



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN**

**DIPLOMARBEIT**

**Abbildung und Bewertung verschiedener Motorstartvarianten für ein  
Parallel-Hybridfahrzeug mittels Längsdynamiksimulation**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

**Univ. Prof. Dr. techn. Bernhard Geringer**

und

**Assoc. Prof. Dr. techn. Peter Hofmann**

**E315**

**Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik**

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Christoph Schwella**



## Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

Herrn Christoph Schwella, Matrikelnummer: 09 53 795 wird folgende Aufgabe gestellt:

### **„Abbildung und Bewertung verschiedener Motorstartvarianten für ein Parallel-Hybridfahrzeug mittels Längsdynamiksimulation“**

Es sollen die beiden Hybridfahrzeug- Verbrennungsmotorstartvarianten Ritzelstart und Schlepstart in der Simulationsumgebung GT-Suite abgebildet werden. Zudem sollen verschiedene Einflussparameter bei den beiden Motorstartvarianten variiert und deren Auswirkungen auf Performance und Effizienz bewertet werden.

Schwerpunkte:

- Literaturrecherche bezüglich Motorstart im Hybridfahrzeug
- Aufbau des Fahrzeugmodells ins GT-Suite
- Abbildung der beiden Motorstartvarianten in GT-Suite
- Bewertung der beiden Startvorgänge und deren Varianten anhand von Parametervariation hinsichtlich Performance und Effizienz

Ein gedrucktes Exemplar und eine Version der Diplomarbeit auf Datenträger sind am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien abzugeben.

Die Ergebnisse der Arbeit sind vertraulich zu behandeln und dürfen nur mit schriftlicher Genehmigung des Institutsvorstandes weitergegeben bzw. veröffentlicht werden.

Einverstanden:

---

Christoph Schwella

Betreuer am Institut:

---

Assoc. Prof. Dr. Peter Hofmann

---

Prof. Dr. Bernhard Geringer

Institutsvorstand

## Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

### **Abbildung und Bewertung verschiedener Motorstartvarianten für ein Parallel-Hybridfahrzeug mittels Längsdynamiksimulation**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Arbeiten selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am 11. Dezember 2017

---

Christoph Schwella

#### Sperrvermerk:

Ich weise darauf hin, dass die Diplomarbeit vertrauliche Informationen und unternehmensinterne Daten beinhaltet. Daher ist eine Veröffentlichung oder Weitergabe von Inhalten an Dritte ohne die vorherige Einverständniserklärung des Instituts für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik nicht gestattet.

## Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während des Studiums und bei meiner Diplomarbeit stets unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dr.techn. Dipl.-Ing. Bernhard Geringer für das Ermöglichen dieser Arbeit. Ebenso großer Dank gilt Herrn Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Hofmann für seine Ratschläge und stete Unterstützung.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem betreuenden Assistenten, Herrn Dipl.Ing. Christoph Six bedanken, der mir bei diversen Problemen immer mit Rat und Hilfe zur Seite stand. Weiters möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik für die freundliche Zusammenarbeit bedanken.

Mein aufrichtiger Dank gilt besonders meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglichten und mich immerwährend dabei unterstützt haben.

Wien, im Dezember 2017

Christoph Schwella

*„Fortschritt besteht nicht in der Verbesserung dessen, was war, sondern in der Ausrichtung auf das, was sein wird.“ – Khalil Gibran (1883-1931)*

## Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden zwei für den Verbrennungsmotorstart in einem Parallel-Hybridfahrzeug eingesetzte Startvarianten mittels Simulation abgebildet. Der Ritzelstart erfolgt über den konventionellen Anlasser. Beim Schlepstart wird der Verbrennungsmotor über die dazwischen liegende Trennkupplung von der E-Maschine angeschleppt.

Alle wesentlichen Fahrzeugkomponenten wurden in der Simulationsumgebung modelliert, wobei die beim Motorstartvorgang besonders relevanten Komponenten detaillierter abgebildet wurden. Besonderer Wert wurde auf die möglichst exakte Abbildung der Motorstartvarianten gelegt. Mit Hilfe der in der Simulationsumgebung vorhandenen Bausteine, wurden die dafür benötigten Regelkreise und Steuerungen entwickelt.

Im Anschluss wurden mit den beiden Startvarianten Motorstart-Untersuchungen bei Vollastbeschleunigung durchgeführt. Bei beiden Motorstartvarianten wurden Parameter die den Motorstartvorgang beeinflussen variiert, um Potential für Verbesserungen aufzuzeigen. Zudem wurde eine dem Schlepstart sehr ähnliche Startvariante, der sogenannte Schlupfstart untersucht.

Es wird gezeigt, welche Vorteile sich durch den Verzicht oder die Reduktion des von der E-Maschine für den Schlepstart vorgehaltenen Reservemoments ergeben. Außerdem wird anhand der Untersuchungen erläutert, welche Faktoren Einfluss auf die Motorstartdauer haben und wie sich generell die Motorstartdauer und -art auf die Fahrzeugperformance und den Energieverbrauch auswirken.

## Abstract

In the presented thesis, two methods for cranking and starting a combustion engine in a parallel-hybrid vehicle were simulated. A so-called Ritzelstart, where the engine is started through a conventional starter and a so-called Schlepstart, where the electric motor and the integrated separating clutch are utilized to crank the engine.

The important vehicle components were modeled within the simulation environment, with a particular focus on those components relevant for the engine starting process. Those were modeled in more detail, to allow accurate modeling of the engine start variants. Using available components in the simulation environment, the necessary control loops were also developed.

With the tool setup, engine start-up analysis at full load acceleration were performed. For both engine start variants, parameters that affect the engine starting process were varied to show potential for improvement. In addition the so-called Schlupstart was analyzed, which is a slightly modified version of the Schlepstart.

It is shown which advantages result through the reduction of the reserve-torque used by the electric motor for the Schlepstart. In addition, the analysis explains which factors affect engine start-up time and how overall engine start-up duration and type, affect vehicle performance and energy consumption.



## Abkürzungsverzeichnis

<u>Abkürzung</u>	<u>Bedeutung</u>
AT	Automatic Transmission
CVT	Continuously Variable Transmission
EKI	Energiekostenindikator
EM	Elektrische Maschine
ePSP	Electric Power Steering Pump
eRC	Electric Refrigerant Compressor
eVP	Elektrische Vakuumpumpe
eWAPU	Elektrische Wasserpumpe
HV	Hoch-Volt
iAOP	Getriebeölpumpe
Inv	Inverter/ Leistungselektronik
ISG	Integrierter Starter Generator
K0/ TK	Trennkupplung
KUEB	Wandlerüberbrückungskupplung
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
OBC	On-Board-Converter
PTC	Elektrischer Zuheizer
RSG	Riemen Starter Generator
SM	Starter Motor
SOC	State of Charge
TC	Torque Converter
VKM	Verbrennungskraftmaschine

## Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen.....	2
2.1	Definition und Klassifizierung der Hybridkonzepte .....	2
2.2	Ottomotorstart im P2-Hybridantriebsstrang .....	4
3	Beschreibung des untersuchten Hybridfahrzeuges .....	8
3.1	Betrachtetes Plug-In P2-Hybridsystem.....	8
3.1.1	Verbrennungsmotor .....	9
3.1.2	9G-Tronic-Plug-in-Hybridgetriebe .....	10
3.1.3	Hochvoltbatterie .....	12
3.1.4	Leistungselektronik .....	12
3.2	Motorstartvorgang im untersuchten Hybridfahrzeug.....	13
3.2.1	Ritzelstart.....	13
3.2.2	Schleppstart.....	17
4	Basisdaten zur Abstimmung des Simulationsmodells .....	20
5	Simulationsmodell .....	23
5.1	Längsdynamikmodell.....	23
5.1.1	Fahrzeugaufbau.....	24
5.1.2	Verbrennungsmotor .....	26
5.1.3	E-Maschine .....	27
5.1.4	HV-Batterie .....	30
5.1.5	Hybridgetriebe.....	30
5.1.6	Ritzelstarter und 12V Batterie .....	34
5.2	Abbildung der Startvarianten .....	35
5.2.1	Ritzelstart.....	37
5.2.2	Schleppstart.....	45
6	Untersuchungen bei Vollastbeschleunigung.....	50
6.1	Schleppstart Parametervariation 1 .....	52
6.2	Schleppstart Parametervariation 2 .....	70
6.3	Schlupfstart .....	78
6.4	Ritzelstart Parametervariation .....	85
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	91
8	Literaturverzeichnis .....	94

# 1 Einleitung

Durch die immer strenger werdenden, vom Gesetzgeber vorgegebenen, Abgasvorschriften, ist der Bedarf an innovativen abgasarmen Antriebskonzepten so groß wie nie zuvor. Im Fokus stehen dabei unter anderem die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Fahrzeuge, die direkt proportional zum Kraftstoffverbrauch sind.

Eine bereits weit verbreitete Alternative zum reinen verbrennungsmotorischen Antrieb stellt der Hybridantrieb dar. Die aktuellen Hybridfahrzeuge kombinieren Elektromotor und Verbrennungskraftmaschine in unterschiedlichen Antriebsstrangarchitekturen. Durch die optimale Abstimmung aufeinander können die Vorteile der beiden Energiewandler ausgenutzt werden, um den Kraftstoffverbrauch und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken und gleichzeitig die Fahrleistungen zu erhöhen.

Diese bereits vor über 100-Jahren [1] entwickelte Antriebstechnologie wird kontinuierlich weiterentwickelt und stellt die Ingenieure auch in der heutigen Zeit vor immer neue Herausforderungen.

Im Hybridfahrzeug sind, um den Verbrennungsmotor zu starten, je nach Topologie oft mehrere Starteinrichtungen verbaut. Beim untersuchten Parallel-Hybridfahrzeug werden, um den Motorstart auch bei tiefen Temperaturen immer gewährleisten zu können, zwei Starteinrichtungen eingesetzt. Abhängig von der Situation in der sich das Fahrzeug befindet, wird die zum jeweiligen Zeitpunkt vorteilhaftere Motorstartvariante gewählt.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Abbildung der beiden für den Verbrennungsmotorstart eingesetzten Startvarianten mittels Simulation. Um deren Eigenschaften zu bewerten, wurden mit beiden Motorstartvarianten Untersuchungen bei Vollastbeschleunigung durchgeführt. Dabei wurden bei beiden Startvarianten Parameter die Einfluss auf den Motorstartvorgang haben variiert, um Potential für Verbesserungen aufzuzeigen. Im Anschluss wurden die Auswirkungen der Parametervariation auf den Energieverbrauch und auf die Fahrzeugperformance untersucht. Eine geringfügig modifizierte Variante des Schlepstarts, der sogenannte Schlupfstart wurde ebenfalls in die Untersuchungen mit einbezogen.

Die für die Motorstartvorgänge relevanten Fahrzeugkomponenten wurden möglichst genau abgebildet. Zudem wurden, die für eine detaillierte Abbildung der beiden Motorstartvarianten notwendigen Regelungs- und Steuerungsabläufe realitätsgetreu nachgebildet.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Definition und Klassifizierung der Hybridkonzepte

Die verschiedenen Hybridkonzepte können, aufgrund der Anordnung der Hauptkomponenten (Verbrennungsmotor, E-Maschine, Generator, Batterie und Getriebe) im Antriebsstrang, in folgende **Grundstrukturen** unterteilt werden [1]:

- Serieller Hybridantrieb
- Paralleler Hybridantrieb
- Leistungsverzweigter Hybridantrieb

#### **Serieller Hybridantrieb:**

Bei diesem Konzept, wird der Verbrennungskraftmaschine (VKM) ausschließlich zum Laden der Batterie über einen Generator und zur Versorgung des Elektromotors eingesetzt. Es besteht keine mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und der Antriebsachse. Die einzige Verbindung zwischen VKM und Elektromotor besteht über den sogenannten elektrischen Zwischenkreis. [1]

#### **Paralleler Hybridantrieb:**

Beim Parallel-Hybrid besteht eine direkte mechanische Verbindung zwischen VKM und Antriebsachse. Die E-Maschine (EM) wird parallel zur VKM verwendet und kann nach Belieben zu- oder abgeschaltet werden. Es ist deshalb ein rein elektrischer, konventioneller oder gemischter Betrieb möglich. [1]

Dabei wird zwischen P1-, P2-, P3-, P4-Hybrid unterschieden. Im P1-Hybrid ist die E-Maschine direkt an der VKM angebracht und fest mit der Kurbelwelle verbunden. Ist die E-Maschine nicht direkt am Verbrennungsmotor verbaut, sondern befindet sich am Getriebeeingang mit einer dazwischen liegenden Trennkupplung, handelt es sich um einen P2-Hybrid. [2]

Befindet sich die E-Maschine am Getriebeausgang, liegt eine P3-Anordnung vor. Bei der P4-Anordnung wirken VKM und EM auf unterschiedlichen Achsen. [2]

#### **Leistungsverzweigter Hybridantrieb:**

Beim leistungsverzweigten Hybridantrieb wird die zu übertragende mechanische Leistung der VKM in einen mechanischen und einen elektrischen Pfad aufgeteilt. Zur Leistungsaufteilung wird meist ein sogenanntes stufenloses Getriebe verwendet. Damit kann die durch die VKM erzeugte Leistung auf einen mechanischen und elektrischen Zweig aufgeteilt und zum Antrieb des Fahrzeuges wieder zusammengeführt werden. [1]  
[3]

Neben der Grundstruktur des hybriden Antriebsstrangs, können Hybridfahrzeuge auch nach ihrem **Hybridisierungsgrad** unterschieden werden [1]:

- Micro-Hybrid
- Mild-Hybrid
- Full-Hybrid
- Plug-In-Hybrid

#### **Micro-Hybrid:**

Im Vergleich mit einem konventionellen Fahrzeug gibt es bei dieser Variante nur geringe Modifikationen. Der konventionelle Anlasser wird, für den Start-Stopp-Betrieb, durch eine leistungsfähigere Variante, oder durch einen Riemen-Starter-Generator ersetzt. Beim Bremsen kann dann die Verzögerungsenergie rekuperiert werden. Dadurch wird ein Verbrauchsvorteil geschaffen. [1]

#### **Mild-Hybrid:**

Die eingesetzten Komponenten sind leistungsfähiger als beim Micro-Hybrid. Mild-Hybridsysteme werden in der Regel als Parallel-Hybrid ausgeführt. Häufig ist die E-Maschine auf der Kurbelwelle zwischen VKM und Getriebe positioniert. Zusätzlich zur Funktion des Rekuperierens, kann die VKM in Anfahr- und Beschleunigungsphasen durch eine sogenannte Boost-Funktion unterstützt werden. [1]

#### **Full-Hybrid:**

Full-Hybrid Fahrzeuge können wahlweise rein elektrisch, nur mit der VKM oder kombiniert betrieben werden. Im Vergleich zum Mild-Hybrid wird die elektrische Antriebsleitung nochmals erhöht und das Fahrzeug um eine HV-Batterie ergänzt. Der Verbrauchsvorteil kann mit einem Full-Hybrid erneut vergrößert werden. [1]

#### **Plug-In-Hybrid:**

Der Plug-In-Hybrid zeichnet sich dadurch aus, dass die HV-Batterie im Fahrzeug über das externe Stromnetz geladen werden kann. Die Batteriekapazität wird gegenüber dem reinen Hybrid vergrößert. Der Plug-In-Hybrid stellt damit eine Mischform zwischen Hybrid und E-Fahrzeug dar. [1]

Bei dem in dieser Arbeit untersuchten Fahrzeug handelt es sich um einen Plug-In-Hybrid mit P2-Struktur und Ottomotor. Das Fahrzeug wird in Kapitel 3.1 näher vorgestellt.

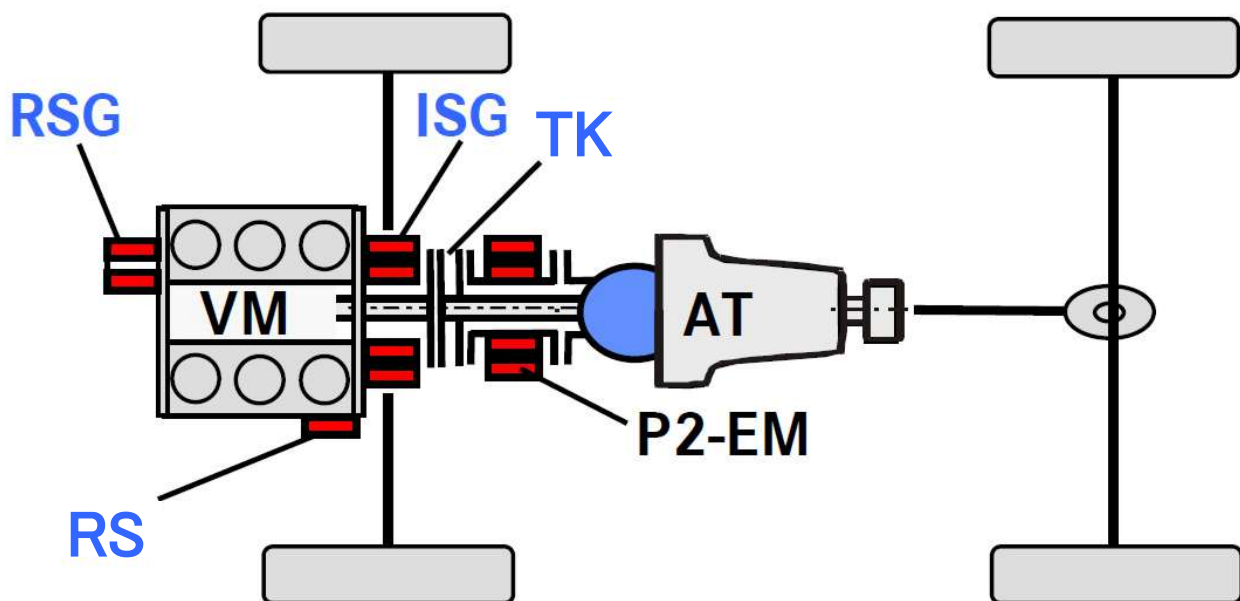
## 2.2 Ottomotorstart im P2-Hybridantriebsstrang

Der Verbrennungsmotor soll, aus allen Fahrzuständen heraus, für den Fahrer möglichst unmerklich gestartet werden können. Der Schlüsselstart bei tiefen Temperaturen, der Wiederstart aus dem automatischen Stopp, der Motorstart während des auslaufenden Motors und der Start aus der elektromotorischen Fahrt werden dabei unterschieden. Aus Sicht des Fahrers ist das Hauptbewertungskriterium des Startsystems die Startdauer und der Startkomfort. [4]

Um bei rein elektrischer Fahrt in einem P2-Hybridantriebsstrang den Verbrennungsmotor zu starten, können 5 unterschiedliche Zustarteinrichtungen eingesetzt werden [4]:

- Riemen-Starter-Generator (RSG)
- Ritzelstarter (RS)
- Integrierter Startergenerator (ISG)
- Trennkupplung (TK)
- Direktstart

Abbildung 1 zeigt die möglichen Zustarteinrichtungen und ihre Positionen im Antriebsstrang.



**Abbildung 1:** P2-Hybrid mit unterschiedlichen Zustarteinrichtungen [4]

### Riemen-Starter-Generator:

Der Riemen-Starter-Generator ist über einen Keilriemen mit der Kurbelwelle verbunden. Während des Startvorgangs, wird das Moment vom RSG über den Riemen auf die Kurbelwelle übertragen und diese wird in Rotation versetzt. Um das entsprechende Drehmoment übertragen zu können, ist eine hohe Riemenvorspannung erforderlich. Die größte Herausforderung für einen RSG ist es, das Durchrutschen des Riemens bei allen

Bedingungen zu verhindern. Zum Beispiel kann es aufgrund von Vereisung, Verschmutzung oder Verölung des Riemens zu einem Durchrutschen und damit zu Startproblemen kommen. In einem P2-Hybrid, kann in diesem Fall dann der Motorstart alternativ über die EM bei geschlossener TK erfolgen. [4]

Der größte Vorteil des RSG besteht darin, dass er sich ständig im Eingriff befindet und eine Startanforderung, von Fahrer oder Fahrzeug, kann unmittelbar und ohne Einspurvorgang in ein hohes Drehmoment an der Kurbelwelle umgesetzt werden. [4]

Die E-Maschine wird häufig als Synchronmaschine ausgeführt und kann nicht nur als Starter, sondern auch als Generator eingesetzt werden. Im Generatorbetrieb übernimmt sie die Funktion der Lichtmaschine. [5]

### **Startermotor:**

Das Ritzel des Starter-Motors greift in den Anlasserzahnkranz, der auf der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors sitzt. Vor dem Start steht das Ritzel des Starters neben dem Zahnkranz in Ruhestellung. Der Startvorgang selbst lässt sich dabei in die drei Arbeitsphasen Einspuren, Durchdrehen, Start und Ausspuren unterteilen. [4]

Beim Einspuren rückt der Starterzahnkranz in den Anlasserzahnkranz ein. In 70% der Fälle kommt es dabei aber aufgrund des geringen Zahnflankenspiels zwischen Ritzel und Anlasserzahnkranz zur Kollision. Das Ritzel wird dann mit zunehmender Kraft auf den Zahnkranz gedrückt und angedreht bis sich eine günstige Zahn-Lücke-Stellung ergibt. Von der gespannten Einrückfeder wird das Ritzel vorgeschoben und eine mechanische Kopplung hergestellt. [6]

Beim anschließenden Durchdrehen, wird durch das große Untersetzungsverhältnis zwischen Ritzel und Zahnkranz ein hohes Drehmoment an der Kurbelwelle abgegeben. Der Startermotor wird als Gleichstrommotor ausgeführt und hat deshalb sein maximales Drehmoment im Stillstand. Der Motor beginnt sich, nachdem die Haftreibung des Motors überwunden wurde, zu drehen. [7]

Sobald die erste Einspritzung erfolgt, gibt der Motor selbstständig Moment ab. Die Drehzahl steigt an und der Starter wird überholt. Ein Freilauf entkoppelt das Ritzel von der Antriebswelle des Starters und das Ritzel wird aus dem Anlasserzahnkranz ausgespurt. [4] Im Vergleich zum RSG weist er eine sicherere Drehmomentübertragung auf, da über die Zahnräder eine formschlüssige Verbindung besteht.

### **Integrierter Startergenerator:**

Der integrierte Startergenerator ist mit dem Kurbelgehäuse des Motors drehfest verbunden und befindet sich auf der Kurbelwelle. Er wird auch Kurbelwellen-Startergenerator genannt. Diese Anordnung bietet sich an, weil der Starter-Generator die Funktion des Anlassers und der Lichtmaschine übernehmen soll. [4] [8]

Der ISG wird an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt, da eine Verwendung in der P2-Struktur theoretisch zwar möglich ist, dieser in der Praxis aufgrund des hohen zusätzlichen Baumraumbedarfs und der im Vergleich zum RSG höheren Kosten nicht eingesetzt wird. Außerdem werden die Funktionalitäten des ISG bereits durch die im P2-Hybrid verbaute E-Maschine abgedeckt.

### **Direktstart:**

Bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung kann bei stehendem Motor Kraftstoff direkt in den Brennraum einspritzt und anschließend sofort gezündet werden. Das Drehmoment für den Hochlauf aus dem Stillstand, wird nur aus der Gaskraft der Verbrennung bezogen. Am Beginn des Startvorgangs wird derjenige Zylinder ermittelt, bei dem die Einlass- und Auslassventile geschlossen sind. In den Zylinder wird Kraftstoff eingebracht und mit dem Zündsystem entflammt. Der daraus entstehende Druckanstieg versetzt die Kurbelwelle in Rotation. [9] [10] [11] [12]

Es wird zwischen dem konventionellen und erweiterten Direktstart unterschieden. Beim konventionellen Direktstart, wird Kraftstoff in den sich im Arbeitstakt befindenden Zylinder eingebracht. Während die Kurbelwelle vorwärts gedreht wird, überwindet der Kolben des in der Zündreihenfolge nächsten Zylinders den oberen Totpunkt und verdichtet dabei die eingeschlossene Luftmasse. In diese wird Kraftstoff eingespritzt und durch Zündung des Gemisches die nächste Verbrennung eingeleitet. Der Motor läuft bis zur Leerlaufdrehzahl hoch. [13]

Im Unterschied zum konventionellen Direktstart, wird beim erweiterten Direktstart die Kurbelwelle anfangs in eine Rückwärtsdrehbewegung versetzt und der Kraftstoff in einen sich im Kompressionstakt befindenden Zylinder eingebracht und gezündet. Gegenüber dem konventionellen Direktstart wird eine höhere Startsicherheit erreicht. Jedoch ist auch der erweiterte Direktstart nicht robust genug, um in jedem Betriebspunkt zu starten. [5]

Deshalb wird in der Praxis eine weitere Form des Direktstarts eingesetzt. Beim starterunterstützten Direktstart, wird eine zusätzliche Starteinrichtung benötigt, um den



Motor durch seine erste Verdichtung zu drehen. Damit soll eine hundertprozentige Startersicherheit gewährleistet werden. [14]

Als zusätzliche Starteinrichtung kann neben dem konventionellen Anlasser auch ein RSG oder ISG eingesetzt werden. Zudem, kann ein gezieltes Schließen der Trennkupplung den Startvorgang initiieren. [4]

### **Trennkupplung:**

In einem P2-Hybrid Antriebsstrang kann der Motor durch das gezielte Schließen der Trennkupplung von der EM angedreht und beschleunigt werden. Der Motorhochlauf ist dabei nicht mehr unabhängig von der Abtriebsseite, auf die keine unerwünschten Einflüsse übertragen werden dürfen. [4]

Im Fahrzeugstillstand läuft der Motorstartvorgang wie folgt ab: Das Grundgetriebe (AT) ist geöffnet und die EM dreht die VKM an. Diese startet und dreht in den Leerlauf. Die Trennkupplung öffnet wieder, die EM wird gestoppt und das Grundgetriebe wird geschlossen. Mit der nun gestarteten VKM, kann das Fahrzeug verbrennungsmotorisch anfahren. [4]

Das Zustraten der VKM aus dem rein elektrischen Betrieb stellt eine deutlich größere Herausforderung dar. Für das Losreißen und Hochdrehen der VKM, muss das benötigte Moment von der EM vorgehalten werden, damit der Motor aus jeder Situation der E-Fahrt zugestartet werden kann. Dadurch ist die dem Fahrer zur Verfügung stehende Antriebsleistung limitiert. [4]

Während der Fahrt, kann der VKM-Zustart neben der Trennkupplung auch über den Ritzelstarter erfolgen. Diese beiden Zustartmöglichkeiten werden in der vorliegenden Arbeit detailliert behandelt, die Methodik wird in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 genau erläutert. Im folgenden Kapitel wird das für die Untersuchungen abgebildete Fahrzeug näher beschrieben.

### 3 Beschreibung des untersuchten Hybridfahrzeuges

*Daimler* stellte 2009 mit dem S400 Hybrid sein erstes Serien-Hybridfahrzeug vor. Ein weiterer Meilenstein in der Hybrid-Entwicklung war der 2012 vorgestellte E 350 BlueTEC Hybrid. Er war das erste Diesel-Hybrid Fahrzeug im Premium-Segment. Außerdem kam erstmalig ein Parallel-Hybrid in P2-Anordnung zum Einsatz. [15] [16] [17]

Für die Startuntersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde der E350e gewählt, dieser stellt die dritte Generation von Mercedes-Benz-Hybridfahrzeugen dar. Neuerungen sind einerseits die innovative Neunstufen-Wandlerautomatik, welche mit einem hochkompakten Hybridtriebkopf elektrifiziert wurde, andererseits die aktuelle Generation von HV-Komponenten. [15]

Gegenüber den vorhergehenden Modellgenerationen, konnte die Effizienz weiter gesteigert werden. Der E350e stößt, im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), nur 49g CO<sub>2</sub>/km aus. Auf im rein-elektrischen Betrieb gefahrenen Kurzstrecken, hat der Plug-In-Hybrid einen signifikanten Verbrauchsvorteil. Dies wird unter anderem durch den hohen Wirkungsgrad des elektrischen Antriebssystems erreicht. [16]

Das intelligente Antriebsmanagement kann, mit Hilfe des Navigationssystems, die vor dem Fahrzeug liegende Strecke in die Betriebsstrategie einfließen lassen. Das Fahrzeug nutzt zudem die Navigationsdaten, das Abstandsradar, die Längsbeschleunigungssensoren und die Kameradaten aus der Verkehrsschilderkennung zum intelligenten vorausschauenden Rekuperieren im Schubbetrieb. [15] [18]

Der im Fahrzeug verbaute Antriebsstrang und seine wesentlichen Komponenten werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

#### 3.1 Betrachtetes Plug-In P2-Hybridsystem

Beim E350e handelt sich um ein Plug-In-Hybrid-Fahrzeug mit P2-Struktur. Zwischen dem Verbrennungsmotor und der E-Maschine (EM) ist eine Trennkupplung (K0) verbaut. Bei rein elektrischer Fahrt ist die Trennkupplung geöffnet. Der Elektromotor ergänzt den Verbrennungsmotor und ermöglicht lokal emissionsfreies Fahren mit einer Reichweite von über 30km. [18] [16]

Abbildung 2 zeigt den Antriebsstrang des E 350e. Der Verbrennungsmotor verfügt über eine elektrische Wasser (eWAPU)- und Vakuumpumpe (eVP). Der Klimakompressor (eRC) ist ebenfalls elektrisch angetrieben und wird über das HV-System versorgt. Des

Weiteren ist eine elektrische Lenkhilfpumpe (ePSP) verbaut. Der Motor konnte deshalb riemenlos ausgeführt werden. Das führt, speziell im Niedriglastbereich, zu einer Reibungsreduktion und einer damit verbundenen Effizienzsteigerung. [15] Die Getriebeölpumpe (iAOP) wird über das 12V-System versorgt.

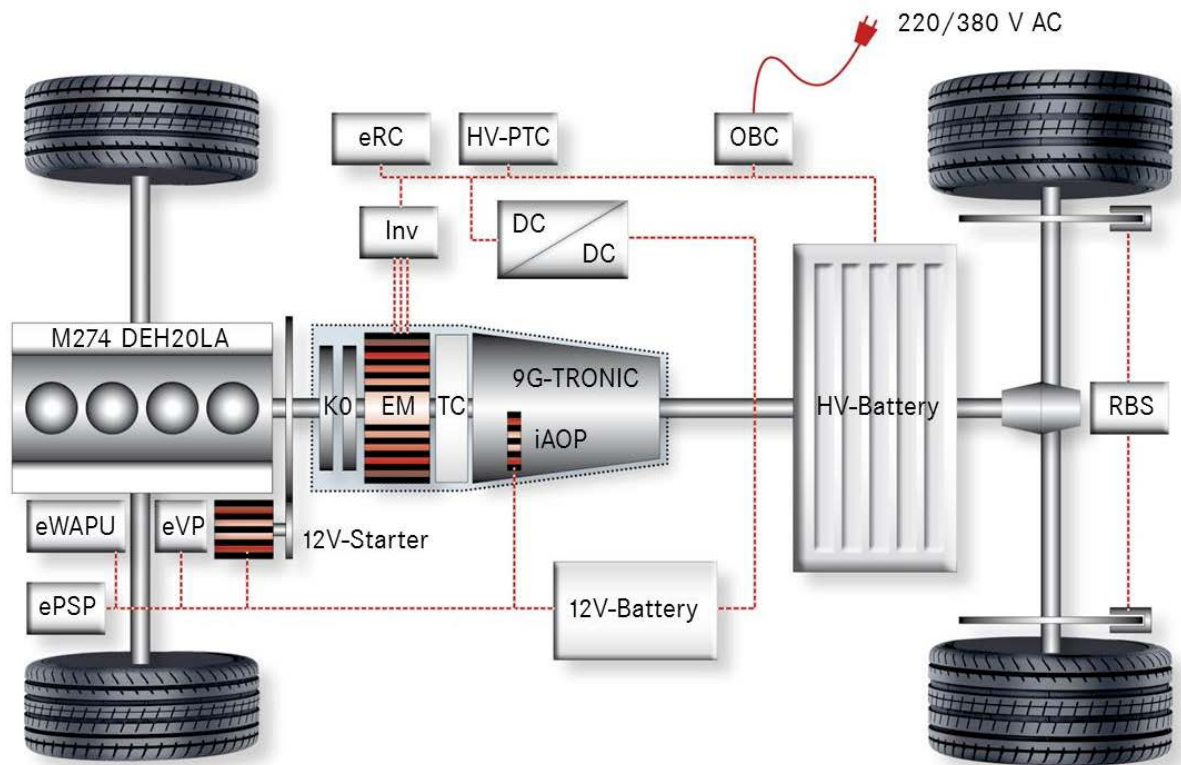


Abbildung 2: Antriebsstrang des E350e [16]

Um ein Aufheizen des Innenraums auch während der rein elektrischen Fahrt mit kaltem Verbrennungsmotor zu ermöglichen, wurde ein elektrischer Zuheizung (PTC) in das HV-System integriert. Dieser konditioniert den Wasserkreislauf für den Innenraumwärmetauscher. [19]

Die E-Maschine wird aus der HV-Batterie gespeist und über einen zwischengeschalteten Wechselrichter (Inv) versorgt. Der On-Board-Lader (OBC) dient dazu, die HV-Batterie über eine externe Spannungsquelle zu laden. Die 12V Batterie wird über den DC/DC Wandler gespeist. Außerdem ist das Fahrzeug mit einem regenerativen Bremssystem (RBS) ausgestattet. [19]

### 3.1.1 Verbrennungsmotor

Der Verbrennungsmotor (M274) ist ein aufgeladener 2.0 Liter 4-Zylinder Ottomotor, verfügt über eine Piezo-Direkteinspritzung und ein strahlgeführtes Brennverfahren. Er hat eine Maximalleistung von 155kW, sein maximales Drehmoment liegt bei 350Nm. [15] [20]

Um das Startverhalten zu optimieren, kann der Verbrennungsmotor beim Abstellvorgang gezielt positioniert werden. Dafür werden die beim Abstellen auftretenden Trägheitsmomente und Gaskräfte ausgenutzt. Nach dem Öffnen der Trennkupplung wird im Motorauslauf die Drosselklappe gezielt angesteuert und eine optimale Abstellposition eingeregelt. Bei einem erneuten VKM-Start kann dadurch die Startgeschwindigkeit verbessert werden. [15]

### 3.1.2 9G-Tronic-Plug-in-Hybridgetriebe

Im verwendeten Hybridgetriebe wird die 9-Stufen-Wandlerautomatik (9G-Tronic) um einen Hybridtriebkopf mit integriertem Drehmomentwandler (Torque-Converter, TC), Trennkupplung (K0) und E-Maschine (EM) ergänzt. [21] Die Abbildung 3 zeigt ein Schnittbild des Hybridgetriebes.

Um das System möglichst kompakt zu gestalten, wurden der Torsionsschwingungsdämpfer, die K0 und die Wandlerüberbrückungskupplung (KUEB) innerhalb des Rotors der E-Maschine integriert. [21]

Zwischen Motor und Getriebe wurde ebenfalls ein Torsionsschwingungsdämpfer verbaut. Dadurch wird das Geräusch- und Schwingungsverhalten des Antriebssystems verbessert. [15] [21]

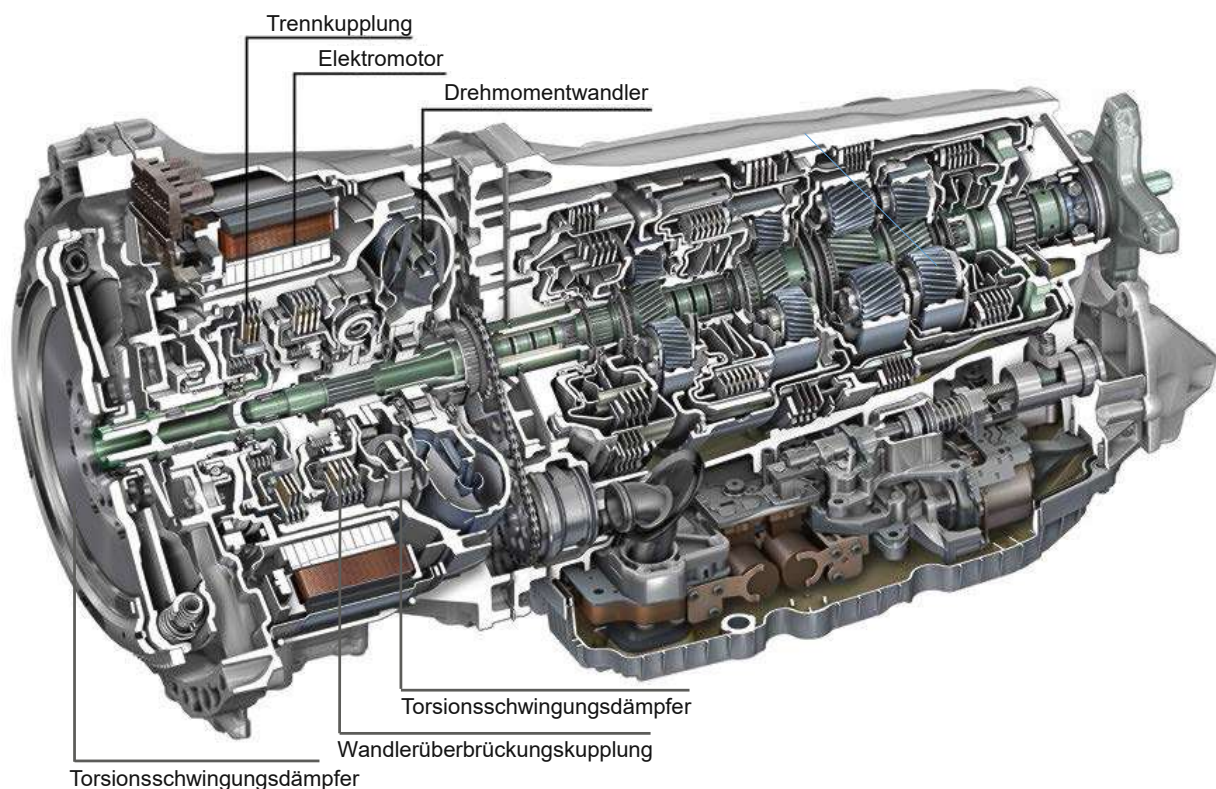


Abbildung 3: 9G-Tronic Plug-in-Hybridgetriebe [18]

Die hohe Spreizung des Grundgetriebes ermöglicht ein niedriges Drehzahlniveau und einen damit verbundenen Verbrauchsvorteil. Außerdem sind das Reibungs- und Schleppleistungsniveau des Getriebes gering. Der sich daraus ergebende hohe Wirkungsgrad des Getriebes trägt, insbesondere während der elektrischen Fahrt, zur Effizienzsteigerung des Triebstrangs bei. [15] [18] [21]

### **3.1.2.1 Trennkupplung K0**

Die verbaute Trennkupplung wurde als hydraulische Lamellenkupplung ausgeführt. Sie dient insbesondere zur Abkopplung des Verbrennungsmotors während der rein elektrischen Fahrt und im Segelmodus. Dadurch werden Schleppverluste vermieden.

Aufgrund ihrer schnellen Ansteuerzeit und der intelligenten Kombination mit dem Drehmomentwandler, kann sie auch beim Motorstart zum Anschleppen des Verbrennungsmotors eingesetzt werden. [15] [18] Der genaue Vorgang beim Widerstart der VKM wird in Kapitel 3.2.2 erläutert.

Die Kupplung muss nicht anfahrfähig sein. Der im Hybridgetriebe verbaute Drehmomentwandler übernimmt den Anfahrvorgang. [21]

### **3.1.2.2 E-Maschine**

Die im E350e verbaute EM ist eine permanent erregte Synchronmaschine und hat eine maximale Leistung von 65kW. Ihr maximales Drehmoment liegt bei 440Nm. Der Stator ist fest in das Triebkopfgehäuse integriert. Der Rotor liegt zwischen Trennkupplung und Getriebeeingang. Rotor und Stator können bedarfsgerecht gekühlt werden. [15] [21]

Sie kann sowohl bei hybridischer, als auch bei elektrischer Fahrt, sowie bei Anfahrvorgängen aus dem Fahrzeugstillstand das volle Drehmoment zur Verfügung stellen. Die E-Maschine kann zum Boosten, bei der Rekuperation, der E-Fahrt und hybriden Fahrt eingesetzt werden. [15] [18]

Neben dem Unterstützen der VKM bei geringen Drehzahlen (Turboloch-Boost), kann das Systemdrehmoment des Fahrzeuges situationsabhängig erhöht werden. Beim Boosten wird, z.B. bei hohem Fahrerwunschmoment, von der E-Maschine Moment zur Leistungssteigerung abgerufen. [15]



### 3.1.3 Hochvoltbatterie

Bei der im Fahrzeug verbauten HV-Batterie handelt es sich um eine Lithium-Ionen-Batterie auf Lithium-Eisenphosphat-Basis. Sie beinhaltet 88 in Serie geschaltete Einzelzellen. Ihre Gesamtkapazität beträgt 6,4kWh und ihre Nennspannung liegt bei 290V. [15]

Um maximale Crashesicherheit zu gewährleisten, ist das Gehäuse aus Aluminium-Druckguss gefertigt. Die Batterie wurde im Heck des Fahrzeugs unter dem Kofferraum verbaut. [15]

Die Batterie kann über den On-Board-Lader des Fahrzeugs, kombiniert mit einer Wallbox, mit einer Ladeleistung von 3,6kW in etwa 2 Stunden aufgeladen werden. Als Wallbox wird die Wandladestation zum Laden der HV-Batterie bezeichnet. Alternativ ist ein Vollladen der Batterie über die Haushaltssteckdose, mit 1,8kW Ladeleistung, in ungefähr 3 Stunden möglich. [18]

### 3.1.4 Leistungselektronik

Die E-Maschine wird über eine wassergekühlte Leistungselektronik gespeist. Um das 12V System zu versorgen, wurde ein DC/DC Wandler direkt in das Hochvoltsystem integriert. Dadurch kann auf eine, an die VKM gekoppelte, Lichtmaschine verzichtet werden. [15] [19]

## 3.2 Motorstartvorgang im untersuchten Hybridfahrzeug

Um den Verbrennungsmotor im untersuchten P2-Hybrid-Fahrzeug zu starten, gibt es 2 Möglichkeiten. Zum einen kann er mit Hilfe des konventionellen Ritzelstarters gestartet werden. Zum anderen gibt es die Option, den Verbrennungsmotor durch einen sogenannten Schleppstart, mit der im Hybridmodul verbauten E-Maschine, anzureißen.

Bei dieser Startart wird, durch das Anreißen über die Trennkupplung mit hohen Drehzahlgradienten, die Eigenfrequenz des Triebstranges schnell durchfahren. Insbesondere können so bei niedrigen Geschwindigkeiten und Lasten auftretende torsionale Anregungen vermieden werden. Dadurch ist ein komfortabler Verbrennungsmotorstart, der nahezu vibrations- und geräuschfrei abläuft, möglich. Die Störung, die durch den Momentenimpuls der Trennkupplung eingebracht wird, kann durch die E-Maschine kompensiert werden und wird außerdem über den Wandler gedämpft. [15] [18]

Mit welcher Motorstartvariante das Fahrzeug gestartet wird, entscheidet die Betriebsstrategie des Hybridfahrzeuges. Hierbei spielen Größen wie das Fahrerwunschmoment als auch der Ladezustand (State of Charge, SOC) der Hochvoltbatterie eine entscheidende Rolle. Wird durch ein sprunghaft ansteigendes Fahrerwunschmoment, zum Beispiel am Beginn einer Vollastbeschleunigung, ein höheres Systemmoment gefordert, wird der Verbrennungsmotor zugestartet. In diesem Fall wird der Ritzelstart priorisiert. Der Schleppstart kommt bei niedrigeren Lastanforderungen zum Einsatz und wird auch als Komfortstart bezeichnet. Neben dem ansteigenden Fahrerwunschmoment, kann auch ein niedriger SOC der HV-Batterie im E-Betrieb einen Verbrennungsmotorstart erfordern.

Beide Startvarianten ermöglichen einen VKM-Start sowohl in Fahrt, als auch im Fahrzeugstillstand. Da die vorliegende Arbeit ihren Fokus auf der Abbildung der beiden Startvarianten während der Fahrt hat, wird im Folgenden die Methodik der beiden Motorstartvarianten für diesen Fahrzeugzustand erläutert.

### 3.2.1 Ritzelstart

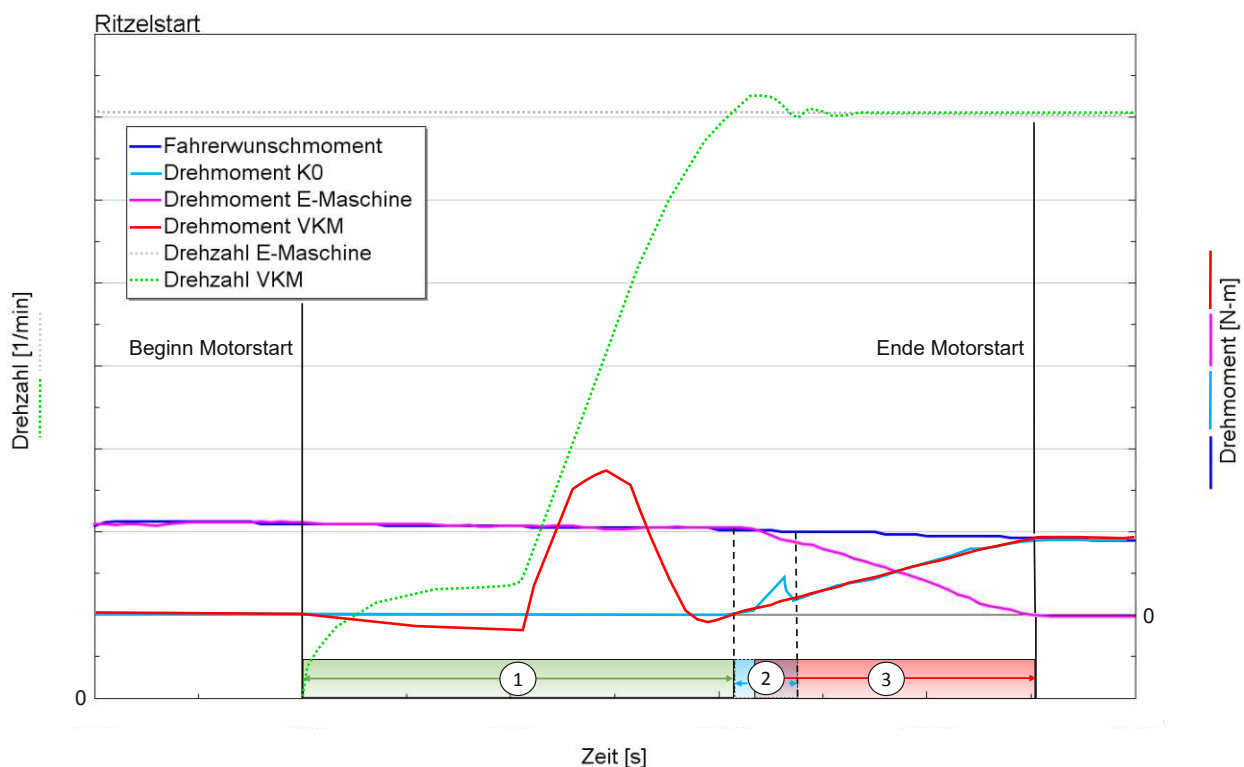
Wenn sich das Fahrzeug im rein elektrischen Betrieb fortbewegt, wird das vom Fahrer eingestellte Wunschmoment nur von der E-Maschine dargestellt und die Trennkupplung (K0) ist geöffnet. Der Verbrennungsmotor wird nicht mitgeschleppt. Damit werden zusätzliche im Antriebsstrang entstehende Verluste vermieden.

Abbildung 4 zeigt die beim Ritzelstartvorgang relevanten Drehmoment- und Drehzahlverläufe. Der Motorstart kann dabei in die markierten Bereiche 1-3 unterteilt werden.

Das abgebildete VKM-Moment, stellt das um das Motorreibmoment reduzierte innermotorisch abgegebene VKM-Moment dar. Beim Schließvorgang der Trennkupplung darf eine Drehzahldifferenz zwischen VKM und EM herrschen. Aufgrund der Drehzahldifferenz und der Massenträgheit des Motors ist das zu diesem Zeitpunkt an der K0 übertragene Drehmoment größer als das von der VKM abgegebene Moment.

### **Bereich 1 – Drehzahlsynchronität herstellen:**

Soll der Verbrennungsmotor mit Hilfe des Ritzelstarters gestartet werden, wird er zunächst über diesen angedreht.



**Abbildung 4: Relevante Drehzahlen und Momente während des Ritzelstarts. Bereich 1 kennzeichnet den Abschnitt bis Drehzahlsynchronität herrscht, Bereich 2 das Schließen der Trennkupplung und Bereich 3 den Momentenverrampungsvorgang**

Ab ca. 280 U/min erfolgt die erste Einspritzung. Bis dahin wird die VKM vom Ritzelstarter angeschleppt, der danach ausrückt. Der Leerlaufregler der VKM regelt die Drehzahl des Motors bis ca. 600 U/min. Ab diesem Drehzahlniveau führt ein PI-Regler die Verbrennungsmotordrehzahl an die E-Maschinendrehzahl heran. Der Sollwert ist die E-Maschinendrehzahl, die Regelgröße die Drehzahl des Verbrennungsmotors. Als



Regelabweichung gilt demnach die Differenz zwischen der Drehzahl der VKM und der E-Maschine. Ziel ist es, Drehzahlsynchronität zwischen der EM und der VKM herzustellen.

Laut Definition herrscht Drehzahlsynchronität, wenn die Drehzahldifferenz zwischen der E-Maschine und dem Verbrennungsmotor für ein Zeitfenster von 50ms kleiner-gleich  $\pm 70-80$  U/min ist. Der Wert der zulässigen Differenzdrehzahl hängt vom jeweiligen Fahrerwunschloment ab. Je höher das Fahrerwunschloment, desto größer ist die zulässige Differenzdrehzahl und umso früher stellt sich Drehzahlsynchronität ein. Falls die VKM-Drehzahl beim Drehzahlhochlauf soweit über die EM-Drehzahl überschwingt, dass dabei der zulässige Differenzdrehzahlbereich im 50ms Zeitfenster wieder verlassen wird, sind die Bedingungen für Drehzahlsynchronität nicht erfüllt.

Das ungewollte Verlassen des zulässigen Differenzdrehzahlbereichs kann auftreten, weil der Regler einen raschen Hochlauf der VKM-Drehzahl gewährleisten soll. In Folge dessen kann es zum unzulässig hohen Überschwingen der VKM-Drehzahl kommen. Bei der Abstimmung des Reglers steht der schnelle Hochlauf der VKM-Drehzahl im Fokus, weil dieser direkten Einfluss auf die Motorstartdauer hat.

Sobald die Drehzahl des Verbrennungsmotors wieder im Bereich der zulässigen Differenzdrehzahl liegt, beginnt das Zeitfenster erneut. Bleibt die Drehzahl der VKM nun für 50ms im erlaubten Differenzdrehzahlbereich herrscht Drehzahlsynchronität und der in Abbildung 4 mit Bereich 2 markierte Abschnitt des Ritzelstartvorgangs beginnt.

### **Bereich 2 und 3 – Schließen der Trennkupplung (2) und Momentenverrampung (3):**

Sind die Bedingungen für Drehzahlsynchronität erfüllt, wird die Trennkupplung (K0) mit einem Gradienten von 2000 Nm/s geschlossen. Der Beginn des Schließvorgangs ist, in Abbildung 4 im Bereich 2, aufgrund des ansteigenden Kupplungsmoments gut zu erkennen. Kommt es während des Schließvorgangs zum Verlassen des Bereichs in dem Drehzahlsynchronität herrscht, wird das Schließen der K0 unterbrochen. Dabei verharrt der Kupplungsaktor solange auf seinem Niveau, bis wieder Drehzahlsynchronität hergestellt ist und die Kupplung weiter geschlossen werden darf.

Der Momentenverrampungsvorgang ist in Abbildung 4 mit Bereich 3 gekennzeichnet und startet parallel zu dem bereits aktiven Bereich 2. Unter dem Momentenverrampungsvorgang versteht man das Heranführen des VKM-Moments an das Fahrerwunschloment. Gleichzeitig wird das von der E-Maschine abgegebene Moment, das bis zu diesem Zeitpunkt dem Fahrerwunschloment entspricht, reduziert.

Damit die Momentenverrampung startet, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein. Zum einen muss Drehzahlsynchronität herrschen, zum anderen muss das von der Trennkupplung am Beginn des Schließvorgangs übertragene Moment, größer als das vom Verbrennungsmotor abgegebene Moment sein.

Wie bereits erläutert, darf beim Schließvorgang der Trennkupplung eine Drehzahldifferenz zwischen VKM und EM herrschen. Aufgrund der Drehzahldifferenz und der Massenträgheit des Motors ist das zu diesem Zeitpunkt an der K0 übertragene Drehmoment größer als das von der VKM abgegebene Moment. Dies lässt sich in Abbildung 4 im Bereich 2 gut erkennen. Das während des Schließvorgangs kurzfristig über das VKM-Moment ansteigende K0-Moment, wird im Verrampungsvorgang nicht berücksichtigt und vom Torsionsschwingungsdämpfer ausgeglichen.

Bei höherem Fahrerwunschemoment ist die Bedingung für Drehzahlsynchronität früher erfüllt. Daraus folgt, dass auch der Momentenverrampungsvorgang früher startet. Dadurch wird eine etwas höhere Dynamik während des Motorstartvorgangs erreicht.

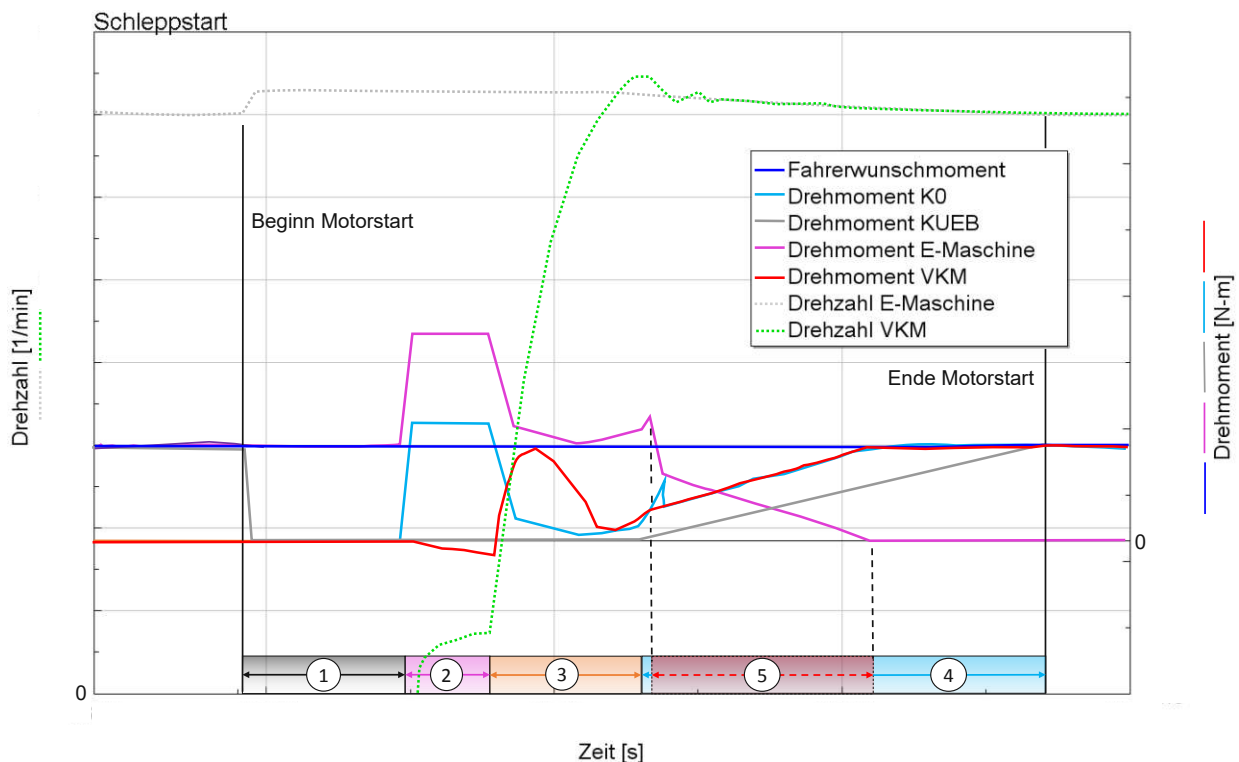
Während des Verrampungsvorgangs wird zu jedem Zeitpunkt das Fahrerwunschemoment aus der Summe von E-Maschinenmoment und VKM-Moment dargestellt. Ist die Summe aus E-Maschinenmoment und VKM-Moment am Beginn des Verrampungsvorgangs größer als das Fahrerforderungsmoment, wird das E-Maschinenmoment mit einem Gradienten von 2000Nm/s schnell zurückgefahren. Sobald die Summe aus VKM-Moment und E-Maschinenmoment dem Fahrerwunschemoment entspricht, werden beide mit dem gleichen Gradienten verrammt. Dabei wird der Gradient von der VKM vorgegeben.

Die Höhe des Gradienten hängt vom Fahrerwunschemoment ab. Je höher der Fahrerwunsch, umso steiler ist der Gradient. Bei höherem Fahrerwunsch läuft der Verrampungsvorgang also schneller ab.

Am Ende des Motorstartvorgangs, wird das Fahrerforderungsmoment vom Verbrennungsmotor erfüllt. Das E-Maschinenmoment wird reduziert, bis diese kein Moment mehr abgibt. Alternativ könnte die Betriebsstrategie des Fahrzeugs eine Lastpunktanhebung über die E-Maschine vorgeben. Dabei wird die nicht für den Antrieb erforderliche überschüssige mechanische Energie der VKM, über den Generator in elektrische Energie umgewandelt und in der Batterie zwischengespeichert. [1] Eine weitere Möglichkeit wäre, dass die EM die VKM, z.B. in einem Beschleunigungsvorgang weiterhin unterstützt und der Fahrerwunsch von VKM und EM erfüllt wird.

### 3.2.2 Schlepstart

Im Folgenden wird der bereits in Kapitel 2.2 erwähnte VKM-Zustart über die Trennkupplung detailliert erläutert. Bevor der Motorstartvorgang eingeleitet wird, fährt das Fahrzeug rein elektrisch und die Trennkupplung K0 ist geöffnet. Abbildung 5 zeigt die beim Schlepstart relevanten Drehmoment- und Drehzahlverläufe. Der Motorstart kann dabei in die mit 1-5 markierten Abschnitte unterteilt werden.



**Abbildung 5: Relevante Drehzahlen und Momente während des Schlepstarts. Bereich 1 kennzeichnet den Abschnitt KUEB öffnen und Drehzahlregelung EM, Bereich 2 das Schließen der K0 auf Reibmoment, Bereich 3 das Öffnen der K0 auf ein geringeres Niveau und Motorhochlauf, Bereich 4 das Schließen von K0 und KUEB und Bereich 5 die Momentenverrampung und das Beenden der EM Drehzahlregelung**

#### **Bereich 1 – Öffnen der KUEB und Drehzahlregelung EM:**

Am Beginn des Schlepstarts wird vom Getriebe die Steuerung der Wandlerüberbrückungskupplung (KUEB) an die Motorstartsteuerung übergeben. Die KUEB wird mit einem definierten Gradienten geöffnet. Die Höhe des Gradienten hängt von Getriebeeingangsdrehzahl und Getriebeeingangsmoment ab. Je größer die Eingangsdrehzahl und das Eingangsmoment, desto größer der Gradient für die Schlupfaufweitung der KUEB. Das garantiert ein schnelles Öffnen der Überbrückungskupplung bei hohen Leistungsanforderungen.

Gleichzeitig mit dem Öffnen der KUEB erhöht sich die E-Maschinendrehzahl. Damit werden die Leistungsverluste, die nun über den Wandler entstehen, ausgeglichen und eine Verringerung der Fahrzeuggeschwindigkeit verhindert.

Nachdem die Wandlerüberbrückungskupplung so weit geöffnet ist, dass sie kein Drehmoment mehr überträgt, geht die E-Maschine in Drehzahlregelung. Damit wird sichergestellt, dass sich die Fahrzeuggeschwindigkeit während des im nächsten Abschnitt (Bereich 2) stattfindenden Anreißvorgangs nicht reduziert.

Die Zieldrehzahl für die Drehzahlregelung wird über ein Kennfeld vorgegeben und hängt von der Turbinendrehzahl des Drehmomentwandlers, die der Getriebeeingangsdrehzahl entspricht, und dem Fahrerwunschloment ab.

### **Bereich 2 – K0 auf definiertes Reibmoment schließen:**

Mit den 80Nm Reibmoment die an der K0 angelegt werden, um die VKM anzudrehen, wird auch das Losbrechmoment der VKM überwunden. Unter dem Losbrechmoment versteht man die Haftreibungsgrenze des Motors [5]. Die Höhe des Reibmoments hat zudem Einfluss auf die für das Andrehen des Motors benötigte Zeitspanne.

Der Gradient mit dem das Reibmoment angelegt wird, hängt vom Fahrerwunschloment ab. Je höher das Fahrerwunschloment, umso höher ist der Schließgradient und umso schneller wird das Losbrechmoment überwunden. Nach dem Überwinden des Losbrechmoments, wird die VKM von der EM angeschleppt. Bereich 2 ist bei hohem Fahrerwunsch also schneller abgeschlossen. Der Fahrerwunsch hat damit direkten Einfluss auf die Motorstartdauer.

Die E-Maschine, die sich in Drehzahlregelung befindet, regelt das durch das Anlegen des Reibmoments zusätzlich in den Antriebsstrang eingebrachte Moment selbstständig ein.

### **Bereich 3 – K0 auf geringeres Niveau öffnen und Motorhochlauf:**

Ab ca. 280 U/min erfolgt die erste Einspritzung und die Trennkupplung wird wieder auf ein geringeres Niveau geöffnet. Die VKM-Drehzahl muss diese Zieldrehzahl mit einem bestimmten Gradienten überschreiten. Damit wird sichergestellt, dass der Motor nicht nur leicht angedreht, sondern wirklich angerissen wurde. Während dem Öffnen der Kupplung wird der Hochlauf des Verbrennungsmotors noch bis zu einer Drehzahl von ca. 600 U/min deutlich vom Moment das über die Kupplung übertragen wird unterstützt. Der PI-Regler führt nun, wie auch beim Ritzelstart, die VKM-Drehzahl an die E-Maschinendrehzahl heran.

Durch das Öffnen auf ein geringeres Niveau soll die Reibarbeit und der damit verbundene Energieeintrag in die Trennkupplung reduziert werden. Diese ist abhängig von Differenzdrehzahl, Reibmomentniveau und der Zeit.

Die Kupplung wird dabei nicht ganz geöffnet, damit sie, wenn sich Drehzahlsynchronität eingestellt hat, rasch wieder schließen kann. Das erneute Öffnen der Kupplung und das Halten auf niedrigem Niveau wird über ein vom Fahrerwunschkmoment und der VKM-EM-Differenzdrehzahl abhängiges Kennfeld gesteuert. Je größer die Differenzdrehzahl, umso weiter wird die Kupplung geöffnet.

Am Beginn des Motorhochlaufs, bei noch großer Differenzdrehzahl wird die Kupplung also auf ein geringeres Niveau geöffnet. Nähert sich die VKM-Drehzahl der EM-Drehzahl an, wird sie wieder auf ein höheres Niveau geschlossen.

Je höher das Fahrerwunschkmoment, umso weniger wird die Kupplung geöffnet. Damit wird die Dynamik während eines Motorstarts bei einer hohen Lastanforderung des Fahrers verbessert.

#### **Bereich 4 – K0 und KUEB schließen:**

Herrscht, laut der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Definition, Drehzahlsynchronität, wird die Trennkupplung vollständig geschlossen. Auch beim Schlepstart ist ein Unterbrechen des Schließvorgangs aufgrund der in Kapitel 3.2.1 erläuterten Bedingungen möglich.

Gleichzeitig mit dem Schließvorgang der K0 beginnt auch der Schließvorgang der KUEB. Je höher der eingelegte Gang und das vom Fahrer geforderte Moment, desto schneller schließt die KUEB. Wird das Schließen der Trennkupplung unterbrochen, unterbricht auch der Schließvorgang der Wandlerüberbrückungskupplung. Am Ende des Vorgangs wird die Steuerung der KUEB wieder an das Getriebe übergeben.

#### **Bereich 5 – Momentenverrampung und Beenden der E-Maschinen-Drehzahlregelung:**

Der Momentenverrampungsvorgang läuft bei Schlepstart und Ritzelstart nach derselben Methodik ab. Das VKM-Moment wird an das Fahrerwunschkmoment herangeführt, gleichzeitig wird das von der E-Maschine übertragene Moment reduziert. Die genauen Kriterien und der detaillierte Ablauf wurden bereits in Kapitel 3.2.1 beschrieben.

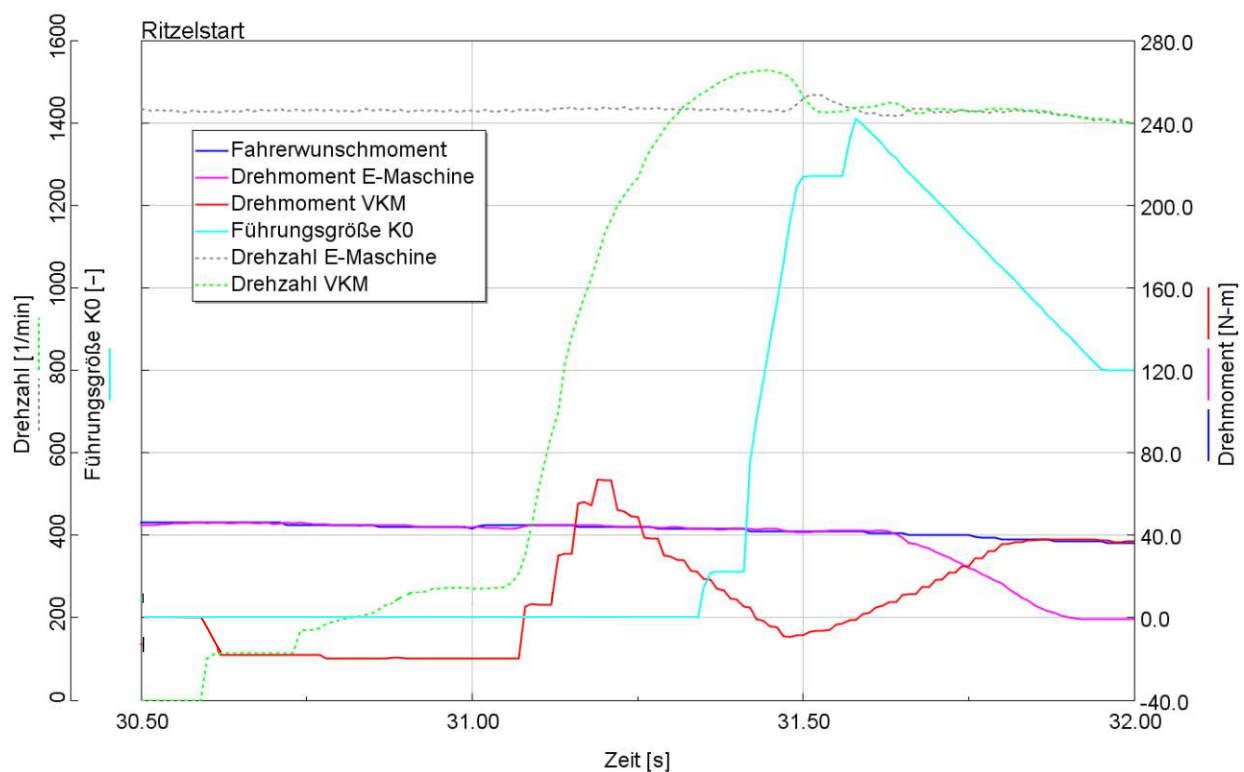
Die Drehzahlregelung der E-Maschine wird beendet und der Motorstartvorgang ist abgeschlossen.

## 4 Basisdaten zur Abstimmung des Simulationsmodells

Als Grundlage für die Abbildung der Motorstartmethodik und zum Abgleich mit den Ergebnissen aus dem Simulationsmodell, dienen vom Projektpartner durchgeführte Messungen. Es wurden Messungen für den Ritzelstart und für den Schleppstart bei konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit durchgeführt. Diese beinhalten alle für die Abbildung der Motorstartmethodik relevanten Messsignale und werden im Folgenden kurz erläutert.

### Ritzelstart

Der Motorstart wurde bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit von 61 km/h durchgeführt. Bis zur Momentenverrampung wird das Fahrerwunschloment von der E-Maschine erfüllt. Abbildung 6 zeigt die Ritzelstartmessung.



**Abbildung 6: Messergebnis Ritzelstart, relevante Drehzahlen und Momente**

Der Verbrennungsmotor wird vom Ritzelstarter angedreht und befindet sich im Schleppbetrieb. In der dargestellten Messung benötigt der Ritzelstarter für diesen Vorgang länger als üblich, da in dieser Messung beispielhaft der Starterstrom begrenzt wurde. Anschließend baut sich das Verbrennungsmotormoment auf und seine Drehzahl wird an die der E-Maschine herangeführt.



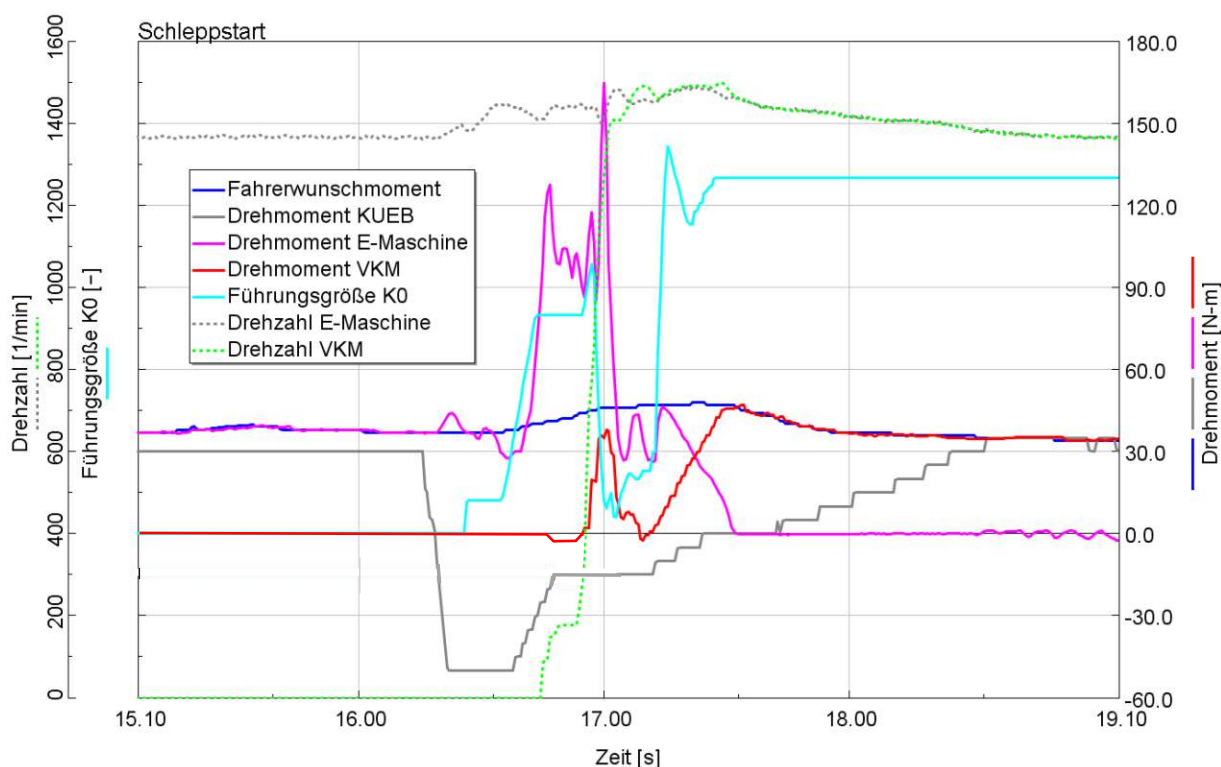
Drehzahlsynchronität ist hergestellt und die Kupplung beginnt zu schließen. Das dargestellte Kupplungssignal (Führungsgröße K0) ist proportional zum Ansteuerdruck der Kupplung. Am Verlauf des Signals lässt sich erkennen, dass zu Beginn des Schließvorgangs Druck angelegt und dann die Kupplung geschlossen wird. Am weiteren Signalverlauf wird ersichtlich, dass der Schließvorgang kurz unterbrochen und dann wieder fortgesetzt wird. Dies geschieht, weil während des Schließvorgangs die in Kapitel 3.2.1 erläuterte Bedingung für Drehzahlsynchronität verletzt wurde. Nachdem die Kupplung vollständig geschlossen ist, wird der Ansteuerdruck nur soweit reduziert, dass an ihr kein Schlupf mehr entsteht.

Ist die Kupplung geschlossen und der Momentenverrampungsvorgang abgeschlossen, wird von dieser nur das Moment des Verbrennungsmotors übertragen.

Am Ende des Motorstartvorgangs, wird das Fahrerwunschmoment alleine von der VKM erfüllt und die E-Maschine überträgt kein Moment mehr.

### **Schleppstart**

Der Schleppstart wurde bei einer Konstantfahrt von 61 km/h durchgeführt. Das Fahrerwunschmoment wird zuvor nur von der E-Maschine erfüllt. Abbildung 7 zeigt die Schleppstartmessung.



**Abbildung 7: Messergebnis Schleppstart, relevante Drehzahlen und Momente**

Am Verlauf des KUEB-Moments lässt sich erkennen, dass das übertragene Moment knapp unter dem Fahrerwunschemoment liegt. Die Differenz zwischen den Momenten ergibt sich, weil an der KUEB ein Mikroschlupf ( $\pm 0-5$  U/min) zugelassen wird. Damit wird der Komfort beim raschen Öffnen der KUEB im Motorstartvorgang verbessert.

Der Startvorgang beginnt mit dem Öffnen der KUEB. Das Signal, dass das von der KUEB übertragene Moment darstellt, ist ein im Steuergerät berechneter Wert. Der negative Verlauf des KUEB-Moments stellt das Entleeren des hydraulischen Systems dar. Ist dieses entleert, wird von der KUEB kein Moment mehr übertragen. Sie wird nur soweit entleert, dass beim erneuten Schließen eine schnelle Reaktion und ein schneller Momentenaufbau möglich sind.

Am E-Maschinendrehzahlverlauf lässt sich erkennen, dass sich beim Öffnen die Drehzahl der E-Maschine erhöht. Ist die KUEB geöffnet, geht die E-Maschine in Drehzahlregelung.

Die Kupplung K0 schließt auf ein konstantes Reibmoment und der Drehzahlregler regelt an der E-Maschine das zusätzliche Moment ein. Das von der E-Maschine zu erfüllende Moment setzt sich aus dem Fahrerwunschemoment und dem an der Trennkupplung angelegten Moment zusammen.

Der schwankende Verlauf des E-Maschinenmoments ergibt sich, weil das von der K0 real übertragene Moment leicht variiert. Nach dem Motorhochlauf sind VKM- und EM-Drehzahl synchron. Am Signalverlauf der K0-Führungsgröße lässt sich erkennen, dass die Kupplung schließt. Das hydraulische System der KUEB wird wieder gefüllt und sie schließt ebenfalls.

Am Ende des in Abbildung 7 dargestellten Schlepstartvorgangs, wird das Fahrerwunschemoment alleine von der VKM erfüllt.



## 5 Simulationsmodell

*GT-Suite* ist eine, von *Gamma Technologies* speziell für die Automotive-Anwendung entwickelte Simulationsumgebung. Sie eignet sich unter anderem zum Aufbau von detaillierten Verbrennungsmotor- und Gesamtfahrzeugmodellen.

Fertige Bausteine, sogenannte Templates, ermöglichen den raschen Aufbau von Fahrzeuglängsdynamikmodellen. Für einzelne Fahrzeugkomponenten wie zum Beispiel Verbrennungsmotor, Getriebe, Reifen, etc., gibt es vorgefertigte Templates. Diese lassen sich damit vereinfacht abbilden. Ist die Detailtiefe einer Komponente nicht ausreichend, kann diese, wieder über entsprechende Templates, exakter modelliert werden. Der Aufbau des Simulationsmodells und die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen erfolgten mit *GT-Suite v2016*.

### 5.1 Längsdynamikmodell

Als Grundlage für die Erstellung des Fahrzeugmodells diente das in Kapitel 3.1 erläuterte Fahrzeug mit P2 –Hybridantriebsstrang.

Bei der Modellierung wurde darauf geachtet, dass der Motorstartvorgang zu jedem Zeitpunkt während der Fahrt aus dem rein elektrischen Betrieb heraus erfolgen kann. Das Kriterium zur Einleitung des Motorstarts kann somit im Simulationsmodell beliebig festgelegt werden. In Zukunft kann so das Modell um eine Betriebsstrategie erweitert werden, die vorgibt wann der Motorstart erfolgt. Wie bereits in Kapitel 3.2 erläutert, können für die Auslösung eines Motorstarts unterschiedliche Faktoren verantwortlich sein.

Das Modell wurde momentengeführt aufgebaut. Sowohl an den Verbrennungsmotor als auch an die E-Maschine wird eine Momentenanforderung gestellt. Diese geben dann ein Moment ab, wobei das maximal abgegebene Drehmoment entsprechend der Drehmomentkennlinien drehzahlabhängig limitiert ist.

Die wesentlichen Bestandteile des P2-Hybridantriebsstrangs sind der Verbrennungsmotor, die E-Maschine, die HV-Batterie, die Trennkupplung K0, der Wandler mit Überbrückungskupplung und das 9-Gang Automatikgetriebe. Diese Hauptkomponenten, der Ritzelstarter und auch der Fahrzeugaufbau wurden durch die in *GT-Suite* vorhandenen Templates abgebildet und entsprechen bedatet.

Die für den Motorstartvorgang notwendigen Regelungs- und Steuerungsvorgänge wurden mit den in der Simulationsumgebung vorhandenen Werkzeugen abgebildet.

Die zur Bedatung des Fahrzeugmodells und zur Abbildung der Motorstartvarianten notwendigen Größen, Kennlinien und Kennfelder wurden vom Projektpartner zur Verfügung gestellt.

### 5.1.1 Fahrzeugaufbau

Der Fahrzeugaufbau und die Komponenten wie Reifen, Fahrzeugachsen und Hinterachsdifferenzial wurden mit den in GT-Suite vorhandenen Templates modelliert. Tabelle 1 zeigt einige für die Modellierung des Fahrzeugaufbaus notwendige Fahrzeugdaten. Mit Hilfe der Ausrollkoeffizienten wird im Simulationsmodell die Fahrwiderstandskurve berechnet.

**Tabelle 1: relevante Fahrzeugdaten**

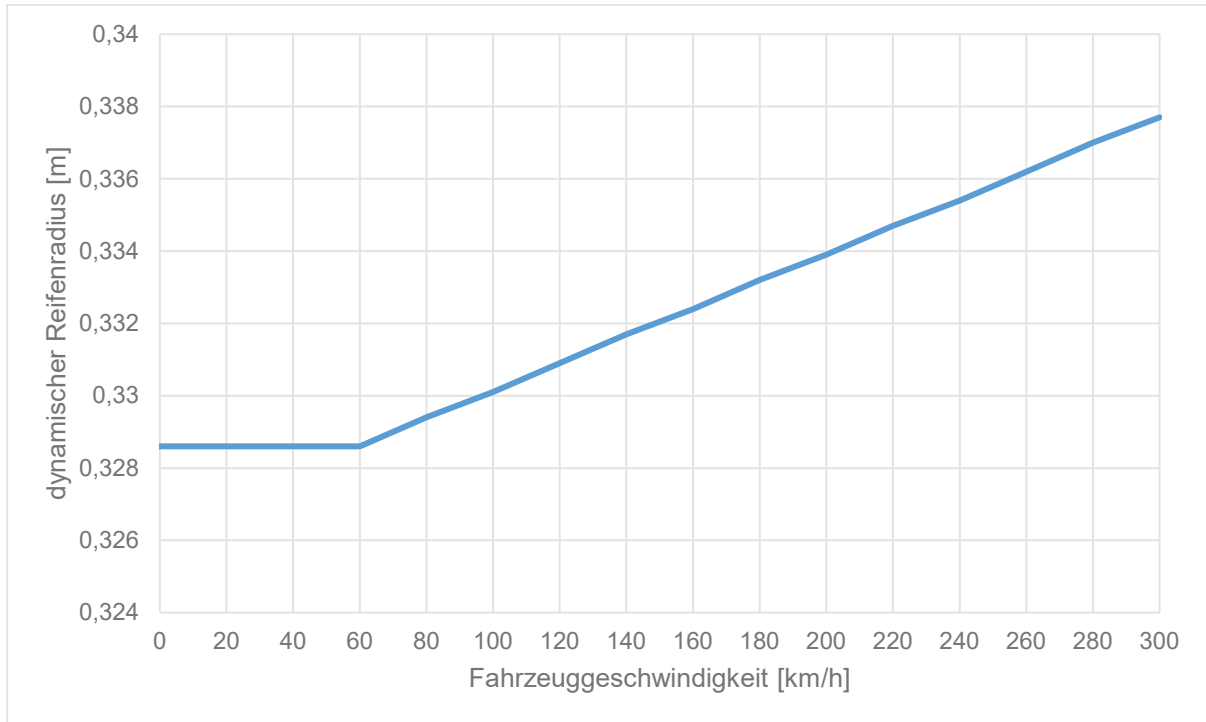
relevante Fahrzeugdaten		
Fahrzeugmasse inkl. Fahrer	[kg]	2040
Radstand	[m]	2.874
Abstand Massenmittelpunkt Hinterachse	[m]	1.5
Ausrollkoeffizient A	[N]	117
Ausrollkoeffizient B	[Nh/km]	1
Ausrollkoeffizient C	[Nh <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> ]	0.0226

Diese wird mit Hilfe folgender Gleichung 1 [22] ermittelt:

$$F=A+B*v+C*v^2 \quad (1)$$

- F Gesamtfahrwiderstand [N]
- A Ausrollkoeffizient [N]
- B Ausrollkoeffizient [Nh/km]
- C Ausrollkoeffizient [Nh<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>]
- v Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]

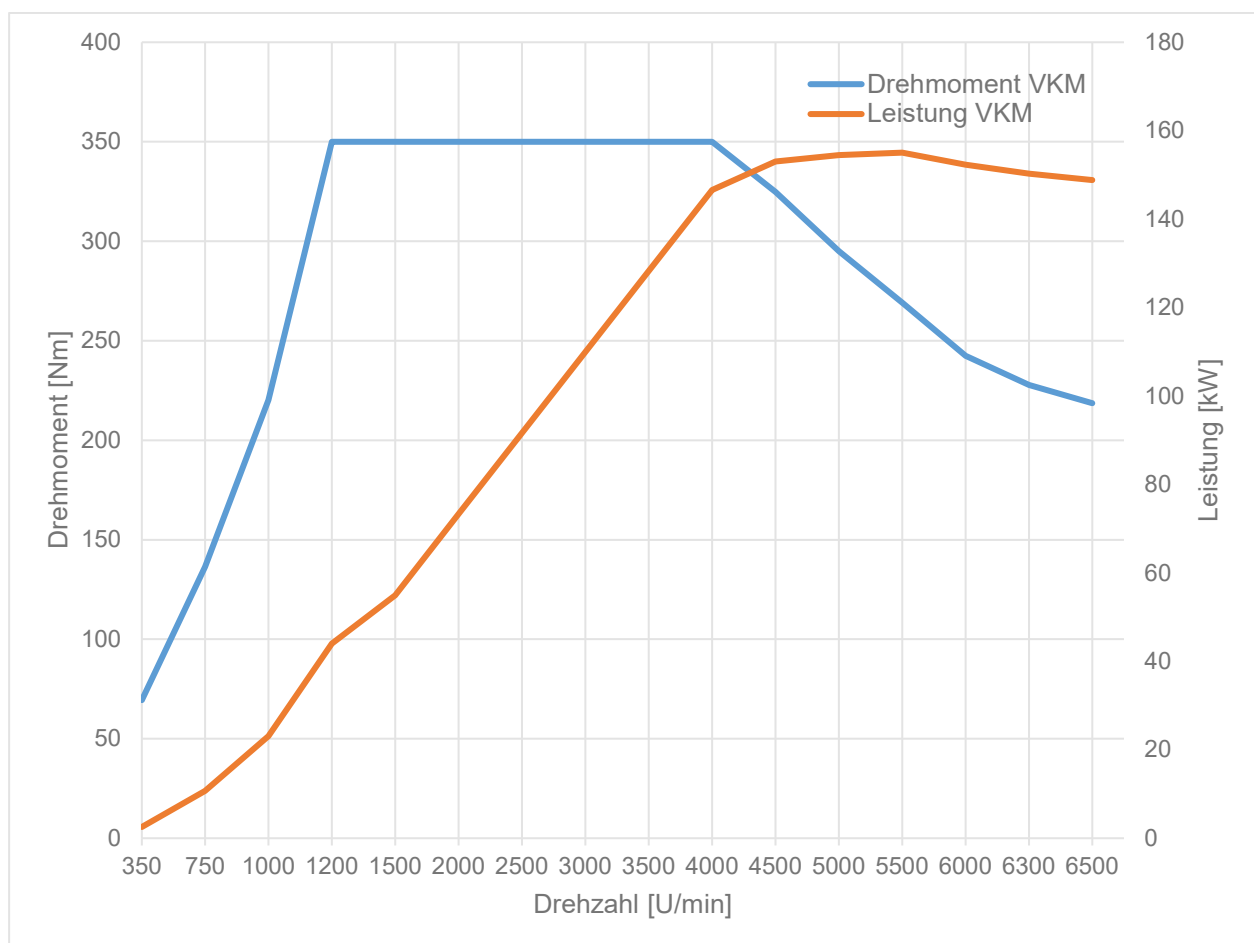
Abbildung 8 zeigt den von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängigen dynamischen Reifenrollradius.



**Abbildung 8: dynamischer Reifenrollradius über der Fahrzeuggeschwindigkeit**

## 5.1.2 Verbrennungsmotor

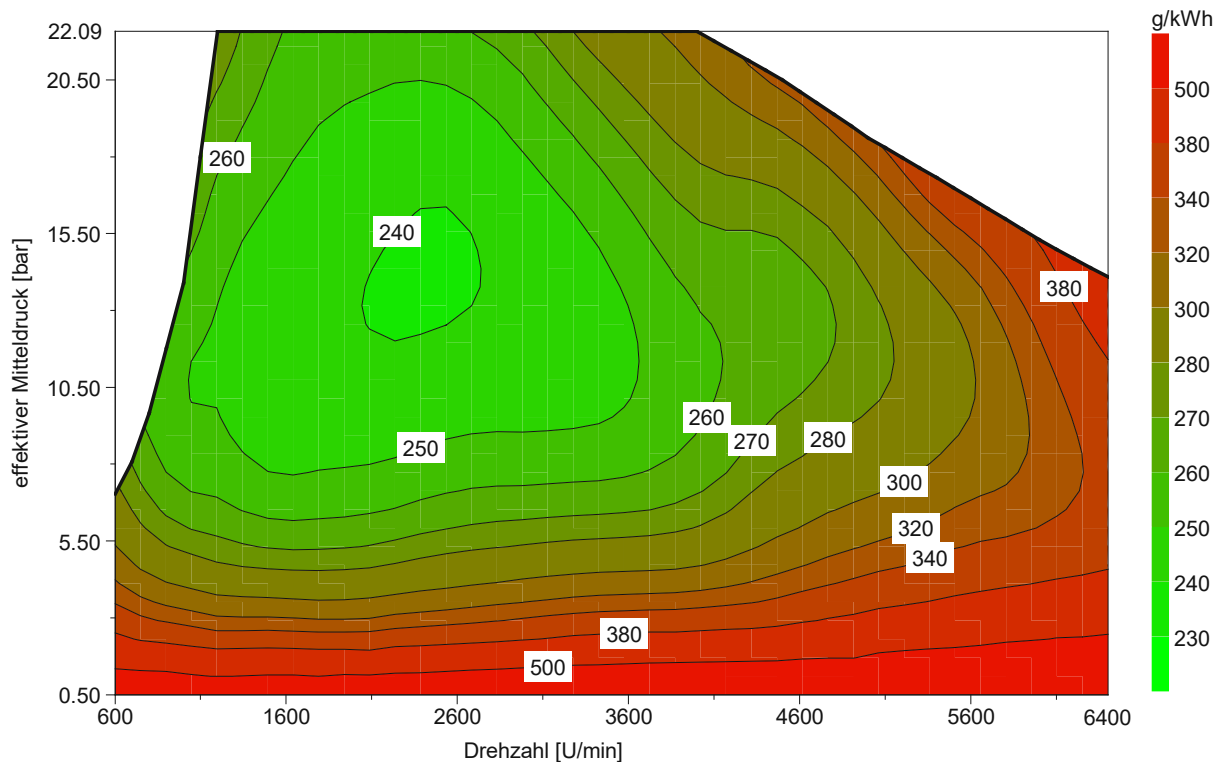
Die bereits in Kapitel 3.1.1 erläuterte VKM wurde mit einem kennfeldbasierten Motormodell abgebildet. Das aufgrund des Turboladerhochlaufs für einen aufgeladenen Ottomotor typische Ansprechverhalten wurde, infolge des geringen Drehmomentbedarfs während des VKM-Drehzahlhochlaufs im Motorstartvorgang, nicht modelliert. Die entsprechende Drehmomentkennlinie, das Verbrauchskennfeld und der Reibmomentverlauf des Motors wurden hinterlegt. Abbildung 9 zeigt den Verlauf des Motormoments und der Motorleistung über der Drehzahl. Der Verbrennungsmotor kann bereits ab einer Drehzahl von 1200 U/min sein maximales Moment abgeben. Dieses ist bis zu einer Drehzahl von 4000 U/min abrufbar.



**Abbildung 9: Drehmoment und Leistung der VKM über der Drehzahl**

Eine wesentliche Größe für die genaue Abbildung des Motorstartvorgangs ist das Reibmoment des Motors. Es hat direkten Einfluss auf die Motorstartdauer. Da das Reibmoment üblicherweise nur bis zur Leerlaufdrehzahl vermessen wird, wurde die Reibmomentkennlinie im darunterliegenden Drehzahlbereich extrapoliert. Zudem wurde im Motormodell ein exakter Wert für das Motorträgheitsmoment hinterlegt, da dieses neben dem Reibmoment wesentlichen Einfluss auf das Motorhochlaufverhalten und die Motorstartdauer hat.

Abbildung 10 zeigt das Kraftstoffverbrauchskennfeld des Verbrennungsmotors in g/kWh. Der Kraftstoffverbrauch ist dabei abhängig von Last und Drehzahl. Es lässt sich der für einen aufgeladenen Ottomotor typische Verlauf, mit niedrigem spezifischem Verbrauch bei mittlerer/ hoher Last und niedriger Drehzahl erkennen.



**Abbildung 10: Kraftstoffverbrauchskennfeld der VKM**

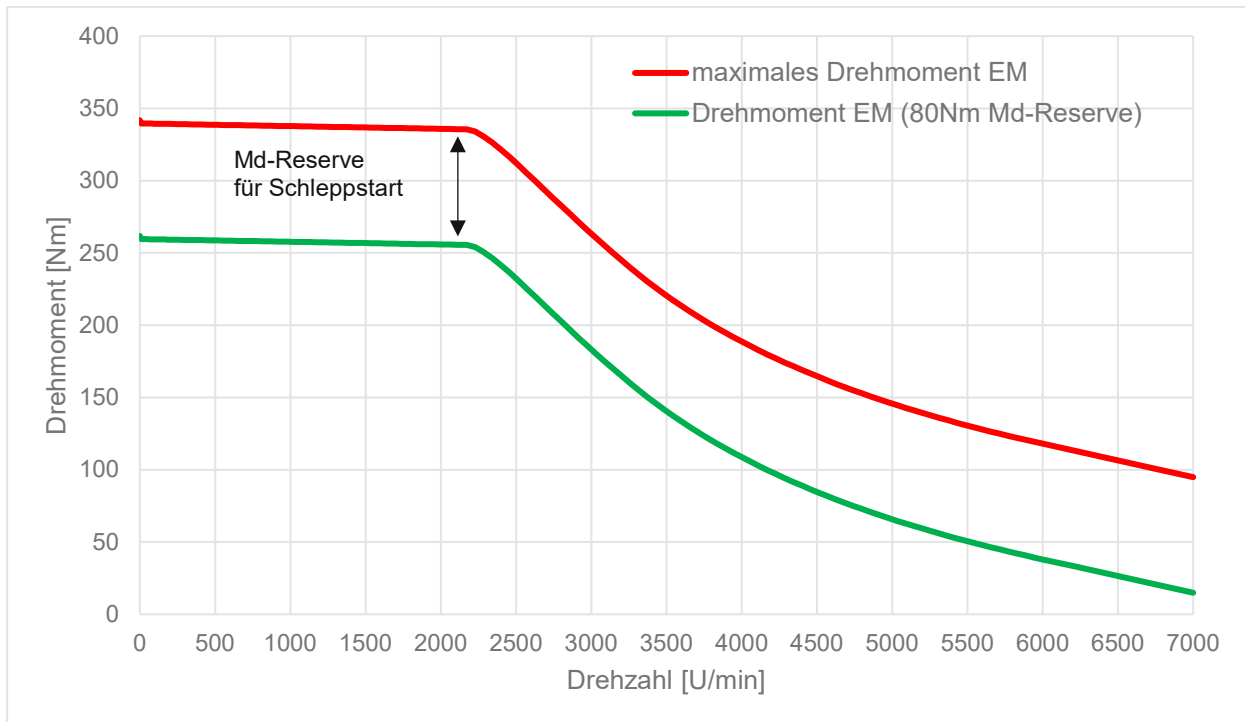
### 5.1.3 E-Maschine

Die E-Maschine wurde ebenfalls kennfeldbasierend abgebildet, somit konnten Wirkungsgradkennfeld und Drehmomentkennlinie hinterlegt werden. Die für die Untersuchungen verwendete E-Maschine weicht von den der in Kapitel 3.1.2.2 erläuterten EM ab. Sie hat ein maximales Drehmoment von 340Nm und eine Peak-Leistung von fast 90kW.

Abbildung 11 zeigt den für eine permanent erregte Synchronmaschine typischen Drehmomentverlauf. Über das Drehzahlband von 0-2200 U/min weist sie einen nahezu konstanten Verlauf des Maximaldrehmoments auf. Darüber hinaus reduziert sich das von der E-Maschine abrufbare Moment bis zur Maximaldrehzahl von 7000 U/min stetig.

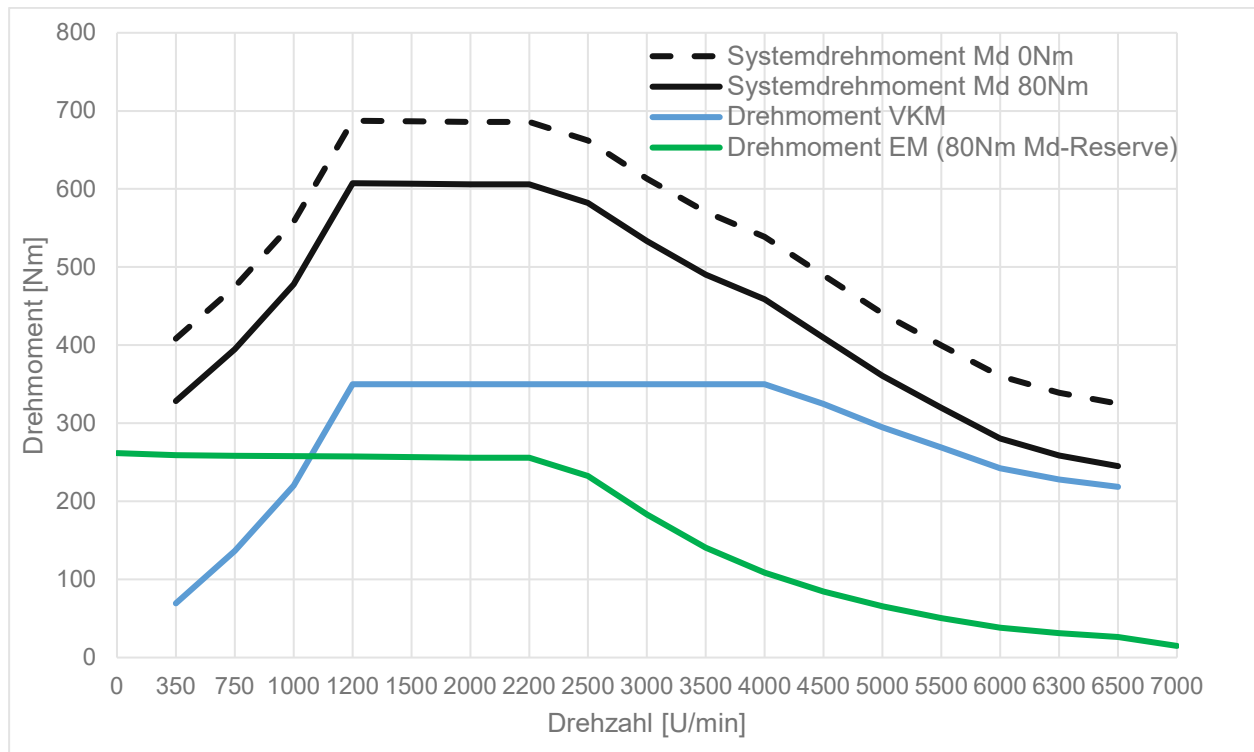
Wie bereits in Kapitel 3.2.2 erläutert, wird das zum Anschleppen der VKM an der Trennkupplung angelegte Reibmoment von einem Regler über die E-Maschine eingeregelt. Damit wird ein spürbarer Ruck im Fahrzeug beim Anreißen des Verbrennungsmotors verhindert. Da in jeder Fahrsituation ein Schlepstart möglich sein

soll, wird von der EM ein Reservemoment (Md-Reserve) von 80Nm vorgehalten. Dieser Bereich bleibt während der rein elektrischen Fahrt ungenutzt. Hält man diese Reserve nicht vor, reduziert sich während des Startvorgangs das Moment am Abtrieb deutlich. In Abbildung 11 ist die maximale Drehmomentkennlinie und die reduzierte Drehmomentlinie der E-Maschine ersichtlich.



**Abbildung 11: Maximale und reduzierte Drehmomentkennlinie der E-Maschine über der Drehzahl**

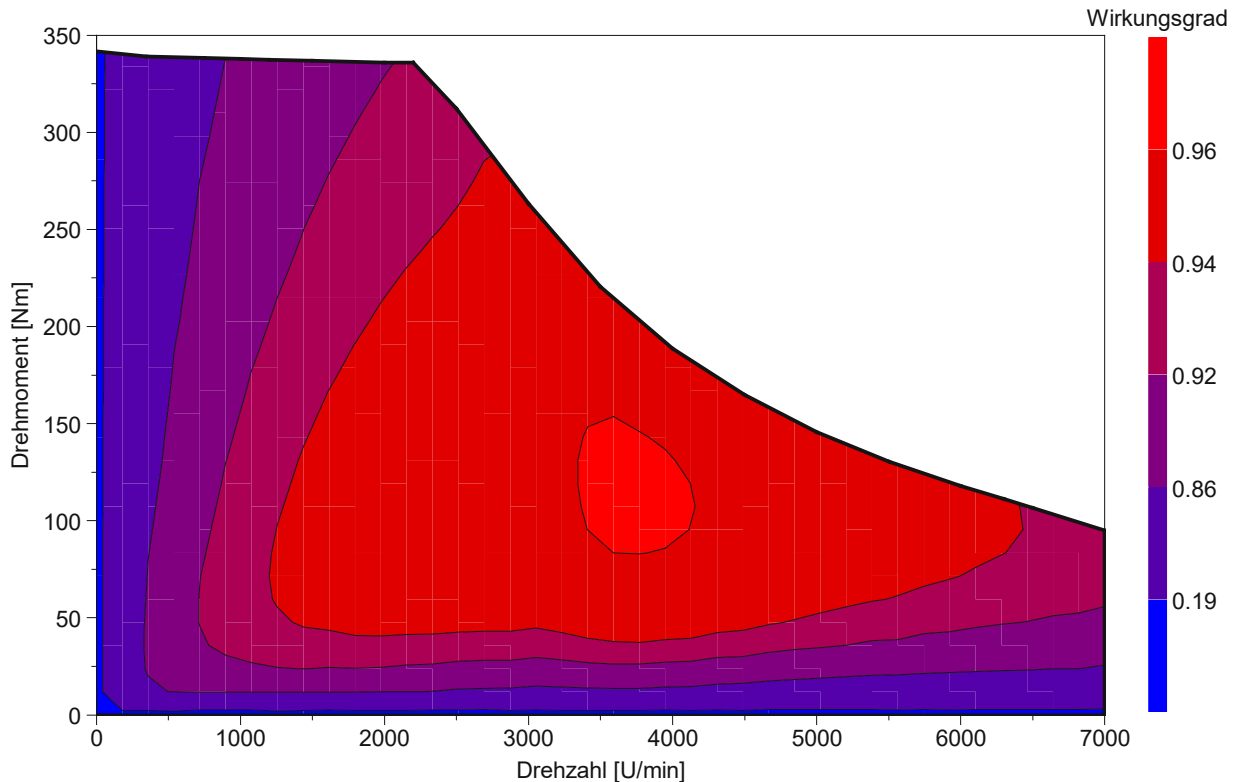
Durch die Kombination von E-Maschine und Verbrennungsmotor ergibt sich im Fahrzeug ein maximal mögliches Systemdrehmoment von fast 690Nm. Das maximale Drehmoment ist bis zu 2200 U/min abrufbar. In [Abbildung 12](#) ist, unter anderem, das limitierte und das theoretisch mögliche Summenmoment ersichtlich.



**Abbildung 12: Verbrennungsmotormoment, E-Maschinenmoment, begrenztes und unbegrenztes Systemdrehmoment über der Drehzahl**

Abbildung 13 zeigt das Gesamtwirkungsgradkennfeld der E-Maschine inklusive der verbauten Leistungselektronik. Es ist für die in Kapitel 6 durchgeführten Untersuchungen, bei denen unter anderem der Energieverbrauch der EM beurteilt wurde, wesentlich.

Der Wirkungsgrad gibt dabei das Verhältnis von abgegebener mechanischer Leistung zu zugeführter elektrischer Leistung an. Die E-Maschine besitzt über einen breiten Kennfeldbereich einen hohen Wirkungsgrad. Die Schaltstrategie des Getriebes ist so abgestimmt, dass sich die Drehzahl der E-Maschine im rein elektrischen Betrieb immer in einem wirkungsgradoptimalen Bereich befindet.



**Abbildung 13: Wirkungsgradkennfeld der EM inkl. Leistungselektronik, gibt den elektromechanischen Umwandlungswirkungsgrad in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl an**

### 5.1.4 HV-Batterie

Die bereits in Kapitel 3.1.3 erwähnte Hochvoltbatterie wurde in einem vom Projektpartner zur Verfügung gestellten *MATLAB-Simulink*-Modell abgebildet und in das in dieser Arbeit erstellte Simulationsmodell eingebunden. Nach der Einbindung läuft die Simulation wie gewohnt über *GT-Suite*.

### 5.1.5 Hybridgetriebe

Wie bereits in Kapitel 3.1.2 detaillierter erläutert, besteht das Hybridgetriebe aus dem 9-Gang Wandlerautomatikgetriebe und einem Hybridtriebkopf der die Trennkupplung und die in den Kapiteln 3.1.2.2 und 5.1.3 beschriebene E-Maschine beinhaltet.

#### Die Trennkupplung

Die Trennkupplung wurde mit dem in *GT-Suite* vorhandenen Template für Einscheibentrockenkupplungen abgebildet. Tabelle 2 zeigt die für die Bedienung notwendigen Kenndaten der Kupplung.



**Tabelle 2: Daten Trennkupplung**

Trennkupplung K0		
mittlerer Reibradius	[mm]	75
maximal übertragbares Drehmoment	[Nm]	400

Für das Schließen der K0 während des Startvorgangs wurde eine entsprechende Steuerung modelliert.

In *GT-Suite v2016* kann zwischen zwei Reibmodellen gewählt werden. Zum einen steht das Coulomb-Reibmodell zur Verfügung zum anderen das Lund-Grenoble (LuGre)-Reibmodell. Während der Simulation wird damit der momentane Reibkoeffizient berechnet.

Das Coulomb-Modell kann nur gemeinsam mit einem sogenannten FrictionConstraint-Object eingesetzt werden. Dieses stellt sicher, dass bei einem Kupplungsgschlupf unter 5 U/min die Kupplung von einem Zeitschritt auf den nächsten geschlossen wird, egal in welcher Position sich der Kupplungsaktuator gerade befindet. Das geschieht, um die Simulationszeit zu verkürzen.

Wie in Kapitel 3.2 detailliert erläutert, wird die VKM-Drehzahl während des Motorstartvorgangs an die E-Maschinendrehzahl herangeführt. Es kommt zu einem Überschwingen der VKM-Drehzahl und erst danach wird die Trennkupplung geschlossen. Um diesen Vorgang abzubilden ist das Coulomb-Reibmodell ungeeignet, weil der Kupplungsschlupf (=Differenzdrehzahl zwischen VKM und EM), schon bevor die Trennkupplung schließen soll, unter 5 U/min liegt. Es musste deshalb das LuGr-Modell verwendet werden.

Das LuGre Modell basiert auf der Annahme, dass ineinandergreifende Borsten die Reibung zwischen zwei aneinander reibenden Körpern übertragen. Diese Borsten können über die Borstensteifigkeit und den Dämpfungskoeffizienten der Borsten entsprechend parametrisiert werden. Wird der Dämpfungskoeffizient zu gering gewählt, schwingt das von der Kupplung übertragene Moment nach, wird er zu groß gewählt, ist das System überdämpft und es treten Laufzeitprobleme auf. Die für den Anwendungsfall optimalen Parameter wurden durch Erprobung ermittelt.

Um die Simulationszeit gering zu halten, wird bei diesem Reibmodell das System für kleine Differenzdrehzahlen (<1 U/min) zu einem Feder-Massesystem reduziert. Beim konkreten Anwendungsfall geschieht das, wenn die VKM-Drehzahl an die EM-Drehzahl

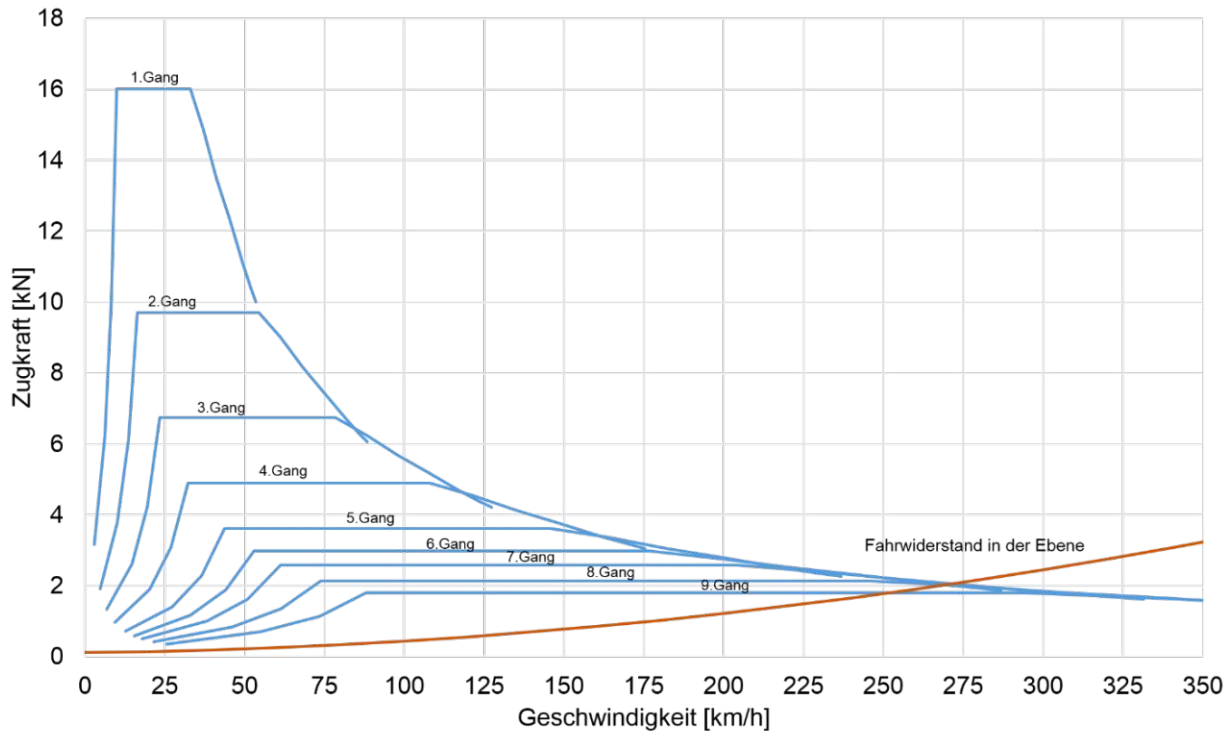
angeglichen wurde. Es ist damit eine realistische Abbildung des Kupplungsmoments während des Schließvorgangs möglich, da sich auch in der Realität das System bei geringer Differenzdrehzahl stabilisieren und bereits annähernd das volle VKM-Moment übertragen würde.

Um den Wärmeeintrag in die Kupplung während des Schließvorgangs untersuchen zu können, wurde das thermische Verhalten der Kupplung über eine thermische Masse abgebildet.

### **Das 9-Gang Automatikgetriebe mit Drehmomentwandler und Überbrückungs-kupplung:**

In Kapitel 3.1.2 wurde das Hybridgetriebe bereits vorgestellt. Die Abbildung in der Simulation erfolgte mit den in GT-Suite vorhandenen Templates für Getriebe und Getriebesteuerung. Die Hoch- und Rückschaltlinien wurden in die Steuerung integriert.

Abbildung 14 zeigt das Zugkraftdiagramm für den verbrennungsmotorischen Betrieb. Die theoretische maximale Fahrzeuggeschwindigkeit liegt bei fast 275km/h und wird im 7.Gang erreicht. Allerdings wurden im dargestellten Zugkraftdiagramm, beim Zugkraftangebot in den einzelnen Gängen, die mechanischen Verluste im Antriebsstrang nicht berücksichtigt. Beim realen, in Kapitel 3.1 erläuterten Fahrzeug, ist die maximale Fahrzeuggeschwindigkeit bei 250 km/h elektronisch abgeregelt.



**Abbildung 14:** Theoretisches Zugkraftdiagramm im rein verbrennungsmotorischen Betrieb bei geschlossener KUEB. Die Zugkraft in den einzelnen Gängen und der Fahrwiderstand sind über der Fahrzeuggeschwindigkeit dargestellt. Beim Zugkraftangebot in den einzelnen Gängen wurden die Verlustmomente im Antriebsstrang nicht berücksichtigt

Tabelle 3 zeigt die Getriebeübersetzung in den einzelnen Gangstufen.

**Tabelle 3:** Getriebeübersetzung in den einzelnen Gangstufen

Getriebeübersetzungen								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5.354	3.243	2.252	1.636	1.211	1	0.865	0.717	0.601

Die Wandlerüberbrückungskupplung wurde ebenfalls über das Einscheibentrockenkupplungsmodell abgebildet. Sie wird von einem mit dem Fahrzeuggetriebe kommunizierenden Controller gesteuert. Findet ein Schaltvorgang statt, öffnet und schließt die Kupplung selbstständig. Für das Öffnen und Schließen der KUEB während des Schlepstartvorgangs wurde eine entsprechende Steuerung modelliert.

Der Drehmomentwandler wurde mit dem in *GT-Suite* vorhandenen TorqueConverter-Template abgebildet. Um den Wandler abzubilden sind zwei Kennlinien notwendig. Einerseits die Kennlinie, die das Wandlerdrehmomentverhältnis über dem Wandlerdrehzahlverhältnis beschreibt. Andererseits die Kennlinie, die die Leistungsziffer des Drehmomentwandlers über dem Wandlerdrehzahlverhältnis beschreibt. Die

Leistungsziffer berechnet sich aus dem Verhältnis Pumpenmoment zu Wurzel der Pumpendrehzahl. Mit diesen beiden Kennlinien ist der Wandler vollständig beschrieben.

### 5.1.6 Ritzelstarter und 12V Batterie

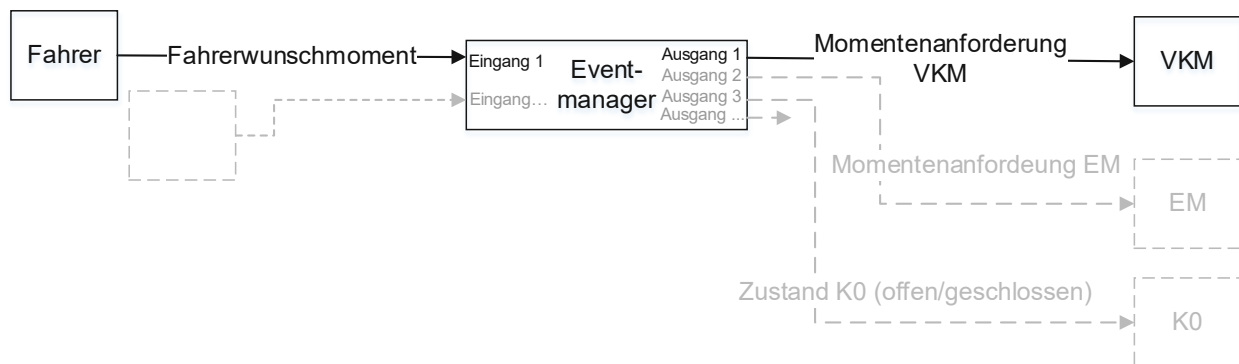
Der Ritzelstarter wurde über ein kennfeldbasierendes Elektromotor-Template abgebildet und die entsprechende Drehmomentkennlinie hinterlegt. Da kein Kennfeld für den elektrischen Leistungsbedarf des Ritzelstarters vorhanden war, wurde der Wirkungsgrad entsprechend Literaturangaben [4] mit  $\eta = 0.75$  angenommen.

Die im 12V Batteriemodell hinterlegten Lade- und Entladekurven und der Verlauf des Innenwiderstands wurde aus der Literatur abgeleitet. [23] [24] Ihr Verlauf wird von der Batterietemperatur, die jedoch konstant gehalten wird und dem Ladezustand der Batterie bestimmt. Für die Batteriekapazität wurde ein typischer Wert von 50Ah angenommen.

## 5.2 Abbildung der Startvarianten

In Kapitel 3.2 wurde die Methodik für den Ritzelstartvorgang und den Schlepstartvorgang bereits detailliert erläutert. Im Folgenden wird beschrieben, wie die Vorgänge in den einzelnen Abschnitten der Motorstartvorgänge modelliert wurden. Um die beiden Startvarianten abzubilden wurden entsprechende Regelungen und Steuerungen entwickelt.

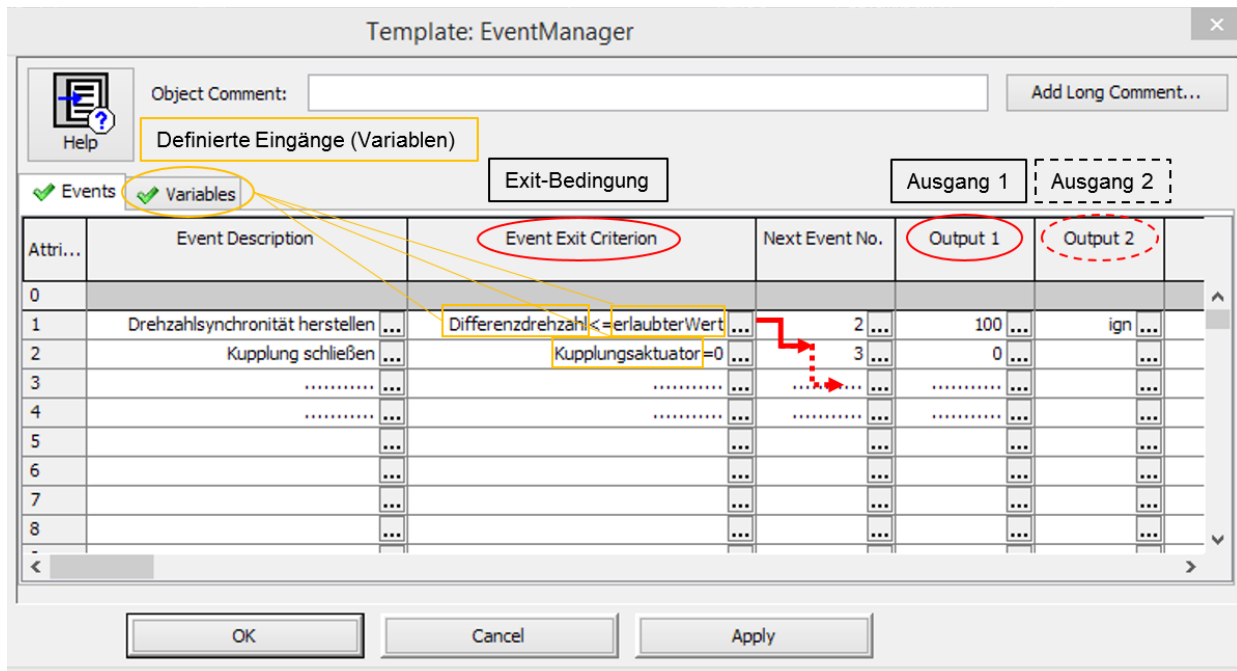
Für beide Startvarianten wurde als zentrale Steuerungskomponente das sogenannte Eventmanager-Template verwendet, das nach dem Prinzip eines endlichen Zustandsautomaten (Finite-State-Machine) funktioniert. Abbildung 15 zeigt die Einbindung des Eventmanagers in die Steuerung des Motorstartvorgangs.



**Abbildung 15: Einbindung des Eventmanagers in die Motorstartsteuerung**

Das Verhalten eines Zustandsautomaten wird durch eine Reihe von endlichen Zuständen beschrieben. Verweilt die Maschine in einem Zustand, werden über die Ausgänge der Maschine Aktionen ausgeführt. Die Eingänge des Automaten und/oder bestimmte Ereignisse, können einen Wechsel zwischen diesen Zuständen bewirken. [25]

Der Eventmanager hat mehrere Ausgänge und beim Wechsel von einem Zustand in den nächsten können, aber müssen sich die Ausgangsgrößen nicht ändern. Um von einem Zustand in den nächsten zu gelangen, muss/ müssen die Bedingung/ -en zum Verlassen des Zustandes erfüllt werden. Die zur Formulierung der Exit-Bedingungen verwendeten Variablen stellen die Eingänge des Eventmanagers dar. Abbildung 16 zeigt den methodischen Ablauf im Eventmanager anhand eines Beispiels.

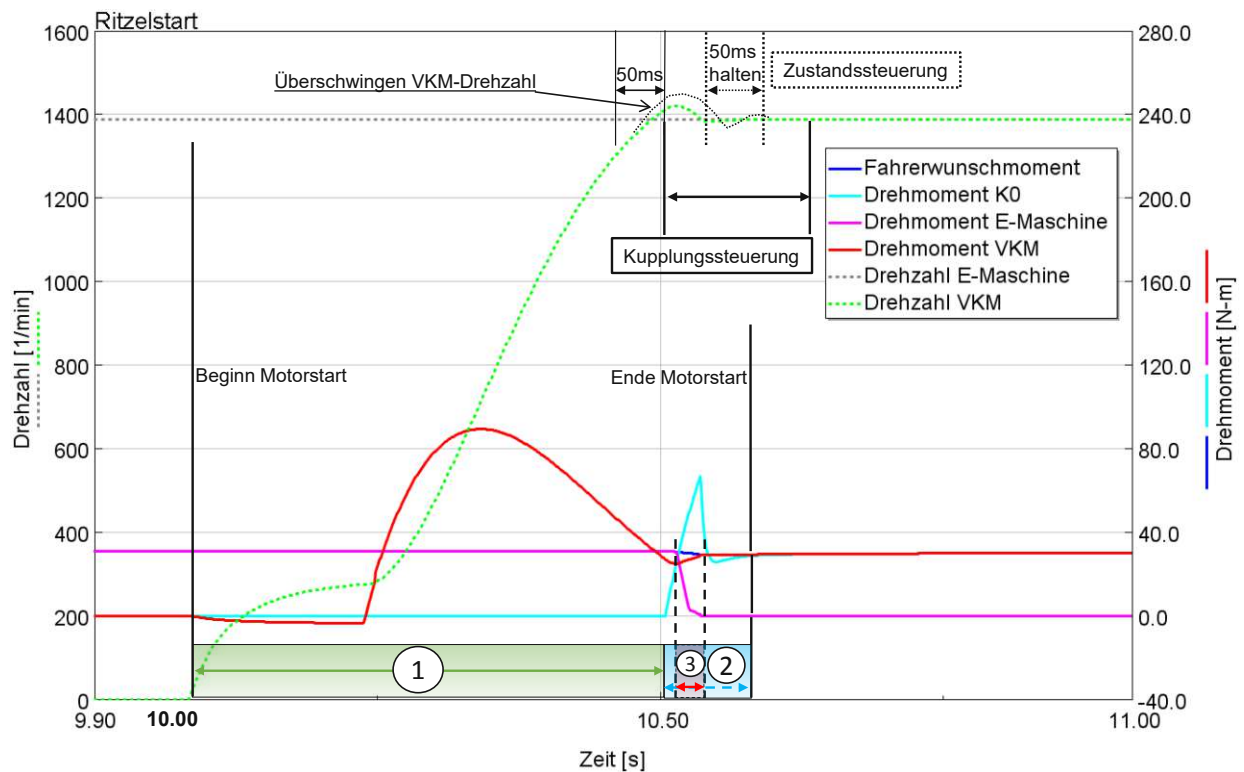


**Abbildung 16: Beispiel zur Methodik im Eventmanager-Template**

Ist während dem Motorstartvorgang die, in Kapitel 3.2.1 erläuterte, Bedingung für Drehzahlsynchronität erfüllt, ist auch gleichzeitig die für diesen Zustand definierte Exit-Bedingung erfüllt und die Maschine wechselt in den nächsten Zustand. In diesem ändert sich unter anderem der Ausgang 1 des Eventmanagers, der für die Aktuatorposition der Trennkupplung zuständig ist. Dieser ändert sich von offen (100) auf geschlossen (0) und die Trennkupplung beginnt zu schließen.

## 5.2.1 Ritzelstart

Die Abbildung 17 zeigt das Simulationsergebnis eines Ritzelstartvorgangs bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit von 61 km/h. Zudem wurde beispielhaft eine höher überschwingende VKM-Drehzahl, bei der die Bedingung für Drehzahlsynchronität verletzt wird, eingezeichnet. Damit kann der Einflussbereich der modellierten Kupplungs- und Zustandssteuerung besser veranschaulicht und im Folgenden verständlich erklärt werden.



**Abbildung 17: Simulationsergebnis Ritzelstart, mit beispielhafter Darstellung einer höher überschwingenden VKM-Drehzahl, zudem sind die Einflussbereiche der modellierten Kupplungssteuerungen dargestellt**

### Bereich 1 – Drehzahlsynchronität herstellen:

#### Der Ritzelstarter

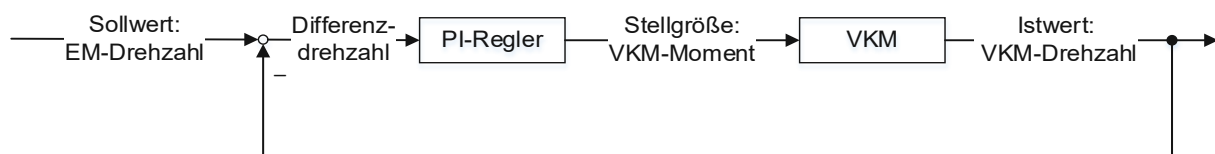
Soll ein Ritzelstart erfolgen, wird im Eventmanager der Impuls zum Motorstart gesetzt. Das modellierte Motorsteuergerät fordert beim Ritzelstarter ein Moment an, dabei wurde das während des Startvorgangs an der Kurbelwelle angelegte Moment auf 210Nm limitiert. Mit zunehmender Starterdrehzahl nimmt das vom Starter abgegebene Moment, seiner Drehmomentkennlinie entsprechend, ab. Deshalb und aufgrund des zunehmenden Motorreibmoments, wird der Drehzahlverlauf der VKM am Beginn vom in Abbildung 17 markierten Bereich 1 wieder flacher.

Die für den Motorstart benötigte elektrische Leistung bezieht der Starter aus der 12V Batterie. Der Ritzelstarter dreht den Verbrennungsmotor bis zu einer Drehzahl von ca. 280 U/min an, die erste Einspritzung erfolgt und der Starter rückt aus.

Das Ausrücken des Ritzelstarters wurde über ein Clutch-Simple-Template modelliert. Dieses Kupplungsmodell unterscheidet nur zwischen geschlossenem und offenem Zustand und verwendet kein Reibmodell. Bei 280 U/min wird der Ritzelstarter, der in der Schwungscheibe des Verbrennungsmotors eingreift, durch das Öffnen der Kupplung abgekoppelt. Das Trägheitsmoment des Ritzelstarters hat somit keinen Einfluss mehr auf den Motorstartvorgang und den Drehzahlhochlauf des Verbrennungsmotors.

### Regler Drehzahlhochlauf

Hat der Verbrennungsmotor eine Drehzahl von 280 U/min erreicht, wird für den weiteren Drehzahlhochlauf, ein entsprechend parametrierter PI-Regler eingesetzt. Die Abstimmung des Reglers erfolgte durch Erproben, wobei die in Kapitel 4 erläuterten Basisdaten als Referenz galten. Der schnelle Hochlauf der VKM-Drehzahl auf Solldrehzahl stand dabei im Fokus. Abbildung 18 zeigt den Regelkreis.



**Abbildung 18: Blockschaltbild Regelkreis VKM-Drehzahlhochlauf**

Die Regelabweichung ist die dynamisch berechnete Drehzahldifferenz. Der Sollwert des Regelkreises ist die E-Maschinendrehzahl, der Istwert die VKM-Drehzahl. Der momentane Stellwert (=Output) des Reglers entspricht dem Motormoment, das zur Reduktion der Drehzahldifferenz aufgebracht werden muss. Die Stellgröße ist dabei, dem Leistungskennfeld der VKM entsprechend, limitiert. Der Regler fordert beim Motor das entsprechende Moment an. Abbildung 19 zeigt den Momentenpfad.



**Abbildung 19: Momentenpfad VKM-Moment**

Die VKM gibt erst nach dem ersten Einspritzvorgang Drehmoment ab. Deshalb wird der Regler erst in diesem Zeitschritt, also bei 280 U/min, durch eine Steuerung aktiviert. Damit wird verhindert, dass der Regler schon ab dem Simulationsbeginn arbeitet und



versucht, die Regelabweichung zu reduzieren. Seine Stellgröße ändert sich erst ab der Aktivierung und der Regler fordert damit erst ab dem Aktivierungszeitpunkt ein Moment beim Verbrennungsmotor an.

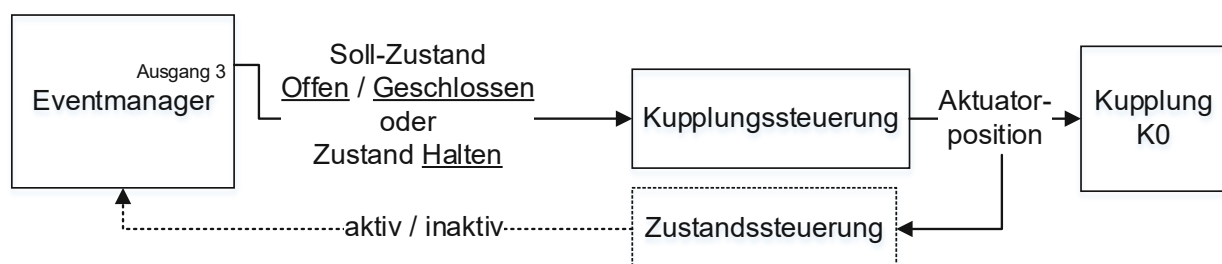
Bis Drehzahlsynchronität erreicht ist, verharrt der Eventmanager im selben Event. Um den Bereich 1 im Motorstartvorgang abzuschließen, muss die entsprechende Exit-Bedingung erfüllt werden. Diese ändert sich dynamisch mit dem Fahrerwunschloment. Ist dieses größer als 20Nm wird Drehzahlsynchronität schon bei einer größeren Differenzdrehzahl erreicht. Nach dem Erfüllen der Bedingung springt der Event-Manager in den nächsten Event.

### **Bereich 2 und 3 – Schließen der Trennkupplung (2) und Momentenverrampung (3):**

#### Schließen der Trennkupplung

In diesem Event ändert sich der Output des Eventmanagers, der die Aktuatorposition der Trennkupplung steuert und der Schließvorgang der Trennkupplung wird eingeleitet. Der Output des Eventmanagers kann den Soll-Zustand Offen (Aktuatorposition 100%), Geschlossen (Aktuatorposition 0%) oder den Zustand Halten einnehmen.

Gibt der Ausgang das Schließen der Kupplung vor, wird dem Kupplungsaktuator die Aktuatorposition (%) der Kupplung während dem Schließvorgang von der **Kupplungssteuerung** vorgegeben. Die Änderungsrate mit der sich die Aktuatorposition von offen auf geschlossen ändert, wird in der Kupplungssteuerung bestimmt. Sie hängt vom in Kapitel 3.2.1 erläuterten Gradienten (Nm/s) ab. Abbildung 20 zeigt den Steuerungsablauf für die Trennkupplung. Der Einflussbereich der Steuerungen während des Motorstarts, ist in Abbildung 17 dargestellt.



**Abbildung 20: Steuerung Trennkupplung Ritzelstart**

Kommt es zu dem in Kapitel 3.2.1 beschriebenen und in Abbildung 17 exemplarisch dargestellten Überschwingen der VKM-Drehzahl, bei dem die Differenzdrehzahl größer als der zulässige Wert ist, wechselt die Änderungsrate mit der der Kupplungsaktuator geschlossen wird auf null. Die Kupplung wird nicht weiter geschlossen und verharrt auf ihrem bis dahin erreichten Niveau.

Sobald die Differenzdrehzahl im erlaubten Bereich liegt, würde die Kupplungssteuerung die Änderungsrate wechseln und die Kupplung wieder weiter schließen. Im Fall des Überschwingens, soll die Kupplung aber erst nach dem erneuten Ablauf der 50ms weiter schließen. Es wurde deshalb eine zweite Steuerung, die **Zustandssteuerung**, modelliert. Diese ist nur aktiv, wenn die Bedingung für Drehzahlsynchronität verletzt wird. In Abbildung 17 ist ihr Einflussbereich im aktiven Zustand dargestellt. Der Ausgang des Eventmanagers nimmt nun weder den Soll-Zustand Offen, noch Geschlossen an. Dieser kennt im Fall des Überschwingens einen dritten Zustand, nämlich den Zustand Halten. In diesem gibt der Eventmanager dem Kupplungsaktuator die bis zum Überschwingen erreichte Aktuatorposition vor und die Kupplung verharrt weiter auf ihrem bis dahin erreichten Niveau.

Die Zustandssteuerung wird nur bei unzulässig hoher Drehzahldifferenz aktiv. Nach dem Ablauf der 50ms ändert die Zustandssteuerung ihren Ausgang von aktiv auf inaktiv und die Kupplung wird geschlossen. Abbildung 21 zeigt das Ablaufdiagramm beim Schließvorgang.

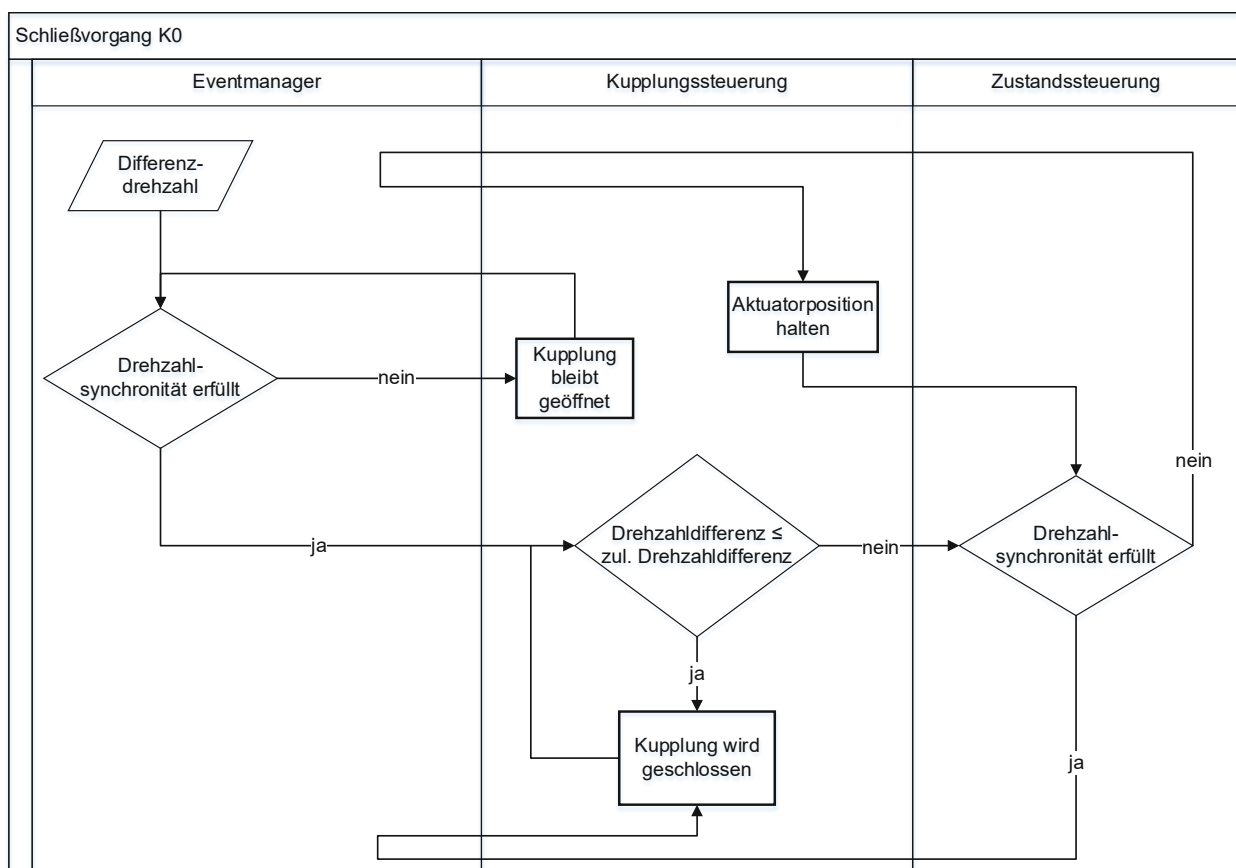
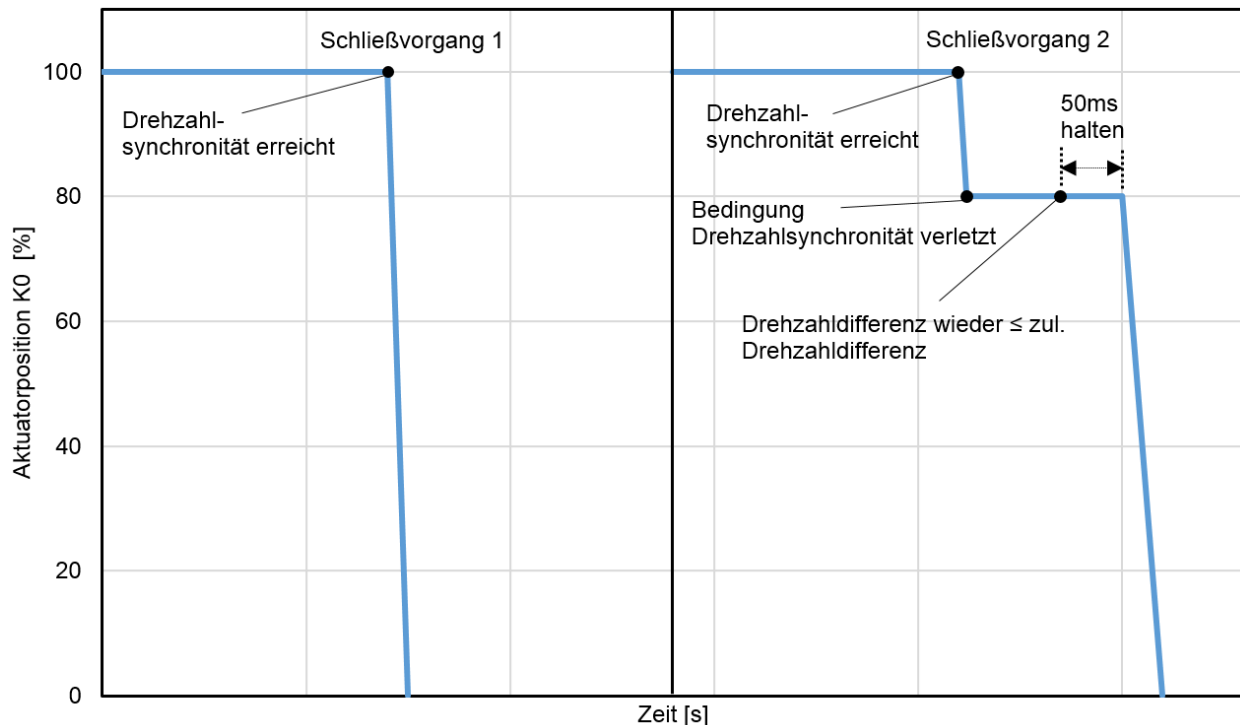


Abbildung 21: Ablaufdiagramm Schließvorgang K0

Wird beim Überschwingen der VKM-Drehzahl die Bedingung für Drehzahlsynchronität eingehalten, wird dieser Event übersprungen und die Kupplung schließt sofort. Es ändert

sich weder die von der Kupplungssteuerung vorgegebene Änderungsrate zum Schließen des Kupplungsaktuators, noch kommt die Zustandssteuerung zum Einsatz. Abbildung 22 zeigt die beiden möglichen Verläufe der Aktuatorposition beim Schließvorgang der K0.



**Abbildung 22: Die 2 möglichen Verläufe der Aktuatorposition beim Schließen der K0**

Schwingt die VKM-Drehzahl nur soweit über, dass die Bedingung für Drehzahl-synchronität nicht verletzt wird, erfolgt Schließvorgang 1. Schließvorgang 2 tritt auf, wenn die Bedingungen für Drehzahl-synchronität bereits erfüllt sind. Die Kupplung schließt. Kommt es dann doch noch zu einem Verletzen der Bedingung für Drehzahl-synchronität, wird das Schließen unterbrochen. Erst nach dem sich erneut die Differenzdrehzahl den vorgeschriebenen Zeitraum (50ms) im erlaubten Bereich befindet, wird der Schließvorgang fortgesetzt.

### Die Momentenverrampung

Bis zum Start des Verrampungsvorgangs, wird das Fahrerwunschmoment von der E-Maschine erfüllt. Ist Drehzahl-synchronität erreicht und am Beginn des Schließvorgangs das von der Trennkupplung übertragene Moment größer als das von der VKM abgegebene Moment, sind die Exit-Bedingungen für den Wechsel in den nächsten Event erfüllt. In diesem findet die Momentenverrampung statt. Abbildung 23 zeigt den Momentenpfad bei der Verrampung des VKM-Moments.

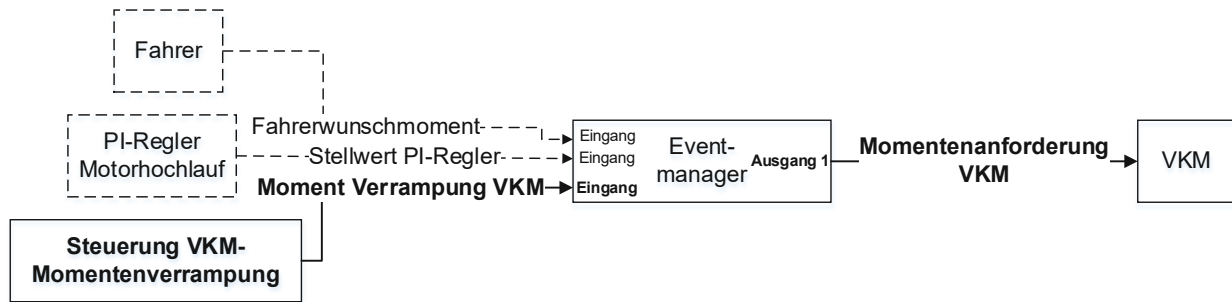


Abbildung 23: Momentenpfad Verrampung VKM-Moment

Während des Verrampungsvorgangs wird in der **Verrampungsteuerung** die Steigung, mit der das **VKM-Moment** verrampung wird, berechnet. Gleichung 2 zeigt die Steigungsberechnung.

$$\text{Steigung}_{M_{\text{verr}}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{T_{\text{Fahrer}} - T_{\text{VKM}}}{t_{\text{Verrampung}}} \quad (2)$$

$\text{Steigung}_{M_{\text{verr}}}$	Steigung während Momentenverrampung [Nm/s]
$T_{\text{Fahrer}}$	Fahrerwunschmoment [Nm]
$T_{\text{VKM}}$	letzter Wert des VKM-Moments vor Verrampungsbeginn [Nm]
$t_{\text{Verrampung}}$	Verrampungzeit [s]

Der letzte Wert des VKM-Moments (vor dem Beginn des Verrampungsvorgangs) und der Wert des Fahrerforderungsmoments werden subtrahiert und durch die Verrampungzeit dividiert.

Am Beginn der Momentenverrampung kann das VKM-Moment unter, aber auch über dem Fahrerforderungsmoment liegen. Es ergibt sich dann dem entsprechend eine positive oder negative Steigung.

Die Steigung entspricht der Geschwindigkeit, mit der der Verrampungsvorgang abläuft. Die Verrampungzeit wird über eine Kennlinie vorgegeben die vom Fahrerwunschmoment abhängt. Steigt das Fahrerwunschmoment im Motorstartvorgang an, verringert sich die Verrampungzeit und die Verrampung erfolgt mit einer größeren Steigung. Die Steigung mit der das VKM-Moment verrampung wird, ändert sich also dynamisch mit dem Fahrerforderungsmoment.

Abbildung 24 zeigt den Steuerungsablauf bei der Verrampung des VKM-Moments. Die Steigung wird nun integriert. Der sich ergebende Drehmomentwert wird mit dem letzten VKM-Moment-Wert (vor Beginn des Verrampungsvorgangs) addiert.

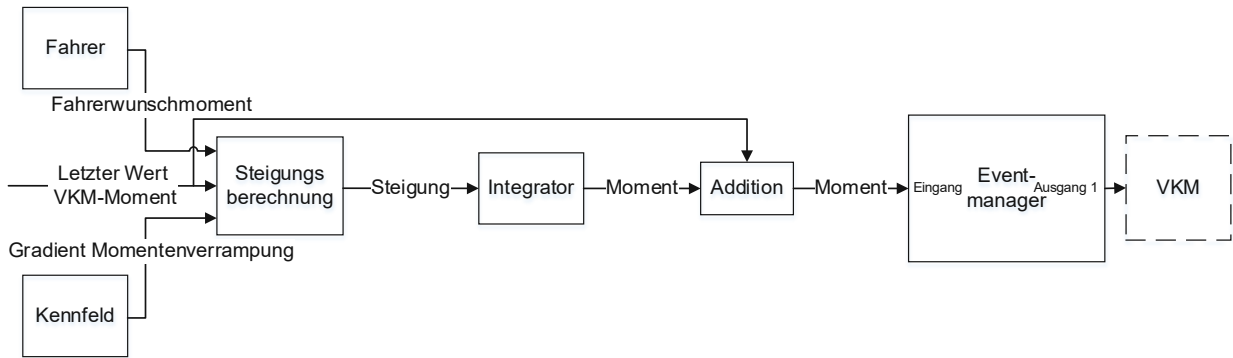


Abbildung 24: Steuerung Momentenverrampung

Der Integrator wird erst im Verrampungsevent über eine Steuerung aktiviert. Somit ist im Verrampungsevent der erste Wert des VKM-Moments gleich dem letzten Wert vor dem Verrampungsevent.

Liegt das VKM-Moment unter dem Fahrerforderungsmoment, ist die Steigung positiv und das VKM-Moment wird größer. Liegt das VKM-Moment über dem Fahrerforderungsmoment, ist die Steigung negativ und das VKM-Moment wird kleiner. Wenn das VKM-Moment das Fahrerwunschkoment erfüllt, ist die Exit-Bedingung für die VKM-Verrampung erfüllt und der Event wird verlassen. Im nächsten Event wird dann direkt das Fahrerwunschkoment von der VKM gefordert.

Die Verrampung des E-Maschinenmoments läuft parallel zur VKM-Verrampung ab. Abbildung 25 zeigt den Momentenpfad bei der Verrampung des EM-Moments.

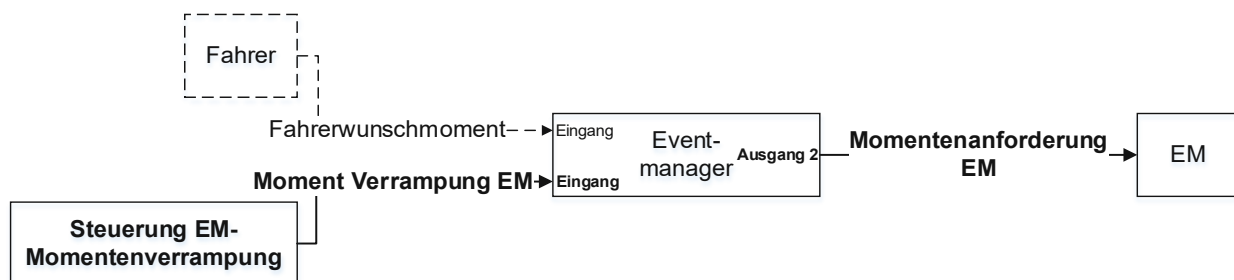


Abbildung 25: Momentenpfad Verrampung EM-Moment

Solange Gleichung 3 erfüllt ist, wird in der **Verrampungsteuerung für das E-Maschinenmoment** dieselbe Steigung wie in der VKM-Verrampung verwendet. Die Steigung wird integriert und das Moment wird vom letzten Wert des E-Maschinenmoments (vor dem Verrampungsbeginn) subtrahiert.

$$M_{VKM} + M_{EM} \leq M_{Fahrerwunsch} \quad (3)$$

$M_{VKM}$  Verbrennungsmotormoment [Nm]

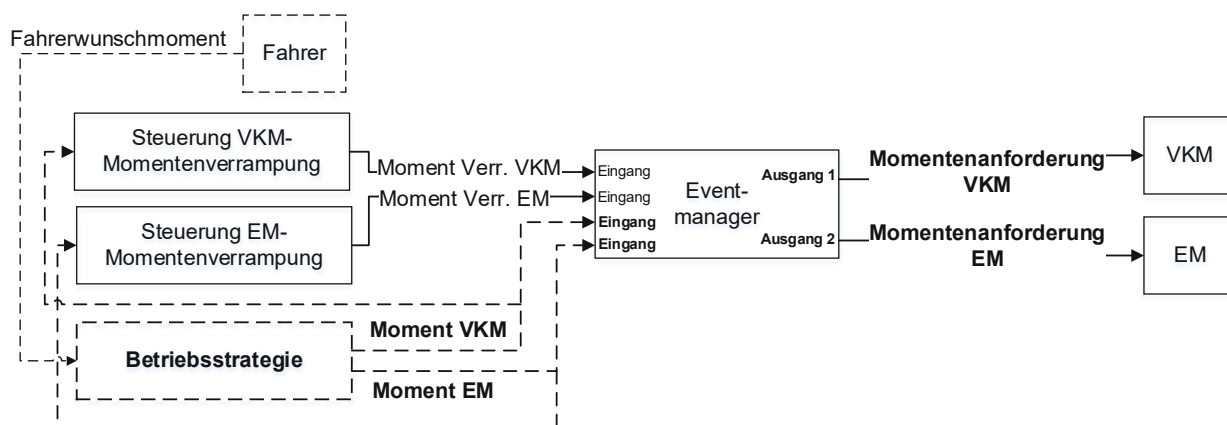
$M_{EM}$  E-Maschinenmoment [Nm]

$M_{Fahrerwunsch}$  Fahrerwunschkoment [Nm]

Ist die Summe aus VKM-Moment und EM-Moment größer als das Fahreranforderungsmoment dann ist Gleichung 3 nicht mehr erfüllt. In der Verrampungssteuerung für das EM-Moment ändert sich die Steigung. Das E-Maschinenmoment wird nun mit einem konstanten Gradienten von 2000 Nm/s reduziert.

Ist Gleichung 3 während des Verrampungsvorgangs wieder erfüllt, ändert sich die Steigung auf den Wert der von der VKM-Verrampung vorgegeben wird. VKM- und EM-Moment werden wieder mit derselben Steigung verrampft.

Das E-Motormoment kann solange verringert werden bis die EM kein Moment mehr abgibt. Alternativ könnte eine modellierte Betriebsstrategie hier auch eine Lastanhebung, oder das Boosten vorgeben. Dies muss dann bei der Verrampung des EM-Moments berücksichtigt werden. Abbildung 26 zeigt beispielhaft, wie eine Betriebsstrategie in das Modell integriert werden könnte.



**Abbildung 26: Momentenpfad mit exemplarisch eingebundener Betriebsstrategie**

## 5.2.2 Schlepstart

Die [Abbildung 27](#) zeigt das Simulationsergebnis eines Schlepstartvorgangs bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit von 61 km/h.

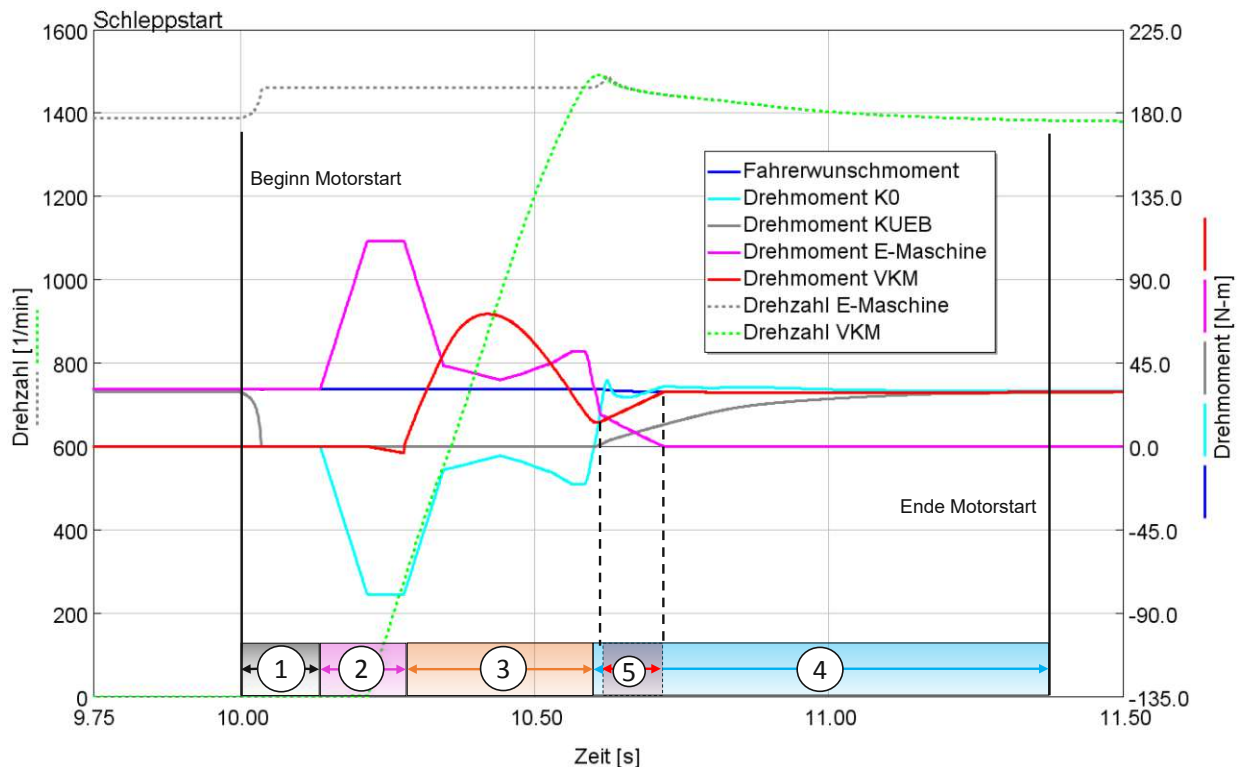


Abbildung 27: Simulationsergebnis Schlepstart

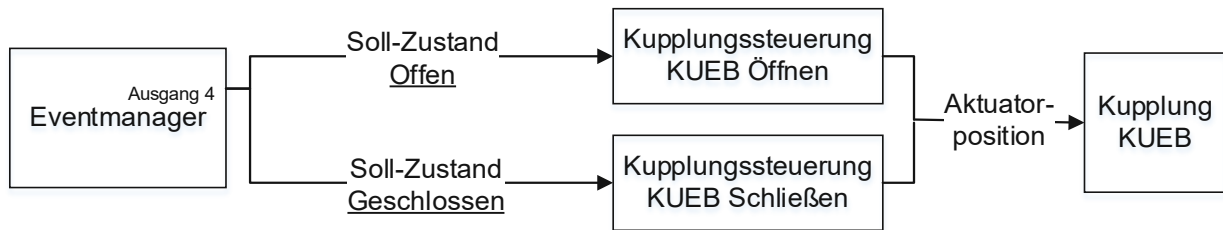
### Bereich 1 – Öffnen der KUEB und Drehzahlregelung EM:

#### Öffnen der KUEB

Wird ein Motorstartvorgang angefordert, springt der Eventmanager in den nächsten Event. Der Ausgang des Eventmanagers, der die Aktuatorposition der KUEB steuert, ändert seinen Soll-Zustand von Geschlossen auf Offen. Die KUEB öffnet. Dem Kupplungsaktuator wird dabei von der KUEB-Steuerung für das Öffnen, die Aktuatorposition (%) zum Öffnen der Kupplung vorgegeben. Die Rate mit der sich die Aktuatorposition ändern darf, wird von der Steuerung bestimmt. Das in Kapitel 3.2.2 beschriebene Kennfeld gibt den Gradienten (Nm/s) zum Öffnen vor. In der Steuerung für das Öffnen der Kupplung, wird daraus dann die Änderungsrate zum Öffnen ermittelt.

[Abbildung 28](#) zeigt den Steuerungsablauf beim Öffnen und Schließen der Trennkupplung. Der Schließvorgang wird in Bereich 4 erläutert.

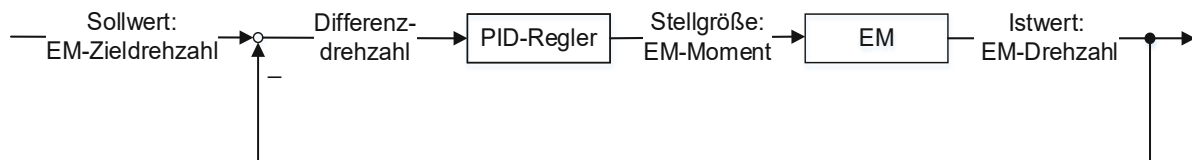




**Abbildung 28: Steuerung KUEB**

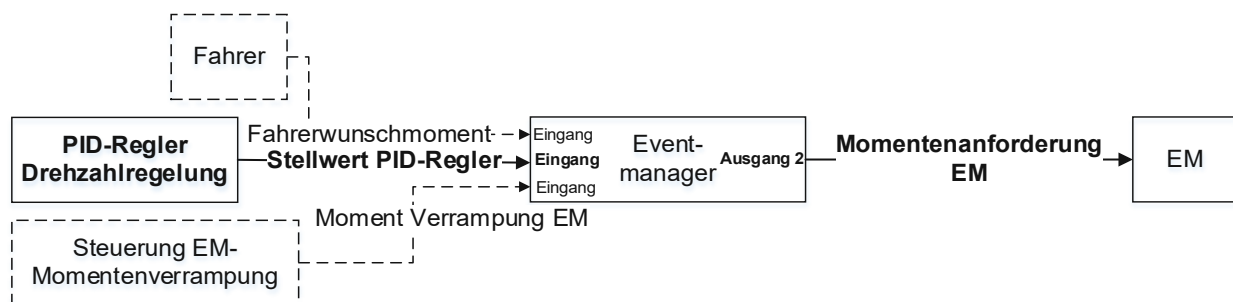
### Drehzahlregelung-EM

Vor dem Beginn der EM-Drehzahlregelung wird das von der E-Maschine geforderte Moment vom Fahrer bestimmt. Über den Ausgang des Eventmanagers, der das E-Maschinenmoment steuert, wird von der E-Maschine das Fahrerwunschmoment gefordert. Wenn die KUEB vollständig geöffnet ist, springt der Eventmanager in den nächsten Event und die E-Maschine geht in Drehzahlregelung. Die Drehzahlregelung der E-Maschine wird über einen PID-Regler abgebildet. Abbildung 29 zeigt den Regelkreis.



**Abbildung 29: Blockschaltbild Regelkreis EM-Drehzahlregelung**

Der Sollwert ist die EM-Zieldrehzahl. Diese kommt aus dem in Kapitel 3.2.2 erläuterten Kennfeld. Istwert ist die EM-Drehzahl. Der momentane Stellwert (=Output) des Reglers entspricht dem EM-Moment, das zum Konstanthalten der E-Maschinendrehzahl aufgebracht werden muss. Das von der E-Maschine geforderte Moment wird, bis zu dem Zeitpunkt an dem die Drehzahlregelung wieder beendet wird, von der Stellgröße des Reglers bestimmt. Abbildung 30 zeigt den Momentenpfad, wenn sich die E-Maschine in Drehzahlregelung befindet.



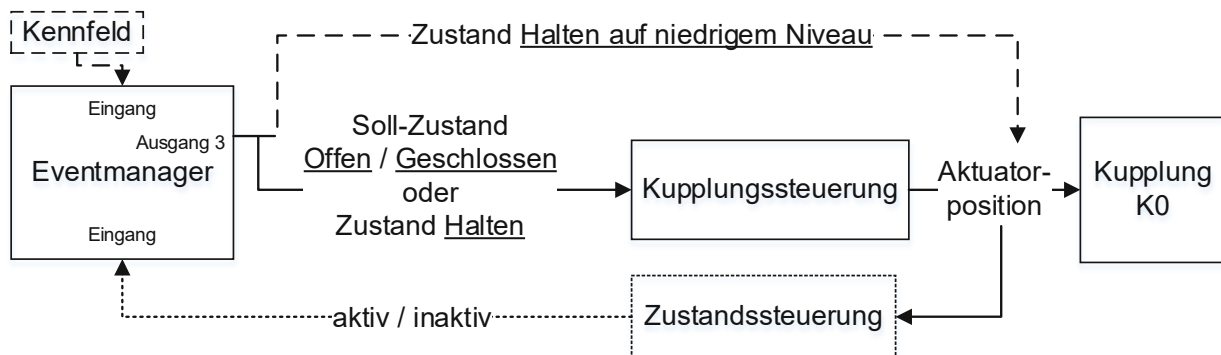
**Abbildung 30: Momentenpfad Drehzahlregelung EM**

Ist die KUEB vollständig geöffnet und befindet sich die E-Maschine in Drehzahlregelung, sind die Exit-Bedingungen erfüllt und der Eventmanager wechselt in den nächsten Event (Bereich 2).



### Bereich 2 – K0 auf definiertes Reibmoment schließen:

Die Steuerung der Trennkupplung ist für das Schließen auf das vordefinierte Reibmoment, das erneute Öffnen der Trennkupplung auf ein niedrigeres Niveau und das endgültige Schließen der Kupplung zuständig. Ein Ausgang des Eventmanagers steuert die Aktuatorposition der Kupplung. Er kann die vier Zustände Offen, Geschlossen, Halten und Halten auf niedrigem Niveau annehmen. Abbildung 31 zeigt die Steuerung der Trennkupplung im Schleppstartmodell.



**Abbildung 31: Steuerung Trennkupplung Schleppstart**

Die Kupplung wird dabei mit unterschiedlichen Gradienten geöffnet und geschlossen. Die Rate mit der sich die Aktuatorposition dabei ändern darf wird von der Kupplungssteuerung vorgegeben.

Um die VKM anzudrehen, ändert zunächst der Ausgang des Eventmanagers, der die Aktuatorposition der K0 steuert, seinen Soll-Zustand von Offen auf Geschlossen. Die Rate mit der sich die Aktuatorposition der Kupplung beim Anlegen des Reibmoments ändern darf, hängt vom Fahrerwunsch ab. Die Kupplung wird geschlossen bis die 80Nm angelegt sind. Die Exit-Bedingung ist damit erfüllt und der Eventmanager wechselt in den nächsten Event. Der Ausgang des Eventmanagers ändert sich dabei vom Soll-Zustand Geschlossen auf den Zustand Halten. Die bis dahin erreichte Aktuatorposition wird gehalten, bis die VKM-Drehzahl 280 U/min erreicht.

Der E-Maschinen-Drehzahlregler verhindert dabei, dass die Drehzahl durch das aufgebrauchte Moment abfällt. Der Stellwert ist auf die Summe aus Fahrerwunschmoment und das von der Trennkupplung übertragene Moment limitiert.

Um das Losbrechmoment der VKM mit den in der Simulationsumgebung vorhandenen Werkzeugen darzustellen zu können, wurde ein die physikalischen Zusammenhänge stark vereinfachender Ansatz gewählt. Eine Welle mit großem Massenträgheitsmoment wurde über eine Kupplung (Clutch-Simple) am Abtrieb der VKM angebracht. Ein Andrehen des Motors wird somit verhindert bis die 80Nm an der Trennkupplung angelegt

sind. Erst danach öffnet die Kupplung, die Welle wird abgekoppelt und der Motor wird angedreht.

Ist die Zieldrehzahl (280 U/min) erreicht, aktiviert das modellierte Motorsteuergerät den Verbrennungsmotor. Wenn die VKM aktiviert ist, dann ist die Exit-Bedingung erfüllt und der Eventmanager wechselt in den nächsten Event.

### **Bereich 3 – K0 auf niedriges Niveau öffnen und Motorhochlauf:**

Der Ausgang im Eventmanager der die Aktuatorposition der K0 steuert, wechselt vom Zustand Halten, in den Zustand Halten auf niedrigem Niveau. Der Kupplung wird aus einem Kennfeld direkt die Aktuatorposition (%) vorgegeben. Die Aktuatorposition hängt dabei von der Differenzdrehzahl zwischen Verbrennungsmotor und E-Maschine und dem Fahrerwunschloment ab. Die Kupplung öffnet und verharrt auf niedrigem Niveau.

Der Drehzahlhochlauf des Verbrennungsmotors erfolgt ident zum Ritzelstartvorgang. Der Ablauf und der verwendete PI-Regler wurden bereits in Kapitel 5.2.1 beschrieben. Das währenddessen an der VKM geforderte Moment wird vom Stellwert des Reglers bestimmt.

### **Bereich 4 – K0 und KUEB schließen:**

Sind die in Kapitel 3.2.1 erläuterten Bedingungen für Drehzahlsynchronität erfüllt, wechselt der Eventmanager in den nächsten Event. Die Trennkupplung und KUEB werden geschlossen.

Der die **K0** steuernde Ausgang des Eventmanagers, ändert seinen Soll-Zustand von Offen auf Geschlossen. Die Kupplungssteuerung gibt die, einem Schließgradient von 2000 Nm/s entsprechende, Rate zur Änderung der Aktuatorposition (%) der Kupplung vor. Der Kupplungsaktuator wird dann mit dieser Rate geschlossen. Wird beim Schließen die Bedingung für Drehzahlsynchronität verletzt, läuft der in Kapitel 5.2.1 erläuterte Steuerungsprozess ab.

Der für die Aktuatorposition der **KUEB** zuständige Ausgang des Eventmanagers ändert seinen Soll-Zustand von Offen auf Geschlossen. Die Änderungsrate, mit der der Aktuator der KUEB geschlossen wird, kommt aus der KUEB-Steuerung für den Schließvorgang. Das Kennfeld, dass die Änderungsrate bestimmt, wurde bereits in Kapitel 3.2.2 erläutert.

Schwingt die VKM-Drehzahl soweit über, dass die Differenzdrehzahl über den erlaubten Wert ansteigt, wird das Schließen der KUEB ebenfalls unterbrochen. Die Steuerung für

den Schließvorgang ändert, abhängig von der Steigung der K0-Aktuatorposition, den Schließgradient der KUEB. Wird das Schließen der K0 unterbrochen, ändert sich die Steigung der K0-Aktuatorposition. In der Steuerung der KUEB wechselt die Änderungsrate mit der die Kupplung geschlossen werden darf auf null. Damit verharrt auch die KUEB auf ihrem bis dahin erreichten Niveau.

### **Bereich 5 – Momentenverrampung und Beenden der E-Maschinen-Drehzahlregelung:**

Während KUEB und Trennkupplung schließen, wechselt der Eventmanager in den nächsten Event und die Momentenverrampung startet. Diese wurde wie beim Ritzelstartvorgang modelliert und bereits in Kapitel 5.2.1 erläutert.

Im selben Event wird die Drehzahlregelung beendet. Das von der E-Maschine geforderte Moment wird nicht mehr vom Stellwert des PID-Reglers, sondern von der Verrampungssteuerung der E-Maschine bestimmt.

Sobald die VKM das Fahrerwunschmoment erfüllt, ist die Exit-Bedingung des Events erfüllt. Im nachfolgenden Event wird von der VKM, über den Eventmanager, direkt das Fahrerwunschmoment gefordert. Dieser wird verlassen, wenn die E-Maschine kein Moment mehr überträgt und die KUEB wieder vollständig geschlossen ist. Alternativ könnte eine modellierte Betriebsstrategie hier vorgeben, dass die E-Maschine die VKM z.B. in einem Beschleunigungsvorgang weiter unterstützt, oder eine Lastanhebung durchgeführt werden soll.

## 6 Untersuchungen bei Vollastbeschleunigung

Um die Eigenschaften und Unterschiede der beiden modellierten Motorstartvarianten besser bewerten zu können, wurden Untersuchungen bei Vollastbeschleunigung durchgeführt. Bei beiden Startvarianten wurden zudem Parameter die Einfluss auf den Motorstartvorgang haben variiert, um Potential für Verbesserungen aufzuzeigen. In den nachfolgenden Kapiteln werden die bei Vollastbeschleunigung durchgeführten Untersuchungen näher erläutert.

Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurde für die Untersuchungen eine entsprechende Beschleunigungssituation definiert.

Während der Vollastbeschleunigung geben sowohl E-Maschine, als auch Verbrennungsmotor ihre maximale Leistung ab. Wird das maximal mögliche E-Maschinenmoment, also auch das Reservemoment ausgenutzt, ergibt sich damit theoretisch ein maximales Systemdrehmoment von fast 700Nm. Das maximal zulässige Getriebeeingangsmoment wird dabei nicht überschritten.

Eine Limitierung des E-Maschinen- oder VKM-Moments in den unteren Gängen wurde nicht modelliert. Daher musste bei der Definition der Beschleunigungssituation darauf geachtet werden, dass die Zugkraft während des Beschleunigungsvorgangs die maximal zulässige Antriebskraft nicht überschreitet. Damit wird gleichzeitig das Durchdrehen der Antriebsräder an der Hinterachse verhindert.

Gleichung 4 [26] beschreibt die Zugkraft des Fahrzeugs.

$$Z_{\max} = \frac{(M_{\text{System}} * i_{\text{Gang}} * i_{\text{Diff}} * \eta)}{r_{\text{dyn}}} \quad (4)$$

$Z_{\max}$	maximale Zugkraft [N]
$M_{\text{System}}$	maximales Systemdrehmoment [Nm]
$i_{\text{Gang}}$	Übersetzungsverhältnis eingelegter Gang [-]
$i_{\text{Diff}}$	Übersetzungsverhältnis Hinterachsdifferenzial [-]
$\eta$	mechanischer Gesamtwirkungsgrad [-]
$r_{\text{dyn}}$	dynamischer Reifenrollradius [m]

Gleichung 5 [26] beschreibt die maximal zulässige Antriebskraft des Fahrzeugs, damit das Durchdrehen der Antriebsräder vermieden wird. Der Reibbeiwert zwischen Reifen und Straße wurde aus der Literatur abgeleitet [26] und mit 0,9 angenommen. Der Einfluss des Luftwiderstandes auf die dynamische Achslast wurde vernachlässigt.

$$F_{\text{Antrieb}} = \mu \cdot F_{\text{zH}} = \mu \cdot \left( \frac{(G \cdot L_v)}{L} + m \cdot \ddot{x} \cdot \frac{H_s}{L} \right) \quad (5)$$

$F_{\text{Antrieb}}$	maximal mögliche Antriebskraft [N]
$\mu$	Reibbeiwert Reifen-Asphalt [-]
$F_{\text{zH}}$	Achslast Hinterachse [N]
$G$	Gewichtskraft Fahrzeug [N]
$L_v$	Abstand Vorderachse Massenmittelpunkt [m]
$L$	Radstand [m]
$m$	Fahrzeugmasse [kg]
$\ddot{x}$	Fahrzeugbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
$H_s$	Abstand Massenmittelpunkt zur Fahrbahnebene [m]

Der Abstand des Massenmittelpunkts zur Fahrbahnebene wurde über die mit der Gleichung 6 [27] beschriebenen Näherungsformel bestimmt.

$$\chi \equiv \frac{H_s}{L} = 0,26 - 0,04 \cdot \frac{m}{1000} \quad (6)$$

$\chi$	Näherungsverhältnis [-]
$H_s$	Abstand Massenmittelpunkt zur Fahrbahnebene [m]
$L$	Radstand [m]
$m$	Fahrzeugmasse [kg]

Aufgrund dieser Überlegungen wurde folgende Beschleunigungssituation definiert.

Das Fahrzeug bewegt sich im rein elektrischen Betrieb bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit von 50 km/h. Bei dieser Geschwindigkeit fährt das Fahrzeug im 5. Gang. Die Gänge werden von der modellierten Getriebesteuerung vorgegeben.

Nach 5 Sekunden Simulationszeit erfolgt der sprunghafte Anstieg des Fahrerwunschs. Das Getriebe schaltet in den 4. Gang zurück und der Verbrennungsmotorstart wird eingeleitet. Es wurde angenommen, dass die KUEB während des Kickdowns beim Zurückschalten nicht öffnet, da in dieser Situation der Komfort eine untergeordnete Rolle spielt. E-Maschine und VKM werden mit Vollast betrieben. Das Fahrzeug beschleunigt bis zur Zielgeschwindigkeit von 150 km/h.

## 6.1 Schleppstart Parametervariation 1

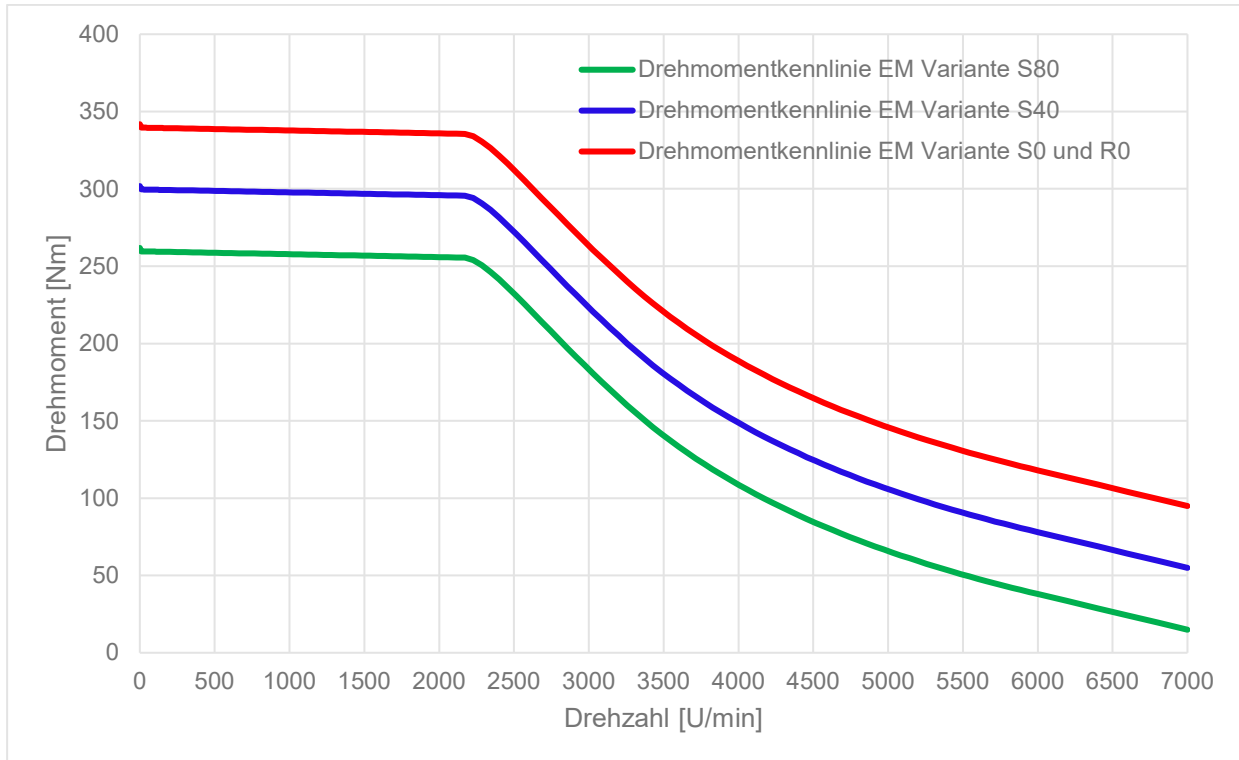
In den nachfolgenden Untersuchungen wurde das Reservemoment, das von der EM für den Schleppstart vorgehalten wird, variiert. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Auswirkungen des Reservemoments und dessen Variation, auf die Performance und das Beschleunigungsverhalten des Fahrzeuges zu ermitteln. Um einen direkten Vergleich zwischen Ritzelstart und Schleppstart anstellen zu können, wurde dieser ebenfalls in die Untersuchungen und die Ergebnisbeurteilung einbezogen. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der untersuchten Schleppstartvarianten und des Ritzelstarts.

**Tabelle 4: Untersuchte Schleppstartvarianten und Ritzelstart**

Variation EM-Reservemoment (Md)		
	Motorstart	Reservemoment EM [Nm]
<b>Variante S80</b>	Schleppstart	80
<b>Variante S40</b>	Schleppstart	40
<b>Variante S0</b>	Schleppstart	0
<b>Variante R0</b>	Ritzelstart	0

Um den Effekt der Reservemoment-Variation beurteilen zu können, wurden die Fahrzeuggeschwindigkeit, die Fahrzeugbeschleunigung und die vom Fahrzeug zurückgelegte Wegstrecke im Beschleunigungsvorgang untersucht. Um den Beschleunigungsvorgang auch energetisch beurteilen zu können, wurde der Kraftstoffverbrauch der VKM und die von der EM aufgenommene elektrische Leistung ermittelt. Beim Ritzelstart wurde zusätzlich die vom Ritzelstarter benötigte elektrische Energie berücksichtigt.

Beim herkömmlichen Schleppstart wird beim Beschleunigungsvorgang über den gesamten Drehzahlbereich der E-Maschine das Reservemoment von 80Nm vorgehalten. Es wird nur für den Startvorgang genutzt. Beim Schleppstart ohne Reservemoment wird das Maximalmoment der E-Maschine vom Beginn des Beschleunigungsvorgangs an voll ausgenutzt. Beim Motorstart reduziert sich das Moment am Abtrieb jedoch spürbar. Die EM-Kennlinie mit 40Nm Reservemoment wurde gewählt, um einen möglichen Kompromiss zwischen Reservemoment und der maximal verfügbaren EM-Leistung in die Untersuchungen einzubeziehen. Abbildung 32 zeigt die drei EM Drehmomentkennlinien.



**Abbildung 32: Die drei in den Untersuchungen verwendeten EM-Drehmomentkennlinien**

Die drei im Folgenden erläuterten Faktoren haben maßgeblichen Einfluss auf die Dauer des Motorstartvorgangs und damit auf das Ergebnis der Untersuchungen.

### **Faktor I:**

Ist das Andrehen des Motors bis zur Drehzahl, bei der die erste Einspritzung erfolgt (ca. 280 U/min).

Die Zeitdauer zum Andrehen der VKM wird beim Ritzelstartvorgang vom Ritzelstarter bestimmt. Das Drehmoment des Ritzelstarters ist die bestimmende Größe.

Beim Schlepstart wird die Zeitspanne vom Gradienten mit dem an der K0 das Reibmoment (Losbrechmoment wird überwunden) angelegt wird und von der Höhe des Reibmoments (z.B. 80Nm) bestimmt.

Das Massenträgheitsmoment und das Reibmoment der VKM hat bei beiden Startvarianten im selben Maße Einfluss.

### **Faktor II:**

Ist die Zeitspanne, die der Hochlauf der VKM-Drehzahl bis zur EM-Drehzahl in Anspruch nimmt. Sie ist über die Reglerabstimmung beeinflussbar und hängt von der zu überwindenden Differenzdrehzahl zwischen VKM und EM ab.

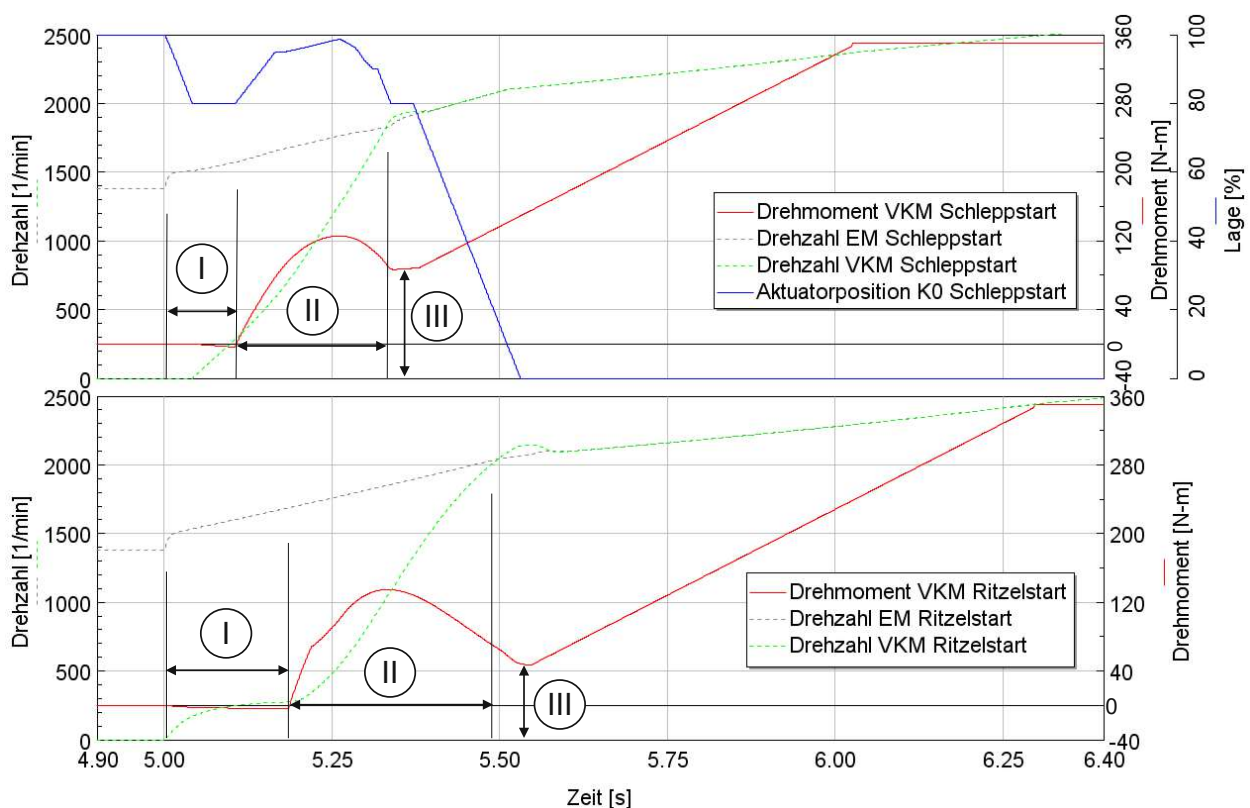


**Faktor III:**

Ist die Höhe des VKM-Moments zu dem Zeitpunkt, an dem die K0 schließt und der Vorgang zum Heranführen des VKM-Moments an das Fahrerwunschmoment startet. Je höher das Moment zu diesem Zeitpunkt ist, umso mehr Moment wird ab dann von der VKM in den Antriebsstrang eingebracht und umso kürzer ist der Vorgang.

Das VKM-Moment wird bis zu diesem Zeitpunkt vom Regler, der für den Hochlauf der VKM-Drehzahl zuständig ist, bestimmt. Eine vom Fahrerwunschmoment oder der Differenzdrehzahl abhängige dynamische Anpassung der Regelparameter, mit der das VKM-Moment gezielter geregelt werden kann, wurde nicht modelliert.

Der Gradient mit dem das VKM-Moment im Rampvorgang an das Wunschmoment herangeführt wird, wird im Vergleichsfahrzeug (siehe Kapitel 3) von der Betriebsstrategie ermittelt und ist auf 400Nm/s limitiert. Angelehnt an dieses Fahrzeug, wurde der maximal zulässige Gradient im Fahrzeugmodell ebenfalls so vorgesehen. Im Modell wird der Gradient dabei von der in Kapitel 5.2.1 erläuterten Verrampungssteuerung vorgegeben. In den folgenden Untersuchungen wird unter anderem auch gezeigt, welche Auswirkungen ein schnelleres Anlegen des maximalen VKM-Moments auf die Fahrzeug-Performance hat. Abbildung 33 zeigt Ritzel- und Schleppstart (Variante R0 und S0) im Vergleich. Die drei Faktoren werden in den markierten Bereichen I-III dargestellt.



**Abbildung 33:** Faktoren I, II und III die Einfluss auf die Motorstartdauer haben, oben ist die Schleppstart-Variante S0, darunter die Ritzelstart-Variante R0 dargestellt



### Fahrzeugbeschleunigung, -geschwindigkeit und zurückgelegte Wegstrecke

Abbildung 34 zeigt den Motorstartvorgang von Variante S0. Nach 5 Sekunden werden der Motorstartvorgang und der Schaltvorgang eingeleitet. Von der EM wird das volle Moment abgerufen. Am Verlauf des EM-Moments ist zu erkennen, dass das Reservemoment von der EM nicht vorgehalten wird und diese das Reibmoment nicht einregelt.

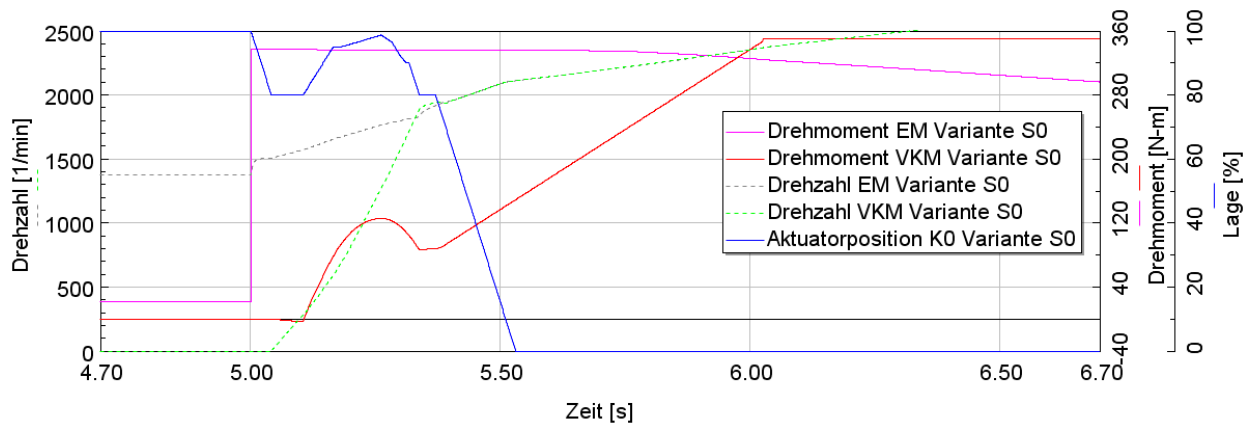


Abbildung 34: VKM- & EM-Moment, VKM- & EM-Drehzahl, K0 Aktuatorposition von Variante S0

Um die Auswirkungen der drei unterschiedlichen Reservemomentkennlinien auf die Performance und den Komfort im Startvorgang qualitativ beurteilen zu können, wurde die Fahrzeugbeschleunigung untersucht. Abbildung 35 zeigt die Fahrzeugbeschleunigung im Motorstartvorgang aller untersuchten Varianten unterteilt in die Bereiche A bis D.

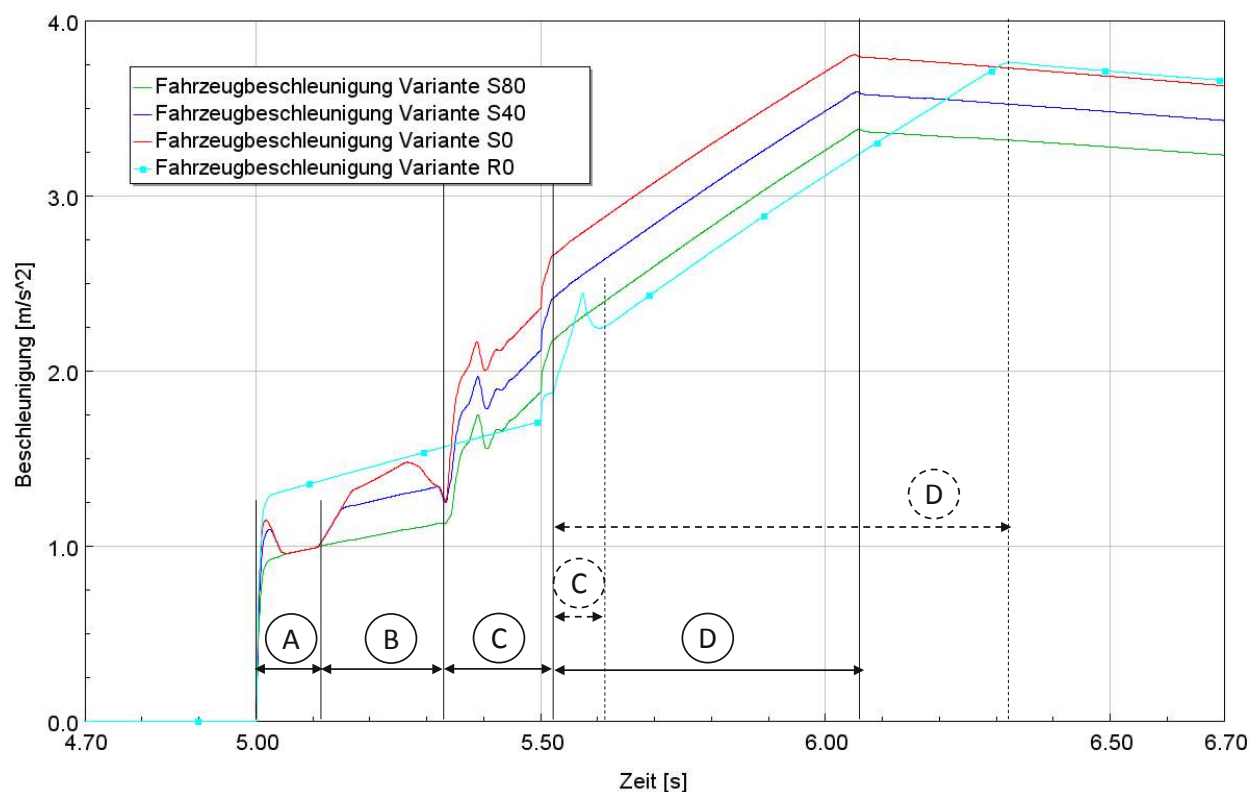


Abbildung 35: Fahrzeugbeschleunigung im Motorstartvorgang aller untersuchten Schlepstart-Varianten und der Ritzelstart-Variante, unterteilt in die Bereiche A bis D

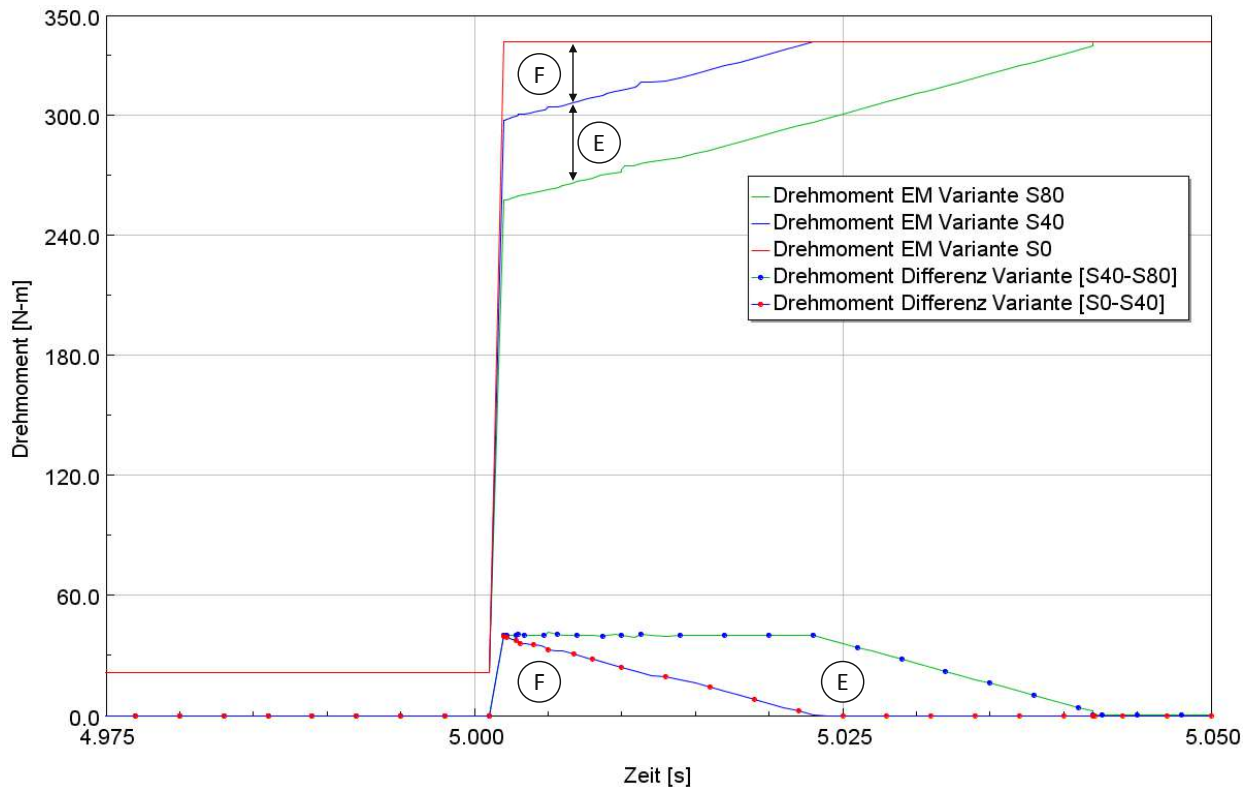
### Fahrzeugbeschleunigung-Bereich A

Am Beginn des mit Bereich A markierten Abschnitts steigt das Fahrerwunschkmoment und damit das EM-Moment sprunghaft an. Abhängig von der Höhe des Reservemoments wird das maximale E-Maschinenmoment abgerufen. Dadurch steigt auch die Fahrzeugbeschleunigung sprunghaft an. Der Schaltvorgang wird eingeleitet, auf das Öffnen der KUEB wird dabei, wie bereits in Kapitel 6 erwähnt, verzichtet. Die EM befindet sich in Drehzahlregelung, gleichzeitig beginnt die K0 auf die 80Nm Reibmoment zu schließen.

Da bei Variante S0 auf das Reservemoment verzichtet wird ist im ersten Moment, im Vergleich mit den anderen beiden Schleppstart-Varianten, die Fahrzeugbeschleunigung am größten.

Bei genauer Betrachtung der Fahrzeugbeschleunigung im Bereich A fällt auf, dass die Differenz der Fahrzeugbeschleunigung zwischen Variante S80 und Variante S40 am Beginn größer ist als zwischen Variante S40 und S0. Das hat folgende Ursache:

Am Beginn von Bereich A ist die EM-Drehmomentdifferenz zwischen Variante S80 und S40 größer als zwischen Variante S40 und S0. Die Differenz wird vom Reservemoment der EM und dem Gradienten mit dem das Reibmoment an der K0 angelegt wird bestimmt. Da Variante S40 weniger Reservemoment vorhält, ist das Differenzmoment zu Variante S80 während des Vorgangs geringer. Abbildung 36 zeigt das EM-Moment von Variante S80, S40 und S0 während die K0 auf die 80Nm Reibmoment schließt. In Bereich E ist die Differenz zwischen Variante S80 und S40 und im Bereich F die Differenz zwischen Variante S40 und S0 dargestellt.



**Abbildung 36:** EM-Moment der Varianten S80, S40 und S0 am Beginn des Beschleunigungsvorgangs (siehe Abbildung 35, Bereich A); Bereich E markiert die Differenz zwischen Variante S80 und S40, Bereich F die Differenz zwischen Variante S40 und S0

Während die K0 geschlossen wird, um die VKM anzudrehen, überträgt sie ein Drehmoment. Dieses wirkt entgegengesetzt zum von der EM abgegebenen Moment. Dadurch wird das Moment am Getriebeeingang und damit die Fahrzeugbeschleunigung bei Variante S40 und S0 deutlich reduziert. Bei Variante S40 fällt die Änderung in Moment und Beschleunigung geringer aus.

Für das Komfortempfinden des Fahrers ist besonders die Änderung der Fahrzeugbeschleunigung maßgeblich. Diese wird auch als Ruck bezeichnet. [28] Eine im Beschleunigungsvorgang stetig anwachsende Fahrzeugbeschleunigung (=positiver Ruck), vermittelt dem Fahrer ein harmonischeres Beschleunigungsverhalten. Daraus lässt sich schließen, dass Variante S40 gegenüber Variante S0 einen höheren Komfort im Bereich A des Motorstartvorgangs aufweist.

Bei der Schlepptart-Variante S80 hat das Schließen der Trennkupplung keine Auswirkung auf die Fahrzeugbeschleunigung, weil an der E-Maschine das Reibmoment eingeregelt wird. Die Ritzelstart-Variante (R0) kann von Beginn an das volle EM-Moment nutzen und weist deshalb die höchste Fahrzeugbeschleunigung auf, Einfluss durch die Trennkupplung gibt es in Bereich A ebenfalls keinen. Daraus lässt sich ableiten, dass beim herkömmlichen Schlepptart und dem Ritzelstart der gesamte Motorstartvorgang

am komfortabelsten abläuft. Bei Variante S40 und S0 reduziert sich die Fahrzeugbeschleunigung auf dasselbe Niveau von Variante S80, weil die EM das zusätzlich über die Trennkupplung eingebrachte Moment, nicht einregeln kann.

### Fahrzeugbeschleunigung-Bereich B

Im mit Bereich B markierten Abschnitt, wird die Trennkupplung wieder auf ein geringeres Niveau geöffnet. Das dem EM-Moment entgegengesetzt wirkende Moment wird wieder reduziert. Die Fahrzeugbeschleunigung von Variante S40 und S0 nimmt wieder zu. Bei Variante S0 gibt die EM mehr Moment ab, deshalb steigt die Fahrzeugbeschleunigung stärker an als bei Variante S40.

Die VKM wird beim Drehzahlhochlauf von der EM unterstützt, währenddessen verringert sich die Differenzdrehzahl zwischen VKM und EM immer weiter. Die K0 wird wieder auf ein höheres Niveau geschlossen. Die Fahrzeugbeschleunigung nimmt deshalb am Ende von Bereich B wieder ab. Bei Variante S40 ändert sich die Beschleunigung in geringerem Ausmaß als bei Variante S0. Daraus lässt sich schließen, dass auch dieser Abschnitt des Motorstartvorgangs bei Variante S40 komfortabler abläuft als bei Variante S0. Bei Variante S80 läuft der Beschleunigungsvorgang jedoch erneut am gleichmäßigsten ab.

### Fahrzeugbeschleunigung-Bereich C

Sobald zwischen VKM-Drehzahl und EM-Drehzahl die Bedingung für Drehzahlsynchronität erfüllt ist, wird die Trennkupplung endgültig geschlossen. Schon zu Beginn des Schließvorgangs wird von der Trennkupplung VKM-Moment übertragen und die Fahrzeugbeschleunigung wächst an. Außerdem herrscht zwischen VKM und EM eine Drehzahldifferenz. Aufgrund der Differenzdrehzahl und der Massenträgheit des Motors, wird zusätzliches Moment in den Antriebsstrang eingebracht und die Fahrzeugbeschleunigung wächst weiter an. Schlussendlich wird das volle VKM-Moment von der Trennkupplung übertragen. Am Ende von Bereich C ist der Schaltvorgang im Getriebe abgeschlossen und die Fahrzeugbeschleunigung wächst noch einmal an.

### Fahrzeugbeschleunigung-Bereich D

Am Ende von Abschnitt D erfüllen VKM und EM das Fahrerwunschkmoment. Die VKM und die EM werden im Volllastbereich betrieben und die Fahrzeugbeschleunigung wächst nichtmehr weiter an. Ihr weiterer Verlauf wird, bis zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit vom Antriebsmoment des Fahrzeugs und den Fahrwiderständen bestimmt.

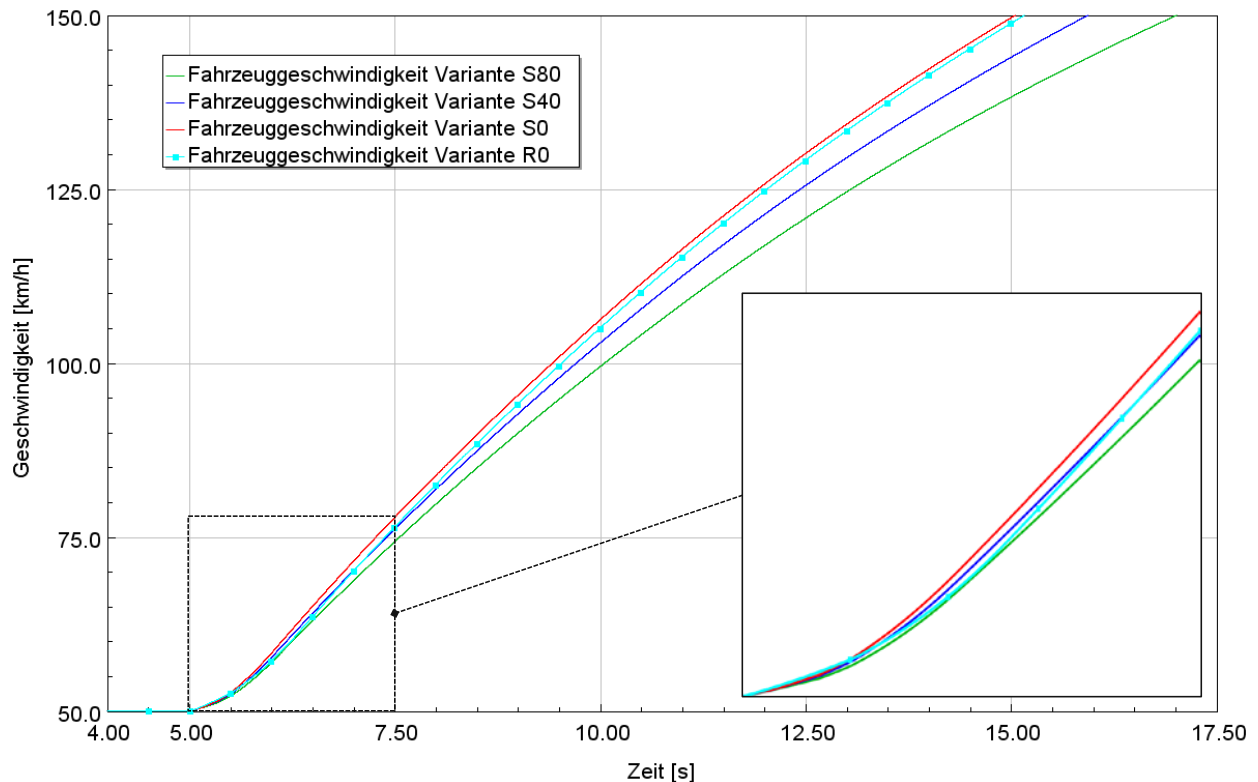
Variante S0 hat gegenüber den anderen Varianten in Bereich D das größte Systemmoment zur Verfügung und weist deshalb die größte Fahrzeugbeschleunigung auf.

Betrachtet man die Fahrzeugbeschleunigung der Ritzelstart-Variante, wird ersichtlich, dass diese erst in Abschnitt D erneut deutlich ansteigt. Das liegt daran, dass der Ritzelstartvorgang aus den zuvor erläuterten Gründen mehr Zeit in Anspruch nimmt (Faktor I und Faktor II) und die VKM erst später Moment in den Antriebsstrang einbringt. Das Fahrzeug beginnt erst später stärker zu beschleunigen. Zusätzlich ist die Fahrzeugbeschleunigung aufgrund von Faktor III auch kleiner als bei Variante S0. Am Ende von Bereich D ist die Fahrzeugbeschleunigung der Ritzelstart-Variante dennoch höher als bei Variante S0. Dies lässt sich durch den von der Drehzahl abhängigen Verlauf der EM-Drehmomentkennlinie und durch die Fahrwiderstandskräfte erklären.

Durch die höhere Fahrzeuggeschwindigkeit und das daraus resultierende höhere Drehzahlniveau, wird das von der EM abgegebene Moment bei Variante S0 früher reduziert. Daraus ergibt sich zwischen der Ritzelstart-Variante und Variante S0, schon während des Motorstartvorgangs eine Differenz im abgegebenen Systemmoment. Da deshalb bei der Ritzelstart-Variante die EM zum selben Zeitpunkt mehr Moment abgibt, ist auch die Fahrzeugbeschleunigung größer. Zusätzlich fährt das Fahrzeug bei Variante S0 bereits mit einer höheren Geschwindigkeit als bei der Ritzelstart-Variante, dadurch ist die Fahrwiderstandskraft bei Variante S0 größer. Dieser Umstand ist ebenfalls für die höhere Fahrzeugbeschleunigung der Ritzelstart-Variante verantwortlich.

Die Differenz in der Fahrzeugbeschleunigung besteht über den gesamten restlichen Beschleunigungsvorgang.

Abbildung 37 zeigt die Fahrzeuggeschwindigkeit aller untersuchten Varianten. Bei Variante S40, S0 und der Ritzelstart-Variante steht für den Beschleunigungsvorgang von Anfang an ein höheres EM-Drehmoment als bei Variante S80 zur Verfügung. Von Beginn an wird mehr Moment von der EM in den Antriebsstrang eingebracht. Aus der daraus resultierenden höheren Fahrzeugbeschleunigung ergibt sich eine höhere Fahrzeuggeschwindigkeit. Bis zum Ende des Beschleunigungsvorgangs wächst die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Variante S80, S40 und S0 immer weiter an.



**Abbildung 37: Fahrzeuggeschwindigkeit aller untersuchten Schlepstart-Varianten und der Ritzelstart-Variante während der Vollastbeschleunigung**

Aufgrund des schnelleren Motorstartvorgangs und des bereits erläuterten Faktor III, weist die Schlepstart-Variante S40 gegenüber der Ritzelstart-Variante, über den Großteil des Motorstarts, eine höhere Fahrzeuggeschwindigkeit auf. Nach Abschluss des Motorstarts, hat jedoch die Ritzelstart-Variante eine höher Fahrzeugbeschleunigung weil sie, aufgrund des höheren EM-Moments, mehr Systemmoment zu Verfügung hat. Nach ca. 7 Sekunden wächst deshalb die Fahrzeuggeschwindigkeit der Ritzelstart-Variante über die von Variante S40 an.

Bei der untersuchten Vollastbeschleunigung läuft der Schlepstart unter anderem aufgrund der eingangs erläuterten Faktoren I-III schneller ab, als der Ritzelstart. Daraus resultiert die, in Abbildung 37 ersichtliche, Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Variante S0 und der Ritzelstart-Variante. Die genauen Ursachen werden im folgenden Absatz erläutert.

Die KUEB öffnet beim Schlepstart aus Komfortgründen. Da bei einer Vollastbeschleunigung der Fokus auf der schnellen Steigerung der Fahrzeuggeschwindigkeit liegt und der Komfort im Motorstart eine untergeordnete Rolle hat, wurde beim Schlepstart auf das Öffnen der KUEB verzichtet. Dadurch verkürzt sich die Motorstartdauer geringfügig (~1,4%), den größten Einfluss haben jedoch die folgenden Faktoren.



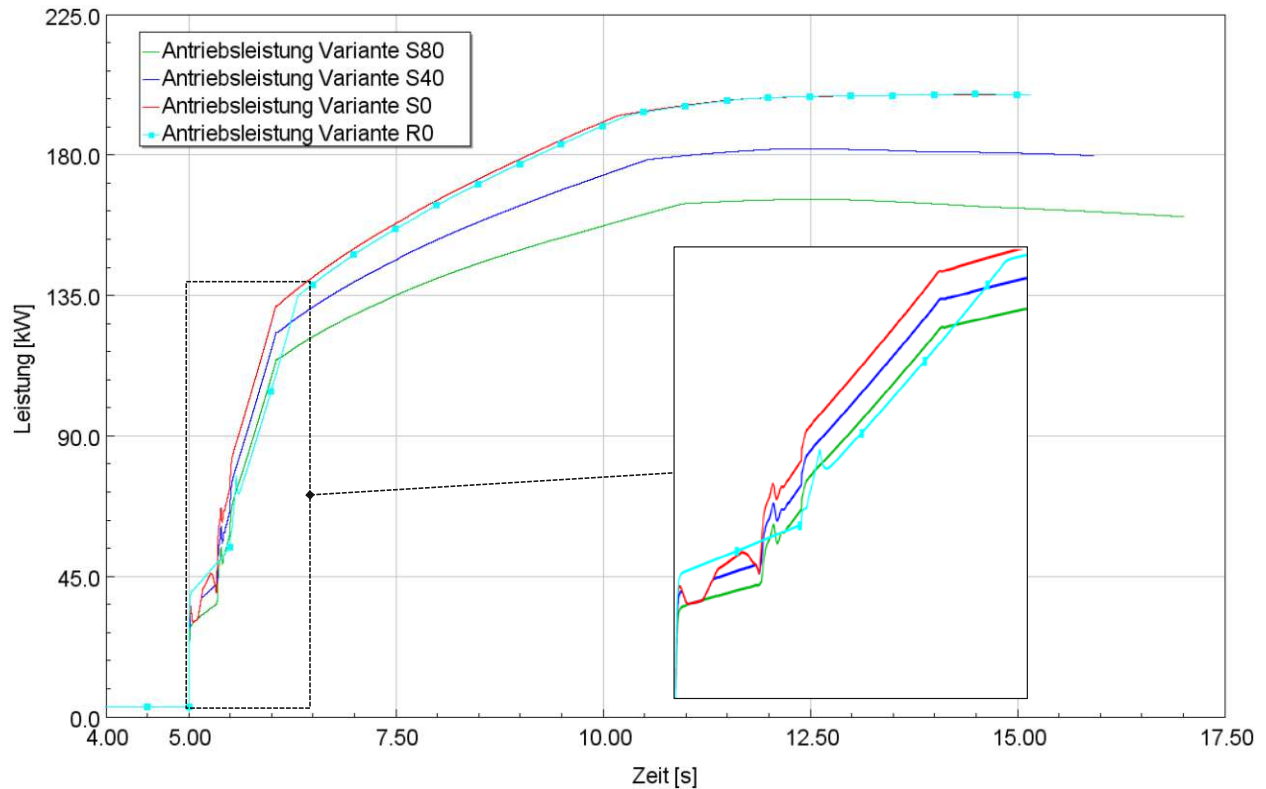
Der Gradient zum Anlegen der 80Nm Reibmoment an der K0 hängt vom Fahrerwunschmoment ab. Bei einer Vollastbeschleunigung fordert der Fahrer das maximale Systemmoment ab und das Reibmoment wird mit dem größtmöglichen Gradienten angelegt. Dadurch wird das Losbrechmoment der VKM schneller erreicht. Bis die erste Einspritzung (bei 280 U/min) der VKM erfolgt, vergeht im Vergleich zum Ritzelstart, ein kürzerer Zeitraum. (Faktor I)

Beim Ritzelstart, benötigt der Ritzelstarter zum Andrehen der VKM eine längere Zeitspanne. Bis ab der ersten Einspritzung, der Hochlauf der VKM-Drehzahl auf EM-Drehzahl startet, hat die EM schon eine höhere Drehzahl als beim Schleppstart erreicht. Beim Ritzelstart, muss der Hochlaufregler also eine größere Drehzahldifferenz überwinden und Drehzahlsynchronität stellt sich später ein. (Faktor II)

Außerdem wird beim Schleppstart die VKM beim Drehzahlhochlauf, speziell am Beginn des Motorstarts und auch nach dem erneuten Öffnen der K0 auf ein geringeres Niveau, vom an der Trennkupplung anliegenden Moment unterstützt. Die VKM muss weniger Moment aufbringen, um die Drehzahldifferenz zu reduzieren. Dieser Faktor ist dafür verantwortlich, dass das VKM-Moment zu dem Zeitpunkt an dem die K0 schließt, ein höheres Niveau als beim Ritzelstartvorgang hat. Die VKM bringt ab diesem Zeitpunkt ein höheres Moment in den Antriebsstrang ein. (Faktor III) Daraus resultiert eine höhere Fahrzeugbeschleunigung im Motorstartvorgang.

Die durch den Schleppstartvorgang erzielte Geschwindigkeitsdifferenz wird jedoch bis zum Abschluss des Beschleunigungsvorgangs wieder stetig reduziert.

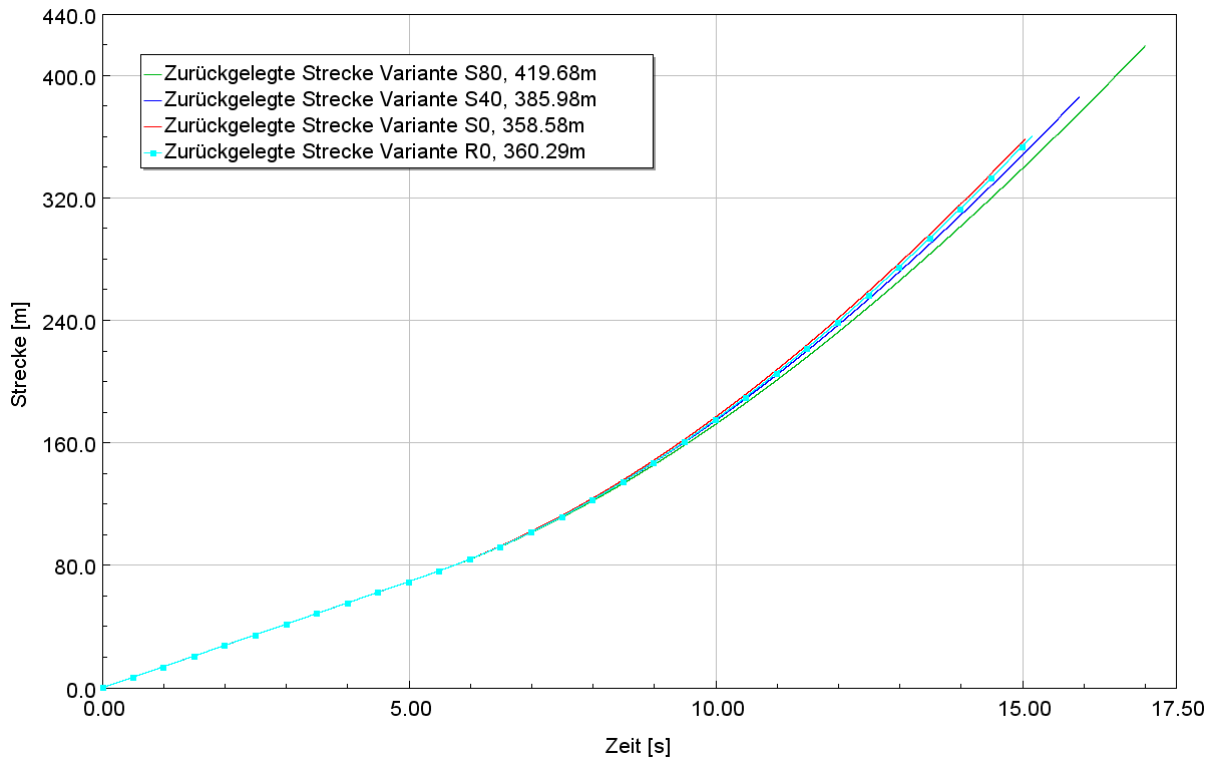
Abbildung 38 zeigt die an den Rädern abgegebene Antriebsleistung aller untersuchten Varianten. Dadurch, dass von der EM bei Variante S0 und S40 mehr Moment in den Antriebsstrang eingebracht wird als bei Variante S80, wächst auch die VKM-Drehzahl und die von ihr abgegebene Leistung schneller an. Die VKM- und auch die Gesamtantriebsleistung befinden sich dadurch früher in einem höheren Bereich. Bei der Ritzelstart-Variante wird von der VKM später Leistung in den Antriebsstrang eingebracht als bei Schleppstart-Variante S0. Nur am Beginn des Motorstartvorgangs, ist die Antriebsleistung der Ritzelstart-Variante höher, weil bei dieser sofort das volle EM-Moment für den Vortrieb genutzt werden kann. Über den restlichen Beschleunigungsvorgang wird dann aber bei Variante S0, aufgrund des schnelleren Motorstarts, früher eine höhere Antriebsleistung abgegeben.



**Abbildung 38: An den Rädern abgegebene Antriebsleistung aller untersuchten Schlepstart-Varianten und der Ritzelstart-Variante in der definierten Beschleunigungssituation**

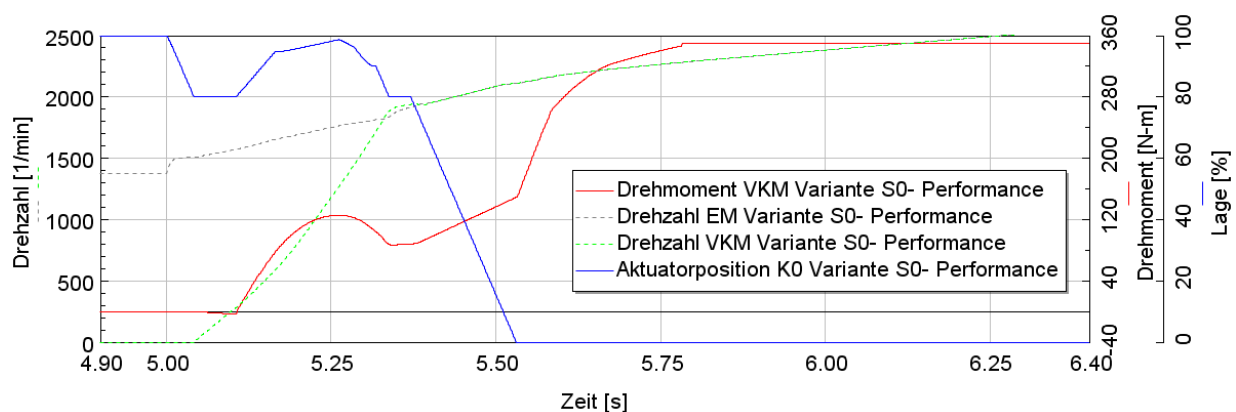
Schlussendlich erreicht Variante S0 die Zielgeschwindigkeit um knapp 0,11 Sekunden vor der Ritzelstart-Variante und legt eine um knapp 1,7m kürzere Wegstrecke zurück. Variante S0 erreicht die Zielgeschwindigkeit ca. zwei Sekunden vor Variante S80 und legt eine um fast 15% kürzere Wegstrecke zurück. [Abbildung 39](#) zeigt die vom Fahrzeug zurückgelegte Wegstrecke aller untersuchten Varianten.





**Abbildung 39: Vom Fahrzeug zurückgelegte Wegstrecke aller untersuchten Schlepstart-Varianten und der Ritzelstart-Variante in der untersuchten Beschleunigungssituation**

An dieser Stelle soll exemplarisch noch gezeigt werden, dass nach dem Abschluss des K0-Schließvorgangs durch das schnelle Anlegen des maximalen VKM-Moments, die Fahrzeugperformance noch weiter gesteigert werden könnte. Der Gradient wird dabei durch das Ansprechverhalten der turboaufgeladenen VKM limitiert, welches nur für diese Performance-Variante stark vereinfacht abgebildet wurde. Abbildung 40 zeigt die Performance-Variante von Schlepstart-Variante S0.

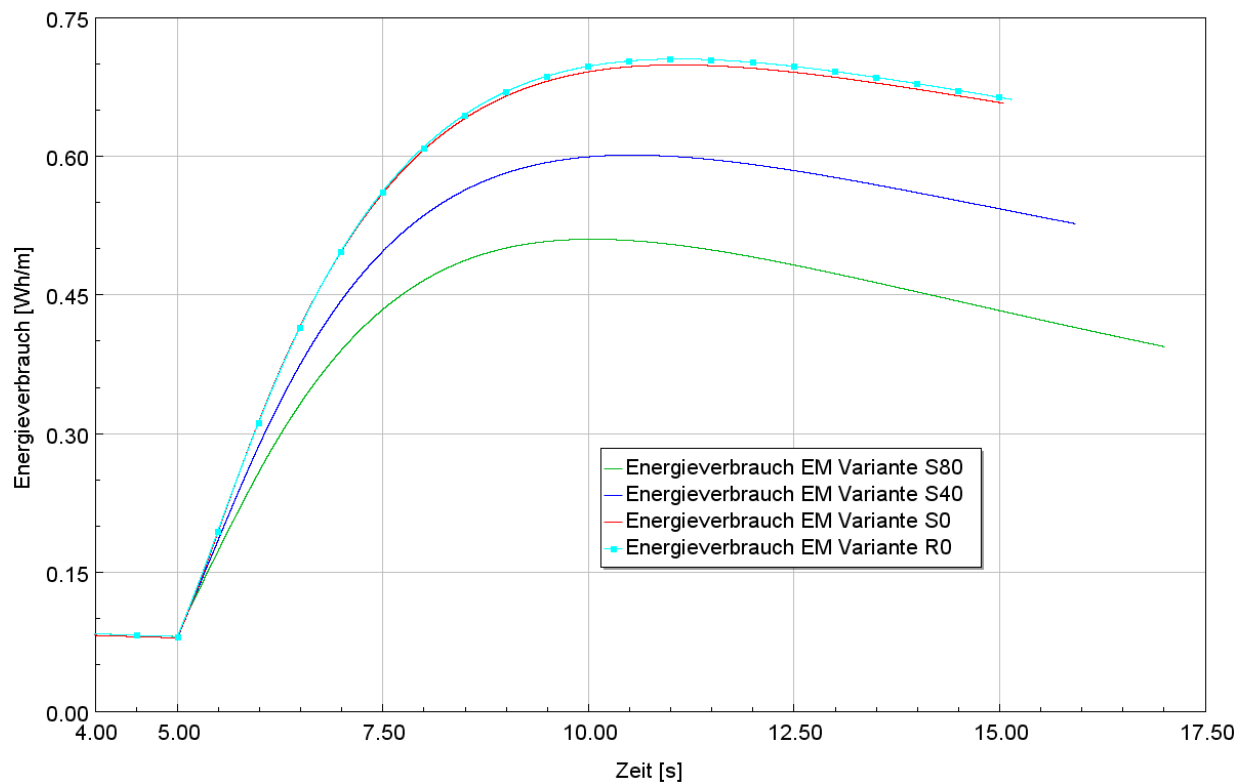


**Abbildung 40: Schlepstart-Variante S0 mit höherem VKM-Gradient nach dem Schließen der Trennkupplung**

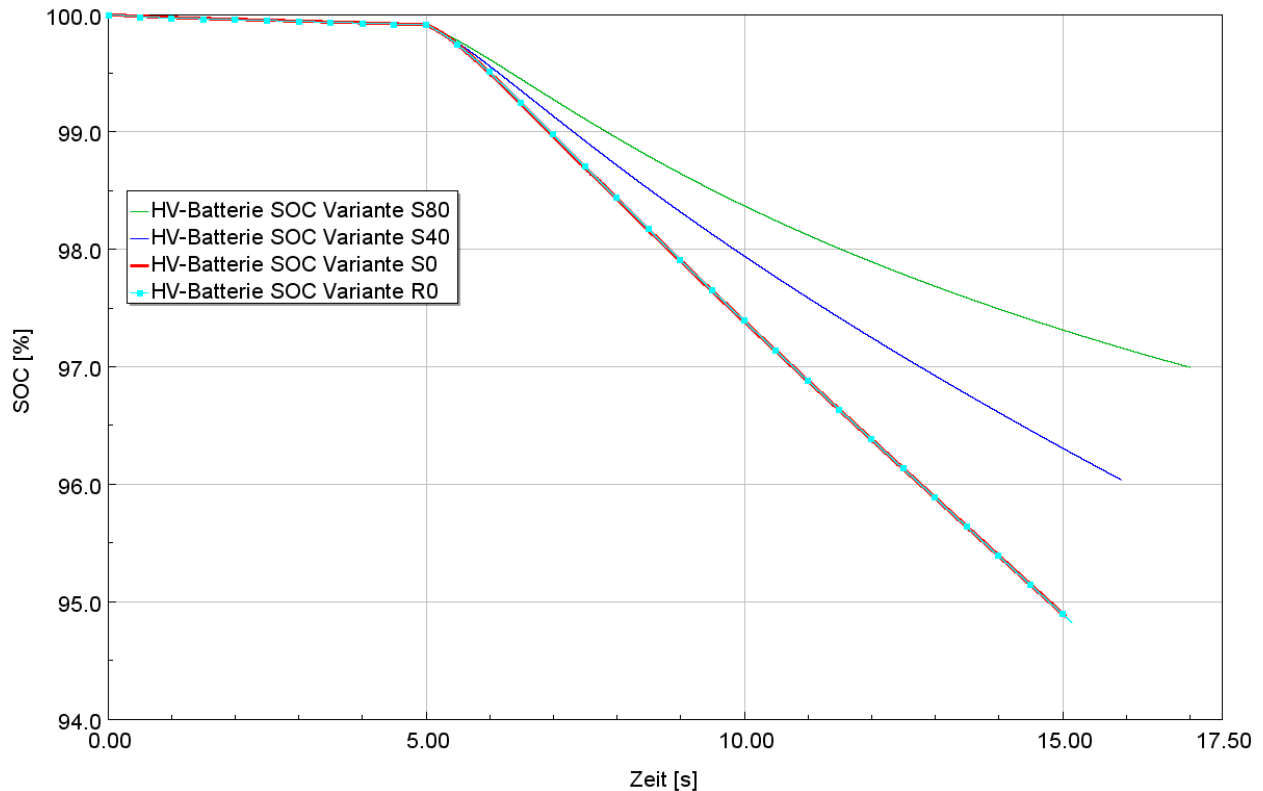
Durch das schnellere Anlegen des maximalen VKM-Moments, kann die zurückgelegte Wegstrecke gegenüber der herkömmlichen Schlepstart-Variante S0 nochmals um 0.86m verkürzt werden. Zudem wird die Zielgeschwindigkeit um 0.05s schneller erreicht.

## Energetische Betrachtung

Abbildung 41 zeigt die von der E-Maschine pro zurückgelegten Meter benötigte elektrische Energie. Abbildung 42 zeigt den SOC der HV-Batterie aller untersuchten Schlepstart-Varianten und der Ritzelstart-Variante.



**Abbildung 41: Von der EM benötigte elektrische Energie aller untersuchten Schlepstart-Varianten und der Ritzelstartvariante während der untersuchten Vollastbeschleunigung bezogen auf die zurückgelegte Wegstrecke**



**Abbildung 42: SOC der HV-Batterie aller untersuchten Schlepstart-Varianten und der Ritzelstart-Variante während der Vollastbeschleunigung**

Variante S0 steht, im Vergleich mit den anderen untersuchten Schlepstart-Varianten, das größte EM-Moment zur Verfügung. Über den gesamten Beschleunigungsvorgang gibt die E-Maschine deshalb auch die größte Leistung ab. Die EM verrichtet bei Variante S0 im Vergleich mit Variante S80 bis zum Ende des Beschleunigungsvorgangs, pro Meter zurückgelegter Wegstrecke, eine um knappe 66% höhere mechanische Arbeit. Betrachtet man die im gesamten Beschleunigungsvorgang von EM und VKM verrichtete Arbeit aller Schlepstartvarianten im Vergleich, wird bei Variante S0 die VKM am stärksten von der EM unterstützt. Variante S0 benötigt deshalb für den Beschleunigungsvorgang auch die größte elektrische Energie.

Im Vergleich mit Variante S80 ist der Verbrauch an elektrischer Energie schlussendlich um knapp 67% höher, da die EM im Betrieb entlang der Vollastlinie einen schlechteren Wirkungsgrad aufweist. Zudem sind, aufgrund der höchsten Fahrzeugbeschleunigung und -geschwindigkeit, die Fahrwiderstandsverluste bei Variante S0 pro Meter zurückgelegter Wegstrecke am größten. Bei Variante S40 verrichtet die EM während des Beschleunigungsvorgangs weniger Arbeit und benötigt deshalb auch weniger elektrische Energie.

Betrachtet man die Ritzelstart-Variante und Variante S0 im Vergleich, fällt auf, dass die Ritzelstart-Variante für den Beschleunigungsvorgang geringfügig mehr elektrische

Energie benötigt. Dies hat folgende Ursache. Beim schnelleren Schlepstartvorgang wird, wie bereits erwähnt, von der VKM früher und auch mehr Leistung (Faktor III) in den Antriebsstrang eingebracht. Deshalb wird ungefähr 1,5s nach dem Motorstart, bei der Schlepstart-Variante das EM-Moment früher reduziert und kurz danach auch weniger mechanische Leistung abgegeben. Über die restliche Zeitdauer des Beschleunigungsvorgangs wird von der Schlepstart-Variante deshalb auch weniger elektrische Leistung aufgenommen und es entsteht eine Differenz zwischen Variante S0 und der Ritzelstart-Variante. In der untersuchten Beschleunigungssituation benötigt die Ritzelstart-Variante schlussendlich jedoch nur um knappe 0,6% mehr elektrische Energie pro Meter, als Schlepstart-Variante S0.

Betrachtet man nur den elektrischen Energiebedarf lässt sich zusammenfassend sagen, dass Schlepstart-Variante S80 die effizienteste Variante darstellt, um die Zielgeschwindigkeit zu erreichen. Die EM verrichtet im Beschleunigungsvorgang pro zurückgelegten Meter weniger Arbeit und wird zudem mit einem höheren Wirkungsgrad betrieben, als bei allen anderen untersuchten Varianten. Deshalb und aufgrund der niedrigeren Fahrwiderstandsverluste, benötigt die EM pro zurückgelegten Meter auch die geringste elektrische Energie. Variante S80 ist aus der Perspektive des EM-Energieverbrauchs zwar effizienter als die anderen untersuchten Varianten, benötigt jedoch auch am längsten um die 150km/h zu erreichen.

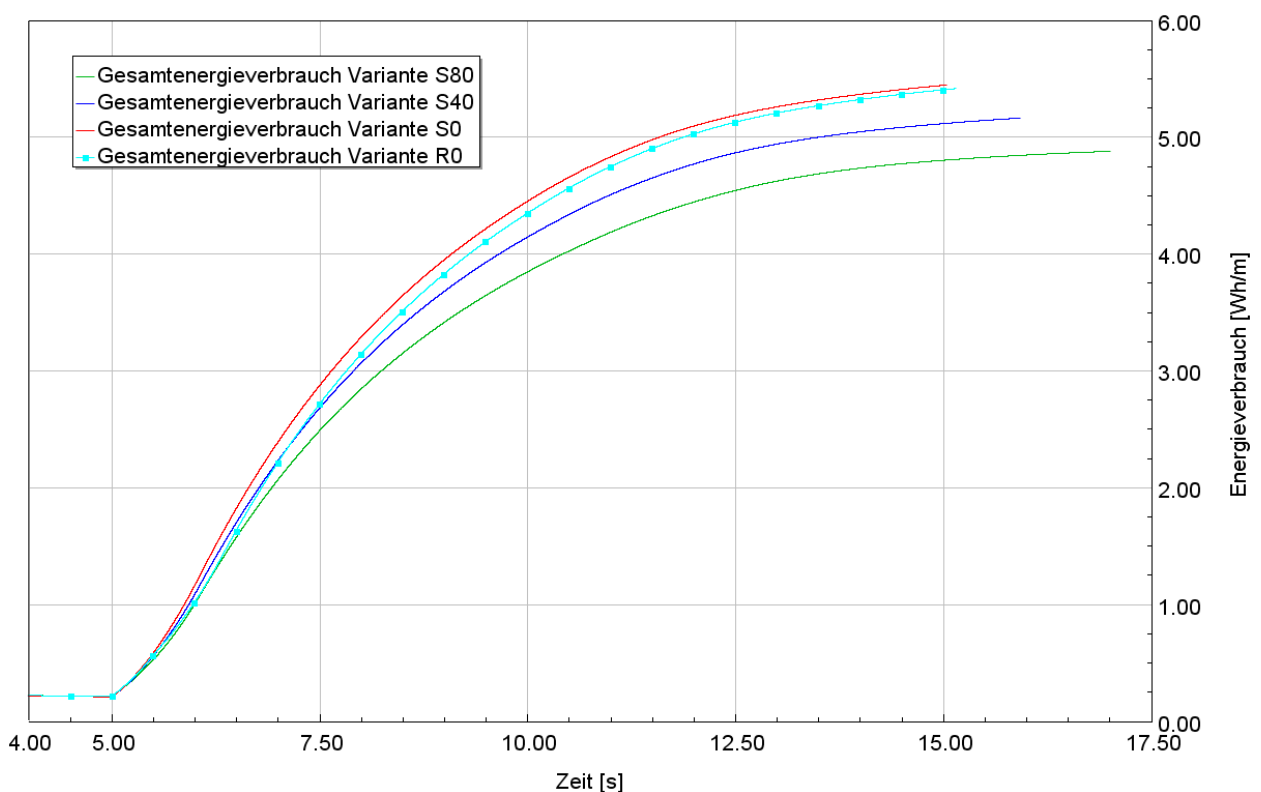
Um schlussendlich auch eine globalere Aussage hinsichtlich der Energieeffizienz der untersuchten Startvarianten treffen zu können, wurde der Gesamtenergieverbrauch ermittelt. Abbildung 43 zeigt die von der E-Maschine und VKM benötigte Energie aller untersuchten Schlepstart-Varianten und der Ritzelstart-Variante, bezogen auf die während der Vollastbeschleunigung zurückgelegte Wegstrecke. Bei der Ritzelstart-Variante wurde zusätzlich der elektrische Energiebedarf des Ritzelstarters berücksichtigt.

Um den verbrauchten Kraftstoff nicht nur beim VKM-Energiebedarf sondern auch beim EM-Energiebedarf berücksichtigen zu können, wurde die elektrische Energie mit einem Kraftstoffverbrauchsäquivalent bewertet. Mit Hilfe des sogenannten Energiekostenindikators (EKI), können die Kraftstoffkosten für die im Energiespeicher gespeicherte elektrische Energie ermittelt werden.

Der EKI gibt das Verhältnis zwischen der für das Laden der Batterie benötigten Kraftstoffmenge und der damit erzielten Ladezustandssteigerung an. Dadurch, dass die Kraftstoffkosten der elektrischen Energie bekannt sind, kann die Betriebsstrategie des Hybridfahrzeugs entscheiden, ob in der jeweiligen Situation der verbrennungsmotorische,

der kombinierte oder der rein elektrische Betrieb am verbrauchsoptimalsten ist. Zudem schafft er damit die Grundlage für eine effiziente Ladestrategie. [29] Der Energieverlust beim Entladen, wurde im konkreten Fall nicht berücksichtigt.

Entsprechend Literaturangaben [29], wurde ein EKI von 0,3 l/kWh verwendet, um die im Beschleunigungsvorgang benötigte elektrische Energie zu bewerten. Dieser entspricht einem spezifischen Kraftstoffverbrauch von 222 g/kWh. Betrachtet man das in Kapitel 5.1.2 dargestellte Verbrauchskennfeld der VKM, wird ersichtlich, dass somit die rein elektrische Fahrt in jedem Fall energieeffizienter ist als der verbrennungsmotorische Betrieb.



**Abbildung 43: Gesamtenergieverbrauch der Schlepstart-Varianten und der Ritzelstart-Variante in der untersuchten Vollastbeschleunigung bezogen auf die zurückgelegte Wegstrecke**

Im Vergleich mit den anderen untersuchten Schlepstart-Varianten, muss die VKM bei Variante S80 die größte Arbeit verrichten, weil sie im Beschleunigungsvorgang am wenigsten von der EM unterstützt wird. Der Kraftstoffverbrauch der VKM, ist somit bei Variante S80 pro Meter zurückgelegter Wegstrecke am höchsten. Aufgrund des geringen elektrischen Energieverbrauchs, ist der Gesamtenergieverbrauch bei Variante S80 aber trotzdem am niedrigsten.

Variante S0 wird während der Vollastbeschleunigung am meisten von der EM unterstützt, der VKM-Kraftstoffverbrauch pro Meter ist deshalb, trotz der höheren Fahrwiderstands- und Wirkungsgradverluste bei höheren Drehzahlen, niedriger als bei

den anderen Schleppstart-Varianten. Ungeachtet dessen, ergibt sich durch den Mehrverbrauch an elektrischer Energie, ein höherer Gesamtenergieverbrauch als bei Variante S80. Dieser ist im Vergleich mit Variante S80 um knapp 12% höher. Die Schleppstart-Variante S0 erreicht die Zielgeschwindigkeit zwar vor allen anderen untersuchten Varianten, benötigt pro zurückgelegten Meter Wegstrecke dafür aber auch die größte Menge an Energie.

Betrachtet man die Ritzelstart-Variante und Schleppstart-Variante S0 im Vergleich, weist die Schleppstart-Variante pro zurückgelegtem Meter einen geringen Mehrverbrauch auf (0,56%). Dieser erklärt sich durch den höheren Kraftstoffverbrauch der VKM im Motorstartvorgang. Bei der Schleppstart-Variante S0, bringt diese früher und auch mehr Leistung in den Antriebsstrang ein. Dadurch wird von der VKM mehr Kraftstoff verbraucht als bei der Ritzelstart-Variante. Der Mehrverbrauch der VKM, kann durch den geringeren elektrischen Energieverbrauch nicht kompensiert werden.

Variante S80 ist, trotz des höchsten VKM-Kraftstoffverbrauchs, somit auch aus der Perspektive des Gesamtenergieverbrauchs die effizienteste Variante um in der untersuchten Beschleunigungssituation einen Meter Wegstrecke zurückzulegen.

### **Zusammenfassung**

Die Untersuchungen zeigen, dass die Ritzelstart-Variante sofort das volle EM-Moment für den Vortrieb nutzen kann, diese weist damit am Beginn der Vollastbeschleunigung die größte Fahrzeugbeschleunigung auf. Durch den schnelleren Motorstart-Vorgang wird bei Schleppstart-Variante S0 jedoch früher und aufgrund des ermittelten Faktors III, auch mehr VKM-Moment in den Antriebsstrang eingebracht. Schleppstart-Variante S0 erreicht deshalb die Zielgeschwindigkeit trotzdem am schnellsten.

Weil bei Variante S0 auf das EM-Reservemoment verzichtet wird, kann das während des Motorstartvorgangs an der K0 angelegte Moment nicht von der EM ausgeglichen werden. Der Einfluss durch das zum VKM-Start an der Trennkupplung angelegte Moment auf die Fahrzeugbeschleunigung, ist deshalb hier auch am größten. Aufgrund der Änderung in der Fahrzeugbeschleunigung lässt sich ableiten, dass Variante S0 den unkomfortabelsten Motorstartvorgang aufweist. Betrachtet man die Schleppstart-Varianten im Vergleich, ist zudem der Bedarf an elektrischer Energie bei dieser Variante am größten. Der Energieverbrauch der VKM ist gleichzeitig zwar am geringsten, trotzdem weist diese aber den höchsten Gesamtenergieverbrauch auf.

Variante S80 stellt die effizienteste Variante dar, um die untersuchte Vollastbeschleunigung zu absolvieren. Sie benötigt am wenigsten Kraftstoff pro zurückgelegten Meter, erreicht die Zielgeschwindigkeit aber auch nach allen anderen Varianten.

Die untersuchte Schlepstart-Variante S40 stellt sowohl aus Komfortperspektive, aus dem Blickwinkel der Fahrzeugperformance, als auch aus energetischer Sicht einen Kompromiss zwischen Variante S0 und S80 dar.

Von allen untersuchten Startvarianten, benötigt die Ritzelstart-Variante für den Beschleunigungsvorgang die größte elektrische Energie, der Gesamtenergieverbrauch ist jedoch niedriger als bei Schlepstart-Variante S0. Die Differenz im elektrischen Energieverbrauch und im Gesamtenergieverbrauch fällt jedoch in der untersuchten Beschleunigungssituation äußerst gering aus. Fairerweise muss an dieser Stelle nochmals erwähnt werden, dass der Wirkungsgrad des Ritzelstarters, wie bereits in Kapitel 5.1.6 erläutert, als konstant angenommen wurde. Sein Energiebedarf ist im Vergleich mit VKM und EM aber marginal und er hat damit nur unerhebliche Auswirkungen auf die Differenz zwischen Variante S0 und der Ritzelstart-Variante.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Verzicht auf das EM-Reservemoment während einer Vollastbeschleunigung aus Performance-Perspektive vorteilhaft, hinsichtlich Energieeffizienz jedoch nachteilig ist. In puncto Komfort ergibt sich beim Schlepstart ebenfalls ein Nachteil. Ist ein schneller VKM-Start notwendig, stellt der Schlepstart im direkten Vergleich zum Ritzelstart die bessere Alternative dar. Die Ritzelstart-Variante ist in der untersuchten Beschleunigungssituation jedoch geringfügig energetisch günstiger als Schlepstart-Variante S0. Bei diesem direkten Vergleich muss aber der Einfluss der am Beginn dieses Kapitels erläuterten Faktoren I-III auf die Motorstartdauer, unbedingt berücksichtigt werden.



## 6.2 Schleppstart Parametervariation 2

Für die nachfolgenden Untersuchungen wird eine neue Variante der Vollastbeschleunigung mit Schleppstart eingeführt. Die in Kapitel 6 definierte Beschleunigungssituation wurde dafür geringfügig modifiziert.

Am Beginn der Vollastbeschleunigung schaltet das Getriebe nicht mehr zurück, sondern bleibt bis zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit im gleichen Gang (Gang 5). Für den gesamten Beschleunigungsvorgang steht der EM das maximale Moment zur Verfügung. Das Reservemoment für den Schleppstart wird nicht vorgehalten ( $M_d=0\text{Nm}$ ). Diese Variante wird mit der, in Kapitel 6 definierten Beschleunigungssituation mit Zurückschalten (keine Zugkraftunterbrechung) und herkömmlichen Schleppstart ( $M_d=80\text{Nm}$ ), verglichen.

Ziel dieser Untersuchung ist es, eine Aussage darüber treffen zu können, ob es bei einem Kickdown mit Vollastbeschleunigung von 50km/h auf 150km/h besser ist nicht zurückzuschalten und die EM zu überhöhen, oder nicht. Tabelle 5 zeigt die untersuchten Varianten.

**Tabelle 5: Beschleunigungssituation Variante S80 und S0/5**

Beschleunigungssituation			
	Motorstart	Reservemoment EM [Nm]	Gang während Vollastbeschleunigung
<b>Variante S80</b>	Schleppstart	80	4
<b>Variante S0/5</b>	Schleppstart	0	5

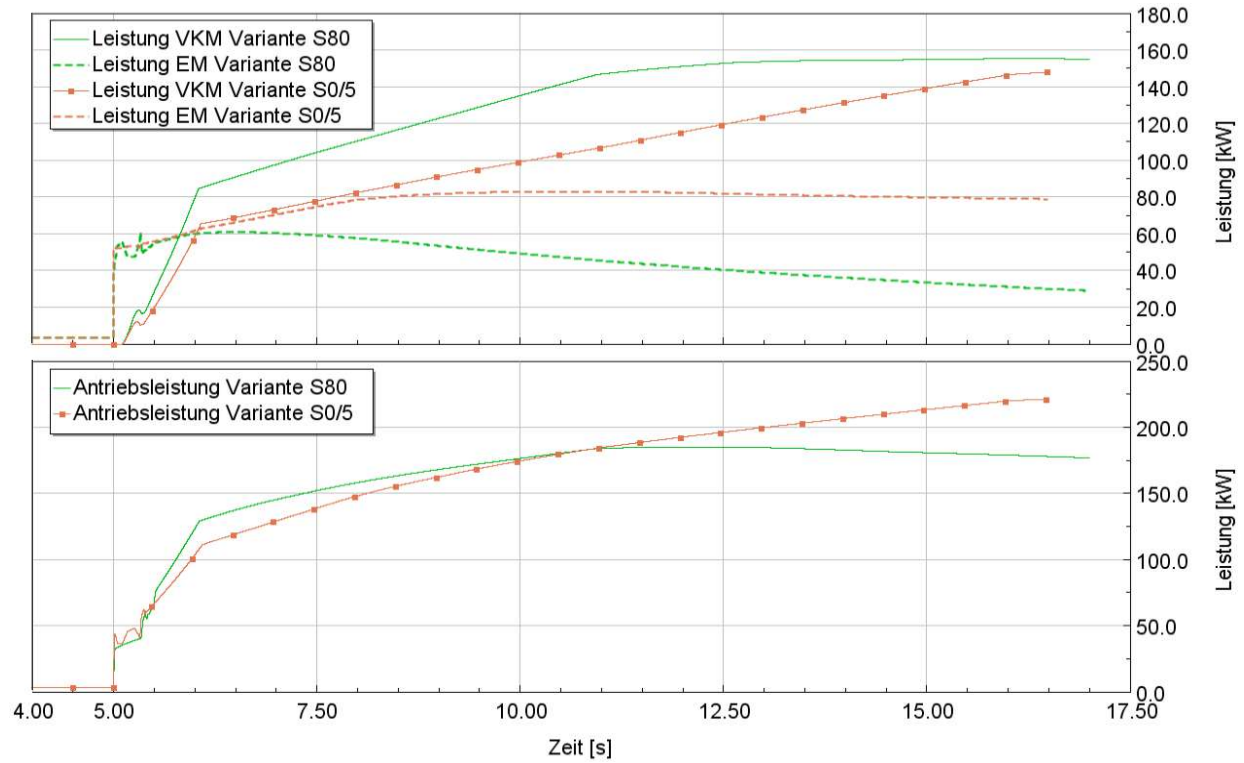
### Fahrzeuggeschwindigkeit und zurückgelegte Wegstrecke

Bei Variante S80 wird beim Kickdown um einen Gang zurückgeschaltet. Die VKM und die EM werden deshalb über den gesamten Beschleunigungsvorgang in einem höheren Drehzahlbereich betrieben als bei Variante S0/5. Durch die höhere Drehzahl, gibt die VKM bei Variante S80 von Beginn an mehr Leistung ab. Die EM-Leistung hat hingegen bei Variante S0/5 von Beginn an und über die gesamte Vollastbeschleunigung ein höheres Niveau. Abbildung 44 zeigt die Leistung, die von der EM und der VKM während des Beschleunigungsvorgangs abgegeben wird. Des Weiteren ist die an den Rädern abgegebene Antriebsleistung dargestellt.

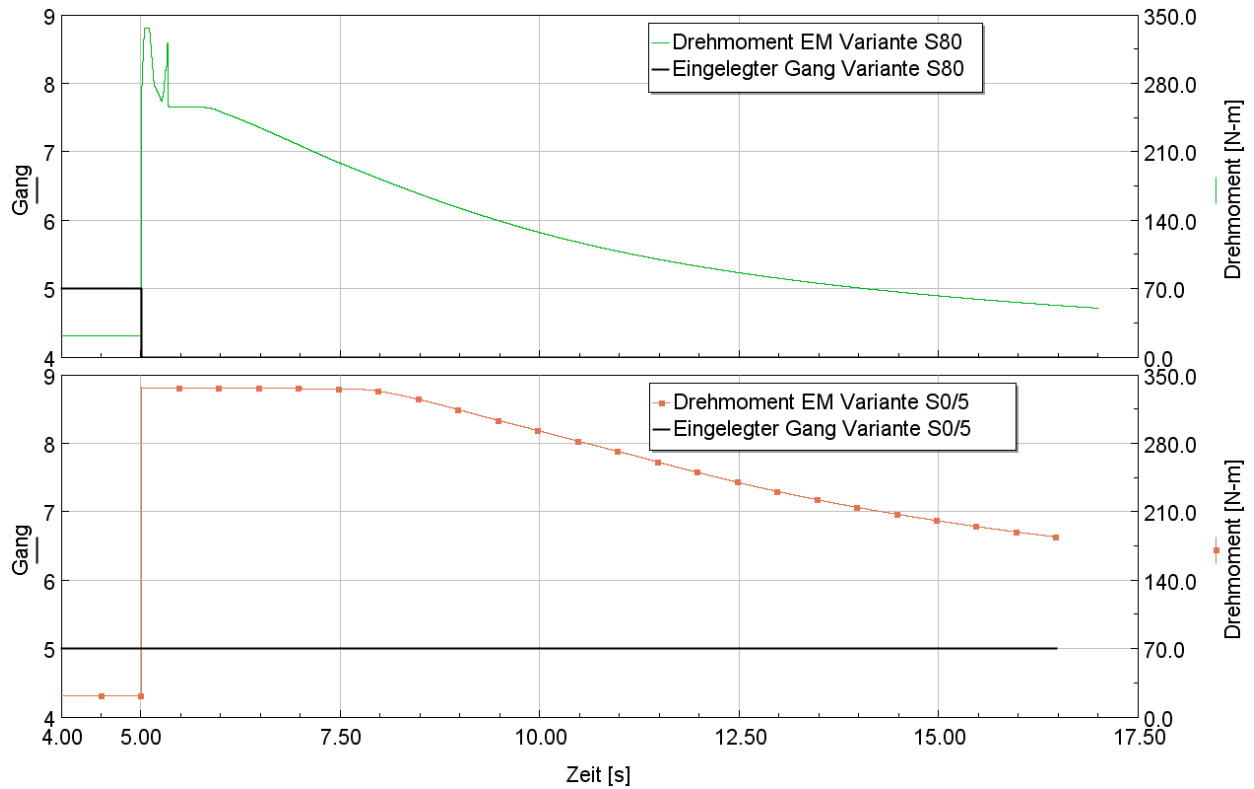
Abbildung 45 zeigt den bei Variante S80 und Variante S0/5 eingelegten Gang und das EM-Moment während des Beschleunigungsvorgangs. Einerseits lässt sich bei Variante S0/5 erkennen, dass durch den Verzicht auf das EM-Reservemoment das Niveau des



EM-Moments höher ist als bei Variante S80. Andererseits ist ersichtlich, dass durch das niedrigere Drehzahlniveau das EM-Moment später reduziert wird.



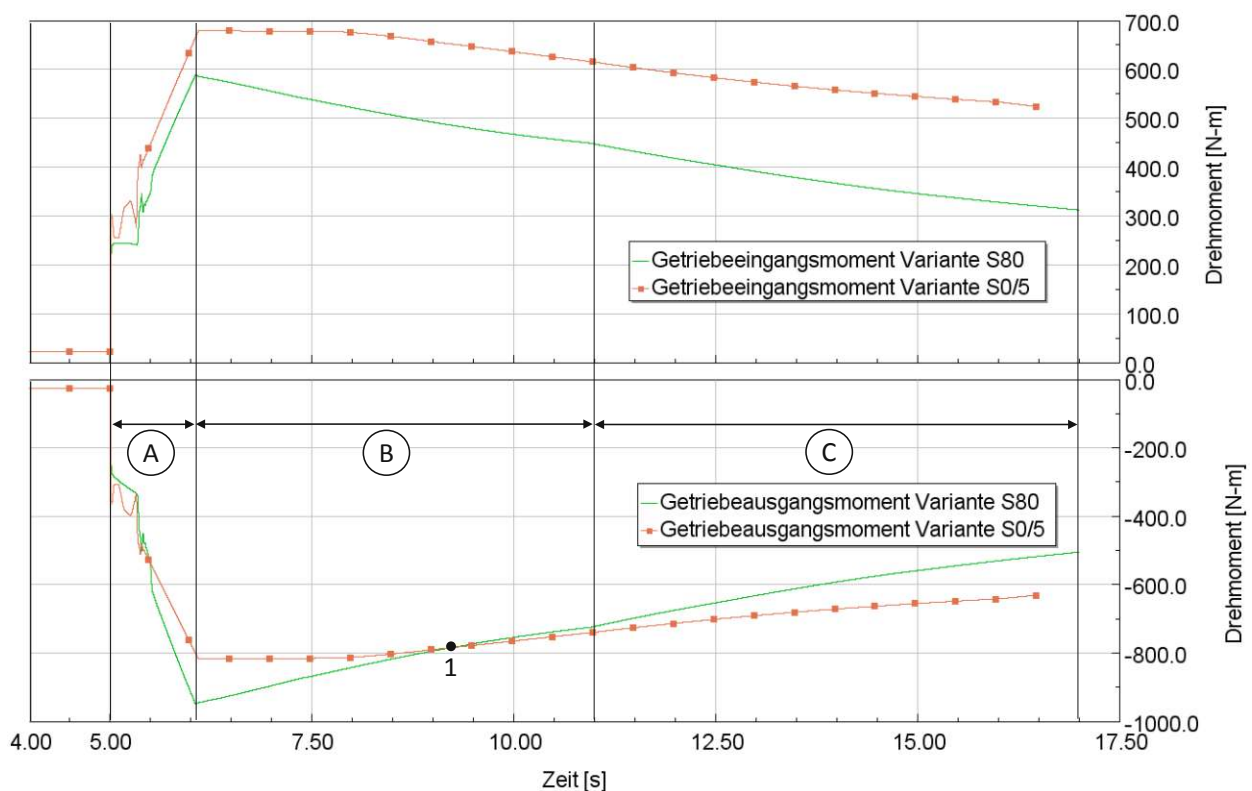
**Abbildung 44: Abgegebene Leistung von EM und VKM und an den Rädern abgegebene Antriebsleistung beider Varianten**



**Abbildung 45: Eingelegter Gang und EM-Drehmoment bei Variante S80 und Variante S0/5**

Die EM gibt bei Variante S0/5 **mehr Drehmoment** und, trotz der niedrigeren Drehzahl, eine höhere Leistung ab. Durch das niedrigere Drehzahlniveau bei Variante S0/5 kann die EM **länger** im Bereich des Maximalmoments betrieben werden, bevor das Moment abfällt. Aufgrund dieser beiden Aspekte, wird bei Variante S0/5 von der EM länger mehr Moment in den Antriebsstrang eingebracht und eine höhere Leistung abgegeben. Die VKM gibt bei Variante S0/5 hingegen weniger Leistung ab. Deshalb ist am Beginn des Beschleunigungsvorgangs die an den Rädern abgegebene Antriebsleistung bei Variante S0/5 trotzdem geringer und steigt erst im weiteren Verlauf der Vollastbeschleunigung über die von Variante S80 an.

Abbildung 46 zeigt dazu das Getriebeeingangs- und das Getriebeausgangsmoment der beiden untersuchten Varianten unterteilt in die Bereiche A-C. Obwohl Variante S80 das geringere Systemmoment zur Verfügung hat, ergibt sich durch den niedrigeren Gang und das damit höhere Übersetzungsverhältnis, schon während des Motorstartvorgangs (Bereich A) am Getriebeausgang ein höheres Moment als bei Variante S0/5.



**Abbildung 46: Getriebeeingangs- und Getriebeausgangsmoment der beiden untersuchten Varianten, unterteilt in die Bereiche A-C**

Dadurch ist die Vortriebskraft und die Fahrzeugbeschleunigung bei Variante S80 höher. Die Fahrzeuggeschwindigkeit nimmt stärker zu als bei Variante S0/5. Abbildung 47 zeigt die Fahrzeuggeschwindigkeit der untersuchten Varianten und deren Differenz.

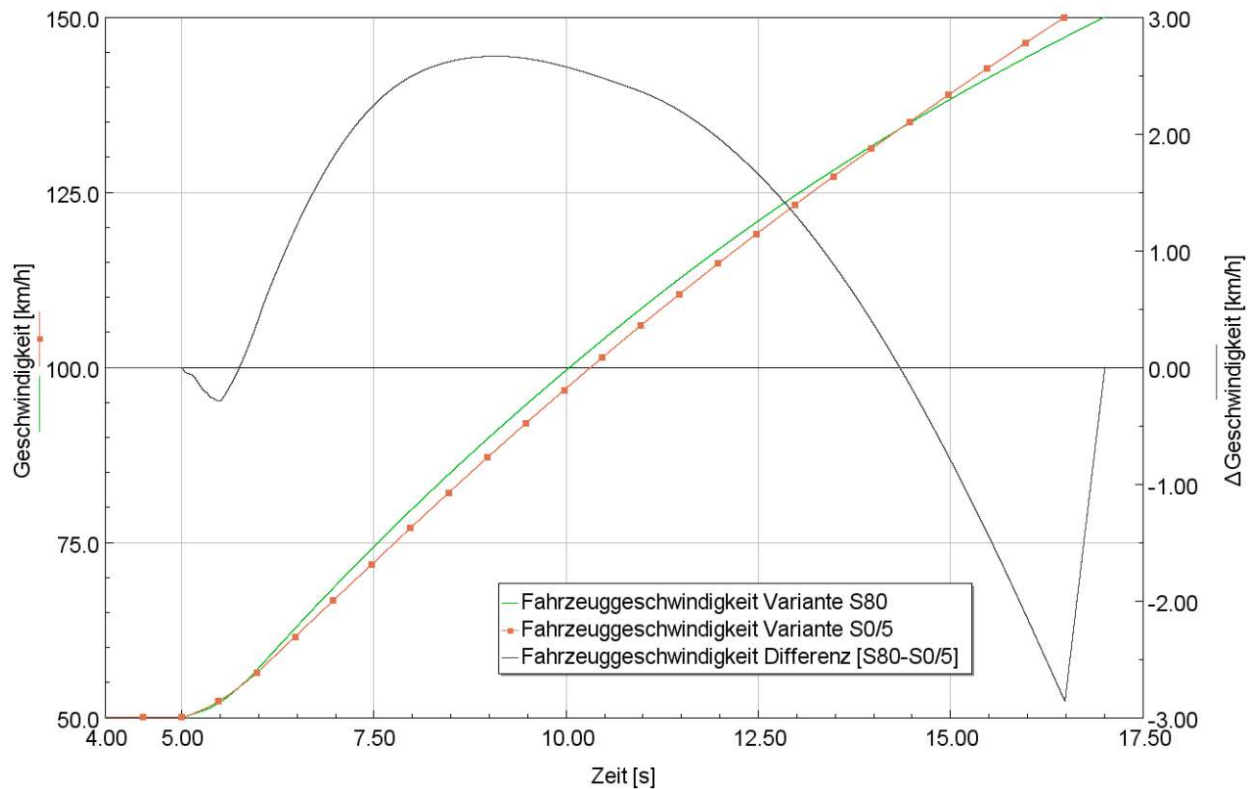
Aufgrund der höheren Drehzahl wird jedoch bei Variante S80 das EM-Moment früher und mit höherem Gradienten reduziert als bei Variante S0/5. Bereits am Ende von dem in Abbildung 46 markierten Bereich A, beginnt die Differenz im Getriebeeingangsmoment von Variante S80 und S0/5 deshalb anzuwachsen.

Die Differenz im Getriebeeingangsmoment wächst jedoch nur geringfügig an, weil sich die frühere Reduktion des EM-Moments bei Variante S80 noch nicht im vollen Maße auswirkt. Dies ist der Fall, weil die VKM aufgrund des in Kapitel 6.1 erläuterten Faktor III, bei Variante S80 im Rampvorgang mehr Moment in den Antriebsstrang einbringt als bei Variante S0/5. Bis der Vorgang abgeschlossen ist, wird so bei Variante S80 das bereits geringer werdende EM-Moment nahezu kompensiert und die Differenz im Getriebeeingangsmoment wächst im Bereich A nur in geringem Ausmaß an.

Nach dem Abschluss des Motorstartvorgangs (Bereich B), wird bei beiden Varianten das maximale Systemmoment in den Antriebsstrang eingebracht. Dadurch, dass bei Variante S80 das EM-Moment früher und mit größerem Gradienten zurück genommen wird, nimmt das Getriebeausgangsmoment auch im Bereich B mit größerem Gradienten als bei Variante S0/5 ab. Schließlich sinkt es unter das Niveau von Variante S0/5. Der Schnittpunkt ist in Abbildung 46 mit Punkt 1 markiert. Zusätzlich sind die Fahrwiderstände aufgrund der höheren Fahrzeuggeschwindigkeit bei Variante S80 größer. Die Fahrzeugbeschleunigung von Variante S80, sinkt deshalb schon kurz zuvor unter das Niveau von Variante S0/5. Ab dem Zeitpunkt an dem die Fahrzeugbeschleunigung von Variante S0/5 größer ist als die von Variante S80, reduziert sich die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den beiden Varianten wieder.

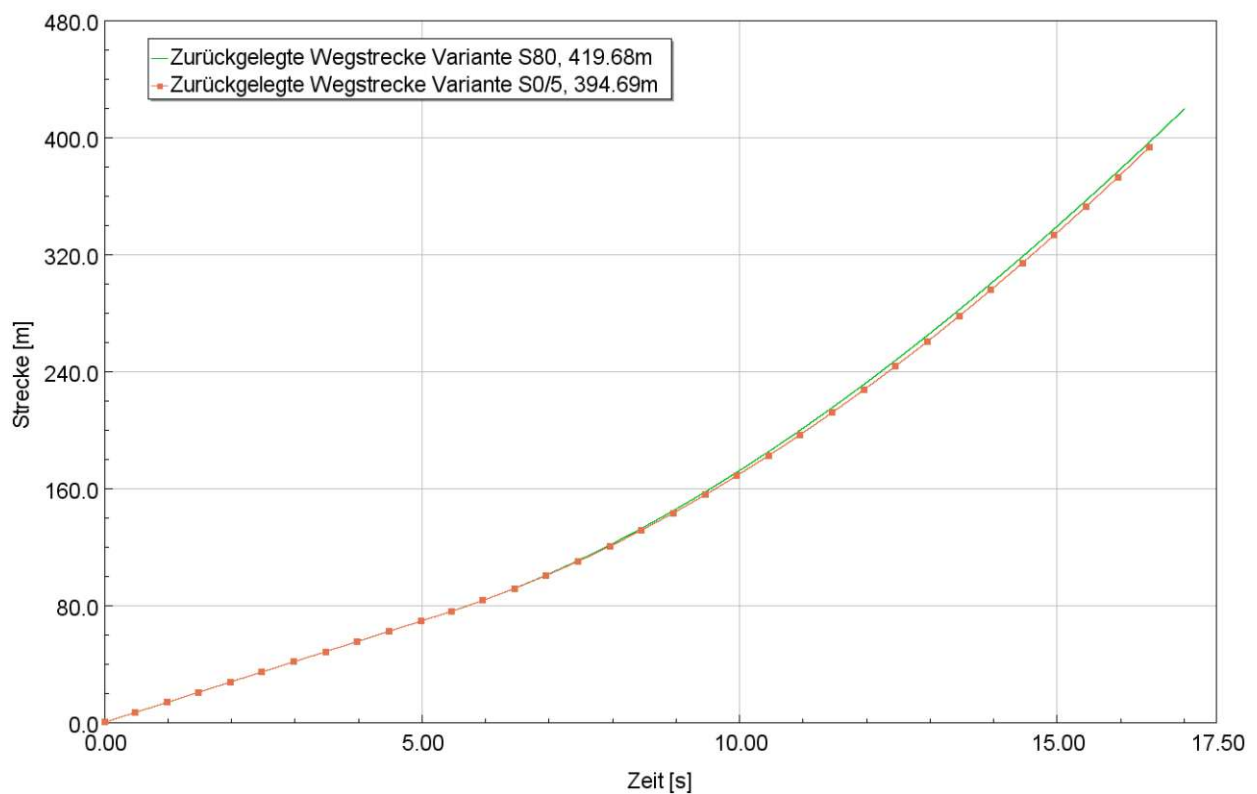
Sobald dann noch bei Variante S80, aufgrund des höheren Drehzahlniveaus, das VKM-Moment früher reduziert wird, nimmt das Getriebeausgangsmoment und damit die Fahrzeugbeschleunigung mit noch höherem Gradienten ab und die Geschwindigkeitsdifferenz verringert sich noch rascher. (Bereich C)

Schlussendlich erreicht Variante S0/5, wie in Abbildung 47 ersichtlich, die Zielgeschwindigkeit (150km/h) knapp eine halbe Sekunde vor Variante S80. Aus Performance-Perspektive stellt Variante S0/5 in der betrachteten Beschleunigungssituation also die vorteilhaftere Variante dar.



**Abbildung 47: Fahrzeuggeschwindigkeit von Variante S80 und S0/5 und deren Differenz**

Variante S80 muss eine weitere Strecke zurücklegen, um die Zielgeschwindigkeit zu erreichen. [Abbildung 48](#) zeigt die von beiden Varianten zurückgelegte Wegstrecke.

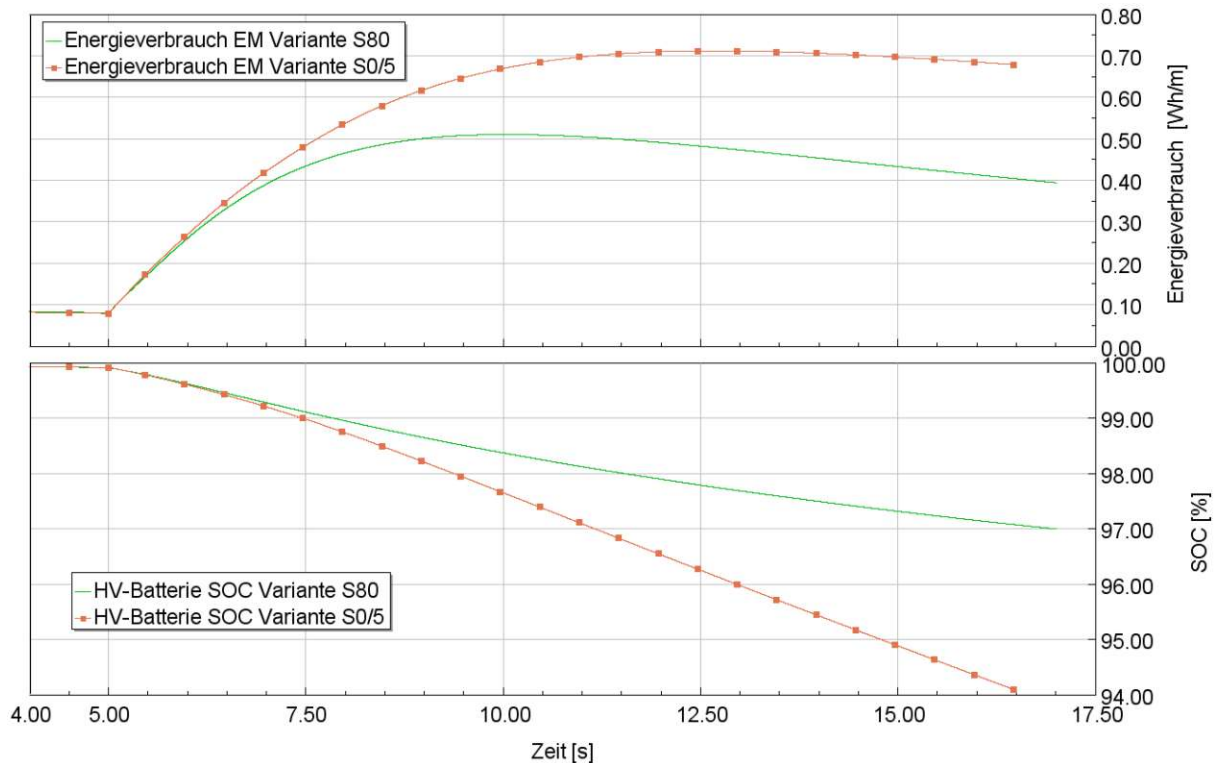


**Abbildung 48: Vom Fahrzeug zurückgelegte Wegstrecke der Variante S80 und S0/5**

Die Differenz in der zurückgelegten Wegstrecke beträgt knapp 25m.

### Energetische Betrachtung

Abbildung 49 zeigt die von der EM verbrauchte elektrische Energie bezogen auf die zurückgelegte Wegstrecke. Außerdem ist der SOC der HV- Batterie dargestellt.

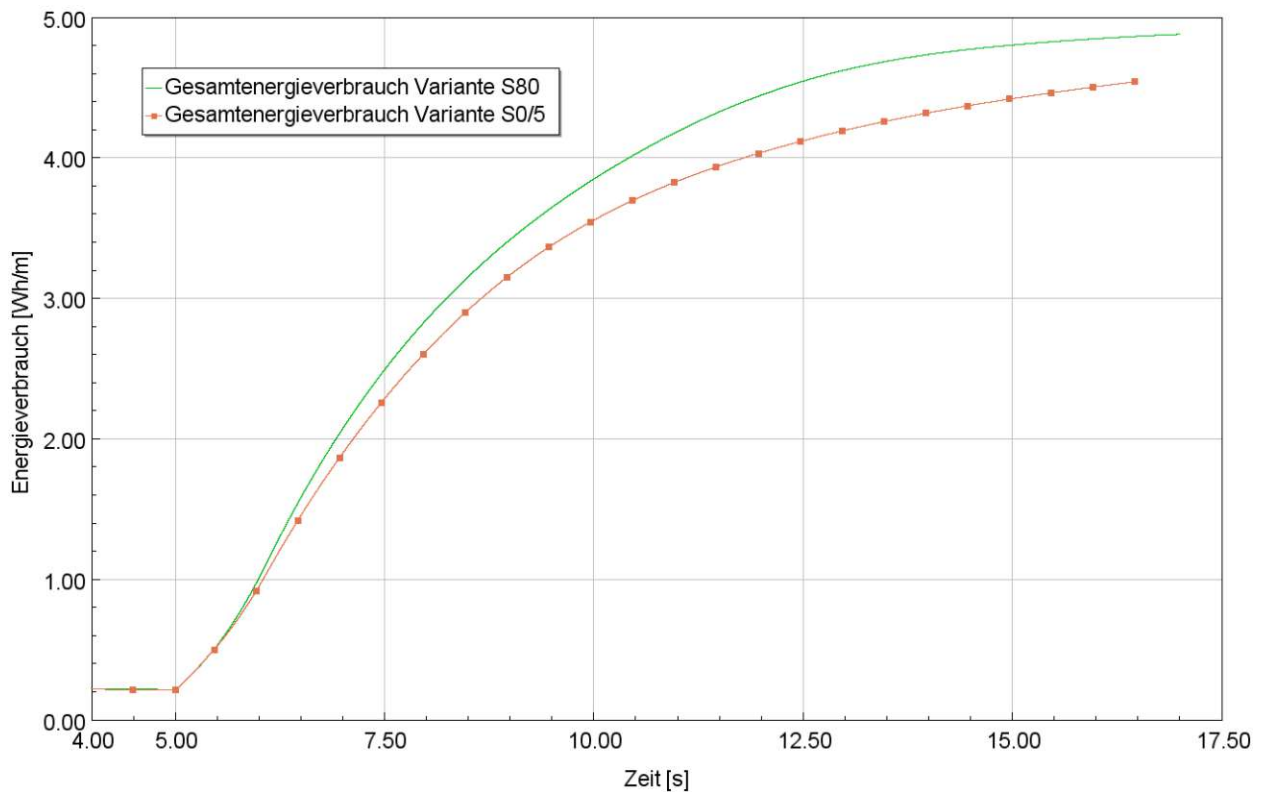


**Abbildung 49: Von der EM benötigte elektrische Energie von Variante S80 und S0/5 und der SOC der HV-Batterie**

Bei Variante S0/5 verrichtet die EM bis zum Ende des Beschleunigungsvorgangs pro Meter zurückgelegter Wegstrecke um knapp 70% mehr mechanische Arbeit. Vergleicht man die von VKM und EM verrichtete Gesamtarbeit der beiden Varianten, wird bei Variante S0/5 also deutlich mehr Arbeit von der EM verrichtet. Zusätzlich wird die EM entlang der Vollastlinie in einem schlechteren Wirkungsgrad betrieben. In der untersuchten Beschleunigungssituation, benötigt Variante S0/5 schlussendlich pro zurückgelegten Meter um knapp 72 % mehr elektrische Energie als Variante S80. Der SOC der Hoch-Volt-Batterie, ist deshalb am Ende der Vollastbeschleunigung um knapp 3% niedriger als bei der herkömmlichen Schlepstart-Variante.

Die VKM verrichtet bei Variante S80 mehr Arbeit als bei Variante S0/5. Zusätzlich ist der Wirkungsgrad der VKM bei höheren Drehzahlen geringer. Des Weiteren sind die Fahrwiderstandsverluste, aufgrund der über den Großteil des Beschleunigungsvorgangs höheren Fahrzeuggeschwindigkeit, größer. Daraus resultiert bei Variante S80 ein deutlich höherer Kraftstoffverbrauch. Obwohl Variante S80 weniger elektrische Energie

als Variante S0/5 benötigt, ist deshalb der Gesamtenergiebedarf pro Meter, bei Variante S80 am Ende der Vollastbeschleunigung um knapp 7,4% höher. Auch an dieser Stelle, wurde der elektrische Energiebedarf mit dem bereits in Kapitel 6.1 erläuterten Energiekostenindikator bewertet. Abbildung 50 zeigt den Gesamtenergieverbrauch der beiden untersuchten Schlepstart-Varianten.



**Abbildung 50: Gesamtenergieverbrauch von Schlepstart-Variante S80 und S0/5 in der untersuchten Beschleunigungssituation**

### Zusammenfassung

Durch das höhere Übersetzungsverhältnis im 4ten Gang, ergibt sich am Beginn der Vollastbeschleunigung bei Variante S80 ein höheres Getriebeausgangsmoment. Das Fahrzeug beschleunigt stärker und es entsteht eine Geschwindigkeitsdifferenz zu Variante S0/5. Schon kurz bevor der Motorstartvorgang abgeschlossen ist, wird der Einfluss des höheren Drehzahlniveaus von Variante S80 auf das EM-Moment deutlich. Die Fahrzeugbeschleunigung von Variante S80 verringert sich mit größerem Gradienten und sinkt schlussendlich unter das Niveau von Variante S0/5. Die Geschwindigkeitsdifferenz wird wieder reduziert.

Variante S0/5 erreicht schlussendlich die Zielgeschwindigkeit vor Variante S80. Dafür benötigt sie zwar im Beschleunigungsvorgang auch mehr elektrische Energie, bezogen auf die zurückgelegte Wegstrecke ist der Gesamtenergiebedarf bei Variante S0/5 aber niedriger.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Fahrzeug bei Variante S80 trotz des höheren Energiebedarfs die Zielgeschwindigkeit von 150km/h später erreicht. Unter den betrachteten Varianten, stellt Variante S0/5 also aus energetischer Sicht und aus Performance-Perspektive die bessere Alternative dar.

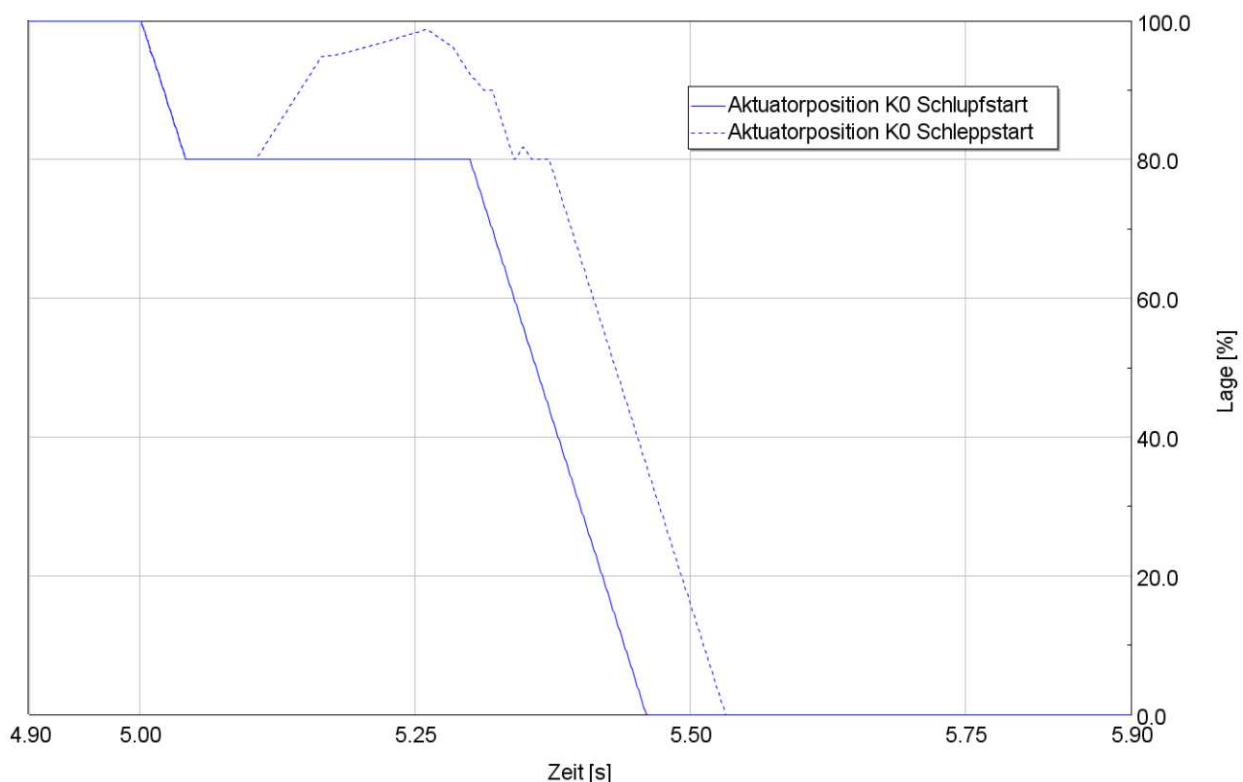
Um die Zielgeschwindigkeit möglichst schnell zu erreichen, wäre jedoch eine Kombination aus beiden Varianten am vorteilhaftesten. In der Beschleunigungssituation, sollte zurückgeschaltet und das Reservemoment für einen komfortablen Motorstart vorgehalten werden. Nach dem Motorstartvorgang sollte die EM das Reservemoment freigeben. Der Zeitpunkt an dem das Getriebe wieder in den ursprünglichen Gang wechselt, sollte so gewählt werden, dass die Antriebsleistung möglichst lange über dem Niveau von Variante S0/5 liegt.



## 6.3 Schlupfstart

Ziel dieser Untersuchungen ist es zu ermitteln, welche Vor- und Nachteile der sogenannte Schlupfstart [30] gegenüber dem herkömmlichen Schlepstart hat. Dafür wurden die Fahrzeuggeschwindigkeit und die zurückgelegte Wegstrecke im Beschleunigungsvorgang untersucht. Um die beiden Varianten auch energetisch beurteilen zu können, wurde der Kraftstoffverbrauch der VKM und die von der EM aufgenommene elektrische Leistung ermittelt. Zusätzlich wurde der Wärmeeintrag in die K0 während des Startvorgangs untersucht, da dieser den Hauptunterschied hinsichtlich Bauteilbelastung und Auslegung ausmacht. Um zudem eine Aussage hinsichtlich Motorstartkomfort treffen zu können, wurde die Fahrzeugbeschleunigung im Startvorgang untersucht.

Beim Schlupfstart wird, im Vergleich zum herkömmlichen Schlepstart, die K0 nach dem Andrehen der VKM nichtmehr auf ein niedrigeres Reibniveau geöffnet. Das Reibmoment von 80Nm wird, bis zu dem Zeitpunkt an dem Drehzahlsynchronität herrscht und die K0 endgültig schließt, angelegt. [Abbildung 51](#) zeigt die Aktuatorposition der K0 bei Schlupf- und Schlepstart im Vergleich.



**Abbildung 51: Aktuatorposition der Trennkupplung beim Schlupf- und Schlepstart im Vergleich**

Um den Schlupfstart abzubilden, wurde im Modell die Kupplungssteuerung der K0 modifiziert. Des Weiteren wurde die Parametrierung des Reglers für den Hochlauf der VKM-Drehzahl so abgeändert, dass ab dem Zeitpunkt an dem die K0 geschlossen wird,



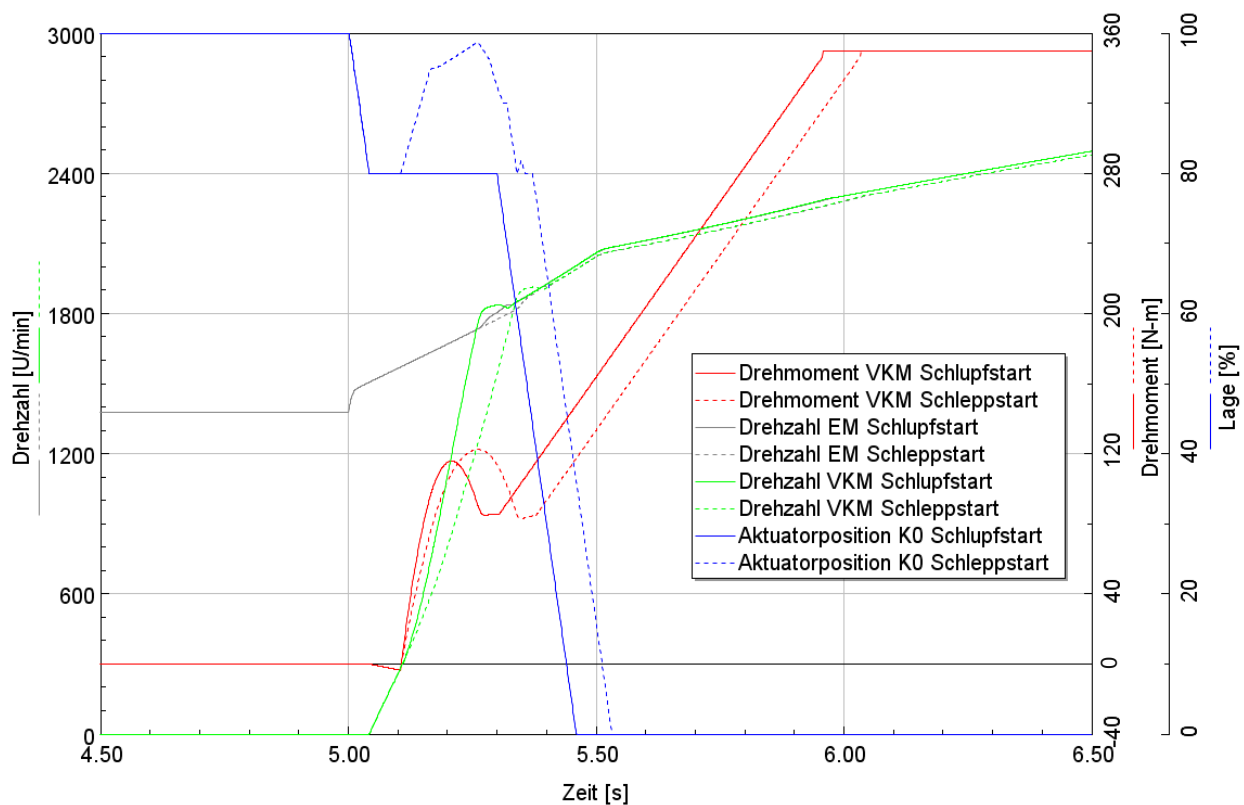
bei beiden Varianten das VKM-Moment auf dem gleichen Niveau ist und somit der in Kapitel 6.1 erläuterte Faktor III während des Rampvorgangs keinen Einfluss hat. Somit wird ab dem Zeitpunkt an dem die Trennkupplung schließt dasselbe VKM-Moment in den Antriebsstrang eingebracht und es herrscht eine vergleichbare Ausgangssituation. Tabelle 6 zeigt die untersuchten Motorstartvarianten.

**Tabelle 6: Untersuchte Motorstartvarianten**

Schlupfstart und Schlepstart		
	Motorstart	Reservemoment EM [Nm]
<b>Variante S80</b>	Schlepstart	80
<b>Variante Su80</b>	Schlupfstart	80

### Fahrzeuggeschwindigkeit und zurückgelegte Wegstrecke

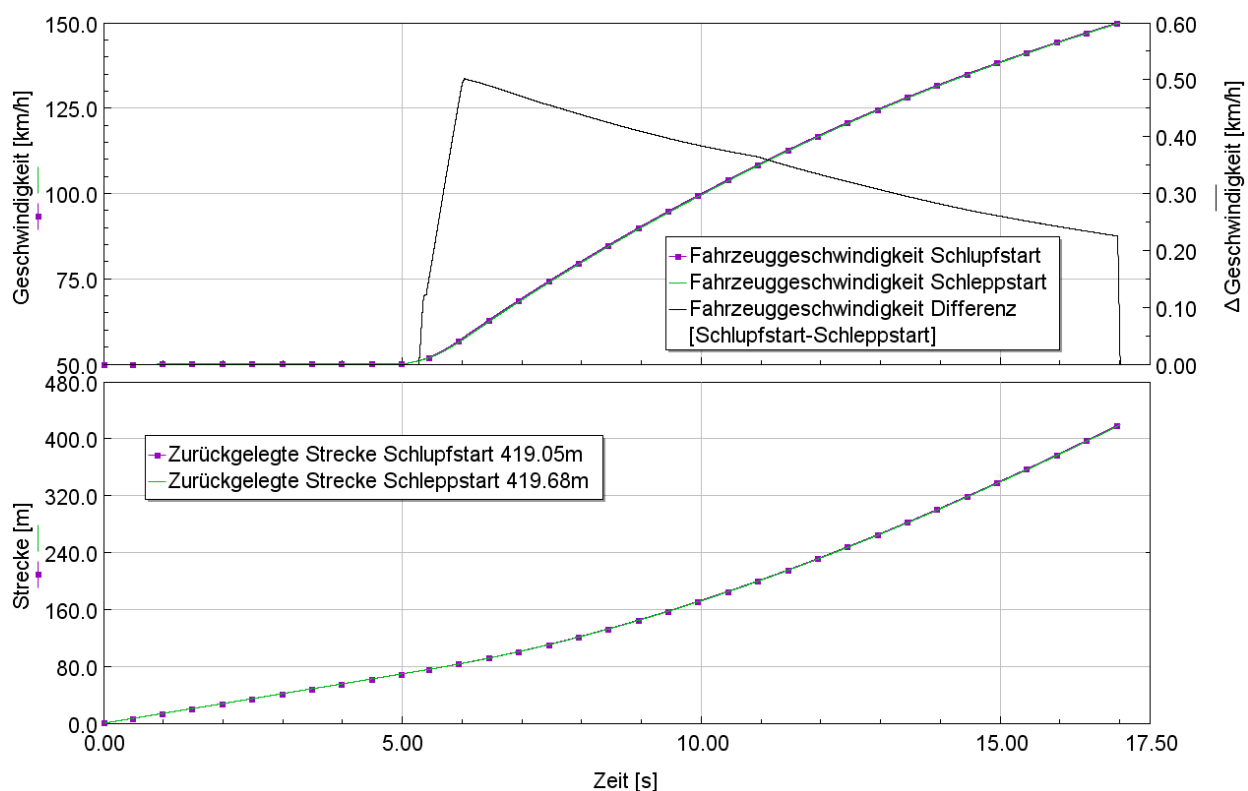
Die VKM wird beim Schlupfstart beim Drehzahlhochlauf länger von der EM unterstützt. Dadurch erreicht die VKM die EM-Drehzahl schneller als beim Schlepstart und es stellt sich früher Drehzahlsynchronität ein. Die K0 beginnt früher zu schließen und die VKM bringt das abgegebene Moment früher in den Antriebsstrang ein. Der Motorstart mit Schlupfstart läuft also schneller ab als der Schlepstartvorgang. Abbildung 52 zeigt den Schlupf und Schlepstart im Vergleich. Der Schlupfstart ist bei diesem Betriebspunkt um knapp 1,25% (~80ms) schneller als der Schlepstart.



**Abbildung 52: Schlupf- und Schlepstart im Vergleich**

Dadurch steigt die Fahrzeugbeschleunigung bei der Schlupfstart-Variante vor der Schlepstart-Variante an. Zwischen Schlupf- und Schlepstart-Variante entsteht eine Geschwindigkeitsdifferenz. Abbildung 53 zeigt die Fahrzeuggeschwindigkeit von Variante S80 und Su80 und deren Differenz. Außerdem ist die von beiden Varianten zurückgelegte Wegstrecke dargestellt. Wenn der Motorstartvorgang abgeschlossen ist wird bei beiden Varianten das maximale Systemmoment abgegeben.

Durch das höhere Drehzahlniveau bei der Schlupfstart-Variante, nimmt das EM-Moment schon während des Motorstart-Vorgangs früher ab, als bei der Schlepstart-Variante. Damit nimmt auch das abgegebene Systemmoment ab. Die Fahrzeugbeschleunigung ist ab diesem Zeitpunkt beim Schlupfstart geringer als beim Schlepstart und die Geschwindigkeitsdifferenz nimmt wieder ab. Auch das von der VKM abgegebene Moment nimmt, ab der entsprechenden VKM-Drehzahl, früher als bei der Schlepstart-Variante ab. Die Differenz im abgegebenen Systemmoment wird noch größer und die Geschwindigkeitsdifferenz reduziert sich rascher. Die Variante mit Schlupfstart, erreicht die Zielgeschwindigkeit trotzdem kurz vor der Schlepstart-Variante.

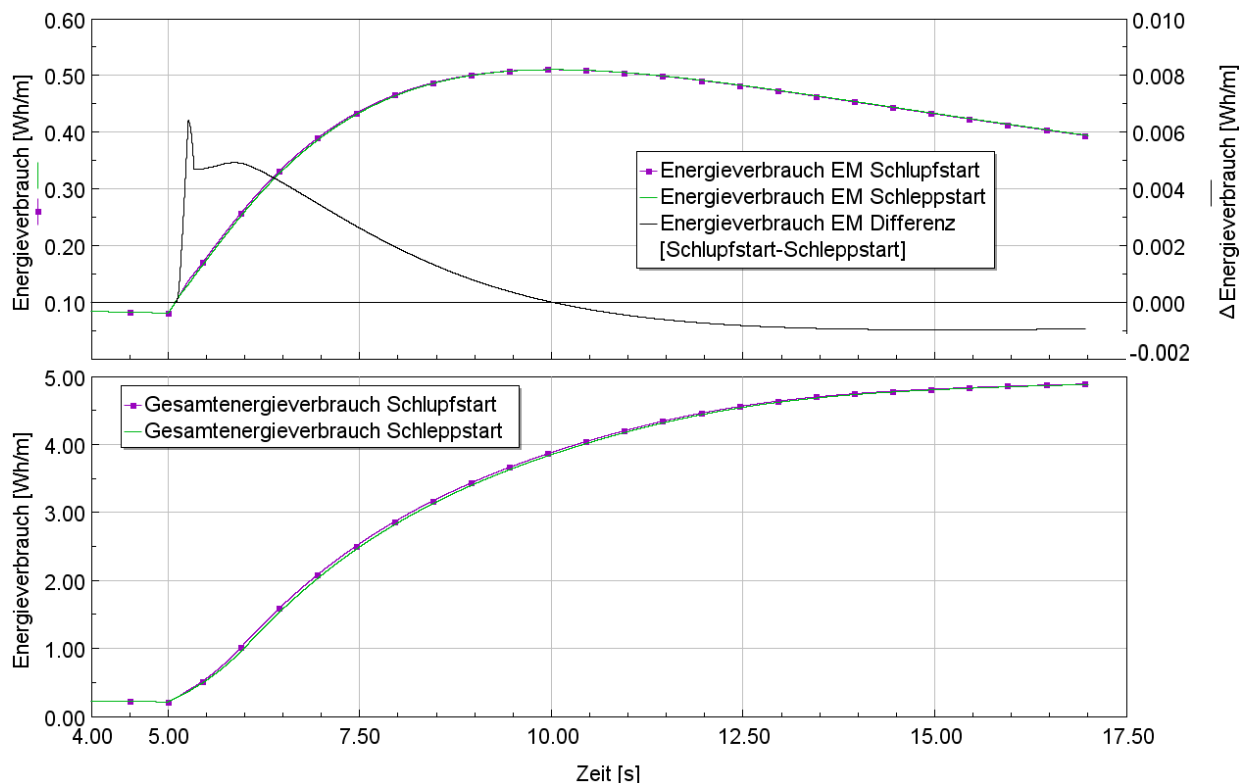


**Abbildung 53: Fahrzeuggeschwindigkeit, Geschwindigkeitsdifferenz und zurückgelegte Wegstrecke der beiden untersuchten Varianten**

Wie in Abbildung 53 ersichtlich, legt die Variante mit Schlupfstart schlussendlich nur eine um knapp 0,63m kürzere Wegstrecke zurück.

## Energetische Betrachtung

Abbildung 54 zeigt die bei beiden Varianten von der EM verbrauchte elektrische Energie bezogen auf die zurückgelegte Wegstrecke und die Differenz. Außerdem ist der Gesamtenergieverbrauch, der sich aus dem Kraftstoffverbrauch der VKM und der EM zusammensetzt, dargestellt. Die Kraftstoffkosten für den elektrischen Energieverbrauch der EM, wurden über den bereits in Kapitel 6.1 erläuterten Energiekostenindikator berücksichtigt.



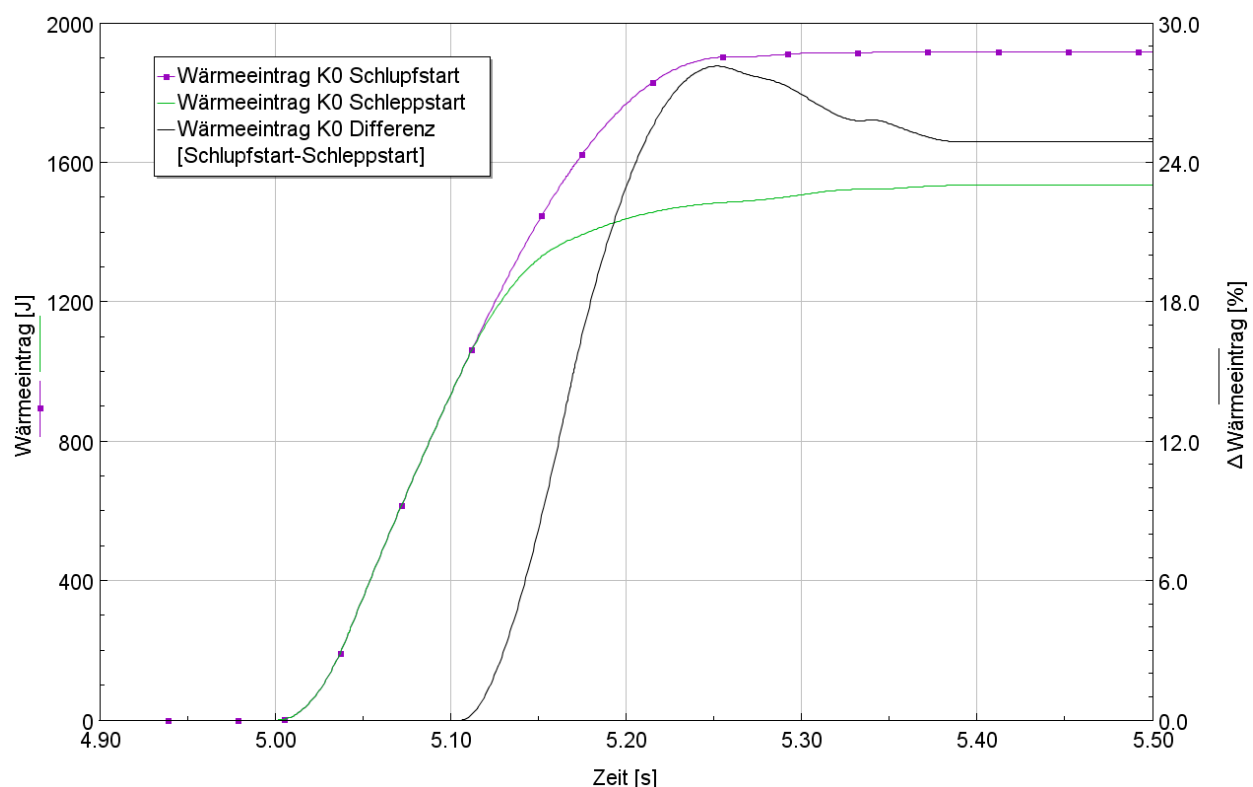
**Abbildung 54: Von der EM verbrauchte Energie, die Differenz im EM-Energieverbrauch und der Gesamtenergieverbrauch beider untersuchter Varianten bezogen auf die zurückgelegte Wegstrecke**

Am Beginn des Motorstartvorgangs, benötigt die Schlupfstart-Variante mehr elektrische Energie. Die EM muss im Startvorgang länger das  $K_0$ -Reibmoment einregeln und gibt deshalb um knapp 5% mehr Leistung ab. Die Differenz in der verbrauchten elektrischen Energie reduziert sich wieder kurzzeitig, weil beim Schleppstart die Kupplung kurz bevor die VKM-Drehzahl die EM-Drehzahl erreicht, wieder auf ein höheres Niveau geschlossen wird. Zu diesem Zeitpunkt muss die EM bei der Schlupfstart-Variante kein Moment mehr einregeln, weil bereits Drehzahlsynchronität herrscht. Der Schlupfstart benötigt deshalb weniger elektrische Energie, kurzfristig ist somit der elektrische Energiebedarf während des Startvorgangs bei der Schleppstart-Variante höher. Während des restlichen Motorstartvorgangs, wird aufgrund der höheren Drehzahl, von der EM bei der Schlupfstart-Variante wieder mehr elektrische Energie verbraucht als bei der Schleppstart-Variante.

Kurz bevor der Motorstartvorgang abgeschlossen ist (ca. bei Sekunde 6), wird das EM-Moment vor dem der Schlepstart-Variante reduziert und die Differenz in der von der EM abgegebenen Leistung verringert sich. Schlussendlich wird über den restlichen Beschleunigungsvorgang bei der Schlupfstart-Variante von der EM weniger elektrische Energie benötigt und die Differenz im Energieverbrauch reduziert sich stetig.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Bedarf an elektrischer Energie im Motorstartvorgang bei der Schlupfstart-Variante zwar erkennbar höher ist, bis zum Ende des Beschleunigungsvorgangs ist der EM-Energieverbrauch der Schlupfstart-Variante schlussendlich doch geringer, die Differenz ist aber marginal (0,041%). Der Zeitpunkt an dem in der Beschleunigungssituation der Energiebedarf betrachtet wird, ist also wesentlich. Der Gesamtenergieverbrauch ist am Ende der Vollastbeschleunigung ebenfalls de facto gleich.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden untersuchten Varianten ergibt sich jedoch beim Wärmeeintrag in die Trennkupplung. Abbildung 55 zeigt den Wärmeeintrag während des Motorstarts bei Schlupf- und Schlepstart und die Differenz zwischen den beiden Varianten.



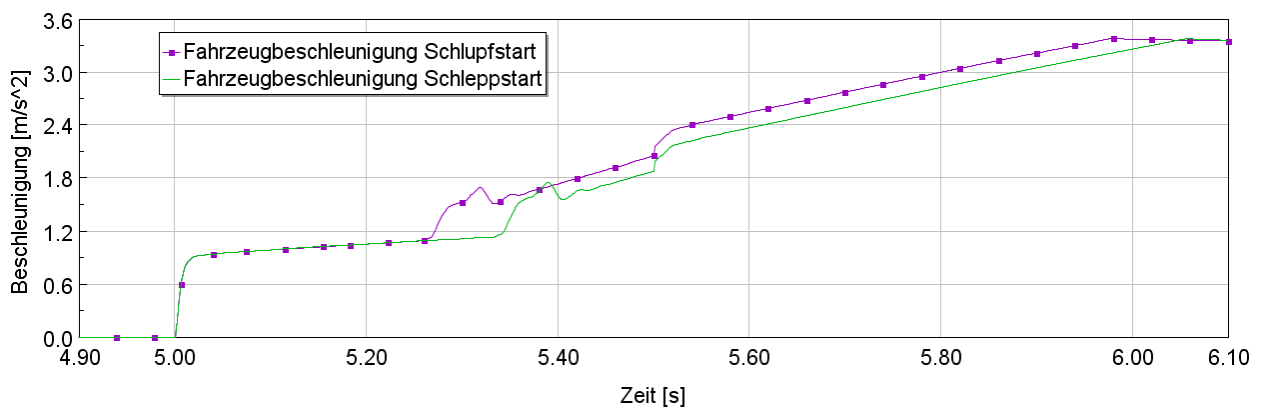
**Abbildung 55: Wärmeeintrag in die K0 bei Schlupf- und Schlepstart und deren Differenz**

Beim Schlupfstart wird das zum Andrehen des Motors angelegte Reibmoment, bevor die Kupplung endgültig schließt, nichtmehr reduziert. Das Reibmoment wird somit über einen

längeren Zeitraum übertragen, dadurch entsteht mehr Reibarbeit in der Kupplung. Bei der Schlupfstart-Variante ist der Wärmeeintrag deshalb um knapp 25% höher.

Bei häufigem Schalten der Kupplung, kann die auftretende Wärmebelastung zu erhöhtem Verschleiß, bis hin zur thermischen Zerstörung führen. Je öfter die Kupplung geschaltet wird, umso geringer ist dabei die zulässige Schaltarbeit pro Schaltvorgang. Die Anzahl der Motorstarts spielt also eine entscheidende Rolle. Zusätzlich hängt die maximal zulässige Wärmebelastung bei mehreren Schaltvorgängen hauptsächlich von der Wärmeabfuhr durch die Kühlung ab. [31] Durch eine effiziente Wärmeableitung an den Kupplungslamellen und einer für den konkreten Anwendungsfall dimensionierten Kupplung, könnte somit einem unzulässig hohen Verschleiß beim Schlupfstart entgegengewirkt werden.

Beurteilt man die Änderung der Fahrzeugbeschleunigung im Motorstart, lässt sich zwischen dem herkömmlichen Schlepstart und dem Schlupfstart kein wesentlicher Unterschied feststellen, weil bei beiden Varianten das an der K0 angelegte Moment von der EM einregelt wird. Daraus lässt sich schließen, dass der Schlupfstart genauso harmonisch abläuft wie der Schlepstart. Abbildung 56 zeigt die Fahrzeugbeschleunigung der beiden untersuchten Varianten während des Motorstarts.



**Abbildung 56: Fahrzeugbeschleunigung der beiden untersuchten Varianten während des Motorstartvorgangs**

### Zusammenfassung

Wird ein schneller Motorstart benötigt, ist der Schlupfstart gegenüber dem Schlepstart im Vorteil. Der Schlupfstart, ist um knapp 1,25% schneller als der Schlepstartvorgang.

Unmittelbar nachdem bei beiden Varianten der Motorstartvorgang abgeschlossen ist, besteht in der Fahrzeuggeschwindigkeit eine Differenz von 0,5km/h. Diese ergibt sich alleine durch den schnelleren Startvorgang. Die Differenz in der zurückgelegten Wegstrecke, die sich schlussendlich durch die zwei unterschiedlichen Motorstartvarianten ergibt, ist äußerst gering.

Zudem ist zu bedenken, dass für diese Untersuchungen die Parametrierung des Reglers für den Hochlauf der VKM-Drehzahl so abgeändert wurde, dass der in Kapitel 6.1 erläuterte Faktor III keinen Einfluss im Vorgang hat, in dem das VKM-Moment an das Fahrerwunschkmoment herangeführt wird. Somit wird ab dem Zeitpunkt an dem die Trennkupplung schließt, bei beiden Varianten das gleiche VKM-Moment in den Antriebsstrang eingebracht. Die Parametrierung des Reglers hat nämlich, aufgrund der nur geringen Differenz in der Motorstartdauer, wesentlichen Einfluss auf das am Ende der Beschleunigungssituation betrachtete Ergebnis. Würde man bei beiden Varianten die gleiche Parametrierung verwenden, dann wird der Vorteil in der Startdauer beim Schlupfstart bis zum Ende des Beschleunigungsvorgangs aufgehoben und die Schlepstart-Variante hätte einen minimalen Vorsprung.

Sowohl im Energieverbrauch, als auch im Motorstartkomfort lässt sich am Ende der untersuchten Beschleunigungssituation so oder so kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Varianten feststellen. Bei der Schlupfstart-Variante ist der Wärmeeintrag in die Trennkupplung jedoch um ein Viertel höher.

## 6.4 Ritzelstart Parametervariation

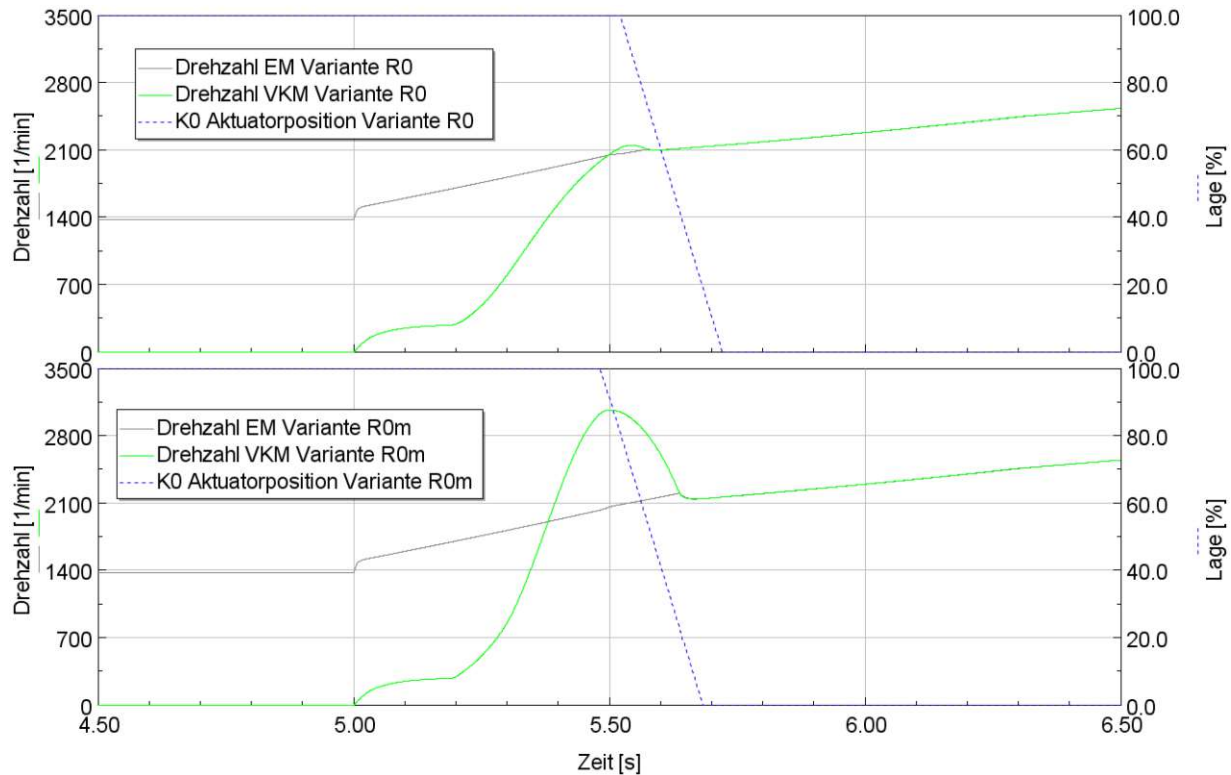
Anhand einer modifizierten Variante des Ritzelstartvorgangs wurde untersucht, welche Auswirkungen das Schließen der Trennkupplung bei großer Differenzdrehzahl auf den Motorstart- und Beschleunigungsvorgang hat. Ziel der Untersuchungen war es, einerseits den Wärmeeintrag in die Trennkupplung festzustellen und andererseits zu untersuchen, ob sich durch den modifizierten Ritzelstart Vorteile in der Fahrzeugbeschleunigung ergeben. Zudem wurde der Einfluss auf den Startkomfort analysiert. Für die energetische Beurteilung wurde der Gesamtenergieverbrauch herangezogen.

Im modifizierten Motorstartvorgang wurde die VKM-Drehzahl gegenüber der EM-Drehzahl um 1000 U/min überhöht. Genau in dem Zeitpunkt, in dem die Differenzdrehzahl zwischen EM und VKM 1000 U/min erreicht, beginnt die Trennkupplung zu schließen. Tabelle 7 zeigt die beiden untersuchten Ritzelstartvorgänge.

**Tabelle 7: Variation Ritzelstart**

Variation Ritzelstart		
	Motorstart	Differenzdrehzahl zu Beginn des K0-Schließvorgangs
<b>Variante R0</b>	Ritzelstart	max. 80 U/min
<b>Variante R0m</b>	modifizierter Ritzelstart	1000 U/min

Abbildung 57 zeigt die beiden untersuchten Ritzelstartvarianten im Vergleich. Wie an dem schnellen Drehzahlhochlauf der VKM bei Variante R0m ersichtlich, musste die Parametrierung des Reglers, der die VKM-Drehzahl an die EM-Drehzahl herauf führt, für die angestrebten Untersuchungen geändert werden. Somit konnte das deutliche Überschwingen der VKM-Drehzahl abgebildet werden. Die VKM-Drehzahl wird nun mit höherem Gradienten an die EM-Drehzahl herangeführt und schwingt deutlich über. In der Kupplungssteuerung wird nun das Schließen bei einer Differenzdrehzahl von 1000 U/min zugelassen. Es findet keine Unterbrechung des Schließvorganges statt.



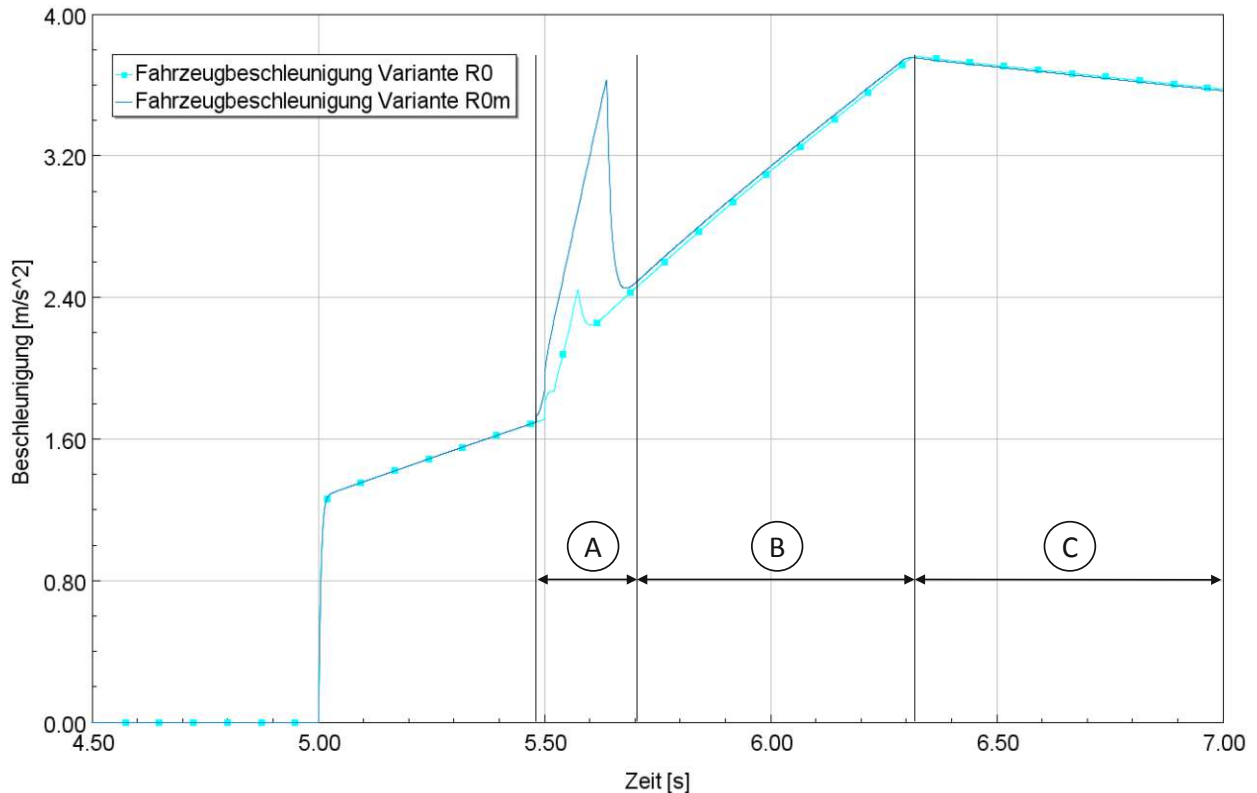
**Abbildung 57: VKM-Drehzahl, EM-Drehzahl und die K0-Aktuatorposition der beiden untersuchten Ritzelstartvarianten im Vergleich**

Zur Beurteilung der Ergebnisse wurden die Fahrzeuggeschwindigkeit, die Fahrzeugbeschleunigung und der Wärmeeintrag in die K0 herangezogen.

### Fahrzeugbeschleunigung und -geschwindigkeit

Nach 5 Sekunden Simulationszeit wird der Motorstartvorgang eingeleitet. [Abbildung 58](#) zeigt die Fahrzeugbeschleunigung des herkömmlichen Ritzelstarts und der modifizierten Variante im Motorstartvorgang unterteilt in die Bereiche A-C. [Abbildung 59](#) zeigt die Fahrzeuggeschwindigkeiten während des Motorstarts und die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Variante R0 und R0m die durch den Motorstartvorgang entsteht.





**Abbildung 58: Fahrzeugbeschleunigung der Ritzelstart-Variante R0 und R0m im Motorstartvorgang**

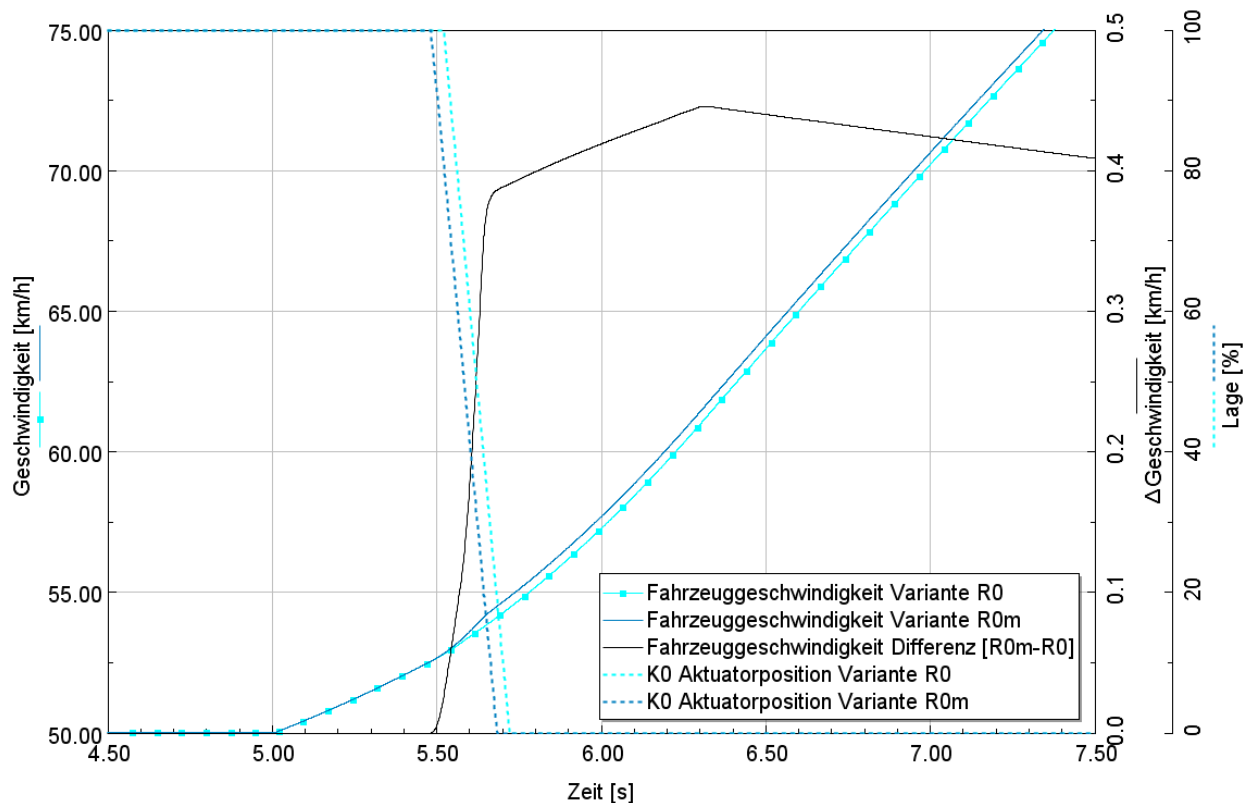
Während des Motorstartvorgangs, ist die Fahrzeugbeschleunigung im Bereich A bei Variante R0m größer als bei Variante R0. Das hat zwei Ursachen.

Durch die größere Drehzahldifferenz und das Massenträgheitsmoment des Motors, wird während des Schließvorgangs bei Variante R0m mehr Moment über die Trennkupplung in den Antriebsstrang eingebracht. Die Fahrzeugbeschleunigung steigt deshalb stärker an, dies lässt sich in Bereich A gut erkennen. Aus der deutlichen Änderung der Fahrzeugbeschleunigung lässt sich ableiten, dass bei Variante R0m während des Motorstarts ein erheblicher Ruck auftritt.

Die zweite Ursache ist, dass bei Variante R0m das Schließen der Trennkupplung und der Vorgang zum Heranführen des VKM-Moments an das Fahrerwunschmoment früher startet, weil schon früher Drehzahlsynchronität (bei 1000 U/min Differenzdrehzahl) herrscht. Grund dafür ist, der bei Variante R0m aggressiver eingestellte Regler, der die VKM schneller an die Zieldrehzahl heranführt. Während des Vorgangs wird, aufgrund des in Kapitel 6.1 erläuterte Faktor III, bei Variante R0m früher mehr Moment in den Antriebsstrang eingebracht als bei Variante R0. Deshalb liegt die Fahrzeugbeschleunigung von Variante R0m auch im Bereich B knapp über dem Niveau von Variante R0 und die in Abbildung 59 dargestellte Geschwindigkeitsdifferenz nimmt weiter zu.

Aufgrund der höheren Fahrzeugbeschleunigung im Motorstartvorgang ergibt sich also eine geringe Geschwindigkeitsdifferenz zu Variante R0, die dann jedoch wieder abnimmt.

Auch in Bereich C, haben beide Varianten die annähernd gleiche Fahrzeugbeschleunigung. Die Differenz die dennoch in der Fahrzeugbeschleunigung besteht und dazu führt, dass die Geschwindigkeitsdifferenz wieder abnimmt, erklärt sich dadurch, dass die EM zu diesem Zeitpunkt bei Variante R0m bereits weniger Moment abgibt, weil sie sich aufgrund der höheren Fahrzeuggeschwindigkeit in einem höheren Drehzahlbereich befindet. Zusätzlich ist die Fahrwiderstandskraft, aufgrund der höheren Fahrzeuggeschwindigkeit, bei Variante R0m größer als bei Variante R0. Nachdem der Motorstartvorgang abgeschlossen ist, reduziert sich deshalb die Geschwindigkeitsdifferenz über den Rest des Beschleunigungsvorgangs wieder stetig.

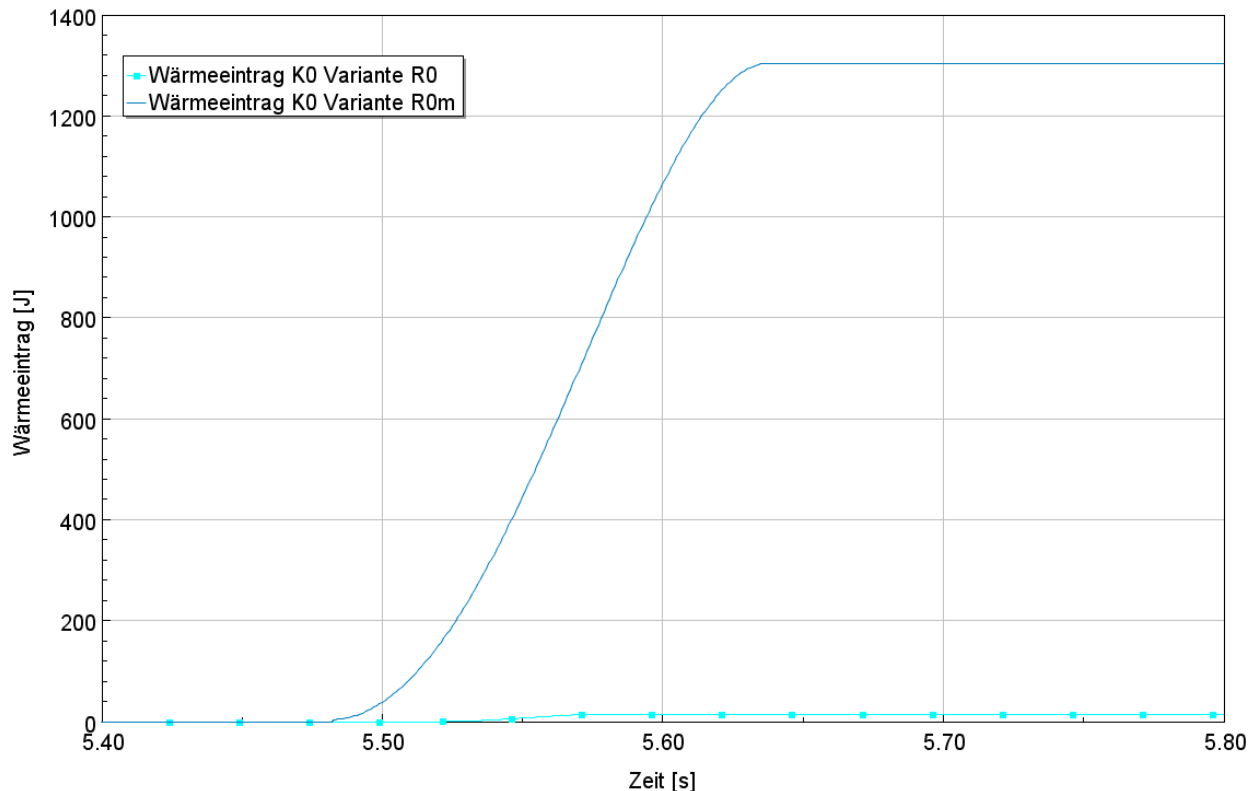


**Abbildung 59: Fahrzeuggeschwindigkeiten der beiden Ritzelstart-Varianten während des Motorstartvorgangs und deren Differenz, außerdem ist die Aktuatorposition der Trennkupplung dargestellt**

Variante R0m erreicht die Zielgeschwindigkeit dennoch knapp vor Variante R0. Schlussendlich legt Variante R0m eine um knapp 0,48m kürzere Wegstrecke zurück. Der deutlichste Unterschied ergibt sich also im während des Motorstarts auftretenden Beschleunigungsruck.

### Wärmeeintrag K0 und Gesamtenergieverbrauch

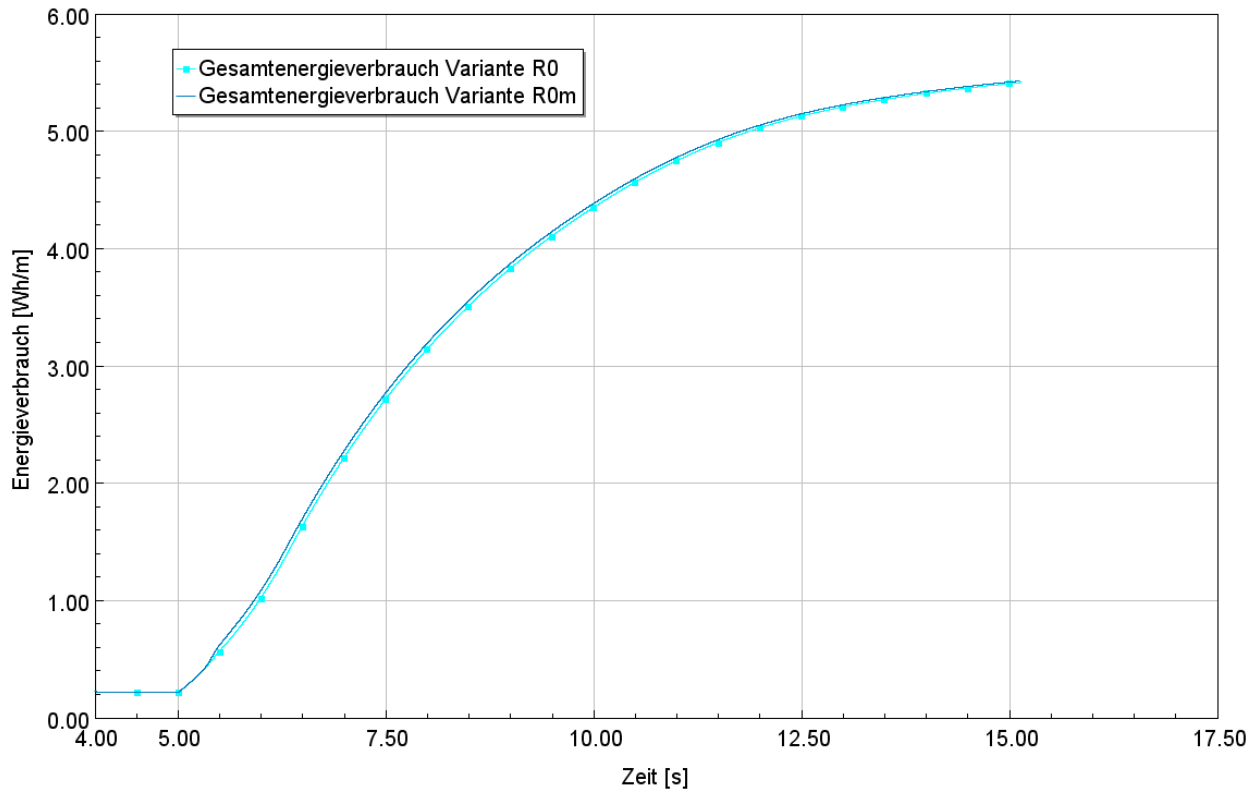
Bei Variante R0m wird allerdings, durch die höhere Differenzdrehzahl zwischen Antriebs und Abtriebs-Seite, während des Schließvorgangs in der Kupplung deutlich mehr Reibarbeit verrichtet. Dabei wird mechanische Energie in thermische Energie umgewandelt. Abbildung 60 zeigt den Wärmeeintrag von Variante R0 und R0m während die K0 geschlossen wird. Variante R0m hat gegenüber Variante R0 einen knapp 100-fach höheren Wärmeeintrag.



**Abbildung 60: Wärmeeintrag in die K0 bei Ritzelstart-Variante R0 und R0m während des K0-Schließvorgangs**

Die beim Schließen der Kupplung in Wärme umgewandelte Schaltarbeit, hängt maßgeblich vom übertragenen Moment, der Differenzdrehzahl und der Rutschzeit der Kupplung ab. [31] Alle drei Einflussfaktoren sind bei Variante R0m größer. Im Vergleich mit dem herkömmlichen Schlepstart (Kapitel 6.3), ist der Wärmeeintrag allerdings um knapp 15% niedriger. Daraus lässt sich schließen, dass die Trennkupplung grundsätzlich auch für die modifizierte Ritzelstart-Variante ausreichend dimensioniert ist. Bei einer etwaigen Umsetzung von Variante R0m, sollte der höhere Wärmeeintrag der sich durch den Startvorgang in die Kupplung ergibt, aber unbedingt berücksichtigt werden.

Abbildung 61 zeigt die von VKM, EM und Ritzelstarter für den Beschleunigungsvorgang pro zurückgelegten Meter benötigte Energie beider Varianten. Die verbrauchte elektrische Energie wurde dabei mit dem bereits in Kapitel 6.1 erläuterten Energiekostenindikator bewertet.



**Abbildung 61: Gesamtenergieverbrauch der untersuchten Ritzelstart-Varianten in der definierten Beschleunigungssituation**

Vergleicht man den Gesamtenergiebedarf der beiden Varianten am Ende der Vollastbeschleunigung, ist der von Variante R0m um knapp 0,19% höher. Am Ende des Motorstartvorgangs ist dieser sogar um knapp 4,7% größer. Zwei Gründe dafür sind die bei Variante R0m höheren Verluste in der Trennkupplung und der Mehrverbrauch der VKM während des Motorstarts. Variante R0 stellt also in der untersuchten Vollastbeschleunigung die effizientere Variante dar.

### Zusammenfassung

In den Untersuchungen wurde gezeigt, dass sich bei Variante R0m im Motorstartvorgang eine höhere Fahrzeugbeschleunigung erzielen lässt. Der dadurch erreichbare Geschwindigkeitsvorteil ist aber gering. Des Weiteren ist der Unterschied im Gesamtenergieverbrauch zwischen den beiden untersuchten Varianten am Ende der Vollastbeschleunigung marginal. Der größte Unterschied konnte im während des Motorstarts auftretenden Wärmeeintrag in die Trennkupplung festgestellt werden. Dieser ist gegenüber der herkömmlichen Ritzelstart-Variante um ein Vielfaches größer. Der modifizierte Ritzelstartvorgang könnte beispielsweise eingesetzt werden, um dem Fahrer durch den deutlichen Beschleunigungsruck während des Motorstarts einen sportlichen Fahreindruck zu vermitteln.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden mittels Simulation Motorstart-Untersuchungen mit besonderem Fokus auf Vollastbeschleunigungsvorgänge (50-150 km/h) in einem P2-Hybridfahrzeug durchgeführt. Die beim Motorstartvorgang relevanten Fahrzeugkomponenten und die Motorstartvorgänge Ritzel- und Schlepstart wurden detailliert abgebildet. Zudem wurde eine weitere Variante des Schlepstarts, der sogenannte Schlupfstart, untersucht.

Im direkten Vergleich unterscheiden sich die untersuchten Startvarianten unter anderem in ihrer Motorstartdauer. Es konnten drei Faktoren, die direkten Einfluss auf die Startdauer haben, ermittelt werden:

- die Zeitdauer, die das Andrehen des Motors bis zur 1. Einspritzung benötigt
- die Zeitspanne, die der Hochlauf der VKM-Drehzahl auf EM-Drehzahl benötigt
- die Höhe des VKM-Moments zu dem Zeitpunkt, an dem die Trennkupplung schließt

Betrachtet man den herkömmlichen Schlepstart (=EM-Reservemoment 80Nm) und den Ritzelstart im Vergleich ist es, aufgrund der in dieser Arbeit für die Untersuchungen festgelegten Randbedingungen, in puncto Performance vorteilhafter, den Verbrennungsmotor mit dem Ritzelstarter zu starten und sofort das volle EM-Moment auszunutzen. Steht die Energieeffizienz im Fokus, ist der Schlepstart in der untersuchten Beschleunigungssituation eindeutig im Vorteil. Zudem kann gesagt werden, dass der Motorstartvorgang beim herkömmlichen Schlepstart, dem Ritzelstart und dem Schlupfstart mit demselben Komfort abläuft.

In den Untersuchungen wurden außerdem bei allen Startvarianten Parameter, die den Motorstartvorgang beeinflussen, variiert. Durch die Modifikationen der Motorstartvorgänge sollten etwaige Verbesserungen und situationsabhängige Vorteile aufgezeigt werden. Zu diesem Zweck wurden ihre Auswirkungen auf den Energieverbrauch und auf die Fahrzeugperformance in der Vollastbeschleunigung untersucht. Anhand des Verlaufs der Fahrzeugbeschleunigung, wurde zudem der Komfort im Startvorgang bewertet.

Beim Schlepstart wurde das Reservemoment, das von der EM für den Motorstart benötigt wird, variiert. Des Weiteren wurde beim Schlepstart untersucht, ob es am Beginn der Vollastbeschleunigung günstiger ist, einen Gang zurückzuschalten und das EM-Moment nicht auszunutzen, oder ob auf das Rückschalten bei gleichzeitigem Überhöhen der E-Maschine verzichtet werden kann.

Anhand der durchgeführten Variationen konnte gezeigt werden, dass der Verzicht auf das EM-Reservemoment während einer Vollastbeschleunigung, aus Performance-Perspektive, einen eindeutigen Vorteil bringt. In puncto Motorstartkomfort müssen dabei aber Abstriche gemacht werden. Durch den Verzicht auf das Rückschalten und das gleichzeitige Ausnutzen des maximalen EM-Moments, kann gegenüber dem herkömmlichen Schleppstart am Ende der Vollastbeschleunigung sowohl eine Verbrauchsreduktion als auch Performancesteigerung erreicht werden.

Bei der Ritzelstart-Variante wurde ebenfalls eine Parametervariation durchgeführt. Es wurde untersucht, wie sich das Schließen der Trennkupplung bei großer Differenzdrehzahl zwischen Verbrennungsmotor und E-Maschine, auf die Fahrzeugperformance auswirkt. In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die modifizierte Variante, im Vergleich mit dem herkömmlichen Ritzelstartvorgang, eine höhere Fahrzeugbeschleunigung im Motorstartvorgang erzielt. Der Wärmeeintrag in die Trennkupplung steigt dabei jedoch um ein Vielfaches an. Im direkten Vergleich mit der Schleppstart-Variante bei der das EM-Reservemoment ebenfalls nicht vorgehalten wird, erreicht auch die modifizierte Ritzelstart-Variante die Zielgeschwindigkeit später.

Fazit dieser Untersuchungen ist, dass bei einer Vollastbeschleunigung aus dem Blickwinkel der Fahrzeugperformance beim Schleppstart auf das EM-Reservemoment verzichtet werden kann, wenn dem Fahrer ein negativer Ruck im Motorstartvorgang zugemutet wird. Am energetisch effizientesten ist es, in der untersuchten Vollastbeschleunigung die VKM mit dem Schleppstart zu starten, dabei schon im Startvorgang das volle EM-Moment zu nutzen und gleichzeitig beim Kick-down nicht zurückzuschalten. Gegenüber dem herkömmlichen Schleppstart, kann in der untersuchten Beschleunigungssituation der Gesamtenergieverbrauch weiter verringert und die Fahrzeugperformance weiter gesteigert werden. Beim Motorstartkomfort, sind der herkömmliche Schlepp-, Schlupf- und Ritzelstart auf gleichem Niveau. Hinsichtlich Motorstartdauer schneidet der Schlupfstart am besten ab. Da die Unterschiede aber sehr gering sind, muss bei diesem direkten Vergleich zwischen den Startvarianten, der Einfluss der am Beginn erläuterten Faktoren unbedingt berücksichtigt werden.

In weiterer Folge wird das in dieser Arbeit erstellte Fahrzeugmodell weiterentwickelt, um im speziellen mit dem System auch Untersuchungen mit mehreren Motorstarts z.B. in einem Fahrzyklus durchführen zu können. In Zukunft soll das Fahrzeugmodell dann auf einem hochdynamischen Hardware-in-the-Loop- Motorprüfstand (HiL) eingesetzt werden. Bei diesem ist nur der Verbrennungsmotor als Hardware vorhanden, der Rest des Fahrzeuges ist virtuell am Prüfstand eingebunden. Ziel ist es, beide Startvarianten

am HiL-Prüfstand darzustellen, um im Weiteren den Energiebedarf, der für den Verbrennungsmotorstart notwendig ist, auch messtechnisch ermitteln zu können. Die Ergebnisse können dann in die Entwicklung bzw. Optimierung der Betriebsstrategie des Hybridfahrzeuges einfließen.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] P. Hofmann, Hybridfahrzeuge, Wien: Springer-Verlag, ISBN: 978-3-7091-1779-8, 2010.
- [2] D. Görke, Untersuchungen zur kraftstoffoptimalen Betriebsweise von Parallelhybridfahrzeugen und darauf basierende Auslegung regelbasierter Betriebsstrategien, Wiesbaden: Verlag Springer Fachmedien, ISBN: 978-3-658-14162-2 , 2016.
- [3] K. Reif, K. E. Noreikat und K. Borgeest, Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, ISBN: 978-3-8348-0722-9, 2012.
- [4] F. Fesefeldt, Ganzheitliche Betrachtung zur Auswahl der Starteinrichtung des Verbrennungsmotors eines Parallel-Hybrids mit Trennkupplung, Dissertation im Fachbereich Maschinenbau der TU Darmstadt, 2010.
- [5] S. H.-J. Müller, Der Startvorgang von hybridisierten Ottomotoren, Dissertation im Fachbereich Maschinenbau der TU Darmstadt, 2010.
- [6] Robert Bosch GmbH, Generatoren und Starter, Stuttgart: Holland + Josenhans Verlag, ISBN: 3778220284, 2002.
- [7] R. Nordmann und H. Birkhofer, Maschinenelemente und Mechatronik 1, Vorlesungsskript TU Darmstadt, Darmstadt, 2001.
- [8] R. Kruse, H. Schäfer und L. Wähner, „Integrierter Starter-Generator für das 42-V-Bordnetz,“ *ATZ- Automobiltechnische Zeitschrift*, pp. 664-671, Jahrgang 104, Juli-August 2002.
- [9] A. Kulzer, J. Laubender, U. Lauff, D. Mößner und U. Sieber, „Der Direktstart- vom Modell zum Demonstrator,“ *MTZ- Motortechnische Zeitschrift*, pp. 636-644, Jahrgang 67, September 2006.
- [10] U. Kramer, Potentialanalyse des Direktstarts für den Einsatz in einem Stopp-Start-System an einem Ottomotor mit starthlgeführter Benzin-Direkteinspritzung unter besonderer Berücksichtigung des Motorauslaufvorgangs, Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2005.
- [11] M. Alt, „Untersuchungen zum Direktstart eines Ottomotors,“ in *10. Tagung "Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors"*, Graz, 2005.
- [12] J. Gerhardt, U. Kassner, J. Kulzer und U. Sieber, „Der Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direktstart - Möglichkeiten und Grenzen,“ in *24. Internationales Wiener Motorensymposium*, Wien, 2003.



- [13] M. Damböck, Darstellung und Entwicklung des Direktstarts für einen Dreizylinder-Erdgasmotor mit Direkteinblasung, Dissertation am IFA der TU Wien, 2016.
- [14] J. Laubender, U. Kassner, S. Hartmann, K. Heyers, K. Benninger und J. Gerhardt, „Vom Direktstart zum marktattraktiven Start-Stopp-System,“ in *14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, Aachen, 2005.
- [15] M. Mürwald, „Die neue Generation Hybrid-Antriebe von Mercedes-Benz,“ in *37. Internationales Wiener Motorensymposium*, Wien, 2016.
- [16] D. Görke, J. Strenkert, S. Schmiedler, T. Schürmann und L. Engbroks, „The intelligent operating strategy of the Mercedes-Benz plug-in hybrid electric vehicles,“ in *Der Antrieb von morgen 11. Internationale MTZ-Fachtagung Zukunftsantriebe*, Frankfurt am Main 2017.
- [17] U. Keller, T. Gödecke, M. Weiss, C. Enderle und G. Henning, „33. Internationales Wiener Motorensymposium,“ in *Diesel Hybrid - The Next Generation of Hybrid Powertrains by Mercedes-Benz*, Wien, 2012.
- [18] S. Schmiedler, J. Strenkert, M. Maisch und F. Nietfeld, „Der neue Plug-In Hybridantrieb,“ *ATZextra-Die neue E-Klasse von Mercedes-Benz*, pp. 132-135, Mai 2016.
- [19] D. Görke, S. Schmiedler und J. Strenkert, „16. Internationales Stuttgarter Symposium,“ in *Plug-in hybrid by Mercedes-Benz - The technology kit for future consumption targets*, Stuttgart, 2016.
- [20] M. Mürwald, R. Kemmler, A. Waltner und F. Kreitmann, „Die neuen Vierzylinder-Ottomotoren von Mercedes-Benz,“ *MTZ- Motortechnische Zeitschrift*, pp. 832-841, Jahrgang 74, November 2013.
- [21] J. Strenkert, C. Schildhauer, M. Steiner und T. Hinsken, „Das neue Plug-in-Hybridantriebssystem für die S-Klasse,“ *MTZ- Motortechnische Zeitschrift*, pp. 46-53, Jahrgang 78, Juni 2017.
- [22] J. Liebl, M. Lederer, K. Rohde-Brandenburger, J. W. Biermann, M. Roth und H. Schäfer, *Energiemanagement im Kraftfahrzeug - Optimierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile*, Wiesbaden: Verlag Springer Fachmedien, ISBN: 978-3-658-04451-0, 2014.
- [23] J. Garche, C. Dyer, P. Moseley, Z. Ogumi, D. Rand und B. Scrosati, *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Amsterdam: Elsevier B.V., ISBN:978-0-444-52093-7, 2009.
- [24] A. Jossen und W. Weydanz, *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*, Neusäß: Ubooks Verlag, ISBN: 3-937536-01-9, 2006.

- [25] D. R. Wright, NC State University: Website: [www.ncsu.edu](http://www.ncsu.edu), [Online], <http://www4.ncsu.edu/~drwrigh3/docs/courses/csc216/fsm-notes.pdf>, Zugriff am 17.08.2017.
- [26] M. Plöchl, K.-O. Endlicher und P. Lugner, Grundlagen der Fahrzeugdynamik, Vorlesungsskript, TU Wien, Wien, 2013.
- [27] M. Burckhardt und H. Burg, Berechnung und Rekonstruktion des Bremsverhaltens von Pkw, Kippenheim: Verlag Information Ambs GmbH, ISBN: 3885500256, 1988.
- [28] Q. Huang und H. Wang, Fundamental Study of Jerk: Evaluation of Shift Quality and Ride Comfort, SAE 2004-01-2065.
- [29] M. Fleckner, M. Göhring und L. Spiegel, „18. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik,“ in *Neue Strategien zur verbrauchsoptimalen Auslegung der Betriebsführung von Hybridfahrzeugen*, Aachen, 2009.
- [30] L. Spiegel, M. Schürmann, T. Rauner, I. Stache, M. Göhring und J. Neußer, „Das Antriebskonzept des neuen Cayenne S Hybrid,“ in *19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2010*, Aachen, 2010.
- [31] K. H. Grote und J. Feldhusen, Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, Berlin: Springer-Verlag, ISBN: 978-3-642-17305-9, 2011.
- [32] H. Wallentowitz und K. Reif, Handbuch Kraftfahrzeugelektronik, Wiesbaden: Vieweg&Sohn Verlag, ISBN: 9783528039714, 2006.
- [33] R. Fischer, Elektrische Maschinen, München: Carl Hanser Verlag, ISBN: 9783446417540, 2009.