

Masterarbeit

**Modellbasierte Entwicklung einer  
Betriebsstrategie mit automatisierter Gangwahl  
für ein parallel-hybrides Freizeitfahrzeug**

Günther A. Roland

---

Institut für Technische Informatik  
Technische Universität Graz



Begutachter: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Eugen Brenner

Graz, im September 2012

## Kurzfassung

Die Ansteuerung des Antriebsstrangs ist in einem Hybridfahrzeug durch die wesentlich höhere Komplexität deutlich schwieriger als in einem konventionellen Fahrzeug. Um durch die Einführung eines Hybridantriebs weniger Kraftstoff zu verbrauchen und weniger Abgase zu produzieren, ist eine möglichst gute Betriebsstrategie erforderlich. Die Betriebsstrategie trifft alle wichtigen Entscheidungen im Antriebsstrang und übernimmt für ein eventuell vorhandenes Getriebe auch die Schaltstrategie.

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Betriebsstrategie für ein Freizeitfahrzeug mit parallel-hybridem Antriebsstrang und automatisiertem Schaltgetriebe. Die gezeigte Betriebsstrategie berücksichtigt die im Vergleich zum PKW deutlich höheren Anforderungen an die Fahrdynamik sowohl in der Leistungsverteilung als auch in der Schaltstrategie. Durch den Einsatz von Matlab/Simulink® mit physikalischen Modellen der verwendeten Komponenten kann die Entwicklung deutlich unterstützt werden. Zum Test der Betriebsstrategie werden standardisierte Testzyklen verwendet, bei denen in bestimmten Konfigurationen der Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu einem konventionellen Antriebsstrang um bis zu 65% reduziert werden kann.

## Abstract

The power train control in a hybrid vehicle is significantly more complex than in a conventional vehicle. The main goal of introducing a hybrid power train to a vehicle is to reduce fuel consumption and exhaust gases. To achieve this goal a good operation strategy is required. The operation strategy decides every variable of the power train. In case a transmission is present it will additionally take the role of the transmission control.

This work describes an operation strategy designed for a parallel hybrid powersports vehicle with an automated transmission. The presented operation strategy considers the high expectations to drivability and responsiveness in both power distribution and transmission control. By using Matlab/Simulink® with physical models of the drive train components, development can be supported significantly. To test the operation strategy standardized driving cycles are used. In certain configurations the fuel consumption can be reduced by up to 65% compared to a conventional power train.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 26. September 2012

---

Günther A. Roland

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich bei der Erstellung meiner Diplomarbeit unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Eugen Brenner für die Betreuung der Arbeit. Weiters möchte ich mich bei allen Kollegen, insbesondere bei Herrn Christoph Dutzler sowie Herrn Walter Hinterberger, bedanken, die mir meine fachlichen Fragen stets geduldig beantwortet haben.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung.....	1
1.3 Gliederung .....	1
2 Grundlagen.....	2
2.1 Hybridantriebe.....	2
2.1.1 Paralleler Hybrid .....	2
2.1.2 Serieller Hybrid .....	3
2.1.3 Kombinationen.....	4
2.1.4 Grad der Hybridisierung.....	5
2.2 Komponenten .....	6
2.2.1 Elektromotor.....	6
2.2.2 Batterie .....	6
2.2.3 Verbrennungsmotor.....	8
2.2.4 Getriebe .....	9
2.3 Energieverbrauch.....	10
2.3.1 Kraftstoff-Energie-Äquivalent .....	10
2.3.2 Testzyklus .....	11
2.4 Fahrdynamik .....	13
2.5 Stand der Technik .....	14
2.5.1 Hybridfahrzeuge.....	14
2.5.2 Verfahren zur Verbrauchsoptimierung .....	14
2.5.3 Gangfolgekonzept .....	15
2.5.4 Nutzung von Navigationsdaten.....	16
2.6 Can-Am Spyder Hybrid Roadster .....	17
3 Betriebsstrategie .....	20
3.1 Momentenverteilung.....	20
3.1.1 Lastpunktverschiebung .....	21
3.1.2 Boost .....	23
3.2 Ladestrategie .....	23
3.2.1 Energiebewertung.....	24
3.2.2 Vorausschauende Ladestrategie .....	25
3.2.3 Lebensdauer der Batterie .....	25
3.3 Start/Stop des Verbrennungsmotors.....	25
3.4 Gangwahl.....	27
3.4.1 Entscheidungslogik für den Gangwechsel .....	29
3.4.2 Vorausschauend schalten .....	30
3.4.3 Manueller Eingriff .....	31

---

3.4.4	Realisierbarkeit des Gangwechsels .....	31
3.4.5	Schaltruckkompensation.....	31
3.5	Einschränkung der Komplexität der Gangwahl.....	32
3.6	Gangwahl und Fahrdynamik .....	32
3.6.1	Beschleunigung.....	33
4	Hybridsteuergerät .....	35
4.1	Verarbeitung der Ein- und Ausgänge.....	35
4.2	Low-Level-Control.....	36
4.2.1	Interface zur Betriebsstrategie.....	36
4.2.2	Funktionen.....	37
4.3	Betriebsstrategie.....	43
4.3.1	Bestimmung der Fahrer kennzahl .....	44
4.3.2	Ladestrategie.....	44
4.3.3	Umschaltung zwischen elektrischem und hybridem Betrieb .....	44
4.3.4	Momentenverteilung.....	45
4.3.5	Gangwahl mit Kennlinien .....	46
4.3.6	Intelligente Schaltstrategie .....	47
4.3.7	Manuelle Gangwahl.....	51
4.4	Betriebsmodi .....	52
4.5	Sicherheitsfunktionen.....	53
5	Simulation und Tests .....	54
5.1	Fahrzeugsimulation .....	54
5.1.1	Virtueller Fahrer.....	56
5.1.2	Fahrwiderstände .....	56
5.1.3	Getriebe .....	58
5.1.4	Verbrennungsmotor.....	59
5.1.5	Elektromotor und Inverter .....	61
5.1.6	Batterie .....	62
5.2	Prüfstand .....	63
5.3	Ergebnisse.....	63
5.3.1	Referenzmotor .....	64
5.3.2	Simulation mit einfacher Betriebsstrategie .....	65
5.3.3	Simulation unter Verwendung der Gangwahl mit Kennlinien .....	68
5.3.4	Simulation der vollständigen Betriebsstrategie .....	69
5.3.5	Betriebsstrategie am Prüfstand .....	74
5.3.6	Vergleich .....	75
6	Zusammenfassung.....	77
7	Literaturverzeichnis.....	79
Anhang	.....	82
A	Liste der verwendeten Symbole .....	82
A.1	Abkürzungen.....	82
A.2	Symbole .....	82

---

B	Ergebnisse.....	84
B.1	WMTC bei Gangwahl mit Kennlinien .....	84
B.2	Betriebsstrategie im Modus „Electric“ .....	85
B.3	Betriebsstrategie im Modus „Economy“ .....	86
B.4	Betriebsstrategie im Modus „Recharge“ .....	90
B.5	Betriebsstrategie im Modus „Sport“ .....	94
B.6	Betriebsstrategie am Prüfstand .....	98



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Paralleler Hybrid .....	2
Abbildung 2-2: Serieller Hybrid .....	3
Abbildung 2-3: Kombiniertes Hybrid .....	4
Abbildung 2-4: Leistungsverzweigender Hybrid.....	5
Abbildung 2-5: Ragone-Diagramm: spezifische Leistung von Batterietechnologien im Vergleich zu ihrer spezifischen Energie [15] .....	7
Abbildung 2-6: Weltweit harmonisierter Prüfzyklus für Krafträder (WMTC) .....	12
Abbildung 2-7: Eigener Testzyklus mit variabler Steigung.....	13
Abbildung 2-8: Can-Am Spyder Hybrid Roadster [6] .....	17
Abbildung 2-9: Rotax 4-TEC ACE 600 [16] .....	18
Abbildung 2-10: Antriebsstrangtopologie des Can-Am Spyder Hybrid Roadster .....	19
Abbildung 3-1: Blockschaltbild der Betriebsstrategie .....	20
Abbildung 3-2: Verbrauchskennfeld .....	21
Abbildung 3-3: Lastpunktverschiebung .....	22
Abbildung 3-4: Verbrauchskennfeld mit optimaler Verbrauchslinie und prozentuellen Abweichungen davon .....	23
Abbildung 3-5: Drehzahlen des Verbrennungsmotors für konstante Getriebeausgangsdrehzahl .....	28
Abbildung 3-6: Spezifischer Verbrauch für alle Gänge bei konstanter Getriebeausgangsdrehzahl .....	28
Abbildung 4-1: Schaltlinien in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment an der Getriebeausgangsseite Im Hintergrund: Verbrauchsoptimaler Gang im jeweiligen Betriebspunkt .....	47
Abbildung 4-2: Gangwechsel bei Erreichen der Schaltschwellen.....	51
Abbildung 5-1: Erweiterte Fahrzeugsimulation in Matlab/Simulink .....	55
Abbildung 5-2: Antriebsstrang für die Funktionsentwicklung in Matlab/Simulink .....	55
Abbildung 5-3: Aufteilung des Reglerausgangs auf Gas, Bremse und Rekuperation .....	56
Abbildung 5-4: Fahrwiderstände am Fahrzeug.....	57
Abbildung 5-5: Verzögerung des Kupplungsdrucks von Soll- auf Ist-Zustand .....	59
Abbildung 5-6: Gang/Start-Stopp: WMTC Referenzmotor .....	64
Abbildung 5-7: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC Referenzmotor .....	65
Abbildung 5-8: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC mit Original-Simulation .....	66
Abbildung 5-9: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC mit Original-Simulation.....	66
Abbildung 5-10: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC mit Original-Simulation.....	67
Abbildung 5-11: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC bei Gangwahl mit Kennlinien .....	68
Abbildung 5-12: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Economy“ mit Start-SOC = End-SOC .....	72
Abbildung B-1: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC bei Gangwahl mit Kennlinien.....	84
Abbildung B-2: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC bei Gangwahl mit Kennlinien.....	84
Abbildung B-3: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Electric“ .....	85
Abbildung B-4: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Electric“ .....	85
Abbildung B-5: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 10%).....	86

---

Abbildung B-6: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 10%) .....	86
Abbildung B-7: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 10%) .....	86
Abbildung B-8: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 50%).....	87
Abbildung B-9: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 50%) .....	87
Abbildung B-10: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 50%) .....	87
Abbildung B-11: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 100%).....	88
Abbildung B-12: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 100%) .....	88
Abbildung B-13: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 100%) .....	88
Abbildung B-14: Gang/Start-Stopp/SOC: Eigener Zyklus im Modus „Economy“ (Start-SOC = 85%).....	89
Abbildung B-15: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: Eigener Zyklus im Modus „Economy“ (Start-SOC = 85%) .....	89
Abbildung B-16: Betriebspunkte des Elektromotors: Eigener Zyklus im Modus „Economy“ (Start-SOC = 85%) .....	89
Abbildung B-17: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 10%).....	90
Abbildung B-18: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 10%) .....	90
Abbildung B-19: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 10%) .....	90
Abbildung B-20: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 50%).....	91
Abbildung B-21: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 50%) .....	91
Abbildung B-22: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 50%) .....	91
Abbildung B-23: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 100%).....	92
Abbildung B-24: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 100%) .....	92
Abbildung B-25: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 100%) .....	92
Abbildung B-26: Gang/Start-Stopp/SOC: Eigener Zyklus im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 85%).....	93
Abbildung B-27: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: Eigener Zyklus im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 85%) .....	93
Abbildung B-28: Betriebspunkte des Elektromotors: Eigener Zyklus im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 85%) .....	93
Abbildung B-29: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 10%).....	94
Abbildung B-30: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 10%) .....	94
Abbildung B-31: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 10%) ....	94

---

Abbildung B-32: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 50%).....	95
Abbildung B-33: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 50%) .....	95
Abbildung B-34: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 50%) ....	95
Abbildung B-35: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 100%).....	96
Abbildung B-36: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 100%) .....	96
Abbildung B-37: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 100%) ..	96
Abbildung B-38: Gang/Start-Stopp/SOC: Eigener Zyklus im Modus „Sport“ (Start-SOC = 85%).....	97
Abbildung B-39: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: Eigener Zyklus im Modus „Sport“ (Start-SOC = 85%) .....	97
Abbildung B-40: Betriebspunkte des Elektromotors: Eigener Zyklus im Modus „Sport“ (Start-SOC = 85%) .....	97
Abbildung B-41: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 100%).....	98
Abbildung B-42: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 100%) .....	98
Abbildung B-43: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 100%) .....	98
Abbildung B-44: Gang/Start-Stopp/SOC: Eigener Zyklus im Modus „Economy“ (Start-SOC = 85%).....	99
Abbildung B-45: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: Eigener Zyklus im Modus „Economy“ (Start-SOC = 85%) .....	99
Abbildung B-46: Betriebspunkte des Elektromotors: Eigener Zyklus im Modus „Economy“ (Start-SOC = 85%) .....	99
Abbildung B-47: Gang/Start-Stopp/SOC: Eigener Zyklus im Modus „Sport“ (Start-SOC = 85%).....	100
Abbildung B-48: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: Eigener Zyklus im Modus „Sport“ (Start-SOC = 85%) .....	100
Abbildung B-49: Betriebspunkte des Elektromotors: Eigener Zyklus im Modus „Sport“ (Start-SOC = 85%) .....	100

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Drehzahlgrenzen für Schaltvorgänge .....	47
Tabelle 4-2: Beispiel für Gang-Bewertungen bei einem SOC von 95%.....	49
Tabelle 4-3: Beispiel für Gang-Bewertungen bei einem SOC von 20%.....	49
Tabelle 5-1: Anzahl Startvorgänge und Motorstarts und -stopps: WMTC Referenzmotor.....	64
Tabelle 5-2: Anzahl Startvorgänge und Motorstarts und -stopps: WMTC mit Original-Simulation .....	66
Tabelle 5-3: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: WMTC mit Original-Simulation.....	67
Tabelle 5-4: Anzahl Startvorgänge und Motorstarts und -stopps: WMTC bei Gangwahl mit Kennlinien .....	68
Tabelle 5-5: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: WMTC bei Gangwahl mit Kennlinien .....	68
Tabelle 5-6: SOC-Verlauf: WMTC im Modus „Electric“ .....	69
Tabelle 5-7: Anzahl Schalt- und Startvorgänge und Laufzeit Verbrennungsmotor: WMTC im Modus „Economy“ .....	70
Tabelle 5-8: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: WMTC im Modus „Economy“ .....	70
Tabelle 5-9: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: WMTC im Modus „Economy“ mit Start-SOC = End- SOC.....	71
Tabelle 5-10: Anzahl Schalt- und Startvorgänge und Laufzeit Verbrennungsmotor: WMTC im Modus „Recharge“ .....	72
Tabelle 5-11: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: WMTC im Modus „Recharge“ .....	73
Tabelle 5-12: Anzahl Schalt- und Startvorgänge und Laufzeit Verbrennungsmotor: WMTC im Modus „Sport“ .....	73
Tabelle 5-13: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: WMTC im Modus „Sport“ .....	73
Tabelle 5-14: Anzahl Schalt- und Startvorgänge und Laufzeit Verbrennungsmotor: Messung: WMTC im Modus „Economy“ .....	74
Tabelle 5-15: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: Messung: WMTC im Modus „Economy“ .....	74
Tabelle 5-16: Anzahl Schalt- und Startvorgänge und Laufzeit Verbrennungsmotor: Messung: Eigener Zyklus (Start-SOC = 85%).....	75
Tabelle 5-17: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: Messung: Eigener Zyklus (Start-SOC = 85%) .....	75
Tabelle 5-18: Vergleich mit dem Referenzmotor .....	75

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Während hybride Varianten von Antriebssträngen in der Automobilindustrie bereits bei vielen Herstellern in Serienfahrzeugen verfügbar sind, gibt es im Bereich der motorisierten Freizeitfahrzeuge noch kaum Hybridprodukte in Serie. Gerade bei Freizeitfahrzeugen könnte aber eine Verringerung der Emissionen durch Verwendung eines Hybridantriebs zu einer höheren Akzeptanz in der Gesellschaft führen. Auch die Abgasgesetzgebung wird in Zukunft immer geringere Emissionsgrenzwerte vorschreiben, sodass langsam aber sicher auch für Freizeitfahrzeuge eine Alternative zu Erdöl als Energiequelle gefunden werden muss. Für zukünftige Zero-Emission-Zonen wird auch ein rein elektrischer Fahrbetrieb notwendig.

Bei Freizeitfahrzeugen ist für Kunden eher nicht der Kraftstoffverbrauch, sondern vielmehr die Fahrleistung das wichtigste Auswahlkriterium. Der meist höhere Preis eines Hybridfahrzeugs muss also sowohl durch einen niedrigeren Verbrauch als auch durch bessere Fahrleistungen kompensiert werden. Um trotz größerer Systemleistung einen niedrigeren Kraftstoffverbrauch zu erreichen, muss eine Betriebsstrategie dafür sorgen, dass das vom Fahrer vorgegebene Antriebsmoment möglichst optimal auf die beiden Motoren aufgeteilt wird.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer solchen Betriebsstrategie für ein hybrides Antriebskonzept für den Can-Am Spyder Hybrid Roadster. Dafür sind geeignete Strategien zu finden, um den Verbrennungsmotor, den Elektromotor und die Batterie in allen Betriebszuständen möglichst optimal zu nutzen. Zusätzlich soll eine automatisierte Schaltstrategie entworfen werden, die in Verbindung mit der restlichen Betriebsstrategie immer den passenden, ebenfalls möglichst optimalen, Gang wählt. Dabei darf aber nicht vernachlässigt werden, dass der Antriebsstrang in einem Freizeitfahrzeug eingesetzt werden soll. Die Fahrdynamik muss also von der Betriebsstrategie laufend auf hohem Niveau gehalten werden. Die Betriebsstrategie soll modellbasiert entwickelt werden, damit die Strategie auch in der Fahrzeugsimulation eingesetzt und bereits während der Entwicklungsphase getestet werden kann.

## 1.3 Gliederung

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in vier Teile. Der erste Teil beschäftigt sich mit den Grundlagen hybrider Antriebsstränge sowie dem Stand der Technik (Kapitel 2). Im zweiten Teil wird das Konzept der entwickelten Betriebs- und Schaltstrategie vorgestellt (Kapitel 3), deren Implementierung im Hybridsteuergerät im dritten Teil näher beschrieben wird (Kapitel 4). Im vierten Teil wird zunächst die verwendete Simulations- und Testumgebung gezeigt, bevor die Ergebnisse präsentiert werden (Kapitel 5). Die Zusammenfassung bildet den Abschluss der Arbeit.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Hybridantriebe

Ein Hybridfahrzeug ist grundsätzlich jedes Fahrzeug, in dessen Antriebsstrang mindestens zwei Antriebe unterschiedlicher Art vorhanden sind. In der Regel wird aber ein Verbrennungsmotor mit einem Elektromotor kombiniert. Ziel dabei ist es, den Verbrennungsmotor in einem günstigeren Wirkungsgradbereich betreiben zu können. Da Verbrennungsmotoren alleine die meiste Zeit nur unter Teillast, und damit, zumindest für Benzinmotoren, sehr schlechtem Wirkungsgrad, betrieben werden, wird versucht, solche Betriebspunkte mithilfe eines Elektromotors zu vermeiden.

Nach der Topologie der Komponenten und des möglichen Energieflusses können die folgenden Hybrid-Typen unterschieden werden [14]:

- Parallele Hybride
- Serielle Hybride
- Kombinationen aus parallelem und seriellem Hybrid

#### 2.1.1 Paralleler Hybrid

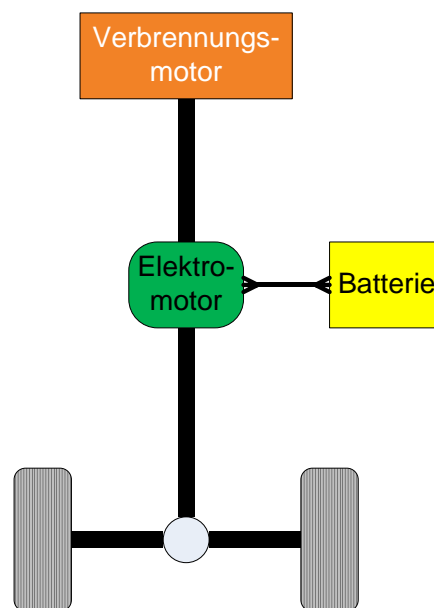


Abbildung 2-1: Paralleler Hybrid

Beim parallelen Hybrid (Abbildung 2-1) kann jeder Motor für sich, oder in Kombination mit dem anderen, das Fahrzeug antreiben. Die Leistungen der beiden Motoren können beliebig überlagert werden. Man kann nach Art der Überlagerung in

- Momentenaddition,
- Drehzahladdition und
- Zugkraftaddition unterteilen.

Bei der Momentenaddition können die Drehmomente von Verbrennungsmotor und Elektromotor beliebig gewählt werden. Die Drehzahlen sind durch feste Übersetzungsverhältnisse in den Verbindungselementen miteinander gekoppelt. Bei Verwendung eines Schalt- oder stufenlosen Getriebes (CVT, Continuously Variable Transmission) als Verbindung der beiden Momentenquellen lässt sich dieses vorher feste Übersetzungsverhältnis variieren. Um den Verbrennungsmotor bei reinem Elektrobetrieb nicht schleppen zu müssen kann ein Freilauf oder eine Kupplung die Verbindung unterbrechen. Drehzahladdition kann durch den Einsatz eines Planetengetriebes erreicht werden. In diesem Fall sind die Momente durch das Getriebe gekoppelt. Die Zugkraftaddition ist im Prinzip eine Momentenaddition, mit dem Unterschied, dass nicht eine gemeinsame Welle angetrieben wird, sondern jeder Motor eine andere Fahrzeugachse antreibt [5].

### 2.1.2 Serieller Hybrid

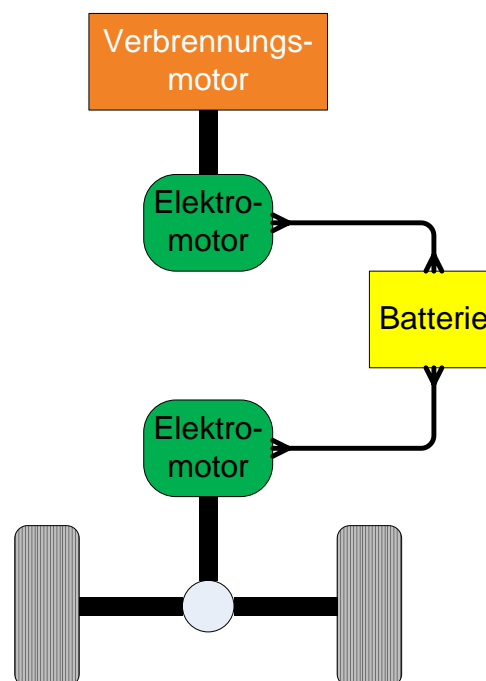


Abbildung 2-2: Serieller Hybrid

Im Gegensatz zum parallelen Hybrid sind beim seriellen Hybrid, wie in Abbildung 2-2 zu sehen ist, nicht beide Motoren mechanisch mit den Rädern verbunden. Zumindest ein Elektromotor treibt das Fahrzeug an, während mit dem Verbrennungsmotor und dem als Generator arbeitenden Elektromotor die elektrische Leistung dafür zur Verfügung gestellt wird. Der Generator lädt einen Pufferspeicher, von dem der Elektromotor dann gespeist wird. Durch den rein elektrischen Zwischenschritt kann der Verbrennungsmotor fast immer im optimalen Wirkungsgradbereich betrieben und transienter Betrieb weitgehend vermieden werden. Dem dadurch entstehende Vorteil steht aber der hohe Verlust durch die mehrfache Wandlung zwischen mechanischer und elektrischer Energie entgegen. Ein größerer Nachteil gegenüber dem parallelen Hybrid ist, dass alle Elemente des

Antriebsstrangs, also Verbrennungsmotor, Generator und Elektromotor, auf die geforderte Spitzenleistung ausgelegt werden müssen und damit deutlich größer und schwerer werden [5].

### 2.1.3 Kombinationen

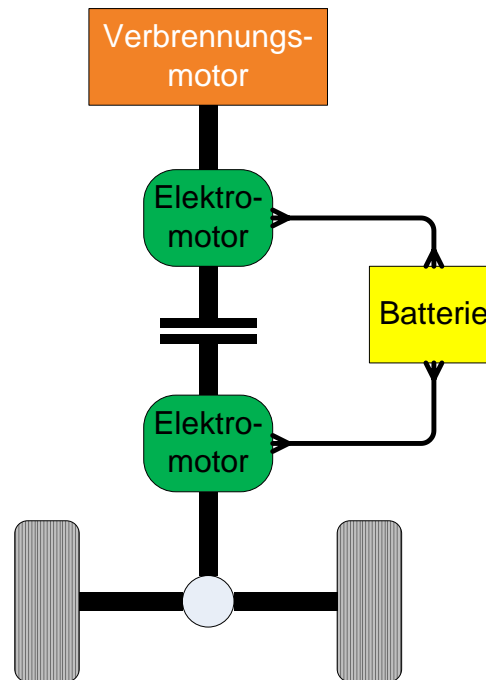


Abbildung 2-3: Kombiniertes Hybrid

Der kombinierte Hybrid (Abbildung 2-3) hat im Gegensatz zum seriellen Hybrid eine Kupplung als zusätzliche direkte Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und den Antriebsrädern. Ist die Kupplung geöffnet, arbeitet das System wie ein serieller Hybrid über die elektrische Verbindung. Wird sie geschlossen, kann der Verbrennungsmotor direkt, und damit ohne die Energiewandlungsverluste, die Räder antreiben. Zudem können auch beide Elektromotoren, zumindest kurzfristig, zusätzliche Antriebsleistung zur Verfügung stellen. Nachteilig sind der Aufwand der zusätzlichen Kupplung, die damit komplexere Betriebsstrategie, sowie der durch die notwendige mechanische Verbindung nicht mehr frei wählbare Einbauort des Verbrennungsmotors [5].



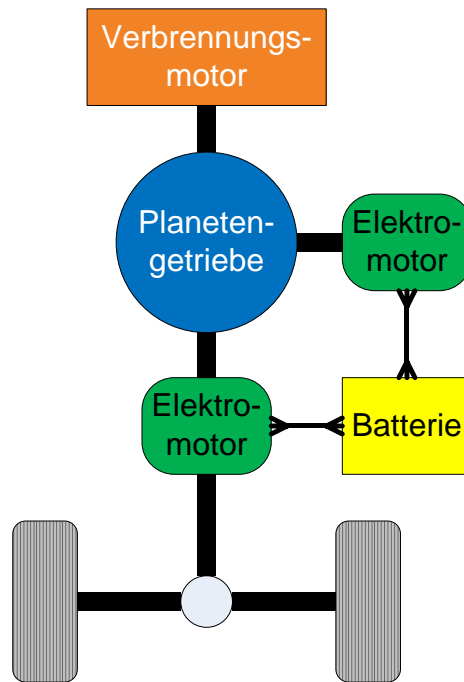


Abbildung 2-4: Leistungsverzweigender Hybrid

Eine komplexere Kombination ist der leistungsverzweigende Hybrid. Im Gegensatz zum kombinierten Hybrid besteht die mechanische Verbindung der drei Motoren dauerhaft über ein Planetengetriebe. Die Leistung des Verbrennungsmotors wird auf die Antriebsräder und einen Generator aufgeteilt. Der Generator lädt entweder die Batterie, oder liefert die elektrische Leistung direkt an den Elektromotor, der selbst auch über das Planetengetriebe die Räder antreibt. Durch den Aufbau wird das Planetengetriebe zum stufenlosen Getriebe für den Verbrennungsmotor [26].

#### 2.1.4 Grad der Hybridisierung

Zusätzlich kann auch nach dem Grad der Hybridisierung unterteilt werden in [10]:

- Mikrohybrid
- Mildhybrid
- Vollhybrid
- Plug-In Hybrid

Darunter ist der Mikrohybrid derzeit bereits relativ weit verbreitet. Unter diese Kategorie fällt die Start-Stopp-Automatik, also das Abstellen des Verbrennungsmotors bei Stillstand und Wiederstart, entweder bei Betätigung der Kupplung (manuelle Getriebe) oder bei Loslassen der Bremse (automatisches Getriebe).

Beim Mildhybrid kommt ein Startergenerator mit höherer Leistung zum Einsatz, der Starter und Lichtmaschine vereint. Der Startergenerator kann dabei einerseits als Generator beim Bremsen

Energie zurückgewinnen, andererseits beim Anfahren oder bei hohem Leistungsbedarf als Motor zusätzliche Leistung an den Antriebsstrang abgeben [40].

Ein Vollhybrid ist dadurch charakterisiert, dass, zumindest über kurze Strecken, rein elektrischer Fahrbetrieb möglich ist. Dafür ist bereits ein Elektromotor mit einer höheren, von der gewünschten Maximalgeschwindigkeit im elektrischen Betrieb abhängigen, Leistung notwendig.

Der Plug-In Hybrid erweitert den Vollhybrid um die Möglichkeit, die Batterie auch direkt aus dem Stromnetz zu laden. Die Batterie wird dafür größer ausgelegt, um beispielsweise den Weg zur Arbeit rein elektrisch fahren zu können und dort die Batterie wieder aufzuladen. Eine derzeit noch weitgehend fehlende Voraussetzung dafür sind passende Ladestationen. Als Alternative bietet sich die Kombination mit einem Range Extender an. Dieser kann bei leerer Batterie in Anordnung als serieller Hybrid zum Betrieb verwendet werden.

## 2.2 Komponenten

### 2.2.1 Elektromotor

Je nach Anforderung an das Hybridfahrzeug ist ein geeigneter Elektromotor zu finden. Aufgrund der hohen Leistungsdichte sowie dem hohen Wirkungsgrad werden permanenterregte Synchronmaschinen im automobilen Bereich bevorzugt eingesetzt. Ein großer Nachteil der permanenterregten Synchronmaschine im Vergleich zur Asynchronmaschine ist das Verhalten im Fehlerfall, da bei Kurzschluss oder Fehlfunktion des Umrichters Brems- oder Pendelmomente auftreten. Weitere Nachteile sind die zukünftig problematische Verfügbarkeit von magnetischen Materialien und die damit verbundenen höheren Herstellungskosten. Fremderregte Synchronmaschinen bieten dazu eine weniger kritische Alternative [18].

### 2.2.2 Batterie

Das vielleicht wichtigste Element eines Hybridfahrzeugs ist die Batterie<sup>1</sup>. Das gesamte Einsparungspotential der verschiedenen Hybridarten, mit Ausnahme des Plug-In Hybrid, wird nur dadurch erreicht, dass Bremsenergie oder eventuell überschüssige Leistung des Verbrennungsmotors in der Batterie zwischengespeichert, und später vom Elektromotor verwendet werden kann. Daraus ergibt sich auch eine wichtige Anforderung, die an Batterien in Hybridfahrzeugen gestellt werden muss: eine möglichst hohe Leistungsdichte, um die überschüssigen Leistungen in diesen Situationen möglichst vollständig in die Batterie zurückladen zu können.

---

<sup>1</sup> Obwohl klarerweise ein Akkumulator gemeint ist, wird in dieser Arbeit entsprechend der im automobilen Bereich geläufigen Terminologie die Benennung „Batterie“ verwendet.

Wie in Abbildung 2-5 zu erkennen ist, widerspricht diese Forderung aber den heute verfügbaren Technologien, so dass ein Kompromiss aus Leistungs- und Energiedichte gefunden werden muss, wobei die Energiedichte für den Einsatz in Fahrzeugen ein bedeutend größeres Problem darstellt.

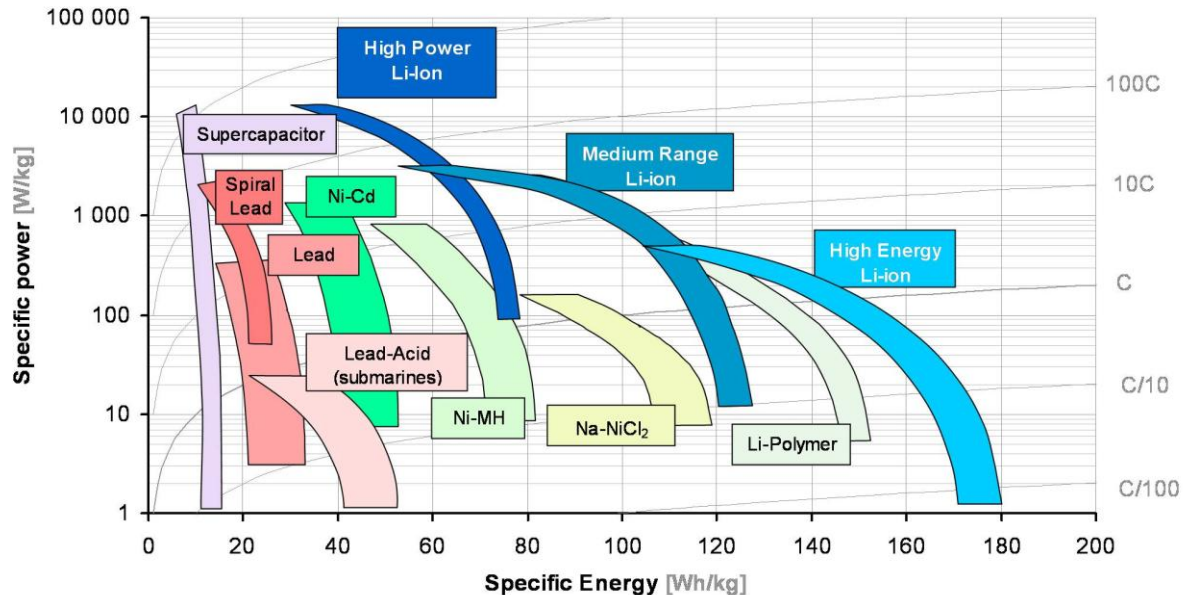


Abbildung 2-5: Ragone-Diagramm: spezifische Leistung von Batterietechnologien im Vergleich zu ihrer spezifischen Energie [15]

Während der Heizwert von Benzin zum Beispiel bei etwa  $41 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  liegt [22], erreichen die derzeit verfügbaren Batterien nur eine Energiedichte von etwa  $0,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  [10]. Anhand eines kleinen Rechenbeispiels kann dieser Unterschied verdeutlicht werden: der Benzinverbrauch eines Autos soll auf 100km sechs Liter betragen. Bei einer Dichte von  $750 \frac{\text{g}}{\text{l}}$  [22], und unter der Annahme, dass der Wirkungsgrad von Kraftstoff zu den Antriebsrädern 20% beträgt, entspricht dies einer Antriebsenergie von:

$$m_{\text{Benzin},100\text{km}} = \rho_{\text{Benzin}} * V_{\text{Benzin},100\text{km}} = 0,750 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 6 \text{ l} = 4,5 \text{ kg} \quad (2-1)$$

$$E_{\text{Benzin},100\text{km}} = m_{\text{Benzin},100\text{km}} * H_{i, \text{Benzin}} = 4,5 \text{ kg} * 41 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 184,5 \text{ MJ} \quad (2-2)$$

$$E_{\text{Antrieb},100\text{km}} = E_{\text{Benzin},100\text{km}} * \eta_{\text{Antrieb}, \text{Benzin}} = 184,5 \text{ MJ} * 20\% = 36,9 \text{ MJ} \quad (2-3)$$

Für ein vergleichbares Elektrofahrzeug mit einem sehr hoch angenommenen Wirkungsgrad von der Batterie zu den Antriebsrädern von 90% würde für die selben 100km folgende Energie von der Batterie benötigt:

$$E_{\text{Batterie,100km}} = \frac{E_{\text{Antrieb,100km}}}{\eta_{\text{Antrieb, Elektrisch}}} = \frac{36,9 \text{ MJ}}{90 \%} = 41 \text{ MJ} \quad (2-4)$$

Die dafür benötigte Batterie hätte damit ein Gewicht von:

$$m_{\text{Batterie,100km}} = \frac{E_{\text{Batterie,100km}}}{\rho_{\text{el,Batterie}}} = \frac{41 \text{ MJ}}{0,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = 82 \text{ kg} \quad (2-5)$$

Der direkte Vergleich der für dieselbe Strecke benötigten Gewichte macht deutlich, dass trotz des viel schlechteren Wirkungsgrades des Verbrennungsmotors, die Energiedichte von Benzin den entscheidenden Vorteil dieser Technologie darstellt. Ein durchschnittlicher Tank eines Mittelklasse Autos fasst etwa 50l Benzin, das entspricht einem Gewicht von etwa 36kg. Mit den Werten aus dem obigen Beispiel bedeutet dies ein Batteriegewicht von knapp 700kg für die gleiche Reichweite.

Ähnlich kann auch die beschränkte Ladeleistung von Batterien von der Seite der Praktikabilität betrachtet werden. Während beim konventionellen Fahrzeug der Tank relativ schnell gefüllt werden kann, zum Beispiel 50 Liter Benzin in zwei Minuten, dauert selbst eine Schnellladung eines aktuellen Elektrofahrzeugs, am Beispiel des Tesla Model S zumindest zwei Stunden [32]. Der Vergleich der Leistungen zeigt hier den gewaltigen Unterschied: das Nachtanken mit Benzin entspricht einer Leistung von 12,9MW (!), während die Ladung der Batterie auf (elektrisch aber dennoch sehr hohe) 20kW begrenzt ist. Beim Nachtanken auf einer längeren Autobahnfahrt kann dies zum Problem werden. Ein Range Extender bietet hier einen mit der aktuellen Versorgungslage akzeptablen Ausweg. Eine denkbare Alternative wäre, an Tankstellen vollgeladene Austauschbatterien zur Verfügung zu stellen. [3]

Diese Betrachtungen sind aber vor allem für Plug-In Hybride von Bedeutung. Wird die Batterie nebenbei vom Verbrennungsmotor geladen, und nur für kurze rein elektrische Fahrten verwendet, ist eine kleinere Batterie kein Nachteil.

### 2.2.3 Verbrennungsmotor

Beim parallelen Hybrid kann der Verbrennungsmotor kleiner als in einer Version ohne Hybrid ausgelegt werden, wenn die Höchstgeschwindigkeit nur mit elektrischer Unterstützung erreicht werden soll. Wenn die Batterie leer ist, fehlt die elektrische Antriebsleistung und es muss, wenn nötig, sogar Leistung vom Verbrennungsmotor zum Laden der Batterie abgezweigt werden. Durch die Verringerung der Leistung des Verbrennungsmotors wird dieser dafür häufiger in Bereichen höheren Wirkungsgrades betrieben. Dadurch steigt folglich der Gesamtwirkungsgrad des Hybridfahrzeugs.

Im Fall eines seriellen Hybrides kann zwischen Vollhybrid mit kleiner Batterie und Plug-In Hybrid unterschieden werden. Während beim Vollhybrid der Verbrennungsmotor immer annähernd die volle

Leistung, auf die das Fahrzeug ausgelegt ist, liefern können muss und nur kurze Leistungsspitzen von der Batterie abgefangen werden, kann beim Plug-In Hybrid der Verbrennungsmotor eventuell auch kleiner ausgelegt werden. Durch die Aufladung am Stromnetz wird bereits so viel Energie in die Batterie geladen, dass definierte Reichweiten ermöglicht werden. Soll danach noch weitergefahren werden, so kann dafür die Höchstgeschwindigkeit bzw. die Maximalleistung des Fahrzeugs limitiert werden, sowie bei langsamen Abschnitten, beispielsweise beim Durchfahren einer Ortschaft, die Batterie wieder nachgeladen werden. Erst bei längeren Fahrten mit hoher Geschwindigkeit und sinkendem Ladezustand der Batterie wird dann die tatsächliche Leistung des Verbrennungsmotors tragend.

#### 2.2.4 Getriebe

Prinzipiell können für Hybridfahrzeuge alle Arten von Getrieben verwendet werden, die auch in konventionellen Fahrzeugen Einsatz finden. Zur Steigerung der Effizienz ist es jedoch sinnvoll, ein automatisiertes Getriebe zu verwenden, und dem Fahrer die Auswahl des „besten“ Gangs abzunehmen [30].

Automatisierte Schaltgetriebe können relativ einfach aus bestehenden manuellen Getrieben weiterentwickelt werden. Am Beispiel eines Motorradgetriebes müssen dazu die Kupplung sowie die Schaltwalze durch elektrische Signale betätigt werden. Diese Betätigung kann durch elektrische Stellmotoren oder andere Aktuatoren erfolgen. Vorteile eines automatisierten Schaltgetriebes sind der hohe Wirkungsgrad, die einfache und kompakte Bauweise und die dadurch relativ geringen Herstellungskosten.

Automatikgetriebe sind durch den hydrodynamischen Drehmomentwandler sehr komfortabel, haben dadurch aber einen niedrigeren Wirkungsgrad als Schaltgetriebe. Durch die Überbrückung des Wandlers kann dieser Nachteil bei festem Gang zwar aufgehoben werden, durch die auch sonst hohe Komplexität und Baugröße eignen sich Automatische Getriebe eher für größere Fahrzeuge. Die Hybridisierung eines Automatikgetriebes wurde von ZF 2008 vorgestellt. In dem in [39] vorgestellten 8-Gang-Hybridgetriebe wird der Elektromotor anstelle des Wandlers verbaut und übernimmt dessen Funktion beim Anfahren. Durch die Position des Elektromotors bleibt die Größe des automatischen Getriebes vergleichbar mit nicht hybriden Automatikgetrieben, so dass die Hybridisierung von bestehenden Antriebssträngen bedeutend erleichtert wird.

Während bei automatischen sowie automatisierten Schaltgetrieben eine bestimmte Anzahl an festen Übersetzungsverhältnissen zur Verfügung steht, bieten stufenlose Getriebe eine viel größere Flexibilität. Innerhalb der baulichen Grenzen des stufenlosen Getriebes ist jede beliebige Übersetzung einstellbar. Dies ermöglicht sowohl bei konventionellen, als auch bei hybriden Antriebssträngen die

optimale Ausnutzung des Verbrennungsmotors, da über weite Geschwindigkeitsbereiche immer ein optimaler Betriebspunkt eingestellt werden kann.

## 2.3 Energieverbrauch

Zur Vergleich eines Hybridfahrzeugs zu einem konventionellen Fahrzeug und auch gegenüber anderen Hybridfahrzeugen stellt sich die Frage, wie der Energieverbrauch eines Hybridfahrzeugs bewertet werden soll.

Während bei konventionellen Fahrzeugen der Kraftstoffverbrauch über einen bestimmten Testzyklus für die Vergleichbarkeit ausreicht, kommt bei Hybridfahrzeugen die Batterie als zusätzliche Energiequelle hinzu. Um einen optimalen Kraftstoffverbrauch zu erreichen, ohne Rücksicht auf den Ladezustand zu nehmen, wird die Betriebsstrategie die Batterie so weit wie möglich entladen, um die gesamte dort gespeicherte Energie auszunutzen, da diese für den Kraftstoffverbrauch irrelevant ist. Daher muss, um die Testergebnisse zwischen konventionellen und hybriden Fahrzeugen vergleichen zu können, gewährleistet sein, dass entweder ein unterschiedlicher Ladezustand an Beginn und Ende des Testzyklus mit einem äquivalenten Kraftstoffverbrauch bewertet wird, oder der Ladezustand am Ende des Zyklus gleich wie am Beginn sein muss. Da letzteres nur in Simulationen mit Vorkenntnis des Fahrprofils realistisch erscheint, ist eine äquivalente Bewertung der Batterieladung notwendig.

### 2.3.1 Kraftstoff-Energie-Äquivalent

Wie in [17] dargestellt, kann die Ladebilanz der Batterie durch Verwendung eines „Kraftstoff-Energie-Äquivalents“ korrigiert werden. Dazu wird ein bestimmter Zyklus mehrfach abgefahren, mit dem Ziel, die Batterie mit anderen Parametern in der Betriebsstrategie wieder auf den ursprünglichen Ladezustand zu bringen. Die Differenzen im Kraftstoffverbrauch werden dann in Abhängigkeit von der Änderung des Energiegehalts der Batterie in einen äquivalenten Faktor umgerechnet, der den Kraftstoffverbrauch in Gramm pro Kilowattstunde elektrischer Energie in der Batterie angibt. In [21] wird dieser Wert auf den Ladezustand der Batterie (SOC, State of Charge) in g/% abgebildet, wobei 100% dem Energiegehalt der vollen Batterie entsprechen.

Bei einem Plug-In Hybrid mit Aufladung am Stromnetz muss diese Problematik noch näher betrachtet werden. Wird beispielsweise ein Zyklus vollständig elektrisch gefahren, so könnte ein Kraftstoffverbrauch von Null angegeben werden. Der Ladezustand der Batterie ist dabei aber entsprechend dem Zyklus gesunken. Hier wäre eine Vergleichsfahrt im reinen Verbrennungsmotorischen Betrieb notwendig, um den Kraftstoffbetrieb für diesen Zyklus zu ermitteln.

Für die vom Hersteller anzugebenden Verbrauchswerte, und damit auch als möglicher Richtwert für Fahrzeugsimulationen, gelten die Bestimmungen, die 2005 von der UNECE (United Nations Economic

Commission for Europe, Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen) in der Verordnung 101 festgelegt wurden [11]. Dort ist definiert, wie der Kraftstoffverbrauch bei hybridem Betrieb berechnet werden soll: der Testzyklus wird dabei zweimal abgefahren, einmal mit vollständig geladener Batterie, und ein zweites Mal mit vollständig entleerter Batterie. Zusätzlich muss die rein elektrische Reichweite ( $D_e$ ) bestimmt werden. Der gewichteter Kraftstoffverbrauch ( $C$ ) ergibt sich nach Gleichung (2-6).

$$C \text{ [l/100km]} = \frac{D_e[\text{km}] * C_1[\text{l/100km}] + D_{av}[\text{km}] * C_2[\text{l/100km}]}{D_e[\text{km}] + D_{av}[\text{km}]} \quad (2-6)$$

$C$  ....gewichteter Kraftstoffverbrauch [l/100km]  
 $D_e$  .. rein elektrische Reichweite [km]  
 $D_{av}$ . 25km, als angenommene Distanz zwischen zwei Batterieladungen  
 $C_1$ ....Kraftstoffverbrauch mit vollständig geladener Batterie [l/100km]  
 $C_2$ ....Kraftstoffverbrauch mit vollständig entleerter Batterie [l/100km]

Für eine Emissionsbetrachtung könnte später auch eine „Well-to-wheel“ Bewertung, wie in [38] dargestellt, durchgeführt werden, die sämtliche Umwelteinflüsse, nicht nur ausgehend vom Tank, bis zum Antrieb berücksichtigt.

### 2.3.2 Testzyklus

Um einen zwischen verschiedenen Fahrzeugen oder auch nur für unterschiedliche Parameter vergleichbaren Energieverbrauch zu ermitteln, ist ein genormter Testzyklus notwendig, der mit allen zu vergleichenden Fahrzeugen durchfahren wird. Während für PKW in Europa der NEDC (New European Driving Cycle, Neuer Europäischer Fahrzyklus) und in Nordamerika der FTP-75 (Federal Test Procedure 75, Fahrzyklus aus 1975) sowie der HWFET (Highway Fuel Economy Test, Autobahn-Fahrzyklus) Standard sind, wird für Motorräder und ähnliche Freizeitfahrzeuge der Euro 3 Zyklus und der WMTC (Worldwide harmonized Motorcycle emission Test Cycle, weltweit harmonisierter Prüfzyklus für Krafträder) als Referenz verwendet [9].

Im Gegensatz zu den sehr synthetischen Zyklen NEDC und Euro 3, basieren FTP-72, HWFET und WMTC auf realistischen Messfahrten. Im WMTC (Abbildung 2-6) sind auch hohe Beschleunigungen, wie sie bei sportlichen Motorradfahrten häufig vorkommen, berücksichtigt. Der Zyklus besteht aus drei Teilen zu je zehn Minuten. Der erste Teil soll eine Stadtfahrt abbilden, die Geschwindigkeiten sind niedriger als 60km/h und auch längere Ampelstopps werden simuliert. Das Geschwindigkeitsniveau im zweiten Teil ist bereits höher, mit Spitzen knapp über 90km/h. Wieder gibt es einen längeren Stopp mit anschließend sehr hoher Beschleunigung. Im dritten Teil wird, mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von über 100km/h für durchgehend mehr als sechs Minuten und einer

Spitzengeschwindigkeit von 126km/h, eine Autobahnfahrt simuliert. Der normierte Verbrauch ( $C_{\text{Gesamt}}$ ) im WMTC wird auf Basis der drei Teilergebnisse nach Gleichung (2-7) berechnet.

$$C_{\text{Gesamt}} [\text{l}/100\text{km}] = C_{\text{Teil 1}} [\text{l}/100\text{km}] * \frac{1}{4} + C_{\text{Teil 2}} [\text{l}/100\text{km}] * \frac{1}{2} + C_{\text{Teil 3}} [\text{l}/100\text{km}] * \frac{1}{4} \quad (2-7)$$

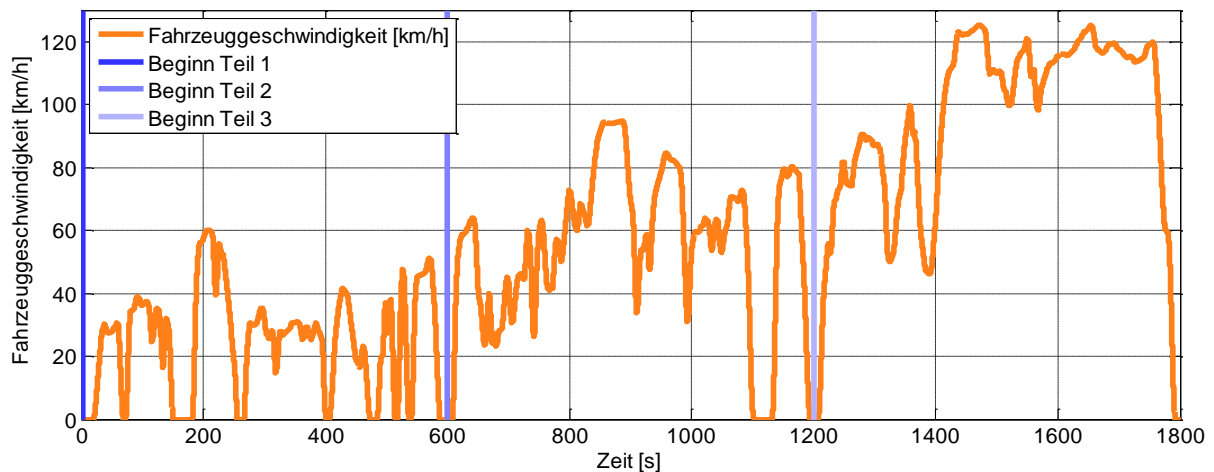


Abbildung 2-6: Weltweit harmonisierter Prüfzyklus für Krafträder (WMTC)

Ein weiterer, nur fünf Minuten langer, synthetischer Testzyklus, der in Abbildung 2-7 dargestellt ist, wurde eigens für die Entwicklung der Schaltstrategie entworfen. Im Gegensatz zu den genannten Normzyklen treten in diesem auch Steigungen und Gefälle auf, die die Schaltentscheidung deutlich beeinflussen können.



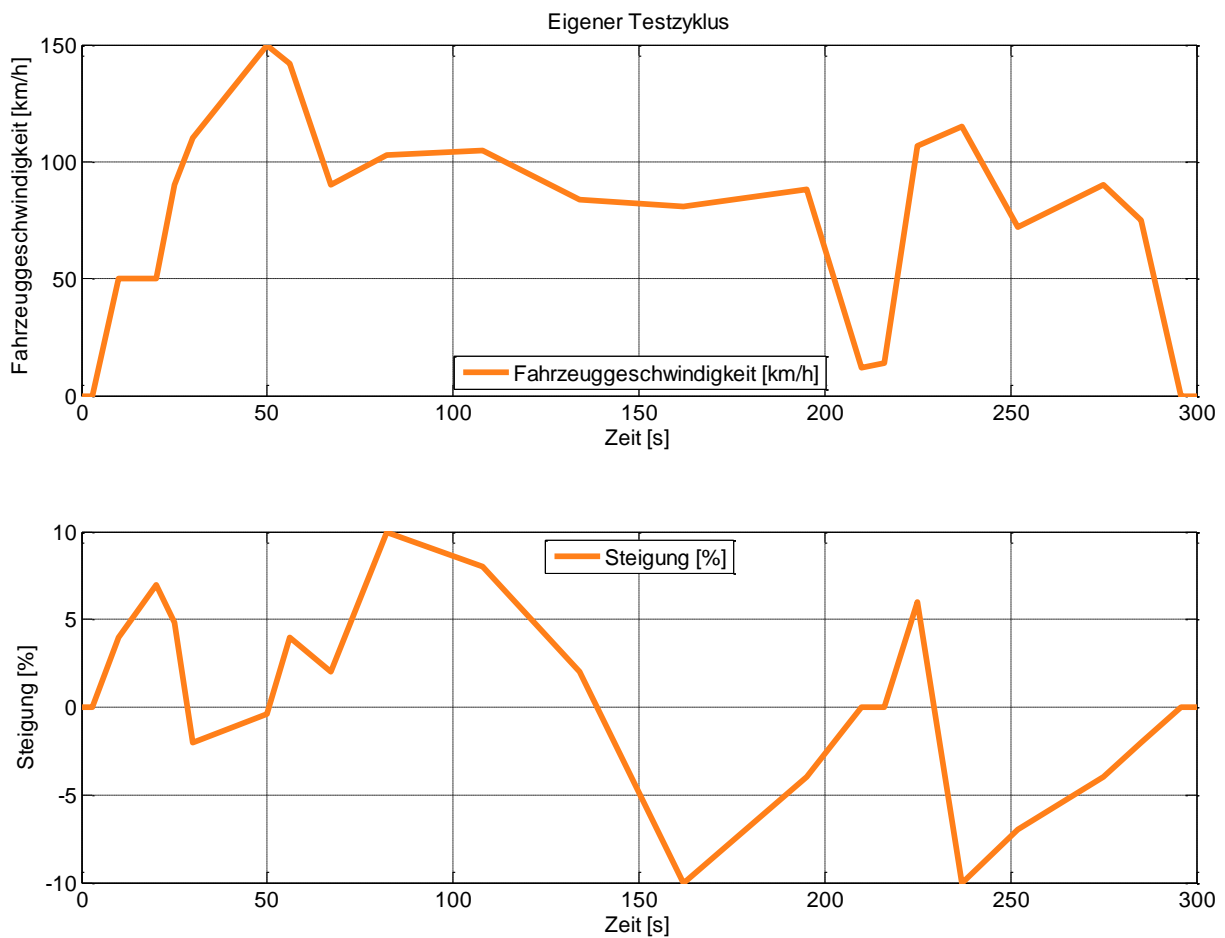


Abbildung 2-7: Eigener Testzyklus mit variabler Steigung

## 2.4 Fahrdynamik

Besonders bei Freizeitfahrzeugen spielen Fahrdynamik und der damit verbundene Fahrspaß eine sehr wichtige Rolle. Als messbare Indikatoren für die Fahrdynamik können Beschleunigungswerte verwendet werden. Die Zeit, die ein Fahrzeug benötigt, um von null auf 100km/h zu beschleunigen, oder die Elastizität, also eine Beschleunigungszeit zwischen höheren Geschwindigkeiten, kann als Richtwert dienen. In diesen Zeiten sind dann bereits die Effektivität der Schaltstrategie sowie die benötigten Schaltzeiten implizit berücksichtigt.

Für die Betriebsstrategie stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, wie wichtig die Optimierung auf niedrigen Kraftstoffverbrauch in jedem Moment tatsächlich ist. Ein Fahrzeug, das nur träge auf eine starke Erhöhung des Wunschkraftmoments reagiert, nur weil ein höherer Gang spritsparend ist, wird nicht akzeptiert werden. Diese Betrachtung muss also auch in den Entwurf der Betriebsstrategie einfließen.

## 2.5 Stand der Technik

### 2.5.1 Hybridfahrzeuge

Das wohl bekannteste und am weitesten verbreitete Hybridfahrzeug ist der Toyota Prius, mit mehr als 2,6 Millionen verkauften Fahrzeugen. Im Prius wird ein leistungsverzweigender Hybridantrieb mit Planetengetriebe eingesetzt. Durch die vielen Möglichkeiten bei der Leistungsverzweigung ist die Betriebsstrategie relativ komplex [20].

Der 2011 in Serie gegangene Chevrolet Volt verwendet eine Mischung aus kombiniertem und leistungsverzweigtem Hybrid. Die Verbindung des Verbrennungsmotors zum Abtrieb wird nicht direkt über eine Kupplung, sondern über den Generator und eine zusätzliche Kupplung mittels Planetengetriebe hergestellt. Bei voller Batterie wird der Volt rein elektrisch betrieben, bei hohen Geschwindigkeiten arbeitet dazu neben dem Elektromotor auch der Generator im motorischen Betrieb. Ist die Batterie leer, wird der Verbrennungsmotor gestartet und über den Generator der Elektromotor versorgt und gleichzeitig die Batterie geladen. Nur bei hohen Geschwindigkeiten und leerer Batterie wird die Kupplung vom Generator zum Planetengetriebe geschlossen und somit die Verbindung von Verbrennungsmotor zu Abtrieb hergestellt [1].

Im Bereich der Freizeitfahrzeuge existieren neben dem in Kapitel 2.6 näher beschriebenen Can-Am Spyder Hybrid Roadster, der von Bombardier Recreational Products (BRP) 2010 als Entwicklungsprojekt vorgestellt wurde [6], kaum Hybridkonzepte.

Ein Beispiel stellt ein Hybridmotorrad von Honda auf Basis der Goldwing dar. Der Elektromotor sitzt dort vor dem Verbrennungsmotor in der Nähe des Vorderrades. Das Hinterrad wird von der anderen Seite der Kurbelwelle angetrieben. Das Konzept ist also ein paralleler Hybrid. Möglicherweise wird auch nur der Startermotor durch einen größeren Elektromotor ersetzt. Von Honda wurden aber neben dem zugehörigen Patentantrag aus dem Jahr 2011 keine weiteren Informationen veröffentlicht [22].

### 2.5.2 Verfahren zur Verbrauchsoptimierung

In [24] wird eine unmittelbar optimierte Steuerung für ein Hybridfahrzeug vorgestellt. Das dort betrachtete Fahrzeug verfügt über einen leistungsverzweigenden Hybridantrieb mit elektrisch variablem Planetengetriebe mit sechs Modi (Multi-Mode Electric Variable Transmission, MMEVT). Das Problem, das MMEVT zu steuern, besteht in der Auswahl, welcher der sechs Modi (zwei Leistungsverzweigende und vier Parallele mit Momentenaddition) mit welcher Leistungsverteilung für den aktuellen Fahrzustand am besten geeignet ist: „The control of a hybrid vehicle can be summarized as finding the power split [...] that meets the driver torque request at the current speed of the vehicle, while maintaining acceptable battery state-of-charge“ [24].

Dazu müssen zunächst die für die elektrischen und mechanischen Leistungen relevanten Systemgleichungen aufgestellt und die Freiheitsgrade bestimmt bzw. eingegrenzt werden. Als quantitatives Optimierungsziel der optimalen Steuerung wird in Gleichung (2-8) das Zeitintegral über die Eingangsleistung des Verbrennungsmotors, also der Kraftstoffverbrauch während des beobachteten Zeitraums, betrachtet. Als Randbedingung wird festgelegt, dass der SOC am Beginn und Ende des Zeitraums gleich sein soll.

$$u^* = \underset{\substack{u \\ \text{SOC}_0 = \text{SOC}_{\text{end}}}}{\text{argmin}} \int_{t=0}^{t=t_{\text{end}}} P_{\text{eng}}(X(t), u(t), t) dt \quad (2-8)$$

Dieses Integral kann natürlich nur für im Vorhinein bekannte Fahrzyklen gelöst werden, da zukünftige Fahrerwünsche nicht vorhergesehen werden können. Für die unmittelbare Optimierung, also während eines unbekanntes Zyklus im normalen Fahrbetrieb, wird eine alternative Kostenfunktion eingeführt, die nur vom aktuellen Zustand abhängig ist. Aus Gründen der Vereinfachung werden die Start-Stopp-Logik sowie die SOC-Abhängigkeit von einfachen externen Bedingungen abgeleitet.

Das Optimierungsziel für die unmittelbar optimierte Steuerung beschränkt sich dadurch auf die einfache Forderung, dass zu jeder Zeit unter allen Möglichkeiten der Modus ausgewählt werden soll, der im niedrigsten momentanen Kraftstoffverbrauch resultiert. Die Optimierungslogik in [24] berechnet zu jedem Zeitpunkt für jeden Modus den optimalen Kraftstoffverbrauch und die dazu notwendigen Bedingungen. Eine separate Entscheidungslogik bestimmt auf Basis dieser Daten, welcher Modus überhaupt möglich, und welche der Möglichkeiten den geringsten Kraftstoffverbrauch erzielen würde. Da die Modi bei ständigem direktem Vergleich zu häufig gewechselt würden, werden verschiedene Methoden eingeführt um dies zu vermeiden, unter anderem muss der Kraftstoffverbrauch des Zielmodus bedeutend besser sein, als der aktuelle.

### 2.5.3 Gangfolgekonzept

In [23] wird für die Entwicklung einer Schaltstrategie für das automatisierte Schaltgetriebe eines konventionellen Fahrzeugs ein Gangfolgekonzept vorgestellt. Die Gänge werden dabei nicht nach festen Schaltschwellen gewechselt. Stattdessen wird abgeschätzt welche Folge von Gangwechseln für eine ganz bestimmte Fahrsituation den optimalen Verbrauch sowie die optimale Fahrdynamik erreicht. Als Fahrerwunsch wird in [23] ein Leistungswunsch verwendet. Dadurch kann eine Änderung des Wunschs in einem Drehzahl-Drehmoment-Diagramm als Übergang zwischen Leistungshyperbeln dargestellt werden. Ein Gangwechsel bei konstanter Leistungsanforderung verschiebt dann nur den Betriebspunkt auf einer solchen Hyperbel.

Zur Bestimmung der während der Gangfolge möglichen Gänge wird zunächst das Verhalten des Fahrzeugs nach Änderung der Wunschleistung betrachtet. Jeder Änderung des Leistungswunschs

folgt ein Beschleunigungs- oder Verzögerungsvorgang. Nach einiger Zeit wird sich ein Gleichgewicht zwischen Fahrwiderstand und Antriebsleistung ergeben, so dass sich eine konstante Fahrzeuggeschwindigkeit ergibt. Mit der so ermittelten Zielgeschwindigkeit kann ein Zielgang ermittelt werden, der für diese Geschwindigkeit den optimalen Verbrauch erreicht. Da die gewünschte Leistung nicht nur durch Zurückschalten in einen niedrigeren Gang erreicht werden kann, sondern auch durch Ausnutzung der Momentenreserve im eingelegten oder einem anderen Gang, bieten sich auch andere Gangfolgen an. Dabei muss allerdings auf ein sofortiges Anliegen der Wunschleistung verzichtet werden. Je nach Gangfolge ergeben sich unterschiedliche Einstellzeiten für die Wunschleistung. Die niedrigste Einstellzeit ergibt sich für die sofortige Rückschaltung in einen niedrigen Gang. Die Einstellzeit entspricht dann der Schaltzeit. Wird ein Gang gewählt, bei dem bei der aktuellen Geschwindigkeit die Maximalleistung niedriger ist als die Wunschleistung, muss zunächst bis zum Erreichen der Wunschleistung beschleunigt werden. Zur Bewertung der möglichen Gangfolgen wird davon ausgegangen, dass der Fahrer die mit der Wunschleistung erzielbare Geschwindigkeit tatsächlich erreichen will. Zunächst wird für jede Folge bestimmt, wie lange das Fahrzeug bis zum Erreichen der Wunschleistung benötigen wird, sowie wie viel Kraftstoff bis zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit verbraucht wird.

Um festzustellen, welche Zeit bis zum Erreichen der Wunschleistung für den Fahrer akzeptabel ist, wird eine „Kennzahl für den Fahrertyp“ eingeführt. Diese setzt sich aus einem Langzeit- sowie einem Kurzzeitwert zusammen. Der Langzeitwert beginnt bei jedem Motorstart genau zwischen ökonomisch und sportlich und wird durch das Fahrverhalten beeinflusst. Länger andauernde hohe Differenzen zwischen Wunschleistung und für die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit notwendiger Leistung verschieben den Langzeitwert in Richtung sportlich, wenn die Wunschleistung höher ist. Langsame Änderungen des Wunschmoments wirken in die andere Richtung. Der Kurzzeitwert wird nur aus der Ableitung der Wunschleistung, also der Gaspedalbeschleunigung, berechnet. Mit der Kombination der Kennzahlen wird eine Referenzzeit berechnet, die angibt, welche Verzögerung bis zum Erreichen der Wunschleistung für den Fahrer akzeptabel ist.

#### 2.5.4 Nutzung von Navigationsdaten

Das größte Optimierungspotential bei einem Hybridfahrzeug liegt, wie in Kapitel 2.5.2 bereits angemerkt, in der Streckenkenntnis. Ist die zu fahrende Strecke vollständig, inklusive aller auftretenden Kurven, Steigungen und Geschwindigkeitsbegrenzungen bekannt, kann im Voraus geplant werden, wann die Batterie ge- und entladen werden soll. Die Streckendaten können nicht nur aus einer aktiv vorgeplanten Route entnommen werden. Auch wenn im Navigationssystem keine Route geplant ist, kann ein wahrscheinlicher Weg anhand von Statistischen Analysen der bisherigen

Fahrten ermittelt werden. Sogar Telemetriedaten, wie Informationen über Ampelschaltungen, könnten in eine Betriebsstrategie einfließen [28].

Die Nutzung von Navigationsdaten ist nicht nur für Hybridfahrzeuge von Vorteil. Auch bei konventionellen Fahrzeugen kann die Kenntnis über die gefahrene Strecke Kraftstoff einsparen. Porsche entwickelt derzeit mit „ACC InnoDrive“ einen adaptiven Tempomaten, der seine Geschwindigkeit dynamisch an die Strecke anpasst. Durch Berücksichtigung von Kurvenverläufen und exakten Höheninformationen wird ein verbrauchsoptimales Geschwindigkeitsprofil erstellt, das dann automatisch eingestellt wird. Der Fahrer muss nur noch die Lenkung übernehmen. Mit diesem System kann sogar bei sportlicher Fahrweise der Kraftstoffverbrauch um etwa zehn Prozent reduziert werden [29].

## 2.6 Can-Am Spyder Hybrid Roadster

Die in dieser Arbeit vorgestellte Betriebsstrategie wurde für den Can-Am Spyder Hybrid (Abbildung 2-8) konzipiert, der derzeit von BRP entwickelt wird.



Abbildung 2-8: Can-Am Spyder Hybrid Roadster [6]

Der Can-Am Spyder hat zwei lenkbare Vorderräder und ein Hinterrad. Der Antrieb erfolgt über einen Zahnriemen am Hinterrad. In der regulären Version wird der Spyder von einem 2-Zylinder Motor mit  $998\text{cm}^3$  Hubraum und  $79\text{kW}$  (106PS) angetrieben [7]. Dieser Motor wird im Hybrid Spyder durch einen  $599,5\text{cm}^3$  2-Zylinder 4-Takt Motor (Abbildung 2-9) ersetzt, der bei BRP normalerweise im Ski-Doo verbaut wird und seine maximale Leistung von  $44\text{kW}$  (60PS) bei einer Drehzahl von  $7250\text{min}^{-1}$

erreicht [16]. Dazu kommt ein Elektromotor mit einer maximalen Dauerleistung von 20kW, der in Verbindung mit einer Lithium-Ionen Batterie eine rein elektrische Reichweite von 30km bei einer Maximalgeschwindigkeit von 50km/h erlauben soll. Dazwischen ist ein automatisiertes 6-Gang-Getriebe platziert, das sich noch in Entwicklung befindet. Gemeinsam treiben die Motoren das Hinterrad an und sollen im Vergleich zum aktuellen Serienfahrzeug 50% Kraftstoff einsparen [6].

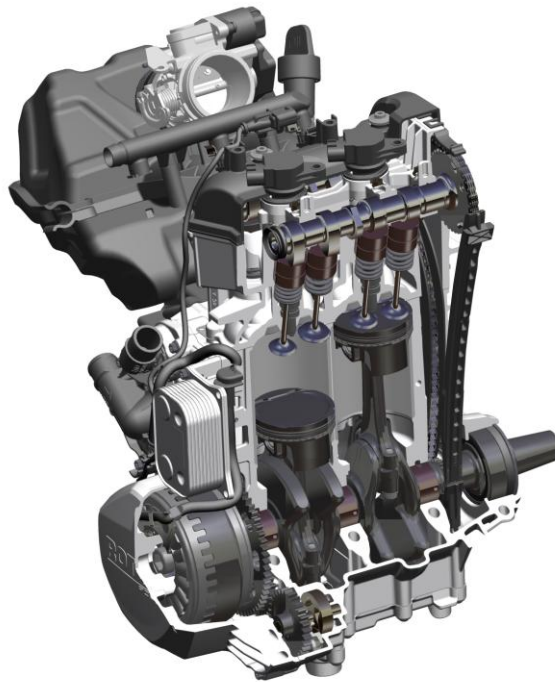


Abbildung 2-9: Rotax 4-TEC ACE 600 [16]

Der Can-Am Spyder Hybrid ist ein paralleler Plug-In Hybrid mit Momentenaddition. Die genaue Topologie wird in Abbildung 2-10 gezeigt.

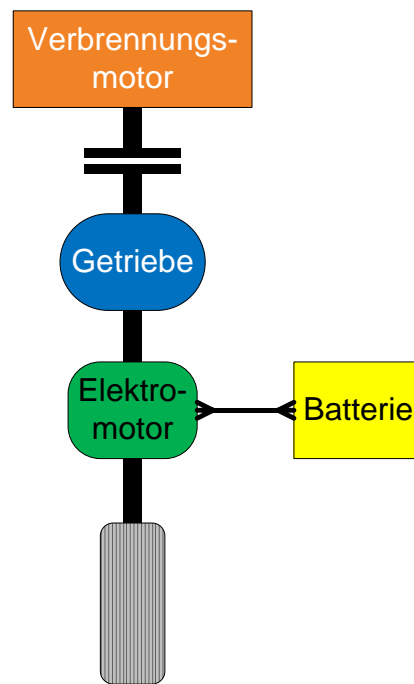


Abbildung 2-10: Antriebsstrangtopologie des Can-Am Spyder Hybrid Roadster

### 3 Betriebsstrategie

Grundsätzliches Ziel jeder Betriebsstrategie ist es, „den gesamten Antriebsstrang möglichst verbrauchs- und emissionsoptimiert zu betreiben“ [4].

Die Betriebsstrategie eines Hybridfahrzeugs entscheidet anhand der aktuellen Fahrsituation, welcher Antrieb aktiv und welche Leistung die einzelnen Antriebe abgeben oder aufnehmen sollen. Wenn zusätzlich ein automatisches Getriebe im Antriebsstrang vorhanden ist, muss die Betriebsstrategie auch den zum aktuellen Betriebspunkt passenden Gang wählen. Bei einem parallel-hybriden Antriebsstrang, existieren somit folgende Freiheitsgrade:

- Kupplung offen oder geschlossen
- Im Schaltgetriebe eingelegter Gang
- Vom Verbrennungsmotor zu lieferndes Moment
- Vom Elektromotor zu lieferndes Moment

Diese Parameter müssen also von der Betriebsstrategie bestimmt und vorgegeben werden.

Als Eingangsgrößen stehen der Betriebsstrategie der Fahrerwunsch sowie die am Fahrzeug gemessenen Signale zur Verfügung. Abbildung 3-1 zeigt ein vereinfachtes Blockschaltbild der Betriebsstrategie.

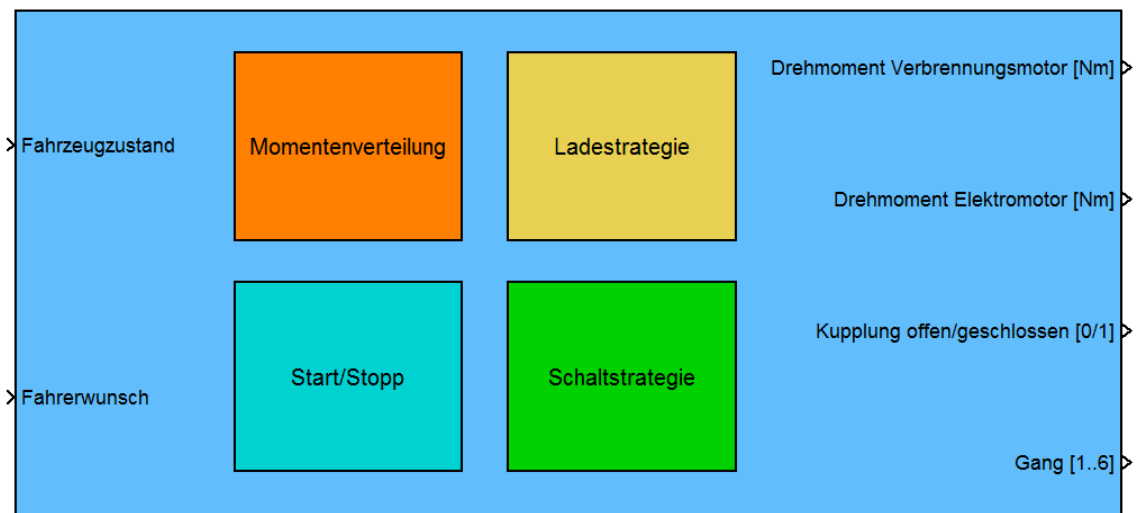


Abbildung 3-1: Blockschaltbild der Betriebsstrategie

#### 3.1 Momentenverteilung

Eine der wichtigsten Fragen bei der Steuerung eines Parallel-Hybridfahrzeugs ist, wie die Aufteilung des Wunschmoments des Fahrers auf die beiden Antriebe erfolgen soll. Durch die Addition der Antriebsmomente ist es prinzipiell möglich jede beliebige durch die Antriebe realisierbare Verteilung



einzustellen. Beispielsweise kann bei gleicher Fahrgeschwindigkeit die Batterie entweder geladen (Elektromotor liefert negatives = generatorisches Moment) oder entladen (Elektromotor liefert positives = motorisches Moment) werden, da das Summenmoment trotzdem konstant gehalten werden kann. Der grundsätzliche Wunsch besteht darin, den Verbrennungsmotor möglichst nahe an seinem optimalen Betriebspunkt zu halten. Zu diesem Zweck kann mit dem Elektromotor eine Lastpunktverschiebung durchgeführt werden. Der rein elektrische Betrieb wird hier nicht weiter diskutiert, da die „Verteilung“ dabei keiner weiteren Berechnung bedarf.

### 3.1.1 Lastpunktverschiebung

Durch Verringerung des motorischen Moments des Elektromotors kann also mehr Drehmoment vom Verbrennungsmotor angefordert werden, ohne damit das Antriebsmoment zu beeinflussen. Auch eine Verringerung des vom Verbrennungsmotor geforderten Moments ist damit durch Erhöhung des Elektromotormoments erreichbar. Betrachtet man in Abbildung 3-2 den spezifischen Verbrauch des Verbrennungsmotors im Muscheldiagramm, kann, insbesondere in Verbindung mit der Linie optimalen Verbrauchs in Abbildung 3-3, leicht erkannt werden, wann eine Anhebung oder Absenkung des Moments sinnvoll ist.

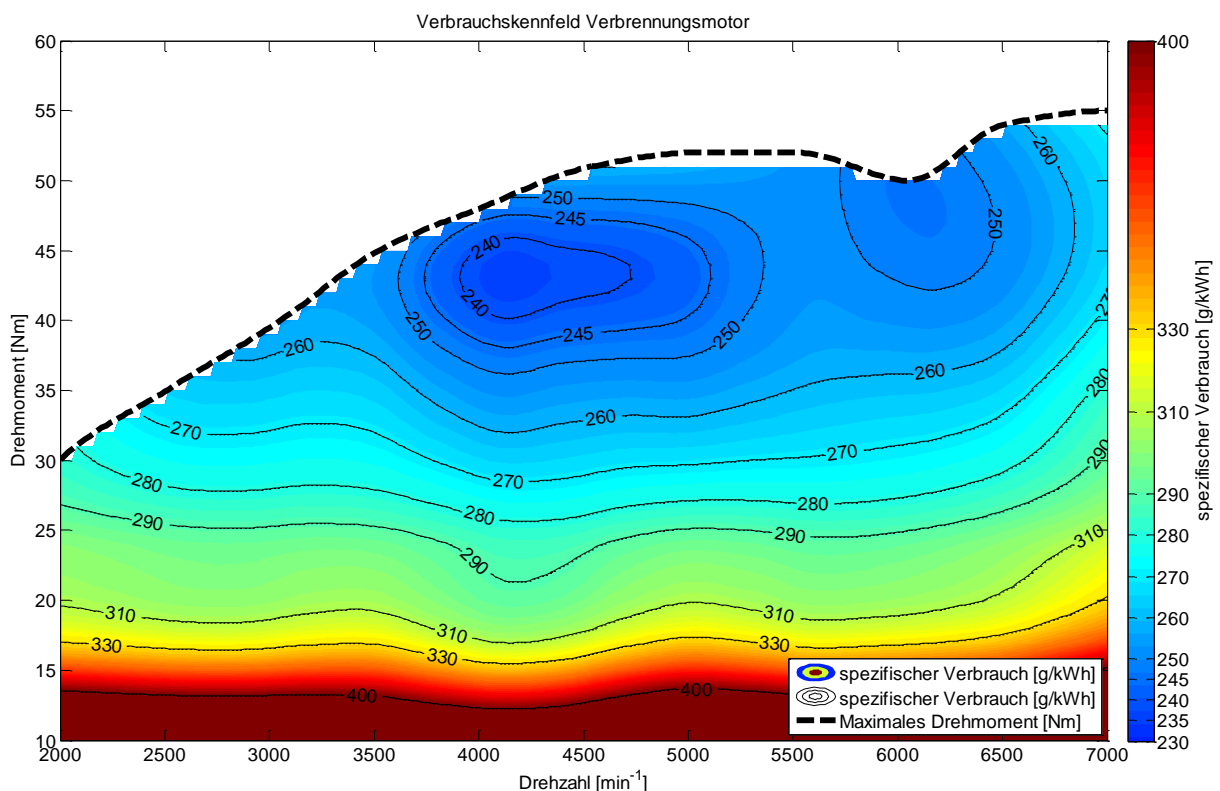


Abbildung 3-2: Verbrauchskennfeld

In Abbildung 3-3 sind zwei Betriebspunkte gekennzeichnet, die durch Lastpunktanhebung bzw. Lastpunktabsenkung in einen Bereich günstigeren Verbrauchs verschoben werden. Die Länge der Pfeile entspricht dabei dem vom Elektromotor auszugleichenden Moment [30].

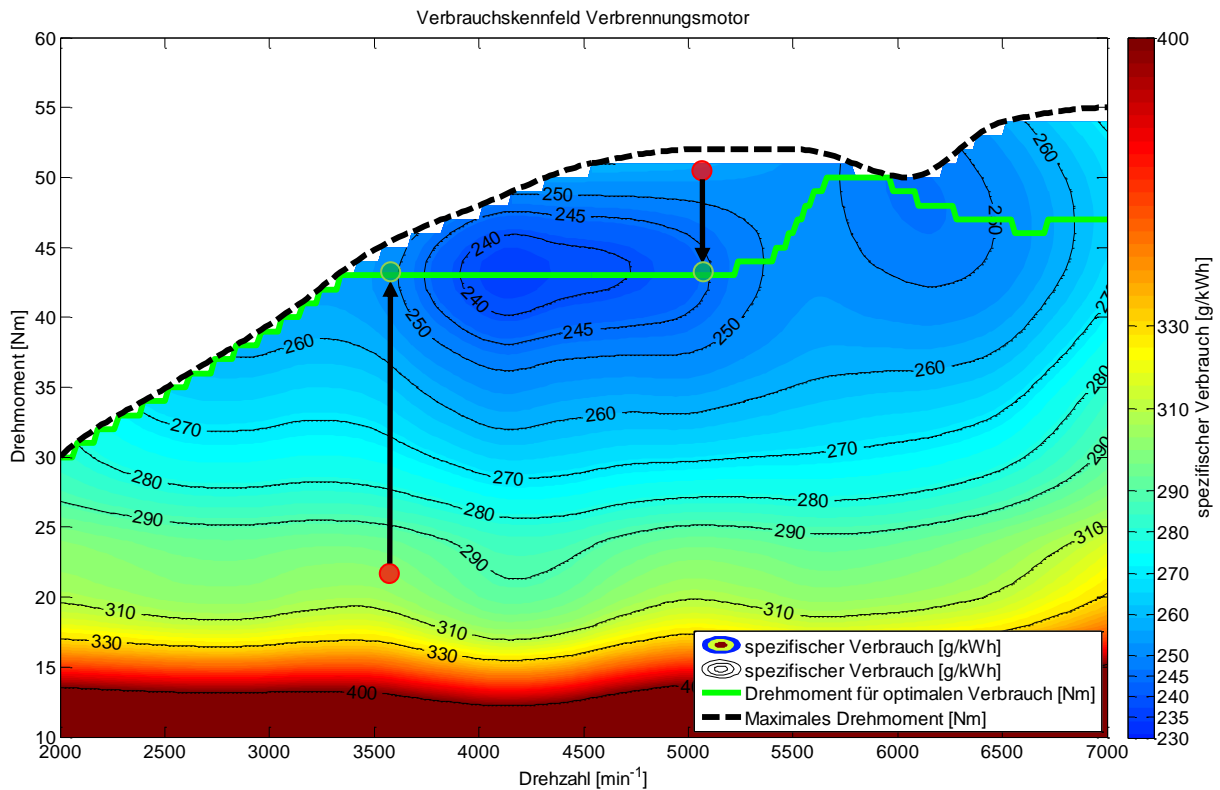


Abbildung 3-3: Lastpunktverschiebung

Obwohl es vom spezifischen Verbrauch gesehen optimal ist, bei jeder Drehzahl das günstigste Moment zu fordern, wird damit einerseits das Leistungspotential nicht vollständig ausgenutzt, andererseits ist der Betrieb in diesem Punkt auch nicht immer möglich. Beispielsweise kann die Begrenzung des Ladestroms dazu führen, dass ein bestimmtes generatorisches Moment vom Elektromotor nicht überschritten werden darf. Als Resultat kann bei geringem Momentenwunsch der Verbrennungsmotor nicht in hoher Last, bei geringem spezifischem Verbrauch, betrieben werden. Als Lösung bietet sich statt einem einzelnen Betriebspunkt für jede Drehzahl ein größerer erlaubter Betriebsbereich an.

Als Parameter kann hier zum Beispiel ein Faktor definiert werden, der die erlaubte Abweichung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs vom optimalen Wert angibt. In Abbildung 3-4 sind die Linie optimalen Verbrauchs (niedrigster spezifischer Kraftstoffverbrauch für jede Drehzahl) sowie Linien für verschiedene prozentuelle Verbrauchsabweichungen zu sehen.

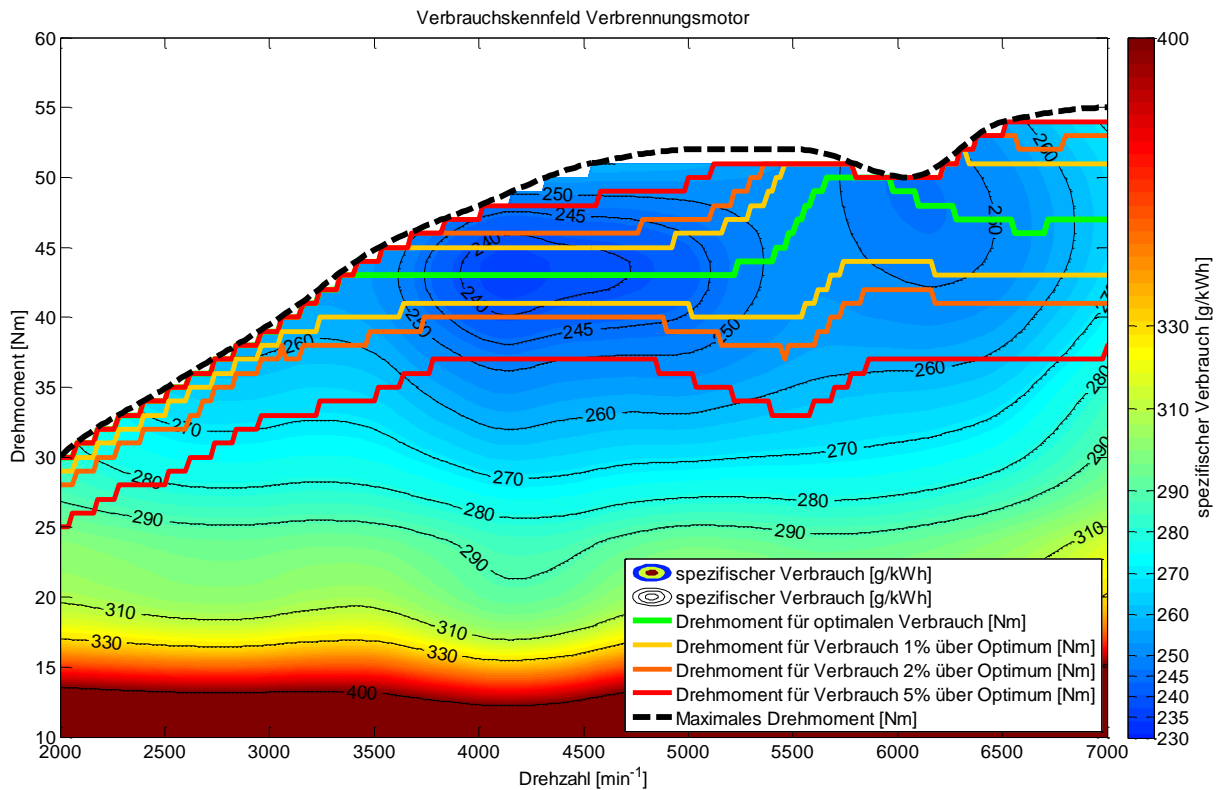


Abbildung 3-4: Verbrauchskennfeld mit optimaler Verbrauchslinie und prozentuellen Abweichungen davon

### 3.1.2 Boost

Boost wird die Betriebsart genannt, in der der Leistungsbedarf so hoch ist, dass der Elektromotor den Verbrennungsmotor nicht mehr so weit unterstützen kann, dass dieser im optimalen Verbrauchspunkt arbeitet. Sobald diese Grenze überschritten wird, arbeitet der Elektromotor immer an seiner maximalen Leistung, der Verbrennungsmotor versucht den restlichen Bedarf abzudecken.

## 3.2 Ladestrategie

Die Ladestrategie entscheidet zu jedem Zeitpunkt anhand des Ladezustandes der Batterie über den Energiefluss im Fahrzeug. Damit legt sie die Basis für alle nachfolgenden Entscheidungen, wie die Aktivierung des Verbrennungsmotors, den einzulegenden Gang und die Momentenverteilung. Die Regelung des SOC erfolgt grundsätzlich durch eine Limitierung des erlaubten Lade- bzw. Entladestroms der Batterie. So muss beispielsweise bei leerer Batterie der motorische Betrieb des Elektromotors möglichst vermieden werden. Ähnlich bei voller Batterie, wobei in diesem Fall ein generatorischer Betrieb sogar relativ schnell zu Überladung und damit einer Zerstörung der Batterie führen kann. Aus diesen Extremzuständen ergeben sich bereits einige Bedingungen für Betriebsstrategie. Der Ladezustand wird hierfür in drei Kategorien eingeteilt wird: Niedrig, Normal und Hoch [24].

Bei niedrigem Ladezustand soll der Verbrennungsmotor möglichst bald aktiviert werden, sodass gerade bei niedrigem Wunschkraftmoment die Batterie schnell wieder auf Normalniveau geladen werden

kann. Bei hohem Ladezustand wird versucht, möglichst nur elektrisch zu fahren. Rekuperation beim Bremsen kann dabei nicht mehr im vollen Umfang gewährleistet werden. Deshalb muss für lange Gefälle, durch Einkuppeln des Verbrennungsmotors, eine Motorbremswirkung aufrechterhalten bleiben. Bei normalem Ladezustand gibt es, neben den generellen Ladestromlimits der Batterie, keine Einschränkung des Betriebsbereiches, der SOC darf also innerhalb dieses Bereichs beliebig variieren.

Soll das Fahrzeug auch rein elektrisch fahrbar sein, zum Beispiel für zukünftige Zero-Emission-Zonen, so sollte eine Möglichkeit bestehen, aktiv in die Ladestrategie einzugreifen und ein Aufladen der Batterie zu erzwingen [31]. Somit könnte beim Einfahren in die Zone der Ladezustand hoch genug sein, um dann innerhalb der Zone, nach manueller Umschaltung in rein elektrischen Betrieb, problemlos voranzukommen. Eine solche Veränderung der Ladestrategie könnte auch vor einer längeren Steigung gefordert werden. Ebenso ist es denkbar, dass der Fahrer, oder sogar ein Navigationssystem, weiß, dass die Fahrt bald zu Ende ist und eine Steckdose verfügbar wird. Dann könnte durch eine Umschaltung ein bevorzugt elektrischer Modus gewählt werden, der nur mehr dann auf hybriden Betrieb wechselt, wenn es die Wunschleistung erforderlich macht. In diesen Situationen kann dann eine Erhöhung des Lastpunktes des Verbrennungsmotors deaktiviert werden, um Kraftstoff zu sparen, und die Batterie nicht unnötig „vom Tank“ zu laden.

### **3.2.1 Energiebewertung**

Für eine passende Auslegung der Ladestrategie ist es wichtig, die elektrische Energie richtig zu bewerten. Zum Beispiel ist die Energie, die beim Bremsen zur Verfügung steht kostenlos, weil sie ohne Rekuperation in Wärme und damit nicht nutzbare Energie umgewandelt wird. Andererseits wird bei Lastpunktanhebung zum Laden der Batterie trotz eventuell besserem Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors mehr Kraftstoff benötigt. Auch das Entladen der Batterie beim Motorischen Betrieb des Elektromotors kann so bewertet werden. Auf eine Lastpunktverschiebung mit sehr geringem Wirkungsgradvorteil, für die der Elektromotor motorisches Moment liefern muss, kann beispielsweise bei niedrigem SOC verzichtet werden.

Neben dem Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors muss auch der Wirkungsgrad des Elektroantriebs genauer untersucht werden. Hierbei muss die gesamte Strecke zwischen Batterie und Abtriebswelle betrachtet werden. Dabei ist speziell zu berücksichtigen, dass die Verluste in beide Richtungen, also beim motorischen und generatorischen Betrieb auftreten und somit den Gesamtwirkungsgrad bei jeder Lastpunktverschiebung verringern. Durch Messung der elektrischen Leistung sowie dem tatsächlich verbrauchten Kraftstoff im Vergleich zur tatsächlich am Rad gelieferten Antriebsleistung können Wirkungsgradkennfelder erstellt werden, mit denen es möglich wird, basierend auf dem aktuellen Fahrzustand eine Abschätzung des Energieflusses zwischen Tank, Verbrennungsmotor,

Elektromotor und Batterie zu berechnen und diese in die Entscheidungen der Betriebsstrategie mit einzubeziehen.

### 3.2.2 Vorausschauende Ladestrategie

Durch Einbeziehung von Umgebungsdaten, insbesondere Navigationsdaten, wie in Kapitel 2.5.4 beschrieben, besteht ein großes Potential für Verbrauchseinsparungen. Kennt die Steuerung im Vorhinein die gesamte Strecke, so kann der Verlauf des Ladezustandes optimiert werden. Der gewünschte Batterieladezustand am Ende muss vor Antritt der Fahrt festgelegt werden, da gerade beim Plug-In Hybrid meistens die Möglichkeit besteht, nach einer Fahrt die Batterie am Stromnetz zu laden. Falls am Ziel jedoch keine Ladestation zur Verfügung steht, ist eine vollkommen Entladene Batterie am Ende der Fahrt nicht optimal. Voraussetzung für die Vorausberechnung der Strecke sind genaue Höheninformationen sowie mögliche Geschwindigkeitsbegrenzungen oder zu erwartende Geschwindigkeiten entlang der Strecke. Daraus kann der Streckenverlauf, zumindest ohne möglichen Verkehr, energetisch betrachtet werden, und vor Teilstrecken, die viel Rekuperation erlauben werden, die Batterie entladen, sowie entgegengesetzt vor längeren Steigungen der Ladezustand erhöht werden, ohne dass der Fahrer dazu weiter eingreifen muss. Kurz vor Ende der Fahrt kann dann auf rein elektrischen Betrieb gewechselt werden, um die in der Batterie gespeicherte Energie bis zum Erreichen des Ziels mit Ladestation auszunutzen.

### 3.2.3 Lebensdauer der Batterie

Ein weiteres Thema, das bei der Ladestrategie berücksichtigt werden muss ist die begrenzte Zyklenfestigkeit von Batterien. Bei jedem Ladezyklus (auf 100% laden und wieder vollständig entladen) verliert ein Akkumulator an Speicherkapazität. Das heißt, nach mehreren hundert Ladezyklen steht nur mehr eine viel geringere Kapazität zur Verfügung, als zu Beginn [13]. Schwankt der Ladezustand immer nur um einige Prozent, so dauert es länger, bis ein voller Ladezyklus erreicht wird. Durch Verkleinerung des erlaubten SOC-Bereichs kann also die Lebensdauer der Batterie, zumindest theoretisch, erhöht werden. Dem gegenüber steht allerdings der geringere Nutzen zur Effizienzsteigerung. Die verfügbare Batteriekapazität sollte, insbesondere wenn eine Vorausschauende Ladestrategie verwendet werden soll, auch von der Betriebsstrategie berücksichtigt werden.

## 3.3 Start/Stop des Verbrennungsmotors

Aufbauend auf der Entscheidung der Ladereglung, welcher Strom der Batterie entnommen werden kann oder zugeführt werden soll, ist zunächst zu klären, welches Moment der Elektromotor mit diesem Strom liefern kann. Dafür ist zunächst in elektrische Leistung umzurechnen, über den experimentell ermittelten Wirkungsgrad auf die mechanische Leistung und schließlich über die aktuelle Drehzahl auf das Drehmoment zurückzurechnen. Zusätzlich muss noch die maximal zulässige

Maximalleistung berücksichtigt werden. Danach kann bestimmt werden, ob dieses Moment ausreicht, um dem Fahrerwunsch nachzukommen. Aufgrund der Tatsache, dass der Verbrennungsmotor nach der Startanforderung nicht sofort Moment liefern kann, ist eine gewisse Momentenreserve für den Elektromotor zu berücksichtigen, die gewährleisten soll, dass bei einer Erhöhung des Wunschements bis zum damit dann verbundenen Motorstart dennoch eine gewisse Momentenerhöhung spürbar ist.

Neben der Momentenreserve ist auch die Fahrzeuggeschwindigkeit ein ausschlaggebender Faktor für die Aktivierung des Verbrennungsmotors. Zum einen wird bei niedriger Geschwindigkeit das Drehmoment des Elektromotors mit großer Wahrscheinlichkeit für normale Fahrt ausreichend sein. Zum anderen ist der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors gerade bei so niedrigen Lasten extrem gering.

Damit der Verbrennungsmotor nicht zu häufig gestartet bzw. gestoppt wird, ist für beide Kriterien eine Hysterese vorzusehen, um beispielsweise bei konstantem Wunschement, das zufällig an der Einschaltsschwelle liegt, den Motor nicht unnötig zu belasten.

Als letztes Kriterium kann noch eine zeitliche Grenze eingeführt werden. Da es notwendig ist, auf eine positive Änderung des Wunschements (z.B. für einen Überholvorgang) möglichst rasch zu reagieren, ist die Zeitschwelle beim Wechsel zurück zum rein elektrischen Betrieb zu bevorzugen. Wie lange die Bedingungen für den elektrischen Betrieb erfüllt sein müssen, bevor der Verbrennungsmotor ausgekuppelt und abgestellt wird, ist noch zu klären.

Dazu eine mögliche Fahrsituation als Beispiel: ein Fahrer fährt auf einer Landstraße aufgrund der sportlichen Fahrweise im Hybrid-Modus und nähert sich einem langsameren Fahrzeug. Aufgrund von Gegenverkehr kann er nicht unmittelbar überholen und wird zum Abbremsen gezwungen. Dadurch sinkt das Wunschement schlagartig und die Fahrzeuggeschwindigkeit nimmt ab. Die Bedingungen für rein elektrischen Betrieb sind also erfüllt. Nach der eingestellten Zeitschwelle stellt der Verbrennungsmotor ab und es bleibt nur die Momentenreserve des Elektromotors. Bei nächster Gelegenheit will der Fahrer dann überholen, die Beschleunigung ist aber, bis der Verbrennungsmotor Moment liefern kann, unerwartet gering. Anhand dieses Beispiels können einige mögliche Bedingungen aufgestellt werden:

- Die Momentenreserve sollte von der Reaktionszeit (Motorstart + Einkuppeln + Anliegen des geforderten Moments) des Verbrennungsmotors abhängig sein. Sollte die Fahrzeuggeschwindigkeit so niedrig sein, dass das verfügbare Elektromotormoment zum Beschleunigen an der Schlupfgrenze über die Reaktionszeit hinaus ausreicht, kann dies vernachlässigt werden.

- Wenn das Wunschmodent bzw. die Fahrzeuggeschwindigkeit längere Zeit sehr hoch war, sollte die Zeitschwelle nach Reduktion des Wunschmodents verlängert werden, da anzunehmen ist, dass wieder ähnlich hohe oder sogar höhere Momente gefordert werden. Während dies im obigen Beispiel Sicherheitsfördernd wäre, kann dies bei Stadteinfahrten aber zu unnötigem Kraftstoffverbrauch führen.
- Darüber hinaus wäre es möglich, dem Fahrer die Möglichkeit zu geben selbst zu bestimmen, dass nicht zurück in reinen Elektromodus gewechselt werden darf.
- Bei einer Unterschreitung der Mindestgeschwindigkeit kann eventuell auch nur die Kupplung geöffnet werden, so dass der Verbrennungsmotor bei erneuter Beschleunigung nur mehr eingekuppelt, nicht aber davor erst gestartet werden muss.

### 3.4 Gangwahl

Ein ähnliches Konzept wie in [24] wird nun auf die Freiheitsgrade Gang und Momentenverteilung angewandt. Im ersten Schritt der Optimierung werden dazu alle möglichen Szenarien generiert und die jeweils bestmögliche Momentenverteilung in jedem Gang ermittelt.

Mit Hilfe des Verbrauchskennfelds (Abbildung 3-2) kann der aktuelle Verbrauch des Verbrennungsmotors für jeden möglichen Betriebszustand ermittelt werden. Werden diese Betriebspunkte auf die Getriebeausgangsseite bezogen, ergeben sich zwischen allen Gängen vergleichbare Werte.

Da im Fahrzeugzustand die Geschwindigkeit — und damit die Drehzahl auf der Getriebeausgangswelle — eine gegebene Größe ist, ergeben sich für die Drehzahlen des Verbrennungsmotors nur so viele verschiedene Möglichkeiten, wie Gänge zur Verfügung stehen. In Abbildung 3-5 sind die Drehzahlen des Verbrennungsmotors in den unterschiedlichen Gängen bei einer konstanten Getriebeausgangsdrehzahl markiert. Dieser Umstand erleichtert die Optimierung bedeutend, da nur einzelne Linien über die möglichen Momente aus dem Verbrauchskennfeld extrahiert werden müssen. Abbildung 3-6 zeigt den spezifischen Verbrauch für diese Linien.

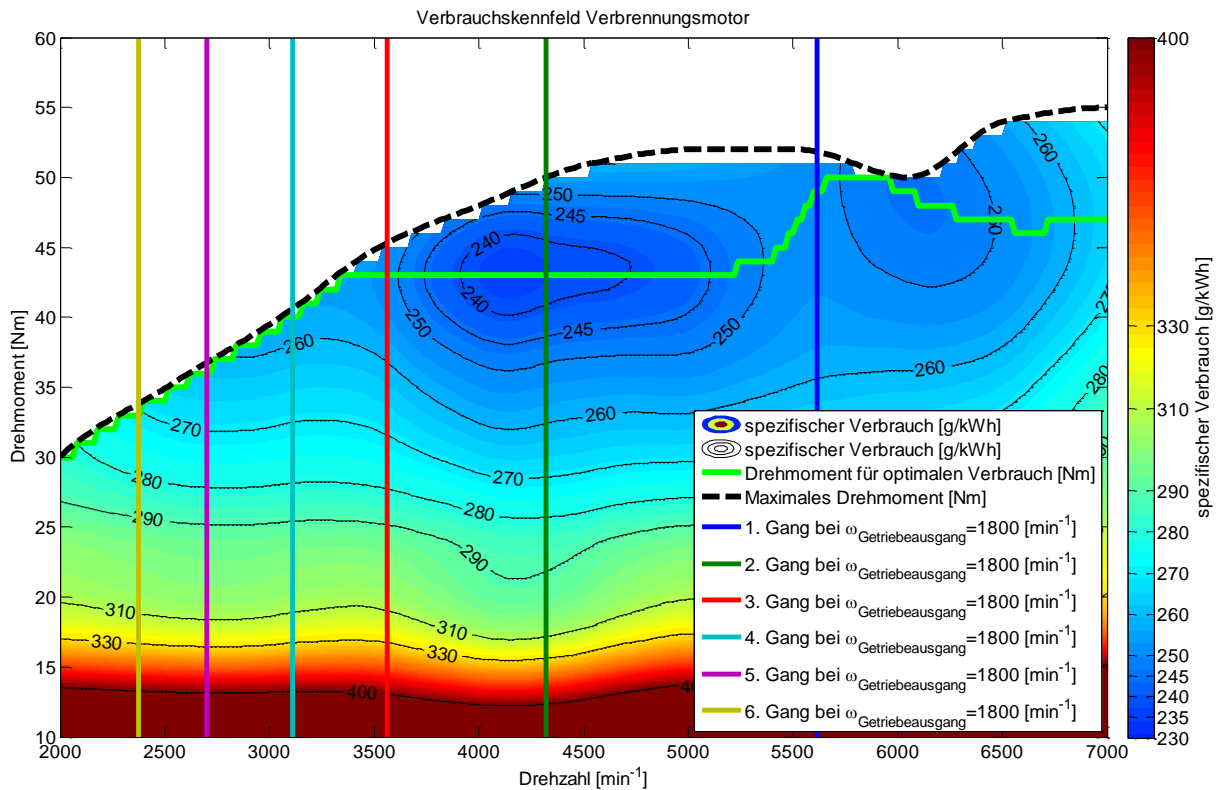


Abbildung 3-5: Drehzahlen des Verbrennungsmotors für konstante Getriebeausgangsdrehzahl

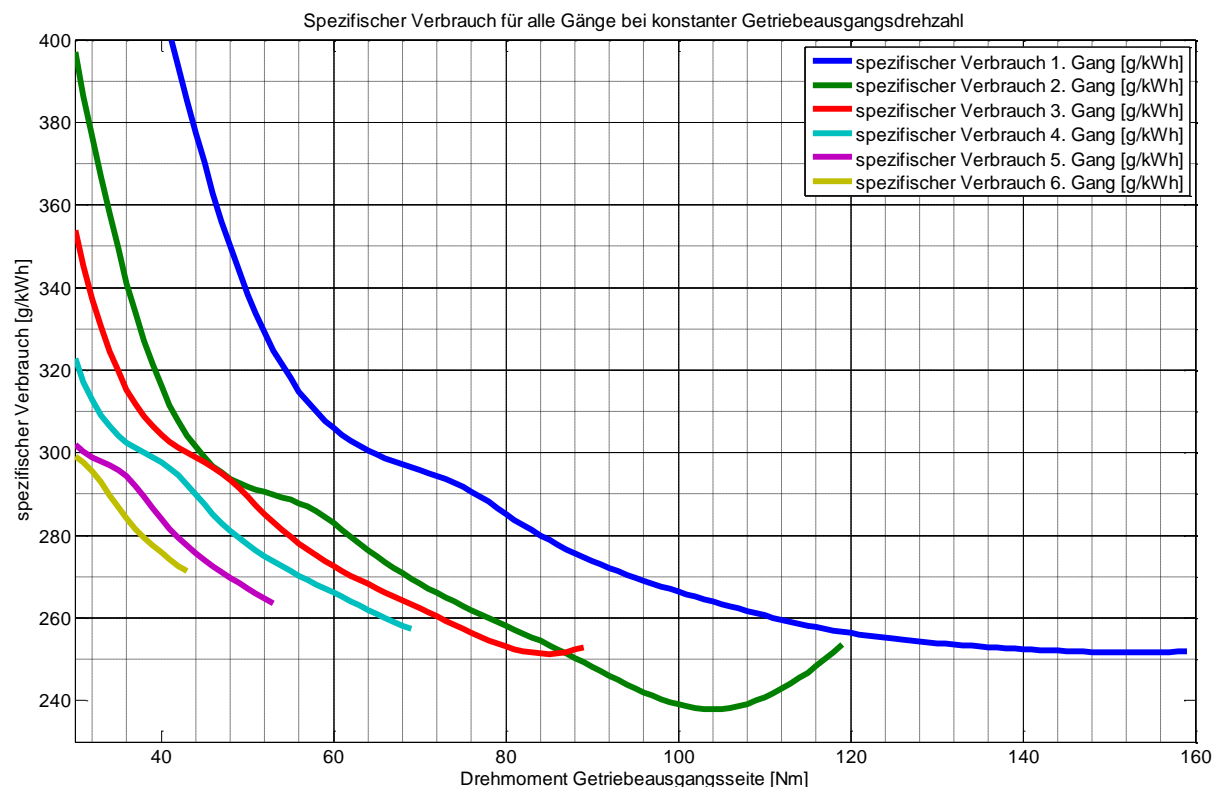


Abbildung 3-6: Spezifischer Verbrauch für alle Gänge bei konstanter Getriebeausgangsdrehzahl

Im nächsten Schritt werden die so gewonnenen Verbrauchskennlinien auf den gerade erlaubten Momenten- und Drehzahlbereich limitiert und in jeder Linie der Punkt mit dem niedrigsten spezifischen Verbrauch gesucht. Daraus ergibt sich eine Liste der für den Verbrennungsmotor



effizientesten Betriebspunkte für jeden Gang. Die daraus gewonnenen Informationen können nicht nur zur Auswahl des optimalen Ganges genutzt werden, sondern auch gleichzeitig für die Momentenverteilung. Da für den aktuell eingelegten Gang das optimale Drehmoment mitbestimmt wird, kann dieses an die Momentenlogik weitergegeben werden.

Eine Betrachtung des absoluten Verbrauchs wird bei dieser Optimierung nicht verwendet, da mit der überschüssigen Kraftstoffenergie in der Regel die Batterie geladen werden kann. Ist dies der Fall, so kann, zumindest unter der bisher getroffenen Annahme, dass das Laden und Entladen der Batterie mit einem sehr hohen Wirkungsgrad geschieht, davon ausgegangen werden, dass, unabhängig vom tatsächlichen Momentanverbrauch, immer der Punkt mit dem höchsten Wirkungsgrad optimal ist.

Die Integration der Ladezustandsabhängigkeit wird durch die Limitierung des für die Kennlinien erlaubten Momentenbereichs erreicht. Zusätzlich können mit dieser Limitierung auch andere Ereignisse, wie beispielsweise eine Überhitzung des Elektromotors oder der Batterie, oder eine Begrenzung des Ladestroms berücksichtigt werden.

### 3.4.1 Entscheidungslogik für den Gangwechsel

Um, vergleichbar mit [24], zu vermeiden, dass die Optimierungslogik zu extrem häufigen Schaltvorgängen führt, müssen geeignete Methoden gefunden werden, um eine sinnvolle Gangwahl zu treffen.

Eine erste wichtige Einschränkung besteht darin, dass der spezifische Verbrauch des Verbrennungsmotors im Zielgang über längere Zeit besser sein muss als im aktuellen Gang. Durch die längere Wartezeit wird der beim Schaltvorgang entstehende, durch die geöffnete Kupplung nicht für Antriebsleistung verwendbare, Kraftstoffverbrauch zumindest teilweise ausgeglichen. Die zu wartende Zeitspanne kann außerdem, durch Einbeziehung des Verbrauchsvorteils in die Berechnung, variabel gestaltet werden. Dadurch ergeben sich zwei mögliche Parameter:

- die Mindestdauer des Verbrauchsvorteils im Zielgang
- Integral über den Verbrauchsvorteil zur Beschleunigung der Umschaltung bei großem Einsparungspotential

Als weitere Möglichkeit bietet sich an, unmittelbar nach einem Gangwechsel die Verbrauchsvorteile der anderen Gänge weniger zu gewichten. Auch dies ist eine Form, den Schaltvorgang energetisch zu berücksichtigen. Letztlich kann noch ein einfaches Zeitlimit nach jedem Gangwechsel auch hohe Wirkungsgradvorteile ausblenden. Ein solches Limit sollte im vorliegenden Fall aber erst nach vollständigem Abschluss des Schaltvorgangs aktiv werden, um bei sehr dynamischen Abläufen einen eventuellen weiteren Gangwechsel noch vor Schließen der Kupplung durchführen zu können. Dies

könnte beispielsweise im Fall eines „ungeahnt“ hohen Drehmomentwunschs des Fahrers auftreten, wenn gerade ein Schaltvorgang initiiert wird und dann plötzlich mehr Moment verlangt wird, als im bisherigen Zielgang erreichbar ist.

Anknüpfend an diese Problematik stellt sich auch die Frage, wie die für das Fahrgefühl sehr wichtige Momentenreserve behandelt werden soll. Auch daraus kann ein Kriterium für den Gangwechsel abgeleitet werden. Obwohl der Elektromotor prinzipiell in den meisten Fahrsituationen eine sehr schnell ansprechende Momentenreserve bietet, sollte der Verbrennungsmotor nicht immer unter Volllast betrieben werden. Ein interessantes Problem stellt dabei der Fall einer fast leeren Batterie dar. In dieser Situation sollte die Batterie möglichst nicht weiter entladen werden. Motorisches Moment wird also für den Elektromotor gesperrt. Läuft der Verbrennungsmotor nun aber bei niedriger Drehzahl in einem Bereich nahe an der Volllast ohne dabei die Batterie zu laden, bleibt keine Momentenreserve. Daher wäre es hier besser, bereits vorher in einen niedrigeren Gang zu schalten, um nicht bei plötzlich steigendem Momentenwunsch zunächst schalten zu müssen. Ein weiterer Vorteil liegt in der Anwendung bei der Ladestrategie: mit dem zusätzlich verfügbaren Moment kann die Batterie geladen werden. Durch Reduktion des generatorischen Moments am Elektromotor kann das höhere Wunschmoment dann trotzdem sofort geliefert werden.

### 3.4.2 Vorausschauend schalten

Neben der vorausschauenden Ladestrategie kann auch bei der automatisierten Schaltung auf eventuell zukünftig eintretende Ereignisse Rücksicht genommen werden. Eine einfache Möglichkeit, um sehr kurz in die Zukunft zu blicken, bietet die Beobachtung des Fahrerwunschs und die daraus in Gleichung (3-1) entwickelte Linearisierung. Trotz des nur kurzen Betrachtungszeitraumes können damit unnötige Schaltvorgänge, zum Beispiel das Hochschalten während einer Erhöhung des Wunschmoments, vermieden werden.

$$M_W(t_2) \text{ [Nm]} = M_W(t_1) \text{ [Nm]} + \frac{M_W(t_1) \text{ [Nm]} - M_W(t_0) \text{ [Nm]}}{t_1 \text{ [s]} - t_0 \text{ [s]}} * (t_2 \text{ [s]} - t_1 \text{ [s]}) \quad (3-1)$$

$M_W$ ..Fahrerwunschmodent

$t_1$  ....Aktueller Zeitpunkt

$t_0$  ....Zeitpunkt in der Vergangenheit

$t_2$  ....Zeitpunkt in der Zukunft

Neben dieser einfachen Betrachtung besteht auch die Möglichkeit eine Fahrertyperkennung wie in [23] zu verwenden, um die Parameter der Entscheidungslogik dynamisch zu verändern. Eine solche Kennzahl könnte in der hier beschriebenen Entscheidungslogik beispielsweise den notwendigen Verbrauchsvorteil zum Gangwechsel beeinflussen, wobei die Schwelle für eine ökonomische Fahrweise niedrig und für eine sportliche Fahrweise hoch sein sollte.

### 3.4.3 Manueller Eingriff

Ein manuelles Eingreifen in die automatische Schaltstrategie durch Betätigung der Schaltwippe sollte immer möglich sein. Beispielsweise, um vor einem Überholvorgang bereits vor Änderung des Wunschmoments einen passenden Gang einlegen zu können.

### 3.4.4 Realisierbarkeit des Gangwechsels

Zusätzlich ist es notwendig, die Realisierbarkeit des Gangwechsels zu überprüfen. Dabei gibt es grundsätzlich zwei mögliche Voraussetzungen. Zum einen kann ein einzulegender Gang zu einer zu niedrigen oder zu hohen Drehzahl am Verbrennungsmotor führen, zum anderen kann eventuell mit dem gewählten Gang das Wunschmoment des Fahrers nicht mehr erfüllt werden. Während die Drehzahlgrenzen immer eingehalten werden müssen, also der Gangwechsel verweigert wird, ist bei der Frage nach dem Wunschmoment zu unterscheiden, ob der Gang durch die Entscheidungslogik oder einen manuellen Eingriff in die Schaltung gewählt wurde. Während hier ein Eingriff durch den Fahrer durchaus akzeptiert werden muss und daraus resultierend die Leistung nicht aufgebracht werden kann, ist bei der automatischen Entscheidung von einer Fehlentscheidung der Logik auszugehen.

Eine weitere Einschränkung für den Gangwechsel stellen Kurvenfahrten dar. Abhängig vom Lenkwinkel sollten Schaltvorgänge und die damit verbundenen Momentenänderungen am Abtrieb vermieden werden, um ein Blockieren oder Durchrutschen des Reifens zu vermeiden.

### 3.4.5 Schaltruckompensation

Bei Verwendung einer automatischen Schaltstrategie in konventionellen Fahrzeugen kann der Fahrer die Schaltpunkte in Abhängigkeit von Fahrzeuggeschwindigkeit und Gaspedalstellung nach einiger Zeit voraussehen. Dies ermöglicht es, sich auf einen kommenden Schaltruck vorzubereiten. Im Fall eines hybrid-elektrischen Antriebsstranges mit automatisiertem Schaltgetriebe können die Schaltpunkte in Abhängigkeit vom Ladezustand der Batterie oder der Temperatur des Elektromotors stark variieren. Dadurch wird die Schaltlogik so komplex, dass der Fahrer nicht immer in der Lage sein wird, vorauszusehen, wann die Automatik schalten wird. Der dann plötzlich auftretende Momentenverlust ist nicht nur unangenehm, er kann, speziell bei Motorrädern und ähnlichen Fahrzeugen, auch eine Gefahr darstellen.

Durch die verwendete Topologie des Antriebsstranges ist es aber prinzipiell möglich, das beim Schaltvorgang fehlende Moment mit dem Elektromotor auszugleichen. Für einen optimalen Ausgleich wäre es notwendig, das tatsächlich über die Kupplung übertragene Moment zu kennen und dem Elektromotor aufzuschlagen. Dieses Moment muss über vorhandene Messwerte, wie Kupplungsdruck und tatsächliches Drehmoment des Verbrennungsmotors, geschätzt werden.

Eine weitere Möglichkeit bietet eine Drehzahlregelung für den Elektromotor. Damit kann bei konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit das fehlende Moment durch den Drehzahlabfall erkannt und danach ausgeglichen werden. Die Qualität des so erzeugten Ersatzmoments hängt dabei von der Geschwindigkeit und -qualität des Drehzahlreglers ab. Ein neues Problem stellen mit dieser Methode aber Schaltvorgänge in dynamischen Zuständen dar. Während der Elektromotor beim Schaltvorgang drehzahl geregelt betrieben wird, muss die Drehzahl geschätzt werden. Der aktuelle Drehmomentwunsch muss anhand einer vorher ermittelten theoretischen Last in die gewünschte Beschleunigung und damit eine neue Drehzahlvorgabe umgerechnet werden.

### 3.5 Einschränkung der Komplexität der Gangwahl

Das in Kapitel 3.4 beschriebene Verfahren zur optimalen Bestimmung von Gang und Momentenverteilung mag zwar eine verbrauchsoptimale Strategie sein, doch kann der dafür notwendige Rechenaufwand unverhältnismäßig hoch sein. Aufbauend auf einer Momentenlogik wird in diesem Kapitel eine vereinfachte Version der Schaltstrategie gezeigt. Durch die Abtrennung der Momenten- von der Ganglogik kann die Komplexität des Gesamtsystems verringert werden. Die verwendete Momentenlogik bestimmt die Momentenverteilung unter Angabe des eingelegten Ganges. Da dieser Gang aber erst bestimmt werden soll, wird zunächst für alle verfügbaren Gänge berechnet, welche Momentenverteilung im jeweiligen Fall von der Momentenlogik gefordert wird.

Aus diesen Berechnungen kann wiederum der spezifische Kraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors nach einem möglichen Gangwechsel bestimmt werden. Um daraus ein Entscheidungskriterium abzuleiten, werden die Verbrauchswerte aller Gänge zueinander in einen Wertebereich von null bis eins normiert, wobei eins dem Gang mit dem niedrigsten und null dem mit dem höchsten spezifischen Verbrauch zugeordnet wird. Gänge, die aufgrund von Drehzahlschranken nicht erlaubt werden, werden hierbei nicht berücksichtigt. Die Momentenlogik versucht bereits, möglichst gute Betriebspunkte auszuwählen. Durch die dadurch eher geringen Unterschiede im spezifischen Verbrauch ist für eine Normierung eine logarithmische Bewertung in Betracht zu ziehen. Dadurch kann einem nur wenig schlechteren Gang im Bewertungsfaktor ein annähernd gleiches Gewicht gegeben werden wie dem verbrauchsgünstigsten Gang.

Anhand dieses Bewertungsfaktors kann ähnlich wie zuvor ein Gangwechsel ausgelöst werden, wenn ein anderer als der eingelegte Gang über längere Zeit den niedrigsten spezifischen Kraftstoffverbrauch erreicht.

### 3.6 Gangwahl und Fahrdynamik

Die bisherigen Betrachtungen behandeln immer nur quasistationäre Zustände sowie sprunghafte Änderungen der Randbedingungen unter denen Verbrauchsvorteile ermittelt und als Grundlage für

die Schaltentscheidung genutzt werden. Während dies zur Verbrauchsoptimierung notwendig ist, kann dadurch die Fahrdynamik massiv verschlechtert werden.

Zur Bewertung der Fahrdynamik wird in konventionellen Fahrzeugen in der Regel die Momentenreserve betrachtet. Die Momentenreserve ist dabei die Differenz zwischen dem bei der aktuellen Drehzahl im aktuellen Gang verfügbaren Maximalmoment sowie dem gerade abgegebenen Moment. [23] Diese Momentenreserve steht sofort nach Erhöhung des Wunschmoments, ohne Gangwechsel, zur Verfügung. Eine ausreichend hohe Momentenreserve verhindert also eine Gedenksekunde durch einen notwendigen Schaltvorgang in einen niedrigeren Gang, mit dem das gewünschte Moment erst tatsächlich geliefert werden kann.

Kann, wie in Kapitel 3.4.2, abgeschätzt werden, welches Wunschmoment der Fahrer in naher Zukunft wahrscheinlich verlangen wird, kann ein passender Gang bereits vorab gewählt werden, dies setzt jedoch Kenntnis über das Fahrerverhalten und die Strecke voraus. Durch eine Analyse der während der aktuellen Fahrt aufgetretenen Wunschmomente in Verbindung mit den dabei aufgetretenen Beschleunigungen und Verzögerungen kann, wie in Kapitel 2.5.3 angedeutet das Fahrerverhalten abgeschätzt werden.

Wird die Momentenreserve ebenso bewertet wie der Kraftstoffverbrauch in Kapitel 3.5, so ergeben sich gleichwertige Faktoren für die Schaltlogik. Mit der Bewertung des Fahrerverhaltens kann dann zwischen sportlicher und ökonomischer Fahrweise unterschieden werden, indem die Faktoren unterschiedlich gewichtet werden.

Neben der reinen Bewertung der Schaltfaktoren erlaubt eine numerische Darstellung des Fahrerverhaltens auch die dynamische Änderung sämtlicher anderer entscheidungsrelevanter Konstanten, die Auswirkungen auf die Schaltstrategie und auch auf die restliche Betriebsstrategie haben. So kann beispielsweise der erlaubte SOC-Bereich für sportliche Fahrten vergrößert werden, um mehr Energie zum Boosten zur Verfügung stellen zu können.

### **3.6.1 Beschleunigung**

Ein weiterer wichtiger Punkt, der bei der Fahrdynamik zu beachten ist, ist die aus der Änderung des Antriebsmoments resultierende Änderung der Fahrzeuggeschwindigkeit.

Bei konventionellen Fahrzeugen geht durch einen Schaltvorgang kurzfristig das Antriebsmoment vollständig verloren, dadurch wird die Fahrzeuggeschwindigkeit bei Vollendung des Schaltvorgangs mit hoher Wahrscheinlichkeit etwas geringer sein als vorher. Die Gangentscheidung kann also mit dem Fahrzeugzustand vor dem Schaltvorgang korrekt getroffen werden.

Wird hingegen ein Hybridfahrzeug während des Schaltvorgangs durch den Elektromotor weiter beschleunigt, so kann sich, abhängig von der Leistung des Elektromotors und der Dauer eines Schaltvorganges, die Geschwindigkeit deutlich ändern, bis der Schaltvorgang abgeschlossen ist. Dadurch kann eine Gangwahl, die von der Schaltlogik zu Beginn des Beschleunigungsvorganges, also bei Erhöhung des Wunschkraftmoments, getroffen wurde und die Beschleunigung während des Gangwechsels selbst nicht berücksichtigt, einen Gang wählen, der beim Einkuppeln entweder nur eine sehr geringe Differenz zur Drehzahlbegrenzung bereit hält, oder bereits zu einer Überdrehzahl am Verbrennungsmotor führt.

Um dies zu verhindern, muss abgeschätzt werden, welche Geschwindigkeit das Fahrzeug am Ende eines Schaltvorganges erreicht haben wird. Voraussetzung für diese Bestimmung sind zum einen die Dauer des Schaltvorgangs und zum anderen das aktuelle Lastmoment sowie das vom Elektromotor zur Verfügung gestellte Moment. Das Lastmoment kann dabei aus zwei Teilen zusammengesetzt werden. Der erste Teil wird aus dem Geschwindigkeitsabhängigen Roll- und Luftwiderstand berechnet, der zweite Teil, mögliche Steigungen, Wind und alle sonstigen unbekanntenen Lasten, wird durch laufende Beobachtung der Beschleunigungswerte im Verhältnis zum Antriebsmoment ermittelt. Zur Vereinfachung der Berechnung kann das Lastmoment zum Zeitpunkt der Betrachtung als konstant angenommen werden. Dadurch ergibt sich für die Berechnung der Zieldrehzahl eine lineare Gleichung, die sehr schnell berechnet werden kann. Wird diese theoretische Drehzahl in die Schaltentscheidung mit einbezogen, können nun Gänge, die sonst nur sehr kurz eingelegt würden, gleich übersprungen werden.

## 4 Hybridsteuergerät

Das Hybridsteuergerät übernimmt die gesamte Koordination und Automatisierung der restlichen Komponenten des Fahrzeugs. Es ist also die Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrzeug. Ein Fahrerwunsch, der bei einem gewöhnlichen drive-by-wire Fahrzeug direkt an das Motorsteuergerät weitergeleitet wird, kommt hier zuerst beim Hybridsteuergerät an, welches dann mithilfe der Betriebsstrategie entscheidet, welcher Antrieb den Wunsch erfüllen soll.

Die Schnittstelle zum Fahrer stellen Komponenten wie Gasgriff, Rekuperationshebel oder Tasten am Schaltmodul als Eingänge sowie ein Display als Ausgang dar. Die Verbindung von Hybridsteuergerät zu den Fahrzeugkomponenten erfolgt hauptsächlich über den CAN (Controller Area Network)-Bus. Nur einzelne Komponenten, die keine CAN Schnittstelle besitzen, werden direkt über analoge Ein- und Ausgänge kontrolliert.

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Steuergerät handelt es sich um das Rapid Prototyping Steuergerät HY-TTC 200 der Firma TTControl [36], das über einen 32bit Prozessor mit 40MHz, eine Floating Point Unit und 33 analoge und digitale Ein- und 36 Ausgänge verfügt. Ein großer Vorteil dieses Systems ist, dass zur Entwicklung Matlab/Simulink® [33], in Verbindung mit dem Real-Time Workshop® [34] zur Codegenerierung, verwendet werden kann. Dadurch kann das funktionale Modell, das unverändert auch im Steuergerät arbeitet, in Verbindung mit einem Simulationsmodell direkt in Simulink getestet werden. Im Steuergerät werden die in Code umgesetzten Simulink Modelle in einem vordefinierten Zeitraster zyklisch abgearbeitet. Ein- und Ausgänge können mit Library-Blöcken verwendet werden. Zur Kalibrierung von Parametern und Kennlinien während der Laufzeit wird die Kalibrier-Software ETAS INCA [12] eingesetzt, die gleichzeitig auch zum Messen von Signalen verwendet werden kann [11].

Bevor die Umsetzung der in Kapitel 3 beschriebenen Betriebsstrategie näher behandelt wird, ist es aber notwendig, die Grundlagen für eine einfache Implementierung zu erläutern.

### 4.1 Verarbeitung der Ein- und Ausgänge

Die Basis für alle Entscheidungen, die im Steuergerät getroffen werden, sind die Eingangssignale. Damit in den restlichen Modulen mit standardisierten Einheiten gerechnet werden kann, ist direkt nach dem Auslesen der Sensorwerte eine Umrechnung notwendig. Ein Potentiometer liefert zum Beispiel Spannungen zwischen 0,5 und 4,5 Volt, für die weiteren Berechnungen soll aber mit Werten zwischen null und 100% gerechnet werden. Aus praktischen Gründen werden alle Eingangssignale zunächst in dieser Art behandelt, bevor sie von anderen Teilen der Software verwendet werden. Dadurch kann sichergestellt werden, dass beim Austausch von Sensoren und einer damit

verbundenen Änderung der Kennlinie die Umrechnung an einer zentralen Stelle angepasst werden kann. Ausgänge werden nach dem gleichen Prinzip verarbeitet.

Ein zusätzlicher Vorteil, der sich aus diesem Aufbau ergibt, ist, dass die Einbindung in die Simulationsumgebung deutlich vereinfacht wird. Die Blöcke der Hardware Ein- und Ausgänge werden einfach durch Blöcke mit Verbindungen zur Simulation ersetzt, ohne Rücksicht auf eventuell veränderte Umrechnungen in anderen Teilbereichen nehmen zu müssen.

## 4.2 Low-Level-Control

Um die Betriebsstrategie auf einer abstrakteren Ebene entwickeln zu können und sie weitgehend unabhängig von der verwendeten Hardware zu machen, wurde die Low-Level-Control als Abstraktionsebene zwischen Betriebsstrategie und Hardware gelegt, die den gesamten Antriebsstrang steuert und die korrekte Funktion und Sicherheit gewährleistet [27]. Zu den Hauptfunktionen der Low-Level-Control zählen insbesondere Kuppel- und Schaltvorgänge. Ein wichtiges Kriterium für diese Ebene ist, dass sie Unstetigkeiten in den Vorgaben der Betriebsstrategie abfedert und in stetiger Form an den Antriebsstrang weitergibt. Solche Unstetigkeiten können in der Betriebsstrategie beispielsweise beim Wechsel vom rein elektrischen in hybriden Betrieb auftreten, wenn der Momentenwunsch plötzlich auf beide Antriebe aufgeteilt wird.

Die Behandlung der transienten Zustände erlaubt es der Betriebsstrategie, ohne weitere Aktionen zu setzen, zwischen elektrischem und hybridem Betrieb oder den eingelegten Gang zu wechseln. Zudem muss sich die Betriebsstrategie nicht weiter darum kümmern, ob der Verbrennungsmotor gestartet wird, bevor die Kupplung geschlossen wird, oder ob die Kupplung zum Schalten zuerst geöffnet werden muss.

### 4.2.1 Interface zur Betriebsstrategie

Zur Kommunikation mit der Betriebsstrategie dient ein unidirektionaler Bus. Die Betriebsstrategie bekommt also keine direkte Rückmeldung, ob die gewünschten Aktionen tatsächlich ausgeführt werden. Erst, wenn die von der Low-Level-Control gesetzten Schritte zu Auswirkungen an den von der Betriebsstrategie überwachten Eingangssignalen führen, kann eine Reaktion erkannt werden. Durch diese Architektur bleibt die Betriebsstrategie unabhängig von der ausführenden Ebene und kann durch die einfache Schnittstelle leicht ausgetauscht werden.

Die von der Betriebsstrategie an die Low-Level-Control übertragenen Signale sind:

- Drehmoment Elektromotor
- Drehmoment Verbrennungsmotor
- Einzulegender Gang
- Kupplung offen/geschlossen



Optional kann über zwei boolesche Variablen ausgewählt werden, ob der Verbrennungsmotor bei geöffneter Kupplung gestoppt werden soll (Entspricht einer Deaktivierung des Start-Stopp-Systems) und ob zum Starten der Starter oder die Kupplung benutzt werden soll (Push-Start).

#### 4.2.2 Funktionen

Die wichtigste Funktion der Low-Level-Control ist die Betätigung des Getriebes und der Kupplung. Zu deren Ansteuerung stehen vier Ventile zur Verfügung. Ein Ventil reguliert den Grunddruck im System, der von einer Ölpumpe zur Verfügung gestellt wird. Die Ölpumpe wird mechanisch über Freiläufe entweder vom Verbrennungsmotor oder vom Elektromotor angetrieben, sobald also einer der Motoren läuft, kann Druck aufgebaut werden. Ein weiteres Ventil wird zur Ansteuerung der Kupplung verwendet. Im drucklosen Zustand bleibt die Kupplung geöffnet. Fällt also die Ansteuerung der Ventile aus, geht das System in einen sicheren Zustand über. Die übrigen zwei Ventile werden zur Ansteuerung der sequentiellen Schaltung verwendet. Durch Anlegen von Druck auf die Schaltstange kann die Schaltwalze bewegt und der eingelegte Gang gewechselt werden. Je nach verwendetem Ventil wird nach unten oder oben geschaltet. Die Rückmeldung des Getriebeblocks erfolgt durch einen Drucksensor an der Kupplung sowie durch ein Gangpotentiometer an der Schaltwalze.

#### *Kupplungskennlinie*

Zur einfacheren Ansteuerung der Kupplung wird in der Low-Level-Control als Sollwert das über die Kupplung übertragbare Drehmoment verwendet. Ein negatives Drehmoment bedeutet, dass die Kupplung geöffnet ist. Der Nullpunkt liegt genau am Kisspoint<sup>2</sup>, wodurch ein Punkt auf der Kennlinie zur Umrechnung bereits festgelegt ist. Um die Steigung der Umrechnungsfunktion zu bestimmen, wird die Kupplung unter Last kontinuierlich geöffnet, bis sie beginnt zu rutschen. Mit dem an diesem Punkt anliegenden Druck ( $P_{Last}$ ) und dem vom Verbrennungsmotor gelieferten Drehmoment (auf die Kupplung bezogen;  $M_{Last}$ ), sowie dem vorher ermittelten Druck am Kisspoint ( $P_{Kisspoint}$ ) kann nun die lineare Gleichung (4-1) zur Umrechnung aufgestellt werden:

$$P_{Soll} [\text{bar}] = P_{Kisspoint} [\text{bar}] + \frac{P_{Last} [\text{bar}] - P_{Kisspoint} [\text{bar}]}{M_{Last} [\text{Nm}]} * M_{Wunsch} [\text{Nm}] \quad (4-1)$$

Diese Kennlinie muss aufgrund der Abnutzung der Kupplung regelmäßig angepasst werden. Während der Punkt unter Last durch Reduktion des Kupplungsdrucks im Betrieb relativ einfach gemessen werden kann, ist die Messung des Kisspoints nicht so einfach. Eine Möglichkeit zu dessen Bestimmung besteht darin, durch Schließen der Kupplung anzufahren und den Beginn der Fahrzeugbewegung mit der Übertragungsfähigkeit der Kupplung zu verknüpfen. Aufgrund der fehlenden Implementierung eines solchen Modus fällt diese Möglichkeit aber weg. Eine weitere

---

<sup>2</sup> Punkt, an dem die Kupplung beginnt, Drehmoment zu übertragen.

Möglichkeit bietet der Startvorgang des Verbrennungsmotors mittels Kupplung. Bei diesem Vorgang wird der Verbrennungsmotor vom Stillstand weg über die schleifende Kupplung beschleunigt. Der Punkt, an dem sich der Motor zu drehen beginnt kann als Kisspoint angenommen werden. Die Zuverlässigkeit dieser Methode ist allerdings sehr gering, weil die Schließgeschwindigkeit der Kupplung sehr hoch gewählt werden muss, um eine korrekte Funktion zu gewährleisten. Dadurch wird die Druckmessung zu langsam für eine zeitlich genaue Zuordnung zur Motordrehzahl.

### *Start/Stop des Verbrennungsmotors*

Der Start- und Stoppvorgang des Verbrennungsmotors wird durch analoge Ausgänge, die das Zündungssignal sowie den Stopp-Taster simulieren ausgelöst. Ob der Start erfolgt ist wird mittels Motordrehzahlsignal erkannt.

Prinzipiell sind zwei verschiedene Arten des Motorstarts zu unterscheiden: der normale Start mittels Startermotor und der Push-Start. Der Start mit Elektro-Starter ist der übliche Startvorgang. Dabei wird der Verbrennungsmotor mit einem elektrischen Startermotor beschleunigt und ab einer bestimmten Drehzahl die Einspritzung und Zündung aktiviert, bis der Motor selbständig lauffähig ist. Im Gegensatz dazu wird beim Push-Start der Startermotor nur zur Unterstützung eingesetzt. Der Push-Start erfolgt technisch wie das Anschieben eines Fahrzeugs. Mit eingelegtem Gang dreht sich die Getriebewelle, während die Kurbelwelle still steht. Wird nun die Kupplung geschlossen, wird die Getriebewelle gebremst während die Kurbelwelle beschleunigt wird. Da im Fall des Hybridantriebs die Getriebewelle vom Elektromotor angetrieben wird, ist eine Funktion ähnlich der des Startermotors gegeben. Ein Problem bei dieser Startmethode stellt der Kompressionswiderstand dar. Durch die Kompression im Zylinder steigt der Widerstand gegen die Drehung an. Ist in diesem Zustand die Drehzahl nicht hoch genug, kann die Kurbelwelle wieder zum Stillstand kommen und zur erneuten Beschleunigung eine viel höhere Anpresskraft der Kupplung notwendig werden.

Wann welche der beiden Startmethoden verwendet wird entscheidet die Betriebsstrategie. Der große Vorteil des Push-Starts liegt in der extrem kurzen Verzögerung zwischen Startwunsch und betriebsbereitem Motor. Der Motor ist in diesem Fall in weniger als einer Sekunde in der Lage Drehmoment zu erzeugen. Der Start mittels elektrischem Startermotor und darauf folgendem Schließen der Kupplung dauert mit etwa drei Sekunden vergleichsweise lange. Insbesondere bei sportlichen Fahrten kann eine so große Verzögerungszeit nicht akzeptiert werden. Ein Vorteil des langsamen Starts ist wiederum die Möglichkeit den Einkuppelvorgang beinahe ohne Ruck durchführen zu können. Der Motorstart wird dann nur noch akustisch und durch Vibrationen im Bereich des Motors wahrgenommen, am Antriebsstrang ist der Wechsel von elektrischem auf hybriden Betrieb aber nicht spürbar.

Um den Ruck beim Einkuppeln zu vermeiden wird der Verbrennungsmotor nach dem Start zunächst auf die Drehzahl gebracht, bei der die Ein- und Ausgangsseite der Kupplung synchron laufen. Umso näher die Drehzahl des Motors an dieser Synchrondrehzahl liegt, umso geringer wird der Ruck beim Einkuppeln. Im Idealfall entsteht dabei zwischen den Kupplungsscheiben auch kein Schlupf. Da das Steuergerät des Verbrennungsmotors selbst keine Drehzahlregelung unterstützt, muss diese durch das Hybridsteuergerät erfolgen. Während eine Drehzahlregelung im Motorsteuergerät Einspritzung, Zündwinkel sowie Luftmenge individuell beeinflussen kann und somit, trotz des unrunder Laufs eines Zweizylinders, eine Drehzahl relativ genau einstellen kann, ist eine solche Regelung durch das einfache externe Momenteninterface bei weitem nicht so schnell, genau oder stabil. Alleine durch die Verzögerung, die durch die Nachrichtenübermittlung am CAN-Bus entsteht, verliert der Drehzahlregler an Dynamik und Genauigkeit. Durch den Einsatz eines PI-Reglers mit vorgesteuertem (von aktueller und Zieldrehzahl abhängigem) Integralanteil gelingt es aber, die Drehzahl von einem beliebigen Punkt innerhalb von etwa einer Sekunde in einen akzeptablen Bereich um die Zieldrehzahl zu regeln.

Nach Erreichen einer akzeptablen Drehzahl am Verbrennungsmotor kann die Kupplung langsam geschlossen werden. Während der Motor sein Schleppmoment selbst ausgleicht, um die Drehzahl zu halten, sollte das über die Kupplung zu übertragende Moment sehr klein sein. Dennoch ist eine ausgleichende Momentenerhöhung beim Elektromotor notwendig, sobald der Kisspoint erreicht wird. Diese Anhebung ist aufgrund der unterschiedlichsten Situationen beim Einkuppeln sehr schwer zu kalibrieren. Eine Drehzahlregelung des Elektromotors in diesem Zeitpunkt stellt eine mögliche Alternative dar, setzt aber ein hoch aufgelöstes Drehzahlsignal des Elektromotors und einen hochdynamischen Drehzahlregler im Inverter voraus, sodass sehr geringe Drehzahlschwankungen schnell ausgeglichen werden können. Ist die Kupplung schließlich vollständig geschlossen, kann die Leistungsverteilung zwischen Verbrennungsmotor und Elektromotor an die Wunschverteilung herangeführt werden.

Beim Push-Start ist ein vollständiger Ausgleich des Rucks nicht möglich. Durch genaue Beobachtung des Schließvorganges der Kupplung kann genau bei Erreichen des Kisspoints vom Elektromotor volles Drehmoment verlangt werden. Dadurch wird der Ruck, soweit technisch möglich, reduziert. Da der Push-Start aber hauptsächlich bei sportlichem Fahrverhalten und plötzlichem Leistungswunsch verwendet wird, ist ein solcher Ruck aber akzeptabel und wird eventuell sogar erwartet.

Soll die Kupplung geöffnet werden, wird zunächst die Motorleistung soweit reduziert, dass der Verbrennungsmotor nur noch sein eigenes Schleppmoment ausgleicht. Damit wird versucht, das über die Kupplung übertragene Moment auf null zu reduzieren. Danach kann die Kupplung ohne große Momentenänderung an der Getriebeseite geöffnet werden. Die Öffnungsgeschwindigkeit sollte dabei

nicht zu gering sein. Sonst kann die Drehzahl des Verbrennungsmotors bei noch schleifender Kupplung bereits weit absinken und dadurch ein steigendes negatives Moment verursachen. Die geringen dabei auftretenden Effekte können sehr schwer abgeschätzt werden und machen dadurch einen Ausgleich mit dem Elektromotor nur mit Drehzahlregelung möglich.

Nach dem Öffnen der Kupplung wird anhand der Einstellungen durch die Betriebsstrategie entschieden, ob der Motor weiterlaufen, oder abgestellt werden soll. Die Möglichkeit, den Verbrennungsmotor im Leerlauf weiter zu betreiben, wurde für eine mögliche Warmlaufphase offen gehalten.

### *Gangwechsel*

Ähnlich wie beim Motorstart gibt es auch für den Gangwechsel zwei unterschiedliche Abläufe, die sich in Geschwindigkeit und Qualität der Ruckkompensation unterscheiden. Die langsamere Variante des Gangwechsels bildet die übliche Abfolge eines manuellen Schaltvorganges ab. Dabei wird zunächst die Motorleistung reduziert, sodass, wie beim Auskuppeln, der Verbrennungsmotor nur mehr seine Schleppverluste ausgleicht. Danach wird die Kupplung relativ langsam geöffnet. Ist die Kupplung messbar getrennt, das heißt das über die Kupplungskennlinie berechnete übertragbare Drehmoment ist negativ, wird mit einem der Schaltventile die Schaltstange und damit die Schaltwalze betätigt — der Gang wird gewechselt. Der erfolgreiche Schaltvorgang wird anhand der Stellung der Schaltwalze ermittelt. Steht die Schaltwalze innerhalb eines erlaubten Bereichs um den gewünschten Gang, gilt der Gang als erfolgreich eingelegt. Stimmt die Position der Schaltwalze nicht, werden weitere Schaltversuche unternommen. Nachdem der Gang korrekt eingelegt wurde, wird analog zum Einkuppeln nach einem Motorstart die Kupplung geschlossen. Zunächst wird anhand des neu eingelegten Ganges die Synchrondrehzahl des Verbrennungsmotors ermittelt und diese mittels Drehzahlregler gehalten, danach wird die Kupplung geschlossen und die Leistung des Verbrennungsmotors kontinuierlich bis zur Wunschleistung erhöht.

Die Ruckkompensation bei dieser Variante des Schaltvorgangs wird durch die relativ langsamen Abläufe begünstigt. Während das Moment vom Verbrennungsmotor zurückgenommen wird, wird die Leistung des Elektromotors simultan erhöht, um das fehlende Drehmoment an der Antriebsachse auszugleichen. Das Öffnen der Kupplung hat durch den Schleppmomentausgleich des Verbrennungsmotors ebenso wie beim Schließen der Kupplung keinen signifikanten Effekt. Nur wenn die Drehzahlabweichung des Verbrennungsmotors beim Einkuppeln durch die mangelnde Reglergenauigkeit sehr hoch ist, entsteht bei der Beschleunigung oder Verzögerung des Motors ein Störmoment.

Ein nicht zu vernachlässigender Ruck tritt trotz geöffneter Kupplung beim Wechsel des eingelegten Ganges auf. Nachdem das Getriebe direkt mit dem Elektromotor und damit auch der Abtriebsachse verbunden ist, dreht sich die Getriebeausgangswelle immer mit. Ist ein Gang eingelegt, drehen sich auch Eingangswelle und Kupplung mit der Übersetzung des eingelegten Ganges. Nach dem Herausnehmen des Ganges wird die Eingangswelle zwar durch Reibung langsamer, das Schaltrad des einzulegenden Ganges dreht sich aber mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit mit einer anderen Drehzahl. Durch die fehlende Synchronisierung führt das Einlegen des nächsten Ganges somit zu einem Schlag zwischen den Klauen, wodurch die Eingangswelle auf die passende Drehzahl beschleunigt oder verzögert wird. Diese plötzliche Geschwindigkeitsänderung führt zu einem Momentensprung an der Getriebeausgangswelle. Die Stärke und Richtung dieses Sprungs hängt von verschiedenen Faktoren ab. Beim Schalten in einen höheren Gang hilft die Verzögerung der Eingangswelle, während kurzfristig kein Gang eingelegt ist, dabei, eine passendere Geschwindigkeit zu erreichen. Beim Schalten in einen niedrigeren Gang ist hingegen das Gegenteil der Fall. Der Schaltruck wird beim Herunterschalten also jedenfalls stärker ausfallen. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Differenz der Übersetzung der geschalteten Gänge. Ein größerer Drehzahlunterschied beim Aufeinandertreffen der Klauen führt zwangsweise zu einem größeren Ruck. Schließlich spielt auch die Schaltgeschwindigkeit eine Rolle, da die Drehzahl der Eingangswelle kontinuierlich sinkt, solange kein Gang eingelegt ist.

Der so entstehende Ruck ist sehr schwer auszugleichen, da zwar über die Position der Schaltwalze relativ genau ermittelt werden kann, wann der nächste Gang eingelegt wird, durch die fehlende Drehzahl der Eingangswelle eine Abschätzung des entstehenden Ruckmoments aber kaum möglich ist. Zusätzlich ist festzuhalten, dass der so entstehende Ruck bei höheren Gängen aufgrund der geringeren Übersetzungsänderung eher gering ausfällt und somit unter Berücksichtigung des zum Ausgleich notwendigen Aufwandes akzeptiert werden kann. Wie bereits bei den Ein- und Auskuppelvorgängen besteht prinzipiell die Möglichkeit der Drehzahlregelung mittels Elektromotor, wobei diese auch hier, vor allem wegen der kurzen Dauer des Störmoments, für einen vernünftigen Ausgleich sehr exakt arbeiten muss.

Durch die für die Ruckkompensation langsam gehaltenen Schaltabläufe und insbesondere durch die langsame Drehzahlregelung des Verbrennungsmotors dauert ein Schaltvorgang mit dieser Methode von der Übertragung der Leistung auf den Elektromotor, bis der Verbrennungsmotor wieder Leistung an den Antriebsstrang abgeben kann etwa zwei Sekunden. Deshalb ist diese Schaltvariante nur akzeptabel, wenn der Elektromotor das fehlende Drehmoment vollständig ausgleichen kann.

Für den Fall, dass das Drehmoment des Elektromotors dafür nicht ausreicht, wurde eine zweite Schaltvariante entwickelt, die einen vollständigen Schaltvorgang in etwa 300 Millisekunden ermöglicht. Durch die kurze Schaltdauer wirkt sich das fehlende Drehmoment nicht negativ auf die

Fahrdynamik aus. Insbesondere für Vollastbeschleunigungen ist dieser Schaltmodus also von Vorteil. Im Gegensatz zum normalen Schaltvorgang wird hierbei die Schaltwalze „vorgespannt“, das heißt das Schaltventil wird betätigt und somit Druck auf die Schaltwalze ausgeübt, während die Kupplung noch geschlossen ist. Aufgrund des über die Klauen des eingelegten Ganges übertragenen Moments kann der Gang nicht herausgenommen werden. Die Schaltwalze bleibt in der Ausgangsposition. Danach wird für sehr kurze Zeit das Moment des Verbrennungsmotors vollständig reduziert und gleichzeitig die Kupplung sprunghaft geöffnet. Weil dadurch plötzlich im Getriebe kein Moment mehr übertragen wird, verlieren die Klauen die Haftung und die Schaltwalze kann den Gang wechseln. Steht die Schaltwalze danach in der korrekten Position wird die Kupplung sofort wieder vollständig geschlossen und gleichzeitig das Motormoment wieder erhöht. Ein Ausgleich des Drehmoments durch den Elektromotor erfolgt parallel zum Öffnen der Kupplung.

Die Vorteile dieser Schaltmethode sind die hohe Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Schaltung aufgrund der schnellen Schaltwalzenbewegung, der nur sehr kurze Verlust des Drehmoments des Verbrennungsmotors sowie der mögliche Verzicht auf eine Drehzahlregelung des Verbrennungsmotors, da eine Drehzhanpassung in der kurzen Zeit der Unterbrechung ohnehin nicht möglich wäre. Nachteilig ist dagegen, dass die Vorspannung der Schaltwalze ein relativ hohes über das Getriebe übertragenes Drehmoment voraussetzt, da sonst bereits bei Betätigung des Schaltventils der Gang unkontrolliert herausrutschen könnte.

### *Gemeinsame Bezugsachse*

Eine wichtige Voraussetzung dafür, die Funktionen der Low-Level-Control einfach zu implementieren, ist ein gemeinsames Bezugssystem für Drehzahlen und Drehmomente. Aufgrund der Topologie des Antriebsstrangs wurde die Abtriebsachse als Bezugspunkt ausgewählt. Diese ist über eine Getriebestufe mit dem Elektromotor und über einen Riemen und das Getriebe mit dem Verbrennungsmotor verbunden. Daraus ergibt sich, dass das Drehzahlverhältnis zwischen Elektromotor und Bezugsachse immer konstant ist, während sich jenes zum Verbrennungsmotor mit dem eingelegten Gang ändert. Da bei diesen Sprüngen die Kupplung aber geöffnet ist, ergeben sich daraus keine weiteren Probleme. Die einzige Ausnahme von diesem Bezugssystem stellt die Drehzahlregelung des Verbrennungsmotors dar. Da hier der Motor bei offener Kupplung frei läuft und der Regler auf Motordrehzahlen kalibriert ist, muss in diesem Zustand die Drehzahl des Verbrennungsmotors getrennt und ohne Umrechnung berücksichtigt werden.

Zur Ansteuerung der einzelnen Antriebe muss vom Bezugspunkt wieder auf den jeweiligen Motor zurückgerechnet werden. Dabei müssen auch Verluste, die zwischen Antrieb und Bezugspunkt auftreten, berücksichtigt werden. Zur einfacheren Berechnung wird für jede Übersetzungs- oder Übertragungsstufe ein konstanter Wirkungsgrad angenommen. Damit bei gleicher

Momentenanforderung von Verbrennungsmotor und Elektromotor tatsächlich dasselbe Moment am Abtrieb anliegt, ist eine zusätzliche Verfeinerung notwendig. Durch unabhängige Vermessung der einzelnen Antriebe am Bezugspunkt können quadratische Gleichungen aufgestellt werden, die die Soll- auf Ist-Momente abbilden. Eine signifikante Abhängigkeit von anderen Größen, wie Drehzahl oder Temperatur, konnte nicht festgestellt werden und wurde somit für den Ausgleich nicht vorgesehen. Mithilfe dieser Gleichungen werden die Drehmomentwünsche direkt am Momenteninterface zur Betriebsstrategie angeglichen. Da das real am Hinterrad anliegende Drehmoment nicht relevant ist, sondern nur von beiden Antrieben das gleiche Moment geliefert werden soll, ist es ausreichend, die Kalibrierung nur für einen der beiden Motoren durchzuführen. Weil der Elektromotor auch ohne Verbrennungsmotor genutzt wird, wird dieser als Referenz festgelegt. Aus den quadratischen Gleichungen (4-2) und (4-3) ergibt sich durch Umformung die Anpassungsgleichung (4-4) für den Verbrennungsmotor.  $M_{\text{Soll, EM}}$  wird dadurch zu einem gemeinsamen Sollwert für Verbrennungsmotor und Elektromotor, der die transparente Momentenaufteilung ermöglicht. Die Konstanten  $a$ ,  $b$  und  $c$  werden durch Messung bestimmt.  $M_{\text{Ist}}$  bezeichnet das gemessene Drehmoment an der gemeinsamen Achse,  $M_{\text{Soll, EM}}$  bzw.  $M_{\text{Soll, VM}}$  sind die Vorgegebenen Drehmomente (auch an der gemeinsamen Achse) für den Elektromotor bzw. Verbrennungsmotor.

$$M_{\text{Ist}}[\text{Nm}] = a_1 * M_{\text{Soll, EM}}^2[\text{Nm}^2] + b_1 * M_{\text{Soll, EM}}[\text{Nm}] + c_1 \quad (4-2)$$

$$M_{\text{Ist}}[\text{Nm}] = a_2 * M_{\text{Soll, VM}}^2[\text{Nm}^2] + b_2 * M_{\text{Soll, VM}}[\text{Nm}] + c_2 \quad (4-3)$$

$$a_1 * M_{\text{Soll, EM}}^2[\text{Nm}^2] + b_1 * M_{\text{Soll, EM}}[\text{Nm}] + c_1 = a_2 * M_{\text{Soll, VM}}^2[\text{Nm}^2] + b_2 * M_{\text{Soll, VM}}[\text{Nm}] + c_2$$

$$M_{\text{Soll, VM}}[\text{Nm}] = \frac{\sqrt{4a_1a_2 * M_{\text{Soll, EM}}^2[\text{Nm}^2] + 4b_1a_2 * M_{\text{Soll, EM}}[\text{Nm}] + 4c_1a_2 - 4a_2c_2 + b_2^2 - b_2}}{2a_2} \quad (4-4)$$

Eine falsche Kalibrierung der beiden Antriebe wird am deutlichsten spürbar, wenn bei hoher Last von elektrischem auf hybriden Betrieb gewechselt wird und dabei der Verbrennungsmotor den Antrieb alleine übernimmt. Wurde dabei die Geschwindigkeit bis zum Wechsel konstant gehalten, ist nach dem Einkuppeln eine deutliche Geschwindigkeitsänderung erkennbar.

### 4.3 Betriebsstrategie

Die Betriebsstrategie wurde aufbauend auf den in Kapitel 3 entworfenen Strategien entwickelt. Dabei wurden zwei unterschiedlich komplexe Varianten der Schaltstrategie implementiert, um diese später vergleichen zu können. Zusätzlich zu den bereits behandelten Kriterien wurden verschiedene Funktionen entworfen, die bei den laufenden Tests als notwendig erschienen. Die Implementierung erfolgte so weit wie möglich generisch, sodass eine Änderung der Komponenten sehr einfach durch

Änderung von Kennlinien und -feldern umgesetzt werden kann. Eine Erhöhung der Anzahl der Gänge oder eine grundlegende Änderung der Antriebsstrangtopologie erfordert allerdings größere Anpassungen. Im folgenden Kapitel sollen einige Details der Umsetzung der Betriebsstrategie genannt werden.

#### 4.3.1 Bestimmung der Fahrer kennzahl

Angelehnt an die Fahrertypkennzahl aus [23] (siehe Kapitel 2.5.3 und 3.4.2) wird in der Betriebsstrategie der Fahrstil auf einer Skala von null bis eins zwischen ökonomisch und sportlich bewertet. Im Gegensatz zu [23] wird aber nur eine Kurzzeitbewertung durchgeführt. Grundlage für die Bewertung ist nur die Stellung des Gasgriffes. Bei hoher Griffbeschleunigung in positiver Richtung, sowie bei vollem Ausschlag (Kickdown) wird ein sportlicher Fahrstil forciert, die Fahrer kennzahl wird bis zum oberen Grenzwert erhöht. Bleibt der Gasgriff auf der Kickdown-Stellung wird auch die Fahrer kennzahl nicht mehr verändert. Erst bei einer Griffstellung von weniger als 100% und geringer Griffbeschleunigung wird die Fahrer kennzahl langsam wieder gesenkt, bis sie schließlich wieder den unteren Grenzwert erreicht. Mit der manuellen Auswahl eines Betriebsmodus werden die Grenzen festgelegt. Dabei kann zwischen ökonomischem (niedrigere obere Grenze) und sportlichem Modus (höhere untere Grenze) gewechselt werden.

#### 4.3.2 Ladestrategie

In der Betriebsstrategie gibt es kein einzelnes Modul, das die Ladestrategie abbildet. Vielmehr werden in sämtlichen Teilen SOC-Abhängigkeiten definiert, die das Ladeverhalten beeinflussen. Eine Basis dafür ist die Festlegung von Drehmomentgrenzen für den Elektromotor, die von der gesamten Betriebsstrategie eingehalten werden müssen.

Für einen manuellen Eingriff in die Ladestrategie kann ein vom tatsächlichen SOC abweichender, „falscher“ SOC an die Betriebsstrategie übermittelt werden. Um ein Laden der Batterie zu forcieren, wird ein konstanter SOC von 15% simuliert, bis der tatsächliche SOC 95% erreicht hat.

#### 4.3.3 Umschaltung zwischen elektrischem und hybridem Betrieb

Für die Kriterien aus Kapitel 3.3 wurde eine SOC-Abhängigkeit implementiert. Bei hohem Ladezustand der Batterie wird die Mindestgeschwindigkeit erhöht. Die vom Elektromotor vorausgesetzte Momentenreserve bleibt konstant. Durch den SOC wird aber die obere Drehmomentgrenze des Elektromotors, die als Ausgangspunkt für die Berechnung verwendet wird, verändert. Dadurch ergibt sich indirekt eine Veränderung des zur Umschaltung in hybriden Betrieb notwendigen Drehmoments. Die Verzögerung für die Rückschaltung in den elektrischen Betrieb wird mit sinkendem SOC verlängert. Bei sehr niedrigem Ladezustand wird ein Wechsel zurück in rein elektrischen Betrieb nur mehr beim Unterschreiten der unteren Drehzahlgrenze des Verbrennungsmotors erlaubt. Eine



zusätzliche Funktion stellt die Verkürzung der Verzögerungszeit bei Betätigung der Rekuperation dar. Dabei wird angenommen, dass bei längerer Verwendung der Rekuperation der Wechsel zum elektrischen Betrieb bewusst erzwungen werden soll. Bei Betätigung der Bremse wird der elektrische Betrieb in jedem Fall erzwungen, um ein Abwürgen des Verbrennungsmotors zu vermeiden.

Die Implementierung arbeitet mit getrennten Pfaden für die Geschwindigkeits- und Momentenabhängigkeit. Als Ergebnis der Einzelberechnungen wird ein Boolean ausgegeben, der *Wahr* ist, wenn der elektrische Modus gewählt werden soll. Die beiden Berechnungen und das Signal des Bremslichtschalters werden mit einer Oder-Verknüpfung zusammengefasst, sodass der hybride Betrieb nur erlaubt wird, wenn alle Pfade *Falsch* sind. Dieses Ausgangssignal wird über die Zeit integriert, und mit der variablen Verzögerungszeit verglichen. Der Integrator wird immer bei Anliegen der Bedingung für hybriden Betrieb zurückgesetzt. Dadurch ergibt sich genau das gewünschte Verhalten der Zeitverzögerung.

#### 4.3.4 Momentenverteilung

Die Momentenverteilung für hybriden Betrieb wird laufend berechnet, damit im Zeitpunkt der Umschaltung bereits eine passende Verteilung bekannt ist. Dafür werden zunächst Drehmomentgrenzen zur Lastpunktverschiebung am Verbrennungsmotor berechnet. Abhängig vom SOC wird die erlaubte Abweichung vom optimalen Verbrauch ermittelt. Abweichungen zu höherem Drehmoment werden bei hohem SOC verboten, während Abweichungen zu niedrigerem Drehmoment bei hohem SOC erlaubt werden. Der Grund dafür liegt im verfügbaren Elektromotormoment. Bei hohem SOC kann und soll der Elektromotor den Verbrennungsmotor unterstützen, deshalb wird bei hohem Drehmomentwunsch das Drehmoment des Verbrennungsmotors nach oben am Bestpunkt limitiert. Der Elektromotor kann dann das restliche Drehmoment liefern, Zusätzliche Leistung zum Laden der Batterie ist nicht notwendig. Bei niedrigem SOC hingegen soll der Elektromotor als Generator arbeiten. Ein höheres Drehmoment am Verbrennungsmotor und damit zusätzliche Leistung zum Laden der Batterie ist also wünschenswert. Insgesamt wird durch die verschiedenen SOC-Abhängigkeiten also der gesamte erlaubte Betriebsbereich des Verbrennungsmotors verschoben. In Abbildung 3-4 sind im Verbrauchskennfeld sowohl die Linie des optimalen Verbrauchs als auch verschiedene Abweichungen davon dargestellt, ähnlich wie sie im Algorithmus verwendet werden.

Die so bestimmten Drehmomentgrenzen werden mit dem Wunschmoment verglichen. Wenn das Wunschmoment größer ist, als die obere Drehzahlgrenze, so muss der Elektromotor die Differenz motorisch ausgleichen. Ist das Wunschmoment kleiner als die untere Drehzahlgrenze, muss der Elektromotor die Differenz generatorisch ausgleichen. Wenn das Wunschmoment innerhalb der Drehzahlgrenzen ist, ist eine Lastpunktverschiebung nicht notwendig, der Elektromotor muss kein

Drehmoment liefern. Das dadurch bestimmte Sollmoment für den Elektromotor wird anschließend noch mit den Grenzen der Ladestrategie limitiert, da diese noch nicht berücksichtigt wurden. Falls dabei das Sollmoment tatsächlich begrenzt wird, muss die dadurch zum Wunschmoment entstehende Differenz wieder vom Verbrennungsmotor ausgeglichen werden. Der Verbrennungsmotor arbeitet dann zwar nicht mehr innerhalb des vorher definierten Bereichs, dem Fahrerwunsch muss aber, soweit technisch möglich, nachgekommen werden.

#### 4.3.5 Gangwahl mit Kennlinien

Für die Schaltstrategie mit Kennlinien, werden die Schaltpunkte offline berechnet. Im Steuergerät sind also nur mehr Kennlinien für die Gangwahl verantwortlich. Diese Kennlinien geben für jeden Gang über den gesamten Drehmomentbereich des Verbrennungsmotors an, bei welcher Drehzahl in den nächsten Gang geschaltet werden soll. Diese Variante wurde ursprünglich aufgrund der einfachen Funktion entwickelt, um die restlichen Module der Betriebsstrategie testen zu können und wurde nach Einführung der komplexeren Schaltstrategie nicht weiter optimiert.

Die Berechnung der Kennlinien erfolgt auf Basis des Verbrauchskennfeldes des Verbrennungsmotors und der Getriebeübersetzungen. Das Verbrauchskennfeld wird für alle Gänge auf die Getriebeausgangsseite abgebildet. Danach wird für jeden Punkt bestimmt, in welchem Gang der niedrigste spezifische Kraftstoffverbrauch erreicht wird. Das Resultat dieser Berechnung ist in Abbildung 4-1 im Hintergrund zu erkennen. Die Schaltlinien zum Herunterschalten werden nun entlang der Grenzen gelegt. Ein niedrigerer Gang wird also nur eingelegt, wenn der spezifische Kraftstoffverbrauch in diesem Gang tatsächlich geringer ist. Für die Schaltvorgänge in einen höheren Gang wird bei derselben Berechnung die Leistung des Verbrennungsmotors eingeschränkt, um eine Hysterese zu erreichen. Punkte in den Schaltlinien zwischen gleichen Gängen, die trotz der Leistungsreduktion zu nahe aneinander liegen, werden zusätzlich verschoben, um eine ausreichende Hysterese sicherzustellen. Die vollständige Darstellung der Schaltlinien ist in Abbildung 4-1 zu sehen, wobei die senkrechten Grenzen durch die in Tabelle 4-1 festgelegten Drehzahlgrenzen entstehen, die von den verbrauchsabhängigen Schaltlinien keinesfalls überschritten werden dürfen. So ist zum Beispiel die niedrigste Drehzahl, bei der ein Hochschaltvorgang erlaubt ist  $1900 \text{ min}^{-1}$ .

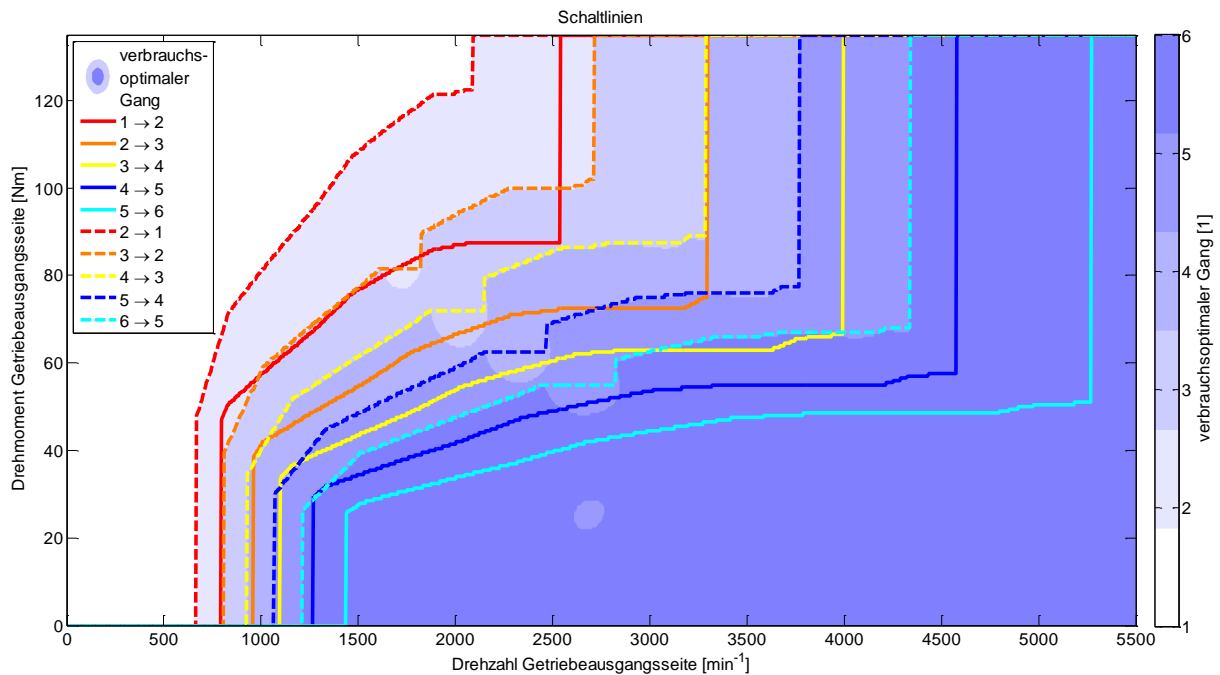


Abbildung 4-1: Schaltlinien in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment an der Getriebeausgangsseite

Im Hintergrund: Verbrauchsoptimaler Gang im jeweiligen Betriebspunkt

ausgelöster Gangwechsel	Minstdrehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	Maximaldrehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]
↑	1900	7900
↓	1500	6500

Tabelle 4-1: Drehzahlgrenzen für Schaltvorgänge

Für die Schaltentscheidung werden mit dem aktuell gewählten Gang und dem Wunschmoment in den Kennlinien die Drehzahlgrenzen für die Schaltvorgänge ermittelt und mit der aktuellen Drehzahl verglichen. Wird eine der Grenzen überschritten, wird der entsprechende Gang gewählt. Diese Funktion ist ähnlich aufgebaut, wie der manuelle Schaltmodus. Die Eingänge der Schaltwippe werden mit den Vergleichsfunktionen ersetzt. Durch die Hysterese und Mindestabstände der Schaltlinien wird vermieden, dass beide Schaltgrenzen gleichzeitig überschritten werden oder nach einem Gangwechsel sofort wieder zurückgewechselt wird.

#### 4.3.6 Intelligente Schaltstrategie

Die intelligente Schaltstrategie ist die Umsetzung der in Kapitel 3.4 und 3.5 entworfenen Verfahren zur Gangwahl. Wie beschrieben, wird für jeden Gang die Momentenverteilung mit einer Kopie der tatsächlich verwendeten Momentenverteilungslogik berechnet. Da diese Berechnung relativ lange dauert, werden in jedem Zeitschritt nur Daten zu einem Gang berechnet. Die Eingänge werden immer für sechs Zeitschritte eingefroren, damit die Berechnung für jeden Gang auf denselben Werten basiert. Ist die Berechnung für alle Gänge abgeschlossen werden die Ausgangswerte gespeichert, bis wieder alle Daten neu berechnet wurden. Die zeitliche Auflösung der Berechnung sinkt dadurch für sechs Gänge von 10 auf 60ms. Aus der Momentenverteilung wird über das Verbrauchskennfeld der

spezifische Verbrauch im berechneten Betriebspunkt, mit dem Wirkungsgradkennfeld des Elektromotors die erwartete Batterieladeleistung und mit dem durch den SOC begrenzten maximalen Drehmoment des Elektromotors die Momentenreserve bestimmt. Darf ein Gang aufgrund von Drehzahlgrenzen<sup>3</sup> am Verbrennungsmotor nicht eingelegt werden, werden ungünstige Werte zugewiesen, die später erkannt werden können.

Die drei Kenngrößen werden unabhängig voneinander normalisiert, so dass der schlechteste Gang als Bewertung 0 und der beste eine Bewertung von 1 bekommt. Die Normalisierung des Verbrauchs erfolgt zwischen dem Gang mit dem niedrigsten Verbrauch, dem 1 zugewiesen wird, und einem Fixpunkt bei 2000g/kWh als 0. Dazwischen werden die restlichen Verbrauchswerte linear interpoliert. Die Maximale Momentenreserve aller Gänge wird zunächst auf ein Maximum von 600Nm bezogen, negative Werte werden durch einen Faktor zusätzlich geschwächt. Das Minimum ist auf -1000Nm festgelegt. Die aus dieser Berechnung resultierenden Werte bewegen sich im Bereich zwischen 0 und 1, weil das Maximum aber höher ist als das maximal erreichbare Drehmoment, wird die Bewertung 1 nie verwendet. Deshalb werden diese Resultate zusätzlich noch auf deren Maximum bezogen um schließlich den vollen Wertebereich auszuschöpfen. Die Bewertung der Ladeleistung erfolgt linear zwischen höchstem Ladestrom (1) und höchstem Entladestrom (0). Gleichungen (4-5), (4-6) und (4-7) zeigen die genaue Berechnung der Bewertungen. Beispielwerte für unterschiedliche Ladezustände können in Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3 verglichen werden. Dabei ist zu erkennen, dass die Momentenlogik bei hohem SOC ein weiteres Laden der Batterie verhindert und dadurch, in Verbindung mit Formel (4-6), die Bewertung der Ladeleistung für alle Gänge gleich ist.

$$\begin{aligned}
 & b_{\text{Verbrauch}}(x_i)^4 : \\
 & = \begin{cases} \max\left(0, 1 + \min\left(0, (-1) * \frac{x_i - \min(x)}{2000 \text{ g/kWh} - \min(x)}\right)\right) , & x_i > 0 \text{ [g/kWh]} \\ 0, & x_i \leq 0 \text{ [g/kWh]}^5 \end{cases} \quad (4-5) \\
 & b_{\text{Momentenreserve}}(x_i) := \max\left(0, \frac{x_i}{600 \text{ Nm}}\right) + 5 * \min\left(0, \frac{x_i}{600 \text{ Nm}}\right) \\
 & b_{\text{Ladeleistung}}(x_i) := \max\left(-1, \min\left(1, \frac{x_i}{\min(x)}\right)\right)
 \end{aligned}$$

<sup>3</sup> Die Drehzahlgrenzen werden mit der Fahrererkennung variiert, um bei ökonomischer Fahrweise keine zu hohen Drehzahlen am Verbrennungsmotor zu erreichen und umgekehrt bei sportlicher Fahrweise die Drehzahl auf höherem Niveau zu halten.

<sup>4</sup> Der Index  $i$  wird für den Gang verwendet. Alle Berechnungen werden für jeden Gang durchgeführt.

<sup>5</sup> Ein Verbrauch von weniger als 0 g/kWh wird in der Momentenlogik zugewiesen, wenn der Gang aufgrund von Drehzahlgrenzen nicht erlaubt ist.

$$\text{norm}(x_i) := \begin{cases} \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}, & \min(x) \neq \max(x) \\ 1, & \min(x) = \max(x) \end{cases} \quad (4-6)$$

$$\text{Bewertung}_{\text{Verbrauch},i} = \text{norm}(b_{\text{Verbrauch}}(\text{Verbrauch}_i))$$

$$\text{Bewertung}_{\text{Momentenreserve},i} = \text{norm}(b_{\text{Momentenreserve}}(\text{Momentenreserve}_i)) \quad (4-7)$$

$$\text{Bewertung}_{\text{Ladeleistung},i} = \text{norm}(b_{\text{Ladeleistung}}(\text{Ladeleistung}_i))$$

Gang (i)	Verbrauch <sub>i</sub> [g/kWh]		Momentenreserve <sub>i</sub> [Nm]		Ladeleistung <sub>i</sub> [kW]	
	Bewertung <sub>Verbrauch,i</sub>		Bewertung <sub>Momentenreserve,i</sub>		Bewertung <sub>Ladeleistung,i</sub>	
1	-1	0	-1 <sup>6</sup>	0	-20 <sup>7</sup>	1
2	514,5	0,9586	316,9	1	0	1
3	421	0,9874	287,9	0,9084	0	1
4	395,4	0,9953	272,8	0,8609	0	1
5	389,9	0,997	263,5	0,8315	0	1
6	380,2	1	248,4	0,784	0	1

Tabelle 4-2: Beispiel für Gang-Bewertungen bei einem SOC von 95%

Gang (i)	Verbrauch <sub>i</sub> [g/kWh]		Momentenreserve <sub>i</sub> [Nm]		Ladeleistung <sub>i</sub> [kW]	
	Bewertung <sub>Verbrauch,i</sub>		Bewertung <sub>Momentenreserve,i</sub>		Bewertung <sub>Ladeleistung,i</sub>	
1	-1	0	-1	0	-20	0
2	264,2	0,9944	65,16	1	6,674	1
3	244,5	1	36,14	0,5546	6,674	1
4	244,9	0,9999	21,09	0,3236	3,429	0,7569
5	257	0,9964	11,76	0,1806	-2,271	0,3299
6	259,5	0,9957	-3,305	0	-6,895	0

Tabelle 4-3: Beispiel für Gang-Bewertungen bei einem SOC von 20%

Nach der Berechnung der drei Bewertungen, werden diese folgendermaßen gewichtet: zuerst werden die Verbrauchsbewertung und die Bewertung der Momentenreserve mittels Fahrererkennung gemischt. Ist die Fahrererkennung 0 (ökonomisch), wird nur der Verbrauch betrachtet. Ist sie 1 (sportlich), wird nur die Momentenreserve betrachtet. Parallel dazu wird die Ladeleistung in einem

<sup>6</sup> Fehlerwert aufgrund von Drehzahlgrenzen.

<sup>7</sup> Fehlerwert aufgrund von Drehzahlgrenzen.

festen Verhältnis von 9:1 mit der Momentenreserve vermischt<sup>8</sup> und diese Mischbewertung schließlich zur Fahrer kennzahlabhängigen Bewertung hinzugefügt. Die Gewichtung ist dabei allerdings nicht direkt proportional zum SOC, sondern erfolgt über eine Kennlinie, die bei niedrigem SOC die Ladeleistung voll und ab einem SOC von 60% gar nicht mehr berücksichtigt.

Die endgültigen Gangbewertungen werden schließlich über die Zeit integriert. Wird ein Gang durch Verletzung einer Drehzahlgrenze ungültig, wird dessen Integral auf null gesetzt. Nach jedem Gangwechsel werden alle Integrale zurückgesetzt. Die Integrale aller Gänge werden danach vom Integral des eingelegten Ganges abgezogen. Daraus ergibt sich der Vorteil im Vergleich zum aktuellen Gang. Im normalen Betrieb werden nun die Gänge unter und über dem aktuellen Gang weiter untersucht. Erreicht einer dieser Vorteile die Schaltschwelle<sup>9</sup>, so wird, wie in Abbildung 4-2 zu sehen ist, ein Gangwechsel ausgelöst und die Vorteilsberechnung fängt wieder bei null an.

Im Fall eines Kickdowns werden im Gegensatz dazu nicht die Vorteile, sondern direkt die aktuellen Bewertungen betrachtet. Weil in diesem Fall die Fahrer kennzahl gleichzeitig auf 1 gesetzt wird, ist für die Gangentscheidung nur die Momentenreserve sowie bei niedrigem SOC die Ladeleistung entscheidend. Durch die Betrachtung der Bewertungen können auch Gänge übersprungen werden, was im normalen Betrieb zur Beruhigung des Systems vermieden wird.

---

<sup>8</sup> Dies ist notwendig, um bei der Kombination niedriger SOC, hohe Leistungsanforderung und Fahrer kennzahl ökonomisch, eine sinnvolle Entscheidung treffen zu können. Die Ladeleistung wird in diesem Fall für alle erlaubten Gänge vom maximalen Ladestrom limitiert. Damit ist die Bewertung für alle Gänge gleich. Durch die Vermengung mit der Momentenreserve „gewinnt“ der niedrigste erlaubte Gang.

<sup>9</sup> Für die beiden Schaltrichtungen werden unterschiedliche Schaltschwellen definiert, die zusätzlich auch von der Fahrer kennzahl abhängen.

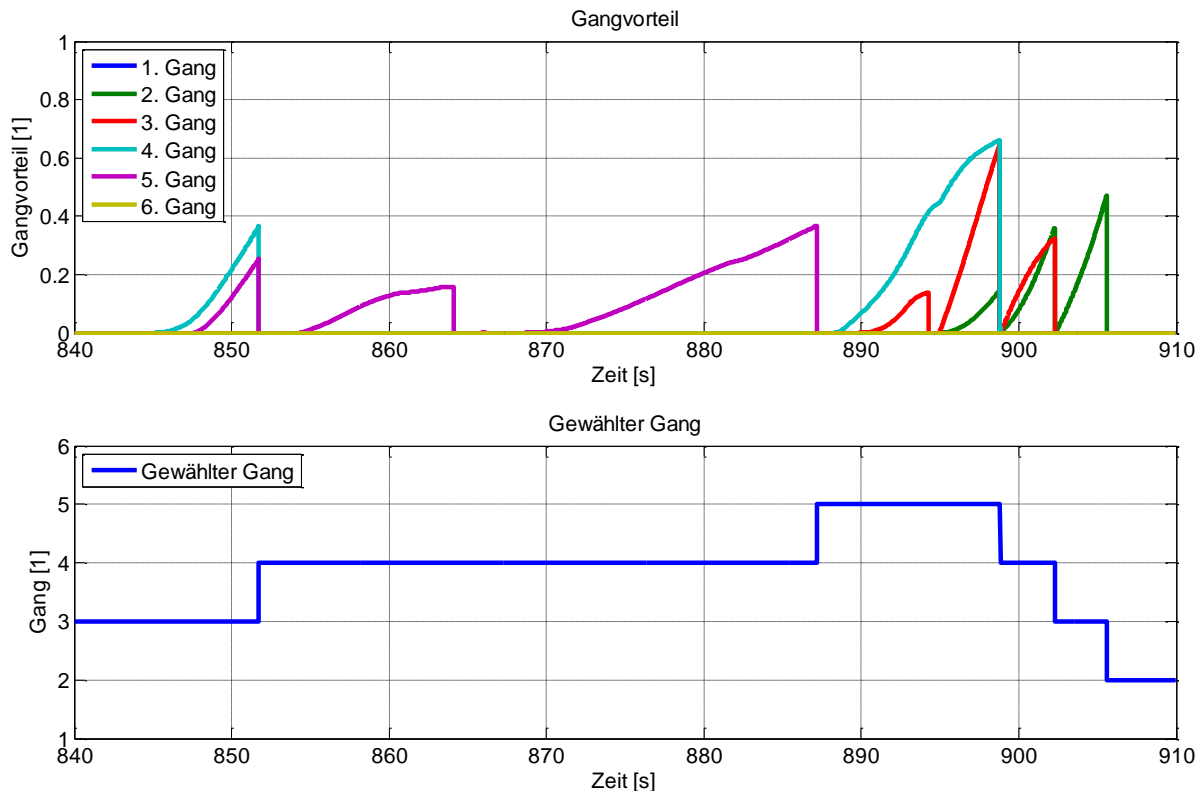


Abbildung 4-2: Gangwechsel bei Erreichen der Schaltschwellen

Zusammengefasst ergeben sich mit der intelligenten Schaltstrategie im Vergleich zur Gangwahl mit Schaltlinien folgende Vor- und Nachteile:

- |   |   |
|---|---|
| + Einfache Kalibrierung, da nur wenige Parameter notwendig sind | – Sehr rechenintensiv   |
| + SOC-Abhängigkeit  | – Aufteilung der Berechnung auf mehrere Zeitschritte notwendig, daher größere Verzögerung |
| + Fahrererkennung wird berücksichtigt                           |   |
| + Kickdown kann Gänge überspringen                              | – Verhalten nicht einfach vorhersehbar  |
| + Tatsächliche Momentenverteilung wird berücksichtigt           |   |

#### 4.3.7 Manuelle Gangwahl

Die manuelle Auswahl des Ganges erfolgt über Plus und Minus Tasten. Wird eine der Tasten betätigt, wechselt die manuelle Auswahllogik ausgehend vom aktuell eingelegten Gang in den höheren bzw. niedrigeren und übernimmt für eine definierte Zeitspanne die Schaltung von der automatischen Schaltstrategie. Wird innerhalb dieser Zeit erneut manuell geschaltet, so wird die Wartezeit wieder verlängert.

Um die erlaubten Drehzahlgrenzen des Verbrennungsmotors nicht zu überschreiten, wird für jede mögliche Schaltrichtung laufend berechnet, welche Drehzahl der Verbrennungsmotor nach dem Gangwechsel hätte. Nur wenn diese Drehzahl innerhalb vorgegebener Grenzen, jedenfalls aber über

der Leerlaufdrehzahl und unterhalb der Drehzahlbegrenzung, liegt, werden die Signale der Schalttasten an die Auswahllogik übergeben.

#### 4.4 Betriebsmodi

Es wurden vier Betriebsmodi erstellt, die über Tasten am Lenker ausgewählt werden können. Ein rein elektrischer Modus sowie drei Hybridmodi sind wählbar. Im rein elektrischen Modus bleibt der Verbrennungsmotor immer deaktiviert. Daher wird keine der bisher behandelten Methoden und Algorithmen der Betriebsstrategie angewendet. Das Wunschmoment wird direkt an den Elektromotor weitergereicht. Die einzige Einschränkung besteht in der SOC-abhängigen Limitierung des Drehmoments. Da im rein elektrischen Betrieb die Batterie ohne ein Limit komplett leer gefahren werden könnte, ist eine Reserve von 5% vorgesehen, unter welcher kein Drehmoment mehr abgegeben werden darf. Diese Reserve kann nach Umschaltung auf einen hybriden Betriebsmodus noch zum Anfahren mit anschließendem Start des Verbrennungsmotors genutzt werden, damit die Batterie wieder geladen werden kann. Eine weitere Besonderheit des elektrischen Betriebs ist die Gangwahl. Sobald in diesen Modus gewechselt wird, wird im Getriebe der Neutralgang eingelegt, um einerseits die zusätzlichen Schleppverluste zu minimieren und andererseits zu vermeiden, dass während des elektrischen Betriebs Schaltvorgänge notwendig werden. Dies könnte in niedrigen Gängen bei hohen Geschwindigkeiten erforderlich werden, um die erlaubte Drehzahl der Kupplung nicht zu  berschreiten. Mit einher geht dabei jedoch, dass ein Wechsel zurück auf einen hybriden Modus nur bei relativ niedrigen Geschwindigkeiten möglich ist. Obwohl das verwendete Getriebe vom Neutralgang direkt in den höchsten Gang schalten kann, wird dieser Schaltvorgang, aufgrund der Massenträgheit von Kupplung und Vorgelegewelle, die plötzlich wieder mit der Getriebeausgangswelle verbunden werden, bei höheren Geschwindigkeiten zu einem starken Ruck und einer damit verbundenen Lärmentwicklung führen.<sup>10</sup>

Die hybriden Modi „Economy“ ( konomisch), „Recharge“ ( konomisch mit Ladebetrieb) und „Sport“ unterscheiden sich hauptsächlich durch die Kalibrierung der Betriebsstrategie. Im ökonomischen Betrieb wird versucht, möglichst verbrauchsoptimal zu fahren. Der verwendete Bereich der Fahrer kennzahl wird so eingeschränkt, dass keine volle sportliche Bewertung mehr erreicht werden kann. Die Schaltschwellen für einen Wechsel in einen höheren Gang sind deutlich niedriger eingestellt als jene für den Wechsel in einen niedrigeren Gang. Die erlaubten Maximaldrehzahlen am Verbrennungsmotor werden reduziert, und, solange der SOC hoch genug ist, wird es nicht erlaubt, den ersten Gang einzulegen. Der Ladebetrieb entspricht funktional exakt dem normalen

---

<sup>10</sup> Ein Lösungsansatz hierfür ist, zuerst den Verbrennungsmotor zu starten und die Kupplung kurz zu schließen, um die Eingangsseite des Getriebes vor dem Schaltvorgang zu beschleunigen. Ein Problem stellt dabei aber die daraus entstehende lange Verzögerung dar.



ökonomischen Betrieb. Damit die Batterie geladen wird, wird der SOC wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben manipuliert. Zusätzlich wird der erste Gang „freigeschaltet“, um bei niedrigeren Geschwindigkeiten höhere Leistung vom Verbrennungsmotor abrufen zu können. Eine weitere Einschränkung ist die Deaktivierung des Momentenausgleichs während der Schaltvorgänge.

Der Sportmodus unterscheidet sich deutlich von den anderen Hybridmodi. Neben der Anpassung der Schaltcharakteristik wird die Hybridlogik zusätzlich so verändert, dass der Verbrennungsmotor einerseits immer mitläuft und andererseits bereits bei Erreichen der Leerlaufgeschwindigkeit im ersten Gang eingekuppelt wird. Damit stehen unabhängig vom SOC ab einer Geschwindigkeit von etwa 19km/h beide Antriebe voll zur Verfügung. Neben den Änderungen in der Betriebsstrategie wird auch die Charakteristik der Low-Level-Control verändert. In der sportlichen Abstimmung wird die Betätigungsgeschwindigkeit der Kupplung deutlich erhöht, und wann immer möglich, die schnelle Schaltvariante verwendet.

## 4.5 Sicherheitsfunktionen

Zur funktionalen Sicherheit werden insbesondere die Schaltsequenzen und der Start des Verbrennungsmotors überwacht. Erkannte Fehler sind dabei zu lange Verzögerungen in den Abläufen, sowie beim Schalten eine zu hohe Anzahl an fehlgeschlagenen Schaltversuchen. Tritt ein Fehler auf, wird automatisch in einen rein elektrischen Notbetrieb gewechselt. Ein eventuell laufender Schaltvorgang wird sofort unterbrochen und die Kupplung geöffnet. Ein so erkannter Fehlerzustand kann durch eine Taste quittiert werden. Tritt der Fehler dann nicht sofort erneut auf, kann wieder auf einen hybriden Betriebsmodus gewechselt werden. Im Notbetrieb wird die Geschwindigkeit soweit begrenzt, dass im noch eingelegten Gang keine Drehzahlgrenzen überschritten werden, sonst bleibt das Fahrzeug aber fahrtauglich.

Die Funktion des Steuergeräts selbst wird von einem im Steuergerät integrierten Watchdog überwacht. Wird von diesem ein Fehler erkannt, werden dieselben Aktionen gesetzt, wie bei einem von der Software erkannten Fehler. Allerdings muss nach einem solchen Fehler das Steuergerät neu gestartet werden, damit wieder alle Funktionen verfügbar sind.

Eine Deaktivierung aller Komponenten im Fehlerfall wurde in Betracht gezogen und auch für den Prüfstand als ausreichend bewertet. Soll der Prototyp allerdings auch auf befahrenen Straßen getestet werden, kann ein Notbetrieb sehr nützlich sein.

## 5 Simulation und Tests

Um die Betriebsstrategie ohne laufende Tests am Prüfstand und damit schneller entwickeln, testen und verifizieren zu können, wurde eine modellbasierte Entwicklung gewählt. Aufbauend auf einer einfachen Zyklussimulation wurde ein genaueres Modell entwickelt, das die wichtigsten Funktionen im Antriebsstrang abbildet, und so eine Verifikation der Steuergerätesoftware ermöglicht.

Die entwickelten Modelle entsprechen zwar nicht vollständig den tatsächlichen physikalischen Komponenten, bilden diese aber für die Funktionsentwicklung ausreichend genau ab. Die Grundlage für die Modelle sind theoretische Überlegungen, sowie am Prüfstand durchgeführte Messungen, die immer wieder durch Tests mit aktuellen Softwareversionen im Vergleich zu dem bis zu diesem Zeitpunkt verwendeten Modell verifiziert wurden.

Die großen Vorteile der Simulation im Gegensatz zu Tests am Prüfstand sind [25]:

- exakt reproduzierbare Tests
- meist schneller als Echtzeit
- keine Gefahr, den Prototyp zu zerstören
- geringere Kosten
- mathematische Optimierungsverfahren können angewandt werden
- Varianten der Komponenten können schneller getauscht werden

Nachteilig ist allerdings:

- Modelle entsprechen nicht zu 100% der Realität (exakte Kopien kaum möglich)
- sehr komplexe Systeme erfordern hohe Rechenzeit (möglicherweise langsamer als Echtzeit)

Weitere wichtige Faktoren, wie etwa die Fahrbarkeit und das Fahrgefühl können weder durch Simulation, noch durch Tests am Prüfstand vollständig ermittelt werden. Für eine vollständige Abstimmung wird daher trotzdem ein fahrbarer Prototyp benötigt.

Als Simulationsumgebung wurde Matlab/Simulink® gewählt, da, wie in Kapitel 4 beschrieben, die Software des Steuergeräts in Simulink programmiert werden kann. Dadurch kann das Steuergerät ohne große Veränderungen in die Fahrzeugsimulation integriert werden. Für den Antriebsstrang wird auf die SimDriveline™ Toolbox zurückgegriffen [35]. Im Folgenden wird zunächst die gesamte Fahrzeugsimulation betrachtet, danach werden die verwendeten Komponenten näher beschrieben.

### 5.1 Fahrzeugsimulation

Zur Auslegung des hybriden Antriebsstranges wurde eine Regelstrecke zum automatisierten Abfahren eines Normzyklus entwickelt. Als Eingangsgröße dient das Geschwindigkeitsprofil des Zyklus mit einer

zugehörigen manuellen Gangwahl. Ein PID-Regler als virtueller Fahrer vergleicht die Soll- mit der Ist-Geschwindigkeit und betätigt Gas und Bremse. Aus diesen Soll-Werten werden in einer sehr einfachen Betriebsstrategie die Momentenanforderungen für den Verbrennungs- sowie für den Elektromotor berechnet. Die so ermittelten Momente für Verbrennungsmotor, Elektromotor und Bremse werden an den Antriebsstrang weitergegeben. Dort werden diese Momente an den jeweiligen Positionen dem Antriebsstrang aufgeprägt. Über Reifenmodelle und schließlich ein Fahrdynamikmodell wird die resultierende Fahrzeugbeschleunigung und damit -geschwindigkeit bestimmt. Damit ist der Regelkreis geschlossen und der Zyklus kann simuliert werden. Einfache Modelle ermöglichen hierbei eine schnellere Simulation und damit die Möglichkeit unterschiedliche Kombinationen von Komponenten untereinander schnell für einen ganzen Fahrzyklus vergleichen zu können.

Für die funktionale Entwicklung des Hybrid-Steuergeräts reichen diese Modelle allerdings nicht aus. Die Software des Steuergeräts soll im besten Fall ohne Änderung auch in der Simulationsumgebung lauffähig sein. Es sind daher detailliertere Modelle notwendig, die funktionell den tatsächlichen Komponenten entsprechen und zusätzlich auch die gleichen Schnittstellen bereitstellen. Neben den Daten, die im Fahrzeug am CAN-Bus übertragen werden, müssen auch alle benötigten Analogsignale simuliert werden. Abbildung 5-1 zeigt die fertige Simulationsumgebung für die funktionale Entwicklung. Der Antriebsstrang, bestehend aus Verbrennungsmotor, Elektromotor und Getriebe ist in Abbildung 5-2 dargestellt.

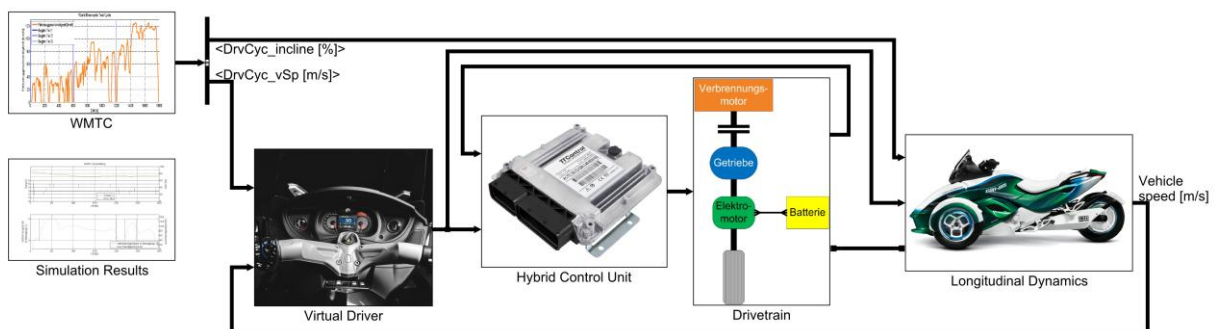


Abbildung 5-1: Erweiterte Fahrzeugsimulation in Matlab/Simulink

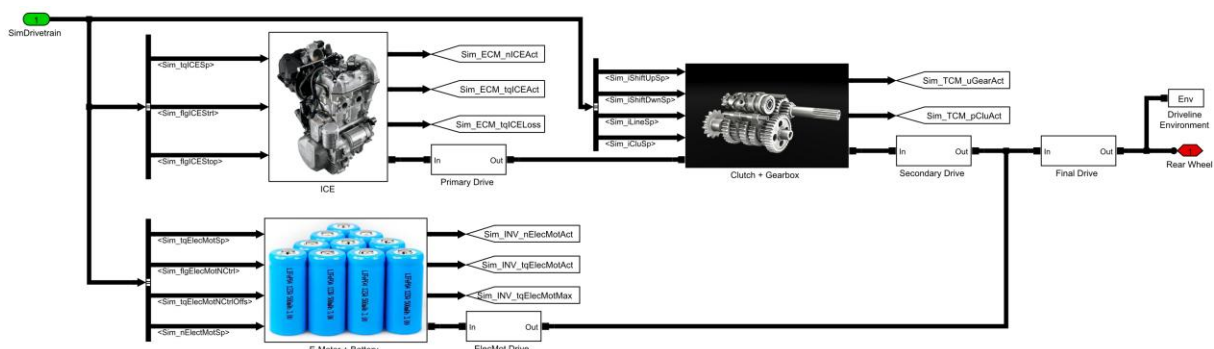


Abbildung 5-2: Antriebsstrang für die Funktionsentwicklung in Matlab/Simulink

### 5.1.1 Virtueller Fahrer

Der virtuelle Fahrer betätigt im Modell Gas, Bremse und Rekuperation. Dazu wird ein PID (Proportional-Integral-Differential)-Regler eingesetzt, der in Abhängigkeit von der Differenz zwischen Soll- und Ist-Geschwindigkeit einen Stellwert im Bereich von  $-1$  (Vollbremsung) bis  $+1$  (Vollgas) berechnet.

Während für eine gewöhnliche Fahrzeugsimulation nur Gas und Bremse notwendig sind, kommt im Fall des Hybridmodells die Rekuperation als eigenständige Funktion hinzu. Um den virtuellen Fahrer möglichst wenig zu verändern und trotzdem die Rekuperation simulieren zu können, wird ein Teilbereich der Bremse dafür verwendet. Der negative Bereich des Reglerausgangs wird dazu in zwei Bereiche unterteilt. Der Bereich  $[-0.2, 0]$  wird nur mehr für Rekuperation benutzt,  $-0.2$  entspricht dabei voller Betätigung des Rekuperationshebels, während die Reibbremse noch nicht betätigt wird. Werte im Bereich  $[-1, -0.2]$  werden zur Betriebsbremse auf  $[-1, 0]$  abgebildet. Eine Vollbremsung des PID-Reglers entspricht somit, wie in Abbildung 5-3 dargestellt, voller Rekuperation und voller Betätigung der Reibbremse.

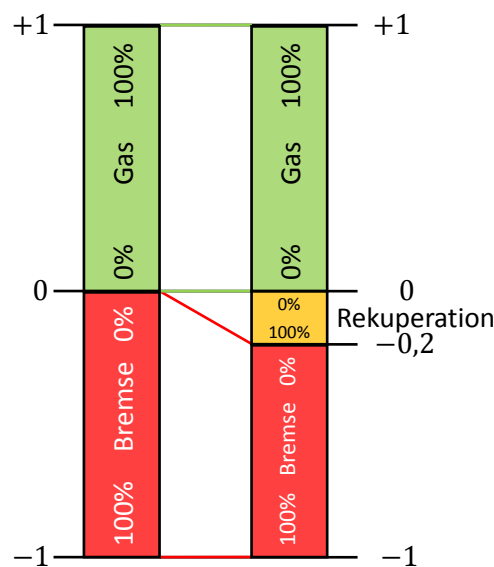


Abbildung 5-3: Aufteilung des Reglerausgangs auf Gas, Bremse und Rekuperation

### 5.1.2 Fahrwiderstände

Die Fahrwiderstände eines Fahrzeugs setzen sich aus dem Luft-, Roll- und Steigungswiderstand zusammen. In Abbildung 5-4 sind diese Größen beispielhaft dargestellt, wobei auf die genauere Zusammensetzung noch eingegangen wird.

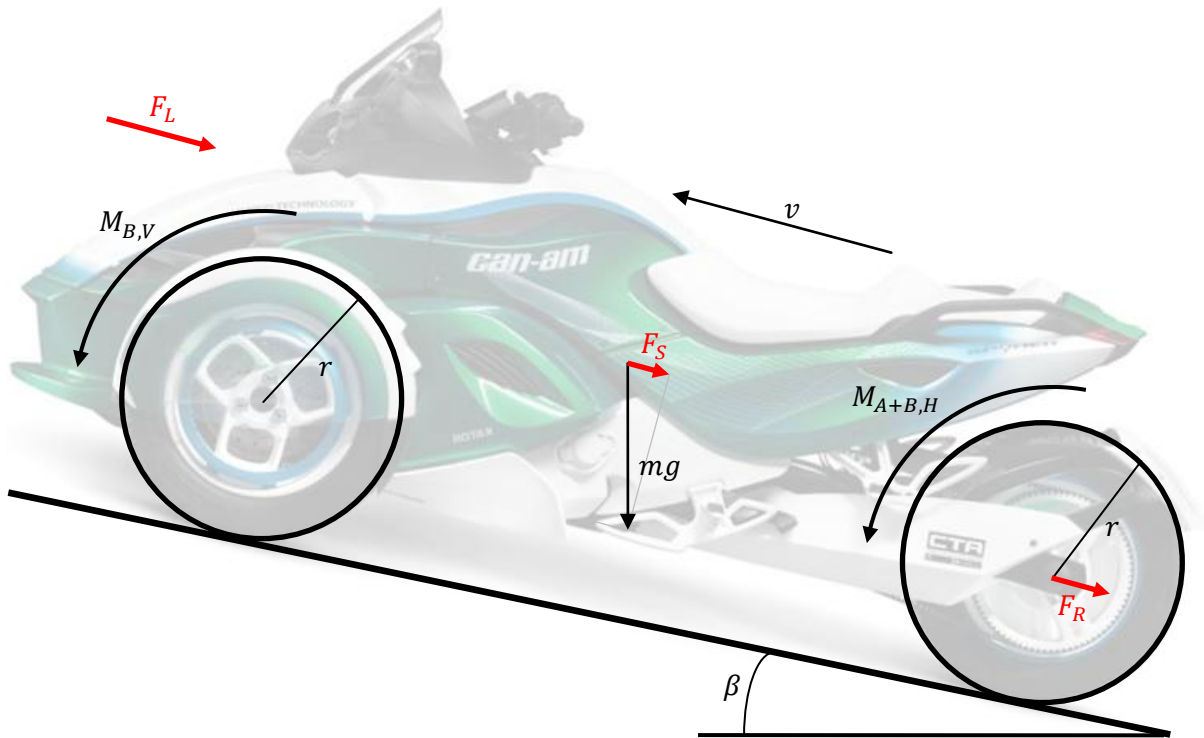


Abbildung 5-4: Fahrwiderstände am Fahrzeug

Wird der Schlupf vernachlässigt, was unter anderem aufgrund der geringeren Modellkomplexität für die Simulationszeit vorteilhaft ist, ergibt sich die in (5-1) gezeigte „vereinfachte Gleichung für die Fahrzeuglängsbewegung“ [37].

$$m^* [\text{kg}] \dot{v} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = \frac{M_A [\text{Nm}] + M_B [\text{Nm}]}{r [\text{m}]} - F_R [\text{N}] - F_L [\text{N}] - F_S [\text{N}] \quad (5-1)$$

$m^*$  bezeichnet die verallgemeinerte Masse, in der die Trägheitsmomente des Systems berücksichtigt werden ( $m^* = \lambda m$ , mit dem Drehmassenfaktor  $\lambda$ ),  $(M_A + M_B)$  ist die Summe der Antriebs- und Bremsmomente und  $(F_R + F_L + F_S)$  ist die Summe der Fahrwiderstandskräfte, die sich wie folgt zusammensetzen [37]:

$$\text{Rollwiderstand:} \quad F_R \approx a_r m g \cos \beta \quad (5-2)$$

$$\text{Luftwiderstand:} \quad F_L \approx \frac{1}{2} c_w \rho_L A_F v |v| \quad (5-3)$$

$$\text{Steigungswiderstand:} \quad F_S = m g \sin \beta \quad (5-4)$$

$a_r$ ....Rollwiderstandsbeiwert

$c_w$  ...Luftwiderstandsbeiwert

$\rho_L$ ....Luftdichte  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$A_F$  ...Anströmfläche  $[\text{m}^2]$

$m$  ....Fahrzeugmasse  $[\text{kg}]$

$\beta$  .....Steigungswinkel

Mithilfe dieser Beziehungen wird im Modell die Fahrzeuglängsdynamik simuliert. Die in (5-1) verwendete verallgemeinerte Masse kommt nicht zur Anwendung, da die Trägheitsmomente bereits in den Antriebsstrangmodellen berücksichtigt werden. Die Antriebs- und Bremskräfte werden mithilfe eines schlupffreien Reifenmodells im Antriebsstrang ermittelt.

### 5.1.3 Getriebe

In der ursprünglichen Simulation war das Getriebe als einfache, umschaltbare Übersetzung ohne zugehörige Kupplungsbetätigung implementiert. Schaltdauer und Unterbrechung des Antriebsmoments konnten damit nicht simuliert werden. Als Eingangswert wurde nur der einzuliegende Gang ausgewertet und das Übersetzungsverhältnis sprunghaft geändert.

Am realen Getriebe treten aber einerseits die genannten Effekte auf, andererseits sind die Stellwerte entsprechend dem Aufbau des hydraulischen Schaltblocks grundlegend verschieden. Die erste Grundvoraussetzung ist, dass die Kupplung hydraulisch geschlossen werden muss. Dazu ist ein gewisser Grunddruck erforderlich, der durch eine Ölpumpe zur Verfügung gestellt werden muss. Die Ölpumpe kann über Freiläufe entweder vom Elektromotor oder vom Verbrennungsmotor angetrieben werden. Der gesamte Schaltblock verfügt über vier stromgesteuerte Ventile, eines für den Grunddruck, ein Ventil für die Kupplungsbetätigung und zwei zur Betätigung der Schaltwalze.

Zur Modellierung dieser Komponente sind also zunächst alle notwendigen Eingangsgrößen zu bestimmen:

- Zum Aufbauen des Grunddruckes: Drehzahl von Verbrennungsmotor und Elektromotor
- Stromvorgaben für die vier Ventile vom Steuergerät

Daraus werden aufbauend auf der theoretischen und tatsächlichen Funktion des Getriebes in einem Zwischenschritt folgende Größen ermittelt:

- Kupplungsdruck
- Position der Schaltwalze

Schließlich müssen daraus noch die entsprechenden Signale, die tatsächlich am Getriebe gemessen werden können, generiert werden, damit sie dem Steuergerät zur Verfügung gestellt werden können.

Im Fall des Getriebes sind dies:

- Spannung eines Potentiometers für die Position der Schaltwalze

- Drucksensorwert zur Überwachung des Kupplungsdruckes
- Strommesswerte zur Überwachung der Ventilströme

Neben den statischen Zusammenhängen zwischen Ein- und Ausgängen des Systems müssen auch die Übergänge modelliert werden. Erst so kann ein Schaltvorgang realistisch simuliert werden. Beispielsweise kann der Druck im realen System nicht unendlich schnell aufgebaut werden. Zu diesem Zweck werden für die Strecke von Ventilstrom zu Druck zuerst aus den Eingangsgrößen die Zielgrößen bestimmt, danach werden die Ausgangsgrößen mittels Tiefpassfilter an die Zielgrößen angenähert. Die Zeitkonstanten dafür wurden durch Versuche so ausgewählt, dass sie möglichst genau dem realen System entsprechen. Als Beispiel wird in Abbildung 5-5 der Signalverlauf des Kupplungsdruckes im Modell gezeigt.

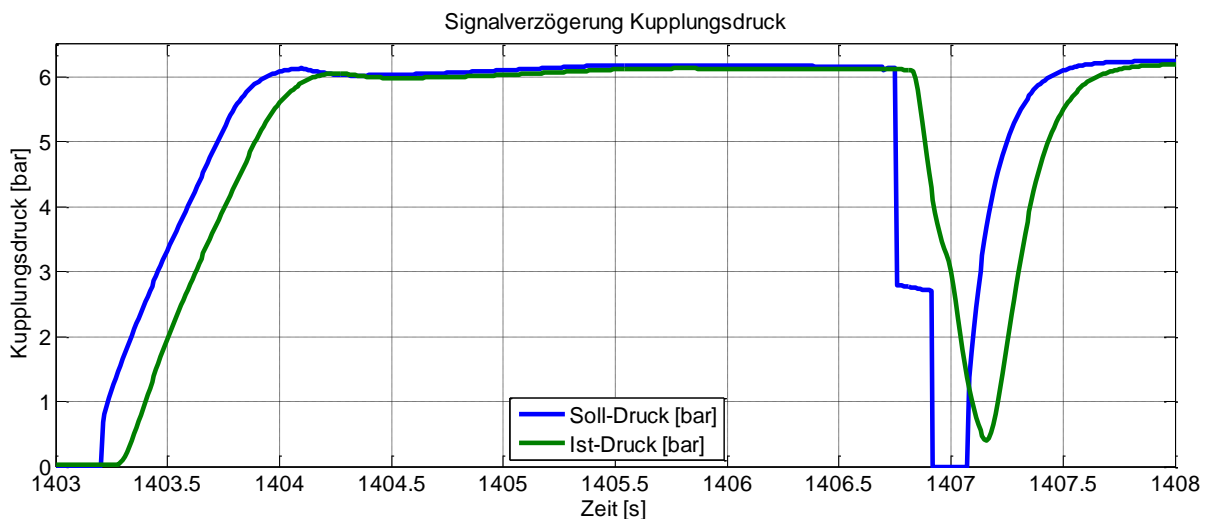


Abbildung 5-5: Verzögerung des Kupplungsdrucks von Soll- auf Ist-Zustand

Bei der Simulation der Schaltwalzenposition ist im Übrigen zu berücksichtigen, dass die Drehung der Schaltwalze prinzipiell wie bei einem gewöhnlichen sequentiellen Motorradgetriebe erfolgt. Die zwei Schaltventile betätigen die Schaltstange, die die Schaltwalze dreht. Durch die Anordnung der Schaltklinken ist ein Überschalten eines Ganges nicht möglich. Um zwei Gänge zu schalten ist also auch eine Unterbrechung des Schaltdrucks notwendig. Ebenso muss die simulierte Schaltwalze bei anhaltendem Ventilstrom nach einer Schaltstufe stoppen.

#### 5.1.4 Verbrennungsmotor

Das Modell des Verbrennungsmotors soll ebenfalls alle für die Steuerung notwendigen Interfaces aufweisen. Neben der grundlegenden Funktion als Momentenquelle im simulierten Antriebsstrang muss dafür einerseits auch die Massenträgheit bis zur Kupplung berücksichtigt werden, um eine Leerlauf- und Drehzahlregelung abbilden zu können, andererseits sind auch ein elektrischer Starter sowie Statusinformationen des Motorsteuergeräts nachzubilden.

Die Anbindung an das Steuergerät erfolgt, wie auch beim Getriebemodell, über dieselben Schnittstellen, wie sie auch beim realen Aufbau verwendet werden. Es werden also alle relevanten Informationen des simulierten Verbrennungsmotors so aufbereitet, wie sie auch tatsächlich vom Motorsteuergerät über den CAN-Bus gesendet werden.

Durch Messung am Prüfstand können wieder alle notwendigen Informationen ermittelt werden. Eine konstante Momentenanforderung ohne Last, also mit geöffneter Kupplung, bringt den Motor zum Hochdrehen. Der mit unterschiedlichen Drehmomenten gemessene Verlauf von Drehzahl und geschätztem abgegebenen Moment erlaubt die Berechnung der trägen Masse des Systems von Motor bis zur geöffneten Kupplung. Weitere zur Simulation wichtige Motordaten, wie Volllastkurve, Schleppmoment und Verbrauchskennfeld, wurden getrennt an einem reinen Motorprüfstand gemessen und anschließend in das Modell übertragen.

Aufgrund der Funktionsweise des Verbrennungsmotors muss bei der Verarbeitung der Momentenanforderung zum simulierten tatsächlichen Motormoment unterschieden werden, in welche Richtung und wie schnell eine Momentenänderung erfolgt. Die für den Antrieb ausschlaggebenden Größen sind Luft- und Kraftstoffmenge. Während die Kraftstoffmenge relativ schnell gesteuert werden kann, erfolgt die Steuerung der Luftmenge über die Drosselklappe vergleichsweise langsam. Bei geringer Luftmenge führt eine erhöhte Kraftstoffmenge nicht zu höherer Leistung, andererseits kann aber bei hoher Luftmenge durch Verringerung des eingespritzten Kraftstoffes Leistung zurückgenommen werden. Daraus folgt, dass eine Erhöhung des Motormoments langsamer erfolgen wird als eine Reduktion. Zur Abbildung dieses Verhaltens dient ein Tiefpassfilter mit variabler Zeitkonstante. Bei positiven Änderungen wird die Zeitkonstante größer gewählt als bei negativen Änderungen. Um nicht bei Rauschen der Momentenanforderung ständig die Zeitkonstante zu verändern, wird ein kleiner Bereich um den Nullpunkt der Ableitung ausgeblendet und bis zu einer eindeutigen Änderung die Zeitkonstante unverändert gelassen.

Um auch die relativ langen Pausen zwischen den Arbeitstakten der Zylinder zu berücksichtigen wird neben dem messtechnisch ermittelten, drehzahlabhängigen Schleppmoment auch ein Störmoment in Abhängigkeit von der Kurbelwellenposition hinzugefügt. Dieses Moment ist dadurch indirekt auch drehzahlabhängig, ist aber nicht gleichförmig verteilt und führt somit zu einem Rauschen des Drehmoments. Während dieser Effekt für hohe Drehzahlen nicht relevant ist, kann mit der Simulation bei niedrigen Drehzahlen die Toleranz der Steuergerätealgorithmen gegenüber Drehmomentschwankungen überprüft werden.

Motorstart und -stopp wurden zeitlich vermessen, um die Verzögerung bei der Aktivierung des hybriden Fahrmodus simulieren zu können. Die dazugehörigen Drehzahlverläufe werden implizit



nachgebildet, indem zum Starten ein Momentenverlauf ähnlich dem des Starters simuliert wird, beim Motorstopp hingegen wird die Momentenquelle des Motormodells gänzlich deaktiviert und der Motor vom Schleppmoment abgebremst. Damit liegt beim simulierten Hybridsteuergerät in allen Situationen ein realistisches Drehzahlsignal an.

Die Leerlaufregelung erfolgt durch einen PI-Regler, der aktiviert wird, sobald der Motor mit dem Startsignal gestartet wurde. Das vom Hybridsteuergerät ermittelte Wunschmodent wird vom Leerlaufregler nach unten limitiert, eine Momentenanforderung, die niedriger ist, als die des Leerlaufreglers wird also ignoriert. Fällt die Drehzahl trotz Leerlaufregler unter die Leerlaufdrehzahl, so verhält sich das Modell nicht wie ein echter Verbrennungsmotor. Während in der Realität unter einer bestimmten Grenzdrehzahl Einspritzung und Zündung unterbrochen werden und der Motor abstirbt, läuft der simulierte Motor weiter und liefert weiterhin das vom Leerlaufregler bestimmte Drehmoment. Diese Vernachlässigung war zur einfacheren Modellierung des Motorstarts notwendig.

Ein weiterer PI-Regler agiert als Drehzahlbegrenzer und greift als Drehmomentgrenze ein, sobald die Grenzdrehzahl erreicht wird, wie auch am realen Motor führt diese plötzliche Begrenzung zu Schwingungen, die aber auch für die Simulation in Kauf genommen werden und eher einen Ausnahmefall darstellen sollen.

Der Kraftstoffverbrauch des simulierten Verbrennungsmotors wird mithilfe eines näherungsweise ermittelten Verbrauchskennfeldes ermittelt. Mit dem jeweils aktuellen Zustand des Motors, also Drehzahl und Drehmoment, ergibt sich im Kennfeld ein Verbrauch in Gramm pro Stunde, der entsprechend umgerechnet und über die Simulationszeit integriert wird. Eine exakte Messung des Verbrauchskennfeldes wurde nicht durchgeführt.

### **5.1.5 Elektromotor und Inverter**

Im Gegensatz zum Verbrennungsmotor reagiert der Elektromotor sehr rasch auf alle Änderungen der Momentenanforderung. Eine Richtungsabhängigkeit bei der Simulation der Momentensteuerung wie beim Verbrennungsmotor ist daher nicht nötig.

Die Funktionalität des Inverters umfasst neben der Momentensteuerung auch eine Drehzahlregelung. Aufgrund von Limitierungen in der Auflösung des Geschwindigkeitsgebers am Elektromotor und im maximal erlaubten Strom ist eine vollkommen exakte Regelung der Drehzahl aber nicht möglich. Eine Drehzahlquelle im simulierten Antriebsstrang scheidet daher für diese Funktion aus. Es muss eine eigene Regelung implementiert werden, die die Drehzahl über eine Momentenquelle regelt, und dabei gewisse Drehzahlschwankungen zulässt. Wie bei der Leerlaufregelung des Verbrennungsmotors wird dafür ein PI-Regler verwendet. Im Gegensatz dazu wird der Ausgang des Reglers aber nicht als

Grenze verwendet, sondern selbst durch die Momentenanforderung des Hybridsteuergeräts begrenzt.

Ist die Drehzahlregelung aktiv, kann zusätzlich ein Offset-Drehmoment angefordert werden, um den Regler vorausschauend zu unterstützen. Hauptanwendung der Drehzahlregelung ist der Ausgleich des Schaltrucks. Bei den dabei auftretenden Drehzahl- und Drehmomentschwankungen reicht die Auflösung des Drehzahlgebers im Elektromotor nicht aus, um eine glatte Drehzahlregelung zu ermöglichen. Da jedoch das Hybridsteuergerät die Kupplung und die Schaltung betätigt, kann auch vorhergesagt werden, wann höheres Drehmoment vom Elektromotor gewünscht wird. Auch diese Funktion ist im Simulationsmodell implementiert.

Im Betrieb mit Momentensteuerung übernimmt ein PI-Regler die Drehzahllimitierung. Bei Erreichen einer vorgegebenen Grenzdrehzahl wird das Drehmoment trotz höherer Anforderung soweit reduziert, dass die Drehzahl nicht weiter steigt.

Der Stromverbrauch von Elektromotor und Inverter wird mithilfe eines vom Hersteller zur Verfügung gestellten Wirkungsgradkennfeldes ermittelt. Als Eingangsgrößen dienen dazu Drehzahl und Drehmoment am Elektromotor. Aus der resultierenden mechanischen Leistung und dem Wirkungsgrad kann die elektrische Leistung ermittelt werden. Da die Batteriespannung ebenfalls bekannt ist, kann schließlich der in den Inverter fließende Strom berechnet werden.

### 5.1.6 Batterie

Das Modell für die Batterie wurde an der TU Graz entwickelt und benötigt als Eingangsgröße den Batteriestrom, sowie einen Initialwert für den Ladezustand. Daraus wird dann der Verlauf der Batteriespannung ermittelt und der SOC sowie die Spannung ausgegeben. Die reale Batterie wird von einem Batterie Management System (BMS) überwacht, das zum einen dafür sorgt, dass die Zellen gleichmäßig genutzt werden und zum anderen den Zustand der Zellen sowie des Gesamtsystems überwacht. Das BMS liefert über CAN aktuelle Daten über Batteriespannung, -strom und SOC. Darüber hinaus werden Stromlimits bekanntgegeben, die möglichst nicht über- oder unterschritten werden sollen, um die Lebensdauer der Batterie nicht zu gefährden. Dabei ist zwischen positivem und negativem Strom zu unterscheiden, die Batterie darf beispielsweise nicht so schnell ge- wie entladen werden. Das Ladestromlimit wird also niedriger sein als das Entladestromlimit.

Für die Verifikation der richtigen Verarbeitung dieser Limits im Hybridsteuergerät müssen die Begrenzungen simuliert werden. Einfache Kennlinien über den SOC reichen dafür aus. Bei voller Batterie ist der mögliche Entladestrom maximal, während der Ladestrom auf null begrenzt wird. Bei leerer Batterie ist genau das Gegenteil der Fall.

## 5.2 Prüfstand

Neben der Model-in-the-Loop (MIL) Simulation werden die Modelle teilweise auch für die Tests am Hardware-in-the-Loop (HIL) Prüfstand verwendet. Die Einbindung der Simulation erfolgt über die Prüfstandssoftware Morphee der Firma D2T [8]. Die laufende Simulation kann alle Bedienelemente, die auch dem Fahrer zur Verfügung stehen, ansteuern. Umgekehrt bekommt das Simulationsmodell das mit einem Messflansch gemessene Drehmoment zur Verfügung gestellt. Damit werden in der Simulation die Fahrzeugbeschleunigung und schließlich die aktuelle Drehzahl am Hinterrad berechnet. Diese Drehzahl wird vom Prüfstand eingestellt und somit der Kreis der HIL-Simulation geschlossen. Um nicht nur vordefinierte Fahrzyklen durchfahren zu können, besteht auch die Möglichkeit den virtuellen Fahrer zu deaktivieren und mittels manuellen Bedienelementen das Fahrzeug zu steuern. Die Fahrdynamik wird dabei weiterhin vom Simulationsmodell berechnet.

Gestartet wurde die Entwicklung mit dem Verbrennungsmotor am Prüfstand und den restlichen Komponenten in der Simulation. Zur weiteren Modellbildung und zum Test der Komponenten wurden danach schrittweise Teile, die vorher nur in der Simulation gelaufen sind, am Prüfstand aufgebaut und aus dem Simulationsmodell entfernt. Im letzten Ausbauschnitt wurde schließlich das gesamte Fahrzeug aufgebaut und die Hinterachse an der Synchronmaschine des Prüfstands angeflanscht. Das Simulationsmodell wurde so weit reduziert, dass nur noch der virtuelle Fahrer auf der einen Seite und die Fahrdynamiksimulation auf der anderen Seite übrig blieben. Die Betriebsstrategie wird in diesem Aufbau bereits am Prototypensteuergerät berechnet.

Bis auf die Batterie entsprechen alle verwendeten Komponenten den auch im fahrbaren Prototyp verwendeten. Statt der Batterie wird ein Batteriesimulator als Gleichspannungsquelle eingesetzt. Dieser liefert konstant die volle Batteriespannung, kann also den SOC nicht simulieren. Stattdessen wird der SOC im Modell simuliert, indem Drehzahl und Drehmoment des Elektromotors wie bei der reinen Simulation verarbeitet werden. Der Prüfstand erzeugt dann die CAN-Nachrichten, die sonst vom BMS kommen, mit dem simulierten SOC. Neben dem großen Nachteil, dass die Funktion der Batterie so nicht realistisch nachgebildet werden kann, bringt die Verwendung des Batteriesimulators doch einen sehr großen Vorteil: die Batterie kann per Knopfdruck auf einen beliebigen SOC gesetzt werden.

Der verwendete Prüfstand ist außerdem mit einer Benzinwaage [2] ausgestattet, die dazu verwendet wurde, den Zyklusverbrauch zu bestimmen.

## 5.3 Ergebnisse

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt qualitativ anhand der während der Zyklen ermittelten Daten in Form von Gang-, SOC- und Start-Stopp-Diagrammen, sowie Betriebspunktdiagrammen für die beiden

Antriebe. Zum quantitativen Vergleich werden in den Zyklen die Schaltvorgänge sowie die Motorstarts und -stopps gezählt und der Energieverbrauch von beiden Quellen, also Kraftstoffverbrauch und Batterieentladung, ermittelt.

### 5.3.1 Referenzmotor

Als Referenz für alle Ergebnisse dient ein fiktiver 3-Zylinder Motor, der auf Grundlage des in der Arbeit verwendeten Rotax 4-TEC ACE 600 als Modell erstellt wurde. Die Motordaten wurden von zwei auf drei Zylinder hochgerechnet, um einen Verbrennungsmotor zu erhalten, der alleine eine ähnliche Leistung erzielt wie das Hybridsystem.

In Abbildung 5-7 ist zu sehen, dass die häufigsten Betriebspunkte im Zyklus relativ nahe am Bestpunkt liegen, häufig auch an der Vollastlinie. Die Schaltpunkte sind relativ früh gewählt, sodass keine Drehzahlen über  $4500 \text{ min}^{-1}$  erreicht werden. Damit wird ein großer Bereich mit gutem Wirkungsgrad nie genutzt. Insgesamt ist die Anzahl der Schaltvorgänge moderat und auch die Abstände zwischen Schaltungen sind nicht unnötig kurz. Siehe Abbildung 5-6 sowie Tabelle 5-1.

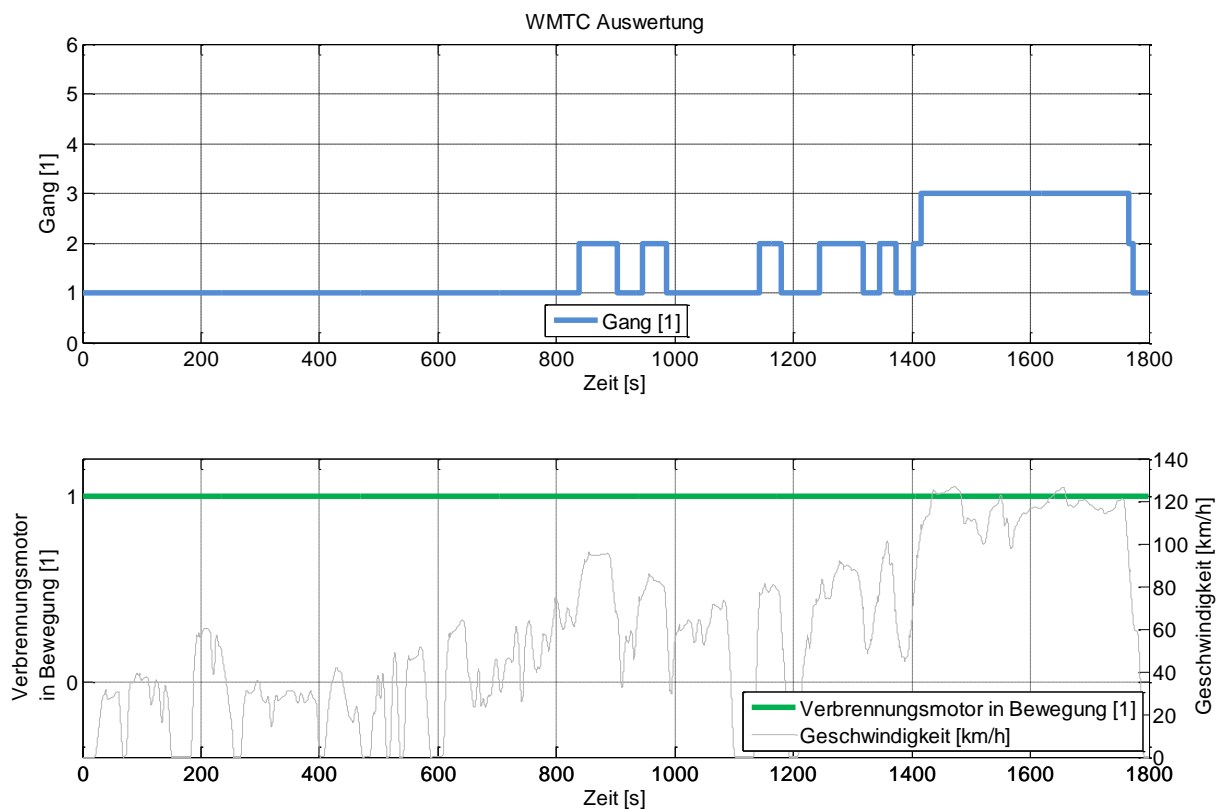


Abbildung 5-6: Gang/Start-Stop: WMTC Referenzmotor

Schaltvorgänge	Motorstarts und -stopps
13	1

Tabelle 5-1: Anzahl Startvorgänge und Motorstarts und -stopps: WMTC Referenzmotor

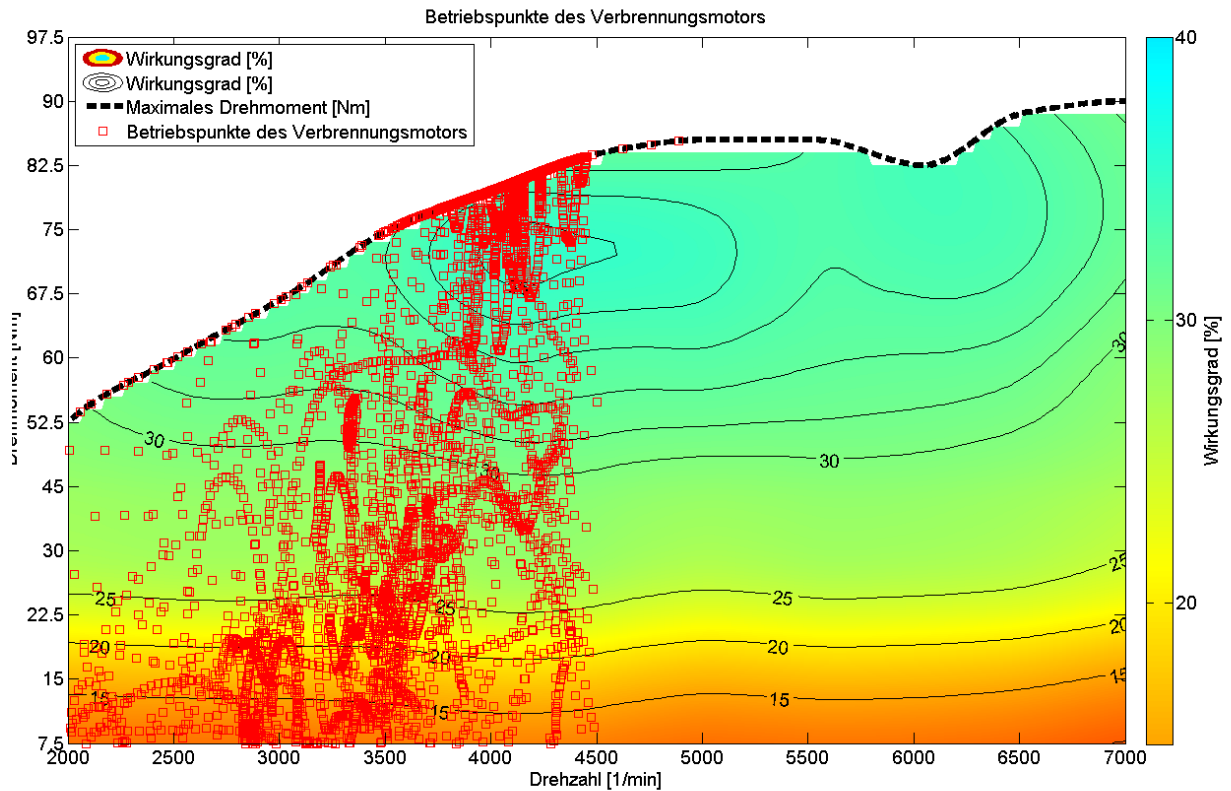


Abbildung 5-7: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC Referenzmotor

### 5.3.2 Simulation mit einfacher Betriebsstrategie

Da bereits die Auslegung der Komponenten mit einer einfachen Betriebsstrategie durchgeführt wurde, soll das Ergebnis der Simulation des WMTC mit diesem Modell hier zum Vergleich kurz erwähnt sein. Die einfache Betriebsstrategie beschränkt sich auf eine Drehmomentabhängige binäre Kupplungsbetätigung, Drehzahlabhängige Schaltpunkte sowie eine einfache Lastpunktverschiebung in der Momentenlogik. Im dabei verwendeten Simulationsmodell werden noch einfache Komponenten verwendet, die keine exakte Abbildung der realen Komponenten darstellen.

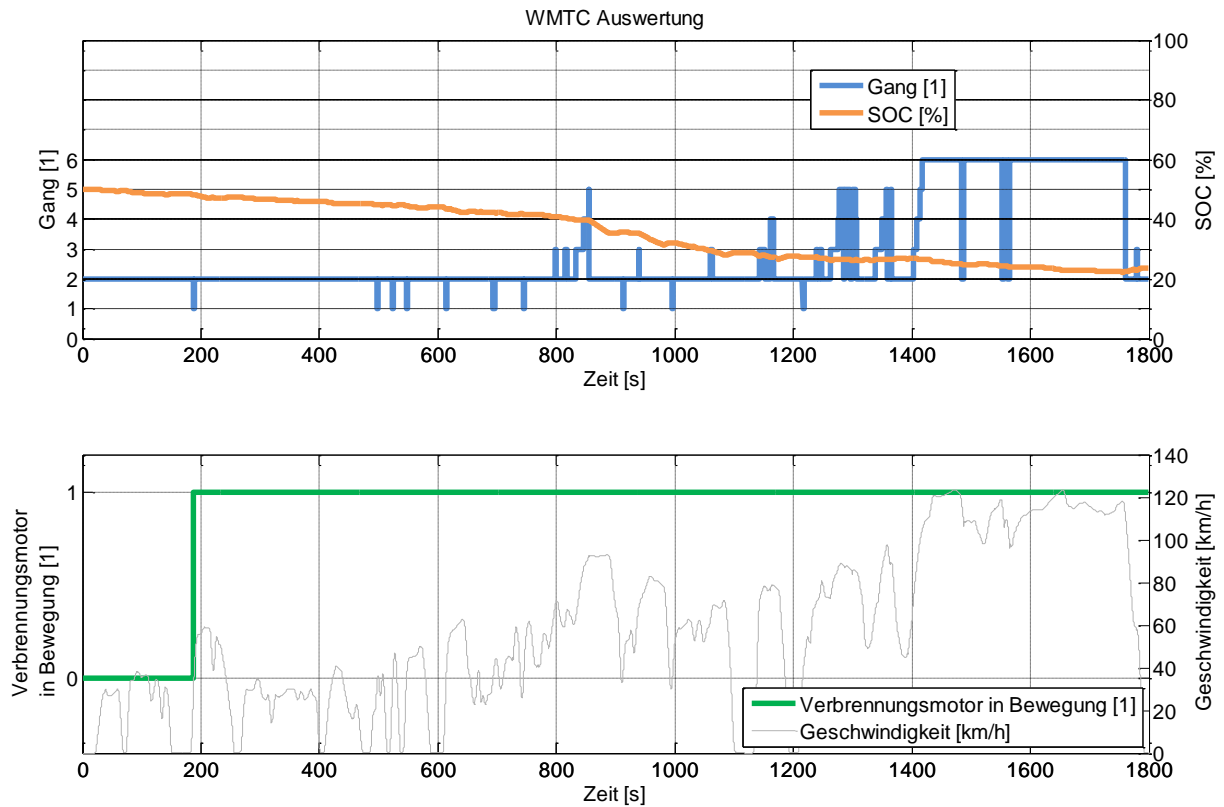


Abbildung 5-8: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC mit Original-Simulation

Schaltvorgänge	Motorstarts und -stops
67	1

Tabelle 5-2: Anzahl Startvorgänge und Motorstarts und -stops: WMTC mit Original-Simulation

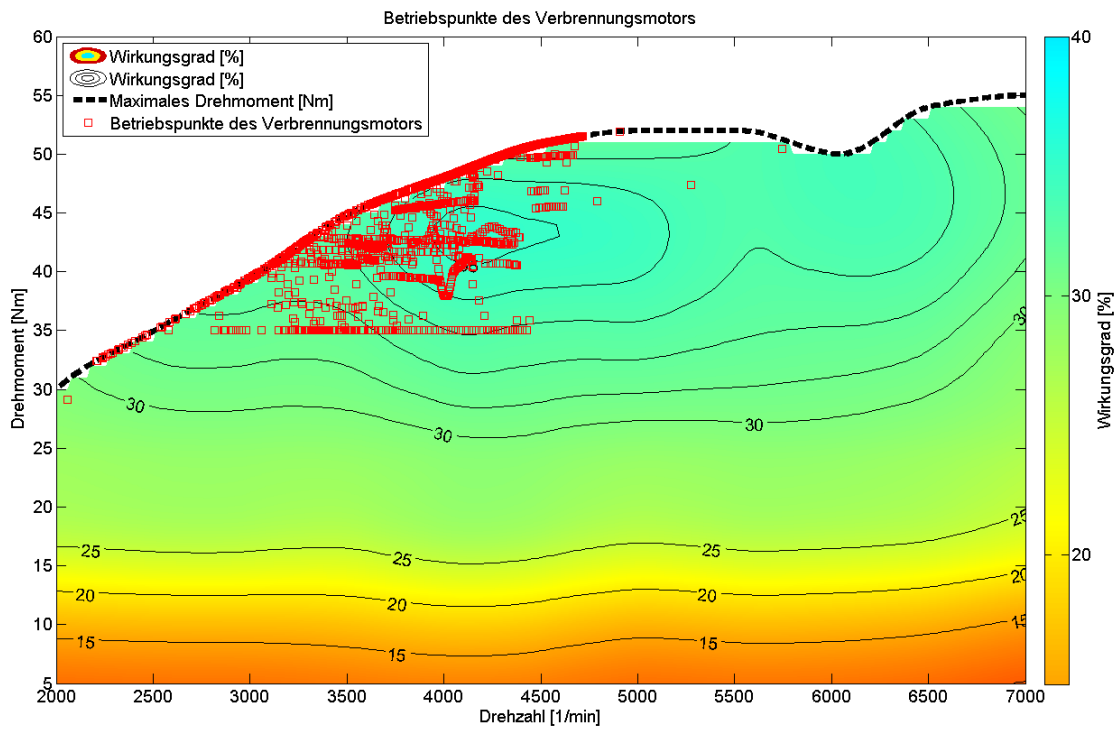


Abbildung 5-9: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC mit Original-Simulation

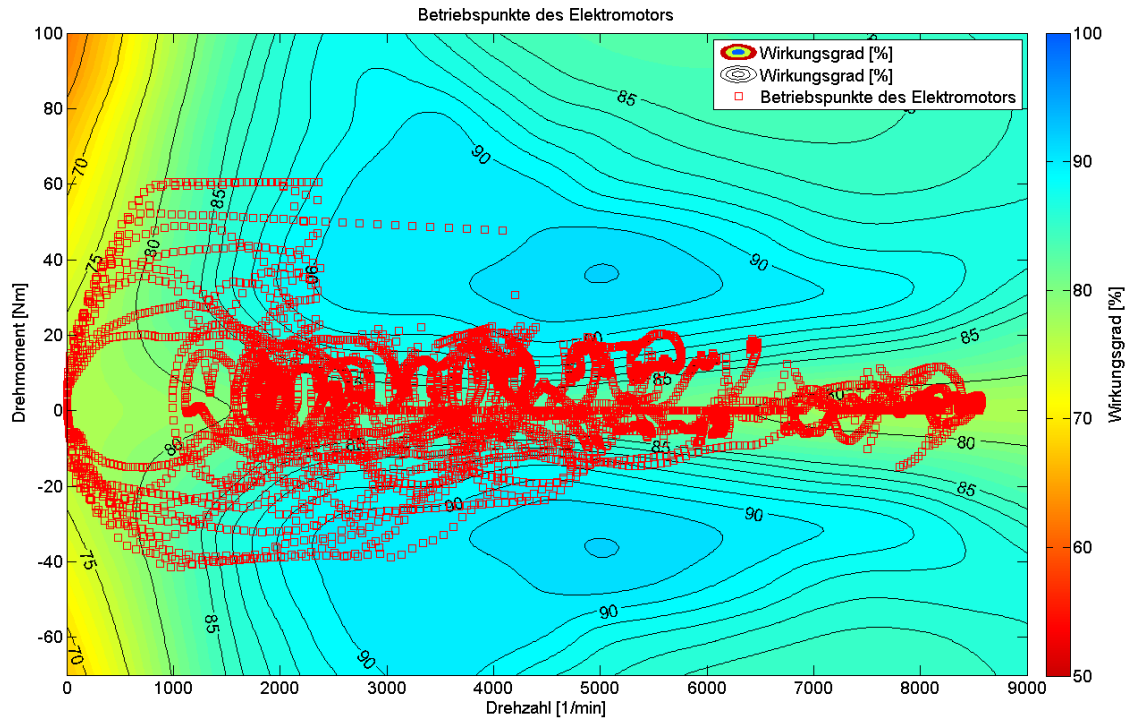


Abbildung 5-10: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC mit Original-Simulation

	Teil 1	Teil 2	Teil 3	Gewichtet <sup>11</sup>	Gesamt <sup>12</sup>
Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum Referenzmotor	-94%	-72%	-4%	-61%	-38%
SOC-Verlauf [%]	Beginn	nach Teil 1	nach Teil 2	nach Teil 3	Gesamt
	50	44	28	24	-26

Tabelle 5-3: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: WMTC mit Original-Simulation

In Tabelle 5-2 sowie in Abbildung 5-8 ist deutlich zu erkennen, dass die fehlende Schaltstrategie große Probleme bereitet. Die Hysterese der Drehzahlabhängigen Schaltpunkte ist offensichtlich zu klein gewählt. Da diese Simulation aber keine Schaltverzögerung kennt, hat dies keine Auswirkungen auf das Geschwindigkeitsprofil. Durch die häufigen Schaltvorgänge ist der Verbrennungsmotor, wie in Abbildung 5-9 zu sehen ist, relativ nahe am Bestpunkt, obwohl durch die niedrige Schaltschwellen die Drehzahl sehr gering gehalten und der Motor deshalb häufig unter Vollast betrieben wird. Zusätzlich fällt auf, dass der Motor nach dem ersten Start nicht wieder abgestellt wird und auch im Stillstand weiterläuft. Der ermittelte Kraftstoffverbrauch ist zwar sehr niedrig, durch die in der Realität unmöglichen Schaltfolgen aber praktisch so nicht erreichbar. Abbildung 5-10 zeigt die Betriebspunkte des Elektromotors. Dieser ist beinahe immer aktiv und arbeitet fast durchwegs bei relativ niedrigem

<sup>11</sup> Die Gewichtung erfolgt nach Gleichung (2-7).

<sup>12</sup> Der Gesamtverbrauch wird aus dem gesamten Kraftstoffverbrauch und der gesamten zurückgelegten Strecke berechnet.

Wirkungsgrad. Der SOC sink während des ersten Teils des Zyklus ab, da lange rein elektrisch gefahren wird. Danach wird er etwa konstant im Bereich der Minimalschwelle von 25% gehalten.

### 5.3.3 Simulation unter Verwendung der Gangwahl mit Kennlinien

Die Gangwahl mit Kennlinien wurde ebenfalls mit dem einfachen Simulationsmodell getestet. Im Gegensatz zur Original-Version ist in Abbildung 5-11 und Tabelle 5-4 sogar eine Verschlechterung der Schalthäufigkeit festzustellen. Daraus geht noch einmal klar hervor, dass einfache Kennlinien ohne weitere Kriterien zwar eine triviale Lösung darstellen, alleine aber nicht für eine ruhige Schaltstrategie ausreichen.

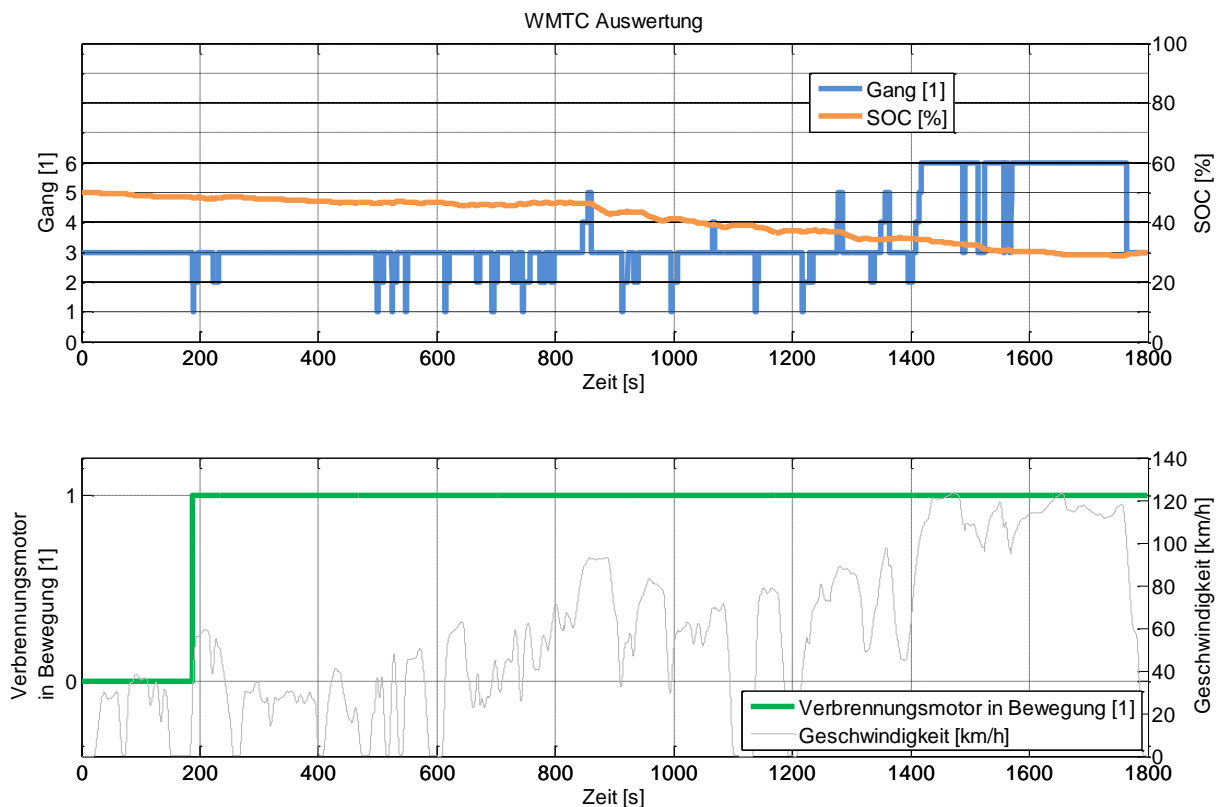


Abbildung 5-11: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC bei Gangwahl mit Kennlinien

Schaltvorgänge	Motorstarts und -stopps
87	1

Tabelle 5-4: Anzahl Startvorgänge und Motorstarts und -stopps: WMTC bei Gangwahl mit Kennlinien

Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum Referenzmotor				
Teil 1	Teil 2	Teil 3	Gewichtet	Gesamt
-84%	-57%	-8%	-53%	-35%
SOC-Verlauf [%]				
Beginn	nach Teil 1	nach Teil 2	nach Teil 3	Gesamt
50	47	37	30	-20

Tabelle 5-5: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: WMTC bei Gangwahl mit Kennlinien



Hier geht die weitere Erhöhung der Schalthäufigkeit nicht mit einer Verringerung des Kraftstoffverbrauchs einher. Vielmehr bleibt dieser im Verhältnis zu den rein drehzahlabhängigen Schaltpunkten, ebenso wie der SOC-Verlauf, annähernd gleich. Auch die Betriebspunkte des Verbrennungs- sowie Elektromotors sind, wie in Anhang B.1 abgebildet, ähnlich verteilt wie bei der Originalversion.

#### 5.3.4 Simulation der vollständigen Betriebsstrategie

Die vollständige Betriebsstrategie wurde im virtuellen Steuergerät getestet. Die Simulation dafür umfasst alle in der Arbeit beschriebenen, verfeinerten Modelle, sodass schlussendlich nichtmehr die Betriebsstrategie einzeln simuliert wird, sondern die gesamte Funktionalität des Steuergeräts. Einzig die Ein- und Ausgänge wurden durch Verbindungen zur Fahrzeugsimulation ersetzt. Hier werden erstmals Schaltabläufe und Motorstarts und -stopps mit hoher Genauigkeit nachgebildet und dadurch die Simulation mit einer Prüfstandsmessung vergleichbar gemacht.

Aufgrund des Umfangs der Vergleiche wird für die Abbildungen der Gang/Start-Stopp/SOC-Verläufe und der Betriebspunkte generell auf Anhang B verwiesen.

Die Ergebnisse zur vollständigen Betriebsstrategie werden nach den Betriebsmodi unterteilt, wobei für jeden Hybridmodus immer drei WMTC Simulationen mit unterschiedlichen SOC-Startwerten (10%, 50% und 100%) und eine Simulation des Zyklus mit Steigungen (Abbildung 2-7) verglichen werden.

#### *Electric*

Die Simulation im elektrischen Betrieb dient einerseits zur Kontrolle, ob das Batteriemodell am Prüfstand korrekt funktioniert, andererseits wird für die Berechnung des Normverbrauchs nach Gleichung (2-6) die rein elektrisch erzielbare Reichweite benötigt.

SOC-Verlauf [%]				
Beginn	nach Teil 1	nach Teil 2	nach Teil 3	Gesamt
100	91	62	7	-93

Tabelle 5-6: SOC-Verlauf: WMTC im Modus „Electric“

In Tabelle 5-6 ist zu sehen, dass der SOC nach dem WMTC von 100 auf sieben Prozent abgesunken ist, erst in Abbildung B-3 wird aber deutlich, dass im ersten Drittel von Teil drei der SOC bereits so weit abgesunken ist, dass die Soll-Geschwindigkeit nicht mehr erreicht wird. Die Betriebsstrategie versucht hier durch Reduktion der Leistung die Reichweite auf Kosten der Höchstgeschwindigkeit zu erhöhen. Für die elektrische Reichweite wird der letzte Punkt verwendet, an dem Soll- und Ist-Geschwindigkeit noch annähernd gleich waren. Dies ist etwa bei  $t = 1430$  s der Fall. Bis dahin wurde eine Strecke von 17,7 km zurückgelegt.

### Economy

Die ökonomische Variante der Betriebsstrategie kommt mit deutlich weniger Schaltvorgängen durch den WMTC wie die einfachen Varianten. Zusätzlich funktioniert in dieser Simulation nun der Motorstopp. In Tabelle 5-7 sind Anzahl der Schaltvorgänge, Motorstarts und -stopps sowie die Laufzeit des Verbrennungsmotors im Verhältnis zur gesamten Zyklusdauer für verschiedene Startwerte des SOC aufgeschlüsselt. Deutlich zu erkennen ist, dass der Verbrennungsmotor umso weniger benötigt wird, umso höher die Batterie zu Beginn geladen ist. Dies wirkt sich auch auf den Kraftstoffverbrauch in Tabelle 5-8 aus. Im Vergleich zur einfachen Simulationsvariante fällt hier zunächst der deutlich höhere Verbrauch von  $-9\%$  im Gegensatz zu  $-35\%$  bei einem Start-SOC von  $50\%$  auf. Ein Blick auf den SOC-Verlauf verrät aber, dass ein Großteil des Mehrverbrauchs zum Aufrechterhalten der Batterieladung verwendet wurde. Die übrige Differenz ist auf die Berücksichtigung der dynamischen Zustände im hier verwendeten Modell und die in der Betriebsstrategie geforderten höheren Drehzahlen zurückzuführen.

Start-SOC [%]	Schaltvorgänge	Motorstarts und -stopps	VM (Verbrennungsmotor) an [%]
10	26	27	80
50	19	20	48
100	25	10	34

Tabelle 5-7: Anzahl Schalt- und Startvorgänge und Laufzeit Verbrennungsmotor: WMTC im Modus „Economy“

Start-SOC [%]	Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum Referenzmotor				
	Teil 1	Teil 2	Teil 3	Gewichtet	Gesamt
10	$-16\%$	$+63\%$	$+12\%$	$+27\%$	$+22\%$
50	$-100\%$	$+10\%$	$+8\%$	$-23\%$	$-9\%$
100	$-100\%$	$-74\%$	$-9\%$	$-65\%$	$-43\%$
	SOC-Verlauf [%]				
	Beginn	nach Teil 1	nach Teil 2	nach Teil 3	Gesamt
	10	18	47	42	$+32$
	50	42	53	45	$-5$
	100	91	72	52	$-48$

Tabelle 5-8: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: WMTC im Modus „Economy“

Mit den Werten aus Tabelle 5-8 kann das Kraftstoff-Energie-Äquivalent aus Kapitel 2.3.1 bestimmt werden. Dafür werden die Differenzen von absolutem Kraftstoffverbrauch und SOC zwischen zwei Zyklen bestimmt und diese dividiert. Mit der Batteriekapazität, der Dichte und des Heizwerts von Benzin ergibt sich in Gleichung (5-5) der theoretische Wirkungsgrad von Tank zu Batterie.

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta V_{\text{Kraftstoff}}}{\Delta \text{SOC}} * \frac{100\% \text{ SOC}}{C_{\text{Batterie}}} &= \left[ \frac{I_{\text{Benzin}}}{\text{kWh}_{\text{Batterie}}} \right] \\
 \left[ \frac{I_{\text{Benzin}}}{\text{kWh}_{\text{Batterie}}} \right] * 750 \frac{g_{\text{Benzin}}}{I_{\text{Benzin}}} &= \left[ \frac{g_{\text{Benzin}}}{\text{kWh}_{\text{Batterie}}} \right] \quad (5-5) \\
 \left[ \frac{g_{\text{Benzin}}}{\text{kWh}_{\text{Batterie}}} \right] * 0,0114 \frac{\text{kWh}_{\text{Benzin}}}{g_{\text{Benzin}}} &= \left[ \frac{\text{kWh}_{\text{Benzin}}}{\text{kWh}_{\text{Batterie}}} \right] = \frac{1}{\eta_{\text{Tank} \rightarrow \text{Batterie}}} \\
 \eta_{\text{Tank} \rightarrow \text{Batterie}} &= [1]
 \end{aligned}$$

Werden die entsprechenden Werte eingesetzt, ergibt sich für den „Economy“ Modus ein Tank-zu-Batterie Wirkungsgrad von 33,8%.

Eine andere Möglichkeit, einen Verbrauch ohne Batterieeinfluss zu bestimmen, ist, einen SOC zu finden, bei dem sich nach dem vollständigen Durchfahren des Testzyklus wieder der gleiche SOC wie zu Beginn einstellt. Für den „Economy“ Modus wurde am Ende einer Zyklussimulation der End-SOC als neuer SOC-Startwert definiert und ein neuer Zyklus gestartet. Dieser Vorgang wurde automatisiert so lange wiederholt, bis sich eine Differenz zwischen Start- und End-SOC von weniger als 0,5% einstellte. Die Verbrauchswerte der Simulation mit dem so ermittelten SOC von 52% sind in Tabelle 5-9 zu sehen. Im ersten Teil des Zyklus wird rein elektrisch gefahren, der SOC sinkt dadurch um acht Prozentpunkte. Dieser Energieverbrauch wird in Teil zwei des Zyklus dann wieder ausgeglichen. Danach bleibt der SOC annähernd konstant. Der genaue Verlauf kann in Abbildung 5-12 betrachtet werden.

Start-SOC [%]	Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum Referenzmotor				
	Teil 1	Teil 2	Teil 3	Gewichtet	Gesamt
52	-100%	+3%	+18%	-23%	-6%
	SOC-Verlauf [%]				
	Beginn	nach Teil 1	nach Teil 2	nach Teil 3	Gesamt
	52	44	53	52	±0

Tabelle 5-9: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: WMTC im Modus „Economy“ mit Start-SOC = End-SOC

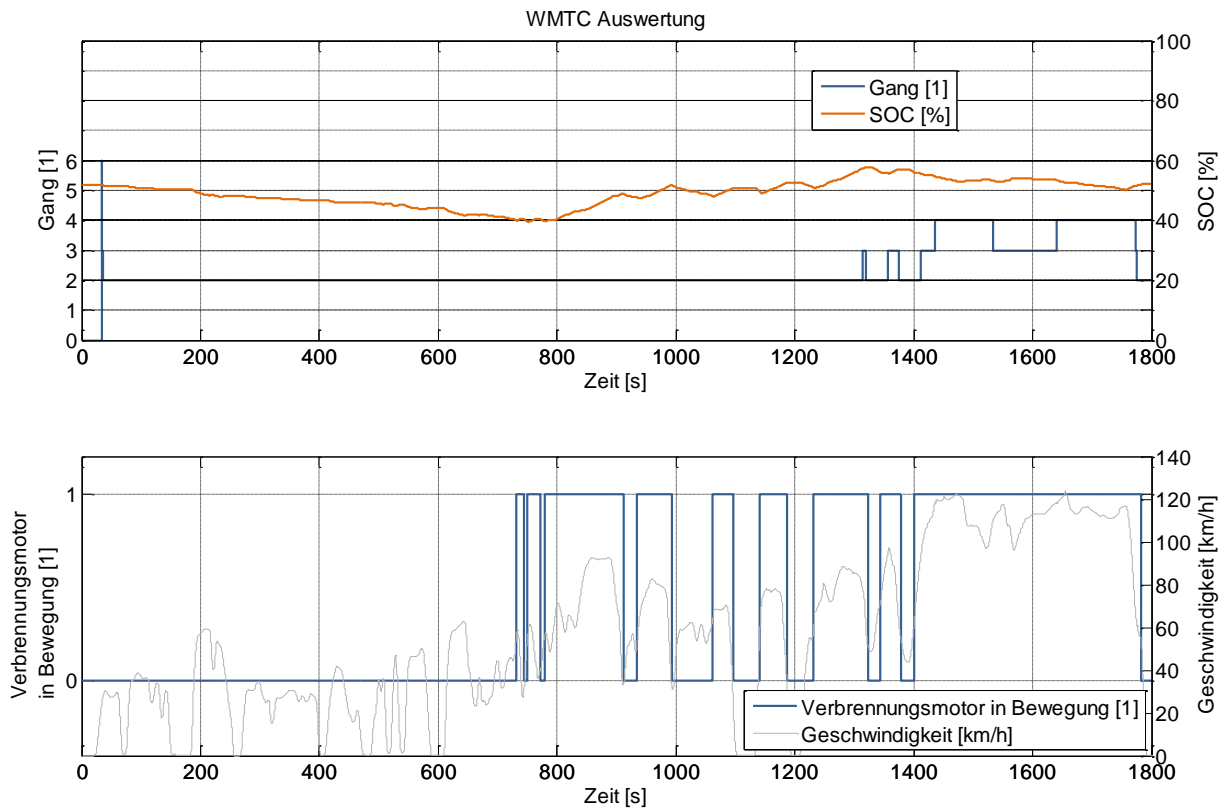


Abbildung 5-12: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Economy“ mit Start-SOC = End-SOC

### Recharge

Im „Recharge“ Modus wird versucht die Batterie zu laden, sobald der SOC unter 85% sinkt. Steigt der SOC dann über 95% wird der erzwungene Ladevorgang wieder beendet. Der Unterschied zum „Economy“ Modus ist bei einem Anfangs-SOC von 50% besonders hoch. In diesem Fall wird im „Economy“ Betrieb nicht versucht die Batterie zu laden, im „Recharge“ Modus hingegen schon. Wird bei einem SOC von 100% gestartet, so fällt der SOC nur kurz unter 85%, woraus, wie in Tabelle 5-10 gezeigt, nur eine kurze Verlängerung des Betriebs des Verbrennungsmotors resultiert. Der dafür zusätzlich notwendige Kraftstoffverbrauch ist in Tabelle 5-11 zu sehen.

Start-SOC [%]	Schaltvorgänge	Motorstarts und -stopps	VM an [%]
10	29	22	85
50	39	25	81
100	24	10	40

Tabelle 5-10: Anzahl Schalt- und Startvorgänge und Laufzeit Verbrennungsmotor: WMTC im Modus „Recharge“

Start-SOC [%]	Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum Referenzmotor				
	Teil 1	Teil 2	Teil 3	Gewichtet	Gesamt
10	+3%	+65%	+33%	+39%	+37%
50	+3%	+65%	+9%	+33%	+24%
100	-100%	-29%	+13%	-39%	-18%
	SOC-Verlauf [%]				
	Beginn	nach Teil 1	nach Teil 2	nach Teil 3	Gesamt
	10	20	51	60	+50
	50	60	90	82	+32
	100	91	88	83	-16

Tabelle 5-11: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: WMTC im Modus „Recharge“

Der Tank-zu-Batterie Wirkungsgrad liegt in diesem Modus bei 32,8%.

### Sport

Im „Sport“ Modus wird der Verbrennungsmotor beim ersten Anfahren gestartet und bleibt dann aktiv, selbst wenn er ausgekuppelt wird. Dies kann man in Tabelle 5-12 klar erkennen. Der Gesamtverbrauch (Tabelle 5-13) steigt im Vergleich zum „Recharge“ Modus nochmals an. Der Verbrennungsmotor wird in diesem Modus schließlich bei gleicher Leistung in höheren Drehzahlbereichen bewegt, um eine höhere Momentenreserve zu garantieren.

Start-SOC [%]	Schaltvorgänge	Motorstarts und - stopps	VM an [%]
10	23	1	98
50	23	1	98
100	27	1	98

Tabelle 5-12: Anzahl Schalt- und Startvorgänge und Laufzeit Verbrennungsmotor: WMTC im Modus „Sport“

Start-SOC [%]	Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum Referenzmotor				
	Teil 1	Teil 2	Teil 3	Gewichtet	Gesamt
10	-9%	+84%	+30%	+43%	+39%
50	+15%	+62%	+16%	+37%	+29%
100	-32%	+7%	+13%	-3%	+4%
	SOC-Verlauf [%]				
	Beginn	nach Teil 1	nach Teil 2	nach Teil 3	Gesamt
	10	19	56	62	+52
	50	62	88	82	+32
	100	98	96	88	-12

Tabelle 5-13: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: WMTC im Modus „Sport“

Der Tank-zu-Batterie Wirkungsgrad liegt im „Sport“ Modus bei 50% und ist damit um 52% höher als im „Recharge“ Modus. Die Ursache dafür sind die grundsätzlich schlechten Betriebspunkte im „Sport“ Modus. Während im „Economy“ und „Recharge“ Modus der Verbrennungsmotor, wenn er überhaupt läuft, sofort bei sehr gutem Wirkungsgrad arbeitet, verbringt er im „Sport“ Modus die meiste Zeit unter niedriger Last und damit sehr schlechtem Wirkungsgrad. Kann die nicht genutzte Leistung zum Laden der Batterie verwendet werden, steigt der Wirkungsgrad wieder deutlich an (Zum Vergleich

siehe Abbildung B-30 und Abbildung B-36). Insgesamt resultiert daraus eine sehr hohe Effizienz zwischen Tank und Batterie, während aber nicht zu vernachlässigen ist, dass auch der Durchschnittsverbrauch deutlich angestiegen ist (+17% im Vergleich zu „Recharge“).

### 5.3.5 Betriebsstrategie am Prüfstand

#### WMTC

Am Prüfstand wurde ein WMTC im „Economy“ Modus gemessen. Schaltvorgänge, Motorstarts und -stopps sowie die Laufzeit des Verbrennungsmotors in Tabelle 5-14 entsprechen bis auf je einen Schalt-, Start- und Stoppvorgang den korrespondierenden Simulationswerten.

Start-SOC [%]	Schaltvorgänge	Motorstarts und -stopps	VM an [%]
100	26	12	36

Tabelle 5-14: Anzahl Schalt- und Startvorgänge und Laufzeit Verbrennungsmotor: Messung: WMTC im Modus „Economy“

Der gemessene Verbrauch in Tabelle 5-15 weicht deutlich von den Ergebnissen der Simulation ab. Ursache dafür ist das unzureichend genaue Verbrauchskennfeld im Simulationsmodell. Während zwar der Verbrauch von der Simulation abweicht, ist der Tank-zu-Batterie-Wirkungsgrad mit 34,2% annähernd gleich.

Start-SOC [%]	Verbrauchsmessung im Vergleich zum Referenzmotor				
	Teil 1	Teil 2	Teil 3	Gewichtet	Gesamt
10	+50%	+58%	+36%	+50%	+45%
50	-100%	+43%	+39%	+16%	+17%
100	-100%	-54%	+24%	-48%	-19%
	Vergleich mit Simulation				
100	-100%	-42%	-27%	-33%	-29%
	SOC-Verlauf [%]				
	Beginn	nach Teil 1	nach Teil 2	nach Teil 3	Gesamt
	10	26	47	41	+31
	50	38	50	45	-5
	100	87	64	51	-49

Tabelle 5-15: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: Messung: WMTC im Modus „Economy“

#### Eigener Zyklus

Eine Tendenz der Abweichung des simulierten Verbrauchs lässt sich anhand des speziell entworfenen Testzyklus ablesen. Dieser Zyklus erfordert aufgrund der hohen Geschwindigkeiten in Kombination mit Steigungen eine sehr hohe Leistung. Tabelle 5-16 zeigt dazu die hohen Laufzeiten des Verbrennungsmotors. In Tabelle 5-17 ist die niedrigere Abweichung zwischen Messung und Simulation im „Economy“ Modus festzustellen. In diesem Modus arbeitet der Verbrennungsmotor fast durchgehend am maximal erlaubten Drehmoment, während im „Sport“ Modus im niedrigeren Gang eine Momentenreserve bleibt (Siehe Abbildung B-45 und Abbildung B-48).

Modus	Schaltvorgänge	Motorstarts und -stopps	VM an [%]
Economy	10	4	58
Sport	14	1	100

Tabelle 5-16: Anzahl Schalt- und Startvorgänge und Laufzeit Verbrennungsmotor: Messung: Eigener Zyklus (Start-SOC = 85%)

Modus	Verbrauchsmessung im Vergleich zur Simulation	SOC-Verlauf [%]		
		Beginn	Ende	Gesamt
Economy	+13%	85	69	-16
Sport	+34%	85	85	0

Tabelle 5-17: Verbrauchsvergleich und SOC-Verlauf: Messung: Eigener Zyklus (Start-SOC = 85%)

### 5.3.6 Vergleich

Um die Ergebnisse zusammenzufassen, ist in Tabelle 5-18 noch einmal ein Vergleich der verschiedenen Modi der Betriebsstrategie im Hybridbetrieb mit dem Referenzmotor zu sehen. Der Verbrauch des hochgerechneten Dreizylindermotors ist im Vergleich zum Hybridbetrieb relativ gut. Im gewichteten Normverbrauch, also unter Berücksichtigung der rein elektrischen Reichweite, ist nur der Verbrauch im „Economy“ Modus niedriger als der Referenzverbrauch. Wenn die Batterie allerdings bei Fahrtantritt vollständig geladen ist, sinkt der gewichtete Verbrauch im „Economy“ Modus im Vergleich mit dem Referenzmotor um 65%. Dies ist schließlich auch das das Hauptanwendungsgebiet des Plug-In Hybrid. In diesem Fall ist sogar der Verbrauch im „Sport“ Modus trotz Optimierung auf sportliche Anforderungen geringer. Wird die Batterie in Summe weder ge- noch entladen, ist also der SOC vor und nach Durchfahren des Testzyklus gleich, ergibt sich ein Verbrauchsvorteil von 23% im Vergleich zum Referenzmotor.

Modus	Verbrauchsberechnung (gewichtete)	Vergleich mit Referenzmotor
„Economy“	Normverbrauch	-11%
„Recharge“	Normverbrauch	+7%
„Sport“	Normverbrauch	+24%
„Economy“	Start mit 100% SOC	-65%
„Recharge“	Start mit 100% SOC	-39%
„Sport“	Start mit 100% SOC	-3%
„Economy“	Start mit 10% SOC	+27%
„Recharge“	Start mit 10% SOC	+39%
„Sport“	Start mit 10% SOC	+43%
„Economy“	Start-SOC = End-SOC	-23%

Tabelle 5-18: Vergleich mit dem Referenzmotor

Für all diese Vergleiche ist jedoch anzumerken, dass die Verbrauchsdaten des Referenzmotors mit Schaltpunkten ermittelt wurden, die sehr unrealistisch früh schalten und eine geringe Fahrerakzeptanz in Kauf nehmen, um den Verbrauch zu senken. Im Gegensatz dazu wurde die getestete Betriebsstrategie zwar zunächst auch auf sehr guten Verbrauch abgestimmt, nach Testfahrten wurde allerdings die Kalibrierung zugunsten der Fahrbarkeit angepasst und dafür ein höherer Verbrauch akzeptiert.



## 6 Zusammenfassung

Mit den immer höher werdenden Anforderungen an Verbrauch und Emissionen werden auch Hersteller von motorisierten Freizeitfahrzeugen dazu motiviert, neue innovative Antriebskonzepte zu entwickeln. Der hybride Antriebsstrang bietet eine im Automobilbereich bereits bewährte Möglichkeit, den Verbrauch zu senken. Die höhere Komplexität dieser Systeme erfordert gleichzeitig einen größeren Aufwand bei der Entwicklung eines Steuerungskonzepts. Durch die modellbasierte Entwicklung wird eine Möglichkeit geschaffen, die Entwicklungsdauer des Gesamtsystems zu verkürzen. Durch die vollständige Abbildung des geplanten Systems können einerseits die einzelnen Komponenten ausgelegt werden, andererseits kann nach Auswahl der Topologie sofort damit begonnen werden, ein passendes Steuerungskonzept zu entwickeln. Mit genaueren Modellen kann auch die Funktionsentwicklung und sogar eine gewisse Vorkalibrierung mithilfe der Simulation durchgeführt werden.

Die in dieser Arbeit gezeigte Betriebsstrategie versucht laufend, den Verbrennungsmotor in einem möglichst optimalen Betriebspunkt zu betreiben, während eine innovative Schaltstrategie dafür sorgt, dass trotz geringer Schalzhäufigkeit immer ein passender Gang gewählt ist. Die Schaltstrategie ist zudem sehr variabel. Bei gemächlicher Fahrt wird immer ein verbrauchsarmer Gang gewählt. Sobald jedoch der Gasgriff sportlich gedreht wird, springt das Schaltprogramm sofort in einen sportlichen Modus, der für kurze Zeit den Kraftstoffverbrauch hinter den Fahrspaß stellt. Besonders für Freizeitfahrzeuge darf diese Komponente bei der Entwicklung nie übersehen werden.

Die in dieser Arbeit behandelte Betriebsstrategie wurde parallel zu den später eingesetzten Komponenten entwickelt. Die Simulationsmodelle wurden laufend mit aktuellen Messdaten verifiziert und immer wieder verfeinert. In der letzten Ausbaustufe konnten schließlich alle Antriebsstrangrelevanten Funktionen des Hybridsteuergeräts, einschließlich der Betriebsstrategie, simuliert werden. Durch die hohe Simulationsgeschwindigkeit konnten verschiedene Parameter der Schaltstrategie relativ schnell auf einen optimalen Kompromiss aus Verbrauch und Fahrkomfort angepasst werden. Insgesamt wurde durch die Nutzung der Simulation bei der Entwicklung wertvolle Zeit gespart und gleichzeitig das Risiko, den Prototypen bei Tests zu zerstören, minimiert. Durch die Verwendung eines Matlab/Simulink® kompatiblen Steuergeräts konnten die entwickelten Funktionen direkt aus der Simulation ins Steuergerät übertragen werden. Eine getrennte Umsetzung in Code und die damit verbundenen Fehlerquellen wurden damit ausgeschlossen.

Durch den Vergleich der Simulation mit der Messung am Prüfstand konnte gezeigt werden, wie realistisch die Simulation arbeitet. Die am Prüfstand getesteten Fahrzyklen resultierten in beiden Welten im gleichen Verhalten der Betriebsstrategie. Die Funktionsentwicklung in der schnelleren

Simulationsumgebung führte also tatsächlich zum gewünschten Ziel. Die Entwicklungsdauer konnte durch den Einsatz von modellbasierter Entwicklung insgesamt deutlich verkürzt werden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass mit der hier gezeigten Betriebsstrategie unter den typischen Einsatzbedingungen trotz höherer Fahrerakzeptanz ein deutlich niedrigerer Kraftstoffverbrauch als mit dem nicht-hybriden Referenzmotor mit gleicher Leistung erzielt werden konnte.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] ARNOLD, G.: *Opel Ampera - Elektrisch Fahren ohne Kompromisse*. In: <http://www.fuehrungskraefte-forum.de/wp-content/uploads/2011/07/Arnold.pdf>, abgerufen am: 26.08.2012.
- [2] AVL: *AVL Fuel Balance and Fuel Temperature Control*. In: <https://www.avl.com/fuel-balance-and-fuel-temperature-control>, abgerufen am: 26.08.2012.
- [3] BETTER PLACE: *Battery Switch Stations*. <http://www.betterplace.com/the-solution-switch-stations>, abgerufen am: 26.08.2012.
- [4] BIERMANN, J.W. UND BADY, R.: *Hybridantriebe - Strukturvarianten, Betriebsstrategien sowie deren Vor- und Nachteile*. In: 5. Symposium Elektrische Straßenfahrzeuge, Technische Akademie Esslingen, 1998.
- [5] BIERMANN, J.W. UND BADY, R.: *Hybrid-Elektrofahrzeuge - Strukturen und zukünftige Entwicklungen*. In: 6. Symposium Elektrische Straßenfahrzeuge, Technische Akademie Esslingen, 2000.
- [6] BRP CAN-AM: *Shaping the future of open-air riding. Again*. Fact-Sheet, 2011.
- [7] BRP-POWERTRAIN: *Rotax 990 V2 SM5*. In: [http://www.brp-powertrain.com/desktopdefault.aspx/tabid-240/380\\_read-367/](http://www.brp-powertrain.com/desktopdefault.aspx/tabid-240/380_read-367/), abgerufen am: 26.08.2012.
- [8] D2T: *Morphee Automatisierungssystem*. <http://www.d2t.com>.
- [9] DELPHI: *Worldwide Emissions Standards - Passenger Cars and Light Duty Vehicles*. In: <http://delphi.com/pdf/emissions/Delphi-Passenger-Car-Light-Duty-Truck-Emissions-Brochure-2012-2013.pdf>, abgerufen am: 26.08.2012.
- [10] DORDA, A. UND EGGER, B.: *Hybridfahrzeuge - Literaturrecherche und Entwicklungstrends*. Österreichische Plattform zur Förderung von alternativen Antriebssystemen, Wien, 2010.
- [11] ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE: *Regulation No. 101: UNIFORM PROVISIONS CONCERNING THE APPROVAL OF PASSENGER CARS POWERED BY AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE ONLY, OR POWERED BY A HYBRID ELECTRIC POWER TRAIN WITH REGARD TO THE MEASUREMENT OF THE EMISSION OF CARBON DIOXIDE AND FUEL CONSUMPTION AND/OR THE MEASUREMENT OF ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION AND ELECTRIC RANGE, AND OF CATEGORIES M1 AND N1 VEHICLES POWERED BY AN ELECTRIC POWER TRAIN ONLY WITH REGARD TO THE MEASUREMENT OF ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION AND ELECTRIC RANGE*. Revision 2, United Nations, 2005.

- [12] ETAS: *INCA*. <http://www.etas.com>.
- [13] FREHNER, M.: *Alles über Akkus*. In: <http://www.funkcom.ch/akkuinfos.htm>, abgerufen am: 26.08.2012.
- [14] FREI, B.: *Regelung eines elektromechanischen Getriebes für Hybridfahrzeuge*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2005.
- [15] GENPORT: *History of battery invention and development*. In: <http://blog.genport.it/?p=133>, abgerufen am: 26.08.2012.
- [16] GUMPESBERGER, M., GRUBER, S., SIMMER, M., SULEK, C., STIEBINGER, C. UND BURGSTALLER, J.: *The New Rotax ACE 600 Engine for Ski-Doo*. SAE Technical Paper 2010-32-0001, 2010.
- [17] GUTTENBERG, P.: *Der Autarke Hybrid am Prüfstand - Funktion, Kraftstoffverbrauch und energetische Analyse*. Dissertation, Technische Universität München, 2004.
- [18] HACKMANN, W.: *Achsantriebe für Elektrofahrzeuge*. Vogel Business Media, Würzburg, 2011.
- [19] HANAWA, K. UND TSUTSUMIZAKI, T.: *Hybrid Motorcycle*. United States Patent Application Publication US 2011/0073401, 2011.
- [20] HART, A.: *Toyota Prius - Power Split Device (PSD)*. In: <http://eahart.com/prius/psd/>, abgerufen am: 26.08.2012.
- [21] HEIZINGER, G.: *Simulation of Hybrid Electric Recreational Vehicles*. Diplomarbeit, Johannes Kepler Universität Linz, 2009.
- [22] HOLBORN EUROPA RAFFINERIE GMBH: *Spezifikation Premium Benzin (schwefelfrei)*. In: [http://www.antonwiller.de/intern/portal01/htdocs/ftp\\_documents/32\\_spezifikation\\_super.doc](http://www.antonwiller.de/intern/portal01/htdocs/ftp_documents/32_spezifikation_super.doc), abgerufen am: 26.08.2012.
- [23] HÖTZER, D.: *Entwicklung einer Schaltstrategie für einen Pkw mit automatisiertem Schaltgetriebe*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1999.
- [24] KARBOWSKI, D., KWON, J., KIM, N. UND ROUSSEAU, A.: *Instantaneously Optimized Controller for a Multimode Hybrid Electric Vehicle*. SAE Technical Paper 2010-01-0816, 2010.
- [25] KELZ, G.: *Modulare Modellbildung und Simulation von hybriden Antriebssträngen*. Dissertation, Technische Universität Graz, 2010.
- [26] KLEIMAIER, A.: *Optimale Betriebsführung von Hybridfahrzeugen*. Dissertation, Technische Universität München, 2003.
- [27] LEITNER, V.: *Steuer und Regelungskonzepte für Schaltvorgänge und Betriebsmodiwechsel von Hybridfahrzeugen*. Diplomarbeit, FH Oberösterreich, Wels, 2011.

- 
- [28] PFISTER, F. UND SCHICK, B.: *Die Zukunft hat einen Sensor: Location awareness meets powertrain controls*. IPG Automotive GmbH, Karlsruhe, 2011.
- [29] PORSCHE AG: *ACC InnoDrive*. In: <http://www.porsche.com/germany/aboutporsche/responsibility/environment/technology/accinnodrive/>, abgerufen am: 26.08.2012.
- [30] REIF, K.: *Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010.
- [31] SCHMITZ, R.W., WILTON, F. UND ANDERSON, J.J.: *Hybrid electric vehicle having a selective zero emission mode, and method of selectively operating the zero emission mode*. United States Patent 6,483,198, 2002.
- [32] TESLA MOTORS: *Charge your Model S*. In: <http://www.teslamotors.com/models/charging>, abgerufen am: 26.08.2012.
- [33] THE MATHWORKS: *Matlab/Simulink*®. <http://www.mathworks.com>.
- [34] THE MATHWORKS: *Real-Time Workshop*®. <http://www.mathworks.com>.
- [35] THE MATHWORKS: *SimDriveline*™. <http://www.mathworks.com>.
- [36] TTCNTROL: *TTC 200 V5 User Manual*. Edition 1.17, TTCntrol, 2010.
- [37] WASER, H.M. UND HIRSCHBERG, W.: *Skriptum zur Vorlesung Kraftfahrzeugtechnik*. Institut für Fahrzeugtechnik, Technische Universität Graz, 2010.
- [38] WYNEN, V., BOUREIMA, F.-S., MATHEYS, J., VAN DEN BOSSCHE, P. UND VAN MIERLO, J.: *Developing applicable driving cycle for retrofitted Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): environmental impact assessment*. In: *World Electric Vehicle Journal* Vol. 3, 2009.
- [39] ZF FRIEDRICHSHAFEN AG: *8-Gang-Hybridgetriebe: Weniger Verbrauch, mehr Agilität*. In: [http://www.zf.com/corporate/de/products/product\\_range/cars/electrification\\_cars/hybrid\\_drive\\_pc\\_1/hybrid\\_kit\\_pc\\_2.html](http://www.zf.com/corporate/de/products/product_range/cars/electrification_cars/hybrid_drive_pc_1/hybrid_kit_pc_2.html), abgerufen am: 26.08.2012.
- [40] ZF FRIEDRICHSHAFEN AG: *DynaStart*® - *Basis der Hybridisierung im Pkw*. In: [http://www.zf.com/corporate/de/products/product\\_range/cars/cars\\_dynastart.shtml](http://www.zf.com/corporate/de/products/product_range/cars/cars_dynastart.shtml), abgerufen am: 26.08.2012.

## Anhang

### A Liste der verwendeten Symbole

#### A.1 Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
CVT	Continuously Variable Transmission, Stufenloses Getriebe
SOC	State of Charge, Ladezustand der Batterie
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe, Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen
PKW	Personenkraftwagen
NEDC	New European Driving Cycle, Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)
FTP-75	Federal Test Procedure 75, US-Fahrzyklus aus 1975
HWFET	Highway Fuel Economy Test, US-Autobahn-Fahrzyklus
WMTC	Worldwide harmonized Motorcycle emission Test Cycle, weltweit harmonisierter Prüfzyklus für Krafträder
BRP	Bombardier Recreational Products
MMEVT	Multi-Mode Electric Variable Transmission, elektrisch variables Planetengetriebe
ACC	Adaptive Cruise Control, adaptiver (Abstands-)Tempomat
CAN	Controller Area Network
EM	Elektromotor
VM	Verbrennungsmotor
PID	Proportional-Integral-Differential
PI	Proportional-Integral
BMS	Batterie Management System
MIL	Model-in-the-Loop
HIL	Hardware-in-the-Loop

#### A.2 Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
$V_{\text{Benzin},100\text{km}}$	Kraftstoffvolumen für 100km Fahrt	[l]
$m_{\text{Benzin},100\text{km}}$	Kraftstoffmasse für 100km Fahrt	[kg]
$\rho_{\text{Benzin}}$	Massendichte von Benzin	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{l}}\right]$
$H_{i, \text{Benzin}}$	(unterer) Heizwert von Benzin	$\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right]$
$E_{\text{Benzin},100\text{km}}$	Energiegehalt der für 100km Fahrt notwendigen Benzinmenge	[MJ]
$\eta_{\text{Antrieb, Benzin}}$	Wirkungsgrad von Kraftstoff zu Antrieb	[1]
$E_{\text{Antrieb, 100km}}$	Notwendige Antriebsenergie für 100km Fahrt	[MJ]
$\eta_{\text{Antrieb, Elektrisch}}$	Wirkungsgrad von Batterie zu Antrieb	[1]
$E_{\text{Batterie},100\text{km}}$	Energiegehalt der für 100km Fahrt notwendigen Batterie	[MJ]
$\rho_{\text{el,Batterie}}$	Energiedichte einer Batterie	$\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right]$
$m_{\text{Batterie},100\text{km}}$	Masse der für 100km Fahrt notwendigen batterie	[kg]
$C$	gewichteter Kraftstoffverbrauch	[l/100km]
$C_1$	Kraftstoffverbrauch mit vollständig geladener Batterie	[l/100km]
$C_2$	Kraftstoffverbrauch mit vollständig entleerter Batterie	[l/100km]

$D_e$	rein elektrische Reichweite	[l/100km]
$D_{av}$	angenommene Distanz zwischen zwei Batterieladungen	[km]
$C_{Gesamt}$	Normierter Kraftstoffverbrauch im WMTC	[l/100km]
$C_{Teil 1}$	Kraftstoffverbrauch in Teil 1 des WMTC	[l/100km]
$C_{Teil 2}$	Kraftstoffverbrauch in Teil 2 des WMTC	[l/100km]
$C_{Teil 3}$	Kraftstoffverbrauch in Teil 3 des WMTC	[l/100km]
$\omega_{Getriebeausgang}$	Drehzahl am Getriebeausgang	[min <sup>-1</sup> ]
$M_W$	Fahrerwunschloment	[Nm]
$t_0$	Zeitpunkt in der Vergangenheit	[s]
$t_1$	Aktueller Zeitpunkt	[s]
$t_2$	Zeitpunkt in der Zukunft	[s]
$P_{Last}$	Kupplungsdruck unter Last	[bar]
$M_{Last}$	Über die Kupplung übertragenes Drehmoment unter Last	[Nm]
$P_{Kisspoint}$	Kupplungsdruck am Kisspoint	[bar]
$M_{Wunsch}$	Über die Kupplung zu übertragenes Drehmoment	[Nm]
$P_{Soll}$	Kupplungsdruck um $M_{Wunsch}$ übertragen zu können	[bar]
$M_{Ist}$	Gemessenes Drehmoment	[Nm]
$M_{Soll, EM}$	Soll-Drehmoment am Elektromotor	[Nm]
$M_{Soll, VM}$	Soll-Drehmoment am Verbrennungsmotor	[Nm]
$a, b, c$	Anpassungskonstanten für Momentenkalibrierung	[1]
$b_{Verbrauch}$	Bewertung des Kraftstoffverbrauchs	[1]
$b_{Momentenreserve}$	Bewertung der Momentenreserve	[1]
$b_{Ladeleistung}$	Bewertung der Batterieladeleistung	[1]
$i$	Gangindex	[1]
$m$	Fahrzeugmasse	[kg]
$m^*$	Verallgemeinerte Masse	[kg]
$\lambda$	Drehmassenfaktor	[1]
$v$	Fahrzeuggeschwindigkeit	$\left[\frac{m}{s}\right]$
$\dot{v}$	Fahrzeugbeschleunigung	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
$M_A$	Antriebsmoment	[Nm]
$M_B$	Bremsmoment	[Nm]
$r$	Reifenradius	[m]
$F_R$	Rollwiderstand	[N]
$F_L$	Luftwiderstand	[N]
$F_S$	Steigungswiderstand	[N]
$g$	Gravitationskonstante	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
$a_r$	Rollwiderstandsbeiwert	[1]
$\rho_L$	Luftdichte	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$c_w$	Luftwiderstandsbeiwert	[1]
$A_F$	Anströmfläche	[m <sup>2</sup> ]
$\beta$	Steigungswinkel	[°]
$\Delta V_{Kraftstoff}$	Differenz im Kraftstoffverbrauch	[l/100km]
$\Delta SOC$	Differenz im Ladezustand der Batterie	[%]
$\eta_{Tank \rightarrow Batterie}$	Theoretischer Wirkungsgrad zwischen Kraftstoff und Batterieladung	[1]

## B Ergebnisse

### B.1 WMTC bei Gangwahl mit Kennlinien

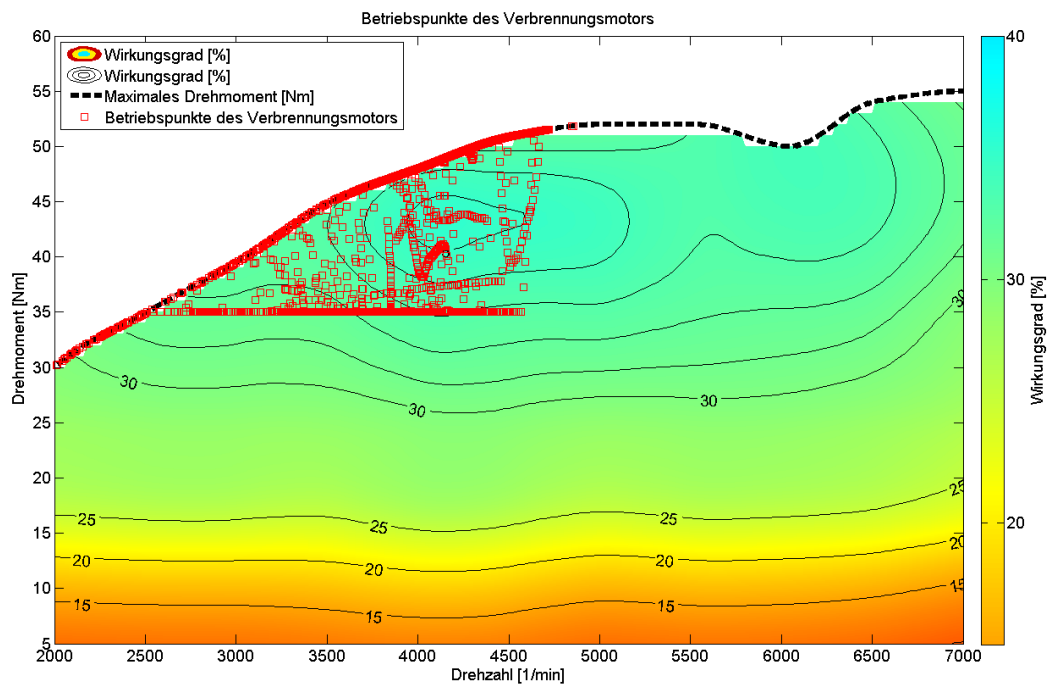


Abbildung B-1: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC bei Gangwahl mit Kennlinien

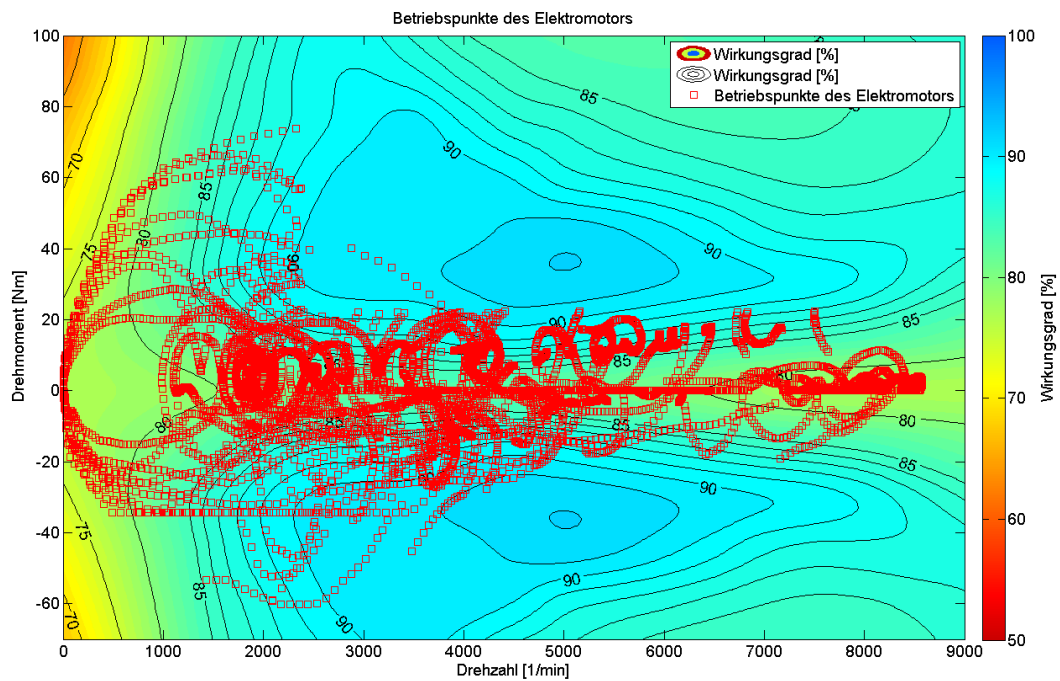


Abbildung B-2: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC bei Gangwahl mit Kennlinien



B.2 Betriebsstrategie im Modus „Electric“

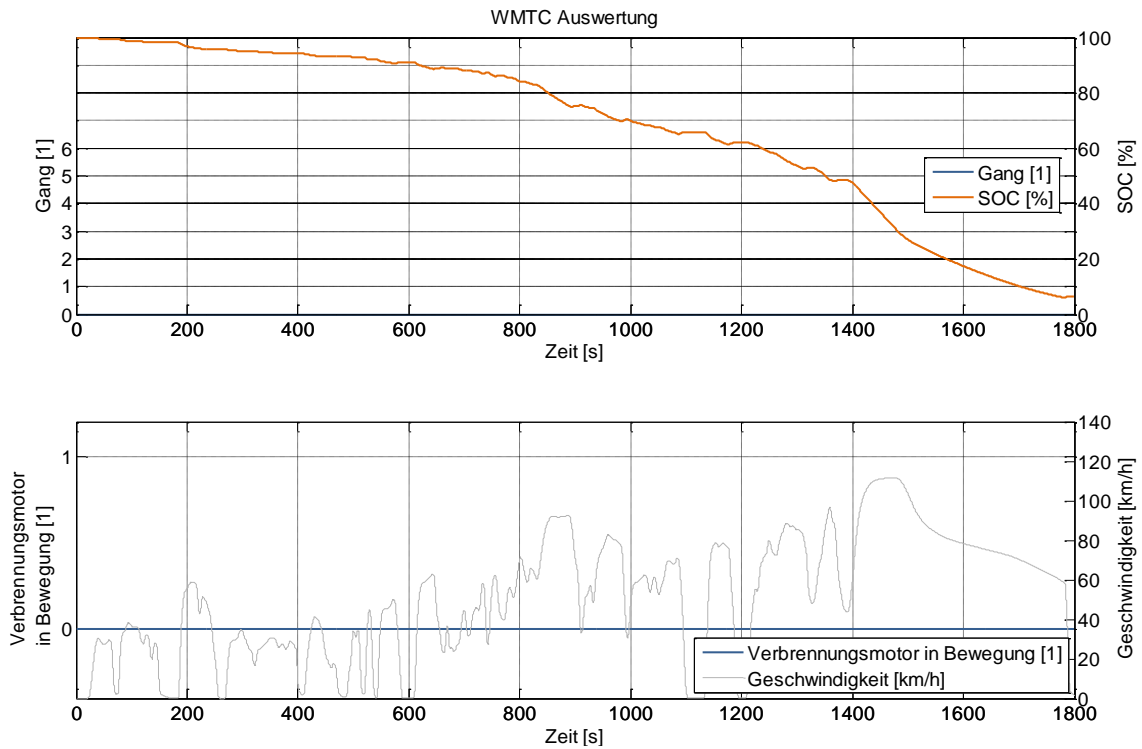


Abbildung B-3: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Electric“

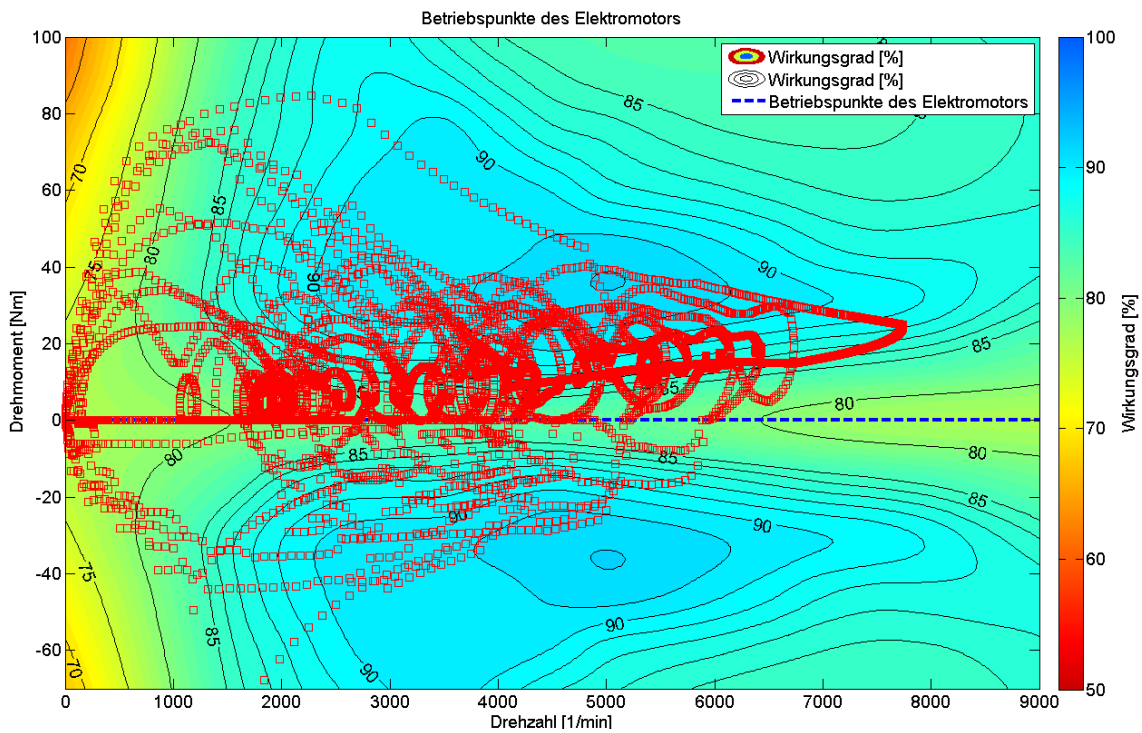


Abbildung B-4: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Electric“

### B.3 Betriebsstrategie im Modus „Economy“

#### B.3.1 WMTC (Start-SOC = 10%)

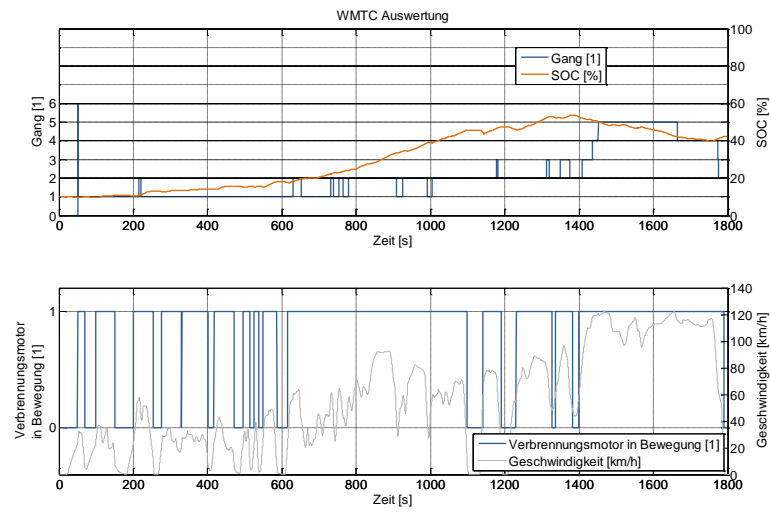


Abbildung B-5: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 10%)

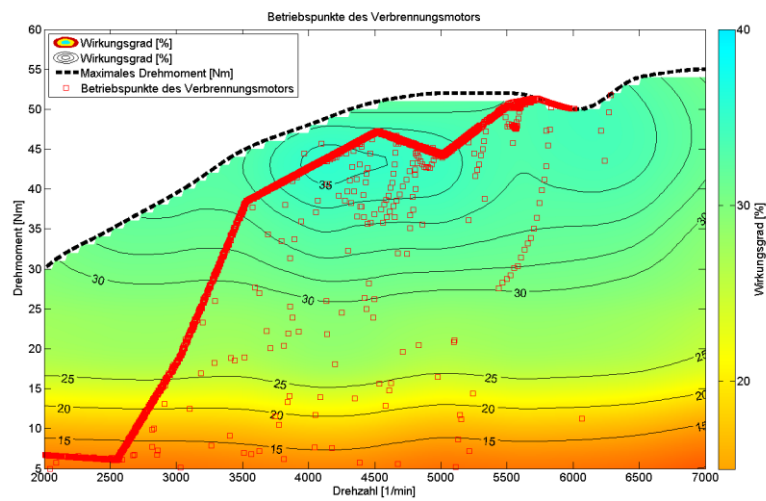


Abbildung B-6: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 10%)

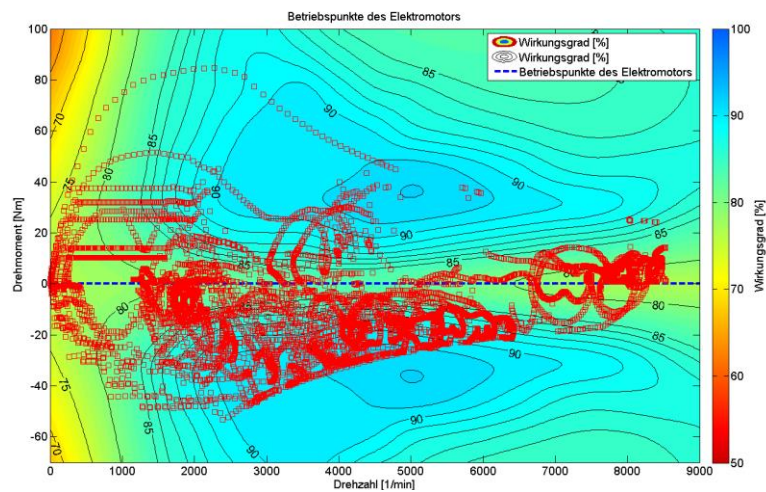


Abbildung B-7: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 10%)

B.3.2 WMTC (Start-SOC = 50%)

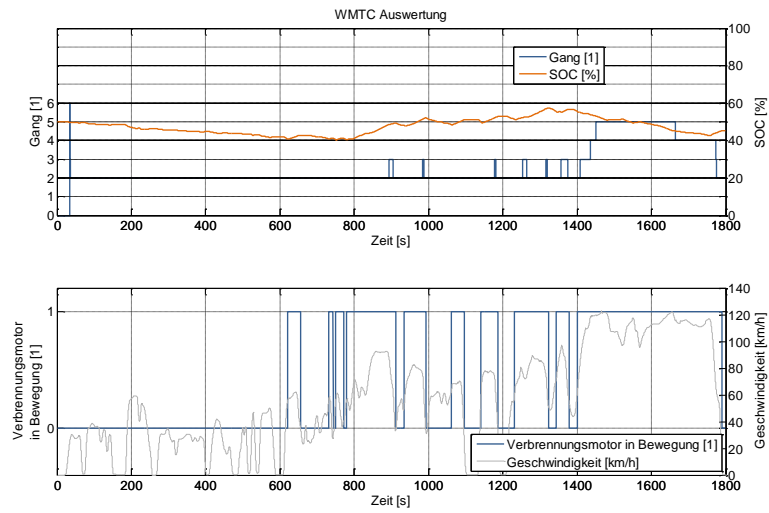


Abbildung B-8: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 50%)

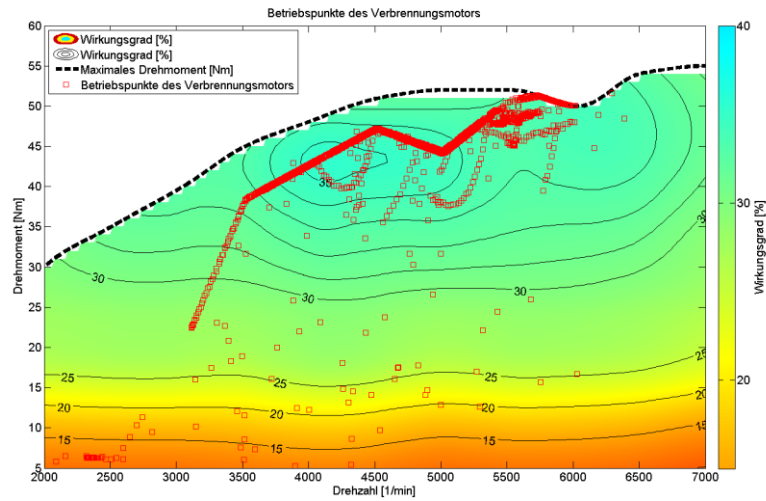


Abbildung B-9: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 50%)

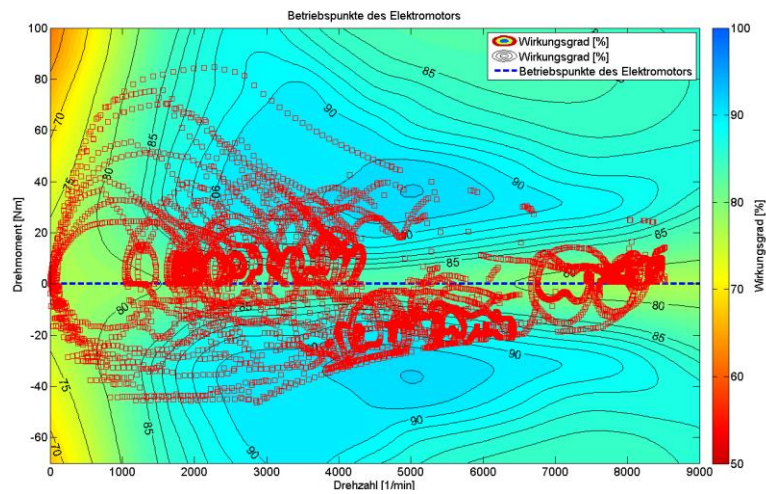


Abbildung B-10: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 50%)

B.3.3 WMTC (Start-SOC = 100%)

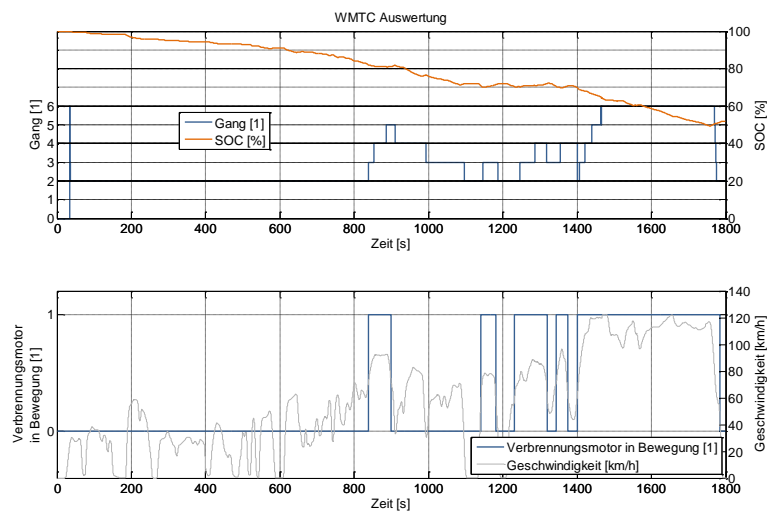


Abbildung B-11: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 100%)

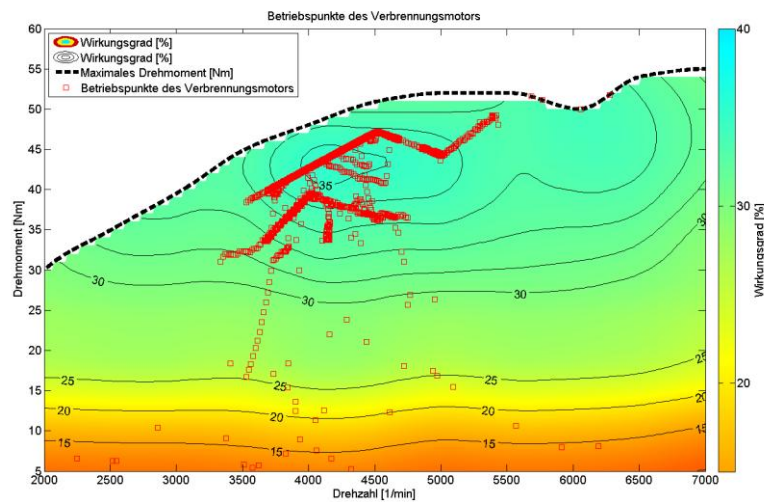


Abbildung B-12: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 100%)

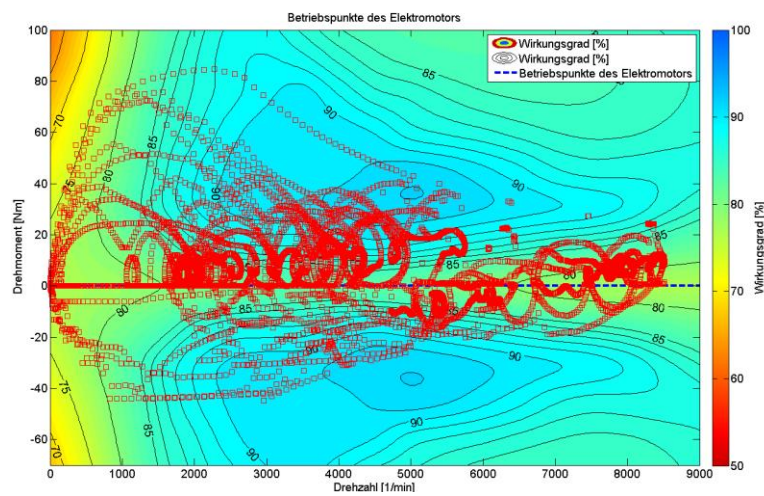


Abbildung B-13: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 100%)

B.3.4 Eigener Zyklus (Start-SOC = 85%)

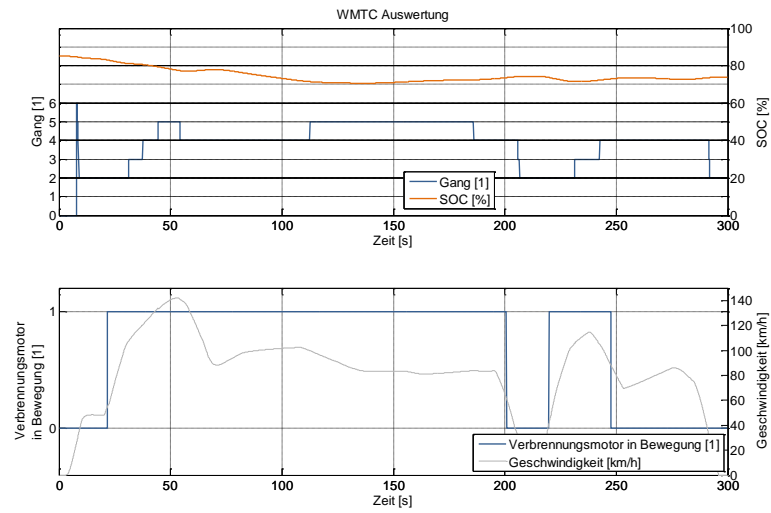


Abbildung B-14: Gang/Start-Stopp/SOC: Eigener Zyklus im Modus „Economy“ (Start-SOC = 85%)

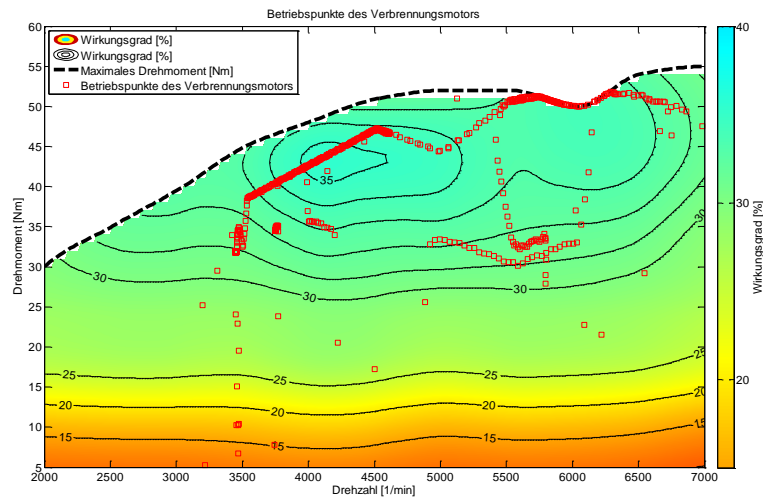


Abbildung B-15: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: Eigener Zyklus im Modus „Economy“ (Start-SOC = 85%)

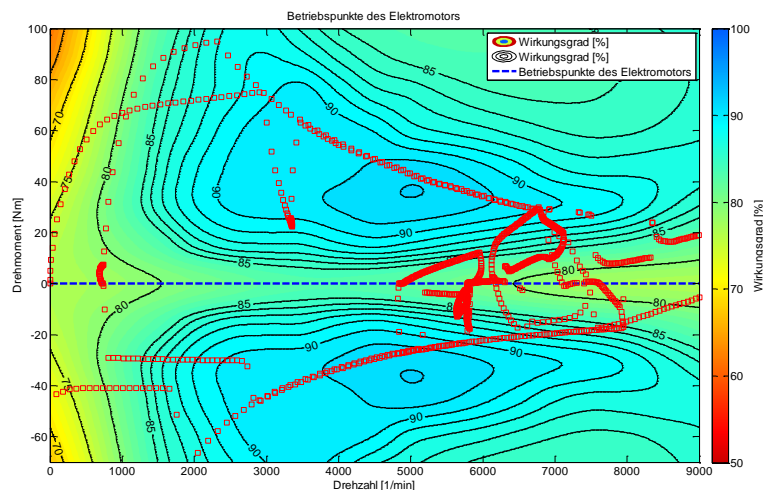


Abbildung B-16: Betriebspunkte des Elektromotors: Eigener Zyklus im Modus „Economy“ (Start-SOC = 85%)

## B.4 Betriebsstrategie im Modus „Recharge“

### B.4.1 WMTC (Start-SOC = 10%)

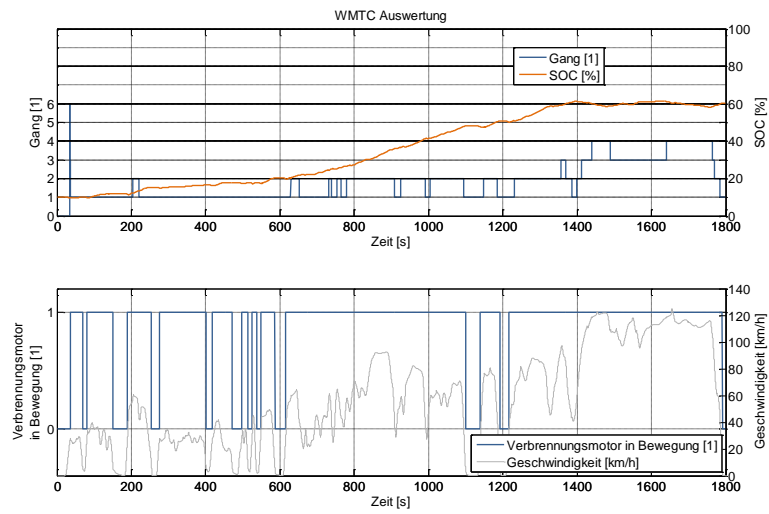


Abbildung B-17: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 10%)

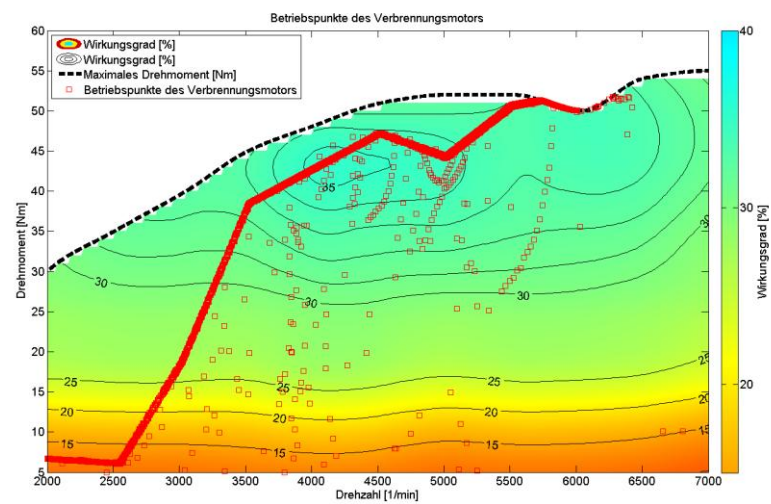


Abbildung B-18: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 10%)

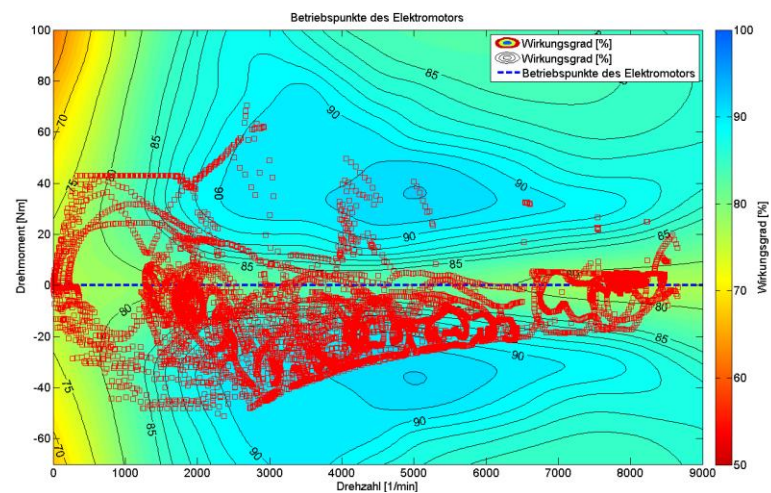


Abbildung B-19: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 10%)

B.4.2 WMTC (Start-SOC = 50%)

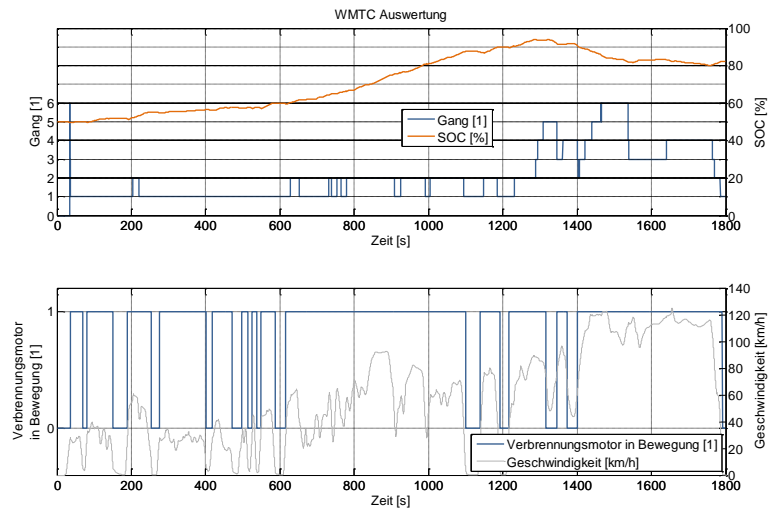


Abbildung B-20: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 50%)

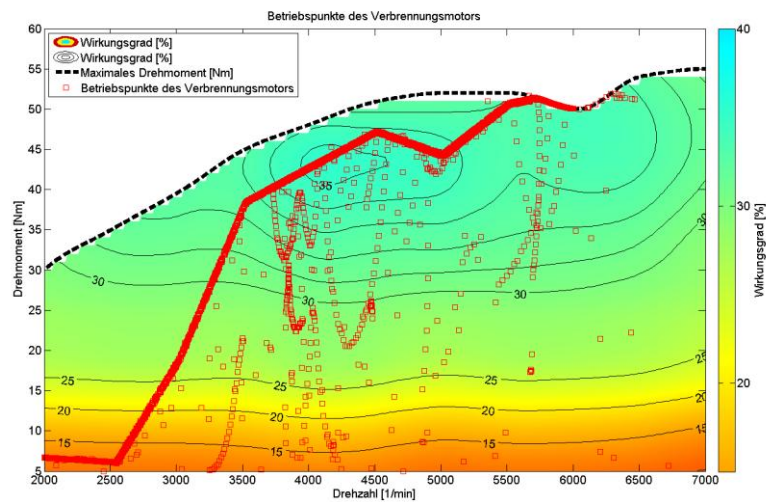


Abbildung B-21: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 50%)

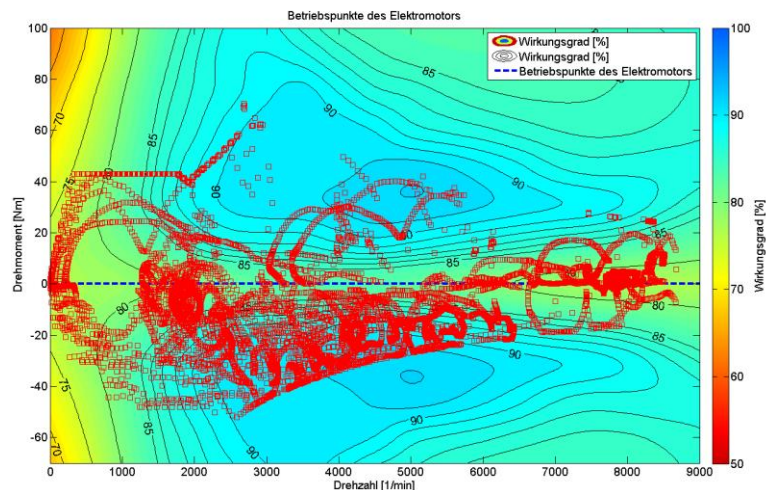


Abbildung B-22: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 50%)

B.4.3 WMTC (Start-SOC = 100%)

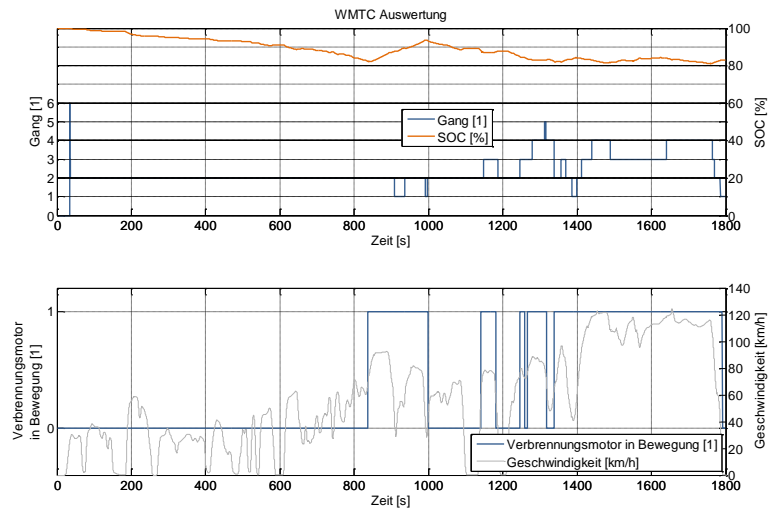


Abbildung B-23: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 100%)

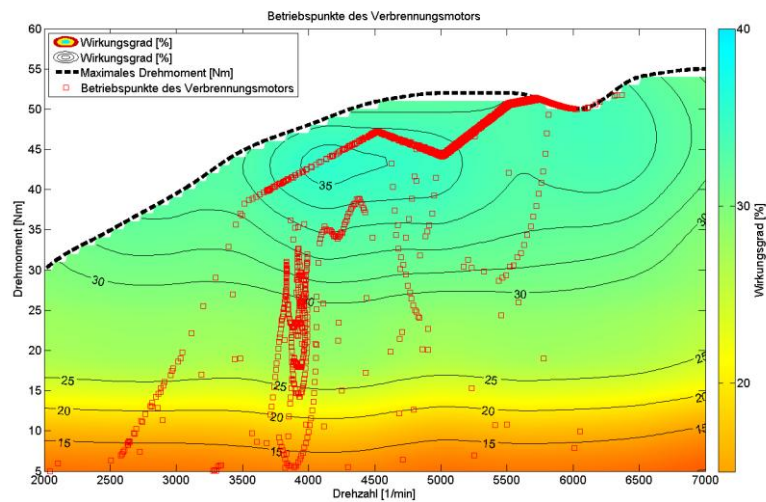


Abbildung B-24: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 100%)

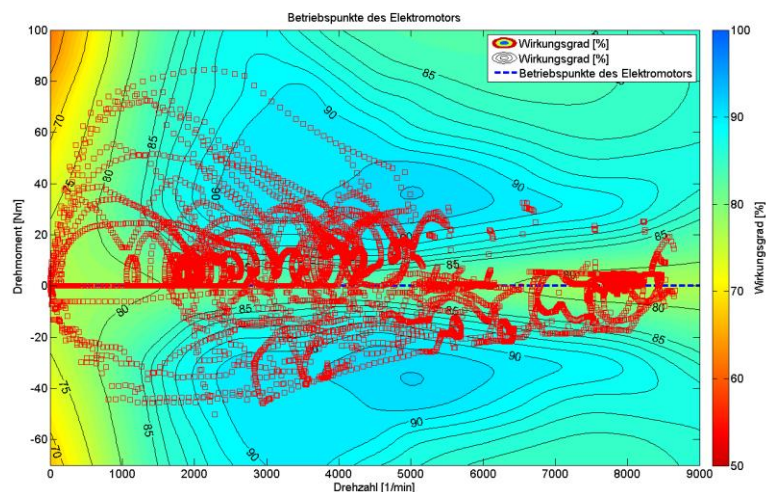


Abbildung B-25: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 100%)



B.4.4 Eigener Zyklus (Start-SOC = 85%)

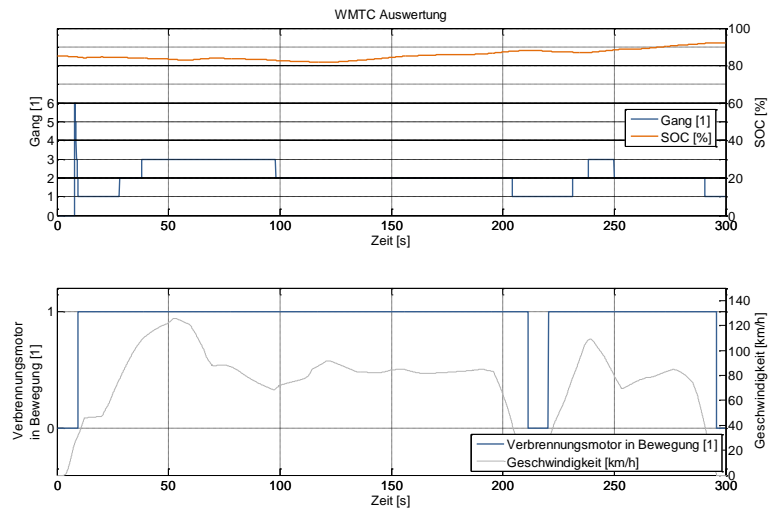


Abbildung B-26: Gang/Start-Stopp/SOC: Eigener Zyklus im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 85%)

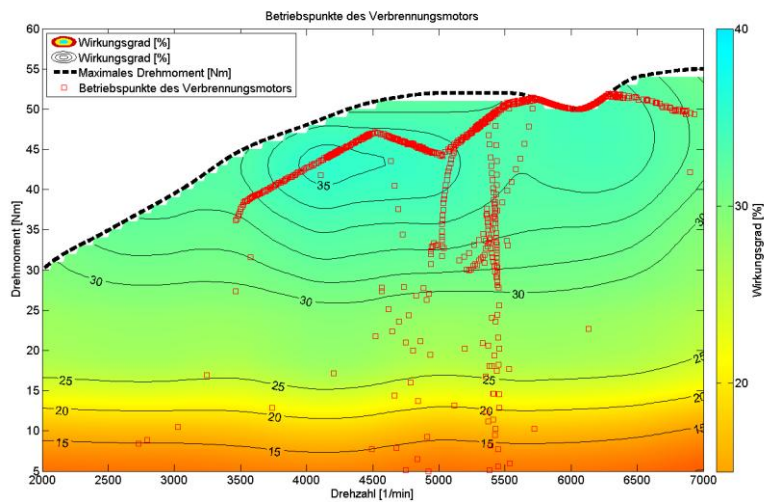


Abbildung B-27: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: Eigener Zyklus im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 85%)

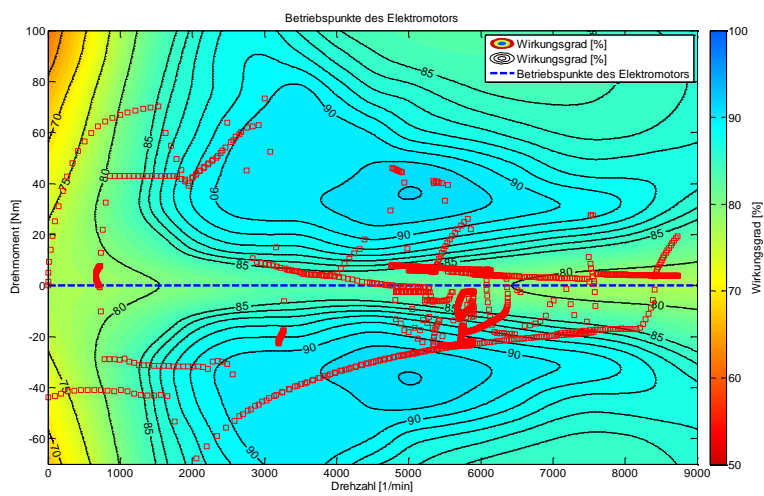


Abbildung B-28: Betriebspunkte des Elektromotors: Eigener Zyklus im Modus „Recharge“ (Start-SOC = 85%)

## B.5 Betriebsstrategie im Modus „Sport“

### B.5.1 WMTC (Start-SOC = 10%)

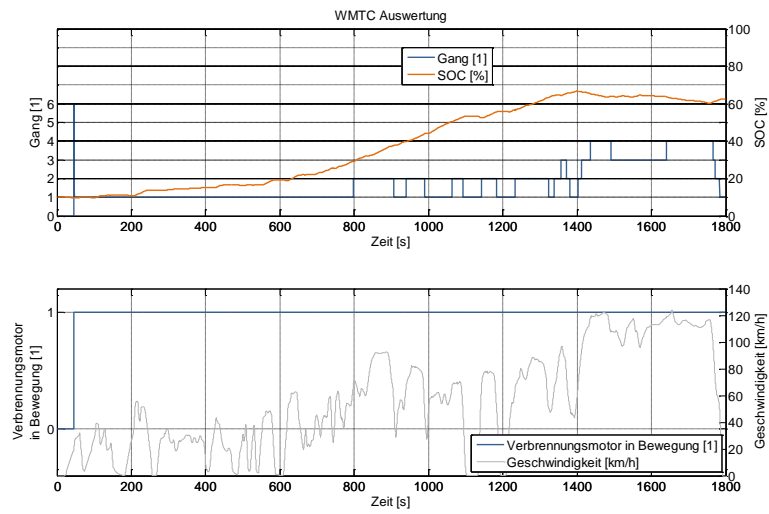


Abbildung B-29: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 10%)

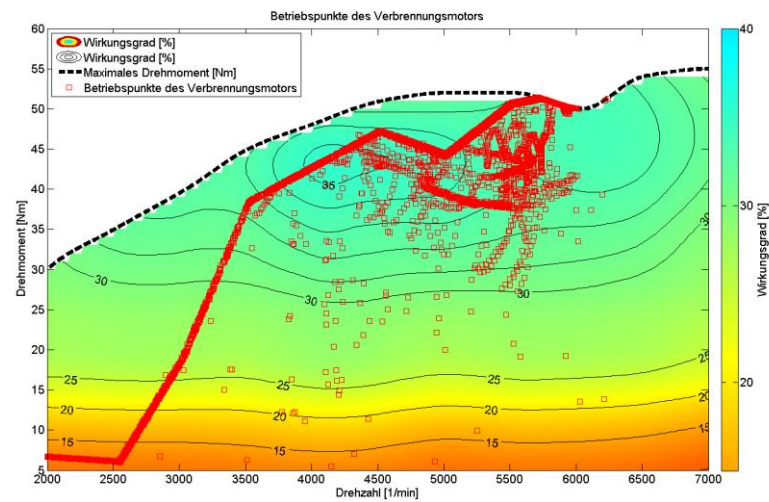


Abbildung B-30: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 10%)

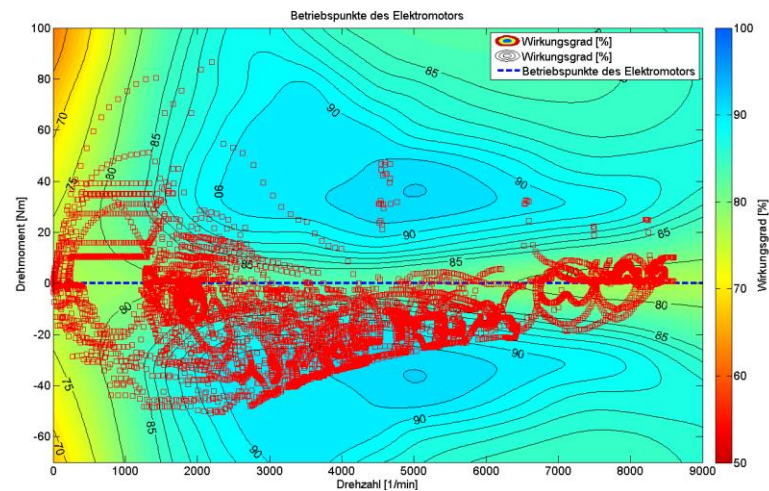


Abbildung B-31: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 10%)

B.5.2 WMTC (Start-SOC = 50%)

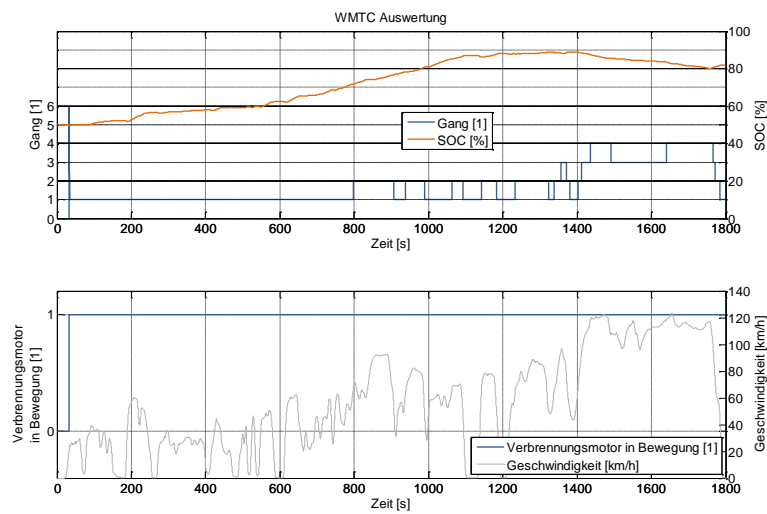


Abbildung B-32: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 50%)

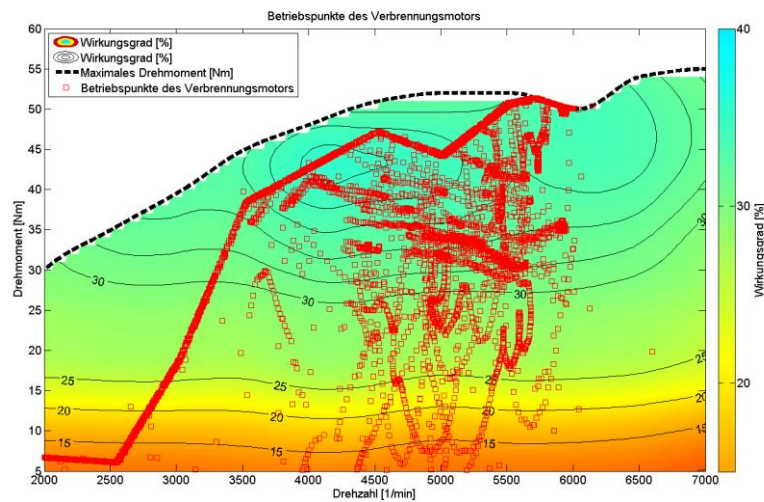


Abbildung B-33: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 50%)

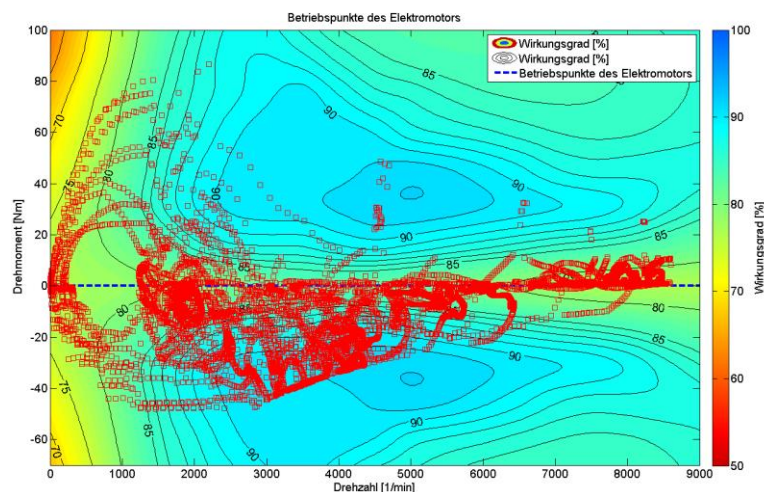


Abbildung B-34: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 50%)

B.5.3 WMTC (Start-SOC = 100%)

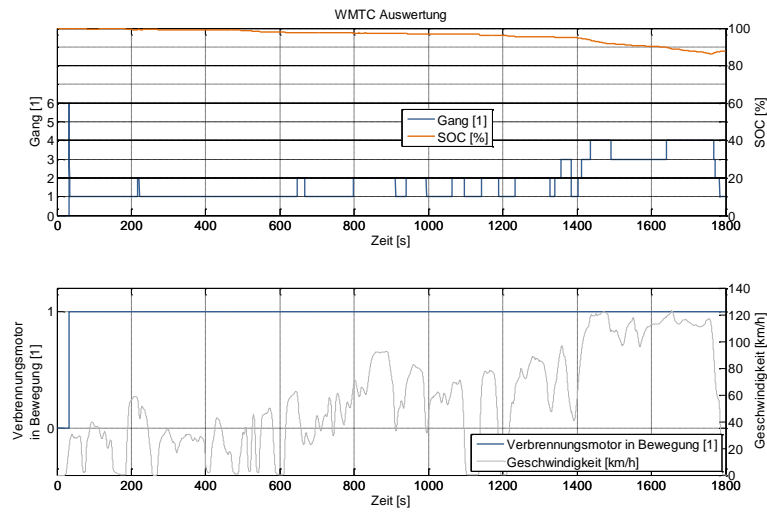


Abbildung B-35: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 100%)

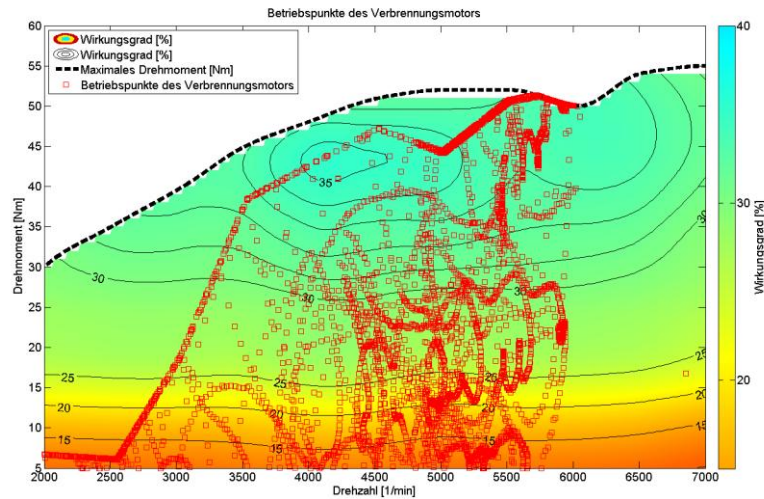


Abbildung B-36: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 100%)

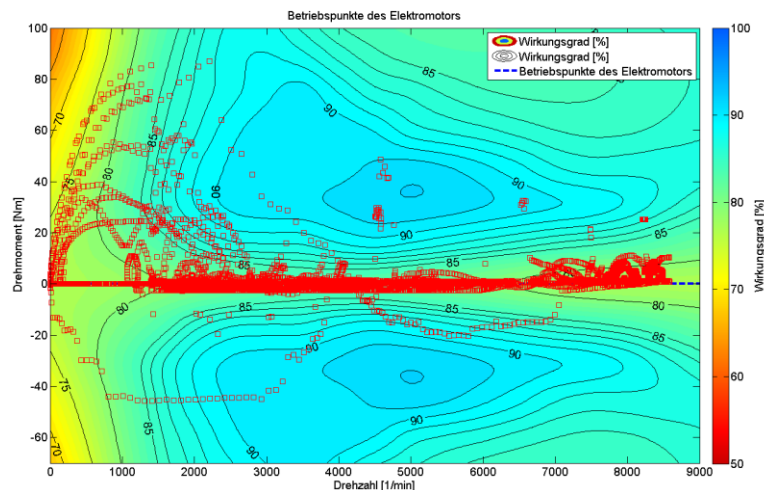


Abbildung B-37: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Sport“ (Start-SOC = 100%)

B.5.4 Eigener Zyklus (Start-SOC = 85%)

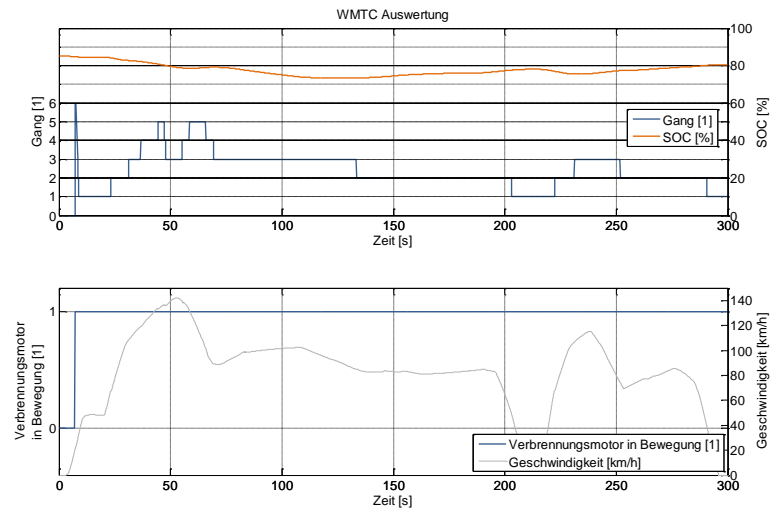


Abbildung B-38: Gang/Start-Stopp/SOC: Eigener Zyklus im Modus „Sport“ (Start-SOC = 85%)

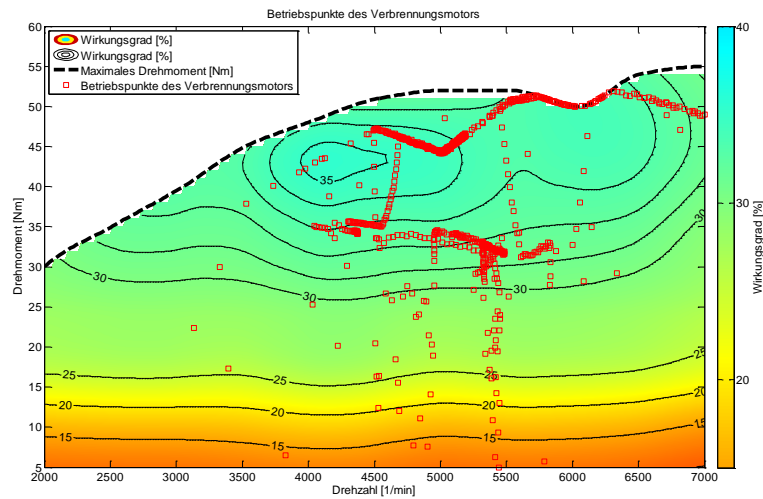


Abbildung B-39: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: Eigener Zyklus im Modus „Sport“ (Start-SOC = 85%)

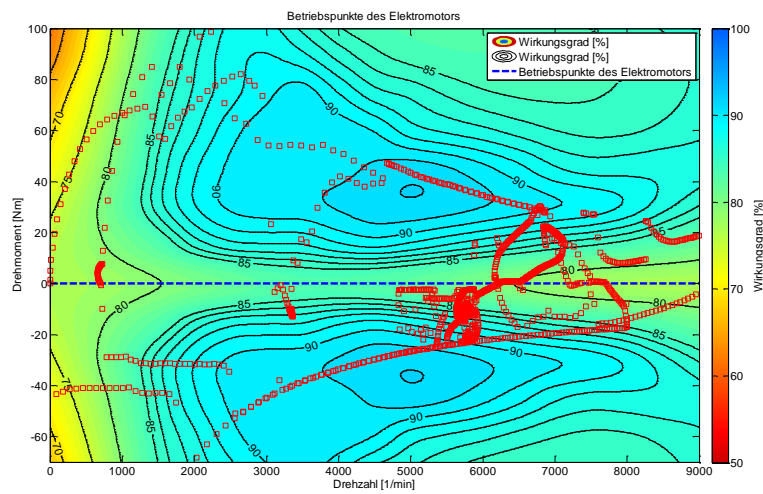


Abbildung B-40: Betriebspunkte des Elektromotors: Eigener Zyklus im Modus „Sport“ (Start-SOC = 85%)

## B.6 Betriebsstrategie am Prüfstand

### B.6.1 WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 100%)

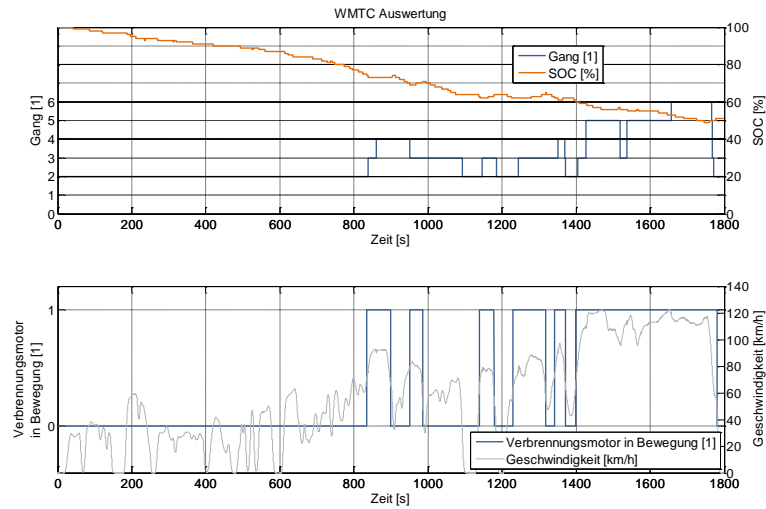


Abbildung B-41: Gang/Start-Stopp/SOC: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 100%)

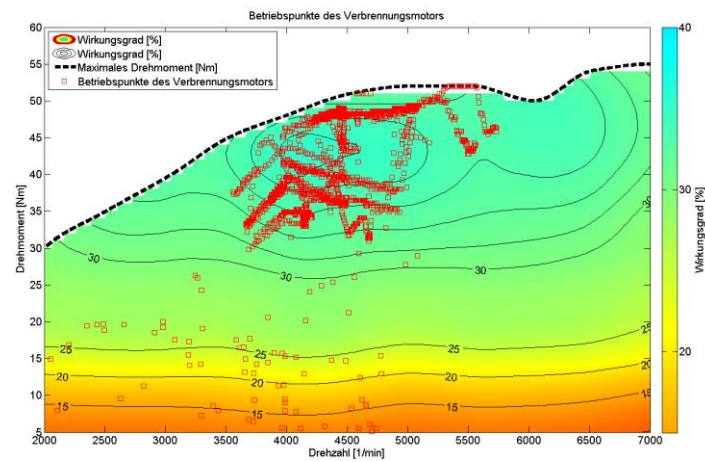


Abbildung B-42: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 100%)

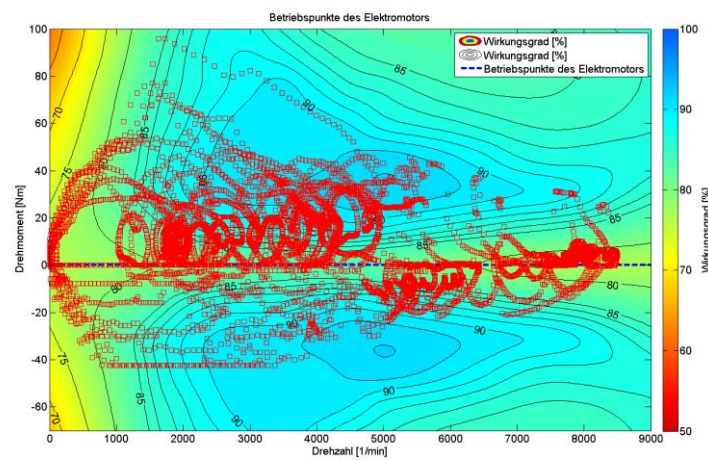


Abbildung B-43: Betriebspunkte des Elektromotors: WMTC im Modus „Economy“ (Start-SOC = 100%)

B.6.2 Eigener Zyklus im Modus „Economy“ (Start-SOC = 85%)

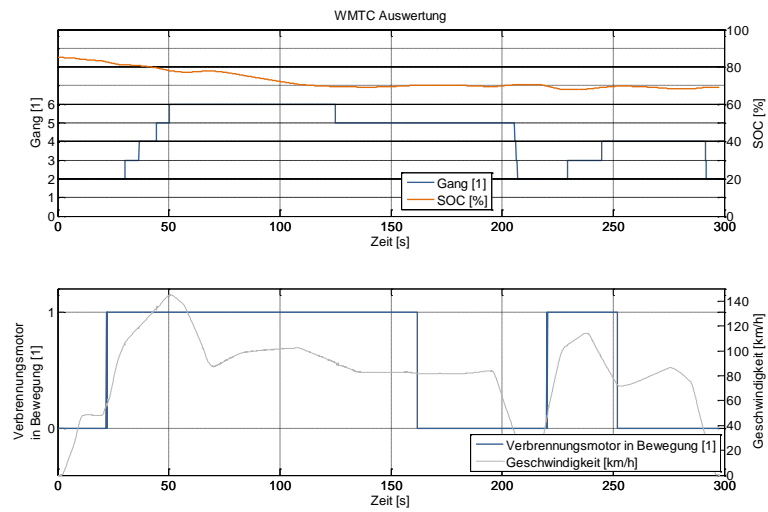


Abbildung B-44: Gang/Start-Stopp/SOC: Eigener Zyklus im Modus „Economy“ (Start-SOC = 85%)

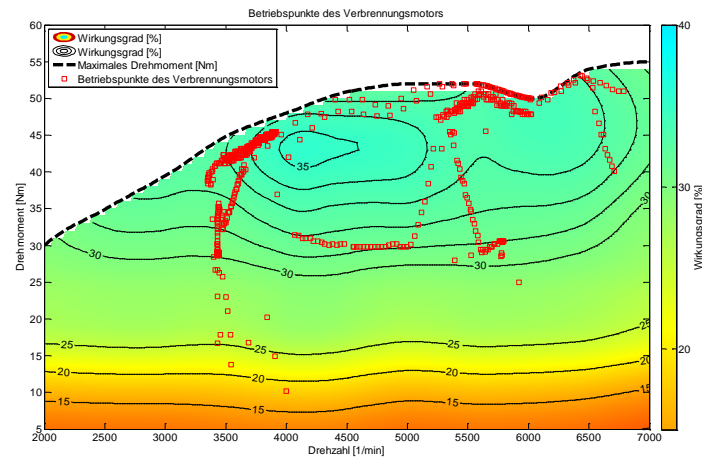


Abbildung B-45: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: Eigener Zyklus im Modus „Economy“ (Start-SOC = 85%)

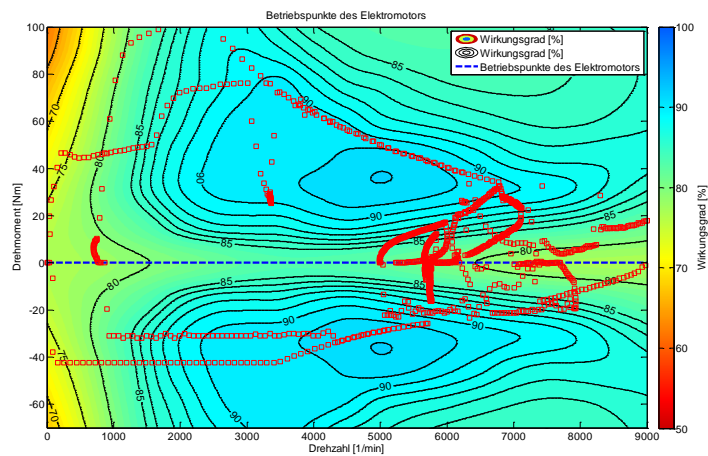


Abbildung B-46: Betriebspunkte des Elektromotors: Eigener Zyklus im Modus „Economy“ (Start-SOC = 85%)

B.6.3 Eigener Zyklus im Modus „Sport“ (Start-SOC = 85%)

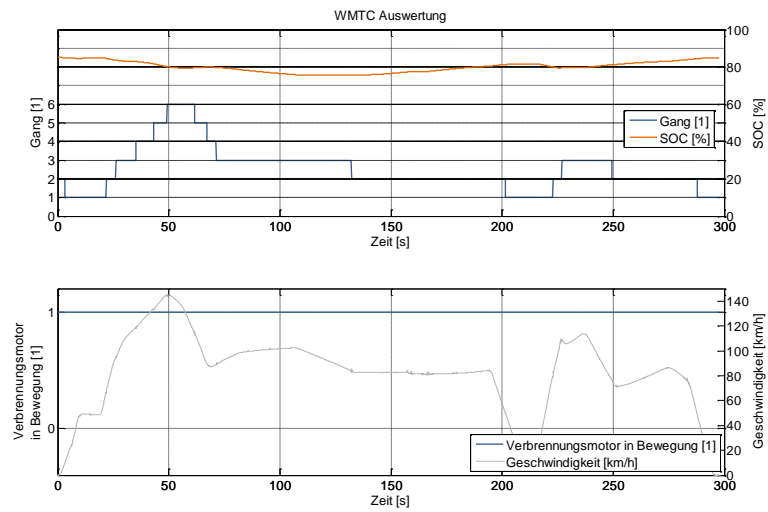


Abbildung B-47: Gang/Start-Stopp/SOC: Eigener Zyklus im Modus „Sport“ (Start-SOC = 85%)

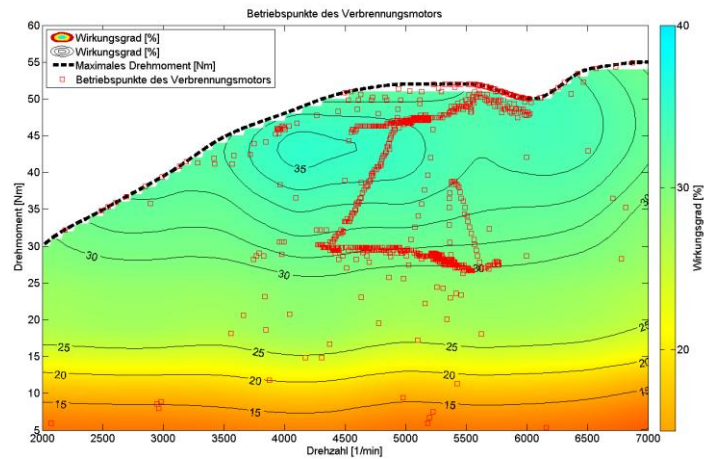


Abbildung B-48: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors: Eigener Zyklus im Modus „Sport“ (Start-SOC = 85%)

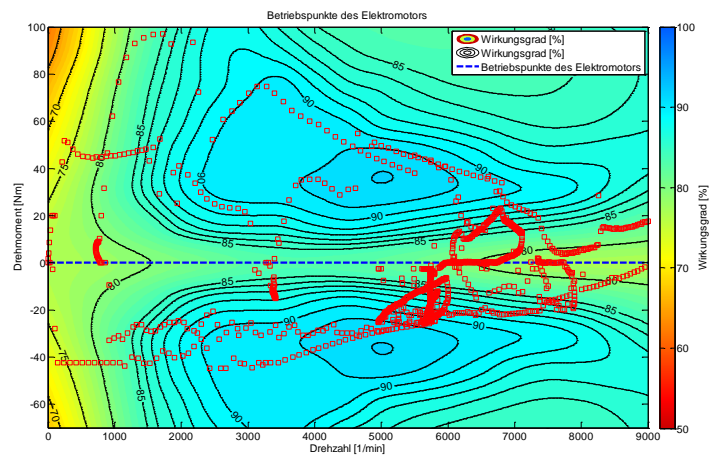


Abbildung B-49: Betriebspunkte des Elektromotors: Eigener Zyklus im Modus „Sport“ (Start-SOC = 85%)