Druck im Ansaugtrakt wird vom ATL stark beeinflusst. Durch die AGR wird dem Turbolader ein Teil des Abgasmassenstromes entzogen, umso mehr Abgas rückgeführt wird, desto weniger stark wirkt er. Gemeinsam haben sie aber das Potential, den Kraftstoffverbrauch sowie die Emissionen zu senken.

Der höhere Druck im Ansaugtrakt bewirkt, dass Schichtbetrieb in einem größeren Drehzahlbereich einsetzbar ist. Andererseits bewirkt er auch, dass es länger dauert, bis der Druck abgebaut werden kann und der nötige Unterdruck für das Feature Unterdruck Bereitstellen verfügbar ist.

Miller / Atkinson

Durch gleichzeitigen Einsatz von Miller oder Atkinson mit AGR werden die positiven Auswirkungen der Features kombiniert. Vorsicht gilt aber beim Atkinson-Verfahren, da dadurch im Brennraum nicht ausgestoßenes Abgas in den Ansaugtrakt gelangen kann, was die Abgasrückführrate und die Gas-temperatur im Ansaugtrakt erhöht.

Die Abgastemperatur wird durch das Miller-Verfahren verringert. Dadurch besteht die Möglichkeit, den Zündwinkel früher zu stellen was zu einer geringeren Aufwärmung des Abgassystems führt. Dies

kann sich unter Umständen negativ auf KAT-Heizen, PFLT-Regenerieren und NO_x-KAT Regenerieren auswirken.

Der Einsatz von Miller oder Atkinson führt zu einer Entdrosselung, was sich negativ auf das Feature Unterdruck Bereitstellen auswirkt.

Es können auch Interaktionen durch gleichzeitigen Einsatz mit Scavening auftreten, da beide die Ventilöffnungszeiten beeinflussen. Ein gleichzeitiges Aktivsein der Features ist also nicht oder nur bedingt möglich.

Abgasrückführung

Das rückgeführte Abgas bewirkt, dass das Gemisch im Brennraum zündunwilliger wird. Dies wirkt sich positiv auf den Schichtbetrieb aus. Bei diesem möchte man nur die Schichtwolke zünden, das restliche Gas soll nicht entfacht werden.

AGR bewirkt, dass die Abgastemperatur sinkt, was sich negativ auf KAT-Heizen und PFLT-Regenerieren auswirkt. Die niedrigere Temperatur wirkt sich auch beim Regenerieren des NO_x-KAT aus, allerdings entsteht durch die kühlere Verbrennung auch weniger NO_x.

Das Ziel von Scavening ist, das Abgas aus dem Brennraum möglichst vollständig zu entfernen. Ein gemeinsamer Einsatz mit AGR ist daher nicht möglich.

Hybrid

Das Feature Hybrid kann sich, wenn man die Momentenaufteilung zwischen Verbrennungs- und Elektromotor gut regelt, auf viele Features positiv auswirken. Lädt man über den Verbrennungsmotor die Batterie auf, wird von diesem ein höheres Moment gefordert. Dadurch erwärmt sich der Abgastrakt stärker, was sich positiv auf das Erwärmen der Komponenten in ihm auswirkt. Generell kann der Elektromotor viel schneller auf Momentenänderungen reagieren als der Ottomotor, was sich positiv auf externe Eingriffe und Fahrbarkeitsfilter auswirkt. Eine negative Interaktion besteht mit dem Feature Unterdruck Bereitstellen, da bei rein Elektrischem Fahren dieser nicht erzeugt werden kann. In diesem Fall muss man den Unterdruck über eine Vakuumpumpe erzeugen.

Der Einsatzbereich von Schichtbetrieb kann sich durch das Feature Hybrid vergrößern, weil der Betrieb des Verbrennungsmotors in einem größeren Bereich mit konstanter Drehzahl möglich ist. Schnelle Änderungen der Momentenanforderung können vom Elektromotor ausgeglichen werden.

Intelligente Generatorregelung

Durch das Feature Intelligente Generatorregelung kann, wenn der Batterieladestatus gering ist, diese geladen werden. Dadurch steigt das vom Motor geforderte Moment, der Abgasmassenstrom wird größer und die Abgastemperatur erhöht. Durch Geringfügigkeit dieses Effekts, ist die Auswirkung auf KAT-Heizen und die Regeneration von PFLT und NO_x-KAT nahezu irrelevant.

Scavening wird dann eingesetzt, wenn vom Verbrennungsmotor ein hohes Moment gefordert wird. Durch das Feature Intelligente Generatorregelung können die Verbraucher von der Batterie betrieben werden, was die für den Antrieb zur Verfügung stehende Motorleistung, wenn auch nur für begrenzte Zeit, erhöht.

Schichtbetrieb

Der Schichtbetrieb bewirkt ein Sinken der Abgas- und der Motortemperatur. Er wirkt sich also negativ auf das Regenerieren des NO_x-KAT und des PFLT aus. Dieselbe Wirkung entsteht für KAT-Heizen, da die Aufheizphase verlängert wird.

Da im Schichtbetrieb der Motor nur einen Teil des möglichen Moments bereitstellen kann, besteht die gleiche Interaktion mit der ACC wie beim HMB.

KAT-Heizen

Für das Regenerieren des NO_x-KAT und des Rußpartikelfilters sind hohe Temperaturen im Abgastrakt erforderlich. KAT-Heizen hebt die Temperatur im Abgastrakt ebenfalls an und könnte beim Aufheizen unterstützen.

Eine Möglichkeit, den KAT schnell aufzuheizen, besteht darin, den Zündwinkel nach spät zu verstellen. Ein externer Eingriff kann allerdings bewirken, dass der Zündwinkel nach früh gestellt werden muss, um auf eine Momentenänderung zu reagieren. Dies wirkt sich negativ auf KAT-Heizen aus.

NO_x-Speicherkatalysator Regenerieren

Mit dem Regenerieren des Partikelfilters besteht sowohl eine positive, als auch eine negative Interaktion. Beide Filter benötigen dazu eine hohe Temperatur, jedoch ist für das Umwandeln der NO_x ein fetter, für das Abbrennen der Partikel ein magerer Betrieb erforderlich. Beides ist daher nicht gleichzeitig möglich.

Scavenging

Durch den Einsatz von Scavenging wird der Abgasmassenstrom erhöht. Dadurch verbessert sich das Ansprechverhalten des Turboladers bei geringen Motordrehzahlen. Durch das bessere Ansprechen des ATL steigt der Druck im Ansaugtrakt, was sich negativ auf Unterdruck Bereitstellen auswirkt.

Externe Eingriffe

Das Feature Externe Eingriffe (berücksichtigt zum Beispiel ESP und Getriebeeingriffe) hebt das Feature Fahrbarkeitsfilter aus. Diese Eingriffe werden am Filter vorbei berücksichtigt, da sie höchste Priorität haben.

Abschlussbemerkungen

Wie die oben beschriebenen Interaktionen zeigen, bestehen Wechselwirkungen zumeist, in den hier angeführten Fällen ausschließlich, zwischen zwei Features, was auch schon im allgemeinen Teil über Feature-Interaktionen beschrieben wurde. Wie eingangs erwähnt, basieren die hier beschriebenen Wechselwirkungen auf Überlegungen, welche die physikalischen Auswirkungen der Features als Grundlage haben. Sehr wahrscheinlich existieren also noch weitere Interaktionen zwischen den Features, welche noch nicht bekannt und somit hier nicht angeführt sind.

4. Methoden zur Koordinierung von Feature-Interaktionen

In diesem Kapitel sind einige Möglichkeiten aus der Literatur beschrieben, wie man Feature-Interaktionen koordinieren kann.

4.1. Kontrollmodell für Feature-Interaktionen

In [13] wird eine Methode zur Steuerung von nichtfunktionalen Feature-Interaktionen vorgestellt. Unter nichtfunktionalen Feature-Interaktionen kann man sich Wechselwirkungen vorstellen, die zu einem zu hohen Stromverbrauch oder zu einer zu großen Rechenlast des Prozessors führen können.

Die Methode basiert auf einer Systemarchitektur die in Ebenen, ähnlich dem OSI-Modell, aufgebaut ist. Der untersten Ebene sind Hardware-Komponenten wie Sensoren und Aktuatoren zugeordnet. In der mittleren Ebene befinden sich Software-Komponenten. Diese stellen die Funktionalität der Features dar und können auf die Hardware-Komponenten Einfluss nehmen. Die oberste Ebene steuert die nichtfunktionalen Feature-Interaktionen der Software-Komponenten.

Das Verhalten jedes Features wird durch einen Zustandsautomaten dargestellt. Zusätzlich werden die möglichen Systemzustände und ihre Übergänge durch Zustandsdiagramme abgebildet. Finden nun mehrere Features in einer Software Anwendung, so werden die einzelnen Zustandsautomaten miteinander verbunden und zu einem zusammengefasst. Das Ergebnis dient zur Steuerung der einzelnen Features und deren Interaktionen.

Die Methode wird nun anhand eines Beispiels genauer erklärt. In einem Fahrzeug seien zwei Features, ein Parkassistent und ein eingebautes Navigationssystem, vorhanden. Eine mögliche Feature-Interaktion besteht darin, dass die Rechenleistung des Steuergerätes nicht ausreicht, um den Parkassistenten auszuführen und gleichzeitig mit dem Navigationssystem eine neue Route zu berechnen. Ein gleichzeitiges Ausführen könnte dazu führen, dass der Parkassistent nicht richtig funktioniert und dadurch ein Unfall verursacht wird. Zusätzlich sollen zwei Modi für den Betrieb unterschieden werden, einer für Normalbetrieb und ein Energiesparmodus (wenn der Motor inaktiv, die Fahrzeugelektronik aber aktiv ist). In Abbildung 4.1 sind die Zustandsdiagramme der Features und die möglichen Betriebsarten dargestellt.

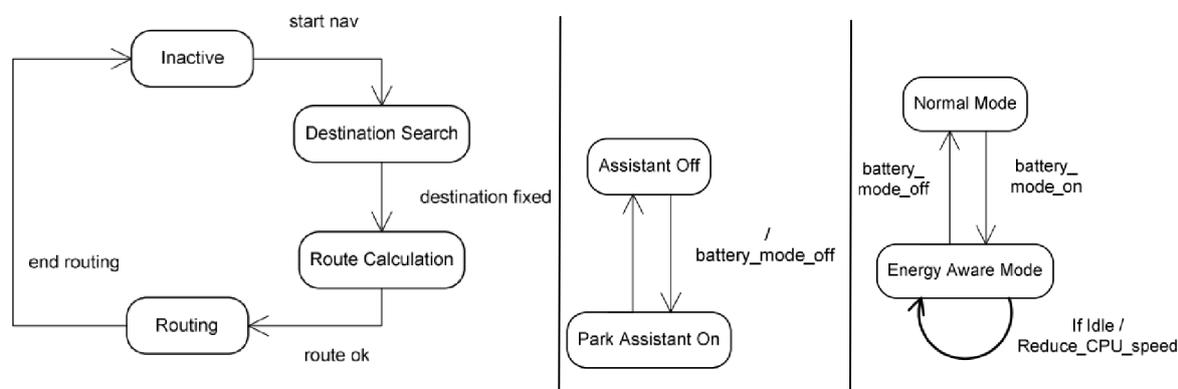


Abbildung 4.1 Zustandsdiagramme der Features und des Systems
[Kopie aus [13] S. 505]

Das System soll sich nun folgendermaßen verhalten: Ein gleichzeitiger Einsatz der beiden Features ist nicht erlaubt. Ist der Normalbetrieb aktiv, so wird die Rechenleistung der CPU erhöht, um die Rou-

tenberechnung zu beschleunigen. Ist eine Routenberechnung aktiv und startet der Parkassistent, so wird sie unterbrochen und später fortgesetzt.

Aus den einzelnen Diagrammen wird ein neues, für alle Features gültiges erstellt. Dieses ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die oberste Architekturschicht beinhaltet dieses Zustandsdiagramm und steuert die Features entsprechend an.

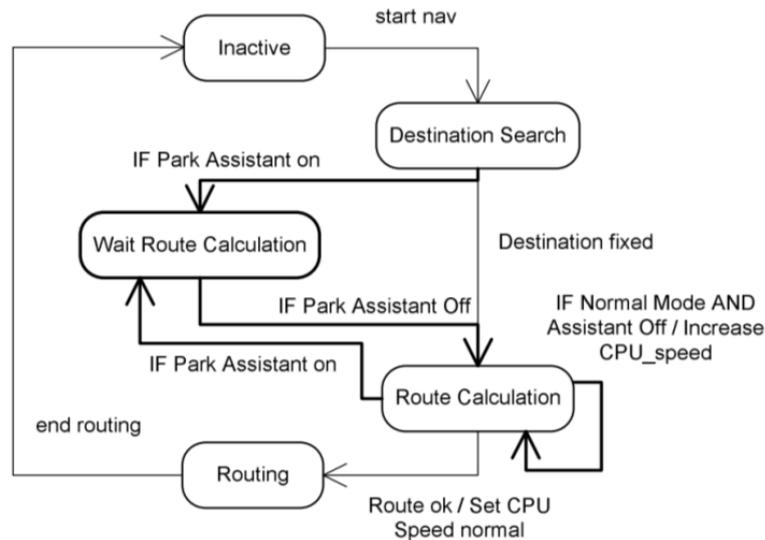


Abbildung 4.2 Gesamtes Zustandsdiagramm [Kopie aus [13] S. 506]

Dieses Verfahren kann man nicht nur für nichtfunktionale Feature-Interaktionen anwenden, was in [14] gezeigt wird.

4.2. Einsatz eines Vermittlers für automatisches Fahren

Eine Möglichkeit, wie man bekannte, ungewollte Feature-Interaktionen verhindern kann ist in [7] beschrieben. In diesem Artikel wird ein Vermittler (Feature-Mediator) vorgestellt, welcher den Einsatz von Features zentral koordiniert.

Der Vermittler basiert auf dem Mediator Pattern. Jedes Feature, das er steuert, verfügt über eine Kommunikationsverbindung zu ihm. Realisiert ist die Verbindung über ein spezielles Interface, welches jedes Feature und auch der Mediator selbst beinhaltet. Die Kommunikation zwischen den Features und dem Vermittler erfolgt ausschließlich über diese Interfaces.

Jedes Feature verfügt über einen Zustandsautomaten mit vier Zuständen (Ein, Aus, Aktiv und Freigegeben). „Aus“ bedeutet, dass es nicht in Betrieb ist, „Ein“, dass es in Betrieb, aber noch nicht aktiv ist (wenn z.B. die ACC eingeschaltet, die Geschwindigkeitsregelung aber nicht aktiv ist). Der Zustand „Aktiv“ bedeutet, dass das Feature aktiv werden möchte, „Freigegeben“, dass es vom Vermittler die Betriebserlaubnis erhalten hat. Zwischen den Zustände „Ein“, „Aus“ und „Aktiv“ wird aufgrund von Eingaben des Fahrers gewechselt, der dies durch Betätigung von Tasten steuert. Ein Wechsel in den Zustand „Freigegeben“ ist nur vom Zustand „Aktiv“ aus möglich und wird vom Vermittler gesteuert.

Zur Auflösung der Feature-Interaktionen erhebt der Vermittler erst, welche Features um Freigabe angesucht haben. Nach dieser Erhebung wird über eine Entscheidungstabelle ermittelt, welche Features freigegeben werden. In der Tabelle sind alle Feature-Kombinationen abgebildet. Sie wird

durchsucht und sobald die aktuelle Kombination gefunden ist, erfolgt die diesem Eintrag zugeordnete Freigabe. Es können mehrere Feature-Kombinationen zur selben Freigabe führen. Die Koordination wird also vorab eingestellt und zur Laufzeit auf die Informationen der Tabelle zurückgegriffen.

4.3. Feature-Komposition durch zentral gesteuerte Reihung

Diese Methode stammt aus der Telekommunikationstechnik und ist in [15] beschrieben. Die grundlegende Idee besteht darin, jedes Feature als eigenständige Komponente, genannt Feature-Box (FB), zu betrachten. Ein Anruf wird durch die geforderten Boxen geleitet. Abbildung 4.3 zeigt den Aufbau eines Gespräches zwischen zwei Teilnehmern (Customer 1 (C1), Customer 2 (C2)). Jeder Teilnehmer ist bei einer eigenen Leitungsschnittstelle (Line Interface, LI) registriert, über welche die Daten geleitet werden. C1 möchte eine Verbindung zu C2 aufbauen und die Features a und b benutzen. Dazu wird vom LI1 über FBa und FBb eine Verbindung zu LI2 und weiter zu C2 aufgebaut. Da jede FB vollen Zugriff auf den Übertragungskanal hat und die zu übertragenden Informationen nach Belieben verändern kann, ist die Reihenfolge, in der sie in den Übertragungsweg eingebettet sind, von Bedeutung. Die Reihenfolge, in der die FBs durchlaufen werden, wird vom Switch festgelegt, durch welchen jede Verbindung zwischen den einzelnen Boxen und Interfaces geleitet wird. Der Switch dient somit als zentrales Steuerelement. Welche Features benötigt werden, teilen die Teilnehmer dem Switch beim Verbindungsaufbau mit.

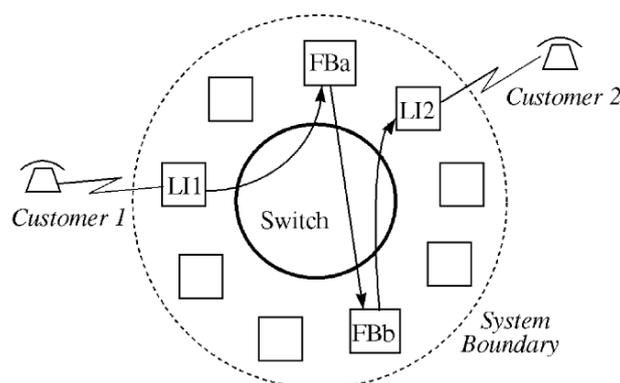


Abbildung 4.3 Routing der verteilten Feature Komposition [Kopie aus [15] S. 832]

Feature-Interaktionen werden durch die Reihenfolge des Aufrufs der FBs aufgelöst. Sind, in Anlehnung an Beispiel 1 aus Unterkapitel 2.2 die Features CF und CW gewünscht, so werden beide FBs in den Übertragungspfad integriert. Der Switch legt ihre Reihenfolge fest. Die Lösung der Interaktion ist in Abbildung 4.4 dargestellt, der Signalpfad ist durch strichlierte Pfeile dargestellt.

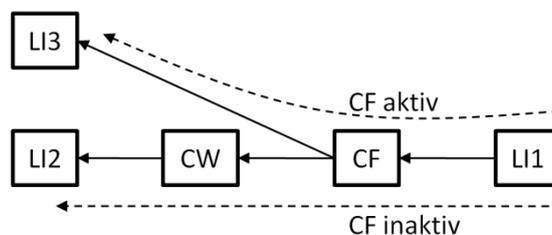


Abbildung 4.4 Lösung der FI zwischen CW und CF

CF muss vor CW platziert sein. CF leitet den Anruf von LI1 dann um, wenn der gewünschte Teilnehmer an LI2 nicht verfügbar und das Ziel der Umleitung LI3 erreichbar ist. In diesem Fall wird der Anruf nicht mehr durch CW geleitet. Seine Aktivierung ist daher ausgeschlossen. Ist LI3 ebenfalls nicht erreichbar, so wird CF für die Übertragung transparent, der Anruf wird also an CW weitergeleitet. CW

weiß, dass LI2 gerade nicht verfügbar ist und wird aktiv. Ein gleichzeitiges Aktivsein beider Features ist somit ausgeschlossen.

4.4. Feature-Auswahl durch Greedy-Algorithmus

In [16] und [17] kommt zum Reihens und Auswählen von Features für maschinelles Lernen ein Vorwärts-Rückwärts-Greedy-Algorithmus zur Anwendung. Dabei handelt es sich um eine Art Hill-Climber (siehe [18]), ein heuristisches Optimierungsverfahren, das sich schrittweise an das Endergebnis herantastet.

Die Aufgabe besteht darin, eine Zielfunktion durch Linearkombination von Basisfunktionen nachzubilden, wobei aus einer Menge von Features eine auf die Zielfunktion optimierte Untermenge ausgewählt wird. Mit Features sind in diesen Arbeiten die Basisfunktionen gemeint. Die Zielfunktion wird als Kostenfunktion formuliert, welche minimiert werden soll.

Der vorgestellte Algorithmus dient zum Reihens der Features nach deren Relevanz zur Minimierung der Kostenfunktion. Das Verfahren lässt sich in zwei Arbeitsschritte unterteilen, den Vorwärts- und den Rückwärtsschritt.

Der Vorwärts-Greedy-Algorithmus arbeitet iterativ, wobei in jedem Iterationsschritt ein Feature ausgewählt wird. Dazu werden in jedem Schritt die Features bewertet und jenes mit der größten errechneten Kostenreduktion der Kostenfunktion gewählt. Das große Problem dieses Auswahlverfahrens besteht darin, dass eine Auswahl nicht rückgängig gemacht werden kann. Außerdem ist nicht sicher, dass die gewählte Untermenge die größte Reduktion der Kostenfunktion bewirkt, eine andere Kombination könnte besser sein.

Beim Rückwärts-Greedy-Algorithmus sind zuerst alle Features aktiv. Es wird iterativ überprüft, ob durch Weglassen eines Features die Kostenfunktion reduzierbar ist. Wenn ja, wird das Betroffene aus der gewählten Untermenge entfernt und das Verfahren wiederholt, bis keines mehr weggelassen werden kann.

Durch Kombination der beiden Methoden zum Vorwärts-Rückwärts-Greedy-Algorithmus lassen sich die Vorteile kombinieren. Nach jedem Hinzufügen eines Features zur gewählten Untermenge durch den Vorwärtsschritt, wird im Anschluss daran durch den Rückwärtsschritt überprüft, ob alle gewählten Features tatsächlich einen positiven Beitrag leisten. Falls nicht, wird das betroffene Feature wieder aus der Untermenge entfernt, das zuletzt hinzugefügte darf dabei nicht wieder entfernt werden.

In [16] kommt zusätzlich eine Funktion zur Anwendung, welche Feature-Interaktionen berücksichtigt. Features, welche in ihrem Effekt ähnlich zu bereits gewählten sind, können so mit einem Straffaktor penalisiert werden. Die Abhängigkeiten der Features stellen eine Art Wechselwirkung zwischen ihnen dar, da die Kostenfunktion durch sie nur abgeschwächt verbessert wird, wenn mehrere ähnliche gewählt werden. Die Ähnlichkeit zweier Features soll anhand eines Beispiels aus dem Automotivebereich veranschaulicht werden. Zwei Features könnten denselben Mechanismus (z.B. Spätverstellen des Zündwinkels) zur Erhöhung der Temperatur im Abgastrakt verwenden. Soll diese erhöht werden und wird eines der beiden gewählt, so ist der zusätzliche Effekt des anderen vermindert (der Zündwinkel kann nicht beliebig nach Spät verstellt werden).

4.5. Feature-Interaktion in Gebäudeautomatisierungsanlagen

Die in [19] beschriebene Methode zum Umgang mit Feature-Interaktionen stammt aus der Gebäudeautomatisierung. Die Steuerung der Wechselwirkungen übernimmt ein zentraler Feature-Interaktions-Manager.

Der Manager hat die Aufgabe, Feature-Interaktionen und Ressourcenzugriffe der Features zu koordinieren und so ungewolltes Systemverhalten zu vermeiden. Wie Abbildung 4.5 zeigt, besteht die Architektur des Managers aus 3 Schichten (Layer). In der obersten, der Feature-Schicht (Service Layer) sind die Features, wie z.B. Klimakontrolle oder Sicherheitssystem, enthalten. Jedes Feature kann eine oder mehrere Ressourcen verwenden. Der mittleren Schicht, der Ressourcenschicht (Device Layer), sind Sensoren und Aktuatoren zugeordnet. Ressourcen können sein Heizung, Klimaanlage oder Thermometer. In der untersten Schicht, der Umgebungsschicht (Environmental Layer), befinden sich relevante Umgebungsvariablen wie beispielsweise die Raumtemperatur oder die Luftfeuchtigkeit. Über diese Variablen wird dargestellt, wie die Features die Umgebung beeinflussen und miteinander interagieren.

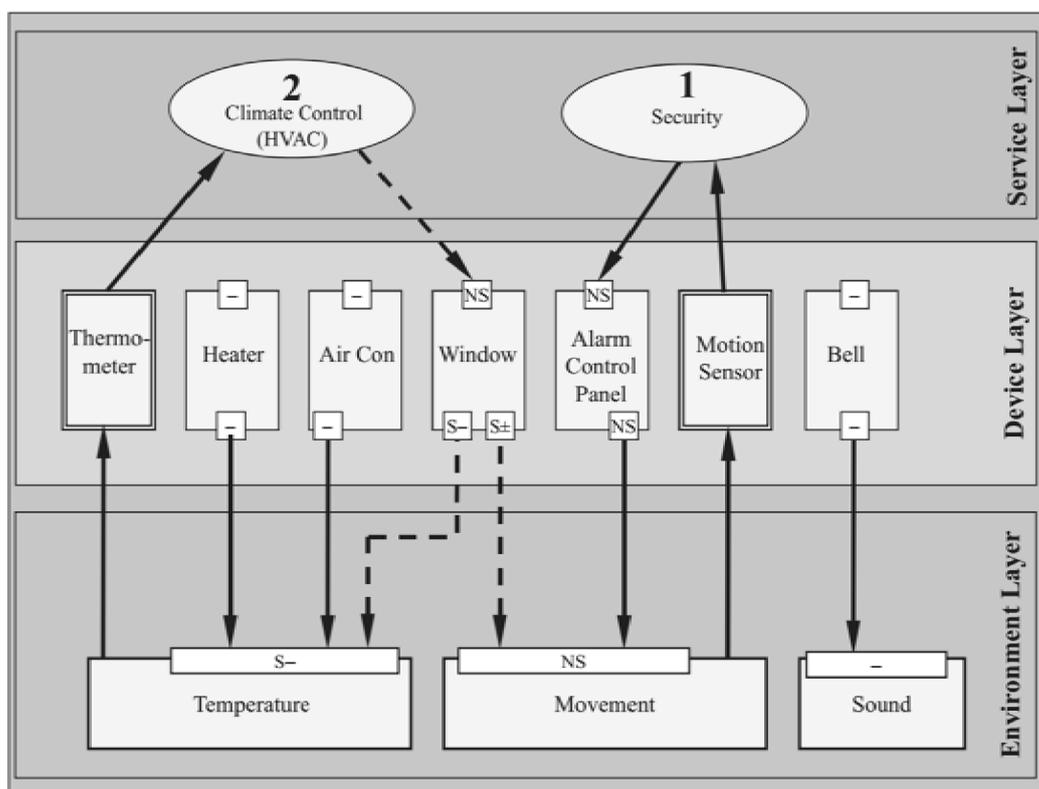


Abbildung 4.5 Architektur und Funktion des Feature-Interaktions-Managers
[Kopie aus [19] S. 254]

Der Zugriff auf eine Ressource oder Umgebungsvariable erfolgt durch Sperren. Ein Sperren kann auf vier verschiedene Arten erfolgen:

- NS Not Shared (nicht geteilt). Variable oder Ressource ist gesperrt und kann von keiner weiteren Ressource oder Feature verwendet werden.
- S+ Shared (geteilt), aber nur steigend. Eine Verwendung durch mehrere Ressourcen oder Features möglich, Umgebungswert oder Ressource darf aber nur ansteigen.
- S- Shared, aber nur sinkend. Mehrfachverwendung möglich, Wert darf nur absinken.

- S± Shared, Variable oder Ressource darf sich beliebig ändern.

Möchte nun ein Feature aktiv werden und auf eine Umgebungsgröße Einfluss nehmen, so sperrt es erst eine Ressource. Die Ressourcen können dann ihrerseits wiederum Umgebungsvariablen sperren. Der Feature-Interaktions-Manager speichert, welches Feature welche Ressource bzw. welche Ressource welche Umgebungsvariable gesperrt hat. Zusätzlich verfügt er über Prioritätsinformationen. Diese ermöglichen es, einem Feature Ressourcen zu entziehen und einem anderen mit höherer Priorität zu überlassen. So kann zum Beispiel der Manager im Falle eines Einbruchs das Aufzeichnen einer TV-Sendung abbrechen und die Daten der Überwachungskameras über das Aufnahmegerät speichern.

In Abbildung 4.5 sind die unterschiedlichen Schichten und ihre Inhalte dargestellt. Ein durchgezogener Pfeil zeigt an, dass eine Ressource oder Variable in Verwendung ist, ein strichlierter Pfeil, dass eine Ressource angefordert, aber nicht durch das anfordernde Feature verwendet werden kann. In den Anfangs- und Endpunkten der Pfeile ist dargestellt, ob und auf welche Art eine Ressource oder Variable gesperrt ist. Den Features ist eine Priorität zugeordnet, welche über dem jeweiligen Feature-Namen durch eine Zahl vermerkt ist (Alarmanlage 1, Klimaanlage 2).

Die Funktion des Feature-Interaktions-Managers wird nun anhand eines Beispiels beschrieben, siehe Abbildung 4.5. In einem Gebäudeautomatisierungssystem seien die Features Alarmanlage (Security) und Klimaanlage (Climate Control) vorhanden. Wird die Alarmanlage aktiv, so sperrt sie die Bewegungsvariable (Movement) und überprüft die Bewegungssensoren (Motion Sensor) fortlaufend. Möchte nun die Klimakontrolle die Fenster öffnen, um die Temperatur abzusenken, so würde sie die Ressource Fenster (Window) und in weiterer Folge die Bewegungs- und Temperaturvariable sperren. Da letztere aber bereits gesperrt ist und von keinem weiteren Feature gesperrt werden darf, kann die Klimakontrolle die Fenster nicht öffnen. Dies ist auch notwendig, da im Falle eines Öffnens die Bewegungssensoren Aktivität melden und die Alarmanlage einen Einbruch registrieren würde. Diese Interaktion wird somit verhindert. Wären die Prioritäten der Features vertauscht, so könnte die Klimakontrolle die Fenster auch dann öffnen, wenn die Alarmanlage aktiv ist.

4.6. Koordinierter Zugriff auf Variablen

Eine weitere Methode zum Koordinieren von Feature-Interaktionen ist in [20] beschrieben. Features können Variablen beeinflussen. Feature-Interaktionen entstehen dann, wenn mehrere Features gleichzeitig Einfluss auf die gleiche Variable nehmen wollen.

Die Architektur der Koordinierung ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Features überwachen die Werte von Variablen (Monitored Variables). Jedes Feature entscheidet zyklisch aufgrund dieser Information, wie es diese Variablen beeinflussen möchte. Zur Ansteuerung jeder Variablen wird ein eigenes Kontrollmodul, Resolver genannt, eingefügt. Die gewünschten Beeinflussungen der Variablen durch die Features werden an die zuständigen Resolver weitergegeben. Dadurch erfährt dieser, welche Features die zugehörige Variable wie ändern wollen.

Auf diesen Informationen basierend ermittelt jeder Resolver für sich, wie die Variable geändert wird. Den Features wird eine Priorität zugeteilt. Dadurch ist es dem Resolver möglich, sicherheitsrelevanten Features (im Sinne von Safety) den Vortritt gegenüber anderen zu lassen.

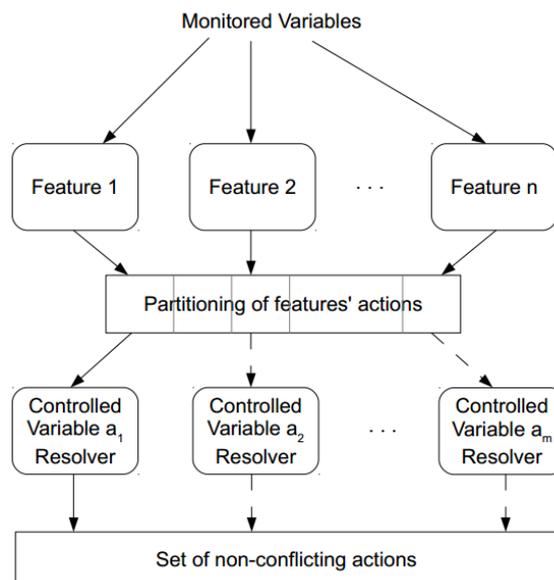


Abbildung 4.6 Architektur für koordinierten Zugriff auf Variablen [Kopie aus [20] S. 4]

Die Wunschänderungen der Features werden zyklisch generiert, wobei die Änderungswünsche aller Features zeitgleich vorliegen müssen.

Die vorgestellte Methode wurde im Automotivbereich getestet. Beispiele für Variablen können Einspritzmenge, Drosselklappenstellung oder angesaugte Luftmasse sein.

4.7. Diskussion der vorgestellten Methoden

In der Literatur gibt es nur wenige Konzepte zur zentralen Koordinierung von Features. Die mögliche Anwendung der in diesem Kapitel beschriebenen Methoden auf die in dieser Diplomarbeit behandelte Problemstellung wird nun kurz diskutiert.

Ein Zustandsautomat könnte offline, durch den OEM, appliziert werden und würde die Steuerung der Features global optimieren. Ein Berücksichtigen von Hard Constraints ist möglich. Aufgrund der hohen Anzahl an zu erwartenden Systemzuständen und möglichen Feature-Kombinationen, ist der Einsatz eines solchen Konzepts aber ungeeignet, weil die vielen Zustände schwer handhabbar sind. Eine Anpassung des Zustandsautomaten ist notwendig, sobald die zu koordinierenden Features geändert werden, was zu einem hohen Mehraufwand in der Entwicklung führt.

Der Einsatz des Vermittlers wäre für diese Problemstellung möglich, er kann das Einhalten von Hard Constraints sicherstellen und das Systemverhalten optimieren. Er könnte offline, durch den OEM, appliziert werden. Problematisch könnte sein, dass die Anzahl der Tabelleneinträge exponentiell mit der Anzahl der zu koordinierenden Features ansteigen kann und dies zu einem inakzeptabel hohen Speicherbedarf führt.

Die Methode der zentral gesteuerten Reihung löst zwar die Feature-Interaktionen, erlaubt aber keine Optimierung des Systemverhaltens. Die Methode scheidet daher zur Lösung der hier betrachteten Problemstellung aus.

Der Greedy-Algorithmus erlaubt es, zur Laufzeit Features für den Betrieb auszuwählen. Dabei ist eine Optimierung des Systemverhaltens möglich. Es handelt sich um ein heuristisches Verfahren, die

Effekte der Features müssten also vereinfacht nachgebildet werden. Eine Erweiterung der Methode zur Berücksichtigung von Hard und Soft Constraints ist notwendig.

Das Sperren von Ressourcen ist für den Einsatz hier nicht geeignet, da mehrere Ziele gleichzeitig verfolgt werden und die Auswirkungen der Features manchmal gegensätzlich sind, ein gleichzeitiger Einsatz aber trotzdem erwünscht ist.

Bei der Methode des koordinierten Zugriffs auf Variablen bestimmt jeder Resolver für sich, wie er die ihm zugeordnete Variable beeinflusst. Die Beeinflussung der Variable stellt dabei einen Kompromiss zwischen den Wunschwerten der Features dar. Eine Optimierung über mehrere Variablen ist nicht vorgesehen. Zwischen den Variablen können Abhängigkeiten bestehen. Beispielsweise kann sich ein höherer Luftmassenstrom im Ansaugtrakt auf die Temperatur im Abgastrakt auswirken. Interaktionen dieser Art werden nicht berücksichtigt.

5. Entwicklung des Feature-Koordinators

Zu Beginn dieses Kapitels sind die Anforderungen, welche an den Koordinator gestellt werden, aufgelistet und beschrieben. Danach wird das Konzept des Koordinators vorgestellt und erklärt, wie es die Anforderungen erfüllt. Anschließend wird die prototypische Umsetzung vorgestellt. Abschließend werden die Unterschiede der prototypischen Implementierung zum erläuterten Konzept und die notwendigen Anpassungen der Features beschrieben.

5.1. Anforderungen an den Koordinator

Die Koordinierung muss so erfolgen, dass Betriebsbedingungen eingehalten werden und der CO₂-Ausstoß minimiert wird.

Unter der Einhaltung von Betriebsbedingungen ist z.B. das Nicht-Überschreiten der maximalen Motortemperatur zu verstehen. Der Kraftstoffverbrauch, und somit der CO₂-Ausstoß, soll dabei minimiert werden.

Die Koordinierung muss zentral erfolgen.

Dies soll die Weiterentwicklung des Koordinators und seine Wartbarkeit erleichtern.

Der aktuelle Systemzustand (z.B. Motortemperatur, gefordertes Moment usw.) muss bei der Auswahl der Features mitberücksichtigt werden.

Der Koordinator soll das Einhalten der Motorbetriebsbedingungen gewährleisten und einen Verstoß gegen diese verhindern. Dafür ist die Beachtung des aktuellen Systemzustandes notwendig.

Der Fahrzeughersteller (OEM) muss die Möglichkeit haben, die Entscheidungen des Koordinators per Applikation zu beeinflussen.

In verschiedenen Ländern gelten unterschiedliche gesetzliche Rahmenbedingungen, an die sich der OEM halten muss. Die Möglichkeit einer Anpassung des Koordinators an diese ist also notwendig. Die Software eines Motorsteuergerätes beinhaltet viele Kennlinien und Parameter. Diese sind per Applikation (darunter versteht man Parametrierung) veränderbar und erlauben eine optimierte Anpassung an die gesetzlichen Gegebenheiten.

Der Koordinator muss mit den, zur Verfügung stehenden, Ressourcen (Rechenzeit und Speicherbedarf) schonend umgehen.

Rechenzeit und Speicher sind in einem Steuergerät stark beschränkt. Manchmal müssen während der Entwicklung integrierte Software-Funktionen wieder ausgebaut werden, da die notwendigen Hardware-Ressourcen nicht zur Verfügung stehen.

Das Verändern der Konfiguration der zu koordinierenden Features (Löschen, Hinzufügen) muss mit wenig Aufwand möglich sein.

In verschiedenen Projekten kommen unterschiedliche Features zum Einsatz. Beim Integrieren des Koordinator-Moduls in ein anderes Projekt sollen möglichst wenige Anpassungen am Modul selbst notwendig sein.

Jedes Feature muss die Möglichkeit haben, seine Funktion selbst zu deaktivieren.

Viele Features unterliegen mehreren Bedingungen, unter denen sie nicht aktiv sein dürfen. Schichtbetrieb beispielsweise ist nur in einem gewissen Drehzahlbereich möglich. Wird der erlaubte Bereich

verlassen, muss das Feature sofort deaktiviert werden, der Koordinator darf dies nicht verzögern oder gar verhindern.

Die Steuerung der Features soll so erfolgen, dass ihr Aktivwerden durch den Koordinator verhindert oder verzögert werden kann.

Das Aktivieren eines Features ist nur dann möglich, wenn dieses betriebsbereit ist und es dies dem Koordinator signalisiert hat. Ob und wann es aktiv wird, entscheidet der Koordinator.

Der Koordinator soll die Kosten, welche beim Umschalten eines Features entstehen können, mitberücksichtigen.

Das Starten des Verbrennungsmotors verursacht beispielsweise solche Umschaltekosten, da dabei der Kraftstoffverbrauch erhöht ist. Bei Fahrzeugen mit Hybridantrieb sollte beispielsweise abgewogen werden, ob es besser ist, den Motor zu aktivieren oder die Batterie durch rein elektrischen Betrieb tiefer zu entladen.

5.2. Konzept des Feature-Koordinators

In diesem Unterkapitel wird das Konzept des Koordinators vorgestellt. Die Diskussion der Anforderungen unter Berücksichtigung des vorgestellten Konzepts erfolgt im Anschluss daran.

5.2.1. Entwurf des Koordinators

Die Aufgabe des Koordinators besteht darin, die Motorsteuerung durch optimierten Einsatz der Features zu verbessern. Durch die Koordinierung soll der Einsatz der Features flexibler und ihre Zusammenarbeit gefördert werden.

Das hier vorgestellte Konzept wurde in Anlehnung an den Vorwärts-Greedy-Algorithmus (siehe Unterkapitel 4.4, auf diesem basiert die Feature-Auswahl im Auswahlalgorithmus) in Kombination mit dem Vermittler (siehe Unterkapitel 4.2, auf diesem basiert die Vorselektion) erarbeitet.

Die physikalischen Größen, welche der Koordinator durch eine geeignete Auswahl an Features beeinflussen möchte, werden Zielgrößen genannt. Als Zielgrößen wurden der aktuelle CO_2 -Ausstoß, die Motortemperatur, die Temperatur im Abgastrakt und das vom Motor geforderte Drehmoment festgelegt. Eine Berücksichtigung weiterer oder anderer Zielgrößen ist möglich.

Der CO_2 -Ausstoß soll minimiert werden. Die Temperatur im Abgastrakt und die Motortemperatur sollen in einem bestimmten Intervall liegen und dürfen einen Maximalwert nicht übersteigen. Beispielsweise kann eine zu hohe Motortemperatur zu Motorschäden führen, eine zu niedrige führt zu erhöhten Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen. Das, vom Fahrer gewünschte, Moment muss vom Motor stellbar sein. Das maximal vom Motor stellbare Moment hängt von aktuellen Betriebsbedingungen wie der Motordrehzahl oder der Betriebsart ab. Features können dieses Maximalmoment beeinflussen, HMB z.B. führt zu dessen Reduktion um mehr als 50%.

Um seine Aufgaben zu erfüllen, kann der Koordinator den Einsatz von n Features koordinieren, wobei einige Bedingungen für ihre Auswahl berücksichtigt werden müssen. Dabei muss man zwischen Hard und Soft Constraints (harten und weichen Bedingungen) unterscheiden. Das Regenerieren des NO_x -Speicherkatalysators beispielsweise muss ab einem bestimmten Füllstandswert erfolgen und stellt ein Hard Constraint dar. Ebenso das Nicht-Überschreiten der Maximaltemperaturen der Zielgrößen.

Das Halten der Motortemperatur über einer gewissen Mindesttemperatur stellt z.B. ein Soft Constraint dar.

Die Koordinierung erfolgt in zwei Stufen, der Vorselektion und dem Auswahlalgorithmus. Der Koordinator wird periodisch ausgeführt, sein zeitliches Verhalten wird nun beschrieben.

Zeitliches Verhalten des Koordinators

Der zeitliche Ablauf der Koordinierung ist in Perioden unterteilt und in Abbildung 5.1 dargestellt. Die X-Achse zeigt die Zeit, die Y-Achse die Anzahl der am Vorgang beteiligten Features. Zu Periodenbeginn erfolgt die Feature-Auswahl (1-3). Die gewählten werden dann für die Periodendauer (4) durch den Koordinator für den Betrieb freigegeben.

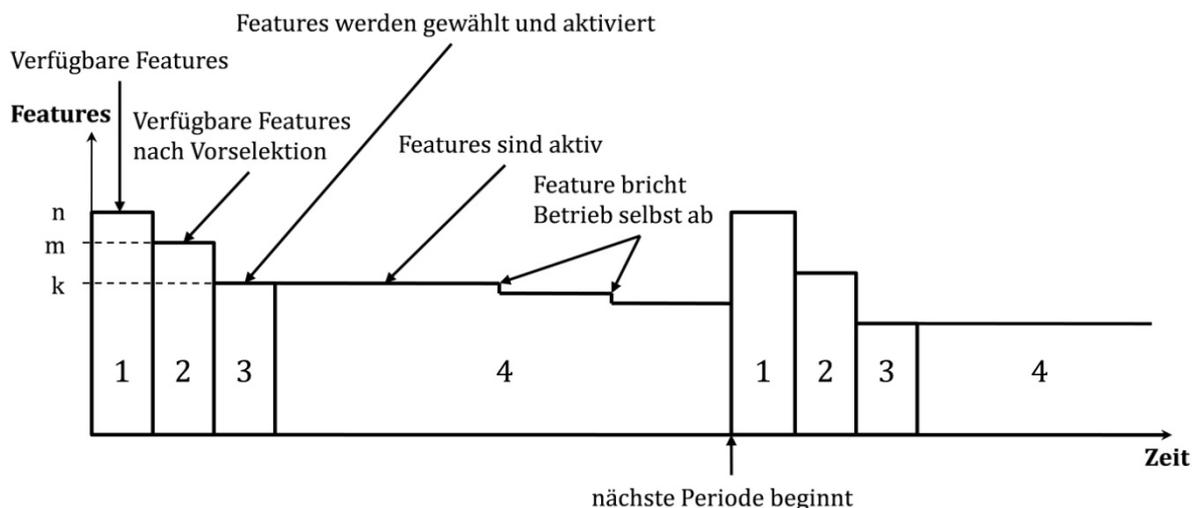


Abbildung 5.1 Zeitlicher Ablauf der Koordinierung

Zu Beginn jeder Periode stehen n Features zur Auswahl (1). Nach der Vorselektion (2) stehen nur mehr m Features zur Verfügung. Einige können bereits aufgrund der Vorselektion nicht mehr möglich oder bereits für die spätere Aktivierung gewählt sein. Der Auswahlalgorithmus entscheidet anschließend durch ein heuristisches Verfahren, welche der verbleibenden m Features (m ist variabel und kann von Periode zu Periode unterschiedlich sein, es gilt $m \leq n$) gewählt werden. Insgesamt werden durch die Vorselektion und den Auswahlalgorithmus k Features (wobei k variabel ist und von Periode zu Periode unterschiedlich sein kann, es gilt $k \leq m$) für die Freigabe ausgewählt.

Sobald die Auswahl abgeschlossen ist, erfolgt die Feature-Freigabe durch den Koordinator. Diese sind dann für die Periodendauer (4) freigegeben. Die Aktivierung nicht freigegebener Features ist nicht möglich. Zu Beginn der nächsten Periode wird die Feature-Auswahl wiederholt und es werden erneut k Features für die Aktivierung gewählt. Ein Feature kann seinen Betrieb jederzeit selbst abbrechen.

Vorselektion

In der Vorselektion erfolgt die Berücksichtigung von Hard Constraints. Sie stellt sicher, dass z.B. die Motortemperatur nicht zu hoch oder das Regenerieren des NO_x -Speicherkatalysators rechtzeitig eingeleitet und durchgeführt wird. Sie hat daher die Möglichkeit, die Aktivierung eines Features vorab auszuschließen oder durchzuführen. Eine Änderung der hier getroffenen Entscheidungen ist im Auswahlalgorithmus nicht mehr möglich.

Von den n zu koordinierenden Features können also in der Vorselektion bereits welche aktiviert oder von der Auswahl ausgeschlossen werden. Über die Aktivierung der verbleibenden Features entscheidet dann der Auswahlalgorithmus.

Auswahlalgorithmus

Der Auswahlalgorithmus wählt aus den ihm zur Verfügung stehenden Features (die, die nicht von der Vorselektion deaktiviert oder aktiviert wurden) jene aus, die aufgrund seiner Berechnungen für den Betrieb des Motors sinnvoll sind. Bei dem Algorithmus handelt es sich um ein heuristisches Optimierungsverfahren, das nach dem Prinzip eines Hill-Climbers arbeitet. In [18] ist die Arbeitsweise eines Hill-Climbers beschrieben. In jedem Iterationsschritt wird für jedes verfügbare Feature sein geschätzter Gesamtnutzen errechnet. Anschließend werden sie anhand dieses Wertes gereiht und jenes mit dem größten errechneten Wert gewählt. Der Algorithmus ist beendet, wenn kein Feature mehr mit positiv geschätztem Gesamtnutzen zur Auswahl steht.

Der erwartete Effekt der Features wird mathematisch formuliert. Jedes Feature stellt für jede Zielgröße einen heuristischen Einflusswert bereit. Der Begriff *heuristisch* ist in [18] wie folgt definiert: „Das Adjektiv „heuristisch“ besagt etwa „nützlich zum Entdecken oder Herausfinden“ (von Lösungen). Problem- und domänenspezifisches Wissen fließt meist über heuristische Regeln ein, wenn exakte (algorithmische) Verfahren nicht bekannt oder zu aufwendig sind.“ Die Einflusswerte beschreiben die erwartete Beeinflussung der Zielgrößen durch das Feature und stellen eine Nachbildung des realen Feature-Effekts dar. Die Einflusswerte können anhand von Einflussfunktionen ermittelt werden. Ein Beispiel für die Einflussfunktionen eines Features ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

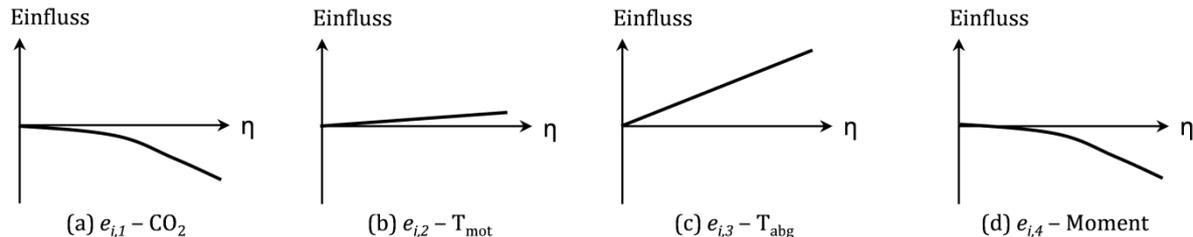


Abbildung 5.2 Beispiel für Einflussfunktionen eines Features

Das gezeigte Feature bewirkt, dass die Temperatur im Abgassystem schneller steigt, was aus der dritten Kennlinie (c) hervorgeht. η steht für den Aktivierungsgrad des Features. Je stärker das Feature aktiviert wird, desto positiver wirkt es sich auf die Temperatur im Abgassystem aus. Aus der zweiten Funktion (b) kann man ablesen, dass der erwartete Effekt auf die Motortemperatur positiv, aber viel schwächer als der auf die Abgastemperatur ist. Die erste und vierte Einflussfunktion zeigt die Beeinflussung des CO_2 -Ausstoßes (a) bzw. des Moments (d). Der Einflusswert auf das Moment entspricht der Momentenbeeinflussung des Features im gegebenen Betriebspunkt und wird in Nm als absoluter Betrag angegeben. Jede Einflussfunktion und somit der erwartete Effekt eines Features auf eine Zielgröße kann von unterschiedlichen Parametern abhängen, es muss nicht immer, wie hier abgebildet, der Aktivierungsgrad sein.

Aus den Einflusswerten eines Features wird sein geschätzter Gesamtnutzen anhand von Formel 5.1 berechnet.

Für die Berechnung werden die Einflusswerte ($e_{i,j}$) mit den zugehörigen Gewichtungsfaktoren (g_j), deren Beschreibung erfolgt später, multipliziert. Dadurch ist eine Anpassung der Relevanz der Ein-

flusswerte auf die jeweiligen Betriebsbedingungen möglich. Durch Addition der einzelnen Terme entsteht der geschätzte Gesamtnutzen eines Features. Je größer dieser Wert ist, desto positiver sind die erwarteten Feature-Effekte.

$$\text{Gesamtnutzen}_{\text{Feature } i} = \sum_{j=1}^4 g_j \cdot e_{i,j}$$

Formel 5.1 Berechnung des geschätzten Gesamtnutzens eines Features

Da vier Zielgrößen gewählt wurden, werden vier Terme summiert, deren Beschreibung nun folgt.

$g_1 \cdot e_{i,1}$ beschreibt den erwarteten, gewichteten Effekt des Features i auf den CO_2 -Ausstoß. $e_{i,1}$ ist negativ, wenn das Feature dessen Reduktion bewirkt, andernfalls positiv. Da der CO_2 -Ausstoß minimiert werden soll, muss der Gewichtungsfaktor g_1 stets kleiner null sein, also ein negatives Vorzeichen haben. Eine Erhöhung des Ausstoßes ist nie gewollt.

Die Terme $g_2 \cdot e_{i,2}$ und $g_3 \cdot e_{i,3}$ beschreiben den erwarteten, gewichteten Effekt des Features i auf die Motortemperatur bzw. die Temperatur im Abgastrakt. Die Einflusswerte $e_{i,2}$ und $e_{i,3}$ sind positiv, wenn die Temperaturen durch den Einsatz des Features steigen, andernfalls sind sie negativ. Die Gewichtungsfaktoren g_2 und g_3 sind negativ, wenn die jeweilige Temperatur verringert werden soll, andernfalls sind sie positiv.

$g_4 \cdot e_{i,4}$ beschreibt den erwarteten Effekt des Features i auf das Moment. Für jeden Betriebspunkt des Motors existiert ein mögliches Maximalmoment. Von diesem wird ein Teil angefordert, das sogenannte Fahrerwunschkmoment. Der Motor muss dieses stets bereitstellen können.

Features können das mögliche Maximalmoment beeinflussen. HMB beispielsweise senkt es um mehr als 50%. Sind z.B. 300Nm möglich und beträgt das Fahrerwunschkmoment 200Nm, so können Features ausgewählt werden, die das Maximalmoment um höchstens 100Nm reduzieren. Die Differenz von maximal möglichem Moment und Fahrerwunschkmoment wird Momentenreserve genannt und beträgt im zuvor beschriebenen Beispiel 100Nm.

Die Bereitstellung des Fahrerwunschkmoments stellt ein Hard Constraint dar, welches erst bei der Feature-Auswahl berücksichtigt wird, da sich das Maximalmoment nach jedem Iterationsschritt ändern kann. Beträgt beispielsweise die Momentenreserve im ersten Iterationsschritt 100Nm und wird ein Feature gewählt, welches das Maximalmoment um 10Nm reduziert, so beträgt sie im nächsten Iterationsschritt nur mehr 90Nm.

Jedes Feature teilt dem Koordinator über den Einflusswert $e_{i,4}$ seinen erwarteten Effekt auf das Moment (z.B. -20Nm, wenn es das Maximalmoment um 20Nm reduziert) mit. Zu Beginn jedes Iterationsschrittes wird für jedes, noch wählbare, Feature überprüft, ob die Momentenreserve seinen Betrieb zulässt (ob die Momentenreserve abzüglich $e_{i,4}$ einen Wert \geq null ergibt). Ist die Bedingung erfüllt, so wird $e_{i,4}$ für die Berechnung des Gesamtnutzens der Wert null zugewiesen. Ist die Bedingung nicht erfüllt, so darf das Feature nicht aktiviert werden. $e_{i,4}$ wird dann für diesen Iterationsschritt ein sehr hoher negativer Wert zugewiesen, wodurch der geschätzte Gesamtnutzen des Features negativ ist, seine Auswahl wird so verhindert. g_4 beträgt während des gesamten Auswahlverfahrens stets 1.

Die Veränderung von $e_{i,4}$ ist nur für die Berechnung des Gesamtnutzens im jeweiligen Iterationsschritt gültig und wird im nächsten wiederholt, da möglicherweise ein Feature gewählt wurde, welches das Maximalmoment anhebt. Ist ein Feature also in einem Schritt nicht möglich, so kann es in einem späteren doch noch gewählt werden. $e_{i,4}$ wird daher nach der Berechnung des geschätzten Gesamtnutzens wieder auf seinen tatsächlichen Wert zurückgesetzt.

Die Features werden anhand ihres geschätzten Gesamtnutzens gereiht und jenes mit dem größten gewählt. Gewählte Features befinden sich gemeinsam mit den bereits durch die Vorselektion gewählten in der Menge K . K enthält k Features, welche für die spätere Aktivierung markiert wurden. Der geschätzte Gesamteinfluss von K auf eine Zielgröße (ge_j) wird durch Aufsummieren der einzelnen Einflusswerte der gewählten Features bestimmt (siehe Formel 5.2). Für jede Zielgröße erfolgt diese Berechnung am Ende jedes Iterationsschrittes. Zu beachten ist, dass für die Einflusswerte der Features auf das Moment ($e_{i,4}$) die Werte aus der Einflussfunktion $E4$ verwendet werden und nicht die, während der Berechnung des Gesamtnutzens veränderten. Der geschätzte Gesamteinfluss auf das Moment wird dann zum maximal möglichen Moment addiert, wodurch sich die Momentenreserve für den nächsten Iterationsschritt ändert.

$$ge_j = \sum_{i=1}^k e_{i,j}$$

Formel 5.2 geschätzter Gesamteinfluss der k gewählten Features auf die Zielgröße j

Die Gewichtungsfaktoren setzen sich, wie Formel 5.3 zeigt, aus zwei Termen zusammen und werden vor jedem Iterationsschritt neu berechnet. Sie können sich somit nach jeder Feature-Auswahl ändern. Interaktionen der bereits gewählten Features mit den noch zur Auswahl stehenden hinsichtlich ihrer Auswirkung auf eine Zielgröße, werden so im nächsten Iterationsschritt mitberücksichtigt.

$$g_j = f(\text{Istwert}_j) \cdot d(ge_j)$$

Formel 5.3 Berechnung des Gewichtungsfaktors g_j

Der erste Term wird als Funktion des Istwertes der Zielgröße gebildet. Er legt das Vorzeichen des Gewichtungsfaktors und seinen Initialwert fest. Für Motortemperatur und Temperatur im Abgastrakt gestaltet sich die Bildung wie folgt: Übersteigt der Istwert den gewünschten Sollbereich, so ist $f(\text{Istwert}_{2,3})$ negativ, andernfalls positiv, wobei große Abweichungen zu hohen, kleine zu niedrigen Werten führen. Ein Beispiel für diese Funktion zeigt Abbildung 5.3 (b).

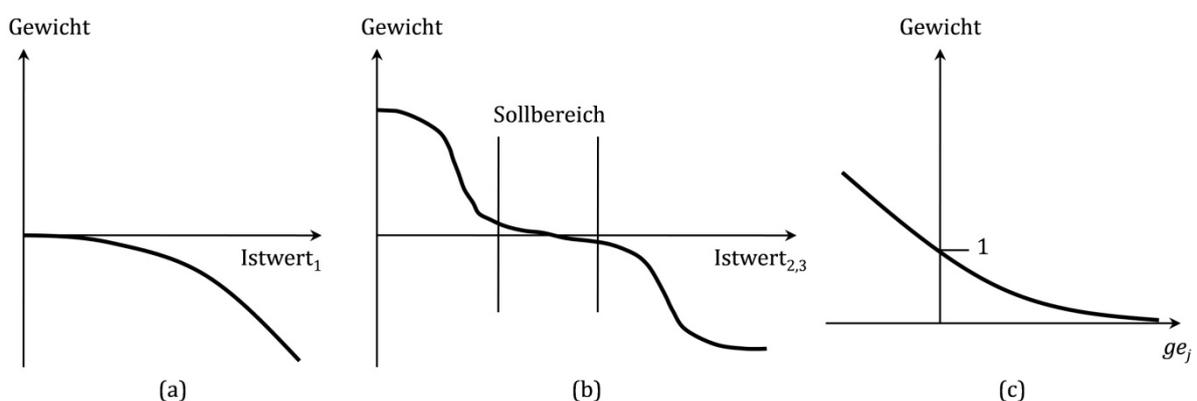


Abbildung 5.3 Funktionen zur Bildung des 1. (a, b) und des 2. Terms (c) des Gewichtungsfaktors

$f(\text{Istwert}_1)$ ergibt bei niedrigem CO_2 -Ausstoß kleine, negative, bei hohem große, negative Werte, was Abbildung 5.3 (a) zeigt. Der zweite Term wird als Funktion des geschätzten Gesamteinflusses der

gewählten Features (ge_j) erzeugt und erlaubt eine Anpassung des Gewichtungsfaktors. Je größer der Wert des Gesamteinflusses ist, desto kleiner ist dieser Term. Es gilt immer $d(ge_j) > 0$, da das Vorzeichen des Gewichtungsfaktors nicht gewechselt werden darf. Ein Beispiel für diese Funktion ist in Abbildung 5.3 (c) gegeben. Wie bereits erwähnt, beträgt der Gewichtungsfaktor für das Moment stets 1, er wird nicht anhand von Formel 5.3 berechnet.

Vor dem ersten Iterationsschritt werden die Gewichtungsfaktoren (mit Ausnahme von g_4) anhand von Formel 5.3 berechnet. Der geschätzte Effekt von Features, welche vorab durch die Vorselektion gewählt wurden, kann so mitberücksichtigt werden. Wurde kein Feature vorab gewählt, so sind alle $ge_j = 0$. $d(ge_j)$ liefert in diesem Fall den Wert 1.

Da die Gewichtungsfaktoren für die Relevanz der Änderung einer Zielgröße stehen, wird durch die Berücksichtigung des Einflusses von K verhindert, dass eine Zielgröße für die gesamte Dauer des Auswahlverfahrens die Feature-Auswahl dominiert. Anhand eines Beispiels soll dies und die Arbeitsweise des Auswahlalgorithmus verdeutlicht werden.

Folgende Annahmen können eintreten, wenn die Kühlung des Motors ausfällt: Die Motortemperatur ist am oberen Ende des erlaubten Bereiches, die Temperatur im Abgastrakt ist zu niedrig. Der Gewichtungsfaktor für die Motortemperatur (g_{Mot}) ist niedrig und negativ, weil der Wert in den Betriebsgrenzen liegt, aber nicht weiter erhöht werden soll. Jener für die Temperatur im Abgastrakt (g_{Abg}) ist hoch und positiv, da eine Erhöhung in der gegebenen Situation wichtig ist.

In Tabelle 5.1 sind 4 Features (F1-F4) mit ihrem jeweiligen Einfluss auf die Motortemperatur (e_{Mot}) und auf die Temperatur im Abgastrakt (e_{Abg}) dargestellt. Daneben stehen die zugehörigen Gewichtungsfaktoren und der, sich daraus ergebende geschätzte, Gesamtnutzen (Berechnung siehe Formel 5.1).

Ohne Anpassung der Gewichtungsfaktoren wird im ersten Iterationsschritt das Feature F1 gewählt, da es den größten geschätzten Gesamtnutzen besitzt. Im nächsten Schritt wird F3 gewählt. Die Features F2 und F4 haben jeweils negativ geschätzten Gesamtnutzen und scheiden daher für die Auswahl aus.

	e_{Mot}	e_{Abg}	g_{Mot}	g_{Abg}	geschätzter Gesamtnutzen
F1	1	10	-1	8	79
F2	10	-5	-1	8	-50
F3	10	2,5	-1	8	10
F4	-10	-2	-1	8	-6

Tabelle 5.1 Auswahl ohne Anpassung der Gewichtungsfaktoren

Die Auswahl bewirkt zwar ein Ansteigen der Temperatur im Abgastrakt, der dafür geschätzte Gesamteinfluss beträgt 12,5, sie verursacht aber auch ein weiteres Ansteigen der Motortemperatur, geschätzter Gesamteinfluss 11, was nicht gewollt ist.

Durch die Berücksichtigung der Auswirkungen der bereits gewählten Features in den Gewichtungsfaktoren wird die obige Auswahl verbessert. Die Ausgangssituation ist wie vorher. Im ersten Schritt wird, wie zuvor, F1 gewählt. Die geschätzten Gesamteinflüsse der gewählten Features werden gebildet (siehe Formel 5.2) und in den Gewichtungsfaktoren berücksichtigt (siehe Formel 5.3). Die neuen,

angepassten Werte sind in Tabelle 5.2 links dargestellt. Durch die neue Gewichtung besitzt F3 einen geschätzten Gesamtnutzen von 7,5 und nicht mehr 10, es wird nun also schlechter bewertet als im Iterationsschritt zuvor. F3 wird aber trotzdem gewählt, da es noch immer den größten geschätzten Gesamtnutzen der verbleibenden Features besitzt. Es folgt die Neuberechnung der geschätzten Gesamteinflüsse und der Gewichtungsfaktoren. Im dritten Iterationsschritt (siehe Tabelle 5.2 rechts) besitzt nun F4 einen positiv geschätzten Gesamtnutzen, dieser war zuvor noch negativ. Somit wird F4 gewählt. Die Werte werden erneut berechnet. F2 hat auch im vierten Iterationsschritt keinen positiv geschätzten Gesamtnutzen und wird nicht gewählt. Die Feature-Auswahl ist beendet.

	e_{Mot}	e_{Abg}	g_{Mot}	g_{Abg}	geschätzter Gesamtnutzen
F1	1	10	-1	8	79
F2	10	-5	-1	7	-45
F3	10	2,5	-1	7	7,5
F4	-10	-2	-1	7	-4

	e_{Mot}	e_{Abg}	g_{Mot}	g_{Abg}	geschätzter Gesamtnutzen
F1	1	10	-1	8	79
F2	10	-5	-2	7	-55
F3	10	2,5	-1	7	7,5
F4	-10	-2	-2	7	6

Tabelle 5.2 Zweiter (links) und dritter (rechts) Iterationsschritt des Auswahlverfahrens mit Anpassung der Gewichtungsfaktoren

Der geschätzte Gesamteinfluss der nun gewählten Features für die Motortemperatur beträgt 1 und nicht mehr 11, der für die Temperatur im Abgstrakt 10,5 statt 12,5. Die Abschwächung des negativen Effekts auf die Motortemperatur, im Vergleich zur Auswahl ohne Anpassung, wurde so möglich.

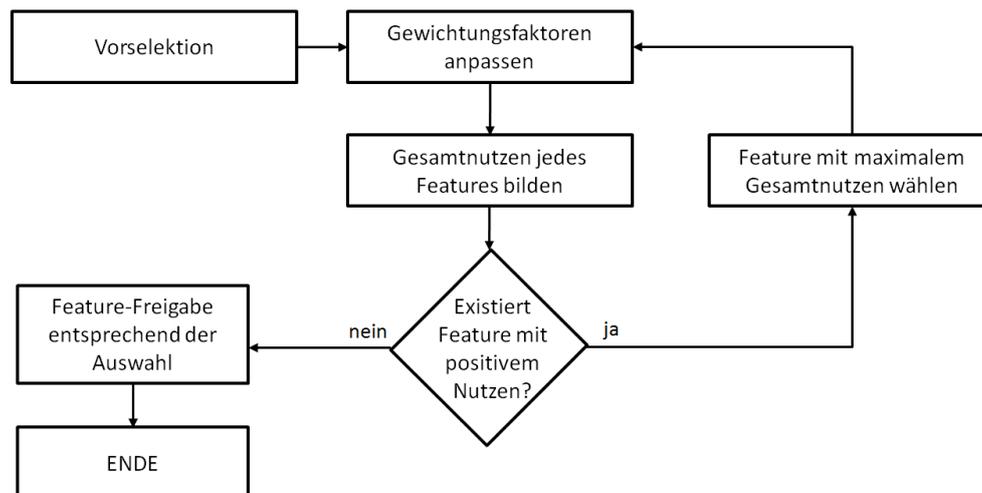


Abbildung 5.4 Ablauf der Feature-Auswahl

Der Ablauf des gesamten Auswahlverfahrens ist in Abbildung 5.4 als Flussdiagramm dargestellt. Erst wird die Vorselektion ausgeführt. Die Einflusswerte der hier ausgewählten Features werden in den Gewichtungsfaktoren berücksichtigt. Die Bildung des Gesamtnutzens der Features erfolgt im Anschluss daran. Existiert mindestens ein Feature mit positiv geschätztem Gesamtnutzen, so wird jenes mit dem größten gewählt. Es folgt die erneute Anpassung der Gewichtungsfaktoren. Der Vorgang wird solange ausgeführt, bis kein Feature mehr mit positiv geschätztem Gesamtnutzen verfügbar ist. Im Anschluss daran werden die gewählten Features freigegeben.

5.2.2. Diskussion der Anforderungen

Es wird nun beschrieben, wie das obige Konzept des Koordinators die zuvor beschriebenen Anforderungen erfüllt.

Die Koordinierung muss so erfolgen, dass Betriebsbedingungen eingehalten werden und der CO₂-Ausstoß minimiert wird.

Der Koordinator wertet für jedes Feature alle Einflusswerte aus. Nach jeder Feature-Wahl wird der Einfluss der gewählten Features in den Gewichtungsfaktoren berücksichtigt. Die Erfüllung von Hard Constraints (mit Ausnahme des Fahrerwunschemoments) ist durch die Vorselektion sichergestellt. Die Minimierung des CO₂-Ausstoßes und die Sicherstellung der Bereitstellung des Fahrerwunschemoments erfolgt im Auswahlalgorithmus.

Die Koordinierung muss zentral erfolgen.

Die Umsetzung des Koordinators ist in einem Modul vorgesehen. In den einzelnen Features sind Anpassungen notwendig, damit sie mit dem Koordinator zusammenarbeiten können.

Der aktuelle Systemzustand (z.B. Motortemperatur, gefordertes Moment usw.) muss bei der Auswahl der Features mitberücksichtigt werden.

Die Berücksichtigung der aktuellen Systemgrößen erfolgt über die Gewichtungsfaktoren.

Der Fahrzeughersteller (OEM) muss die Möglichkeit haben, die Entscheidungen des Koordinators durch Applikation zu beeinflussen.

Diese Einflusswerte können vom OEM applikativ verändert werden. Auch die Funktionen zur Generierung der Abweichungsfaktoren sind veränderbar. Eine andere Beeinflussung der Feature-Auswahl ist für den OEM nicht möglich.

Der Koordinator muss mit den, zur Verfügung stehenden, Ressourcen (Rechenzeit und Speicherbedarf) schonend umgehen.

Der Algorithmus wird in einem Durchlauf nur maximal so oft ausgeführt, wie Features koordiniert werden. Geplant ist der Einsatz des Koordinators für maximal 15 Features. Außerdem sind nur wenige Kennlinien, Variablen und Rechenoperationen notwendig. Der Ressourcenverbrauch sollte sich somit in Grenzen halten und kein Problem darstellen.

Das Verändern der Konfiguration der zu koordinierenden Features (Löschen, Hinzufügen) muss mit wenig Aufwand möglich sein.

Die Steuergeräte-Software verfügt je nach Projekt über unterschiedliche Features. In der Vorselektion können Feature-spezifische Anpassungen notwendig sein, falls es sich auf Hard Constraints auswirkt. Die Anbindung der Features an den Koordinator muss für neue Features durchgeführt werden.

Jedes Feature muss die Möglichkeit haben, seine Funktion selbst zu deaktivieren.

Ein Deaktivieren durch den Koordinator kann erst bei dessen nächstem Aufruf erfolgen. Ein sofortiges Deaktivieren ist möglich, indem die Freigabebedingung des Koordinators und die Freigabebedingung des Features selbst (beides logische Größen) gemeinsam das Aktivierungssignal des Features bilden. Der Einsatz des Features ist nur dann möglich, wenn beide Bedingungen erfüllt sind.

Die Steuerung der Features soll so erfolgen, dass ihr Aktivwerden durch den Koordinator verhindert oder verzögert werden kann.

Die Freigabe der Features erfolgt aufgrund des aktuellen Systemzustandes und ihrer Einflusswerte. Das Verhindern und Verzögern der Freigabe wird von der Vorselektion durchgeführt.

Der Koordinator soll die Kosten, welche beim Umschalten eines Features entstehen können, mitberücksichtigen.

Im Moment ist eine Berücksichtigung dieser Kosten nicht vorgesehen. In Kapitel 7.1 wird beschrieben, wie diese möglich wäre.

5.3. Prototypische Umsetzung des Feature-Koordinators

Bevor mit der Umsetzung begonnen wurde, wurden einige Software-Features ausgewählt, welche der Koordinator steuern soll. Starken Einfluss auf die Auswahl hatten die erwarteten Wechselwirkungen zwischen den Features, welche in Abschnitt 3.3.3 beschrieben sind. Zusätzlich sollten die gewählten Features, wenn möglich, in einem bestehenden Softwareprojekt verfügbar sein.

Der Koordinator wurde mit Hilfe eines LabCars getestet. Bei einem LabCar handelt es sich um eine spezielle Testumgebung, welche ein Fahrzeug simuliert. Ein LabCar kann verschiedene Fahrzeuge nachahmen, wobei für jedes ein eigenes Fahrzeugmodell benötigt wird. Damit können viele, aber nicht alle, Motorfunktionen simuliert und die entsprechenden Softwarefunktionen getestet und betrieben werden. Es war also auch wichtig, dass die gewählten Features am LabCar funktionsfähig sind.

Anhand der zuvor genannten Kriterien wurde für die prototypische Umsetzung ein Projekt gewählt, in welchem die Features *HMB* und *KAT-Heizen* verfügbar sind. Zusätzlich wurden die Features *PFLT-Regenerieren* und *Vorausschauendes Fahren*, welche in der Software nicht vorhanden sind, in vereinfachter Form implementiert. Die prototypische Umsetzung umfasst also fünf Features, bei dem gewählten Projekt handelt es sich um einen 8-Zylinder Ottomotor mit Direkteinspritzung.

5.3.1. Anwendungsszenarien

Für den Einsatz des Koordinators in Zusammenhang mit den gewählten Features wurden zwei Anwendungsszenarien erarbeitet. Szenario 1 ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Es zeigt eine Interaktion zwischen HMB und PFLT-Regenerieren. Zusätzlich werden die Streckeninformationen vom Feature vorausschauendes Fahren berücksichtigt.

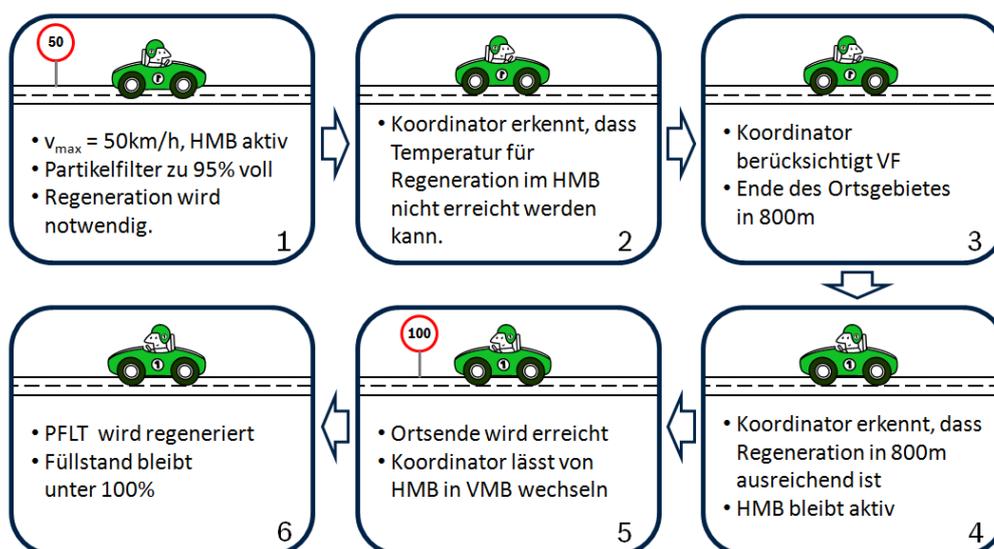


Abbildung 5.5 Anwendungsszenario 1, HMB und PFLT-Regenerieren

Das Fahrzeug bewegt sich im Ortsgebiet, die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt 50km/h, HMB ist aktiv. Der Partikelfilter meldet, dass er zu 95% voll ist und demnächst regeneriert werden muss. Der Koordinator stellt fest, dass die für das Regenerieren notwendige Temperatur nicht im HMB erreichbar ist. Durch Auswerten der Informationen von Vorausschauendem Fahren erkennt der Koordinator, dass in ca. 800m das Ortsgebiet verlassen wird und eine Geschwindigkeit von 100km/h erlaubt ist. Da ein Regenerieren in 800m ausreichend ist, wird die Regenerierung verzögert, HMB kann also länger aktiv bleiben. Am Ende des Ortsgebiets möchte der Fahrer auf 100km/h beschleunigen und es wird vom HMB in den VMB gewechselt. Die Regenerationstemperatur kann nun, da das vom Motor geforderte Drehmoment höher ist als bei 50km/h, leichter erzielt werden, der Filter wird regeneriert, ohne dass der Füllstand 100% erreicht. Zusätzlich wird noch der Verbrauch reduziert, da HMB länger aktiv bleibt und die notwendige Temperatur für das Regenerieren des PFLT bei größeren Drehmomentenanforderungen weniger zusätzliche Heizleistung benötigt.

Wird ohne Koordinator ein bestimmtes Füllstandniveau des PFLT erreicht, so wird HMB sofort verlassen und die Regenerierung eingeleitet. Ein Verschieben der Regeneration auf einen günstigeren Streckenabschnitt ist nicht möglich. Das Szenario zeigt, dass der Einsatz des Koordinators zu einer Kraftstoffeinsparung führen kann.

Im zweiten Anwendungsszenario ist eine Interaktion zwischen den Features HMB und KAT-Heizen beschrieben.

Das Fahrzeug wird am höchsten Punkt einer Passstraße abgestellt und nach einer Pause wieder in Betrieb genommen. Die Temperatur des Abgastraktes ist unterhalb des gewünschten Wertebereichs. Es folgt eine längere Bergabfahrt mit nur sehr geringen Momentenanforderungen. HMB ist möglich und der Koordinator gibt das Feature frei, um den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. Dadurch wird aber die Temperaturzunahme des Abgastraktes vermindert. Der Koordinator aktiviert in weiterer Folge KAT-Heizen, die Temperatur des Abgastraktes und der Kraftstoffverbrauch werden dadurch erhöht. Die Features HMB und KAT-Heizen sind also gleichzeitig aktiv. Der Kraftstoffverbrauch ist geringer als im VMB und die Temperatur des Abgassystems erreicht den gewünschten Wertebereich.

Ohne den Koordinator würde sofort vom HMB in den VMB gewechselt werden, sobald KAT-Heizen aktiviert wird. Das Abgassystem würde auch hier auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt werden, eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs ist aber nicht möglich.

5.3.2. Implementierung des Feature-Koordinators

Entwickelt wurde der Koordinator in der Entwicklungsumgebung ASCET, einem Entwicklungswerkzeug der Firma ETAS, welches in der Automobilbranche weit verbreitet ist. ASCET erlaubt es, den Signalfluss einer Funktion durch Blockdiagramme darzustellen und den entsprechenden C-Code automatisch zu generieren.

Einführung in ASCET

Anhand eines ASCET-Blockdiagramms (siehe Abbildung 5.6) werden die einzelnen ASCET-Symbole (a-h) nun erklärt. Alle Diagramme sind von links nach rechts zu lesen. Das dargestellte Blockdiagramm zeigt die Auswertung der Informationen von VF, welche in der Vorselektion erfolgt.

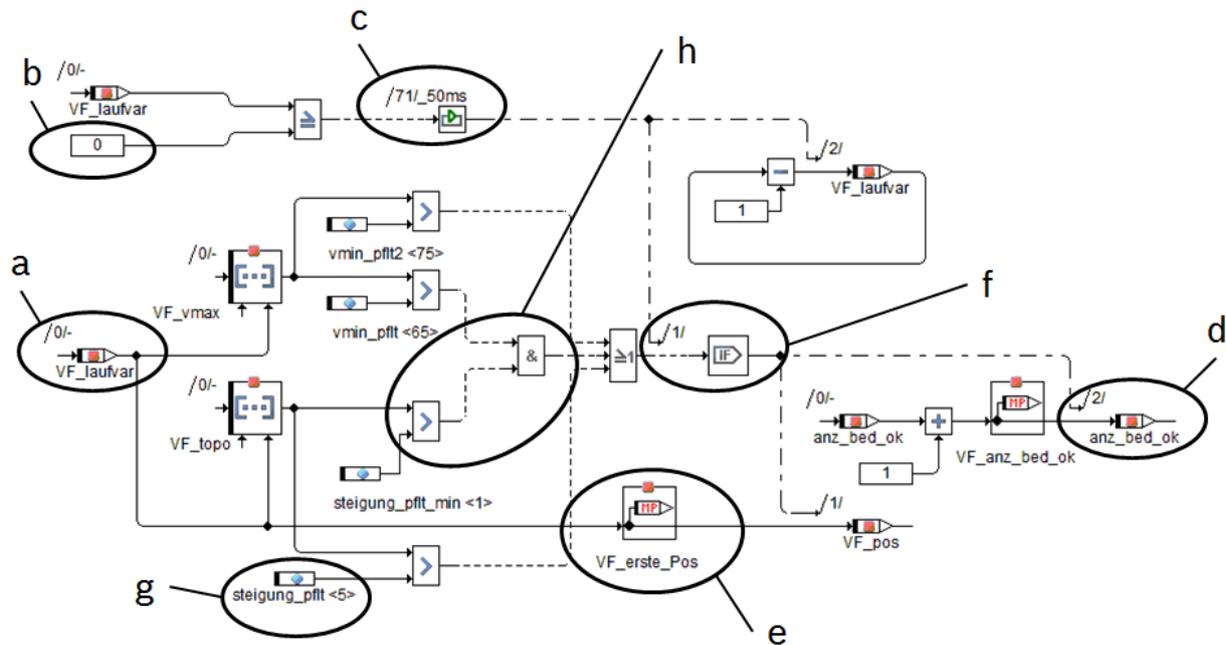


Abbildung 5.6 Blockdiagramm zur Erklärung der ASCET-Symbole

- stellt eine Variable dar, von der gelesen wird. Sie trägt den Namen *VF_laufvar*. Die Scheduling-Information der Variablen steht über dem Symbol (/0/-). Da von ihr gelesen wird, ist diese Information nicht notwendig, sie enthält also 0.
- ist das Symbol für einen Zahlenwert, in diesem Fall NULL. Dieser Wert kann nur im ASCET-Modell verändert werden. In weiterer Folge wird geprüft, ob *VF_laufvar* größer oder gleich dem Zahlenwert ist. Die Vergleichsoperation liefert TRUE, wenn die Bedingung erfüllt ist, andernfalls FALSE.
- zeigt eine WHILE-Schleife. Diese wird so lange ausgeführt, wie an ihrem Eingang TRUE anliegt (*VF_laufvar* \geq 0 ist). Über dem Schleifensymbol ist die Scheduling-Information angeführt. Man erfährt daraus, in welchem Prozess die Funktion ausgeführt wird, hier der *_50ms* Prozess. Durch die Zahl vor dem Prozess wird die Reihenfolge der einzelnen Aktionen festgelegt. Die WHILE-Schleife ist also die 71te Aktion des Moduls im *_50ms* Prozess. Die Aktionsnummer muss immer dann angeführt werden, wenn eine Variable beschrieben, eine IF-Abfrage abgearbeitet oder eine WHILE-Schleife ausgeführt wird. Die Nummernzuordnung muss eindeutig sein, keine Nummer darf mehrfach vergeben werden.
- stellt eine Variable dar, auf die geschrieben wird. Der Schreibvorgang ist von einer IF-Abfrage abhängig, was durch die Verbindung der Variablen zur Abfrage dargestellt ist. Bei abhängigen Aktionen wird in der Scheduling-Information die Reihenfolge angegeben, in der sie ausgeführt werden, vorausgesetzt die Aufrufbedingung ist erfüllt. Die Zuordnung zum Prozess und zum globalen Scheduling erfolgt über die Ausführbedingung, in diesem Fall über die WHILE-Schleife. Die Aktion wird also ausgeführt, wenn die WHILE-Schleife durchlaufen wird und die Bedingung der IF-Abfrage (f) erfüllt ist.
- beinhaltet das Symbol für einen Messpunkt. Ein Messpunkt stellt den Wert jener Variablen dar, auf die von ihm aus geschrieben wird, hier also *VF_pos*.
- ist eine IF-Abfrage. Ist die Bedingung an ihrem Eingang TRUE, so werden die, von ihr abhängigen, Aktionen ausgeführt, andernfalls nicht.

- g. symbolisiert einen Applikationsparameter. Diese Parameter können zur Laufzeit manuell manipuliert werden. Er hat den Namen `steigung_pflt` und den Wert 5.
- h. beinhaltet logische Operationen. Vergleichsoperationen überprüfen ihre Eingänge und liefern TRUE, wenn die Bedingung erfüllt ist, und FALSE, wenn sie nicht erfüllt ist. Verglichen wird immer der obere mit dem unteren Eingang. Hier wird also überprüft, ob der Inhalt des Feldes `VF_topo` an der Position `VF_laufvar` größer als `steigung_pflt_min` ist. Die &- und die ≥ 1 -Operationen sind äquivalent zu UND- und ODER-Gattern. Mathematische Operationen werden durch die Symbole +, -, / und x dargestellt.

Allen Variablen, Applikationsparametern, Messpunkten, Kennlinien und Kennfeldern muss ein Wertebereich zugewiesen werden. Zusätzlich ist es möglich, ihnen eine physikalische Größe zuzuteilen, z.B. km/h oder mg/s.

Gesamtübersicht

In Abbildung 5.7 ist die Gesamtübersicht der Umsetzung des Koordinators in einem Blockdiagramm dargestellt. Die Eingangsgrößen des Koordinators werden in die Einflussfunktionen, in die Zielfunktion und in `PFLT_fuellstand` geleitet. Diese Blöcke leiten wiederum ihre Ausgangsgrößen, die Gewichtungsfaktoren, die Einflusswerte und den Füllstand des Partikelfilters an den Auswahlalgorithmus weiter, wo dann die Auswahl der Features erfolgt.

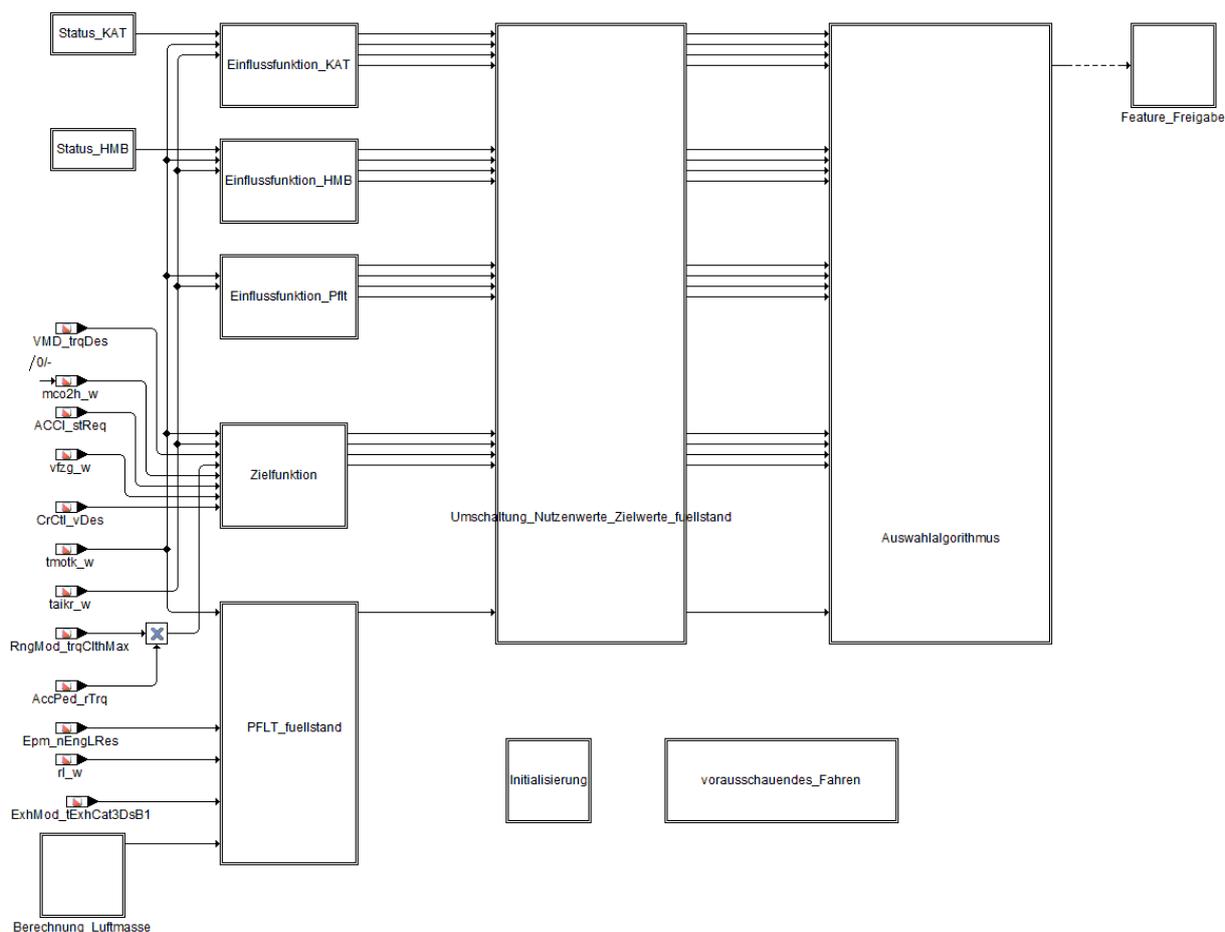


Abbildung 5.7 Gesamtübersicht Feature-Koordinator

Steht die Feature-Auswahl, welche vom Algorithmus getroffen wurde, fest, so wird das Ergebnis an den Block `Feature_Freigabe` weitergeleitet, wo die Freigabe der Features erfolgt. Eine Beschreibung

der Eingangsgrößen ist Tabelle 5.3 zu entnehmen. Das Produkt von RngMod_trqClthMax und AccPed_rTrq entspricht dem maximal möglichen Antriebsmoment.

Der Block *Umschaltung_Nutzenwerte_Zielwerte_fuellstand* ist ausschließlich zu Testzwecken implementiert und hat im Normalbetrieb keine Auswirkung auf das System. Er ermöglicht es, die Eingangsgrößen des Auswahlalgorithmus per Applikation festzulegen. Dadurch kann seine Funktion einfacher getestet werden.

Die einzelnen, in Abbildung 5.7 abgebildeten, Funktionsblöcke und deren Subblöcke werden nun im Detail erläutert. Die Beschreibung der Blöcke erfolgt so, dass sie der Reihenfolge beim Ausführen des Programms entspricht. Alle Blockdiagramme des Koordinators sind im Anhang A dargestellt.

Initialisierung

Die Variablen werden bei erneutem Funktionsaufruf nicht automatisch auf ihren Default-Wert zurückgesetzt. Daher muss jedes Mal, wenn die Funktion aufgerufen wird, der Block *Initialisierung* ausgeführt werden. In diesem wird die Initialisierung der Variablen durchgeführt.

Eingangsgröße	Beschreibung
VMD_trqDes	gefordertes Antriebsmoment, entspricht dem Sollmoment
mco2h_w	CO2-Ausstoß des Fahrzeuges in kg/h
ACCI_stReq	Status der ACC (aktiv, inaktiv, usw.)
vfzg_w	aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit
CrCtl_vDes	geforderte Geschwindigkeit des Tempomats / der ACC
tmotk_w	Motortemperatur
taikr_w	Abgastemperatur vor Katalysator
RngMod_trqClthMax	Maximales Kupplungsmoment
AccPed_rTrq	Faktor der Übersetzung des Motormoments
Epm_nEngLRes	Motordrehzahl
rl_w	angesaugte Luftmenge
ExhMod_tExhCat3DsB1	Temperatur des Katalysators
B_khakt_Fl	Information, ob KAT-Heizen betriebsbereit ist
B_hmbs_Fl	Information, ob HMB betriebsbereit ist
UEGO_rLamS1B1	aktuelles λ
msabg_w	Abgasmassenstrom, beschreibt Menge des aus den Zylindern ausgestoßenen Abgases

Tabelle 5.3 Eingangsgrößen des Feature-Koordinators

Vorausschauendes_Fahren

Nach der Initialisierung erfolgt die Übernahme der Werte für das Feature Vorausschauendes Fahren. Dieses Feature wurde folgendermaßen umgesetzt: Es wurden zwei Felder, jedes mit einer Größe von zehn, angelegt. In dem einen Feld werden die Informationen über die erwartete Geschwindigkeit, in dem anderen die Informationen über die Topologie (durchschnittliche Steigung und Gefälle) der Wegstrecke, abgespeichert. Jeder Wert entspricht dem erwarteten Durchschnittswert auf einer Wegstrecke von 100m. Die Werte selbst werden per Applikation im Block *Vorausschauendes_Fahren* eingetragen.

Berechnung_Luftmasse

In diesem Block wird die Luftmasse im Abgas berechnet, diese wird für die anschließende Berechnung des Partikelfilterfüllstandes benötigt. Das λ wird um 1 reduziert, wodurch sich ein Faktor für die überschüssige Luft im Zylinder ergibt. Ist dieser Wert größer als null, so wird er mit der Abgasmasse

multipliziert. Andernfalls befindet sich nur sehr wenig Frischluft im Abgas und der Wert beträgt null. Das Ergebnis liefert die Luftmasse in der Abgasmasse. Da der Wert in kg/h vorliegt, dieser aber in mg/s benötigt wird, wird die Luftmasse noch mit dem Faktor 277,77 multipliziert.

PFLT_fuellstand

Im nächsten Schritt wird der Füllstand des Partikelfilters berechnet. Die Partikelemission ist abhängig von der Motortemperatur, der Motordrehzahl und der angesaugten Luftmasse. Erst wird die aktuelle Partikelemission gebildet. Diese wird dann mit 0,05 multipliziert, um den Durchschnittswert der Emission für 50ms zu erhalten und in der Variable *rohmission* gespeichert. Parallel dazu wird jene Partikelmasse berechnet, welche im PFLT abgebrannt wird. Dieser Wert hängt vom Füllstand des PFLT, von seiner Temperatur und von der Luftmasse im Abgas ab. Die beiden Werte werden dann subtrahiert und zum Füllstand aufintegriert. Wenn der PFLT regeneriert wird, muss die Temperatur des Filters angehoben werden. Da das Fahrzeugmodell des Testplatzes ein Erhöhen der Temperatur im Abgastrakt nicht zulässt, wurde ein Zähler für das Regenerieren eingebaut. Wird das bit_1 gesetzt (PFLT-Regenerieren aktiv), so wird die Variable *pflt_reg_aktiv* alle 50ms um 1 inkrementiert, bis sie 200 überschreitet. Ein vollständiges Regenerieren dauert also hier 10 Sekunden. Dann wird der Füllstand auf null zurückgesetzt und der Regenerationsvorgang ist abgeschlossen.

Zielfunktion

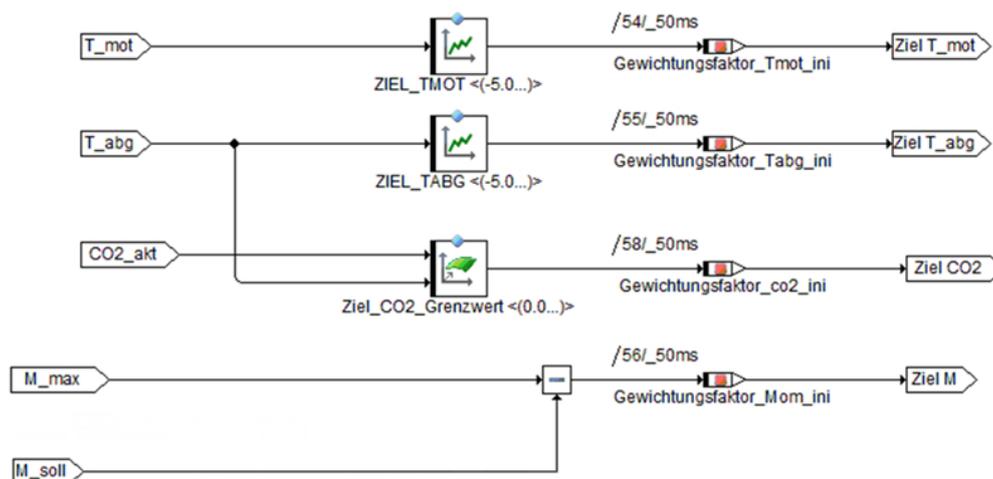


Abbildung 5.8 Generierung der Gewichtungsfaktoren

In Abbildung 5.8 ist die Generierung der Gewichtungsfaktoren dargestellt. Die Gewichtungsfaktoren für die Abgas- und die Motortemperatur werden über jeweils eine Kennlinie aus den aktuellen Istwerten gebildet. Beide Zielgrößen haben einen bestimmten gewünschten Betriebsbereich mit einem Minimal- und einem Maximalwert. Außerhalb des jeweiligen Bereiches sind die Gewichtungsfaktoren groß, innerhalb der Grenzen klein. Der Gewichtungsfaktor für den CO₂-Ausstoß wird über ein Kennfeld gebildet, welches als Eingangsgrößen den aktuellen CO₂-Ausstoß und die Temperatur im Abgastrakt hat. So kann bei geringer Abgastemperatur ein höherer Verbrauch toleriert werden, um z. B. das Abgassystem schneller auf Betriebstemperatur zu bringen. Die Funktion, anhand der der Gewichtungsfaktor für die Abgastemperatur gebildet wird, ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Sie liefert für Temperaturwerte unterhalb der Mindesttemperatur negative, für Temperaturwerte über der maximalen Betriebstemperatur positive Gewichtungsfaktoren. Im gewünschten Intervall liegt der Faktor nahe null.

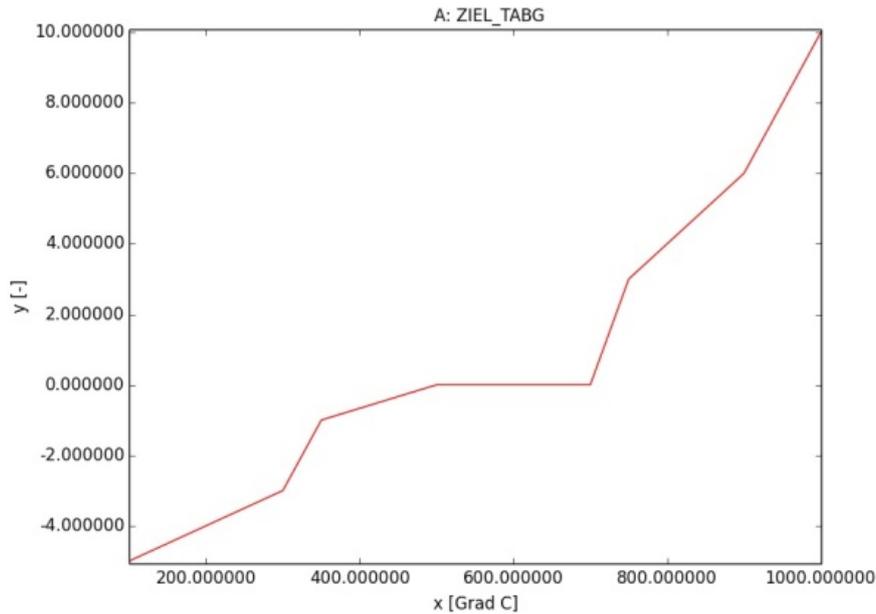


Abbildung 5.9 Zielfunktionen für die Abgastemperatur

Der Gewichtungsfaktor für das Moment wird als absoluter Wert in Nm berücksichtigt. Dabei wird vom Maximalmoment das Fahrerwunschmodent abgezogen. Das Ergebnis kann als Momentenreserve angesehen werden, welche von den Features durch Momentenreduktion aufbrauchbar ist.

Status_KAT und Status_HMB

Features können Abbruchbedingungen unterliegen und somit nicht nach Belieben eingesetzt werden. Im Normalbetrieb würde ein Feature, wenn es nicht betriebsbereit ist, für seine Einflusswerte null übergeben. Da die Generierung der Werte aber im Koordinator erfolgt, wurden für die Features Betriebsbereitschaftssignale eingeführt. In Abhängigkeit von diesen werden entweder die korrekten Einflusswerte oder 0 an den Auswahlalgorithmus übergeben.

Beide Blöcke bieten die Möglichkeit, den Betriebsstatus der Features per Applikation zu beeinflussen. Dies erleichtert den Softwaretest, da die Features viele Abbruchbedingungen besitzen und so deren Umgehung möglich ist.

Bei der vereinfachten Implementierung des PFLT wurde auf das Betriebsbereitschaftssignal verzichtet. Ein Regenerieren des PFLT ist also aus Sicht des Features immer möglich.

Einflussfunktion_KAT, Einflussfunktion_HMB und Einflussfunktion_PFLT

Die Generierung der Einflusswerte der Features wurde, da dadurch weniger Anpassungen in den einzelnen Features selbst notwendig sind, nicht in den Features, sondern im Koordinator umgesetzt. Für jedes Feature werden, teils aus Kennlinien, teils aus Applikationswerten die Einflusswerte bestimmt. Als Eingangsgröße für die Features dienen die Motor- und die Abgastemperatur sowie der PFLT-Füllstand. Die Einflusswerte eines Features werden, mit Ausnahme jener von PFLT-Regenerieren, nur dann weitergegeben, wenn sein Betriebsbereitschaftssignal „TRUE“ ist, andernfalls wird für seine Werte null übergeben.

Die Bedatung der Einflussfunktionen ist im Anhang B unter „Kennlinien und Kennfelder“ zu finden.

Auswahlalgorithmus

Die Implementierung des Auswahlalgorithmus ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Bevor dieser abgearbeitet wird, wird die Vorselektion, dargestellt in Abbildung 5.10 ohne Berücksichtigung von VF, ausgeführt. Von den gewählten Features wird nur PFLT-Regenerieren durch die Vorselektion beeinflusst. Seine Einflusswerte werden nur dann an den Auswahlalgorithmus übergeben, wenn der Filter zu einem bestimmten Grad, der Wert ist über die Applikationsparameter *PFLT_GW1* einstellbar, gefüllt und ein Regenerieren aus Sicht von Vorausschauendem Fahren sinnvoll ist. Wie bereits erwähnt, liefert VF die Streckeninformationen in zwei Feldern. Diese Felder werden nach günstigen Streckenabschnitten durchsucht, wobei die Festlegung, was ein günstiger Streckenabschnitt ist, über die Größen *vmin_pflt*, *vmin_pflt2*, *steigung_pflt* und *steigung_pflt_min* applizierbar ist. Für jedes günstige Streckensegment wird die Variable *anz_bed_ok* um eins erhöht und die Position im Feld in der Variablen *VF_pos* vermerkt. Nur wenn mehr als zwei günstige Abschnitte gefunden wurden und *VF_pos* gleich 0 ist, also ein günstiger Abschnitt unmittelbar bevorsteht, erfolgt eine Freigabe von PFLT-Regenerieren durch VF.

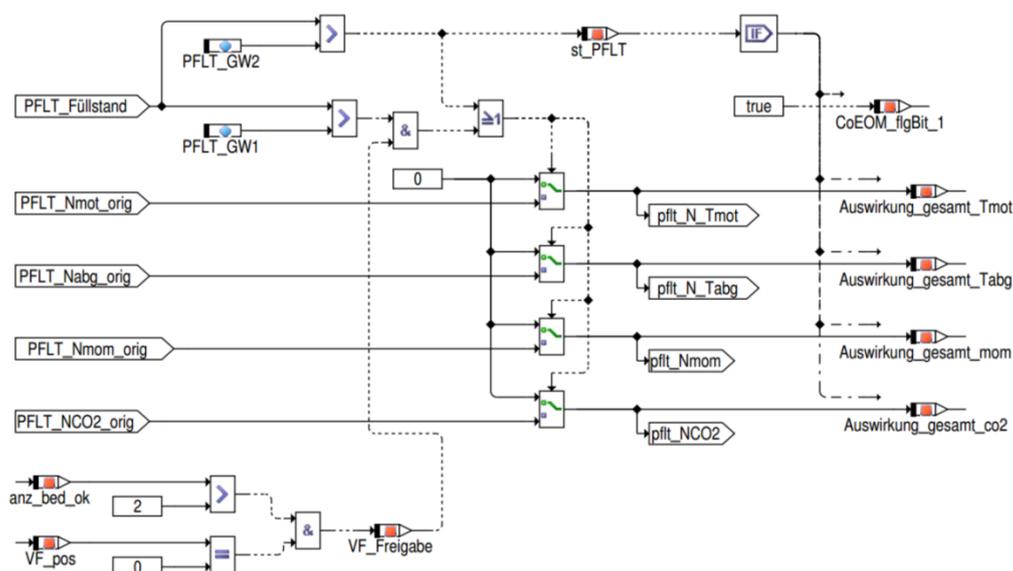


Abbildung 5.10 Vorselektion

Überschreitet der Füllstand einen bestimmten Wert (Applikationsparameter *PFLT_GW2*), so kann das Regenerieren nicht mehr weiter aufgeschoben werden. In diesem Fall wird das Feature sofort aktiv geschaltet und der Gesamteinfluss der gewählten Features mit den Einflusswerten von PFLT-Regenerieren initialisiert. Dies ist notwendig, damit die Auswirkungen des Features sofort in den Gewichtungsfaktoren für die Auswahl der weiteren Features berücksichtigt werden können.

Nachdem die Vorselektion abgeschlossen ist, beginnt der eigentliche Auswahlalgorithmus. Als erstes erfolgt die Berechnung der Gewichtungsfaktoren (für Motortemperatur, Abgastemperatur und CO₂-Ausstoß). Dazu werden die Gewichtungsfaktoren aus dem Block *Zielfunktion* mit Faktoren, die durch die Gesamteinflüsse der, bereits gewählten, Features gebildet wurden, multipliziert. Die Gesamteinflüsse werden durch Aufsummieren der Einzeleinflüsse der, bereits gewählten, Features berechnet. Anschließend erfolgt die Umrechnung auf einen Faktor über die Kennlinie *Auswirkung_Faktor*.

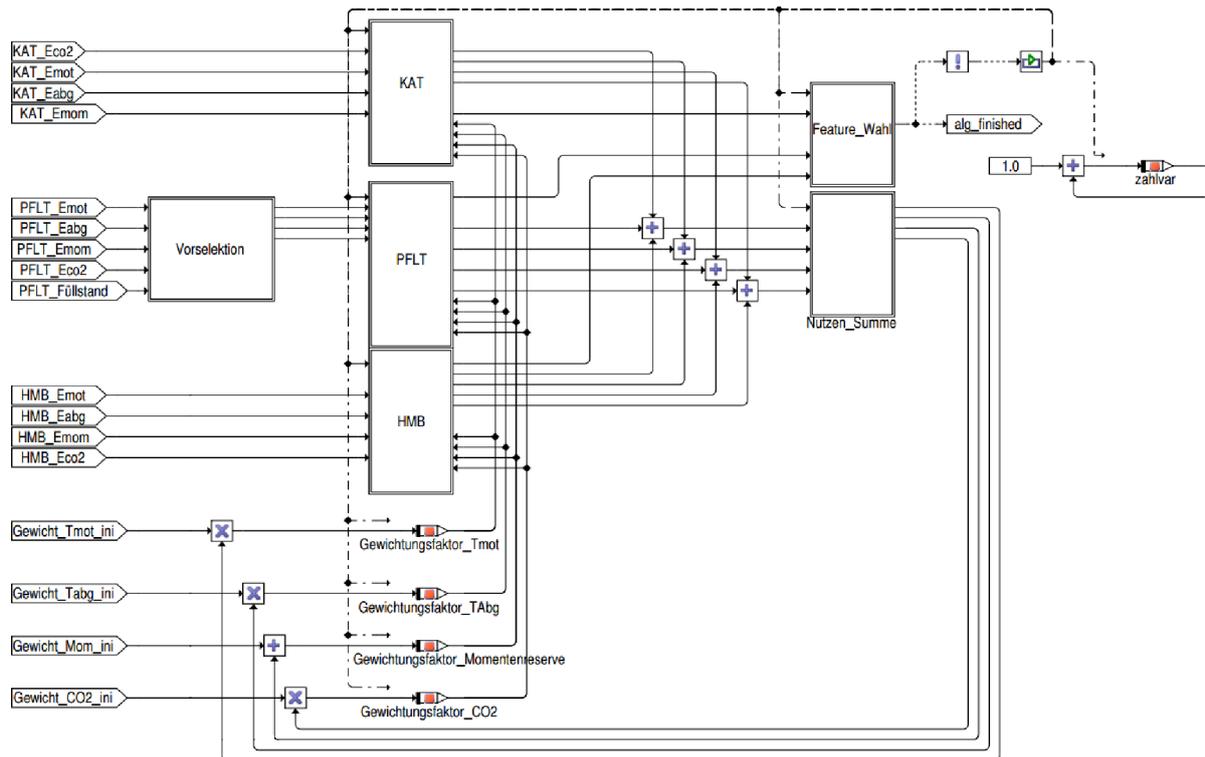


Abbildung 5.11 Gesamtansicht des Auswahlalgorithmus

So werden die, für diesen Iterationsschritt gültigen, Gewichtungsfaktoren gebildet. Da der Gewichtungsfaktor für das Moment in absoluten Zahlen vorliegt, wird er durch Addition mit dem Gesamteinflusswert der gewählten Features auf das Moment gebildet.

Das Vorzeichen der Gewichtungsfaktoren wird bereits im Block *Zielfunktion* festgelegt. Ein Vorzeichenwechsel im Auswahlalgorithmus ist nicht möglich. Dies ist auch notwendig, da dies sonst zur Wahl eines falschen Features führen könnte. Verbessert beispielsweise ein Feature einen Gewichtungsfaktor so stark, dass dieser sein Vorzeichen wechselt, so würden nun Features, welche sich negativ auf die Zielgröße auswirken, vom Algorithmus als positiv interpretiert werden.

Zur Bildung des Nutzenwertes für das Moment wird im Block *Momentenanpassung* (siehe Abbildung 5.12) überprüft, ob die Momentenreserve größer ist als die Momentenreduktion des Features. Die Momentenreduktion des Features entspricht dessen Einflusswert auf das Moment. Ist dies der Fall, wird ein Nutzenwert von -250 eingestellt, um die Wahl des Features zu verhindern. Andernfalls wird der Wert über die Kennlinie *Nutzen_MOM* gebildet.

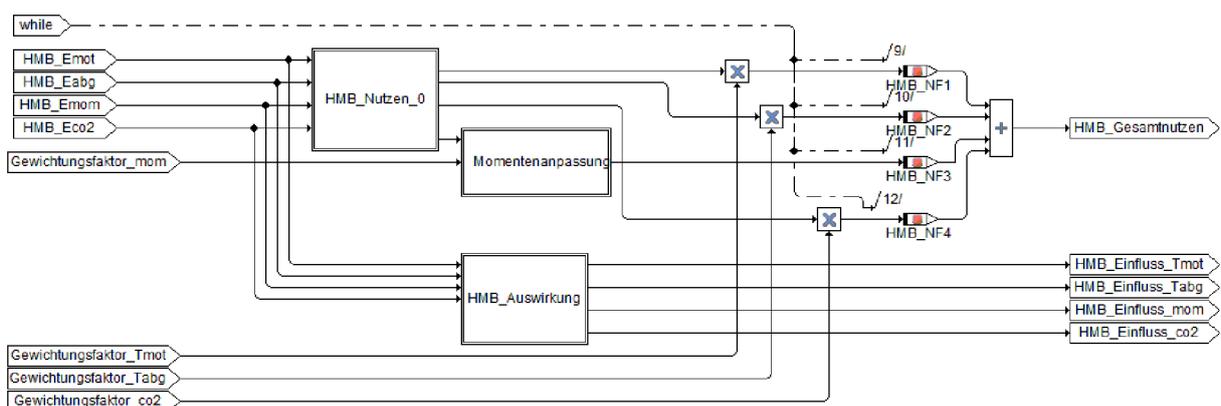


Abbildung 5.12 Subblock HMB, ident aufgebaut wie die Blöcke KAT und PFLT

Nach Bildung der Gewichtungsfaktoren werden sie mit den zugehörigen Einflusswerten der Features, mit Ausnahme jenes Wertes für das Moment, in den Subblöcken *KAT*, *HMB* und *PFLT* multipliziert. Diese Werte werden summiert (siehe Formel 5.1) und das Ergebnis an den Subblock *Feature_Wahl* weitergeleitet.

Die Blöcke *HMB*, *KAT* und *PFLT* sind identisch aufgebaut, ihre Funktionsweise wird daher nur einmal beschrieben.

Im Block *HMB_Nutzen_0* (Abbildung 5.12) erfolgt die Umschaltung der Einflusswerte des Features auf null, wenn es vom Algorithmus gewählt wurde. Dies bewirkt, dass der Gesamtnutzen des Features, unabhängig von den Gewichtungsfaktoren, ab dem nächsten Iterationsschritt stets gleich null ist. Würde diese Umschaltung nicht erfolgen, so wählt der Algorithmus in jedem folgenden Iterationsschritt dasselbe Feature, was zu einer Endlosschleife führt. Gleichzeitig mit dem „Auf null Schalten“ der Einflusswerte durch den Block *HMB_Nutzen_0*, werden im Block *HMB_Auswirkung* die Einflusswerte von null auf den tatsächlichen Wert umgeschaltet. Dadurch können die Einflusswerte der gewählten Features im Block *Nutzen_Summe* aufaddiert und zu Beginn des nächsten Iterationsschrittes in den Gewichtungsfaktoren berücksichtigt werden.

Im Block *Feature_Wahl*, dargestellt in Abbildung 5.13, wird ermittelt, welches Feature den größten geschätzten Gesamtnutzen hat. Ist der größte Wert kleiner als null, so wird der Algorithmus beendet. Andernfalls wird ermittelt, welches Feature zu diesem Wert gehört und das entsprechende Bit (*bit_0*, *bit_1* oder *bit_2*) gesetzt. Durch das Setzen des Bits wird vermerkt, welches Feature bereits gewählt und nach Abschluss der Feature-Auswahl aktiviert wird.

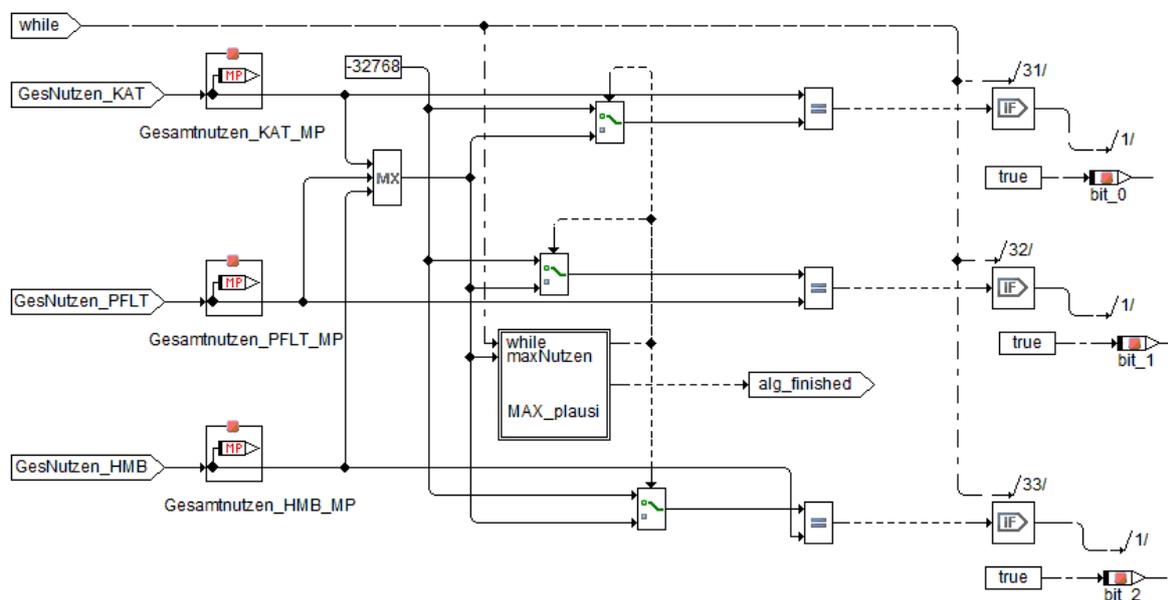


Abbildung 5.13 Subblock *Feature_Wahl*

Sobald der Auswahlalgorithmus beendet ist, werden die Werte der Bits (*bit_0*, *bit_1* und *bit_2*) im Block *Feature_Freigabe* auf die Variable *CoEOM_stchoice* geschrieben. In Abhängigkeit von dieser Variable werden die Features aktiviert.

5.4. Anpassung der Features und Abweichungen vom Konzept

Inhalt dieses Unterkapitels sind die notwendigen Anpassungen der Features, damit sie mit dem Koordinator zusammenarbeiten können. Das in Unterkapitel 5.2 vorgestellte Konzept des Feature-Koordinators wurde leicht abgewandelt implementiert. Die Unterschiede werden ebenfalls hier beschrieben.

5.4.1. Abweichungen vom Konzept

Das Feature VF wird nur in der Vorselektion berücksichtigt. Die Entscheidung ob es aktiviert werden soll liegt nicht beim Koordinator, VF stellt immer Informationen zur Verfügung. VF wirkt sich dabei nur auf PFLT-Regenerieren aus.

Da PFLT-Regenerieren nur vereinfacht implementiert und in keinem eigenen Modul umgesetzt ist, werden seine Einflusswerte im Koordinator generiert. Die Generierung der Einflusswerte der Features HMB und KAT-Heizen werden ebenfalls im Koordinator durchgeführt, weil dies weniger Anpassungen in den Features selbst erfordert. Features können aber einer Vielzahl an Abbruchbedingungen unterliegen, deren Berücksichtigung in den Einflusswerten notwendig ist. Da der Koordinator diese Bedingungen nicht kennt, wurden Betriebsbereitschaftssignale für KAT-Heizen und HMB eingefügt, welche sie berücksichtigen. Die Signale werden in den Features gebildet und an den Koordinator übergeben. Per Applikation können die Abbruchbedingungen umgangen werden, um den Softwaretest zu erleichtern.

Auf den Gewichtungsfaktor für das Moment wurde verzichtet, da die Durchführung der Multiplikation mit 1 nicht notwendig ist.

5.4.2. Anpassungen der Features

HMB signalisiert den anderen Software-Modulen über die Bitgröße B_hmbs, dass es aktiv ist. Diese Variable wurde in B_hmbs_FI umbenannt und dient nun als Betriebsbereitschaftssignal für HMB. Für das Bit B_hmbs wird der Wert des 2. Bits der Variable CoEOM_stchoice übernommen, welches im Koordinator gesetzt wird.

In der ursprünglichen Software-Implementierung des HMB kann es nur dann aktiv sein, wenn KAT-Heizen inaktiv ist. Da hart codierte Abhängigkeiten der Features untereinander nicht gewollt sind (der Koordinator soll diese berücksichtigen), wurden sie entfernt. Zusätzlich unterliegt HMB einer Reihe weiterer Bedingungen, unter denen es nicht aktiv sein kann. Da der Koordinator die Möglichkeit bietet, die Zielgrößen bei der Feature-Auswahl zu berücksichtigen, wurden alle Abhängigkeiten des HMB von den Zielgrößen entweder im Software-Modul selbst oder durch Applikation entfernt.

Über die Bitgröße B_khakt signalisiert KAT-Heizen den anderen Software-Modulen, dass es aktiv ist. Sie wurde in B_khakt_FI umbenannt. Das Bit B_khakt wird nun in Abhängigkeit des Bit 0 der Variable CoEOM_stchoice gesetzt. Da die Aktivierung von KAT-Heizen in erster Linie von der Temperatur im Abstrakt abhängt, diese Größe aber durch den Koordinator beeinflusst wird, soll es immer möglich sein und vom Koordinator, wenn nötig, freigegeben werden. Die Umschaltung im ASCET-Block Status_KAT auf den Applikationswert ist also immer aktiv (siehe Applikation in Anhang B).

Wie bereits erwähnt, wurde das Feature PFLT-Regenerieren vereinfacht implementiert, da es in der Software nicht integriert ist. Die Partikelemission wird stark vereinfacht berechnet, ebenso die Reduktion der Partikel im Filter. Das Regenerieren des Filters wurde über einen Zähler realisiert, da eine Beeinflussung der Abgastemperatur am LabCar nicht möglich ist. Neben der Temperaturerhöhung wäre auch ein Eingriff in die Drosselklappenstellung notwendig, um $\lambda > 1$ zu erzeugen.

6. Evaluierung des Feature-Koordinators

Der Vergleich der Software Funktion der Software mit und ohne Koordinator erfolgt in diesem Kapitel. Anhand von Messungen wird das Verhalten der Software mit Feature-Koordinator gezeigt. Das Softwareverhalten ohne Koordinator wird im Vergleich dazu beschrieben.

Die Messungen wurden auf einem LabCar durchgeführt. Ein Ausschnitt der Benutzeroberfläche des LabCar-Modells ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Das Modell ermöglicht verschiedene Fahrzeugparameter wie die Gaspedalstellung, Umgebungstemperatur oder Fahrzeuggeschwindigkeit manuell einzustellen. Die Motorsteuergeräte-Software reagiert auf diese Einstellungen entsprechend, wodurch sich wiederum Werte des Modells ändern. Ein geschlossener Regelkreis wird auf diese Weise gebildet. Wird z.B. das Gaspedal betätigt, so öffnet die Steuergeräte-Software die Drosselklappe weiter und erhöht die Einspritzmenge. Das Modell, welches das Fahrzeug simuliert, erhöht dann die angesaugte Luftmenge und die Motordrehzahl entsprechend.

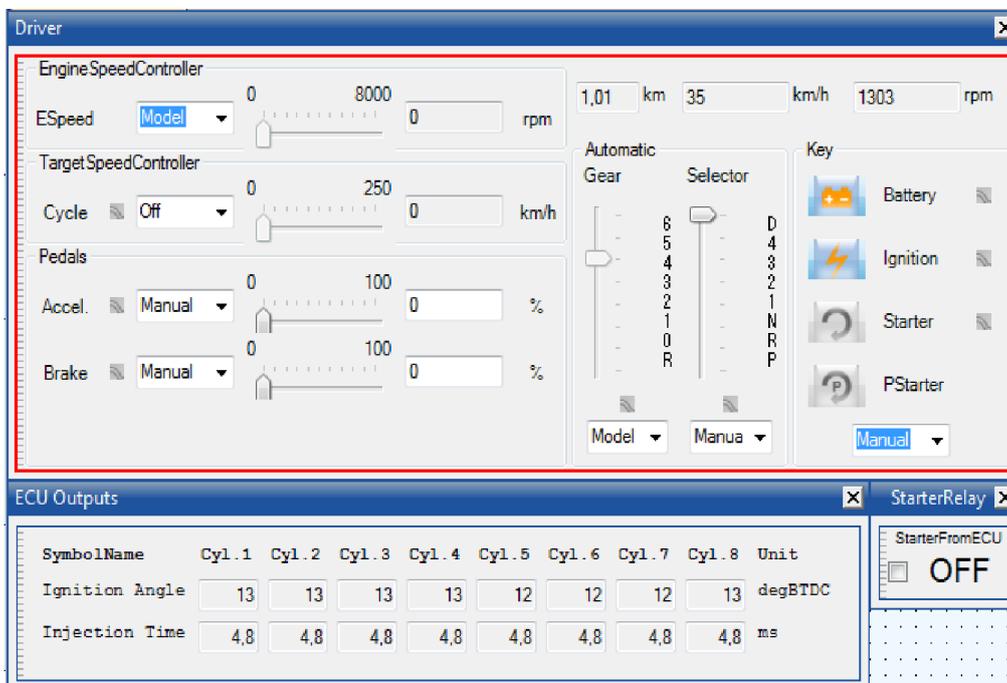


Abbildung 6.1 Benutzeroberfläche des LabCar-Modells

Mit dem Programm INCA der Firma ETAS ist es möglich, die Variablen der Software zur Laufzeit zu messen und die Applikationsparameter zu verändern. Ein Ausschnitt der Messumgebung ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Rechts neben jeder Variablen und jedem Applikationsparameter befindet sich der zugehörige numerische oder logische Wert. Die Messungen können aufgezeichnet und anschließend grafisch ausgewertet werden.

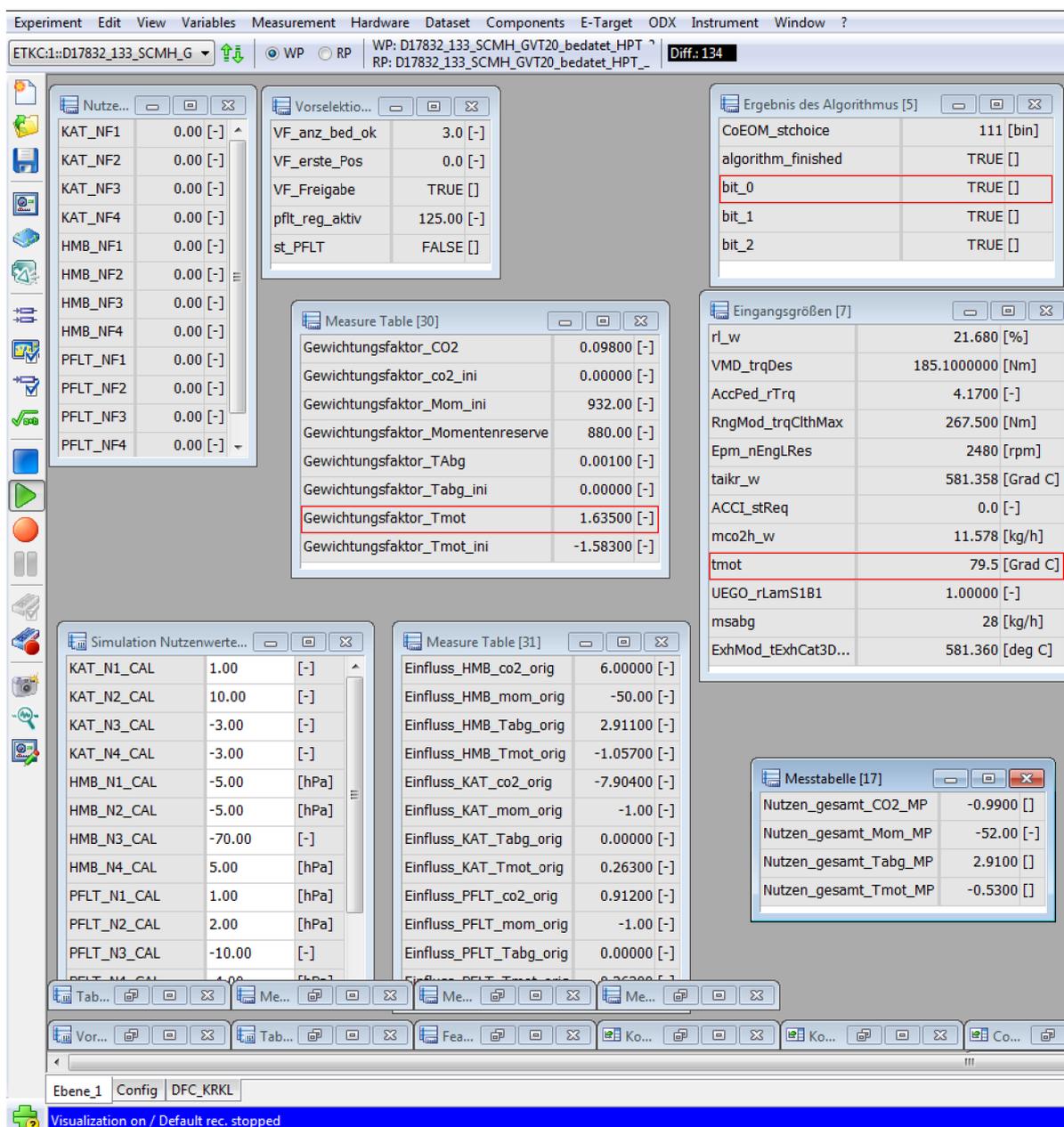


Abbildung 6.2 INCA-Messumgebung

Anhand von zwei Messungen soll veranschaulicht werden, wie der zentrale Feature-Koordinator das Systemverhalten verbessert. In der ersten Messung, gezeigt in Abbildung 6.3, ist der gemeinsame Einsatz von HMB und KAT-Heizen dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung sind die Motortemperatur (linke Skala) und der CO₂-Ausstoß (rechte Skala), im unteren Teil sind relevante, logische Größen abgebildet. Ist *HMB aktiv* TRUE, so ist das Feature HMB in Betrieb, *HMB möglich* zeigt an, dass das Feature betriebsbereit ist. *Kat-Heizen aktiv* signalisiert wenn es TRUE ist, dass das Feature aktiv ist. Der CO₂-Ausstoß unterliegt einer Schwankung, welche vom Fahrzeugmodell verursacht wird. Außerdem wird darin nicht der Mehrverbrauch, welcher von KAT-Heizen verursacht wird, berücksichtigt, was ebenfalls auf das Modell zurückzuführen ist.

Sowohl Motor wie auch Abgassystem müssen zu Beginn der Messung möglichst schnell auf Betriebstemperaturen gebracht werden. Da sich KAT-Heizen positiv auf die Motor- und vor allem auf die Abgassystemtemperatur auswirkt, wird das Feature vom Auswahlalgorithmus gewählt und anschließend aktiviert. HMB ist zu jeder Zeit der Messung möglich und signalisiert dies dem Koordinator. Da

es sich aber aus aktueller Sicht negativ auswirkt, wird es noch nicht vom Auswahlalgorithmus für die Aktivierung gewählt. Die Motortemperatur steigt, der CO₂-Ausstoß sinkt, da die Reibungsverluste des Motors mit steigender Temperatur abnehmen. Bei einer Motortemperatur von ungefähr 80°C wird HMB aktiviert. Da beim Umschalten auf HMB eine große Momentenreserve aufgebaut werden muss, steigt der CO₂-Ausstoß stark an, sinkt nach dem Umschalten aber stark. Der kurzzeitige Verbrauchsanstieg wurde in der Heuristik vernachlässigt. Sobald Motor- bzw. Abgassystem ihre notwendige Temperatur erreicht haben wird KAT-Heizen deaktiviert, da sein Gesamtnutzen nicht mehr positiv ist.

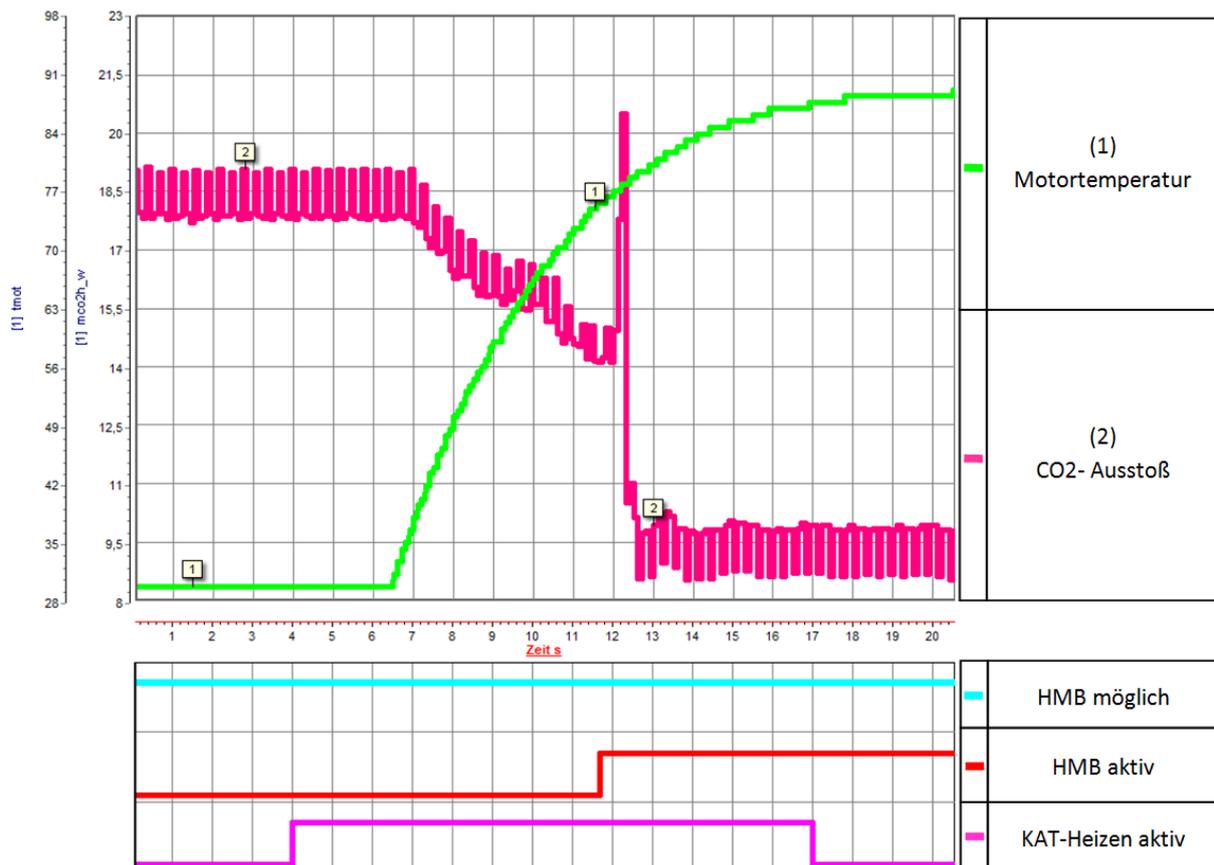


Abbildung 6.3 Gemeinsamer Einsatz von HMB und KAT-Heizen

Die Entwicklung des Gesamtnutzens der beiden Features ist in Tabelle 6.1 dargestellt. Die angeführten Zahlenwerte wurden extrapoliert und entsprechen nicht den tatsächlichen Werten, diese können nicht mitgemessen werden, sie veranschaulichen aber deren Veränderung.

Durch Annäherung der Ist- an die Solltemperatur nimmt die Dominanz des Gewichtungsfaktors für die Temperatur, bei der Berechnung des Gesamtnutzens der Features, gegenüber den anderen ab. Gleichzeitig gewinnt der Gewichtungsfaktor für den CO₂-Ausstoß an Bedeutung, da dieser auch von der Temperatur abhängig ist und mit deren Anstieg größer wird (sein negativer Wert wird größer siehe Abbildung 5.3 (a)). Der Gesamtnutzen von KAT-Heizen wird also verringert, da die Temperatur steigt und die negative Auswirkung auf den CO₂-Ausstoß an Bedeutung gewinnt. Der geschätzte Gesamtnutzen von HMB steigt, da die negative Auswirkung auf die Temperatur immer weniger stark gewichtet und das Gewicht für den CO₂-Ausstoß größer wird.

Der Auswahlalgorithmus wählt die Features nacheinander. In der ersten Iteration wird zu Beginn KAT-Heizen ausgewählt. Durch die dynamische Anpassung der Gewichte steigt der errechnete Ge-

samnutzen von HMB im zweiten Iterationsschritt gegenüber dem ersten, wodurch HMB früher aktiviert wird (sein geschätzter Gesamtnutzen wäre ohne KAT-Heizen geringer).

Übersteigt der errechnete Gesamtnutzen von HMB jenen von KAT-Heizen in der ersten Iteration, so wird KAT-Heizen erst im zweiten Iterationsschritt gewählt. Durch die dynamische Anpassung der Gewichte wird nun KAT-Heizen im zweiten Iterationsschritt besser bewertet als im ersten. Dies führt dazu, dass es länger aktiv bleibt (ohne HMB wäre sein Gesamtnutzen früher negativ). Sein Gesamtnutzen nimmt durch Ansteigen der Temperaturen kontinuierlich ab. Wird der Gesamtnutzen von KAT-Heizen negativ, so wird es deaktiviert.

Zeit s	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
HMB	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-4	-2	-1	-1	-1	1	2	3	3	4	4	4	4	4
KAT-Heizen	10	10	10	10	10	10	10	8	6	5	3	1	2	2	1	1	1	-1	-3	-5	-5

Tabelle 6.1 Entwicklung des Gesamtnutzens der Features

Ohne Koordinator ist der gleichzeitige Einsatz von HMB und KAT-Heizen nicht erlaubt. HMB könnte in dem hier gezeigten Fahrzyklus also erst bei Sekunde 17 und nicht bei etwa Sekunde 12 aktiviert werden. Aufgrund seiner Berechnungen entscheidet der Koordinator aber, dass der gleichzeitige Einsatz der Features in einem gewissen Bereich nützlich ist und aktiviert beide. Dadurch kann das System von den Vorteilen von HMB und KAT-Heizen über längere Zeit profitieren. Da HMB früher aktiviert wird, sinkt der CO₂-Ausstoß gegenüber der Steuerung ohne Koordinator.

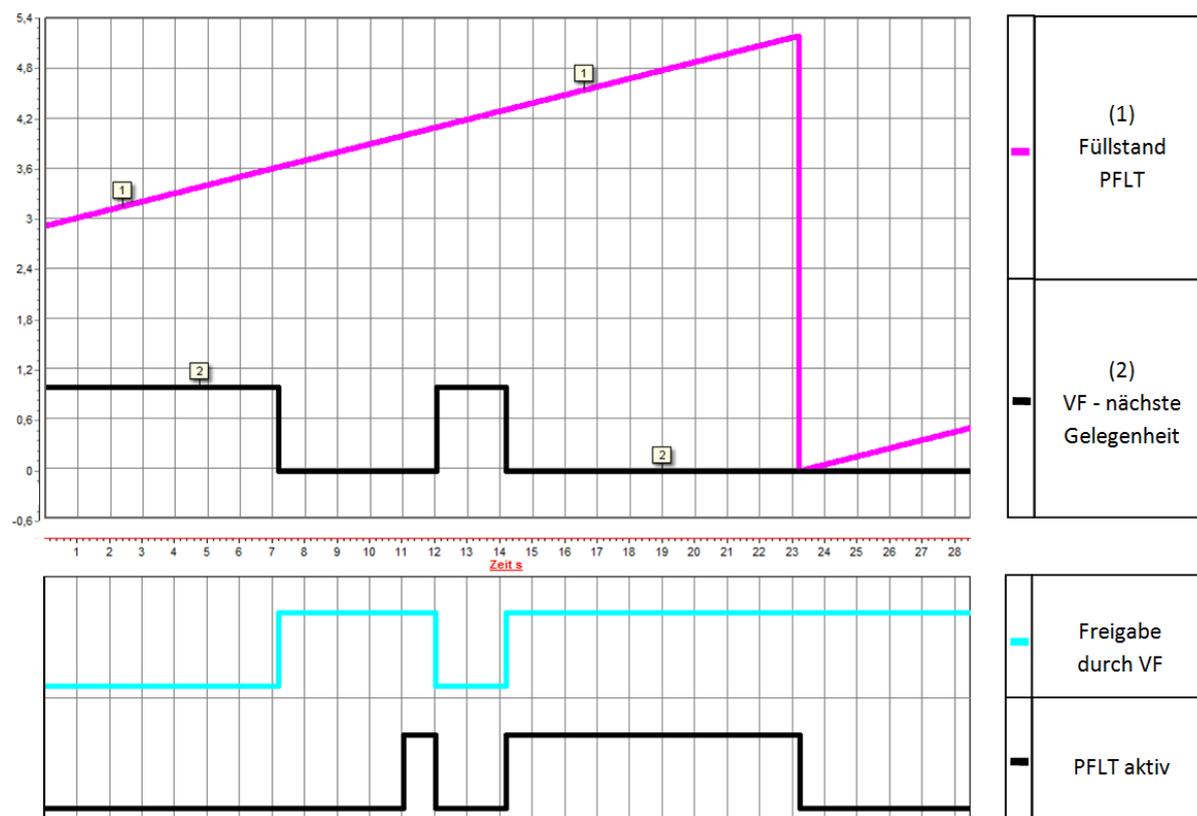


Abbildung 6.4 VF und PFLT-Regenerieren

In der zweiten Messung ist das Zusammenarbeiten von VF und PFLT-Regenerieren dargestellt, das Messergebnis ist in Abbildung 6.4 abgebildet. Das Regenerieren des PFLT soll dann erfolgen, wenn es aus Sicht von VF sinnvoll ist. PFLT-Regenerieren ist dann möglich, wenn der Füllstand einen gewissen,

vorab eingestellten Schwellwert übersteigt. Für die gezeigte Messung liegt dieser Wert bei 3. Außerdem muss die Freigabe durch VF erfolgen (TRUE sein, in der Abbildung Türkis dargestellt). Diese erfolgt, wenn mehr als zwei günstige Abschnitte (*VF – Anzahl günstiger Abschnitte*) auf den nächsten 1000 Metern folgen. Zusätzlich muss ein günstiger Abschnitt unmittelbar bevorstehen, *VF – nächste Gelegenheit* also den Wert 0 haben.

Die dargestellte Messung zeigt auf der X-Achse die Zeit, auf der Y-Achse oben den Füllstand des PFLT und die Freigabebedingungen von VF. Auf der Y-Achse unten sind die logischen Zustände für die Freigabe durch VF und ob PFLT-Regenerieren aktiv ist abgebildet. Das Feature wird dem Auswahlalgorithmus dann zur Auswahl gestellt, wenn die Freigabe durch VF erfolgt und der Grenzwert des Füllstandes für das Regenerieren überschritten wird. In der Messung ist dies ab Sekunde 1 der Fall, wenn *Freigabe durch VF* TRUE ist. Erst bei einem Füllstand von 4 aktiviert der Koordinator PFLT-Regenerieren, unterbricht die Regeneration aber, da die Freigabebedingung kurz später nicht mehr erfüllt ist. Bei Sekunde 14 wird die Freigabebedingung wieder erfüllt und das Feature aktiv geschaltet. Bei Sekunde 23 ist der Regenerationsvorgang abgeschlossen, der Füllstand beträgt 0 und beginnt wieder langsam zu steigen.

Die Entwicklung des Gesamtnutzens von PFLT-Regenerieren ist Tabelle 6.2 zu entnehmen, auch hier entsprechen die Zahlenwerte nicht den tatsächlichen Werten. Erfolgt keine Freigabe durch VF, so ist der Gesamtnutzen 0, da das Feature durch die Vorselektion verboten wird. Erfolgt die Freigabe, so wird der geschätzte Gesamtnutzen von PFLT-Regenerieren durch den Auswahlalgorithmus berechnet. Dieser steigt mit dem Füllstand an.

Zeit s	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
PFLT-Regenerieren	0	0	0	-2	-1	-1	-1	1	0	0	2	2	2	2	3	3	3	3	4	-9	-9
Freigabe VF	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabelle 6.2 Entwicklung des Gesamtnutzens von PFLT-Regenerieren

Ohne den Koordinator würde der PFLT dann regeneriert werden, wenn der Füllstand eine bestimmte Schwelle überschreitet. Ein Regenerieren vor Erreichen dieser Schwelle ist nicht möglich. Der Feature-Koordinator berücksichtigt die zukünftigen Streckengegebenheiten und kann so das Regenerieren auf einen günstigen Streckenabschnitt verschieben. In einem günstigen Abschnitt ist weniger zusätzliche Heizleistung erforderlich, um die benötigte Temperatur im Abgastrakt zu erreichen, als in einem ungünstigen. Erst wenn der Füllstand eine kritische Schwelle erreicht hätte, wäre die Regenerierung durch die Vorselektion sofort, und am Auswahlalgorithmus vorbei, aktiviert worden (dieser Fall ist in Abbildung 6.4 nicht dargestellt).

7. Diskussion

In diesem Kapitel sind Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten der Umsetzung und des Konzeptes beschrieben.

7.1. Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten des Konzepts

- Berücksichtigung von Wechselwirkungen der Features hinsichtlich ihrer Einflusswerte
- Beachtung der Umschaltekosten eines Features
- Beeinflussung der Gewichtungsfaktoren durch die Features vor dem Auswahlalgorithmus
- Einschränkungen bei der Art der zu koordinierenden Feature-Interaktionen
- Nicht optimale Feature-Wahl durch Auswahlalgorithmus
- Beeinflussung des Systemverhaltens durch Features kann vom Betriebszustand abhängen
- Bestimmung des Aktivierungsgrades von Features nicht möglich
- Korrektur der Feature-Auswahl nicht sofort möglich
- Applikation des Feature-Koordinators
- Schwingendes Verhalten der Feature-Freigabe
- Ein- und Ausschaltvorgänge der Features
- Erweiterung durch Statistikfunktion

Berücksichtigung von Wechselwirkungen der Features hinsichtlich ihrer Einflusswerte

Features können über dieselben Mechanismen auf die Zielgrößen Einfluss nehmen. PFLT-Regenerieren und NO_x-KAT Regenerieren könnten beispielsweise die Temperatur im Abgastrakt auf dieselbe Weise beeinflussen. Werden beide aktiviert, so ist das Addieren ihrer Einflusswerte nicht zulässig, da dadurch die Heuristik verfälscht wird. Eine Anpassung der Einflusswerte der, noch wählbaren, Features in Abhängigkeit der bereits ausgewählten müsste am Ende jedes Iterationsschrittes erfolgen.

Beachtung der Umschaltekosten eines Features

Für die Berücksichtigung dieser Kosten könnte ein weiterer Einflusswert eingeführt werden. Dieser wirkt sich auf keine Zielgröße aus, könnte aber den geschätzten Gesamtnutzen eines Features verringern (falls es in der Periode zuvor nicht aktiv war) oder erhöhen (falls es in der vorigen Periode aktiv war). Eine Verzögerung der Umschaltung ist so möglich.

Beeinflussung der Gewichtungsfaktoren durch die Features vor dem Auswahlalgorithmus

Es können Situationen auftreten, in denen eine Zielgröße einen Wert außerhalb ihres, im Normalbetrieb gewünschten, Bereiches annehmen soll. Soll z.B. der NO_x-KAT regeneriert werden, so kann eine Temperatur im Abgastrakt erforderlich sein, die über den gewünschten Bereich hinaus geht. Der Koordinator würde aber diesem Temperaturanstieg entgegenwirken, da der Gesamtnutzen von Features, welche die Temperatur absenken, steigt.

Das Problem ließe sich dadurch lösen, dass die Features auf die Bildung der Gewichtungsfaktoren Einfluss nehmen können. Sie müssten also, bevor der Auswahlalgorithmus beginnt, die Möglichkeit haben, die Funktionen $f(Istwert_j)$ zu manipulieren.

Einschränkungen bei der Art der zu koordinierenden Feature-Interaktionen

Das Konzept setzt derzeit voraus, dass sich die Features nicht gegenseitig sperren oder zulassen. Interaktionen dieser Art können aber auftreten. Das Problem besteht darin, dass ein Feature, welches ein anderes zulässt oder verhindert, falsche Einflusswerte liefert. In Tabelle 7.1 sind die Einflusswerte von drei Features dargestellt. Angenommen, F1 sperrt F2 und F3 ist nur dann möglich, wenn F2 aktiv ist. Da F1 den größten Einflusswert (10) besitzt, wird es ausgewählt, F2 und F3 sind somit nicht mehr möglich, würden aber gemeinsam einen Einflusswert von 14 liefern, wären also die bessere Wahl.

F1	F2	F3
10	8	6

Tabelle 7.1 Features mit zugehörigem Einflusswert

Nicht optimale Feature-Wahl durch Auswahlalgorithmus

Der Auswahlalgorithmus basiert auf einem Hill-Climber. Das Set an Features, welches vom Algorithmus als Optimum gefunden wird, stellt nicht zwangsweise ein globales Optimum dar. Existieren mehrere Optima, so wird eines davon gefunden.

Beeinflussung des Systemverhaltens durch Features kann vom Betriebszustand abhängen

Manche Features beeinflussen das Systemverhalten abhängig von ihrem Betriebszustand. PFLT-Regenerieren erhöht beispielsweise erst die Temperatur im Abgastrakt und dann, wenn sie eine bestimmte Schwelle überschritten hat, den Sauerstoffgehalt im Abgas. Die Auswirkung auf das System ist während des Aufheizens anders als beim Erhöhen des Sauerstoffgehaltes. Dies muss in den Einflussfunktionen des Features mitberücksichtigt werden. Das Vorsehen mehrerer Einflussfunktionen pro Einflusswert eines Features kann also notwendig sein.

Bestimmung des Aktivierungsgrades von Features nicht möglich

Die in der prototypischen Umsetzung implementierten Features können entweder aktiv oder inaktiv sein. Es existieren aber viele, wie z.B.: ATL oder AGR, die auch zu einem gewissen Grad aktivierbar sind. Der Koordinator kann im Moment selbst keine Entscheidung treffen, wie stark ein solches Feature aktiviert werden soll. Der Einsatz von Fuzzy-Reglern könnte die Bestimmung des Aktivierungsgrades ermöglichen.

Korrektur der Feature-Auswahl nicht sofort möglich

Stellt sich während der Feature-Auswahl (im selben Auswahlzyklus) heraus, dass sich eines der bereits gewählten nun doch negativ auf das System auswirkt, so kann die Auswahl nicht rückgängig gemacht werden. Merkt sich der Koordinator diese „schlechte“ Auswahl und ändern sich die Eingangswerte bis zum nächsten Auswahlzyklus nicht, so könnte er die erneute „schlechte“ Auswahl verhindern.

Applikation des Koordinators

Die Parametrierung der Kennlinien und Kennfelder, über welche die Einflusswerte und Gewichtungsfaktoren erzeugt werden, ist schwierig. Deren Applikation ist nur in einem Fahrzeug oder an einem Motorprüfstand sinnvoll durchführbar. Ideal wäre eine Applikation durch Simulation, ein geeignetes Fahrzeugmodell vorausgesetzt.

Schwingendes Verhalten der Feature-Freigabe

In Abbildung 7.1, rot umrandet, ist dargestellt, dass bei der derzeitigen Umsetzung ein Toggeln der Aktivierung eines Features möglich ist. Dieses Verhalten ist nicht gewünscht, durch den Einsatz von Schalthysteresen lässt es sich verhindern. Deren Berücksichtigung kann in der Vorselektion erfolgen.



Abbildung 7.1 Problem der Umsetzung: Toggeln der Aktivierung von PFLT-Regenerieren

Wurde ein Feature gewählt, so könnte es für eine bestimmte Zeit durch die Vorselektion immer ausgewählt werden. Erst wenn die Zeit abgelaufen ist, wird das Feature wieder dem Auswahlalgorithmus zur Auswahl übergeben.

Die Schwelle des Gesamtnutzens eines Features, ab dem es wählbar ist, liegt derzeit bei 0. Schwankt der Gesamtnutzenwert um 0, so würde dies ebenfalls ein Toggeln verursachen. Die Schaltschwelle könnte also von 0 auf z.B. $\pm 0,5$ verlegt werden. Somit wird ein Feature erst ab einem Gesamtnutzen von 0,5 aktiviert und, wenn es in der vorigen Periode aktiv war, erst ab einem Wert $< -0,5$ deaktiviert.

Ein- und Ausschaltvorgänge der Features

Das Umschalten von Features kann längere Zeit in Anspruch nehmen. Beispielsweise ist ein Wechsel von VMB in den HMB nicht sofort durchführbar, erst ist der Aufbau einer Momentenreserve, durch Spätverstellung des Zündwinkels und Erhöhung der angesaugten Luftmasse, erforderlich. Beim Umschalten von HMB auf VMB tritt ebenfalls eine Verzögerung auf. Der Einfluss von HMB auf das System ist also nicht sofort vorhanden bzw. weg, sondern erst nach einer Zeitverzögerung (siehe Abbildung 6.3). Die Berücksichtigung dieses Verhaltens ist in den folgenden Auswahlzyklen erforderlich. Es muss also gegebenenfalls neben den Betriebszuständen „aktiv“ und „inaktiv“ eines Features auch der Zustand „umschalten“ beachtet werden.

Erweiterung durch Statistikfunktion

Man könnte eine Statistikfunktion implementieren, die protokolliert, welches Feature wie lange aktiv war. Möglicherweise existieren Features, die hohe Kosten in der Fahrzeugproduktion verursachen und deren Ansteuerung aufwendig ist, die aber nur selten aktiv sind. Durch eine Auswertung könnten solche Features gefunden und über deren Einsatz neu entschieden werden.

7.2. Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten der Umsetzung

- **Umsetzung beinhaltet WHILE-Schleifen**
- **Berücksichtigung des Moments**
- **Problem bei Wahl des Features mit größtem Gesamtnutzen**
- **Anforderungen der Features hinsichtlich Temperatur**
- **Ausführen nicht benötigter Rechenschritte**
- **Berücksichtigung der Auswirkung auf das Moment**

Umsetzung beinhaltet WHILE-Schleifen

Bei der Umsetzung werden WHILE-Schleifen verwendet. Diese bergen die Gefahr, dass sie zu einer Endlosschleife führen können. Tritt eine solche in der Motorsteuergeräte-Software auf, kann dies schwerwiegende Folgen haben, da dadurch Personen- und Sachschäden entstehen können. Die Implementierung des Koordinators sollte man so umstrukturieren, dass die Schleife entfällt. Der Auswahlalgorithmus könnte in einer anderen Zeitscheibe gerechnet werden. Pro Aufruf des Koordinators würde ein Iterationsschritt abgearbeitet werden.

Die Beendigung der WHILE-Schleife für VF erfolgt immer nach zehn Durchläufen. Sie kann somit als weniger kritisch betrachtet werden, da ihre Abbruchbedingung nicht errechnet wird.

Berücksichtigung des Moments

Derzeit teilt jedes Feature seine Auswirkung auf das Motormoment in Nm, beispielsweise -150Nm, dem Koordinator mit. Dieser Wert wird dann zum maximal möglichen Motormoment addiert. Manche Features bewirken aber, dass das mögliche Moment um einen bestimmten Faktor verändert wird, für HMB wird z.B. das maximal mögliche Moment halbiert. Wird ein Feature ausgewählt, welches das Moment durch einen Faktor beeinflusst, so ist nach dem Iterationsschritt eine Anpassung des maximalen Moments um diesen notwendig. Der Faktor muss also in einen Zahlenwert umgerechnet werden.

Problem bei Wahl des Features mit größtem Gesamtnutzen

Es könnte der Fall eintreten, dass für mehrere Features derselbe geschätzte Gesamtnutzen berechnet wird. Ist dies der Fall, so würde der Koordinator bei derzeitiger Umsetzung alle mit diesem Nutzenwert im selben Iterationsschritt auswählen. Dieses Verhalten ist nicht gewünscht, da immer nur ein Feature pro Iteration gewählt werden soll, um etwaige Wechselwirkungen berücksichtigen zu können.

Anforderungen der Features hinsichtlich Temperatur

Verschiedene Features haben unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich der Temperatur im Abgasstrakt. Zurzeit bestimmt nur eine Temperatur des Abgasstraktes, die des Krümmers, die Einflusswerte

der Features. Da mehrere Temperaturen zur Verfügung stehen, könnten die Einflusswerte auch von verschiedenen abhängen, was ihre Aussagekraft verbessert.

Ausführen nicht benötigter Rechenschritte

In jedem Iterationsschritt des Auswahlalgorithmus werden die Einflusswerte aller Features, unabhängig davon, ob das Feature überhaupt möglich ist, mit den Gewichtungsfaktoren multipliziert. Pro Feature sind drei Multiplikationen und eine Addition erforderlich. Es werden in der Folge nur die Multiplikationen berücksichtigt, da deren Berechnung für das Motorsteuergerät aufwendig ist. Hat man nun z.B. 100 Features, von denen aber nur 10 möglich sind, so berechnet der Auswahlalgorithmus pro Iterationsschritt 300 Multiplikationen und nicht nur die 30 notwendigen. Die Implementierung sollte man dahingehend anpassen, dass nur die Nutzenwerte jener Features berechnet werden, die auch tatsächlich möglich sind.

Berücksichtigung der Auswirkung auf das Moment

Bei der Umrechnung der Momentenauswirkung eines Features auf einen Einflusswert besteht ein Problem bei positiven Einflusswerten. Derzeit wird überprüft, ob genügend Momentenreserve verfügbar ist, um das Feature zu aktivieren. Dazu wird der Betrag des Einflusswertes (welcher der Veränderung des Maximalmoments in absoluten Zahlenwerten entspricht) auf das Moment gebildet. Der Koordinator behandelt also positive und negative Momentenänderung gleich. Bewirkt ein Feature einen Anstieg des maximalen Moments und ist dieser größer als die Momentenreserve, so würde das Feature gesperrt werden, obwohl es möglich wäre.

8. Conclusio und Ausblick

Die vorliegende Diplomarbeit stellt das Konzept eines Feature-Koordinators vor, welcher zentral und zur Laufzeit Software-Features auswählt, aktiviert und dabei ihr gemeinsames Verhalten optimiert.

Die Literaturrecherche hat ergeben, dass nur wenige Strategien zur zentralen Koordinierung von Features existieren.

Eine zentrale Steuerung hat den Vorteil, dass die einzelnen Features keine Schnittstellen untereinander benötigen, sondern nur jeweils eine zum Koordinator. Somit ist nach der Abänderung eines Features nur die Anpassung des Koordinators, wenn überhaupt, notwendig, nicht aber die der anderen Features. Eine Erweiterung des Systems mit zusätzlichen Features wird dadurch erleichtert. Die Wartung und Entwicklung eines zentralen Software-Moduls ist ebenfalls einfacher als die von mehreren dezentralen Modulen.

Das Konzept wurde prototypisch implementiert und evaluiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das Verhalten der Software durch den Feature-Koordinator verbessert wird. Features können durch ihn in einem größeren Betriebsbereich eingesetzt werden und das System kann von ihren Vorteilen länger profitieren.

Weitere Aufgaben für eine Weiterentwicklung werden nun erst aufgelistet und dann im Detail beschrieben.

- **Genauere Verhaltensanalyse der Features und ihrer Interaktionen**
- **Definition der Schnittstellen zwischen Features und Koordinator**
- **Weitere Features für den Probetrieb des Koordinators anpassen und Testen im Fahrzeug oder am Motorprüfstand**
- **Kritisches Hinterfragen der gewählten Zielgrößen**

Genauere Verhaltensanalyse der Features und ihrer Interaktionen

Die Analyse der Feature-Interaktionen im Rahmen dieser Diplomarbeit beschränkte sich auf physikalische Überlegungen. Diese sollten noch einmal kritisch überprüft werden. Auch eine Analyse der Wechselwirkungen auf Software-Ebene ist notwendig, eine automatische Überprüfung mittels Model-Checker wäre sinnvoll. Aus den Abhängigkeiten der Softwaremodule müssten dann die Feature-Interaktionen identifiziert werden. Eine Möglichkeit zur automatischen Erkennung von Feature-Interaktionen ist in [21] beschrieben.

Definition der Schnittstellen zwischen Features und Koordinator

Das Konzept sieht vor, dass die Features dem Koordinator ihre Einflusswerte mitteilen. Wie aber z.B. PFLT-Regenerieren zeigt, können weitere Informationen notwendig sein (PFLT-Füllstand). Der Koordinator steuert die Aktivierung der Features durch das Setzen von bestimmten Bits. Die Schnittstellen sollten eindeutig definiert werden. Dies könnte die Entwicklung und Anpassung der Features für den Betrieb mit dem Koordinator erleichtern und die Notwendigkeit von Feature-spezifischen Anpassungen im Koordinator vermeiden.

Weitere Features für den Probetrieb des Koordinators anpassen und Testen im Fahrzeug oder am Motorprüfstand

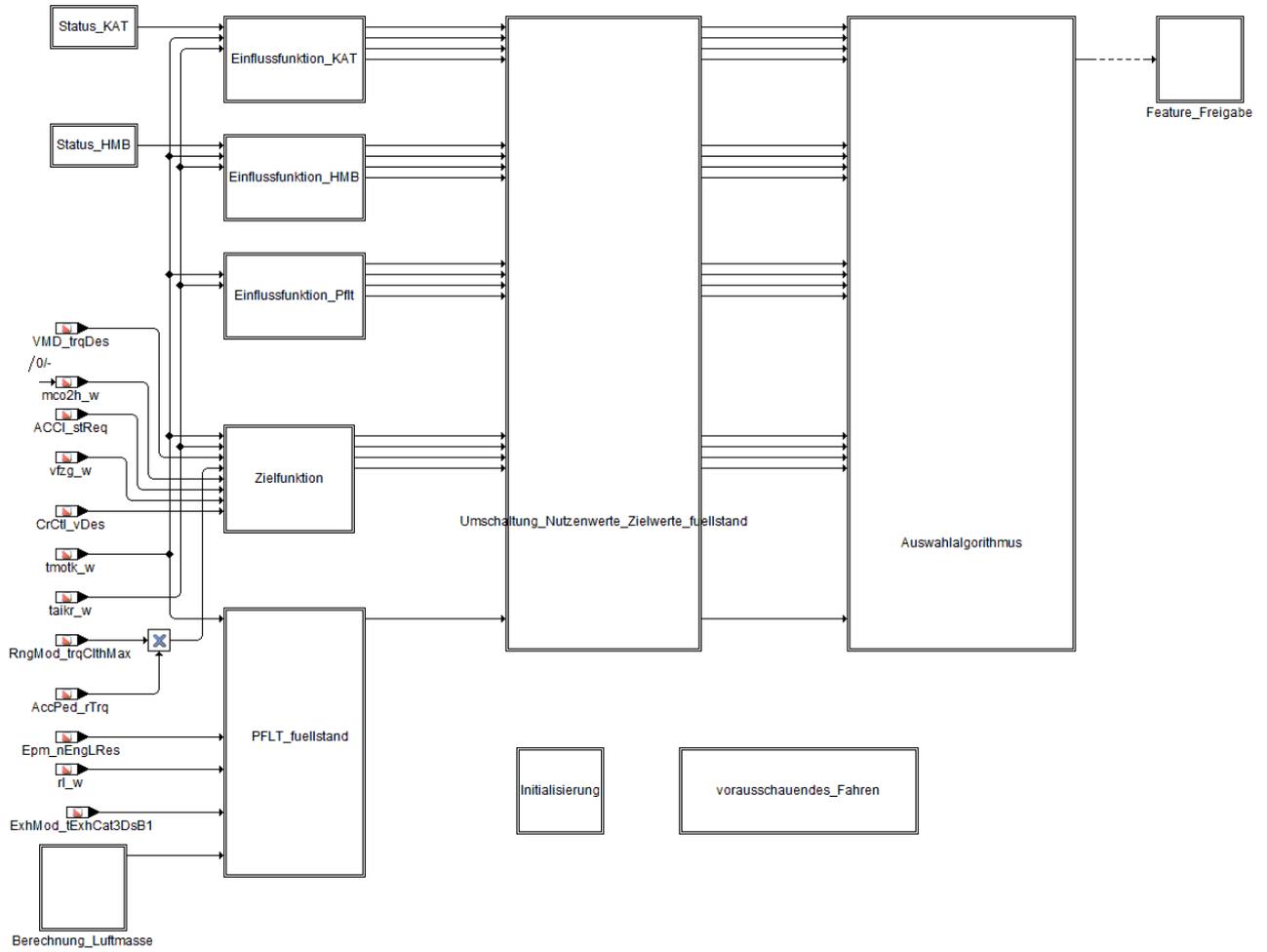
Der Probetrieb wurde mit wenigen Features durchgeführt. Der positive Einfluss des Koordinators auf das System konnte dadurch am LabCar gezeigt werden. Für eine realitätsnahe Messung ist das Testen auf einem Motorprüfstand oder in einem Testfahrzeug notwendig. Dazu sollten weitere Features für den Betrieb angepasst werden, um die Aussagekraft über den Einfluss des Koordinators zu verbessern.

Kritisches Hinterfragen der gewählten Zielgrößen

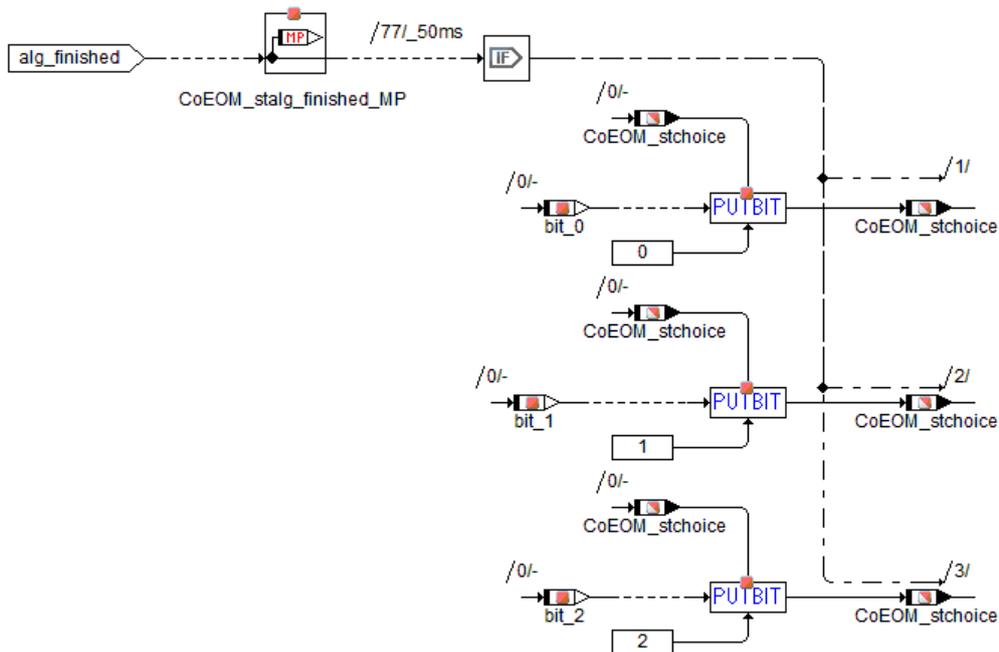
Für die Umsetzung wurden vier Zielgrößen definiert. Es sollte hinterfragt werden, ob diese Wahl auch tatsächlich sinnvoll ist und ob noch weitere Systemgrößen für die Koordinierung relevant sind. Beispielsweise könnte bei einem Hybridfahrzeug der Ladezustand der Batterie eine für die Auswahl der Features relevante Größe sein.

Anhang A: ASCET-Blockschaltbilder

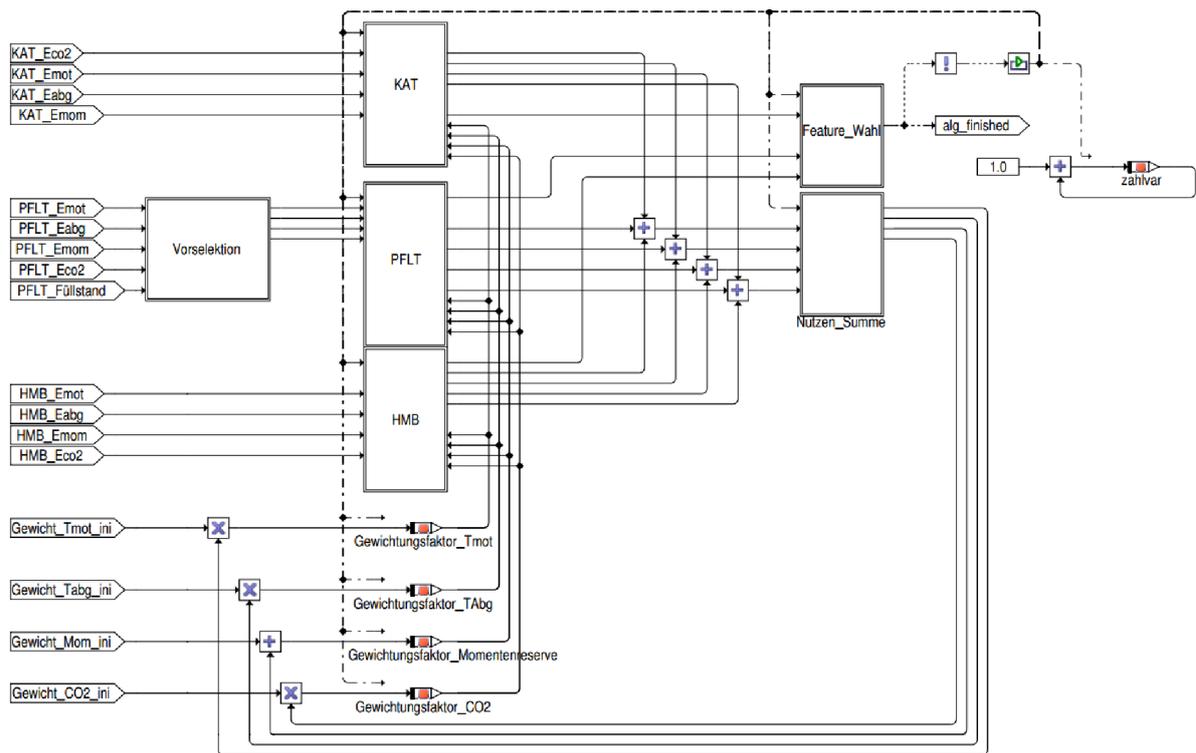
Gesamtübersicht



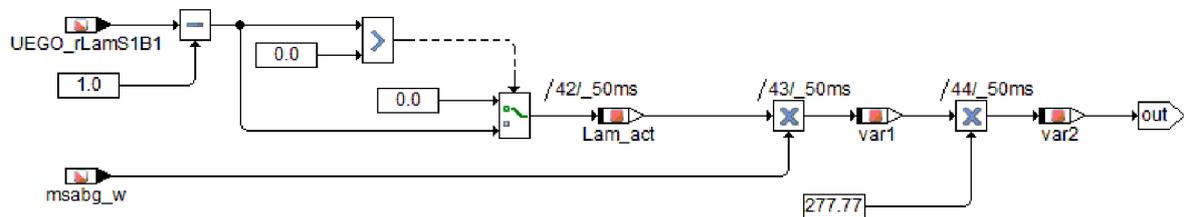
Feature_Freigabe



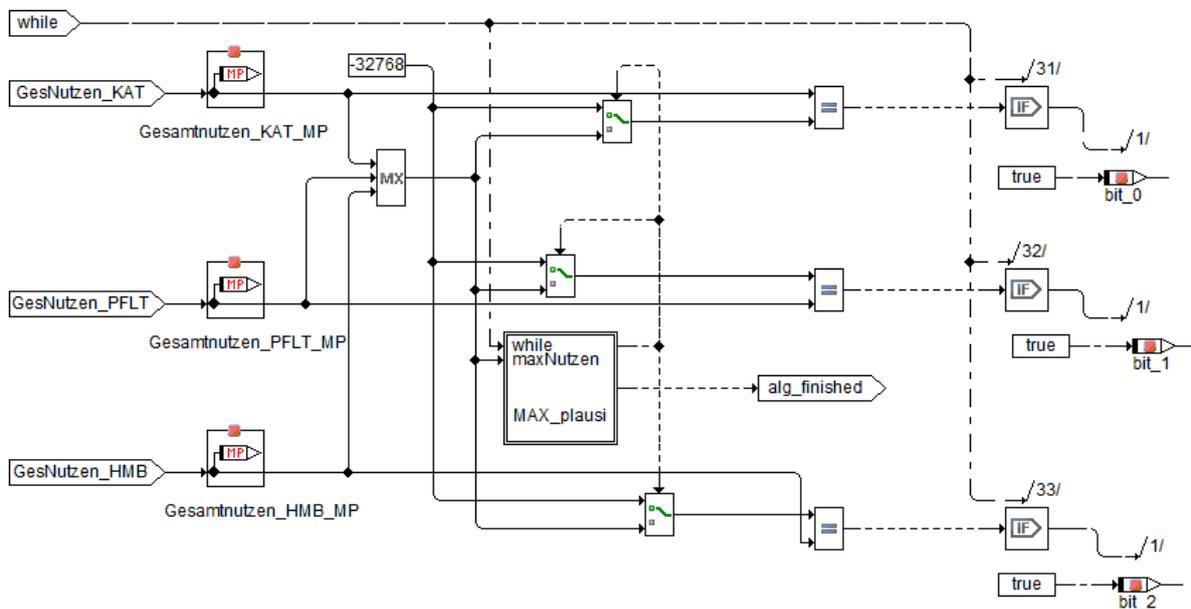
Auswahlalgorithmus



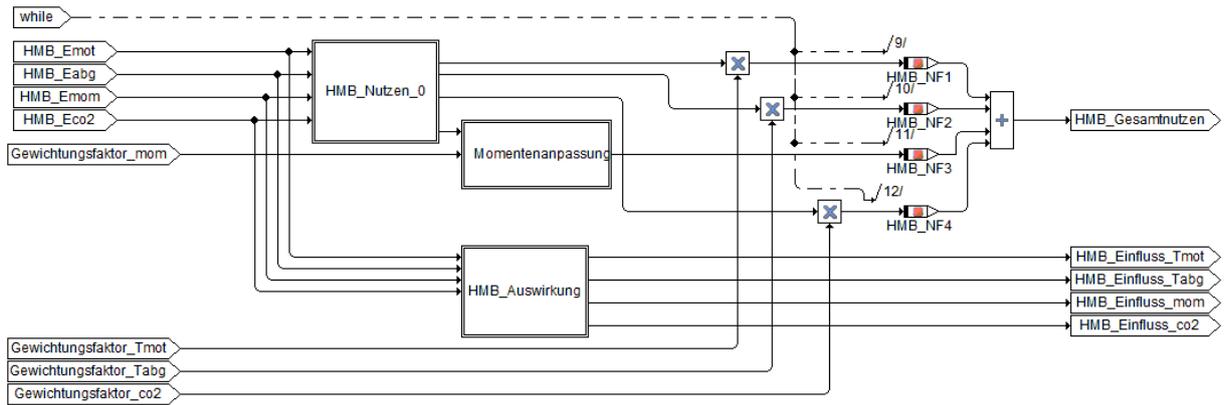
Berechnung_Luftmasse



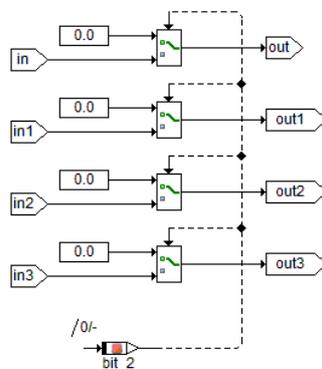
Feature_Wahl



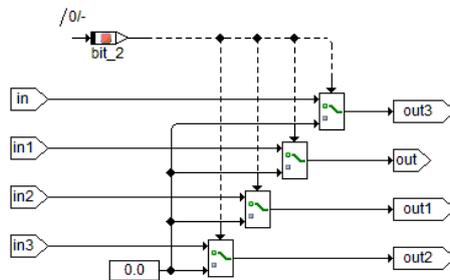
HMB



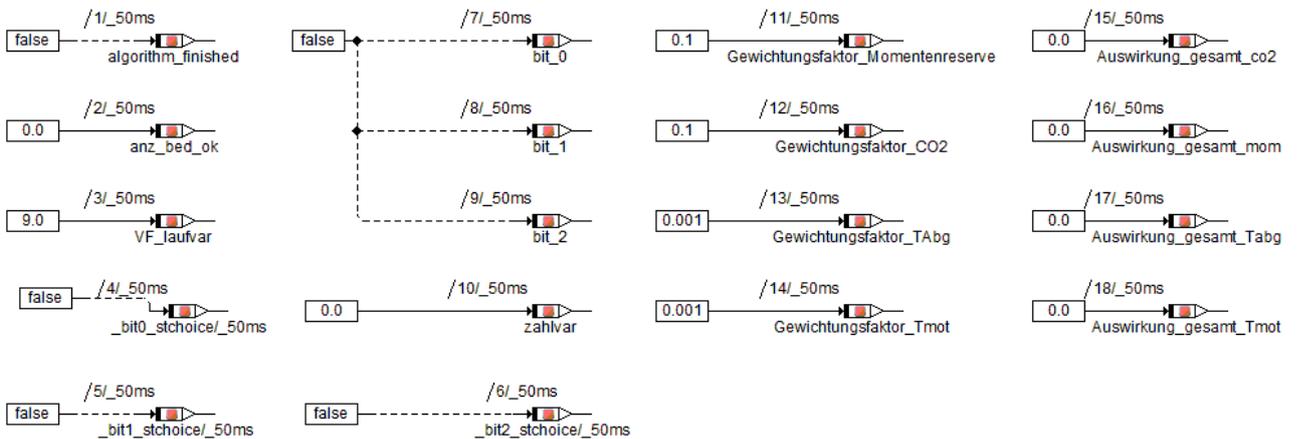
HMB_Auswirkung



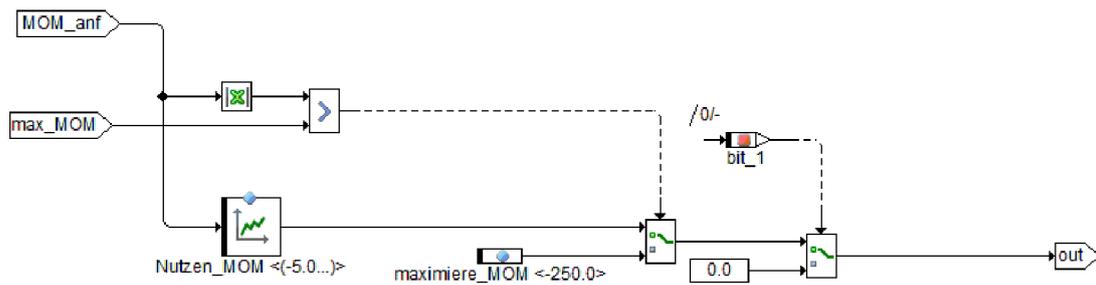
HMB_Nutzen_0



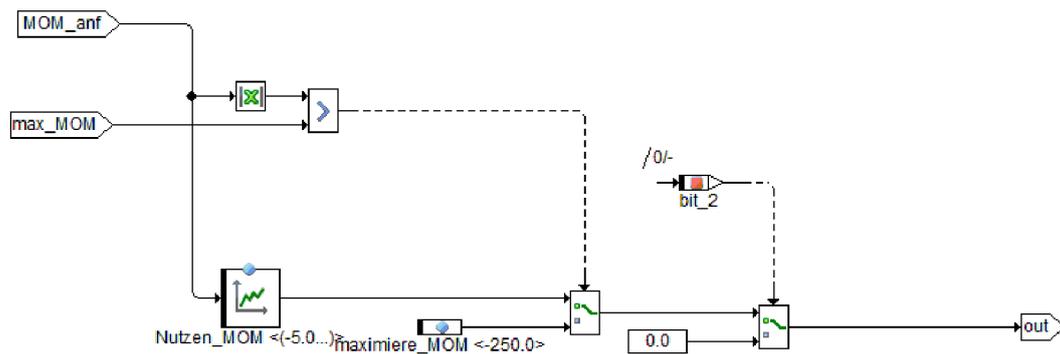
Initialisierung



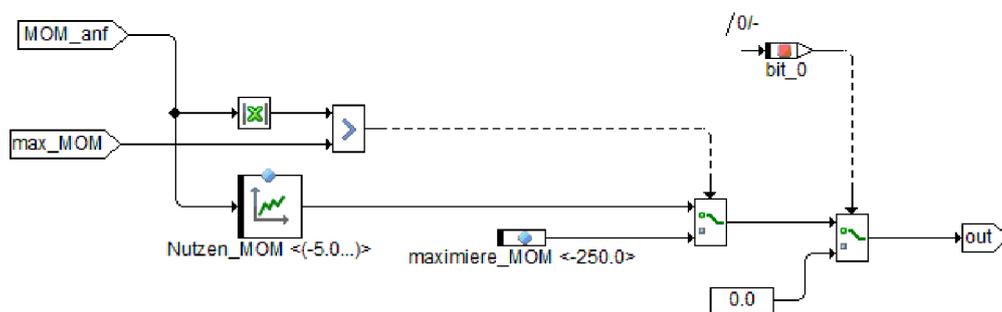
Momentenanpassung_PFLT



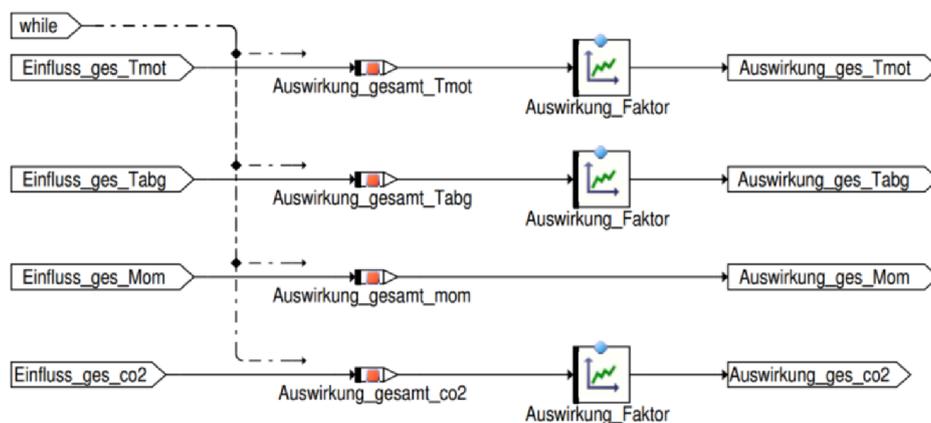
Momentenanpassung_HMB



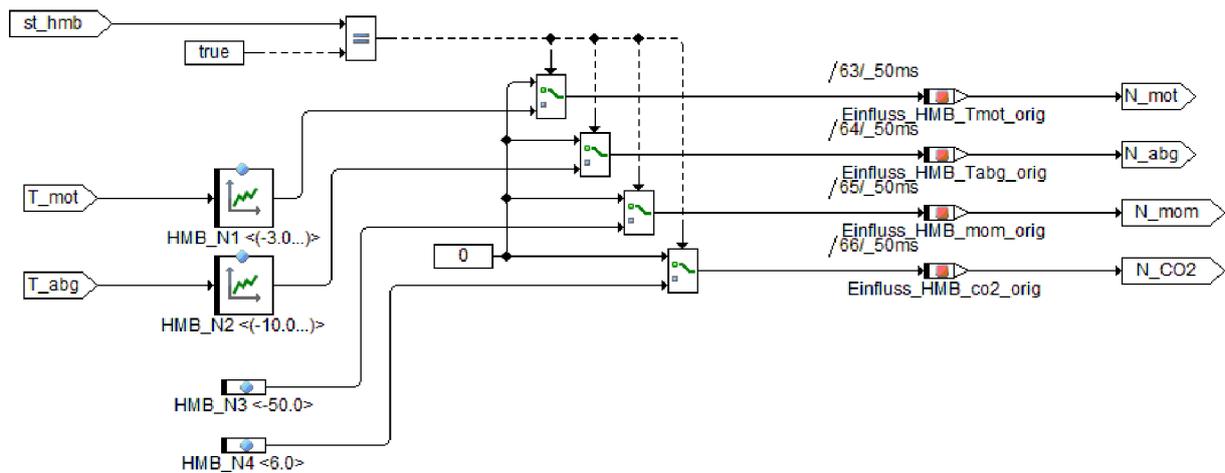
Momentenanpassung_KAT



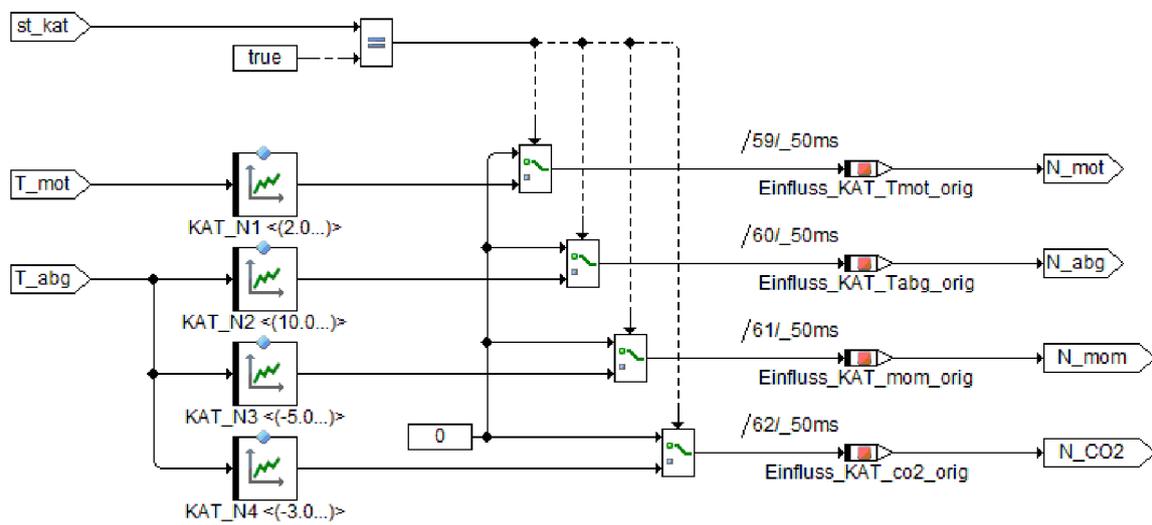
Nutzen_Summe



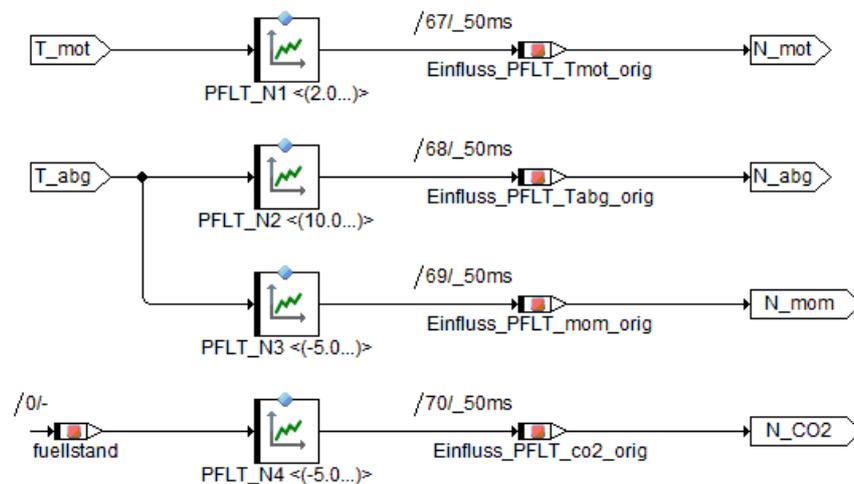
Einflussfunktion_HMB



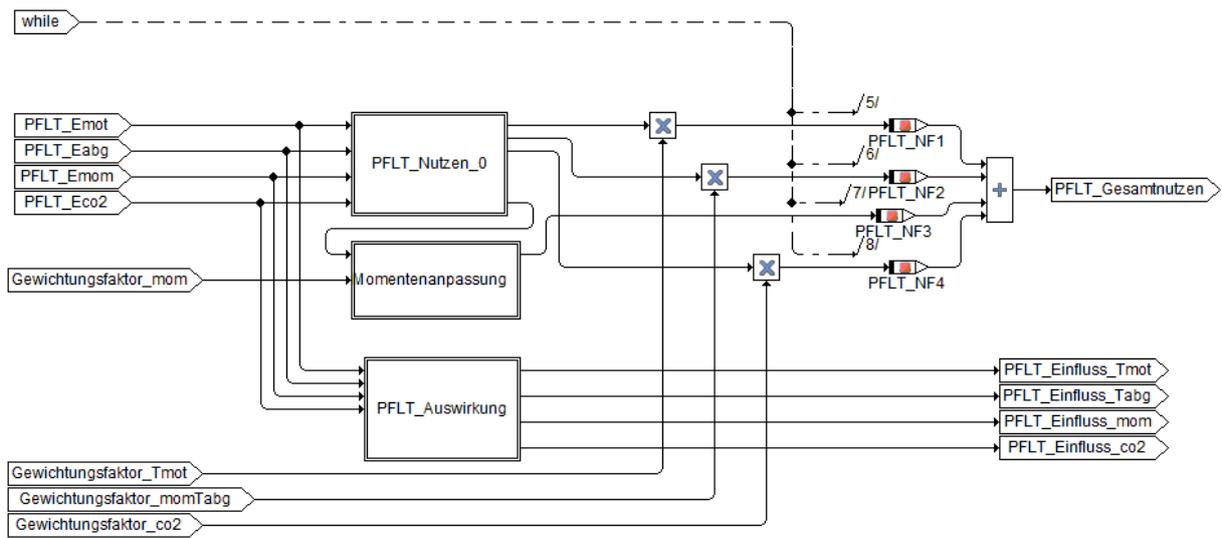
Einflussfunktion_KAT



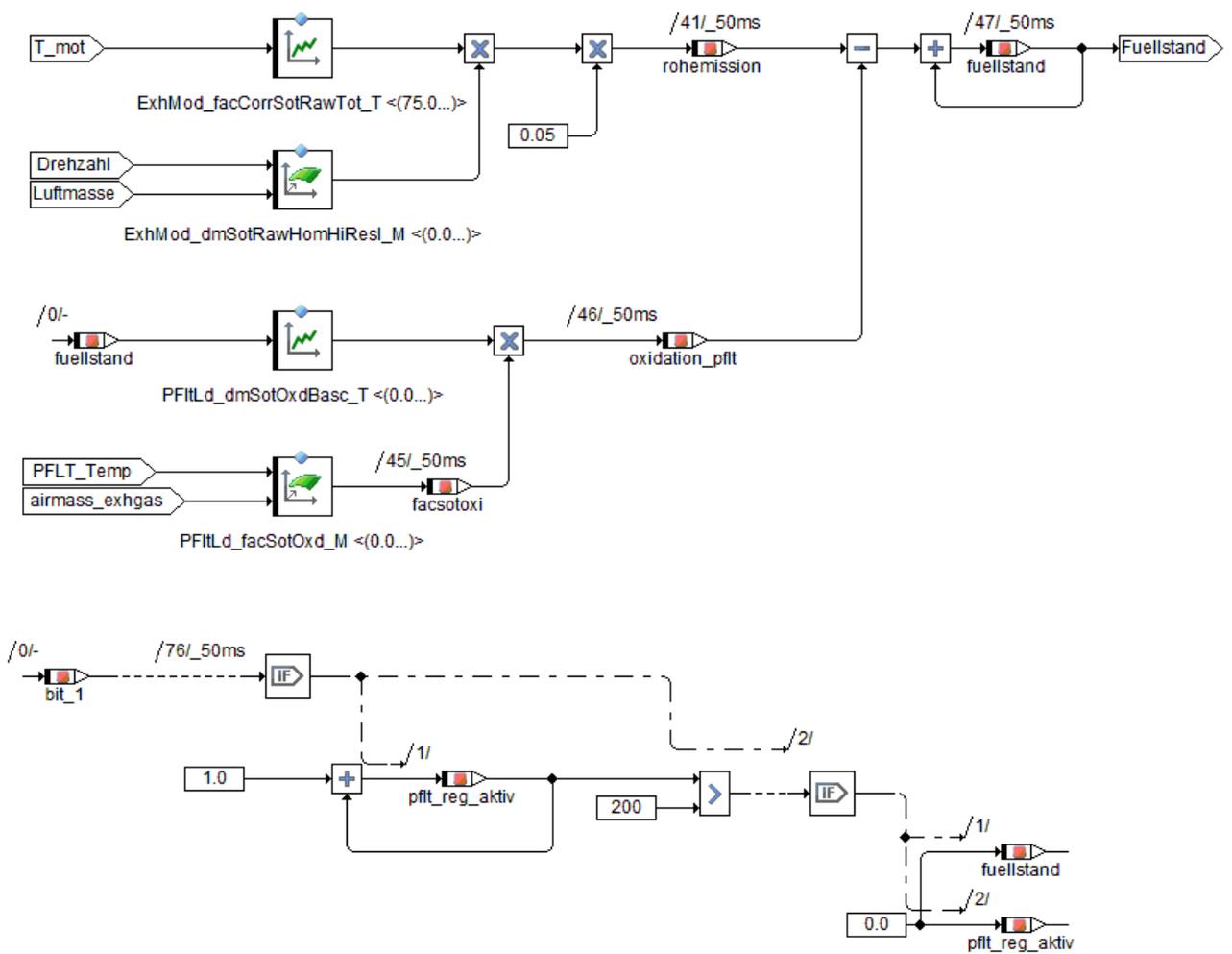
Einflussfunktion_PFLT



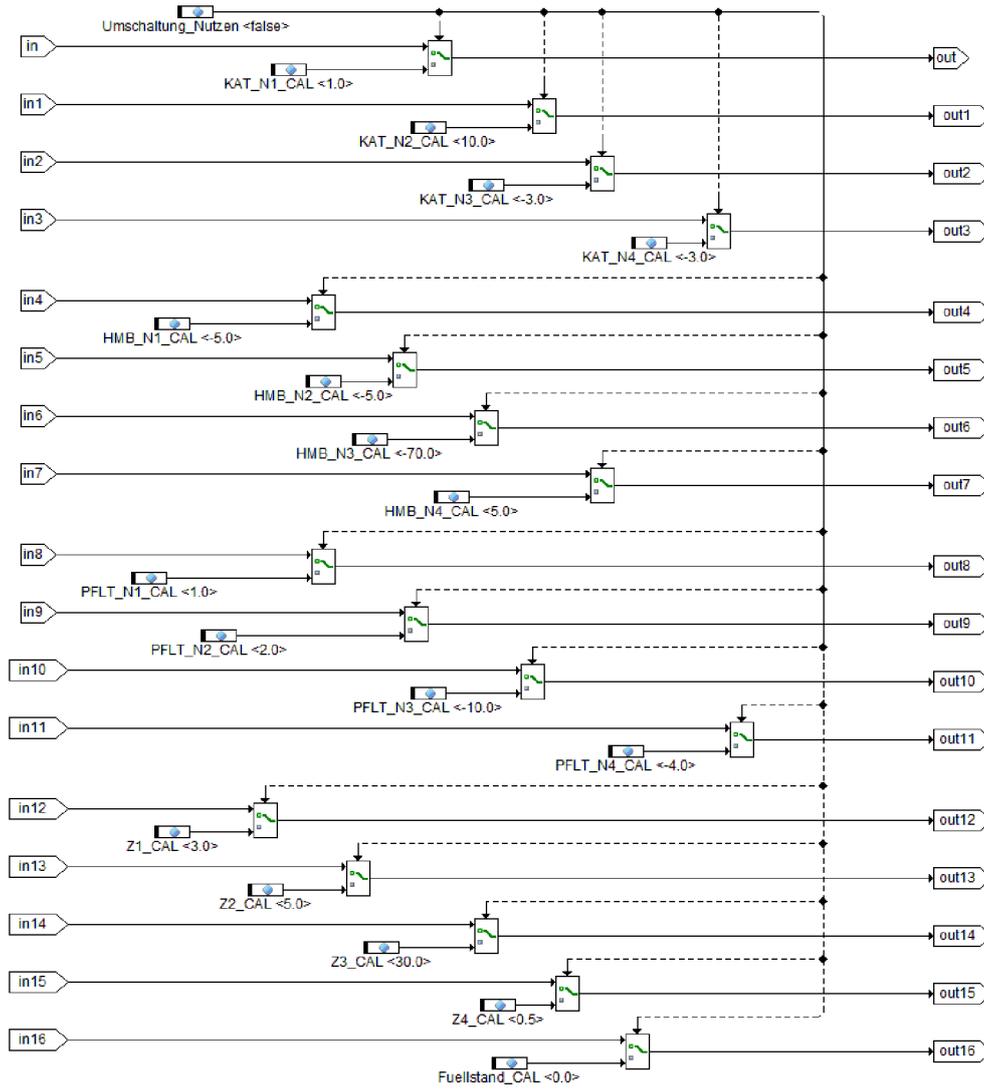
PFLT



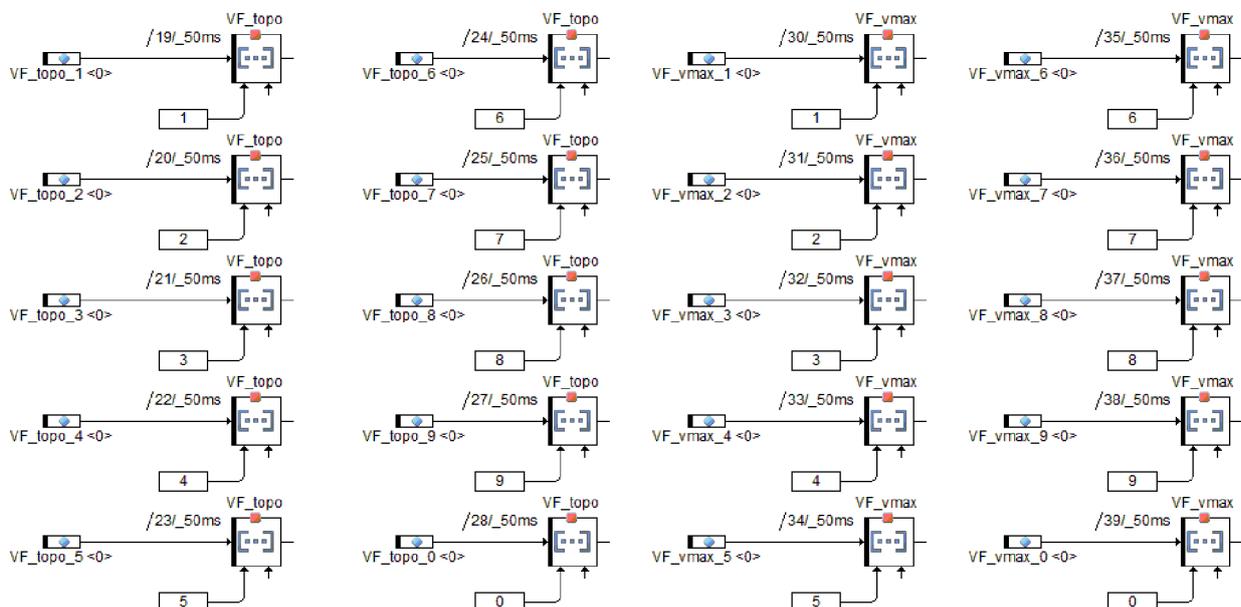
PFLT_fuellstand



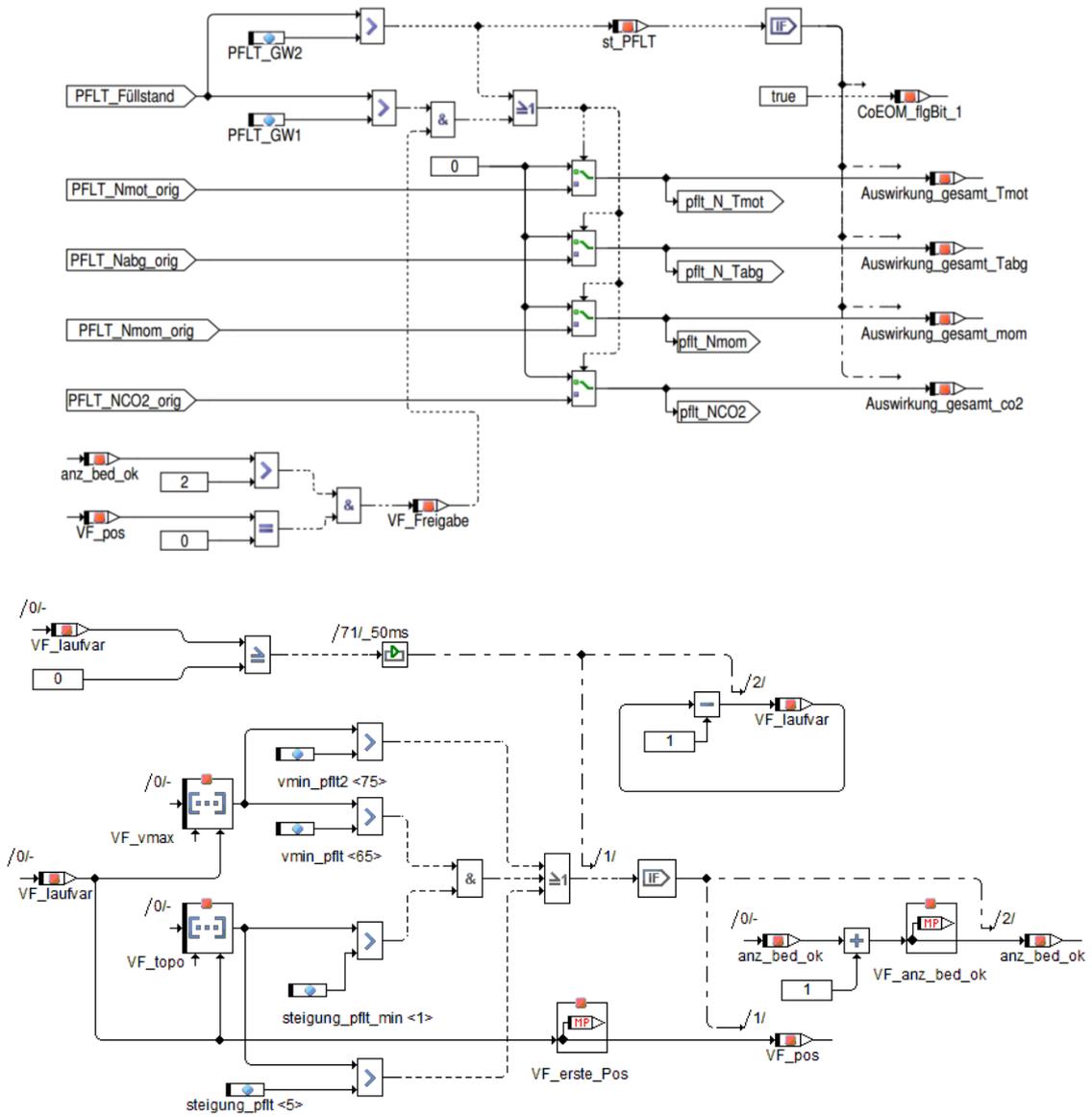
Umschaltung_Nutzenwerte_Zielwerte_fuellstand



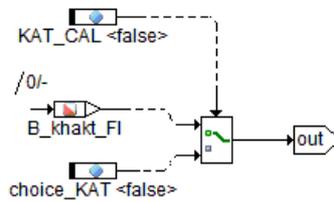
Vorausschauendes_Fahren



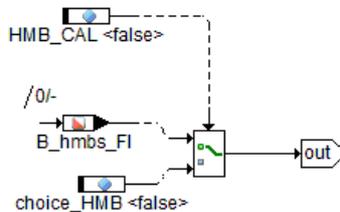
Vorselektion



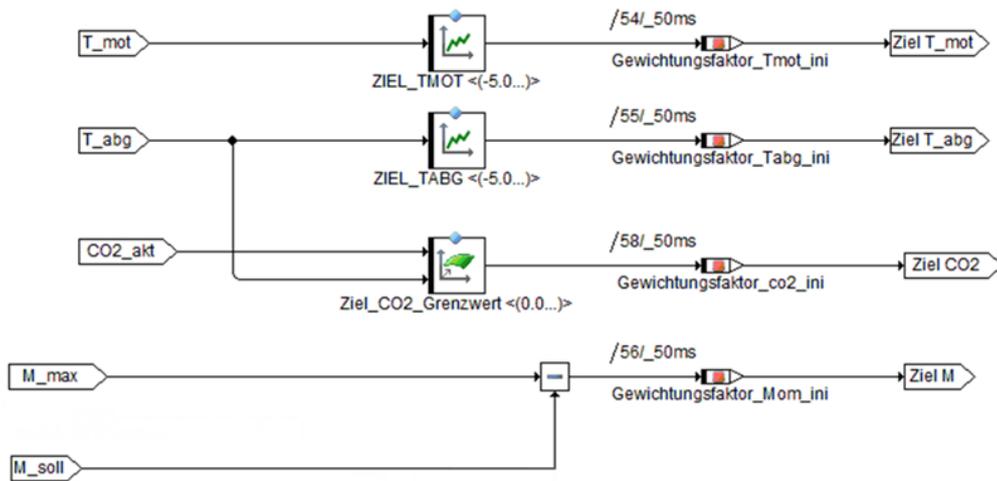
Status_KAT



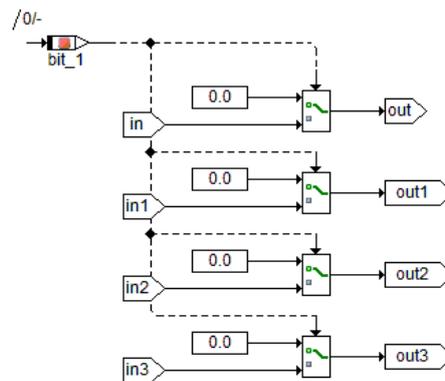
Status_HMB



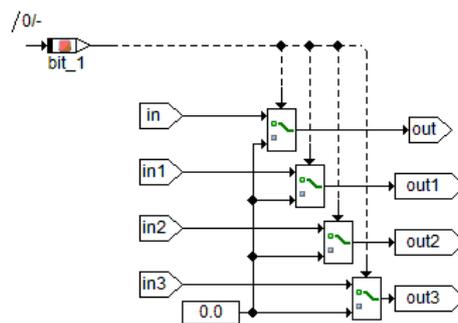
Zielfunktion



PFLT_Auswirkung



PFLT_Nutzen_0



Anhang B: Applikation

Unter Applikation versteht man die Parametrierung (Bedatung) der Steuergeräte-Software. In diesem Anhang wird die Bedatung der Parameter, Kennfelder und Kennlinien angeführt. Die hier angeführten Applikationswerte sind standardmäßig eingestellt und können, in gewissen Grenzen, verändert werden.

Parameter

Name	Data	Name	Data
ACC_STATUS_ABFRAGE	0.0	PFLT_GW1	5.0
choice_HMB	FALSE	PFLT_GW2	7.0
choice_KAT	TRUE	PFLT_N1_CAL	1.0
Fl_crctl_vdes_cal	0.0	PFLT_N2_CAL	2.0
Fuellstand_CAL	0.0	PFLT_N3_CAL	-10.0
HMB_CAL	FALSE	PFLT_N4_CAL	-4.0
HMB_N1_CAL	-5.0	st_ACC_cal	0.0
HMB_N2_CAL	-5.0	steigung_pflt	5.0
HMB_N3	-50.0	steigung_pflt_min	1.0
HMB_N3_CAL	-70.0	Switch_ACC	FALSE
HMB_N4	6.0	Umschaltung_Nutzen	FALSE
HMB_N4_CAL	5.0	Vdiff	5.0
KAT_CAL	TRUE	vmin_pflt	65.0
KAT_N1_CAL	1.0	vmin_pflt2	75.0
KAT_N2_CAL	10.0	Z1_CAL	3.0.0
KAT_N3_CAL	-3.0	Z2_CAL	5.0
KAT_N4_CAL	-3.0	Z3_CAL	30.0
maximiere_MOM	-250.0	Z4_CAL	0.5
Momentenreduktion	20.0		

Kennlinien und Kennfelder

Auswirkung_Faktor

x	-10	-5	0	5	10.0
z	2	1.3	1	0.75	0.4

HMB_N1

x	50.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	140.0
z	-3.0	-2.0	-1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0

HMB_N2

x	100.0	200.0	300.0	400.0	600.0	700.0	800.0	1000.0
z	-10.0	-8.0	-2.0	2.0	3.0	3.0	3.0	5.0

KAT_N1

x	10.0	50.0	90.0	100.0	110.0	120.0	125.0	140.0
z	2.0	1.0	0.0	-2.0	-2.0	-5.0	-15.0	-19.0

KAT_N2

x	100.0	300.0	350.0	500.0	600.0	650.0	800.0	1000.0
z	10.0	7.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	-5.0	-19.0

KAT_N3

x	200.0	300.0	600.0	1000.0
z	-5.0	-2.0	0.0	0.0

KAT_N4

x	0.0	350.0	750.0	1000.0
z	-3.0	-5.0	-10.0	-10.0

Nutzen_MOM

x	-500.0	-100.0	-50.0	-30.0	-10.0
z	-5.0	-1.0	-0.5	-0.3	-0.1

PFLT_N1

x	10.0	50.0	90.0	100.0	110.0	120.0	125.0	140.0
z	2.0	1.0	0.0	-2.0	-2.0	-5.0	-15.0	-19.0

PFLT_N2

x	100.0	300.0	350.0	500.0	600.0	650.0	800.0	1000.0
z	10.0	7.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	-5.0	-19.0

PFLT_N3

x	200.0	300.0	600.0	1000.0
z	-5.0	-2.0	0.0	0.0

PFLT_N4

x	0.0	3.0	5.0	7.0
z	-5.0	0.0	3.0	8.0

VF_topo

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
z	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

VF_vmax

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
z	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Ziel_CO2_Grenzwert

y,x	0.0	20.0	40.0	70.0	100.0
0.0	0.0	0.0	2.0	4.0	5.0
300.0	0.0	0.0	4.0	8.0	10.0
350.0	0.0	0.0	4.0	8.0	10.0
600.0	0.0	0.0	3.0	6.0	8.0
1000.0	0.0	0.0	2.0	4.0	5.0

ZIEL_TABG

x	100.0	300.0	350.0	500.0	700.0	750.0	900.0	1000.0
z	-5.0	-3.0	-1.0	0.0	0.0	3.0	6.0	10.0

ZIEL_TMOT

x	50.0	70.0	90.0	100.0	110.0	130.0	150.0	160.0
z	-5.0	-3.0	0.0	0.0	1.0	3.0	6.0	10.0

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
AGR	Abgasrückführung
ASCET	Advanced Simulation and Control Engineering Tool
ATL	Abgasturbolader
BKV	Bremskraftverstärker
CF	Call Forwarding
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CW	Call Waiting
FAS	Feueralarmsystem
g/s	Gramm pro Sekunde
HC	Kohlenwasserstoff
HMB	Halbmotorbetrieb
INCA	Integrated Calibration and Application Tool
KAT	Katalysator
kg/s	Kilogramm pro Sekunde
km/h	Kilometer pro Stunde
mg	Milligramm
Nm	Newtonmeter
NO _x	Stickoxid
NO _x -KAT	NO _x -Speicherkatalysator
OEM	Original Equipment Manufacturer (Fahrzeughersteller)
PFLT	Partikelfilter
VF	Vorausschauendes Fahren
VMB	Vollmotorbetrieb
WAS	Wasseralarmsystem

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1 Übersicht der Features und deren Hauptaufgabe.....	26
Tabelle 3.2 Übersicht der Feature-Interaktionen.....	28
Tabelle 5.1 Auswahl ohne Anpassung der Gewichtungsfaktoren.....	46
Tabelle 5.2 Zweiter (links) und dritter (rechts) Iterationsschritt des Auswahlverfahrens mit Anpassung der Gewichtungsfaktoren.....	47
Tabelle 5.3 Eingangsgrößen des Feature-Koordinators	53
Tabelle 6.1 Entwicklung des Gesamtnutzens der Features.....	64
Tabelle 6.2 Entwicklung des Gesamtnutzens von PFLT-Regenerieren.....	65
Tabelle 7.1 Features mit zugehörigem Einflusswert	67

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Mögliche Feature-Interaktionen zwischen drei Features	6
Abbildung 3.1 Viertakt- Prinzip	10
Abbildung 3.2 Strukturbild eines aufgeladenen Ottomotors mit Direkteinspritzung und Komponenten für elektronische Steuerung	14
Abbildung 3.3 Kraftstoffwolke bei Schichtbetrieb	24
Abbildung 4.1 Zustandsdiagramme der Features und des Systems	32
Abbildung 4.2 Gesamtes Zustandsdiagramm	33
Abbildung 4.3 Routing der verteilten Feature Komposition	34
Abbildung 4.4 Lösung der FI zwischen CW und CF	34
Abbildung 4.5 Architektur und Funktion des Feature-Interaktions-Managers	36
Abbildung 4.6 Architektur für koordinierten Zugriff auf Variablen	38
Abbildung 5.1 Zeitlicher Ablauf der Koordinierung	42
Abbildung 5.2 Beispiel für Einflussfunktionen eines Features	43
Abbildung 5.3 Funktionen zur Bildung des 1. (a, b) und des 2. Terms (c) des Gewichtungsfaktors	45
Abbildung 5.4 Ablauf der Feature-Auswahl	47
Abbildung 5.5 Anwendungsszenario 1, HMB und PFLT-Regenerieren	49
Abbildung 5.6 Blockdiagramm zur Erklärung der ASCET-Symbole	51
Abbildung 5.7 Gesamtübersicht Feature-Koordinator	52
Abbildung 5.8 Generierung der Gewichtungsfaktoren	54
Abbildung 5.9 Zielfunktionen für die Abgastemperatur	55
Abbildung 5.10 Vorselektion	56
Abbildung 5.11 Gesamtansicht des Auswahlalgorithmus	57
Abbildung 5.12 Subblock HMB, ident aufgebaut wie die Blöcke KAT und PFLT	57
Abbildung 5.13 Subblock Feature_Wahl	58
Abbildung 6.1 Benutzeroberfläche des LabCar-Modells	61
Abbildung 6.2 INCA-Messumgebung	62
Abbildung 6.3 Gemeinsamer Einsatz von HMB und KAT-Heizen	63
Abbildung 6.4 VF und PFLT-Regenerieren	64
Abbildung 7.1 Problem der Umsetzung: Toggeln der Aktivierung von PFLT-Regenerieren	68

Literaturverzeichnis

- [1] Sven Apel, Don Batory, Christian Kästner, Gunter Saake, *Feature-Oriented Software Product Lines*, Springer, 2013.
- [2] Jan Bosch, *Design and use of software architectures: adopting and evolving a product-line approach*, ACM Press, 2000.
- [3] Kyo C. Kang, FORM: A Feature-Oriented Reuse Method with Domain-Specific Reference Architectures, In *Annals of Software Engineering* 5, pp. 143–168, Jan. 1998.
- [4] Pamela Zave, An experiment in feature engineering, In *Programming Methodology*, Springer Verlag, 2003.
- [5] Sven Apel, Christian Lengauer, Bernhard Möller, Christian Kästner, An Algebraic Foundation for Automatic Feature-Based Program Synthesis, In *Science of Computer Programming*, pp. 1022–1047, Nov. 2010.
- [6] Andreas Vogelsang, Steffen Fuhrmann, Why Feature Dependencies Challenge the Requirements Engineering of Automotive Systems: An Empirical Study, In *Requirements Engineering Conference (RE), 2013 21st IEEE International*, 2013, pp. 267–272.
- [7] Dominik Ertl, Sven Dominka, Hermann Kaindl, Using a Mediator to Handle Undesired Feature Interaction of Automated Driving, In *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2013, pp. 4555–4560.
- [8] Konrad Reif, *Ottomotor- Management*, Springer Vieweg, 2014.
- [9] Fred Schäfer, Richard van Basshuysen, *Handbuch Verbrennungsmotor*, Springer Vieweg, 2014.
- [10] Günter P. Merker, *Grundlagen Verbrennungsmotoren*, Springer Vieweg, 2014.
- [11] (2010) www.vcd.org. [Online].
http://www.vcd.org/fileadmin/user_upload/redakteure_2010/themen/auto_umwelt/Partikelfilter/VCD-Faktencheck_Partikel_aus_Benzin-Direkteinspritzern.pdf
- [12] www.eict.de. [Online]. http://www.eict.de/de/newsreader-DE/items/Wie_kooperative_Systeme_vorausschauendes_Fahren_unterstuetzen.html
- [13] Christian Prehofer, An Adaptive Control Model for Non-Functional Feature Interactions, In *37th EUROMICRO Conference on Software Engineering and Advanced Applications*, 2011, pp. 501–507.
- [14] Christian Prehofer, Plug-and-play composition of features and feature interactions with statechart diagrams, In *Softw Syst Model*, 2003, pp. 221–234.
- [15] Michael Jackson, Pamela Zave, Distributed Feature Composition: A Virtual Architecture for Telecommunications Services, In *IEEE TRANSACTIONS ON SOFTWARE ENGINEERING, VOL. 24, NO. 10*,

1998, pp. 831–847.

- [16] Hanjiang Lai, Yong Tang, HaiXia Luo, Yan Pan, Greedy Feature Selection for Ranking, In *15th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design*, 2011, pp. 42–46.
- [17] Tong Zhang, Adaptive Forward-Backward Greedy Algorithm for Learning Sparse Representation, In *IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, VOL. 57, NO. 7*, 2011, pp. 4689–4708.
- [18] Hermann Kaindl, *Problemlösung durch heuristische Suche in der Artificial Intelligence*, Springer-Verlag Wien NewYork, 1989.
- [19] Michael Wilson, Evan H. Magill, Mario Kolberg, An Online Approach for the Service Interaction Problem in Home Automation, In *Consumer Communications and Networking Conference*, 2005, pp. 251–256.
- [20] Cecylia Bocovich, Joanne M. Atlee, Variable-Specific Resolutions for Feature Interactions, In *FSE 2014 Proceedings of the 22nd ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering*, 2014, pp. 553–563.
- [21] Norbert Siegmund, Sergiy S. Kolesnikov, Christian Kästner, Sven Apel, Don Batory, Gunter Saake, Predicting Performance via Automated Feature-Interaction Detection, In *ICSE*, Zürich, 2012, pp. 167–177.