



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

Bewertung eines innovativen Hybridsystems für kleine Stadtfahrzeuge 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. Peter Hofmann

E315

Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Philipp Fasching

0827850

Kindergartenweg 9, 5071 Wals

Diplomaufgabe

Herrn Philipp Fasching, Matr. Nr.: 0827850 wird folgende Diplomaufgabe gestellt:

“Bewertung eines innovativen Hybridsystems
für kleine Stadtfahrzeuge mittels Längsdynamiksimulation“

Folgende Arbeiten sind durchzuführen:

Es soll ein neuartiges hybrides Antriebskonzept hinsichtlich Kraftstoffverbrauch analysiert und bewertet werden. Dazu soll ein numerisches Längsdynamikmodell erstellt werden. Für den Vergleich mit bereits bestehenden hybriden Antriebskonzepten sollen möglichst reale Komponenten und spezifizierte Fahrzyklen verwendet werden.

Im Einzelnen sind folgende Punkte zu bearbeiten:

- Literaturrecherche bezüglich alternativer Antriebssysteme und Komponenten
- Komponentenauswahl für das zu entwickelnde Antriebskonzept
- Erstellung eines Längsdynamikmodells für das Antriebskonzept in GT-SUITE
- Analyse und Bewertung des Kraftstoffverbrauchs in spezifizierten Fahrzyklen
- Vergleich des neu entwickelten Antriebskonzept mit vergleichbaren hybriden Antriebskonzepten

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

Dauer: März 2014 - September 2014

Kennzahl: E 700

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

Die Benutzung der Versuchseinrichtungen des Institutes hat in den Dienststunden und unter Anleitung des Betreuers zu erfolgen. Dabei dürfen alle Arbeiten nur unter besonderer Beachtung der geltenden Sicherheitsvorschriften durchgeführt werden.

Einverstanden:

.....

Philipp Fasching

Betreuer:

.....

AProf. Dr. techn. Peter Hofmann

.....

Prof. Dr. Bernhard Geringer
Institutsvorstand

Eidesstattliche Erklärung

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

Bewertung eines innovativen Hybridsystems für kleine Stadtfahrzeuge 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 selbstständig 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

Philipp Fasching

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 Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau nicht gestattet.

Kurzfassung

In dieser Diplomarbeit wird ein neuartiges hybrides Antriebskonzept mittels Simulation untersucht und hinsichtlich des Potentials zur Kraftstoffeinsparung bewertet. Es wird ein geeignetes Längsdynamik-Simulationsmodell erstellt und die verwendeten Komponenten im Antriebsstrang möglichst realitätsnah modelliert. Die Betriebsstrategie für das neue Hybridkonzept wird hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs möglichst optimal gewählt und geeignet in das Simulationsmodell implementiert. Für die Bewertung des neuartigen Hybridkonzeptes wird der Kraftstoffverbrauch in den Fahrzyklen NEFZ bzw. US06 ermittelt und das Beschleunigungsverhalten untersucht. Zusätzlich wird ein Simulationsmodell für ein paralleles Hybridkonzept erstellt und zu Vergleichszwecken in den beiden Fahrzyklen simuliert. Es wird in der Arbeit gezeigt, dass bei geringen Leistungsanforderungen an den Antrieb im neuartigen hybriden Antriebskonzept Verbrauchsvorteile möglich sind und beschrieben weshalb diese Vorteile in Bereichen mit hohen Leistungsanforderungen verschwinden und sich ein schlechterer Verbrauch einstellt. Die Fahreigenschaften des neuen Hybridkonzeptes werden in der Diplomarbeit anschaulich dargestellt und die Auswirkungen auf den Betrieb des Konzeptes bewertet. Zum Abschluss werden mögliche Einsatzgebiete, in denen durch das neuartige hybride Antriebskonzept Verbrauchseinsparungen möglich sind, vorgeschlagen.

Inhalt

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	2
2.1. Klassifizierung von Hybridkonzepten	2
2.1.1. Einteilung nach Struktur des Antriebsstranges	2
2.1.2. Einteilung nach Grad der Hybridisierung	4
2.2. Hybridkomponenten	4
2.2.1. Verbrennungskraftmaschine	5
2.2.2. E-Maschinen	5
2.2.3. Batterie	6
2.2.4. Planetengetriebe	7
3. Neues Hybridkonzept	11
3.1. Idee des neuen Konzeptes (Sapienter-Konzept)	11
3.2. Auswahl der Komponenten	12
3.2.1. Verbrennungskraftmaschine (VKM)	12
3.2.2. Elektromotor EM	14
3.2.3. Generator GEN	15
3.2.4. Batterie	17
3.2.5. Übersetzung EM zu linken Vorderrad	17
3.2.6. Planetengetriebe	19
3.2.7. Zusammenfassung der Komponenten	26
3.3. Wirkungsgrade im Antriebsstrang	26
3.3.1. Mechanische Wirkungsgrade	26
3.3.2. Elektrische Wirkungsgrade	28
3.4. Betriebsmodi	29
3.4.1. E-Fahren	30
3.4.2. VKM-Fahren mit EM und GEN	34
3.4.3. Aufladen im Stillstand	55

3.4.4. Rekuperation.....	57
4. Simulation des Sapienter-Hybridkonzeptes:	59
4.1. Simulation im NEFZ.....	59
4.1.1. Betriebsstrategie	59
4.1.2. Simulation im NEFZ Stadtzyklus.....	60
4.1.3. Simulation im NEFZ Überlandzyklus.....	63
4.1.4. Simulation im kombinierten NEFZ.....	66
4.1.5. Simulation im NEFZ mit Lastpunktanhebung.....	69
4.2. Simulation im US06	73
4.3. Maximale Beschleunigung des Hybridkonzeptes	75
4.4. Zusammenfassung der Simulationen	76
5. Vergleich zu parallelem Hybridkonzept.....	77
5.1. Wirkungsgradvergleich mit parallelem Hybrid	77
5.2. Parallelhybrid mit gleichen Komponenten	80
5.2.1. Simulation im NEFZ	80
5.2.2. Simulation im US06	82
5.3. Paralleler Hybrid mit stärkerer VKM	83
5.3.1. Simulation im NEFZ	84
5.3.2. Simulation im US06	85
6. Bewertung des Sapienter-Hybridkonzeptes.....	88
6.1. Bewertung des Verbrauchsvorteiles	88
6.2. Bewertung der Fahrdynamischen Eigenschaften	90
6.3. Mögliches Einsatzgebiet des neuen Hybridkonzeptes.....	92
7. Zusammenfassung.....	93
8. Literaturverzeichnis	94

1. Einleitung

Durch die immer höheren Anforderungen an moderne Fahrzeuge hinsichtlich des CO₂- und Schadstoffausstoßes, ist die Senkung des Kraftstoffverbrauches ein unverzichtbares Thema bei der Entwicklung von Fahrzeugen. Neben der Optimierung von konventionellen Antriebskonzepten mit Verbrennungskraftmaschinen wird der Hybridisierung des Antriebsstranges ein großes Potential zur Kraftstoffeinsparung zugeschrieben. Durch die Elektrifizierung des Antriebsstranges in Verbindung mit konventionellen Verbrennungskraftmaschinen sind neue Antriebsarchitekturen möglich, mit denen der Kraftstoffverbrauch von Kraftfahrzeugen gesenkt werden kann. Bei der Hybridisierung von Fahrzeugen können durch den Einsatz von ein oder mehreren elektrischen Antriebskomponenten im Antriebsstrang unterschiedlichste hybride Antriebskonzepte realisiert werden. In dieser Arbeit wird die von Prof. Ernst Fiala stammende Idee eines neuartigen hybriden Antriebskonzeptes vorgestellt und mittels Simulation das Potential zur Kraftstoffeinsparung untersucht. Die für das neuartige Hybridkonzept verwendeten Komponenten werden dabei in möglichst genauen Modellen abgebildet, um eine realitätsnahe Bewertung des Konzeptes zu ermöglichen. Es werden mögliche Betriebsmodi für den hybriden Antriebsstrang definiert und möglichst optimale Betriebsstrategien ausgearbeitet. Durch Simulation werden die Eigenschaften im Betrieb des Antriebskonzeptes untersucht und der Kraftstoffverbrauch in unterschiedlichen Fahrzyklen ermittelt. Mithilfe der Simulationsergebnisse wird das neuartige Hybridkonzept auf Potentiale zur Kraftstoffeinsparung in unterschiedlichen Anwendungsbereichen untersucht und hinsichtlich der Fahreigenschaften bewertet. Mit dieser Arbeit können fundierte Aussagen hinsichtlich der Anwendbarkeit des Hybridkonzeptes getroffen werden und weiters bietet sie eine Grundlage für weitere Studien über das neuartige Hybridkonzept.

2. Grundlagen

2.1. Klassifizierung von Hybridkonzepten [1, p. 17]

Verschiedene Hybridkonzepte unterscheiden sich in der Anordnung der Komponenten im Antriebsstrang sowie in der Dimensionierung der elektrischen und mechanischen Komponenten. Deshalb werden Hybridkonzepte nach ihrer Struktur des Antriebsstranges sowie nach dem Grad der Hybridisierung klassifiziert.

2.1.1. Einteilung nach Struktur des Antriebsstranges

Hybridkonzepte können nach der Struktur des hybriden Antriebsstranges in serielle, parallele und leistungsverzweigte Hybridantriebe unterteilt werden. Die drei Arten von Hybridantrieben und jeweils drei Beispiele dazu sind in Abbildung 1 dargestellt.

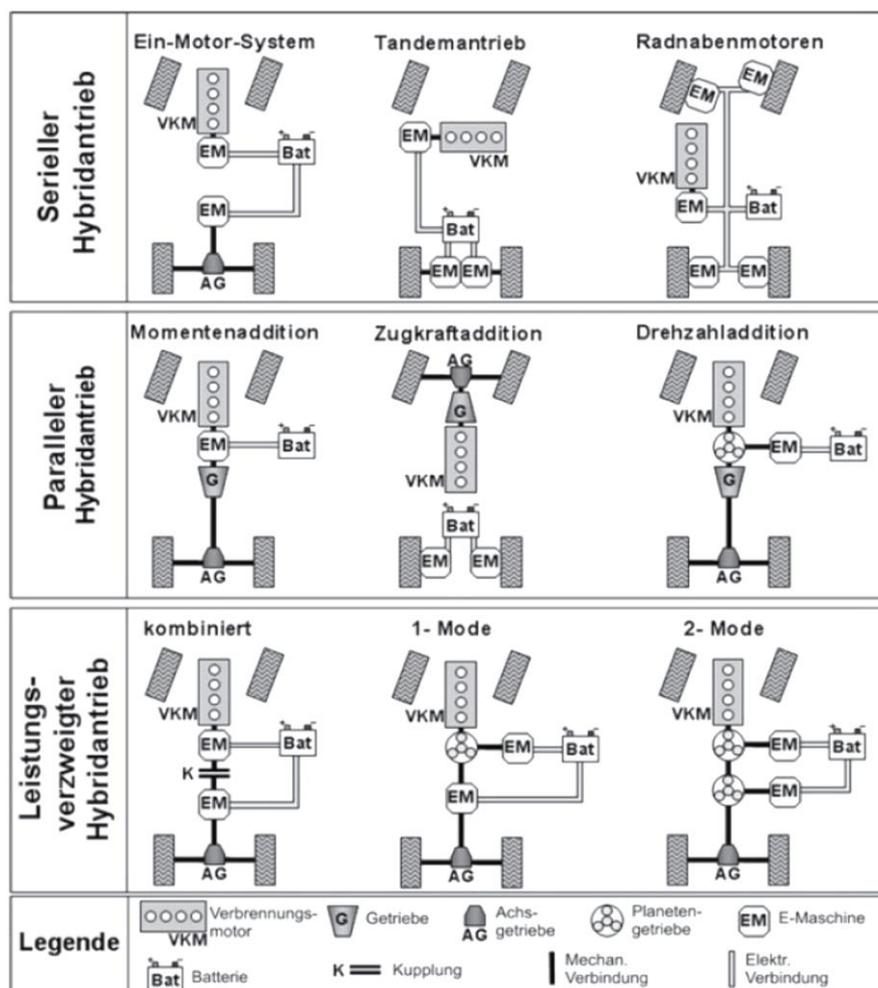


Abbildung 1: Strukturen von Hybridkonzepten

Serieller Hybridantrieb

Beim seriellen Hybridantrieb wird zum Antrieb des Fahrzeuges ausschließlich ein E-Motor verwendet. Die Verbrennungskraftmaschine ist in diesem Konzept zusammen mit einer generatorisch betriebenen E-Maschine zur elektrischen Versorgung des E-Motors und zum Aufladen der Batterie vorgesehen. Es besteht dabei keine mechanische Verbindung zwischen dem Verbrennungsmotor und der Antriebsachse sondern nur eine Verbindung über den so genannten elektrischen Zwischenkreis.

Paralleler Hybridantrieb

Im Gegensatz zum seriellen Hybridantrieb besteht bei parallelen Hybridkonzepten eine direkte mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und Antriebsachse. Der elektrische Antrieb wird parallel zu dem mechanischen Antrieb verwendet und kann zu oder abgeschaltet werden. Damit ist es möglich, das Fahrzeug konventionell, rein elektrisch oder gemischt anzutreiben. Wie in Abbildung 1 dargestellt, kann das Fahrzeug durch den Verbrennungsmotor und durch die E-Maschine über eine Momenten-, Zugkraft- oder Drehzahladdition angetrieben werden. Das in dieser Arbeit zu Vergleichszwecken verwendete Parallel-Hybridkonzept verwendet eine Momentenaddition und ist in Kapitel 5 näher beschrieben.

Leistungsverzweigter Hybridantrieb

In leistungsverzweigten Hybridkonzepten wird mechanische Leistung in einen mechanischen und elektrischen Zweig aufgeteilt und damit das Fahrzeug angetrieben. Mit Ausnahme des kombinierten Antriebsstranges (Abbildung 1) wird zur Leistungsaufteilung ein leistungsverzweigtes Getriebe verwendet. Planetengetriebe eignen sich in Kombination mit einfachen Übersetzungen und Kupplungen gut zur Leistungsaufteilung und werden in Kapitel 2.2.4 beschrieben. Das in dieser Arbeit untersuchte neue Hybridkonzept verwendet einen Planetenradsatz zur Leistungsverzweigung und zählt somit zu den leistungsverzweigten Hybridkonzepten. Eine detaillierte Beschreibung des neuen Konzeptes erfolgt in Kapitel 3.

2.1.2. Einteilung nach Grad der Hybridisierung

Neben der Struktur des hybriden Antriebsstranges können Hybridkonzepte auch nach dem Grad der Hybridisierung eingeteilt werden.

Micro-Hybrid

In einem Micro-Hybrid werden im Vergleich zu einem konventionellen Antrieb nur wenige Modifikationen vorgenommen. Oft wird nur der konventionelle Anlasser des Verbrennungsmotors durch einen Riemenstarter/Generator ersetzt, um durch die geringe Hybridisierung einen Verbrauchsvorteil zu schaffen.

Mild-Hybrid

In einem Mild-Hybrid werden leistungsfähigere Komponenten als im Micro-Hybrid verwendet, und die elektrische Maschine wird meist zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe positioniert. Dadurch erlaubt dieses System auch die Unterstützung des Verbrennungsmotors bei Anfahr- und Beschleunigungsphasen, auch Boosten genannt.

Full-Hybrid

In Full-Hybrid-Konzepten reicht die Dimensionierung der elektrischen Komponenten aus, um das Fahrzeug auch rein elektrisch antreiben zu können. Dadurch steigen die möglichen Verbrauchseinsparungen, jedoch steigen dadurch auch die Systemkomplexität und somit die Kosten an.

Plug-In-Hybrid

Bei einem Plug-In-Hybrid besteht die Möglichkeit, die Batterie des Fahrzeuges zusätzlich extern über das Stromnetz zu laden. Meist wird dabei die Batteriekapazität gegenüber Full-Hybrid-Konzepten vergrößert und vereint somit die Vorteile eines Full-Hybrids mit denen eines reinen Elektro-Autos.

2.2. Hybridkomponenten

In Hybridkonzepten werden neben den Komponenten eines konventionellen Antriebes auch elektrische Komponenten und unterschiedliche Getriebe verwendet. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Komponenten in hybriden

Antriebskonzepten wie Verbrennungsmotor, E-Maschinen, Batterien und Planetengetriebe beschrieben.

2.2.1. Verbrennungskraftmaschine [1, p. 101]

In hybriden Antriebskonzepten werden in den meisten Fällen konventionelle Verbrennungskraftmaschinen in Verbindung mit einem elektrischen Antriebssystem verwendet. Obwohl für Hybridkonzepte auch andere Verbrennungskraftmaschinen wie etwa Rotationskolbenmotoren oder Gasturbinen in Frage kommen, wird in diesem Kapitel nur auf konventionelle Otto- und Dieselmotoren und deren Rolle in hybriden Antriebskonzepten eingegangen.

Ottomotor

In konventionellen Ottomotoren treten durch die Drosselung der Ansaugluft in der Teillast schlechte Wirkungsgrade auf. Die Hybridisierung des Antriebsstranges stellt ein Potential dar, den Wirkungsgrad des Antriebes durch Betriebsmodi wie Lastpunktanhebung oder E-Fahren zu erhöhen und den Verbrauch zu senken. Im Vergleich zum Dieselmotor sind die Herstellungskosten des Ottomotors geringer und er weist eine höhere weltweite Akzeptanz auf als der Dieselmotor. Aus diesem Grund werden in bisherigen Serienhybridfahrzeugen meist Ottomotoren als Verbrennungskraftmaschine eingesetzt.

Dieselmotor

Der Dieselmotor hat vor allem in der Teillast deutlich bessere Wirkungsgrade als der Ottomotor. Somit kann mit einem Hybridkonzept mit Dieselmotor der geringste Verbrauch im Vergleich zu Konzepten mit Ottomotoren erreicht werden. Jedoch sind die Herstellungskosten des Dieselmotors sowie der nötigen Abgasnachbehandlungssysteme schon sehr hoch und der Preis wird durch die Hybridisierung nochmals gesteigert. Kann durch die Hybridisierung der Aufwand zur Abgasnachbehandlung gesenkt werden, so wird der Dieselmotor für Hybridkonzepte wieder attraktiv.

2.2.2. E-Maschinen [1, p. 113]

Eine wichtige Kernkomponente in Hybridkonzepten mit elektrischem Antrieb ist die E-Maschine. Diese wird in den verschiedenen hybriden Antriebskonzepten motorisch

sowie generatorisch betrieben. Die verschiedenen Bauformen und die Eignung für den hybriden Antriebstrang werden in diesem Kapitel beschrieben.

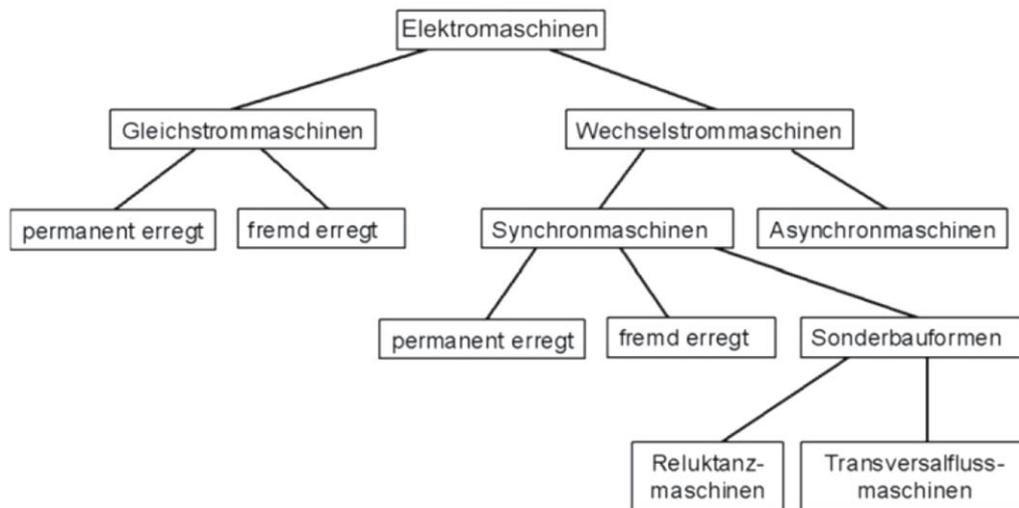


Abbildung 2: Bauarten von E-Maschinen [1, p. 114]

Wie in Abbildung 2 dargestellt, unterscheiden sich E-Maschinen grundsätzlich in Gleich- und Wechselstrommaschinen. Die Wechselstrommaschinen werden weiters in Synchron und Asynchronmaschinen unterschieden. Werden in E-Maschinen Permanentmagnete für die Erzeugung des Erregermagnetfeldes verbaut, so spricht man von permanenterregten E-Maschinen. Im Gegensatz spricht man von fremderregten E-Maschinen, wenn das Magnetfeld über Wicklungen und Gleichstrom aufgebaut wird.

Einsatz in hybriden Antriebssystemen

Wegen dem höheren Wirkungsgrad werden für hybride Antriebskonzepte fast ausschließlich Drehstrommaschinen eingesetzt. Die häufigste Bauform stellt dabei die permanenterregte Synchronmaschine dar, mit der auch in der Teillast gute Wirkungsgrade realisierbar sind. Derzeit verstärkt in der Entwicklung als Fahrzeugantrieb sind Transversalfluss- und Reluktanzmotoren sowie fremderregte Synchronmaschinen, welchen ein hohes Potential für Hybridfahrzeuge zugeschrieben wird.

2.2.3. Batterie [1, p. 146]

Batterien sind eine Art von Energiespeichern und werden zur Speicherung von elektrischer Energie zur späteren Nutzung verwendet. Für die Anwendung im PKW und insbesondere in Hybridfahrzeugen können unterschiedliche Batterie-

September 2014

Technologien eingesetzt werden. In diesem Kapitel werden drei wichtige Technologien aufgezählt und kurz beschrieben. Für andere Technologien und Arten von Energiespeichern wird auf die Literatur verwiesen.

Blei-Säure-Batterie

Diese Batterie-Technologie hat sich durch jahrzehntelangen Einsatz als Starter-Batterie im PKW bewährt und ist aus Sicht der Herstellungskosten anderen Technologien weit überlegen. Durch die Einschränkungen der Batterie hinsichtlich des Energiedurchsatzes und der Zyklenfestigkeit findet die Blei-Säure-Batterie nur für moderate Anwendungen in Micro-Hybrid-Fahrzeugen Anwendung.

Nickel-Metallhydrid-Batterie

Die Nickel-Metallhydrid-Batterie wird im Gegensatz zur Blei-Säure-Batterie in Hochleistungsanwendungen im Fahrzeugbereich verwendet und hat sich durch jahrzehntelangen Einsatz als zuverlässige und leistungsfähige Batterie-Technologie erwiesen. Weiterentwicklungen der Nickel-Metallhydrid-Batterie zielen heutzutage auf Systemoptimierung und die Kostenreduktion ab, um die Batterie für den Einsatz in Hybridfahrzeugen zu optimieren.

Lithium-Ionen-Batterie

Die Lithium-Ionen-Technologie ist die neueste Entwicklung bei den Batterie-Technologien und stellt ein großes Potential zur Anwendung im Fahrzeugbereich dar. Neben der hohen Leistungsdichte und dem hohen möglichen Energiedurchsatz sind Lithium-Ionen-Batterien durch das sehr gute Langzeitverhalten für Anwendungen in Hybridfahrzeugen äußerst attraktiv. Der große Nachteil besteht in dem notwendigen aktiven Batterie-Management-System und in dem erforderlichen Kühl-System, das die Kosten für Lithium-Ionen-Batterien in die Höhe treibt.

2.2.4. Planetengetriebe [1, p. 27]

Planetengetriebe eignen sich aufgrund ihrer Funktion gut für hybride Antriebsstränge und werden als Überlagerungsgetriebe oder zur Leistungsverzweigung eingesetzt. In Abbildung 3 wird schematisch ein einfacher Planetenradsatz gezeigt. Die Planetenräder, die im Planetenträger (Steg) gelagert sind, führen neben einer Umlaufbewegung um das Sonnenrad auch eine Eigendrehung aus. Das Hohlrad steht mit den Planetenrädern im Eingriff und führt ebenfalls eine umlaufende

Bewegung aus. Mit dem Hohlrads, Sonnenrad und dem Steg stehen drei Ein- / Ausgänge im Planetengetriebe zur Verfügung und können über Wellen mechanisch in den Antriebsstrang integriert werden.

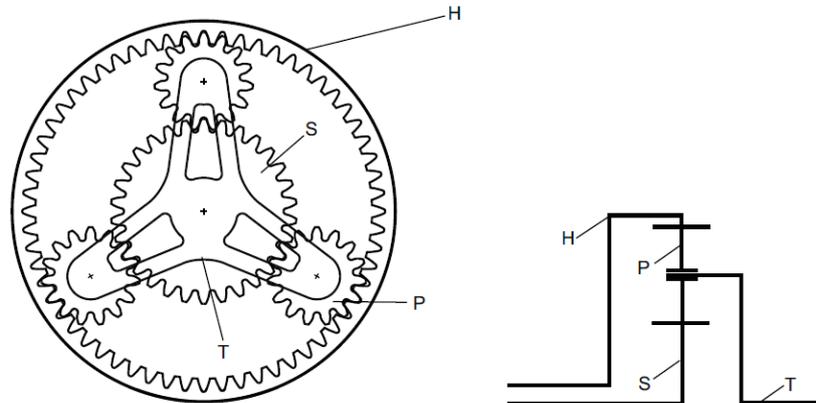


Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines Planetenradsatzes [2, p. 109], H ... Hohlrads, S ... Sonnenrad, T ... Planetenträger, P ... Planetenrad

Definiert man mit ω_1 die Winkelgeschwindigkeit des Sonnenrades, mit ω_2 die Winkelgeschwindigkeit des Steges und mit ω_3 die Winkelgeschwindigkeit des Hohlrades, kann man zusammen mit der Anzahl der Hohlradzähnen z_H und der Sonnenradzähnen z_S die so genannte Standübersetzung und die Willis-Gleichung angeben. Die Standübersetzung in Gleichung 1 gibt die Übersetzung von Hohlradwelle auf Sonnenradwelle bei festgehaltenem Steg an. Mit Hilfe der Willis-Gleichung in Gleichung 2 können die Verhältnisse der Winkelgeschwindigkeiten im Planetengetriebe beschrieben werden.

$$i_{\text{stand}} = -\left(\frac{z_H}{z_S}\right) \quad (1)$$

z_H ... Hohlradzähne, z_S ... Sonnenradzähne

$$\omega_1 - (1 - i_{\text{stand}}) \cdot \omega_2 - i_{\text{stand}} \cdot \omega_3 = 0 \quad (2)$$

ω_1 ... Winkelgeschw. Sonnenrad, ω_2 ... Winkelgeschw. Steg, ω_3 ... Winkelgeschw. Hohlrads

Die Willis-Gleichung kann man auch graphisch in einem so genannten Nomogramm darstellen und ist in Abbildung 4 als Beispiel ausgeführt. In den weiterführenden Kapiteln, insbesondere bei den Betriebsmodi werden Nomogramme verwendet, um die Drehzahlverhältnisse im Betrieb darzustellen. An den drei vertikalen Achsen

werden dabei jeweils die Winkelgeschwindigkeiten aufgetragen (ω_1 , ω_2 , ω_3). Die horizontale Position der mittleren Achse (ω_2) ist durch die Zahnanzahl des Hohl- und Sonnenrades festgelegt. Wie aus der Willis-Gleichung und aus dem Nomogramm ersichtlich, wird durch zwei Winkelgeschwindigkeiten immer die dritte Winkelgeschwindigkeit definiert und beschreibt somit die Verhältnisse der Winkelgeschwindigkeiten im Planetengetriebe.

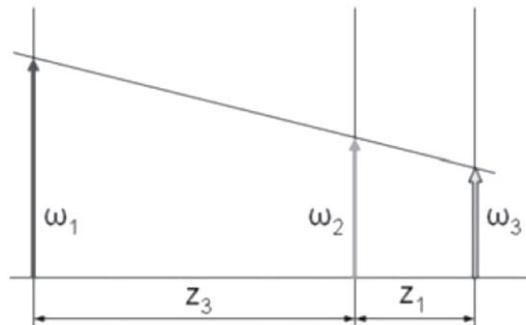


Abbildung 4: Nomogramm eines Planetengetriebes [1, p. 30], $\omega_1, \omega_2, \omega_3$... Winkelgeschw., z_3 ...Hohlradszähne, z_1 ...Sonnenradzähne

Betrachtet man die Dynamik im Planetengetriebe bei konstanten Winkelgeschwindigkeiten, so muss bei vernachlässigten Trägheiten und Reibung die Drehmomentbilanz null ergeben, dargestellt in Gleichung 3.

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0 \quad (3)$$

M_1 ... Moment am Sonnenrad, M_2 ... Moment am Steg, M_3 ... Moment am Hohlrad

Die Drehmomentbilanz ist auch zur Veranschaulichung im Nomogramm in Abbildung 5 eingezeichnet. Wie ersichtlich, muss dem Moment M_2 das Moment M_1 und M_3 entgegenwirken damit die Drehmomentbilanz null ergibt und sich konstante Winkelgeschwindigkeiten einstellen.

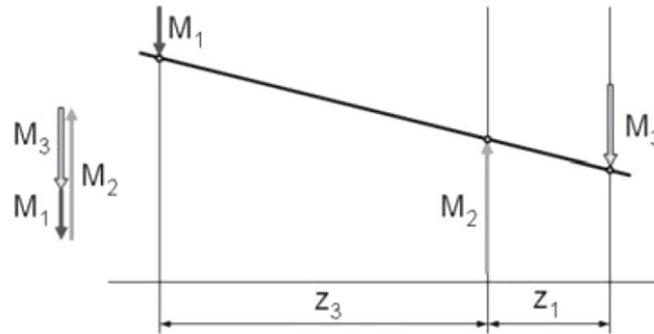


Abbildung 5: Nomogramm und Momente im Planetengetriebe [1, p. 30], M_1 ...Moment am Sonnenrad, M_2 ...Moment am Steg, M_3 ...Moment am Hohlrad, z_3 ...Hohlradzähne, z_1 ...Sonnenradzähne

Planetengetriebe eignen sich aufgrund der beschriebenen Eigenschaften hervorragend zur Leistungsverzweigung in hybriden Antriebssträngen. In dieser Arbeit wird in dem in Kapitel 3 vorgestellten neuen Hybridkonzept eine Planetenradstufe verwendet, um die Leistung der Verbrennungskraftmaschine aufzuteilen.

3. Neues Hybridkonzept

Der Zweck dieser Arbeit ist die Bewertung eines neuartigen Hybridkonzeptes. Die Idee zu diesem Konzept stammt von Herrn Prof. Fiala und wird in Kapitel 3.1 vorgestellt. Diesem neuen Antriebskonzept wurde von Prof. Fiala der Name Sapienter gegeben und zur Vereinfachung wird in der folgenden Arbeit das neue Hybridkonzept als Sapienter-Konzept bezeichnet. In den darauffolgenden Kapiteln werden die von der Idee abgeleiteten Komponenten gezeigt, die mit diesem Konzept möglichen Betriebsmodi vorgestellt und in ihren Eigenschaften bewertet. Mit einer geeigneten Betriebsstrategie wird das Konzept in spezifizierten Fahrzyklen simuliert und die Ergebnisse analysiert.

3.1. Idee des neuen Konzeptes (Sapienter-Konzept)

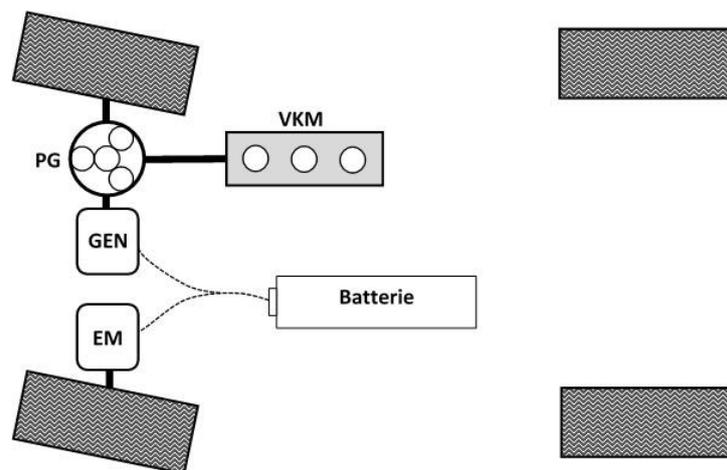


Abbildung 6: Schematische Darstellung des neuen hybriden Antriebskonzeptes (Sapienter-Konzept)

In Abbildung 6 wird die Idee des Sapienter-Hybridkonzeptes schematisch gezeigt. Die Verbrennungskraftmaschine (VKM) ist über ein Planetengetriebe (PG) mit dem Generator (GEN) und dem rechten Vorderrad mechanisch verbunden. Das linke Vorderrad besitzt nur eine mechanische Verbindung mit dem Elektromotor (EM).

Die Grundidee besteht darin, durch eine leistungsschwache VKM die Lastpunkte und somit den Wirkungsgrad der VKM zu erhöhen. Die fehlende Leistung der VKM während Beschleunigungsvorgängen und während Bergfahrten wird mit dem EM ausgeglichen. Der Wegfall des Schalt- und des Differentialgetriebes soll zusätzlich den mechanischen Wirkungsgrad des Antriebsstranges erhöhen. Das Planetengetriebe und der GEN dienen bei diesem Konzept der Drehzahlregelung der

VKM und sind für die Erzeugung elektrischer Energie zuständig. Zur Speicherung und Bereitstellung der elektrischen Energie ist eine den Anforderungen entsprechende Batterie in dem Konzept vorgesehen. Abgesehen vom energetischen Aspekt beinhaltet die Idee auch eine Kosteneinsparung aufgrund der kleiner dimensionierten Komponenten. Zusammenfassend sind die erhofften Vorteile des Konzeptes angeführt:

- Klein dimensionierte VKM → hohe Last, hoher Wirkungsgrad
- Kein Schaltgetriebe, kein Differential → weniger Zahneingriffe, höherer Wirkungsgrad
- Geringe Leistung der Komponenten → Kostenvorteil

3.2. Auswahl der Komponenten

Basierend auf der Idee des Sapienter-Hybridkonzeptes wurden die Komponenten des Antriebsstranges ausgelegt und werden in diesem Kapitel argumentiert und beschrieben.

Der gesamte Antriebsstrang soll auf einen PKW mit den von Prof. Fiala vorgeschlagenen Eckdaten ausgelegt werden:

- Masse $m = 1500 \text{ kg}$
- Stirnfläche $A = 2,2 \text{ m}^2$
- c_w -Wert = 0,3
- Rollwiderstand = 0,01
- Reifenradius = 300 mm

3.2.1. Verbrennungskraftmaschine (VKM)

Um die Lastpunkte an der VKM hoch zu halten, war die Idee eine klein dimensionierte VKM zu verwenden. Die VKM sollte aber genug Leistung zur Verfügung stellen können, um das Fahrzeug bei Konstantfahrten in der Ebene bis zu einer Geschwindigkeit von 110 km/h ohne Unterstützung des EM anzutreiben.

Besitzt die VKM zu viel Leistung, so stellen sich zu niedrige Lastpunkte ein und der Verbrauchsvorteil verschwindet. Bei zu geringer Leistung der VKM muss mehr Leistung über den wirkungsgradärmeren elektrischen Zweig erbracht werden (siehe Kapitel 3.3) und führt ebenfalls zu schlechterem Verbrauch.

Mit diesen Überlegungen wurde eine VKM mit dem in Abbildung 7 dargestellten Motorkennfeld und einer maximalen Leistung von 26 kW gewählt. Das Motorkennfeld wurde aus den Messdaten eines 1,4L frei ansaugenden 4-Zylinder-Motor erstellt. Der in Abbildung 8 dargestellte Drehmoment- und Leistungsverlauf wurde durch Skalierung des gemessenen 1,4L-Motor auf 490ccm erstellt. In Kapitel 3.2.6 wird das Motorkennfeld mit zugehörigen Fahrwiderstandslinien abgebildet und gezeigt, dass die VKM passend gewählt wurde.

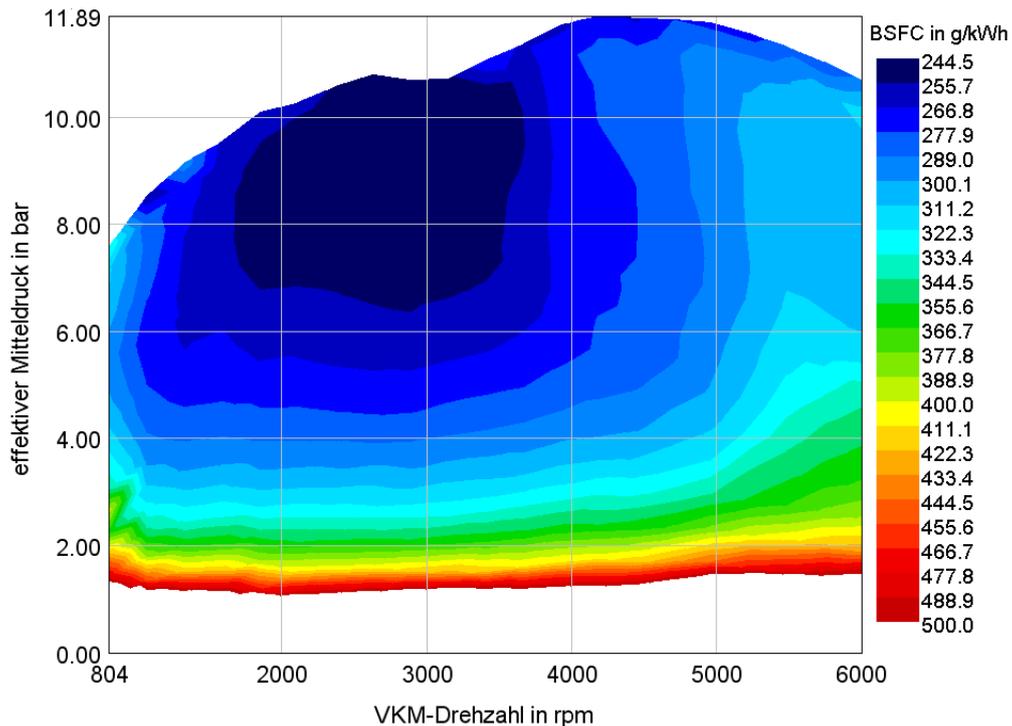


Abbildung 7: Kennfeld der VKM

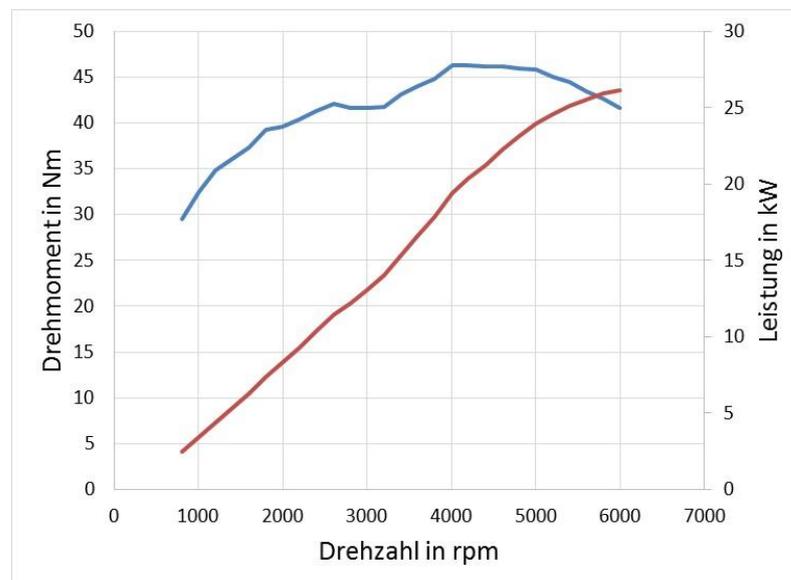


Abbildung 8: Drehmoment und Leistung der VKM

max. Drehzahl: 6000 rpm

max. Leistung: 26,1 kW (35,5 PS) bei 6000 rpm

max. Drehmoment: 46 Nm bei 4000 rpm

3.2.2. Elektromotor EM

Bei dieser Komponente handelt es sich um eine E-Maschine, die motorisch sowie generatorisch betrieben werden kann. Die E-Maschine wird hauptsächlich im motorischen Betrieb zum Vortrieb des Fahrzeuges verwendet und wird deshalb in dieser Arbeit vereinfacht als Elektromotor (EM) bezeichnet. Der EM hat die Aufgabe, die leistungsschwache VKM bei Beschleunigungsvorgängen und Steigungsfahrten zu unterstützen. Zusätzlich wird bei Bremsvorgängen über den EM Energie rekuperiert. Für diese Anforderung ist in dem Hybridkonzept ein EM mit einer Maximalleistung von 30 kW ausreichend. Addiert man dazu die Leistung der VKM, so steht eine Maximalleistung von 56 kW zum Vortrieb bereit. Zum Vergleich wird der Volkswagen Polo (Stand August 2014), der mit dem Fahrzeug des Sapienter-Konzeptes vergleichbar ist, mit einer Leistung von 51 kW angeboten. [3] So kann die addierte Leistung von 56 kW im Sapienter-Konzept als ausreichend angenommen werden.

In Abbildung 9 wird der Verlauf des Drehmomentes und der Leistung des EM über der Drehzahl dargestellt. In Abbildung 10 ist das Wirkungsgraddiagramm des EM dargestellt, welches aus der Literatur [4] entnommen und für die diese Arbeit adaptiert wurde. Zum Wirkungsgrad des EM wurde schon der Inverter-Wirkungsgrad von 92%¹ hinzugerechnet und der Gesamtwirkungsgrad beträgt somit im besten Fall ca. 86%.

Drehzahlbereich: ±6000 rpm

max. Leistung: 30 kW Dauerleistung

max. Drehmoment: 286 Nm

¹ Aus Messungen am Institut

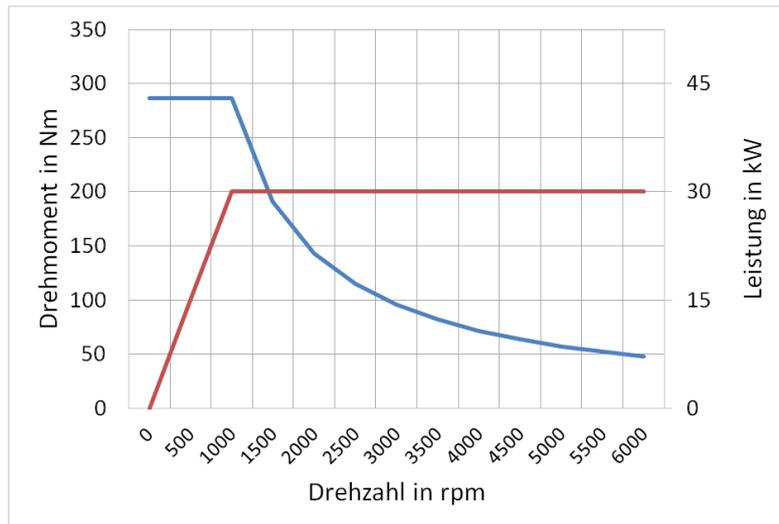


Abbildung 9: Drehmoment und Leistung des EM

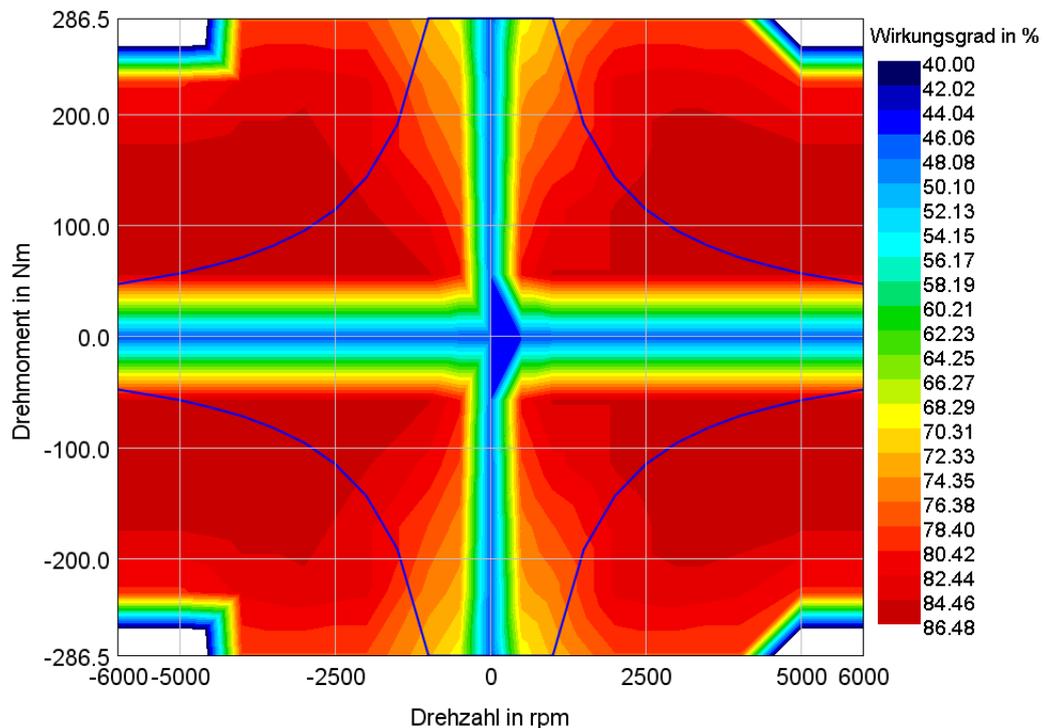


Abbildung 10: Wirkungsgrad des EM inkl. Inverter-Wirkungsgrad

3.2.3. Generator GEN

Der GEN ist genau genommen eine E-Maschine, die auch motorisch betrieben werden kann, jedoch hauptsächlich im generatorischen Betrieb verwendet wird und deshalb als Generator (GEN) bezeichnet wird. Dieser hat primär die Aufgabe, die Drehzahl der VKM zu regeln und elektrische Energie zu generieren, um damit die Batterie zu laden und den EM zu speisen. Zusätzlich wird bei Anfahrvorgängen und hohen Geschwindigkeiten der GEN motorisch betrieben und erbringt mechanische Leistung zum Vortrieb des Fahrzeuges.

Wie später bei den Betriebsstrategien beschrieben, deckt ein GEN mit einer maximalen Leistung von 15 kW alle Anforderungen ab.

Drehzahlbereich: ± 10.000 rpm

max. Leistung: 15 kW Dauerleistung

max. Drehmoment: 142 Nm

In Abbildung 11 ist der Verlauf des Drehmomentes und der Leistung des GEN über der Drehzahl abgebildet. In Abbildung 12 wird der Wirkungsgrad des GEN inklusive Inverter abhängig von Drehzahl und Drehmoment gezeigt. Das Wirkungsgraddiagramm wurde aus der Literatur entnommen [4] und für die Simulation des Generators adaptiert. Ident wie der EM hat der GEN inkl. Inverter im günstigsten Fall einen Wirkungsgrad von 86%.

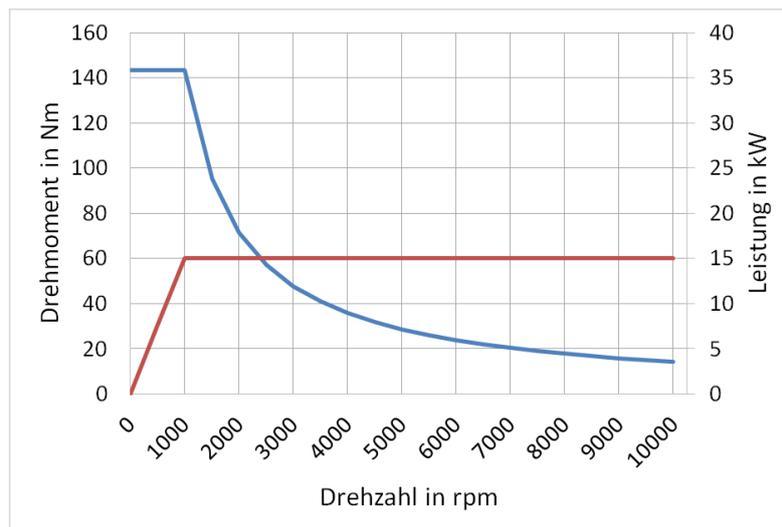


Abbildung 11: Drehmoment und Leistung des GEN

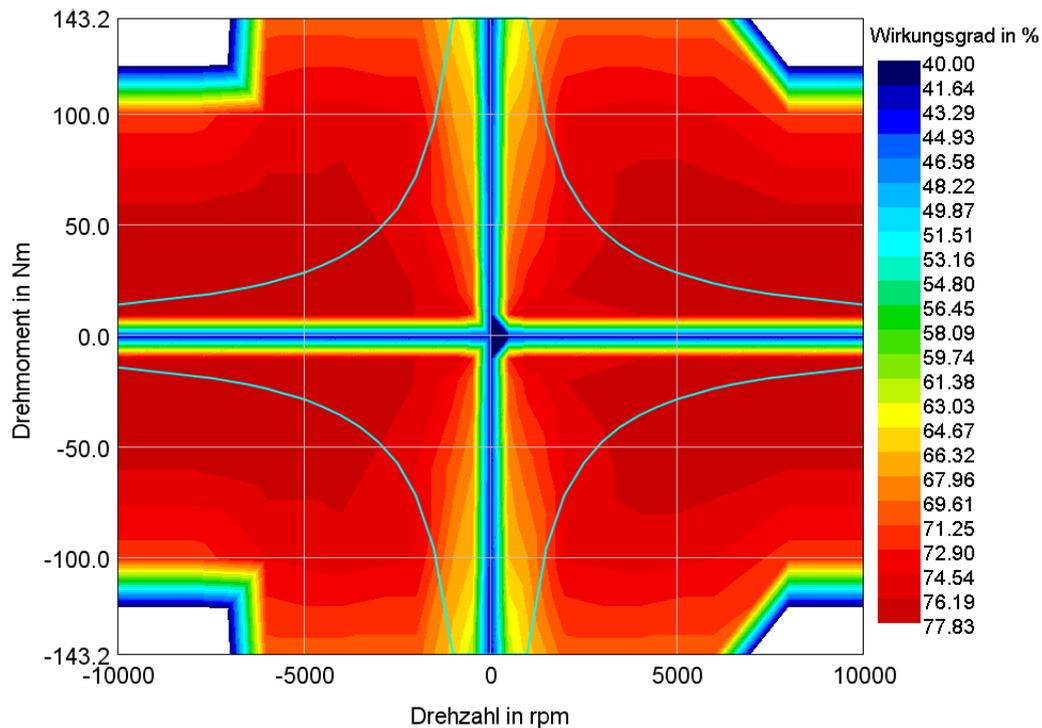


Abbildung 12: Wirkungsgrad des GEN inkl. Inverter-Wirkungsgrad

3.2.4. Batterie

Die Batterie hat die Aufgabe, elektrische Energie zu speichern und wenn nötig zur Verfügung zu stellen. Die Nennspannung der Batterie beträgt 400 V und die Kapazität der Batterie ist mit 10 Ah dimensioniert, das einen Energiegehalt der Batterie von 4 kWh ergibt. Wie in späteren Simulationen ersichtlich, ist die Batterie somit ausreichend dimensioniert und kann mit einer Maximalleistung von über 30 kW den EM problemlos mit elektrischer Energie versorgen.

Für die Modellierung in GT Suite wurde ein über den Ladezustand konstanter Innenwiderstand von $0,15 \Omega$ angenommen und stellt damit einen energetischen Wirkungsgrad von 93% dar, das in etwa einer Lithium-Ionen Batterie entspricht. [1, p. 191]

3.2.5. Übersetzung EM zu linken Vorderrad

Da das Drehmoment des EM maximal 286 Nm beträgt und an der Radachse viel höhere Momente gefordert sind, ist es unumgänglich zwischen der Radachse und dem EM ein Untersetzungsgetriebe einzusetzen (Abbildung 13).

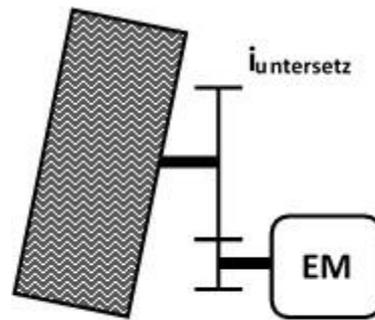


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Übersetzung zwischen EM und linkem Vorderrad

Für die Wahl der richtigen Übersetzung zwischen dem EM und dem linken Vorderrad waren die folgenden Anforderungen ausschlaggebend:

- Drehzahlbereich des EM: ± 6000 rpm
- Max. Drehmoment des EM: 286 Nm
- Fahrzeuggeschwindigkeit mit dieser Drehzahl: 0-135 km/h
- Reifenradius: 0,3 m

Mit diesen Anforderungen ergibt sich eine optimale Übersetzung von dem EM zur Radachse von $i = 5$. In [Abbildung 14](#) ist der Drehmomentverlauf, der sich durch diese Übersetzung ergibt, über der Geschwindigkeit dargestellt. Zusätzlich wurde das benötigte Drehmoment am EM, das sich bei verschiedenen Steigungen und Geschwindigkeiten ergibt, als Fahrwiderstandslinien eingezeichnet. Es ist somit möglich, das Fahrzeug in der Ebene bis zu einer Geschwindigkeit von 135 km/h rein durch den EM anzutreiben und es besitzt bei geringeren Geschwindigkeiten ausreichend Drehmomentreserve für Beschleunigungsvorgänge.

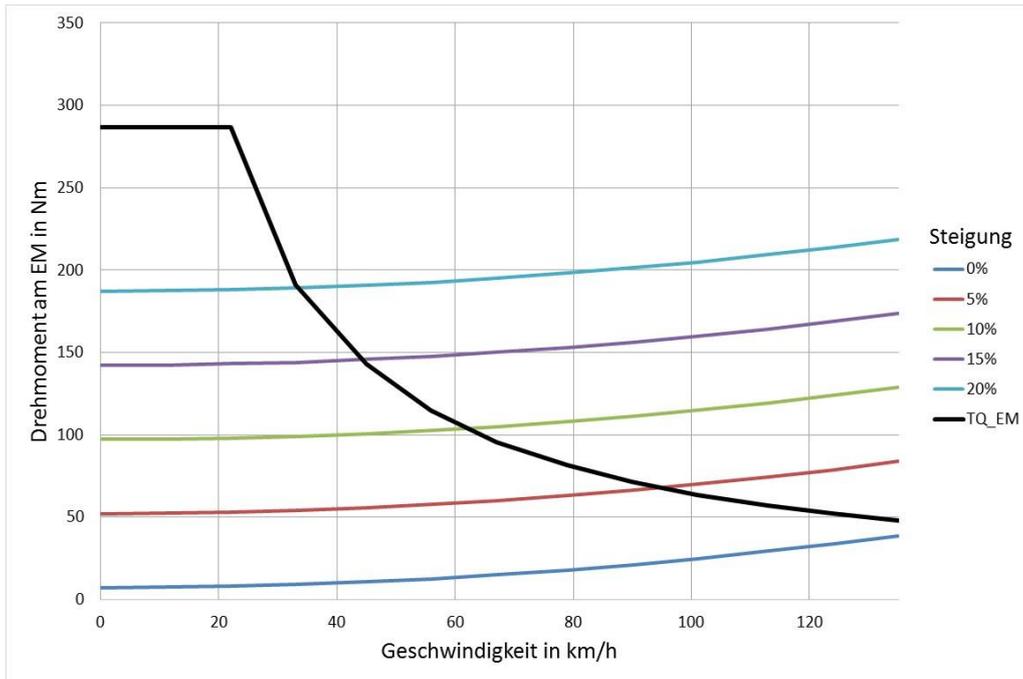


Abbildung 14: Drehmomentverlauf des EM mit Fahrwiderstandslinien bei gewähltem Übersetzungsverhältnis

Für die Modellierung und Simulation wird der Wirkungsgrad der Getriebestufe mit $\eta = 98\%$ angenommen. [5, p. 75]

3.2.6. Planetengetriebe

Das Planetengetriebe soll die Aufgabe der Drehzahlregelung der VKM übernehmen und zur Leistungsverzweigung von der VKM zum GEN und zum rechten Vorderrad dienen. Um diese Leistungsverzweigung zu erreichen, müssen die Komponenten wie in Abbildung 15 mit dem Planetengetriebe verbunden sein. [1, p. 27]

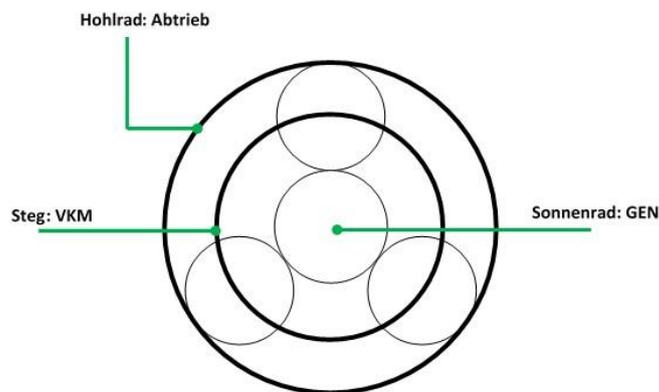


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Planetengetriebes

Mit dieser Konfiguration teilt sich das Drehmoment der VKM (Steg) mit konstantem Verhältnis auf den Abtrieb (Hohlrad) und auf den GEN (Sonnenrad) auf. Die prozentuale Aufteilung ist direkt von den Übersetzungsverhältnissen des Planetenradsatzes abhängig. Wie in der Literatur beschrieben, gilt bei vernachlässigter Reibung und Trägheiten die Drehmomentbilanz: $\sum M = 0$. [1, p. 29]

Das bedeutet, dass das Drehmoment der VKM stets höher sein muss als das geforderte Drehmoment am Hohlrad (Abtrieb) des Planetengetriebes. Durch die Fahrwiderstände ergeben sich bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h schon eine Drehmomentanforderung von mehr als 50 Nm an der Radachse². Durch das hohe benötigte Drehmoment an der Radachse und dem beschränkten Drehmoment der VKM ist es unbedingt notwendig, eine Übersetzungsstufe zwischen dem Hohlrad des Planetengetriebes und der Radachse zu verwenden. Die genauen Übersetzungsverhältnisse des Planetengetriebes und dem der Übersetzungsstufe werden im nachfolgenden Kapitel diskutiert und festgelegt.

Auslegung des Planetengetriebes mit Endübersetzung

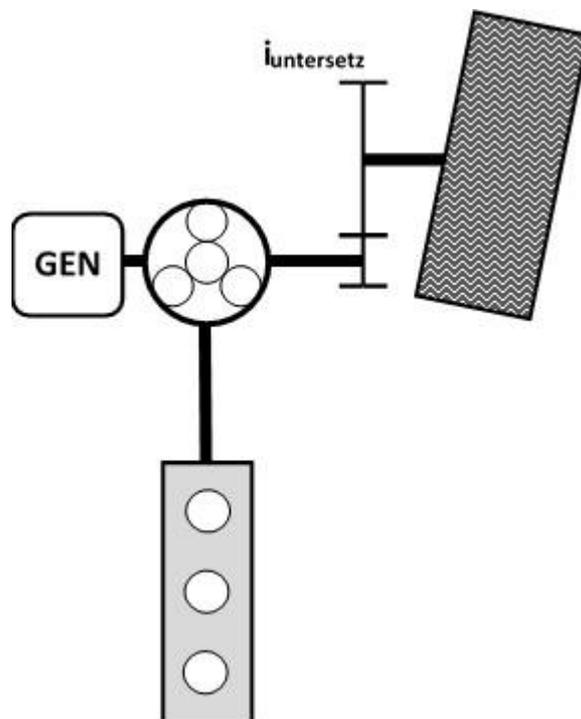


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Antriebsstrangs zum rechten Vorderrad

In Abbildung 16 wird schematisch der Antriebsstrang zum rechten Vorderrad dargestellt. Zwischen dem Planetengetriebe und der Radachse des rechten

² Ermittelter Wert aus Längsdynamik Simulation

Vorderrades ist ein Getriebe notwendig, um die Momente an der Radachse an die VKM-Drehmomente anzupassen. Die auszulegenden Parameter für diesen Teil des Antriebsstranges sind einerseits das Zahnverhältnis von Hohl- zu Sonnenrad im Planetengetriebe sowie die Übersetzung der nachfolgenden Getriebestufe.

Aus den verwendeten Komponenten und aus der Konzeptidee wurden folgende Anforderungen an das Planetengetriebe abgeleitet:

- Drehzahlbereich VKM: 1000-6000 rpm
- Drehzahlbereich GEN: -10.000-10.000 rpm
- VKM-Betrieb ohne Leistungsverzweigung: 20-110 km/h
- Möglichkeit zum Aufladen der Batterie im Stillstand

Ermitteln des Zahnverhältnisses

Durch die Forderung, dass die Batterie auch im Stillstand aufgeladen werden kann und dabei die VKM-Drehzahl wegen des besseren spezifischen Verbrauches (siehe Abbildung 7) einen Wert von 2000 rpm nicht unterschreiten sollte, darf das Verhältnis der Hohlrad- zu den Sonnenradzähnen maximal 80:20 betragen, um diese Funktion zu ermöglichen (siehe Abbildung 17).



Abbildung 17: Drehzahlverhältnisse im Planetengetriebe bei einem Zahnverhältnis von 80:20

Das Verhältnis von Hohl- zu Sonnenradzähnen ist ausschlaggebend für die Drehmomentverteilung der VKM auf den GEN bzw. auf den Abtrieb. Ist das Verhältnis hoch, so wird mehr Drehmoment an den Abtrieb abgegeben und es steht dort im Falle von Beschleunigungen mehr Drehmomentüberschuss zur Verfügung.

Jedoch steht dabei weniger Drehmoment am GEN zur Verfügung und die maximal mögliche Leistung am GEN zur Umwandlung in elektrische Energie ist geringer.

Als Beispiel werden in Tabelle 1 drei Planetenradsätze aufgeführt und miteinander verglichen. Es wird untersucht, welche mechanischen Leistungen am GEN möglich sind wenn sich das Fahrzeug im Stillstand befindet. Dabei wird der GEN an seiner Drehzahlgrenze von 10.000 rpm betrieben und das maximale VKM-Drehmoment aus dem Motordiagramm aus Abbildung 7 entnommen.

Tabelle 1: Planetenradsätze mit unterschiedlichen Zahnverhältnissen und die Auswirkungen auf Drehzahlen, Drehmomente und Leistungen

Zahnverhältnis	60:40	70:30	80:20
$n_{\text{GEN,max}}$	10.000 rpm	10.000 rpm	10.000 rpm
n_{VKM}	4000 rpm	3000 rpm	2000 rpm
$M_{\text{VKM,max}}$	46 Nm	41 Nm	39,5 Nm
M_{GEN}	18,4 Nm (40%)	12,3 Nm (30%)	7,9 Nm (20%)
$M_{\text{Abtr.}}$	27,6 Nm (60%)	28,7 Nm (70%)	31,6 Nm (80%)
P_{GEN}	19,4 kW	12,9 kW	8,3 kW

$n_{\text{GEN,max}}$... max. GEN-Drehzahl; n_{VKM} ... VKM-Drehzahl; $M_{\text{VKM,max}}$... max. VKM-Drehmoment;

M_{GEN} ... Drehmoment am GEN; $M_{\text{Abtr.}}$... Drehmoment am Abtrieb; P_{GEN} ... Leistung am GEN

Man erkennt, dass bei geringen Zahnverhältnissen von Hohlrad- zu Sonnenrad wie etwa 60:40 mehr Leistung am GEN möglich ist, jedoch das Moment am Abtrieb ($M_{\text{Abtr.}}$) mit nur 60% des VKM-Drehmomentes geringer ist als bei höheren Zahnverhältnissen. Dadurch gibt es ein Trade-Off zwischen dem Moment am Abtrieb und der Leistung am GEN, der bei der Wahl des Zahnverhältnisses berücksichtigt werden muss.

Ermitteln der Endübersetzung

Um die Forderung des VKM-Betriebs von 20 bis 110 km/h ohne Leistungsverzweigung zu ermöglichen und ebenfalls das erforderliche Drehmoment am Hohlrad an das maximale VKM-Drehmoment anzupassen, muss die Endübersetzung entsprechend gewählt werden. Je niedriger die Endübersetzung gewählt wird, desto höhere Geschwindigkeiten können ohne Leistungsverzweigung gefahren werden. Jedoch erhöht sich dadurch auch das erforderliche Drehmoment

der VKM um die Fahrwiderstände zu überwinden. Dazu ist in [Abbildung 18](#) und [Abbildung 19](#) jeweils das maximale Drehmoment der VKM über der Fahrzeuggeschwindigkeit bei verschiedenen Endübersetzungen aufgetragen (GEN ist im Stillstand). Man erkennt, dass bei einer Endübersetzung von $i=8$ nur bis zu einer Geschwindigkeit von 120 km/h ohne Leistungsverzweigung gefahren werden kann. Dabei ergeben sich hohe Motordrehzahlen, jedoch können Fahrwiderstände bis zu einer Steigung von 3% überwunden werden. Mit einer geringeren Übersetzung von $i=5$ ist es zwar, in Bezug auf die Drehzahlübersetzung zwischen VKM und Vorderrad, möglich hohe Geschwindigkeiten ohne Leistungsverzweigung zu erreichen, jedoch ist das Drehmoment der VKM zu gering, um die Fahrwiderstände überwinden zu können.

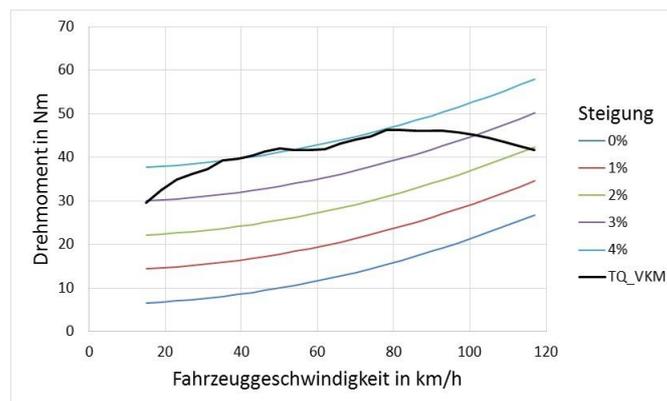


Abbildung 18: Drehmoment der VKM und Fahrwiderstandslinien bei $i=8$ und GEN-Drehzahl = 0

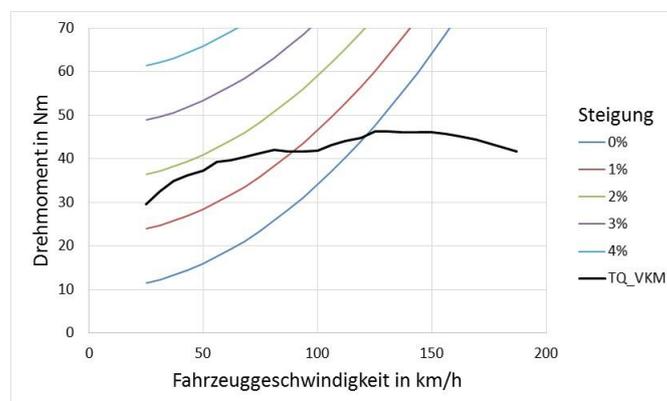


Abbildung 19: Drehmoment der VKM und Fahrwiderstandslinien bei $i=5$ und GEN-Drehzahl = 0

Auswahl eines geeigneten Planetengetriebes mit Endübersetzung

Mit den Überlegungen zum Zahnverhältnis im Planetengetriebe und der Endübersetzung wurden dementsprechende Parameter festgelegt.

Ein guter Kompromiss für das Zahnverhältnis im Planetenradsatz liegt etwa bei einem Verhältnis von Hohlrad zu Sonnenrad von 70:30, da noch ausreichend Drehmoment am Vorderrad zur Verfügung steht und ebenfalls annehmbare Leistungen am GEN möglich sind. Für das Simulationsmodell wurde ein Planetengetriebe mit 78 Hohlradzähnen und 30 Sonnenradzähnen verwendet. Dies entspricht einem Verhältnis von etwa 72:28 welches beim Hybridfahrzeug Toyota Prius verwendet wird. [1, p. 256]

Die Endübersetzung mit $i=8$ ermöglicht es angemessene Geschwindigkeiten zu erreichen und gleichzeitig auch ausreichende Fahrwiderstände mit der VKM zu überwinden (siehe Abbildung 18).

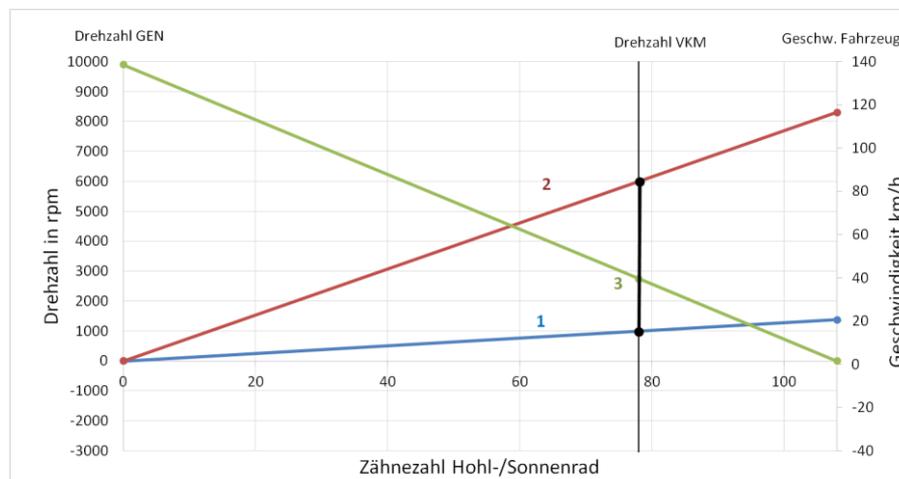


Abbildung 20: Drehzahlverhältnisse im Planetengetriebe bei stehendem Generator und minimaler (1) bzw. maximaler (2) VKM-Drehzahl sowie bei stehendem Fahrzeug und maximaler GEN-Drehzahl (3)

Abbildung 20 zeigt die Drehzahlverhältnisse mit dem ausgewählten Planetengetriebe und der gewählten Endübersetzung. Die Fälle eins bis drei werden folgend erklärt:

Fall eins und **Fall zwei:** Bei stehendem GEN ist es möglich, das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit zwischen 19 und 117 km/h mit der VKM zu betreiben (1000-6000 rpm).

Fall drei: Bei stillstehendem Fahrzeug ist es möglich, mechanische Leistung von der VKM über den GEN in elektrische Leistung umzuwandeln und somit die Batterie im

Stillstand aufzuladen. Die maximal mögliche mechanische Leistung am GEN ergibt sich dabei zu 12 kW.

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Daten sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenfassung des ausgelegten Planetenradsatzes mit Endübersetzung

Zahnverhältnis	78:30
i_{end}	8
M_{VKM}	100%
M_{GEN}	28%
M_{Abtrieb}	72%
$V_{\text{VKM},1000\text{RPM}}$	19 km/h
$V_{\text{VKM},6000\text{RPM}}$	117 km/h
$P_{\text{GEN,max}}$	12 kW

Der Wirkungsgrad für das Planetengetriebe zwischen den Eingangswellen in das Planetengetriebe (Sonnenrad, Hohlrads, Steg) wird mit $\eta = 90\%$ angenommen. Dieser Wirkungsgrad wird etwas pessimistischer als in den Messungen am Institut (93-94%) angenommen. Da für das Differential im parallelen Vergleichskonzept der selbe Wirkungsgrad angenommen wurde, hat dieser Wirkungsgrad einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Bewertung des Konzeptes, lediglich die Absolutwerte der Verbräuche in den Fahrzyklen werden zu niedrigeren bzw. höheren Werten verschoben. Der Wirkungsgrad der Endübersetzungsstufe wird laut Literatur mit $\eta = 98\%$ festgelegt. [5, p. 75]

In Abbildung 21 ist das Motorkennfeld, das sich mit den gegebenen Übersetzungsverhältnissen und stehendem Generator (GEN-Drehzahl = 0) ergibt, dargestellt. Zusätzlich sind noch die Fahrwiderstandslinien bis zu einer Steigung von drei Prozent eingezeichnet. Man kann an den Fahrwiderstandslinien erkennen, dass durch die schwache VKM nur Steigungen bis zu 3% von der VKM alleine überwunden werden können. Durch die schwach ausgelegte VKM wird diese in Bereichen mit geringem spezifischem Verbrauch betrieben.

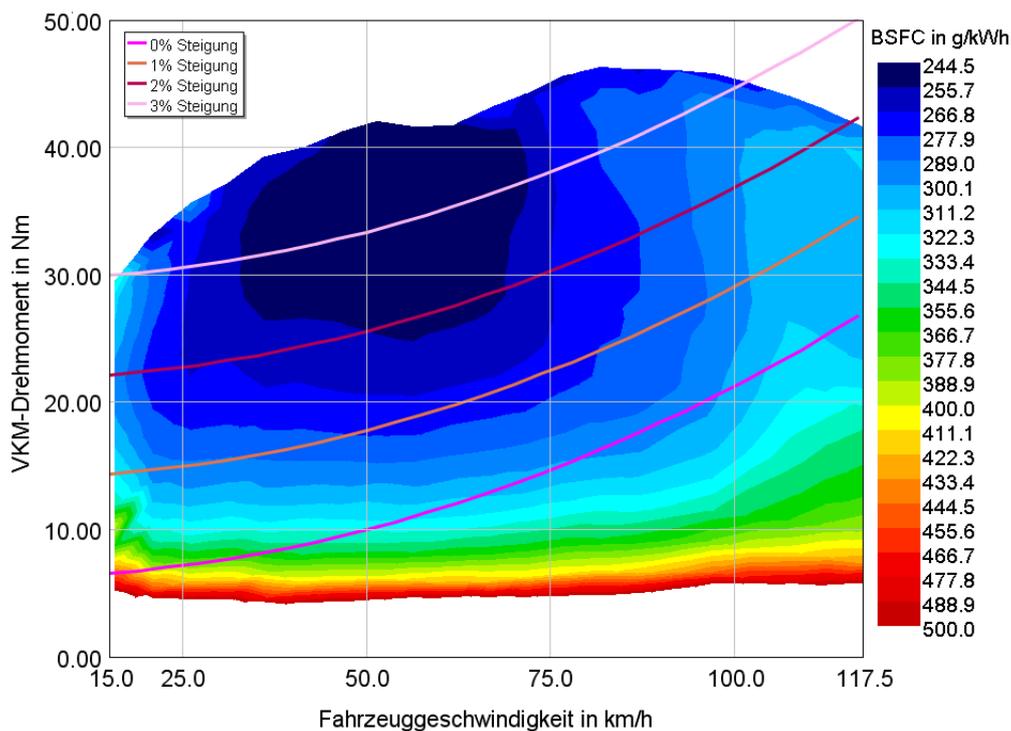


Abbildung 21: Motorkennfeld der VKM mit Fahrwiderstandslinien für GEN-Drehzahl = 0

3.2.7. Zusammenfassung der Komponenten

Zusammenfassend ergeben sich folgende Eckdaten der Komponenten:

- VKM: max. Leistung: 26 kW
- EM: max. Leistung: 30 kW Dauerleistung
- GEN: max. Leistung: 15 kW Dauerleistung
- Batt.: max. Leistung: 30 kW, Nennspannung: 400 V, Kapazität 10 Ah (4 kWh)

3.3. Wirkungsgrade im Antriebsstrang

3.3.1. Mechanische Wirkungsgrade

Betrachtet man den Antriebsstrang des neuen Konzeptes, so ergeben sich die in [Abbildung 22](#) dargestellten mechanischen Wirkungsgradketten. Diese mechanischen Wirkungsgrade beschreiben die Verluste zwischen den Wellen des EM, GEN und der VKM bzw. zu der rechten und linken Radachse. Die Wirkungsgrade bei der Umwandlung im GEN und EM werden in Kapitel 3.3.2 beschrieben.

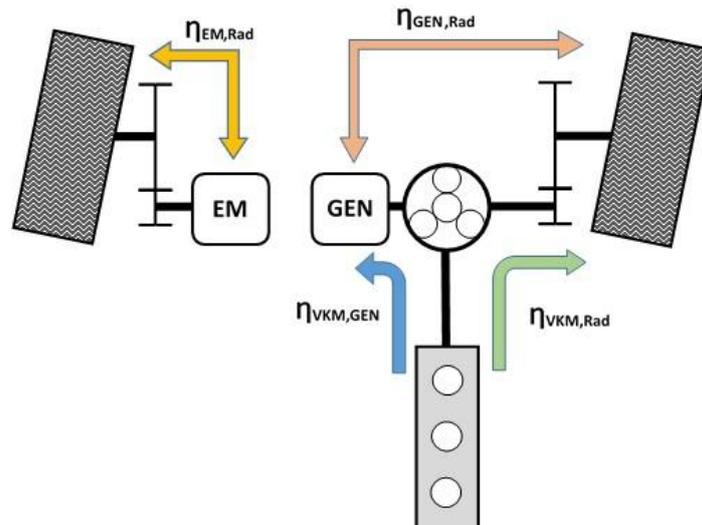


Abbildung 22: Mechanische Wirkungsgrade im Sapienter-Antriebsstrang

$\eta_{EM,Rad} = 0,98$... Wirkungsgrad von der EM Welle auf die Radachse links

Dieser Wirkungsgrad beeinflusst die Verluste, die beim Antrieb bzw. bei der Rekuperation zwischen dem EM und der linken Radachse entstehen.

$\eta_{VKM,Rad} = 0,9 \cdot 0,98 = 0,882$... Wirkungsgrad von der VKM Welle auf die Radachse rechts

Durch das Planetengetriebe und der nachfolgenden Endübersetzung entstehen Verluste bei der Leistungsübertragung zwischen VKM und dem rechten Vorderrad.

$\eta_{VKM,GEN} = 0,9$... Wirkungsgrad von der VKM Welle auf die GEN Welle

Wird Leistung von der VKM auf den GEN abgezweigt (z.B. Laden im Stillstand) so beeinflusst dieser Wirkungsgrad die dabei entstandenen Verluste.

$\eta_{GEN,Rad} = 0,9 \cdot 0,98 = 0,882$... Wirkungsgrad von der GEN Welle auf die Radachse rechts

Dieser Wirkungsgrad beschreibt die Verluste, die zwischen dem GEN und rechter Radachse entstehen.

Betrachtet man den Wirkungsgrad vom EM zum linken Vorderrad, so erkennt man, dass dabei nur Verluste in der einfachen Übersetzungsstufe auftreten und somit Vorteile gegenüber anderen Hybridkonzepten, bei denen sich ein Differential und evtl. ein Schaltgetriebe dazwischen befindet, bringen kann. Der Wirkungsgrad von der VKM zum rechten Vorderrad wird durch die Verluste im Planetengetriebe, sowie in der darauffolgenden Übersetzungsstufe geprägt und stellt wenig Potential für eine Wirkungsgradverbesserung gegenüber anderen Konzepten dar. Ein genauer Vergleich der Wirkungsketten wird anhand eines Parallel-Hybrid in Kapitel 5.1 ausführlich behandelt.

3.3.2. Elektrische Wirkungsgrade

Wie in Abbildung 23 gezeigt werden durch die elektrischen Wirkungsgrade die Verluste in den E-Maschinen, im Inverter sowie in der Batterie beschrieben. Die Wirkungsgrade η_{EM} und η_{GEN} der E-Maschinen sind vom Betriebspunkt abhängig und zusammen mit dem Inverter-Wirkungsgrad von 92% in Kapitel 3.2.2 und 3.2.3 als Kennfelder dargestellt. Der Entlade- bzw. Lade-Wirkungsgrad $\eta_{Batt,ein}$, $\eta_{Batt,aus}$ der Batterie wird wie in der Literatur beschrieben mit 93% angenommen. [1, p. 191]

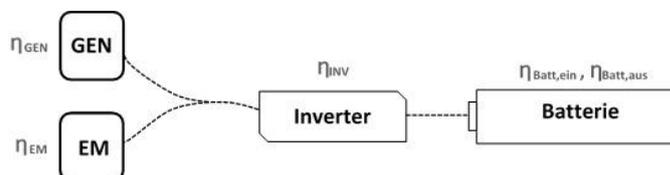


Abbildung 23: Schematische Darstellung der elektrischen Komponenten und deren Wirkungsgrade

$$\begin{aligned} \eta_{\text{elekt., gesamt, max}} &= \eta_{EM} * \eta_{INV} * \eta_{Bat, ein} * \eta_{Bat, aus} * \eta_{INV} * \eta_{EM} = \\ &= 0,86 * 0,93 * 0,93 * 0,86 = 64\% \quad (4) \end{aligned}$$

Der in Gleichung 4 angegebene gesamte elektrische Wirkungsgrad definiert die Verluste die auftreten, wenn mechanische Leistung über eine der beiden E-Maschinen umgewandelt und als elektrische Leistung in der Batterie gespeichert wird, sowie wieder zurück in mechanische Leistung transferiert wird. Im EM, sowie im GEN ist inklusive Inverter ein Wirkungsgrad von maximal 86% möglich (siehe Kapitel 3.2.2). Wird der Batteriewirkungsgrad mit 93% (siehe Kapitel 3.2.4) angenommen, so

ergibt sich ein maximal möglicher Gesamtwirkungsgrad des elektrischen Zweiges von 64%.

Der elektrische Gesamtwirkungsgrad gibt an, welche Verluste auftreten, wenn die Leistung von der VKM anstatt über den mechanischen Zweig zum Rad, über den elektrischen Zweig geführt wird und beeinflusst die Wahl der Betriebsstrategie sowie den Verbrauch während des Betriebs des Sapienter-Hybridkonzeptes.

3.4. Betriebsmodi

Nachdem das Sapienter-Konzept in den vorigen Kapiteln vorgestellt und passende Komponenten definiert wurden, werden in diesem Kapitel mögliche Betriebsmodi vorgestellt und auf die Eigenschaften dieser Modi eingegangen.

Zusammenfassend werden beim Sapienter-Konzept vier allgemeine Betriebsmodi definiert, wobei der Betriebsmode „VKM-Fahren mit EM und GEN“ zum besseren Verständnis in fünf Unterpunkte unterteilt wird. Alle nachfolgend beschriebenen Betriebsmodi sind hier aufgelistet:

- E-Fahren
- VKM-Fahren mit EM und GEN
 - Anfahren mit VKM und GEN
 - VKM-Fahren mit EM-Unterstützung, GEN im Stillstand
 - Erhöhen/Absenken der VKM-Drehzahl (Laden durch den GEN)
 - Lastpunktanhebung durch den EM
 - Kombination Lastpunktanhebung und VKM-Drehzahlverschiebung
- Aufladen im Stillstand
- Rekuperieren

3.4.1. E-Fahren

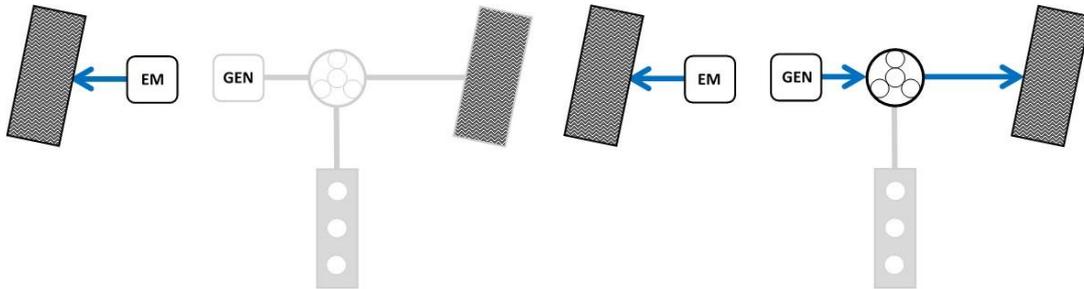


Abbildung 24: E-Fahren mit EM

Abbildung 25: E-Fahren mit EM und GEN

Mit dem vorgestellten Konzept ist es ohne weiteres möglich, das Fahrzeug rein elektrisch anzutreiben. Dafür stehen der EM, der direkt über ein Getriebe mit dem linken Vorderrad verbunden ist, zur Verfügung (Abbildung 24). Der GEN, der mit dem Planetengetriebe verbunden ist, kann ebenfalls motorisch betrieben werden und kann den EM beim Antrieb des Fahrzeuges unterstützen (Abbildung 25). Somit stehen für hohe Leistungsanforderungen der EM und der GEN als elektrische Antriebe zur Verfügung. Wird der GEN motorisch betrieben, ist es notwendig die VKM-Welle mechanisch zu bremsen, um ein Mitdrehen der VKM während dem Betriebsmodus E-Fahren zu verhindern. Mit dem gewählten Planetengetriebe und dem Drehzahllimit des GEN ist es möglich, das Fahrzeug bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 54 km/h elektrisch anzutreiben.

Die zum Betriebsmodus zugehörigen Drehzahlen im Planetengetriebe werden in Abbildung 26 dargestellt. Während die VKM-Drehzahl bei 0 rpm verbleibt, zeigt Fall eins die Drehzahl des GEN bei 20 km/h und Fall zwei die maximale Drehzahl des GEN bei 54 km/h.

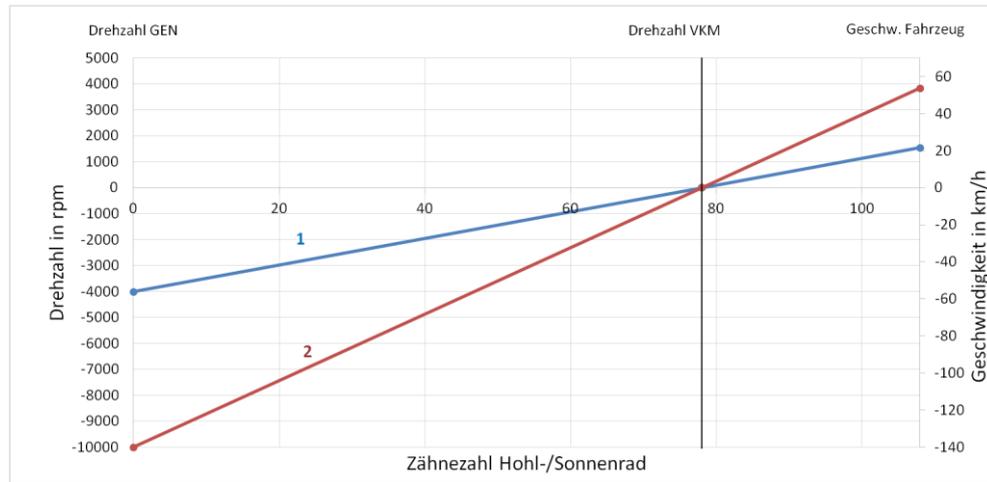


Abbildung 26: Drehzahlverhältnisse im Planetengetriebe im Betriebsmodus E-Fahren (1: 20 km/h; 2: 54 km/h)

Um den rein elektrischen Betrieb zu veranschaulichen, wurden zwei Simulationen durchgeführt, in denen einmal nur mit dem EM angetrieben wird und einmal die Möglichkeit des motorischen Betriebs des GEN gezeigt wird.

Antrieb nur mit EM:

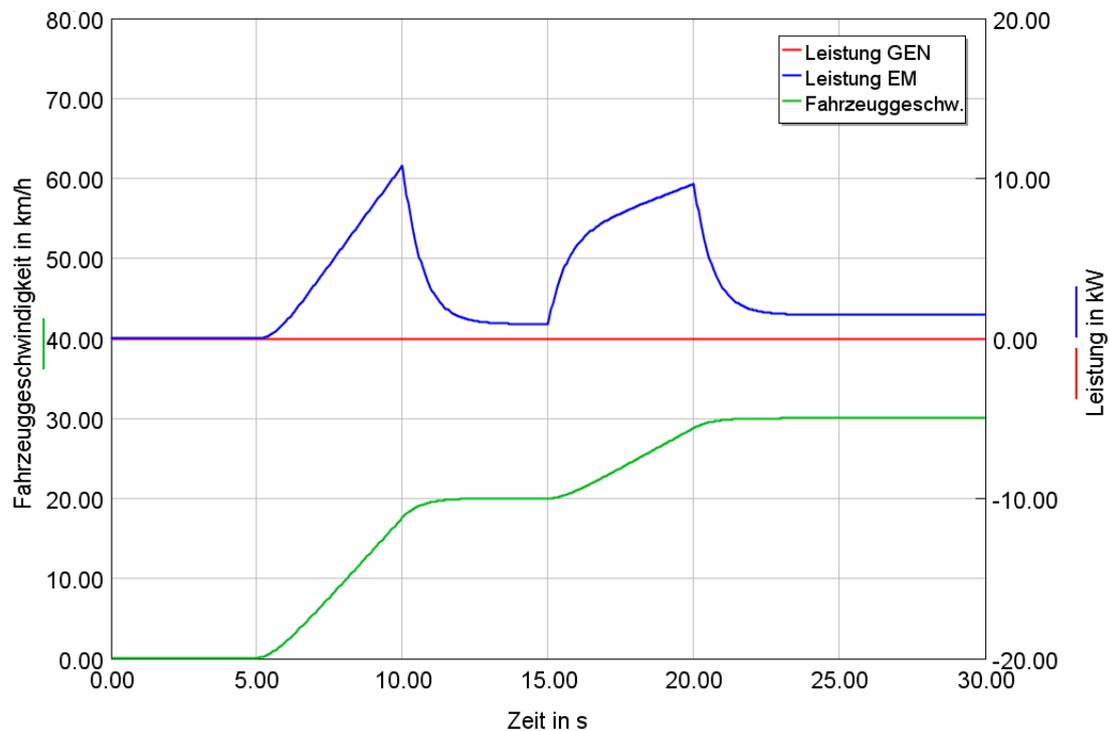


Abbildung 27: Leistung des EM und GEN bei Antrieb nur mit EM

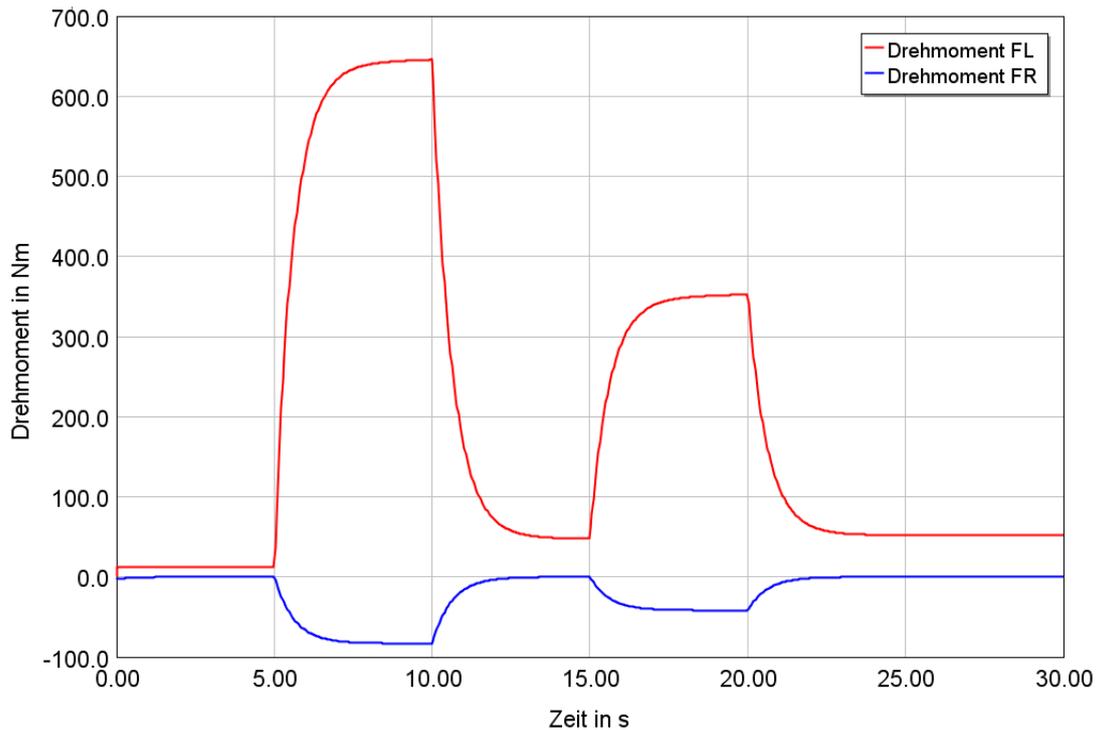


Abbildung 28: Drehmomentverlauf an den Vorderrädern bei Antrieb nur mit EM

Wird das Fahrzeug nur rein elektrisch durch den EM angetrieben, erbringt dieser die gesamte Leistung zum Vortrieb des Fahrzeuges (Abbildung 27). Wie aus dem Drehmomentdiagramm (Abbildung 28) für die beiden Vorderräder zu entnehmen ist, kommt es dabei zu ungleichen Antriebsmomenten zwischen linkem und rechtem Vorderrad. Während durch den EM positives Drehmoment auf dem linken Vorderrad auftritt, kommt es aufgrund der Trägheitsmomente im Antriebsstrang zu negativen Drehmomenten im rechten Vorderrad.

Vorteil: -besserer Wirkungsgrad

Nachteil: - ungleiches Drehmoment an den Vorderrädern

Antrieb mit EM und GEN:

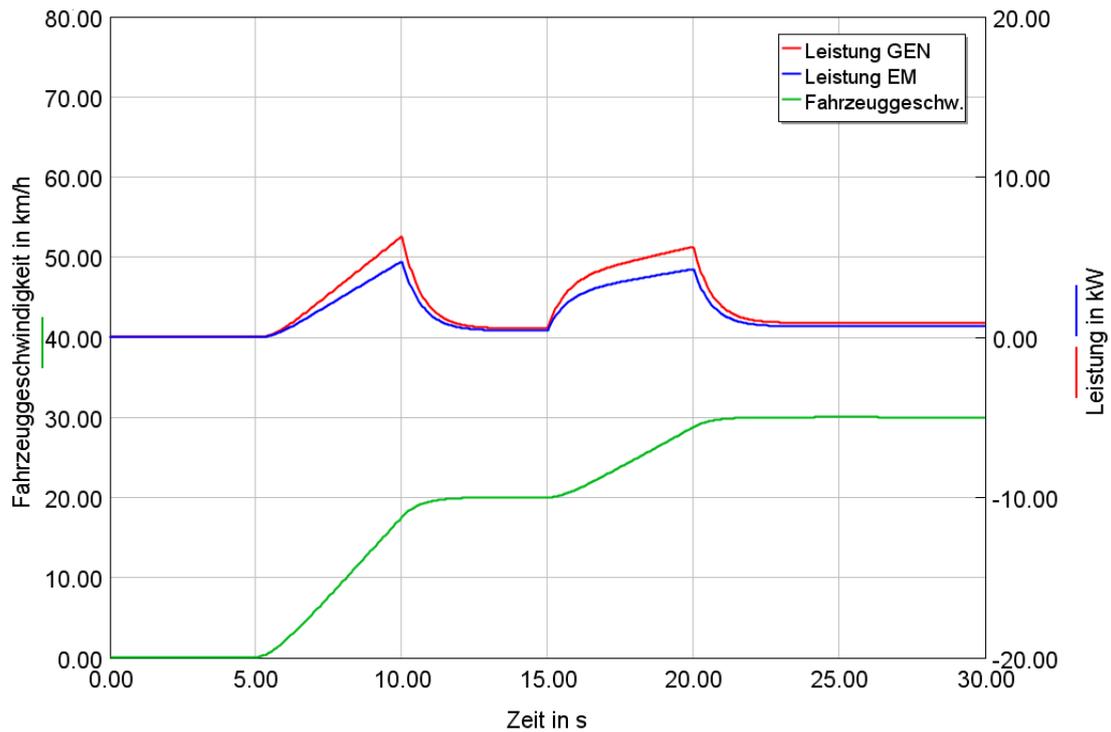


Abbildung 29: Leistung des EM und GEN bei Antrieb mit EM und GEN

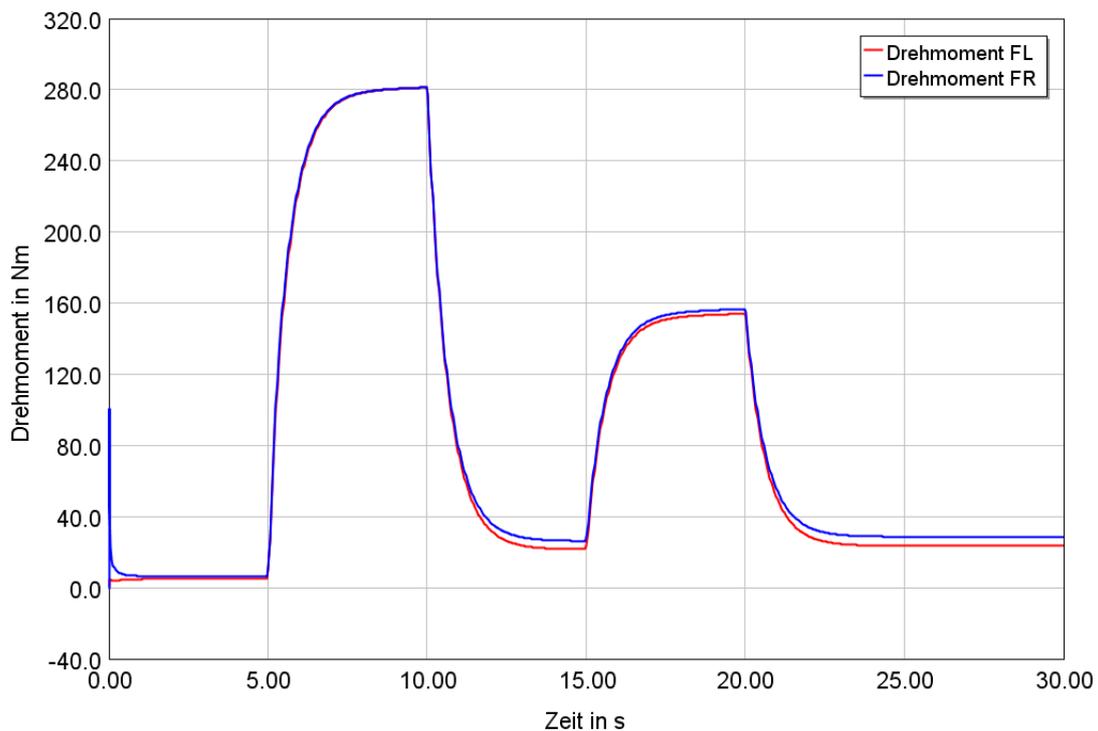


Abbildung 30: Drehmomentverlauf an den Vorderrädern bei Antrieb mit EM und GEN

Wird das Fahrzeug vom EM und vom GEN angetrieben, teilt sich die Leistung auf die beiden elektrischen Maschinen wie im entsprechenden Diagramm (Abbildung 29) ersichtlich auf. Im Gegensatz zum Antrieb nur mit dem EM ist es in diesem

Betriebsmode möglich, das Drehmoment zum Antrieb des Fahrzeuges gleichmäßig auf die beiden Vorderräder aufzuteilen (Abbildung 30). Die maximal mögliche Antriebsleistung ist durch die Verwendung von zwei E-Maschinen zwar höher, jedoch ist der Gesamtwirkungsgrad durch den Leistungsfluss durch das Planetengetriebe geringer als der Antrieb nur mit dem EM.

Vorteile: - Drehmoment gleichmäßig verteilt
 - Mehr maximale Leistung

Nachteil: - schlechterer Wirkungsgrad

3.4.2. VKM-Fahren mit EM und GEN

In diesem Betriebsmode erfolgt der Antrieb des Fahrzeuges mithilfe einer Kombination der drei Komponenten VKM, EM und GEN. Die verschiedenen Möglichkeiten des Antriebs mit diesen drei Komponenten, wie etwa die Lastpunktanhebung oder die Drehzahlab senkung, werden in diesem Kapitel beschrieben und auf die Verbrauchsvorteile eingegangen.

Anfahren mit VKM und GEN

Als Alternative zum rein elektrischen Anfahren ist es auch möglich, mit der VKM und dem GEN anzufahren und den EM nur als Unterstützung der VKM einzusetzen. Dies kann vorteilhaft sein, wenn der Ladezustand der Batterie gering ist, oder ein hoher Ladezustand der Batterie für zukünftige Fahrmanöver zur Verfügung stehen soll.

Um mit der VKM anfahren zu können, wird im Stillstand mithilfe des GEN ein Moment über das Planetengetriebe auf die VKM-Welle aufgebracht und die VKM damit gestartet. Währenddessen muss das rechte Vorderrad mechanisch gebremst werden, um ein Anfahren des Fahrzeuges während des VKM-Starts zu vermeiden. Ist die VKM gestartet, wird zum Anfahren über die Drehzahlregelung des GEN die gewünschte VKM-Drehzahl festgelegt und das entsprechende Drehmoment für den Anfahrvorgang von der VKM bereitgestellt. Während des Anfahrvorganges wird die Drehzahl des GEN so geregelt, dass sich eine konstante VKM-Drehzahl ergibt. Dabei wird mechanische Leistung vom Generator aufgenommen und in elektrische Leistung umgewandelt, um damit die Batterie bzw. den EM zu speisen. Steht für das

Fahrmanöver von der VKM zu wenig Leistung zur Verfügung, kann die fehlende Leistung vom EM erbracht werden.

In Abbildung 31 ist das Anfahren mit VKM und GEN mithilfe der Generator- und VKM-Drehzahl sowie der Fahrzeuggeschwindigkeit und anhand von drei Betriebszuständen angeführt. Diese werden in weiterer Folge näher erläutert.

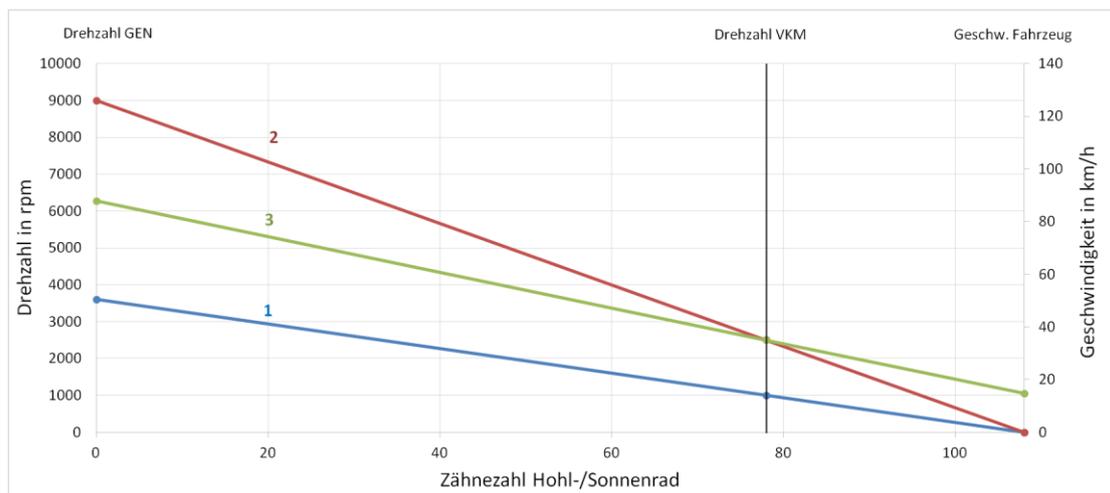


Abbildung 31: Drehzahlverhältnisse im Planetengetriebe im Betriebsmodus Anfahren mit VKM. Der Motor wird bei 1000 rpm gestartet (1) auf eine Drehzahl von 2000 rpm gebracht (2) und durch den Anfahrvorgang die Fahrzeuggeschwindigkeit erhöht (3).

Fall eins: Durch eine passende GEN-Drehzahl wird die VKM-Drehzahl auf 1000 rpm eingestellt um die VKM zu starten. Das Fahrzeug bleibt in diesem Fall im Stillstand und das rechte Vorderrad wird mechanisch gebremst.

Fall zwei: Die Drehzahl des GEN wird erhöht und somit eine VKM-Drehzahl von 2500 rpm eingestellt, um zum Anfahren ausreichend Drehmoment an der VKM zur Verfügung zu haben. Das Fahrzeug befindet sich ebenfalls noch im Stillstand und das rechte Vorderrad bleibt mechanisch gebremst.

Fall drei: Von der VKM wird das entsprechende Drehmoment bereitgestellt, um das Fahrzeug anzutreiben. Durch die Regelung der GEN-Drehzahl wird die VKM-Drehzahl konstant auf 2500 rpm gehalten. Der GEN nimmt dabei mechanische Leistung auf und wandelt diese in elektrische Leistung um.

Der Nachteil in diesem Betriebsmodus ist, dass der GEN auf eine Drehzahl von über 9000 rpm, sowie die VKM auf über 2000 rpm gebracht werden muss bevor sich das Fahrzeug in Bewegung setzen kann. Dieser Vorgang braucht Zeit und führt zu einer Verzögerung zwischen dem Anfahrwunsch und dem eigentlichen Anfahren des Fahrzeuges.

VKM-Fahren mit EM-Unterstützung, GEN im Stillstand

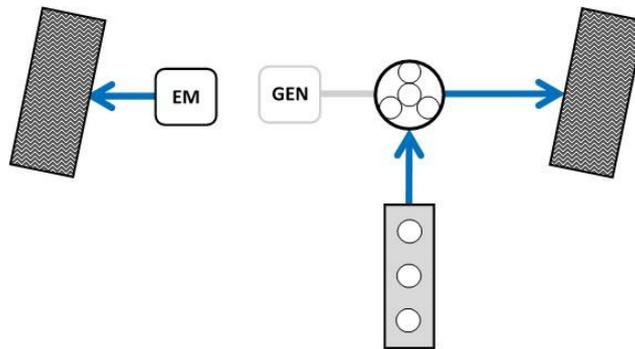


Abbildung 32: Leistungsfluss bei VKM-Fahren mit EM-Unterstützung, GEN im Stillstand

In diesem Betriebsmodus wird das Fahrzeug über die VKM angetrieben und wird bei hohen Leistungsanforderungen, die während Beschleunigungsfahrten oder Bergfahrten auftreten, durch den EM unterstützt. Der GEN bleibt dabei im Stillstand. Der Leistungsfluss im Antriebsstrang wird in Abbildung 32 dargestellt. In diesem Betriebsmodus wird keine elektrische Energie vom GEN erzeugt, und die GEN-Drehzahl bleibt bei einem Wert von 0 rpm. Es wird im Simulationsmodell davon ausgegangen, dass der GEN im Stillstand mechanisch gebremst wird und somit keine elektrischen Verluste durch das Haltemoment auftreten. Wird aufgrund der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Übersetzung im Planetengetriebe die maximale VKM-Drehzahl von 6000 rpm erreicht, so muss für höhere Geschwindigkeiten der GEN motorisch betrieben werden. In diesem Fall muss für hohe Geschwindigkeiten ausreichend elektrische Energie in der Batterie zur Verfügung stehen um den GEN speisen zu können. Um dauerhaft höhere Geschwindigkeiten fahren zu können, muss elektrische Energie über den EM erzeugt werden, um den GEN mit ausreichend Energie versorgen zu können.

Die zu diesem Betriebsmodus gehörigen Drehzahlen im Planetengetriebe werden in Abbildung 33 veranschaulicht. Es werden hierbei die Drehzahlverhältnisse, die sich im Planetengetriebe bei drei unterschiedlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten ergeben, gezeigt. Während sich im Fall eins und zwei der GEN im Stillstand befindet und keine Leistung aufnimmt oder abgibt, muss im Fall drei aufgrund der hohen Fahrzeuggeschwindigkeit der GEN motorisch betrieben werden.

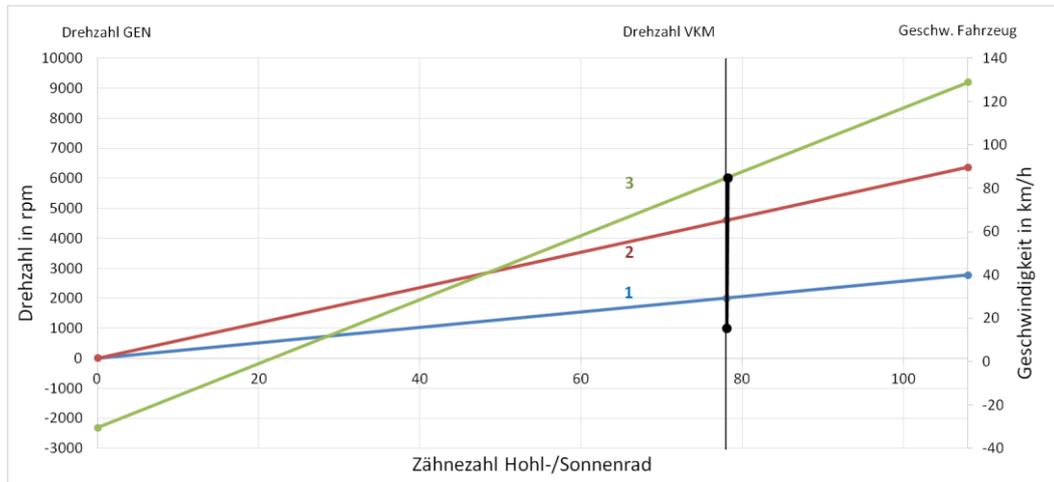


Abbildung 33: Drehzahlen im Planetengetriebe im Betriebsmodus VKM-Fahren mit EM-Unterstützung

Fall eins: Konstantfahrt mit 40 km/h, GEN ist gebremst, die GEN-Drehzahl ist 0 rpm, keine Leistung am GEN

Fall zwei: Konstantfahrt mit 90 km/h, GEN ist gebremst, GEN-Drehzahl ist 0 rpm, keine Leistung am GEN

Fall drei: Konstantfahrt mit 130 km/h, der GEN muss dabei motorisch betrieben werden, da die maximale Drehzahl der VKM von 6000 rpm erreicht wurde. Die elektrische Energie für den GEN wird dabei aus der Batterie entnommen oder durch den generatorischen Betrieb des EM bereitgestellt.

Mithilfe einer Simulation wurde die Funktion des Betriebsmodus während Konstant- und Beschleunigungsfahrten gezeigt.

In Abbildung 34 wird der Geschwindigkeitsverlauf des Fahrzeuges, sowie die Leistungen der VKM (rot), des EM (grün) und des GEN (blau) dargestellt. Man erkennt gut, dass bei Konstantfahrten ausschließlich die VKM Leistung abgibt während bei Beschleunigungen zusätzliche Leistung vom EM benötigt wird. Ab Sekunde 57 in der Simulation bzw. ab einer Fahrzeuggeschwindigkeit von etwa 115 km/h muss der GEN motorisch betrieben und gibt ebenfalls mechanische Leistung ab, um höhere Geschwindigkeiten zu erreichen. In der Simulation wird dabei der Energiebedarf des GEN über die Batterie gedeckt.

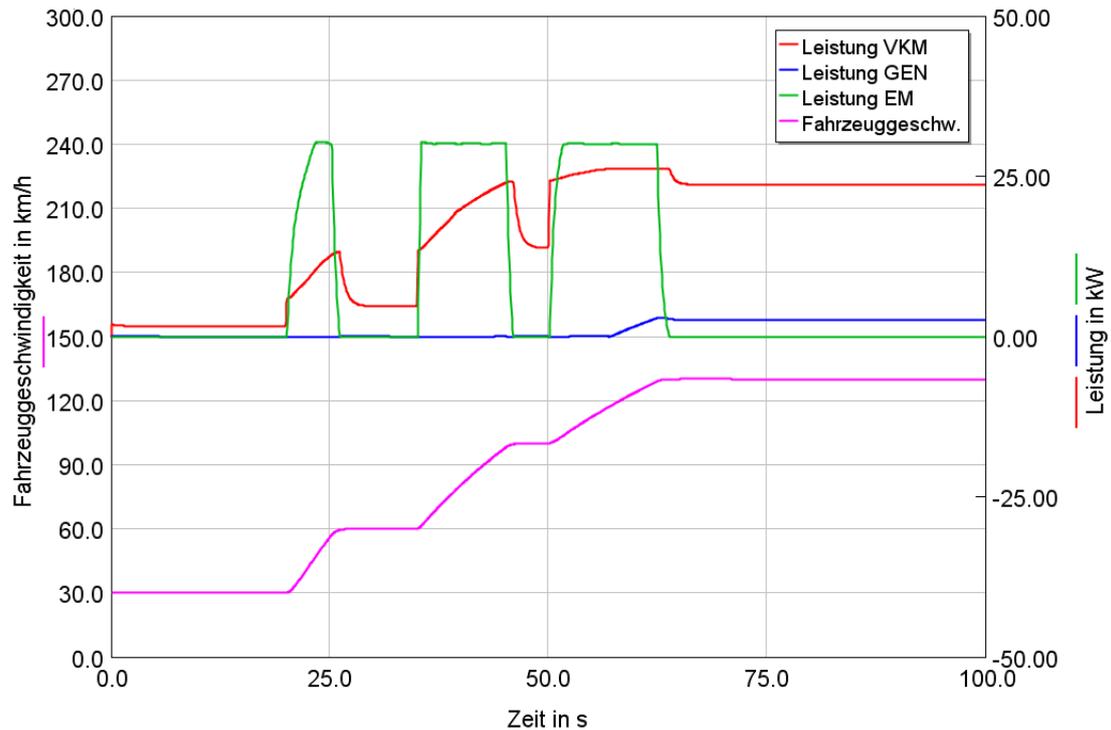


Abbildung 34: Leistung VKM, EM und GEN bei Abfahren des Geschwindigkeitsprofils

Der Ladezustand der Batterie wird dabei in [Abbildung 35](#) dargestellt. Bei konstanter Geschwindigkeit bleibt durch den reinen VKM-Betrieb der Ladezustand konstant. Bei Beschleunigungsvorgängen des Fahrzeuges wird Leistung am EM gefordert und der Ladezustand der Batterie verringert sich. Ab einer Fahrzeuggeschwindigkeit von ca. 115 km/h ist der Antrieb nur mit der VKM nicht möglich und die Batterie muss auch bei Konstantfahrten elektrische Energie für den motorischen Betrieb des GEN zur Verfügung stellen. Sind dauerhaft Geschwindigkeiten über 115 km/h gefordert, so kann der Energiebedarf des GEN nicht auf Dauer über die Batterie gedeckt werden und es ist notwendig, elektrische Energie über den EM zu erzeugen.

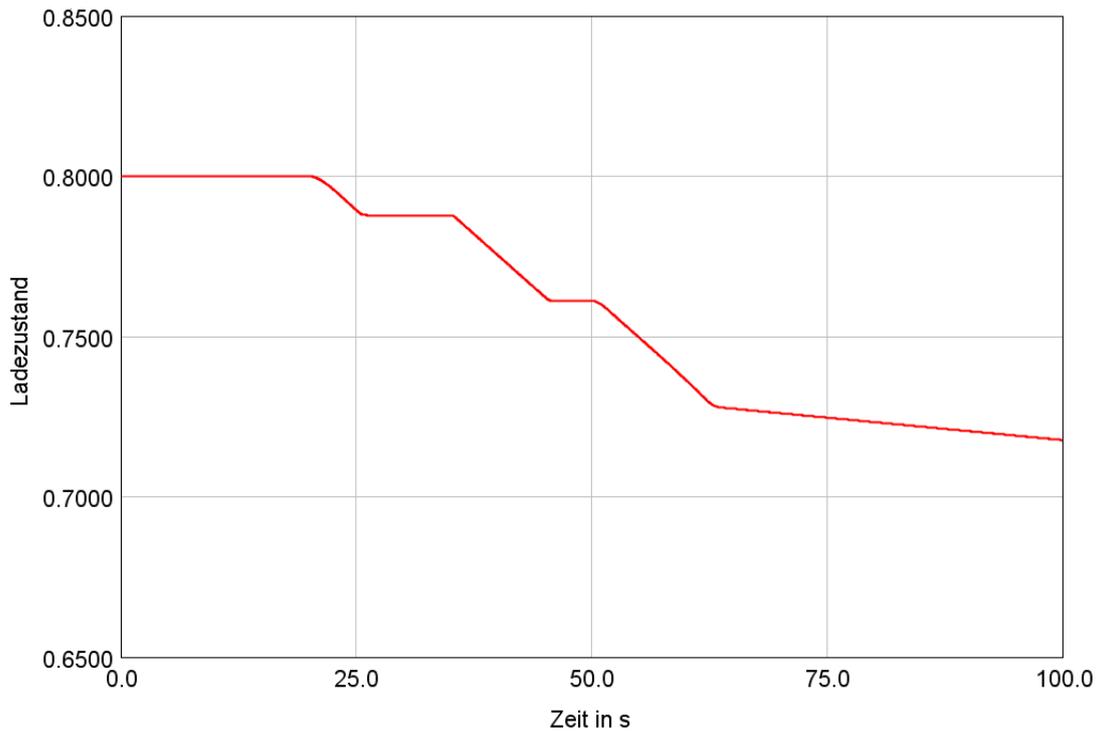


Abbildung 35: Ladezustand (SOC) der Batterie während der Simulation

Die Betriebspunkte der VKM stellen sich in der Simulation wie in [Abbildung 36](#) ersichtlich ein. Dabei erkennt man, dass durch die klein dimensionierte VKM die Betriebspunkte bei Konstantfahrten in Bereichen mit gutem Wirkungsgrad liegen und niedrige Lastpunkte vermieden werden. Jedoch ist auch ersichtlich, dass bei einer Geschwindigkeit von 90 km/h die Drehzahl der VKM mit über 5000 rpm relativ hoch ist und bei höherer Geschwindigkeit an die Drehzahlgrenze kommt, was sich negativ auf den Komfort im Fahrzeug auswirken kann.

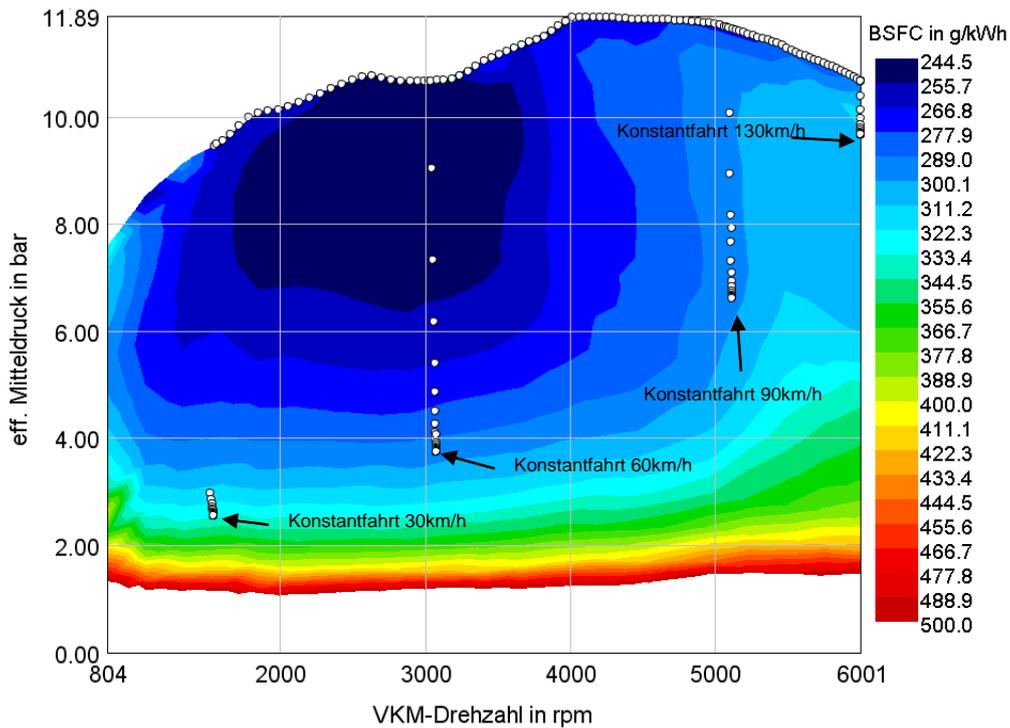


Abbildung 36: Motorkennfeld und Betriebspunkte der VKM während der Simulation

Erhöhen/Absenken der VKM-Drehzahl (Laden durch den GEN)

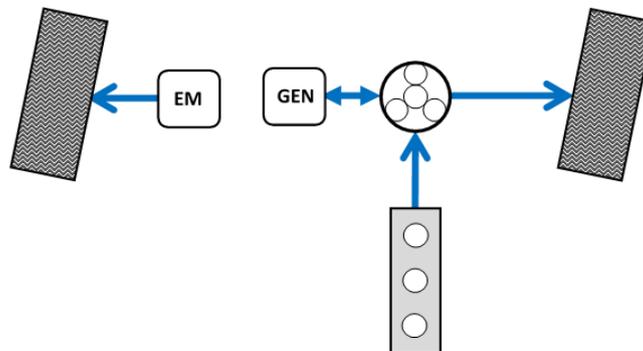


Abbildung 37: Leistungsfluss bei Erhöhen/Absenken der VKM-Drehzahl

Durch die Funktionsweise des Planetengetriebes ist es möglich, während der Fahrt die Betriebspunkte der VKM zu höheren oder zu niederen Drehzahlen zu verschieben. Es wird entweder bei der Verschiebung zu höheren VKM-Drehzahlen elektrische Leistung durch den GEN erzeugt oder der GEN muss im Fall der VKM-Drehzahlabenkung die fehlende Leistung durch motorischen Betrieb ausgleichen. Dabei wird im Planetengetriebe die Leistung der VKM auf den GEN und das Vorderrad aufgeteilt oder die Leistung der VKM und des GEN wird im

Planetengetriebe addiert und an das rechte Vorderrad abgegeben. Schematisch ist der mechanische Leistungsfluss in diesem Betriebsmodus in Abbildung 37 dargestellt.

Verschiebung zu höheren VKM-Drehzahlen (Laden durch den GEN)

Um die VKM-Drehzahl erhöhen zu können, wird bei gleichbleibender Fahrzeuggeschwindigkeit die Drehzahl des GEN erhöht und auf die gewünschte Drehzahl geregelt. Dadurch wird die Drehzahl der VKM zu höheren Werten verschoben. Diese zusätzliche mechanische Leistung, die durch die erhöhte VKM-Drehzahl erzeugt wird, wird am GEN in elektrische Leistung umgewandelt und kann zum Laden der Batterie oder zur Versorgung des EM verwendet werden.

Die Drehzahlverhältnisse im Planetengetriebe bei der Erhöhung der VKM-Drehzahl werden in Abbildung 38 dargestellt. Die Fahrzeuggeschwindigkeit in allen drei eingezeichneten Fällen beträgt konstant 70 km/h. Durch Erhöhen der GEN-Drehzahlen ergeben sich entsprechend höhere VKM-Drehzahlen in den Fällen 2 und 3 und Leistung wird von der VKM an den GEN und an das Antriebsrad abgezweigt. Es wurde eine Geschwindigkeit von 70 km/h für die Simulation gewählt, um die Drehzahlverhältnisse anschaulich darstellen zu können. Der Betriebsmodus funktioniert bei jeder beliebigen Geschwindigkeit unter 115 km/h, da ab 115 km/h die Grenzdrehzahl der VKM von 6000 rpm erreicht wird und somit keine Erhöhung der VKM-Drehzahl mehr möglich ist.

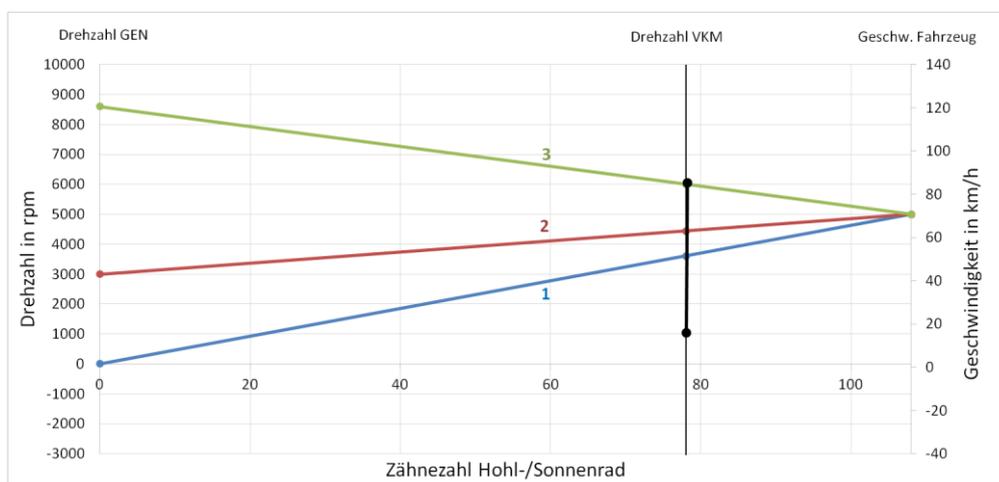


Abbildung 38: Drehzahlverhältnisse im Planetengetriebe bei Erhöhung der VKM-Drehzahl

Fall eins: Konstantfahrt mit 70 km/h, GEN-Drehzahl ist 0 rpm und erzeugt keine Leistung

Fall zwei: Konstantfahrt mit 70 km/h, Motordrehzahl wurde erhöht und GEN-Drehzahl wird auf 3000 rpm geregelt. Der GEN erzeugt elektrische Leistung.

Fall drei: Konstantfahrt mit 70 km/h, GEN erzeugt elektrische Leistung, maximale VKM-Drehzahl von 6000 rpm wurde erreicht

In Abbildung 39 wird gezeigt, wie sich die Betriebspunkte der VKM verändern, wenn die Drehzahl des GEN erhöht wird. Die Betriebspunkte der Fälle eins und drei aus Abbildung 38 sind zur Veranschaulichung ebenfalls eingezeichnet. Im Fall eins befindet sich der Generator im Stillstand und die gesamte VKM-Leistung wird an das rechte Vorderrad abgegeben. In Fall drei wird die VKM an ihrer Grenzdrehzahl von 6000 rpm betrieben und die überschüssige Leistung an den GEN abgegeben. Da die Momentenaufteilung im Planetengetriebe vom Zahnverhältnis abhängt und immer konstant ist, können die Betriebspunkte der VKM durch den GEN nur horizontal zu höheren oder niederen Drehzahlen verschoben werden wenn das Fahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit fährt. Das Verschieben der Betriebspunkte zu höheren Lasten bei konstanten Geschwindigkeiten funktioniert nur in Kombination mit dem EM und wird nachfolgend im Kapitel Lastpunktanhebung beschrieben. Würde man das Moment der VKM unabhängig vom EM anheben, so führt das unweigerlich zu einer Beschleunigung des Fahrzeuges.

In diesem Betriebsmodus ist es somit nur möglich, die VKM-Drehzahl zu erhöhen bzw. abzusenken und die zusätzliche bzw. fehlende Leistung (P_{GEN} in Abbildung 39) über den GEN auszugleichen. Eine Lastpunktanhebung nur mithilfe des GEN und des Planetengetriebes ist dabei nicht möglich.

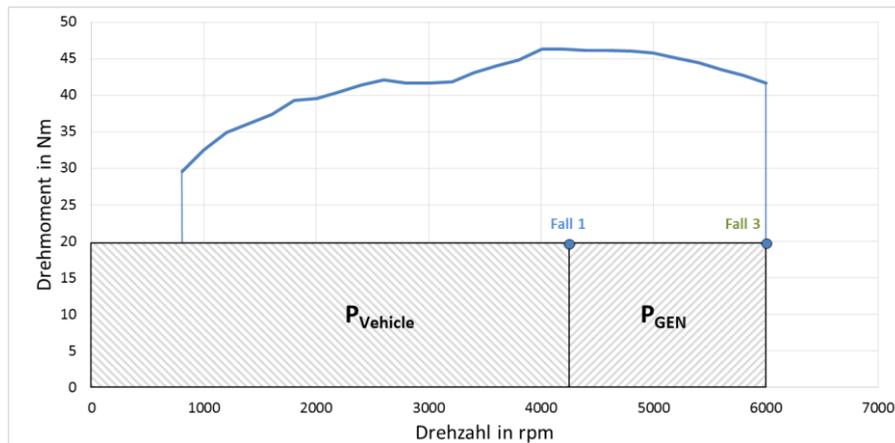


Abbildung 39: Drehmoment der VKM und Aufteilung der Leistung während dem Laden durch den GEN

Um das Erhöhen der VKM-Drehzahl und das Aufladen durch den GEN zu veranschaulichen, wurde das Fahrzeug in einer Simulation mit einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit von 70 km/h in der Ebene bewegt (Fall eins). Nach etwa 100 Sekunden wurde die VKM-Drehzahl auf 6000 rpm erhöht und die überschüssige Leistung am GEN zum Aufladen der Batterie verwendet (Fall drei). Die Fahrzeuggeschwindigkeit bleibt dabei ebenfalls konstant auf 70 km/h.

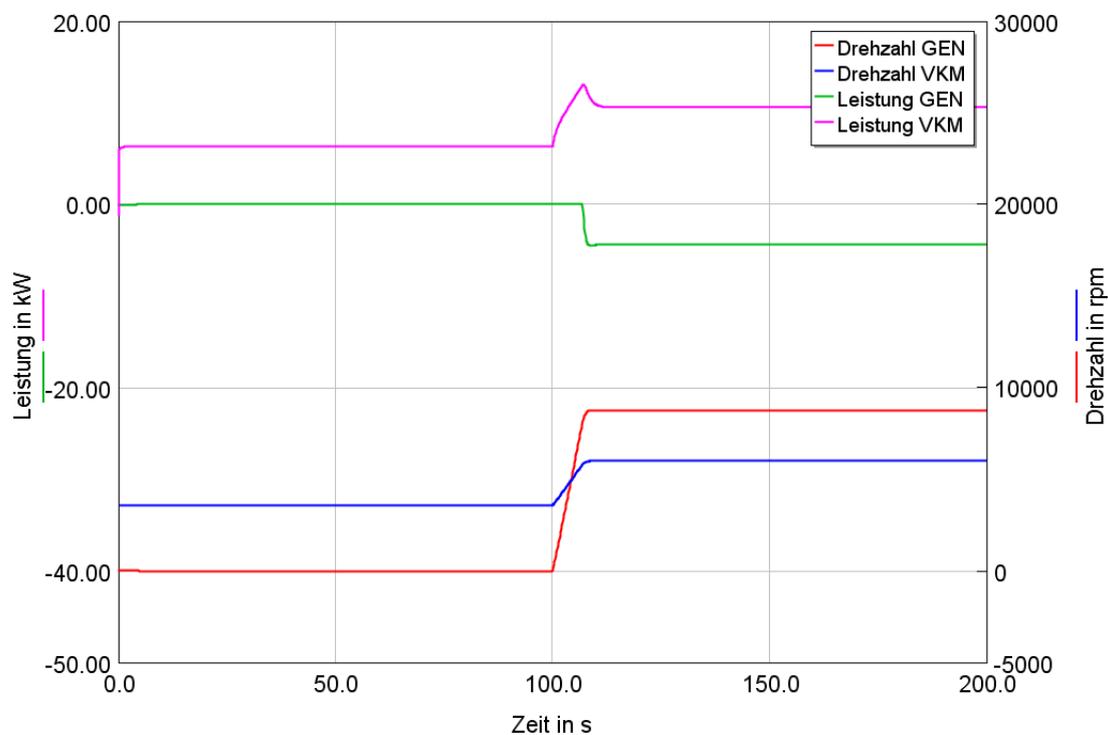


Abbildung 40: Drehzahlen und Leistungen der VKM und des GEN bei Erhöhung der VKM-Drehzahl

Wie in Abbildung 40 ersichtlich, wurde die VKM-Leistung (pink) von 6,3 kW auf 10,6 kW erhöht. Die zusätzliche Leistung von 4,3 kW wurde über das Planetengetriebe dem GEN zur Umwandlung zugeführt und damit der Ladezustand der Batterie erhöht (Abbildung 41).

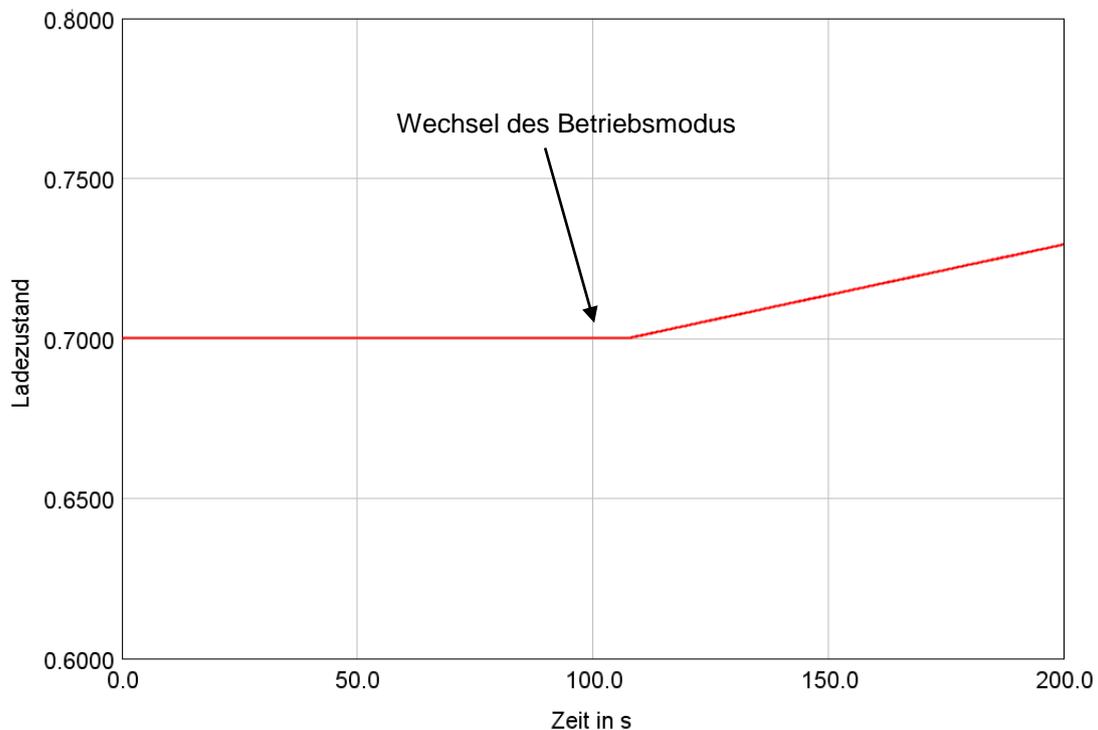


Abbildung 41: Batterieladezustand während der Erhöhung der VKM-Drehzahl

Der Betriebspunkt der VKM in Abbildung 42 verschiebt sich, wie erwartet horizontal zu höheren Drehzahlen. An den spezifischen Verbräuchen im Motorkennfeld ist zu erkennen, dass das horizontale Verschieben der Betriebspunkte zu höheren VKM-Drehzahlen in den meisten Fällen in einem gleichbleibenden, eher schlechteren spezifischen Verbrauch resultiert. Das Erhöhen der VKM-Drehzahl und Laden durch den GEN ist lediglich sinnvoll, wenn während der Fahrt elektrische Energie benötigt wird und der Ladezustand der Batterie dabei nicht ausreicht.

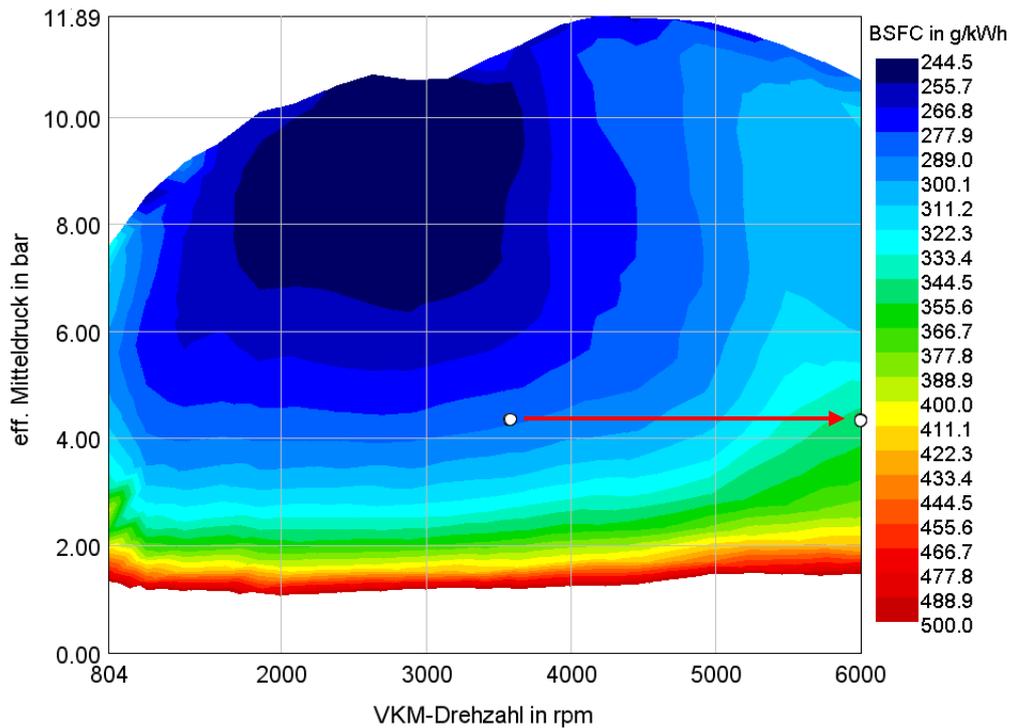


Abbildung 42: Motorkennfeld und Verschiebung des Betriebspunktes bei Erhöhung der VKM-Drehzahl

Die nachfolgende Tabelle 3 zeigt die maximalen Leistungen, die dem GEN bei den entsprechenden konstanten Geschwindigkeiten zur Umwandlung zur Verfügung stehen können. Die maximale mechanische Leistung am GEN ist bei niedrigen Geschwindigkeiten durch die maximale GEN-Drehzahl von 10.000 rpm, sowie bei höheren Geschwindigkeiten durch die maximale VKM-Drehzahl von 6000 rpm eingeschränkt.

Tabelle 3: Maximale Ladeleistungen am GEN bei verschiedenen konstanten Fahrgeschwindigkeiten

konst. Fahrgeschwindigkeit	30 km/h	50 km/h	70 km/h	90 km/h
Drehzahl VKM	4330 rpm	5305 rpm	6000 rpm	6000 rpm
Drehzahl GEN	10000 rpm	10000 rpm	8760 rpm	5070 rpm
Drehmoment VKM	10 Nm	12,8 Nm	16,9 Nm	22,5 Nm
Drehmoment GEN	2,8 Nm	3,5 Nm	4,7 Nm	6,3 Nm
max. Leistung GEN	2,95 kW	3,7 kW	4,3 kW	3,3 kW

Unter den untersuchten Geschwindigkeiten kann bei 70 km/h mit 4,3 kW die größte Leistung vom GEN aufgenommen werden. Dies ist damit zu erklären, dass bei dieser

Geschwindigkeit ein relativ hohes Drehmoment am GEN anliegt und auch aufgrund der Übersetzungsverhältnisse im Planetengetriebe noch hohe GEN-Drehzahlen möglich sind.

Das Erhöhen der VKM-Drehzahl ermöglicht es, während der Fahrt elektrische Energie über den GEN zu erzeugen und zum Aufladen der Batterie zu verwenden. Jedoch bringt dieser Modus keinen Verbrauchsvorteil und führt oft zu einem höheren spezifischen Verbrauch. Wirkungsgradgünstiger ist dabei das Aufladen der Batterie im Stillstand, wie es in Kapitel 3.4.3 beschrieben wird, hat jedoch die Einschränkung, dass dabei das Fahrzeug stehen muss und den Nachteil, dass das Fahrzeug im Stillstand nicht emissionsfrei betrieben wird.

Absenken der VKM-Drehzahl

Aufgrund der möglichen Verbrauchsvorteile kann es in manchen Betriebspunkten der VKM sinnvoll sein, die VKM-Drehzahl zu niedrigeren Werten zu verschieben. Durch die VKM-Drehzahlablenkung wird weniger Antriebsleistung durch die VKM erzeugt und es ist somit notwendig, die fehlende Antriebsleistung durch den motorischen Betrieb des GEN auszugleichen. In Abbildung 43 ist ein Betriebspunkt der VKM der sich durch die Drehzahlablenkung ergibt eingezeichnet. Zusätzlich wird gezeigt, wie sich die Leistungen der VKM (P_{VKM}) und des GEN (P_{GEN}) aufteilen, um die geforderte Antriebsleistung ($P_{gef.}$) zu erbringen. Durch eine Drehzahlablenkung in Kombination mit einer Lastpunktanhebung ist es möglich, die Betriebspunkte der VKM in Bereiche mit besserem spezifischen Verbrauch zu verschieben. Die Lastpunktanhebung und die Kombination mit der Drehzahlablenkung werden nachfolgend ausführlich beschrieben und die möglichen Verbrauchsvorteile untersucht.

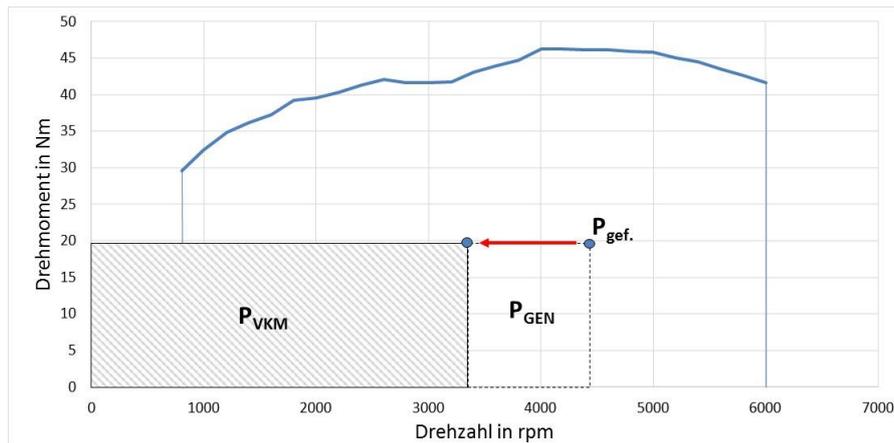


Abbildung 43: Drehmoment der VKM und Aufteilung der Leistung bei Absenkung der VKM-Drehzahl

Lastpunktanhebung durch den EM

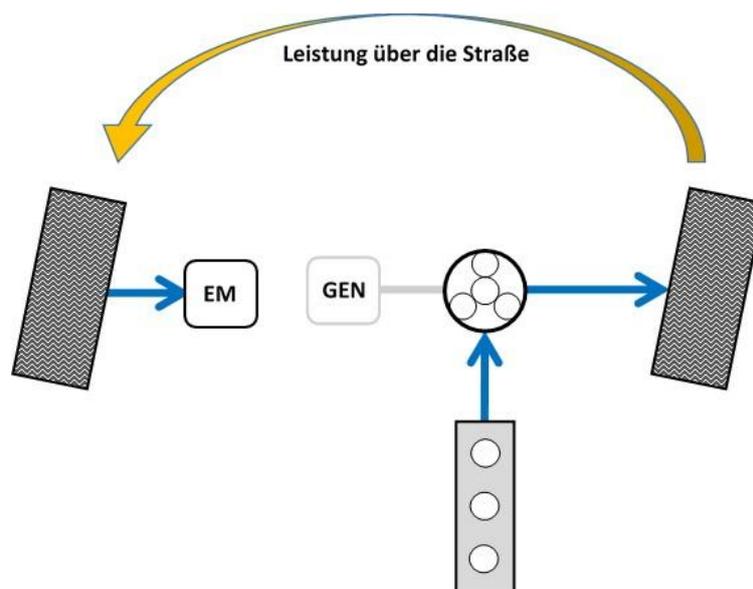


Abbildung 44: Leistungsfluss bei Lastpunktanhebung mit EM

Mit diesem Hybrid-Konzept ist es auch möglich, eine Lastpunktanhebung der VKM zu realisieren, um Bereiche mit schlechtem Wirkungsgrad zu vermeiden. Wie in [Abbildung 44](#) dargestellt, wird dabei Leistung von der VKM über das Planetengetriebe und das rechte Vorderrad auf die Straße gebracht und über das linke Vorderrad wird dem EM mechanische Leistung zugeführt. Das bedeutet, dass das überschüssige Drehmoment am rechten Vorderrad, das von der VKM erzeugt wird, über ein Bremsmoment am linken Vorderrad ausgeglichen wird. Dadurch wird das geforderte Drehmoment der VKM erhöht. Die Betriebspunkte der VKM werden

dabei vertikal von niedrigen zu hohen Lastbereichen verschoben, wodurch, außer bei sehr geringen Drehzahlen, ein effizienterer VKM Betrieb möglich ist. Die zusätzlich von der VKM erzeugte Leistung wird über den EM in elektrische Leistung umgewandelt und damit die Batterie aufgeladen (P_{EM} in [Abbildung 45](#)).

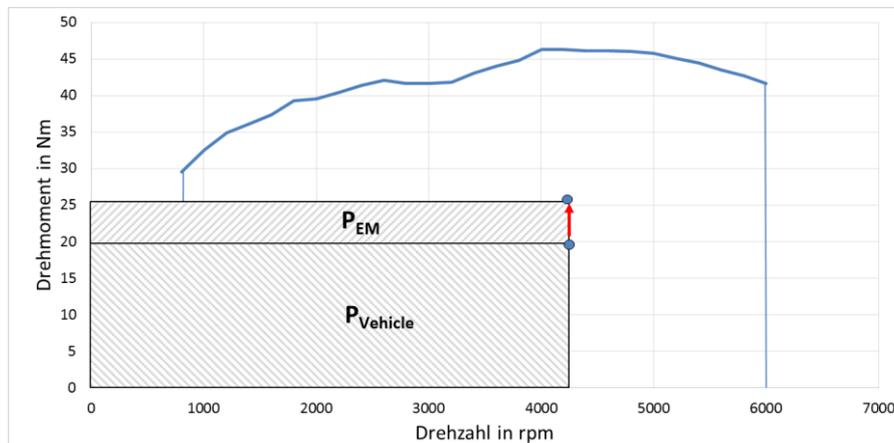


Abbildung 45: Drehmoment der VKM und resultierende Leistungen bei Lastpunktanhebung

In einer Simulation wurde untersucht, welche Verbrauchsvorteile durch die Lastpunktanhebung möglich sind und wie sich der Betriebsmodus auf die Momentenverteilung der Vorderräder auswirkt. Dabei wurde bei einer Konstantfahrt von 50 km/h eine Lastpunktanhebung simuliert und die Ergebnisse ausgewertet. Die Geschwindigkeit von 50 km/h wurde gewählt, da dies eine typische Geschwindigkeit in einer Stadtfahrt darstellt. In [Abbildung 46](#) ist der spezifische Verbrauch der VKM dargestellt und die Betriebspunkte mit und ohne Lastpunktanhebung eingezeichnet.

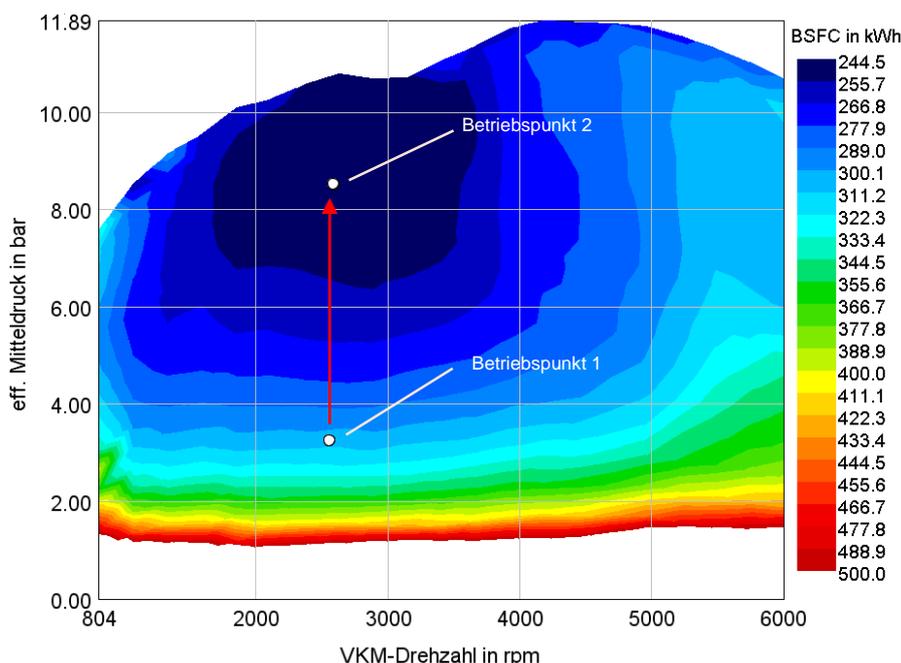


Abbildung 46: Motorkennfeld und Verschiebung des Betriebspunktes bei Lastpunktanhebung

Betriebspunkt eins: Dieser Betriebspunkt entspricht der VKM-Leistung ohne Lastpunktanhebung bei einer Konstantfahrt mit 50 km/h. Der effektive spezifische Kraftstoffverbrauch beträgt 311 g/kWh

Betriebspunkt zwei: Dieser Punkt wurde durch eine Lastpunktanhebung bei Konstantfahrt mit 50 km/h erreicht. Mit der zusätzlichen Leistung an der VKM von 4,8 kW wird mithilfe des EM die Batterie aufgeladen. Der effektive spezifische Verbrauch ist durch die Lastpunktanhebung auf 248 g/kWh verbessert worden.

Durch die Verschiebung des Betriebspunktes konnte der Wirkungsgrad der VKM um etwa 20% gesteigert werden.

Geht man davon aus, dass der Wirkungsgrad des elektrischen Zweiges (EM → Batterie ein → Batterie aus → EM) bei maximal 64% liegt (siehe Kapitel 3.3.2), beschränken sich die möglichen Verbrauchsvorteile auf die farbigen Bereiche wie in Abbildung 47 dargestellt. Die eingezeichnete farbige Linie stellt dabei den Fahrwiderstand bei einer Steigung von 0% dar. Man erkennt, dass durch die klein dimensionierte VKM die Lastpunkte ohne Lastpunktanhebung im Vergleich zu einer leistungsstärkeren VKM bereits hoch liegen und damit in Bereichen mit gutem spezifischem Verbrauch liegen. Betriebspunkte mit extrem schlechten spezifischen Verbräuchen, wie sie bei einer größer dimensionierten VKM auftreten würden, werden durch die leistungsschwache VKM, die im Sapienter-Konzept verwendet wird, vermieden. Das bedeutet, dass über ca. 50 km/h eine Lastpunktanhebung vom

Verbrauch her nur sinnvoll ist, wenn die elektrische Energie unbedingt benötigt wird. Intermittierendes Fahren, das bedeutet abwechselnd elektrisch Fahren mit anschließendem VKM-Betrieb und Aufladen der Batterie über eine Lastpunktanhebung, ist in diesem Konzept nicht sinnvoll und würde zu einem schlechteren Gesamtverbrauch führen.

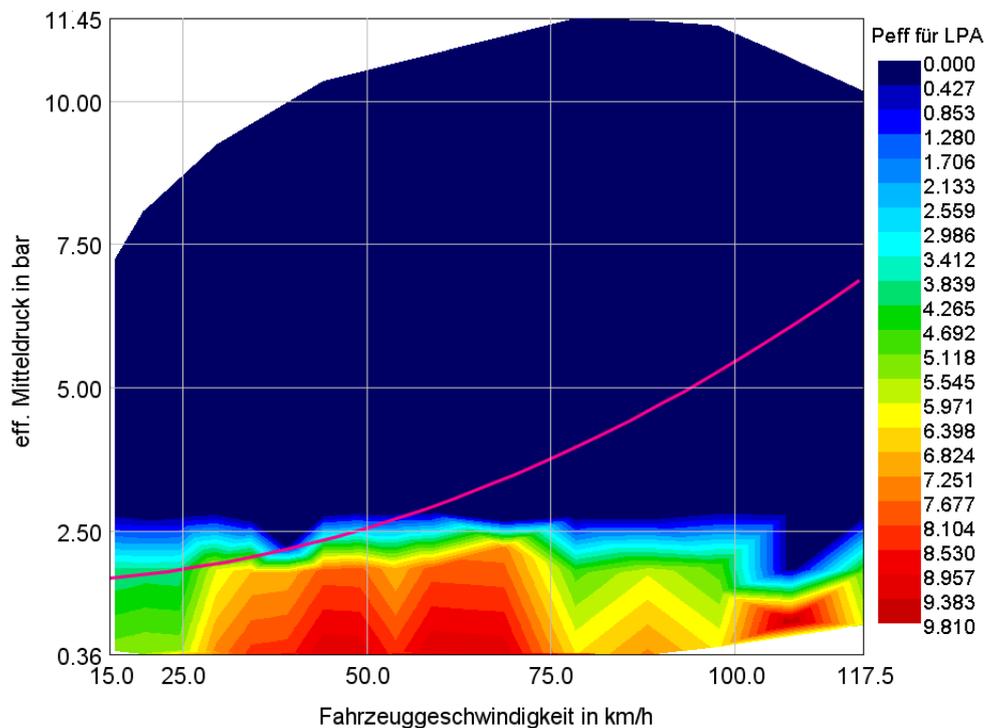


Abbildung 47: Darstellung der VKM-Betriebsbereiche mit Potential zu Verbrauchsvorteilen durch Lastpunktanhebung

Betrachtet man in diesem Betriebsmodus die Momentenverteilung auf die beiden Antriebsräder, so zeigt sich ein negativer Aspekt der bei der Lastpunktanhebung auftritt. Durch das erhöhte Antriebsmoment am rechten Vorderrad und das Bremsmoment durch den EM am linken Vorderrad kommt es unweigerlich zu einer extrem ungleichen Drehmomentverteilung zwischen den Antriebsrädern. Da der EM am linken Vorderrad Energie aufnehmen muss, tritt dort ein negatives Drehmoment auf, im Gegensatz zum rechten Vorderrad, an dem die VKM das Drehmoment durch die Lastpunktanhebung erhöht.

In [Abbildung 48](#) werden die Drehmomentverläufe des rechten (rot) und des linken (blau) Antriebsrades während der Simulation gezeigt. Ab Sekunde 30 wurde die Lastpunktanhebung aktiviert und man erkennt den stark vergrößerten Drehmomentunterschied von über 280 Nm zwischen den beiden Antriebsrädern:

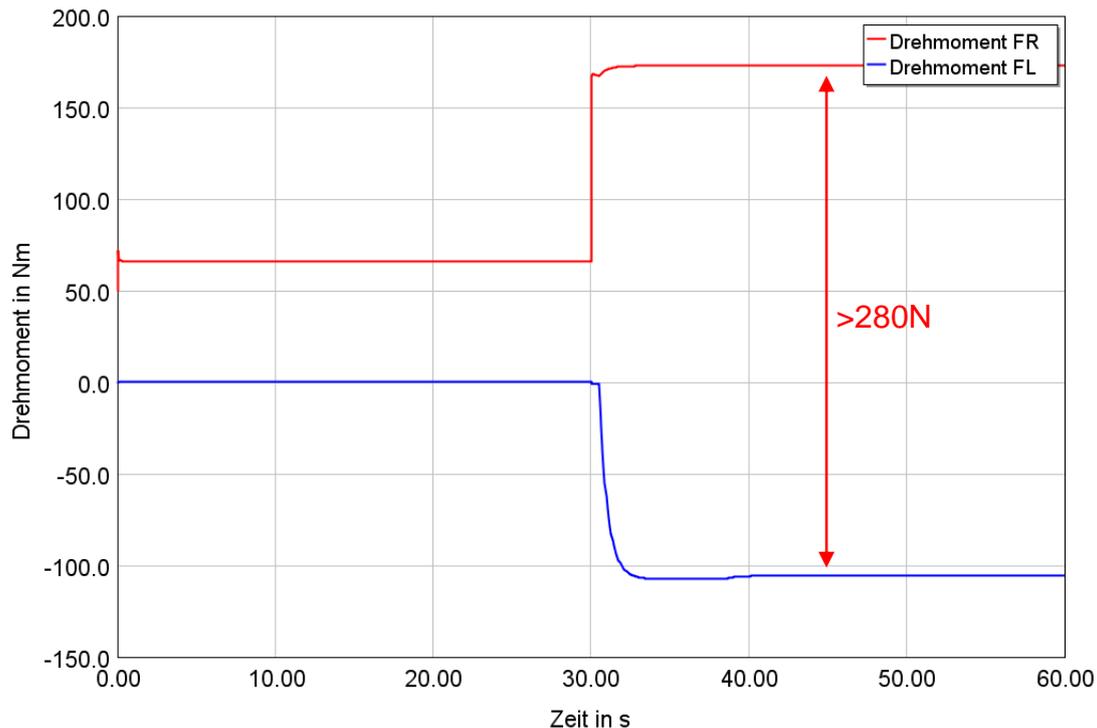


Abbildung 48: Drehmomente an den Antriebsrädern mit und ohne Lastpunktanhebung

Wie in den vorigen Absätzen beschrieben, ist in diesem Konzept eine Lastpunktanhebung nur möglich, wenn man den extremen Momentenunterschied zwischen den Antriebsrädern zulässt und Wege findet diesen fahrdynamisch auszugleichen. Lässt man eine Lastpunktanhebung zu, so bringt dies nicht direkt Verbrauchsvorteile sondern macht nur Sinn, um damit die Batterie wenn nötig aufzuladen.

Kombination Lastpunktanhebung und VKM-Drehzahlverschiebung

Kombiniert man die Lastpunktanhebung durch den EM und die Drehzahlverschiebung durch den GEN, so können die VKM-Betriebspunkte sowohl zu höheren Lasten, sowie horizontal zu höheren oder niedrigeren Drehzahlen verschoben werden. Dadurch ist es möglich, während dem Betrieb des Sapienter-Konzeptes die Lastpunkte der VKM in Bereiche mit besserem spezifischem Verbrauch zu verschieben.

In nachfolgender Simulation wurde ermittelt, ob durch die Verschiebung der VKM-Betriebspunkte ein Verbrauchsvorteil generiert werden kann. Dabei wurde das Fahrzeug konstant mit 60 km/h bewegt und die VKM an vier verschiedenen Betriebspunkten betrieben. Schematisch wird dabei der Leistungsfluss in Abbildung 49 gezeigt.

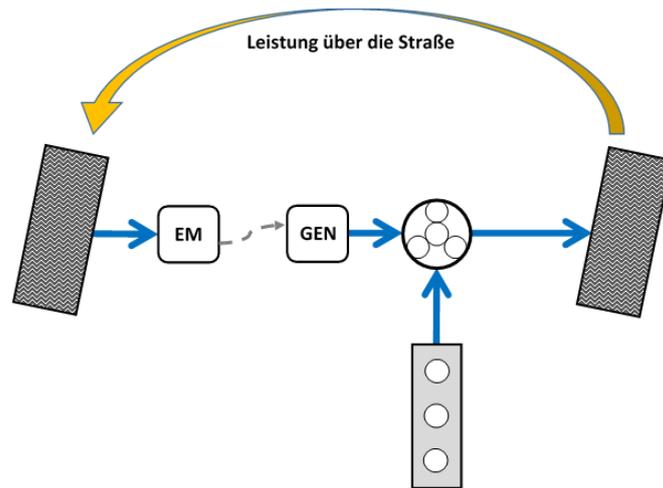


Abbildung 49: Leistungsfluss bei Kombination der Lastpunktanhebung mit einer VKM-Drehzahlab senkung

Durch den motorischen Betrieb des GEN wird die VKM-Drehzahl zu niederen Werten abgesenkt und die fehlende Antriebsleistung wird durch den GEN ausgeglichen. Der EM wird generatorisch betrieben und nimmt somit Leistung über die Straße auf und führt zu einer Lastpunktanhebung an der VKM. Die vier simulierten Betriebspunkte an der VKM wurden so gewählt, dass am EM genau so viel elektrische Leistung erzeugt wird, wie der GEN für den motorischen Betrieb benötigt. Dadurch muss keine Energie aus der Batterie entnommen bzw. in die Batterie gespeist werden und es ergibt sich ein konstanter Batterieladezustand. In [Abbildung 50](#) ist das Kennfeld der VKM mit den vier simulierten Betriebspunkten dargestellt und man erkennt, dass die Betriebspunkte in Bereiche mit besserem spezifischem Verbrauch verschoben wurden. In allen vier VKM-Betriebspunkten beträgt die Fahrzeuggeschwindigkeit 60 km/h und der Batterieladezustand bleibt konstant.

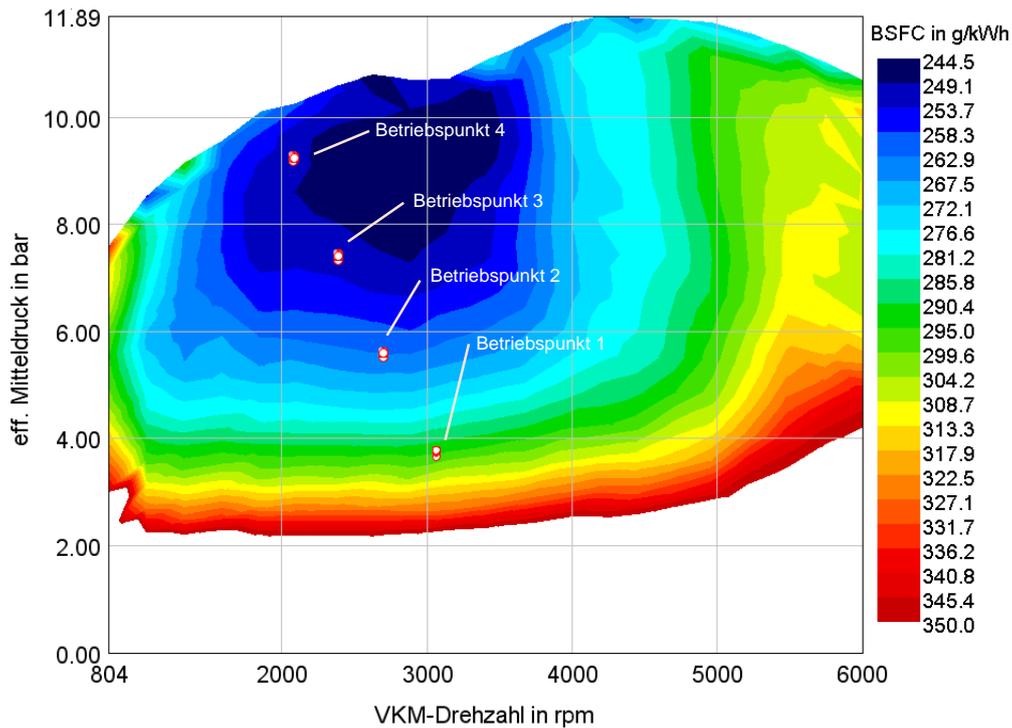


Abbildung 50: VKM-Kennfeld mit vier simulierten Betriebspunkten bei einer konstanten Geschwindigkeit von 60 km/h

In nachfolgender Tabelle 4 sind die zu den simulierten Betriebspunkten gehörigen Wirkungsgrade und Verlustleistungen der VKM und des GEN eingetragen. Zusätzlich sind noch die spezifischen Verbräuche sowie die Verbräuche in L/100km für jeden Betriebspunkt eingetragen.

Tabelle 4: Verbräuche, Wirkungsgrade und Verlustleistungen bei verschiedenen Betriebspunkten.

Betriebspunkt	1	2	3	4
Fahrzeuggeschw.	60 km/h	60 km/h	60 km/h	60 km/h
spez. Verbrauch	300 g/kWh	266 g/kWh	254 g/kWh	252 g/kWh
η_{EM}	50%	55%	60%	66%
$P_{V,EM}$	0 kW	0,9 kW	1,57 kW	2,04 kW
η_{GEN}	50%	75%	83%	92%
$P_{V,GEN}$	0 kW	0,27 kW	0,39 kW	0,32 kW
ΔSOC	0%	0%	0%	0%
Verbrauch	3,1 L/100km	3,6 L/100km	4,1 L/100km	4,4 L/100km

η_{EM} ... Wirkungsgrad EM, $P_{V,EM}$... Verlustleistung EM, η_{GEN} ... Wirkungsgrad GEN, $P_{V,GEN}$... Verlustleistung GEN, ΔSOC ... Änderung des Batterieladezustands

Wie man an den spezifischen Verbräuchen erkennen kann, können die Betriebspunkte der VKM in wirkungsgradgünstigere Bereiche verschoben werden.

Jedoch wird der EM durch die verhältnismäßig geringe Last während der Lastpunktanhebung in Bereichen mit sehr schlechtem Wirkungsgrad betrieben, wie in Abbildung 51 hervorgehoben. Dies führt unweigerlich dazu, dass die Verlustleistung am EM sehr hohe Werte annimmt und trotz des verbesserten spezifischen Verbrauches der Gesamtverbrauch stark zunimmt. Durch die leistungsschwache VKM wird in der Simulation bei 60 km/h ohne Lastpunktanhebung bereits ein relativ guter spezifischer Verbrauch von 300 g/kWh erreicht. Diese Simulation hat gezeigt, dass aufgrund des schlechten Wirkungsgrades des EM bei niedrigen Lasten und wegen dem relativ guten spezifischen Verbrauch, der sich bereits ohne Lastpunktanhebung einstellt, die Verschiebung der VKM-Betriebspunkte keine Verbrauchsvorteile bringt und in einem schlechteren Gesamtverbrauch resultiert.

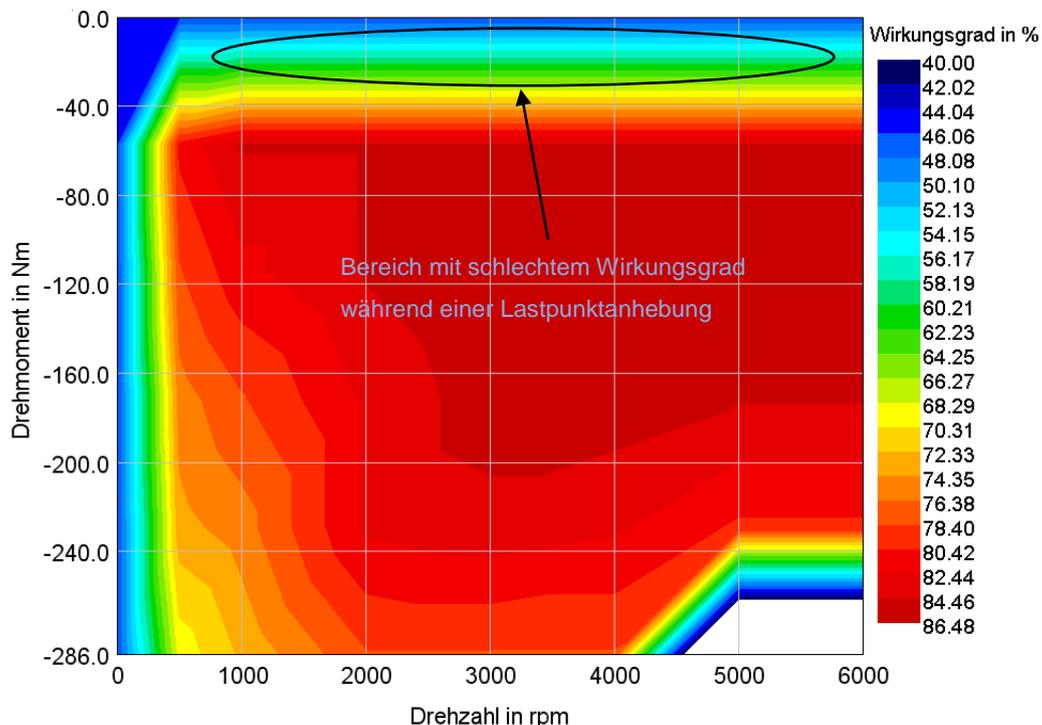


Abbildung 51: Wirkungsgradbereiche des EM während einer LPA

Aufgrund des schlechteren Gesamtverbrauches durch die Verschiebung der VKM-Betriebspunkte, ist es bei der Wahl der Betriebsstrategie aus Sicht des Kraftstoffverbrauches am idealsten, die Antriebsleistung wenn möglich durch die VKM alleine zu erbringen. Lastpunktanhebung und die Verschiebung der VKM-Drehzahl sollten dabei nur angewendet werden, um elektrische Leistung während der Fahrt zu erzeugen, um damit den Batterieladezustand zu erhöhen.

3.4.3. Aufladen im Stillstand

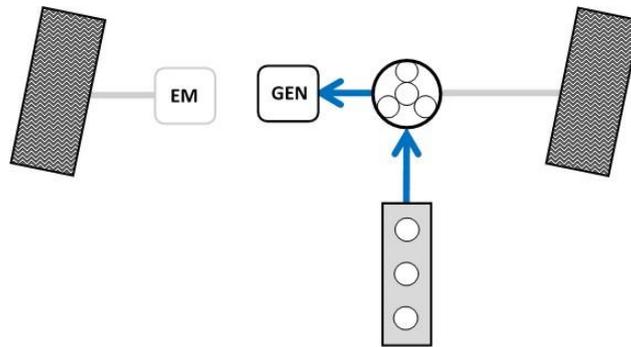


Abbildung 52: Leistungsfluss bei Laden im Stillstand

Außer der Möglichkeit die Batterie über den GEN während der Fahrt aufzuladen oder die Batterie über eine Lastpunktanhebung über den EM zu laden, kann auch im Stillstand des Fahrzeuges elektrische Energie erzeugt werden. Dabei wird von der VKM mechanische Leistung erzeugt und die gesamte Leistung über das Planetengetriebe zum GEN geführt, welche dieser dann in elektrische Leistung umwandelt und damit die Batterie auflädt (siehe [Abbildung 52](#)).

Die Drehzahlen im Planetengetriebe während dem Aufladen im Stillstand sind in [Abbildung 53](#) dargestellt. Während die Fahrzeuggeschwindigkeit 0 km/h ist, wird über die Drehzahl der VKM die Drehzahl des GEN festgelegt. In Fall eins wird die VKM an ihrem unteren Drehzahl-Limit von 1000 rpm betrieben. In Fall zwei ist die maximale Drehzahl des GEN von 10.000 rpm erreicht und die VKM läuft mit einer Drehzahl von 2800 rpm. Über eine Drehzahlregelung kann innerhalb dieser beiden Drehzahlgrenzen die VKM-Drehzahl beliebig eingestellt werden. Während des gesamten Betriebsmodus Aufladen im Stillstand muss das rechte Vorderrad mechanisch gebremst werden, da sich ansonsten das Fahrzeug während dem Aufladen in Bewegung setzen würde.

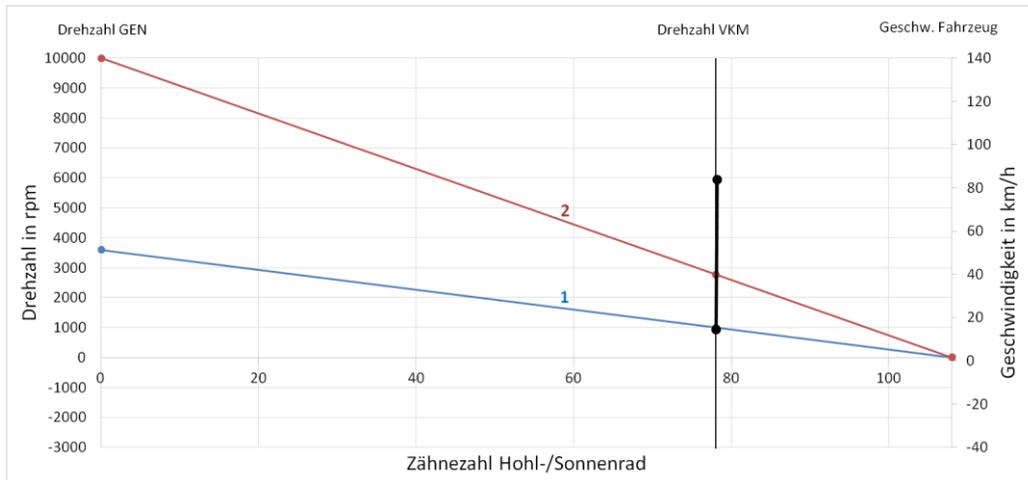


Abbildung 53: Drehzahlverhältnisse im Planetengetriebe im Betriebsmodus Laden im Stillstand

Fall eins: Drehzahl VKM = 1000 rpm, Drehzahl GEN = 3600 rpm

Fall zwei: Drehzahl VKM = 2800 rpm, Drehzahl GEN = 10000 rpm (Maximum)

Neben der gewünschten Drehzahl kann ebenfalls das gewünschte Drehmoment an der VKM bzw. am GEN variiert werden und somit können die Betriebspunkte der VKM innerhalb der Drehzahlgrenzen frei gewählt werden.

In einer Simulation wurden ein Betriebspunkt mit optimalem spezifischem Verbrauch und ein Betriebspunkt mit der maximal möglichen Ladeleistung gewählt. Die beiden Betriebspunkte sind in dem Motorkennfeld in [Abbildung 54](#) eingezeichnet. Während der Betriebspunkt 2a im Optimum des Motorkennfeldes eine Leistung von 10 kW am GEN bringt, stehen im Betriebspunkt 2b mit der gewählten VKM eine maximale Leistung von 12 kW am GEN für den Ladevorgang zur Verfügung.

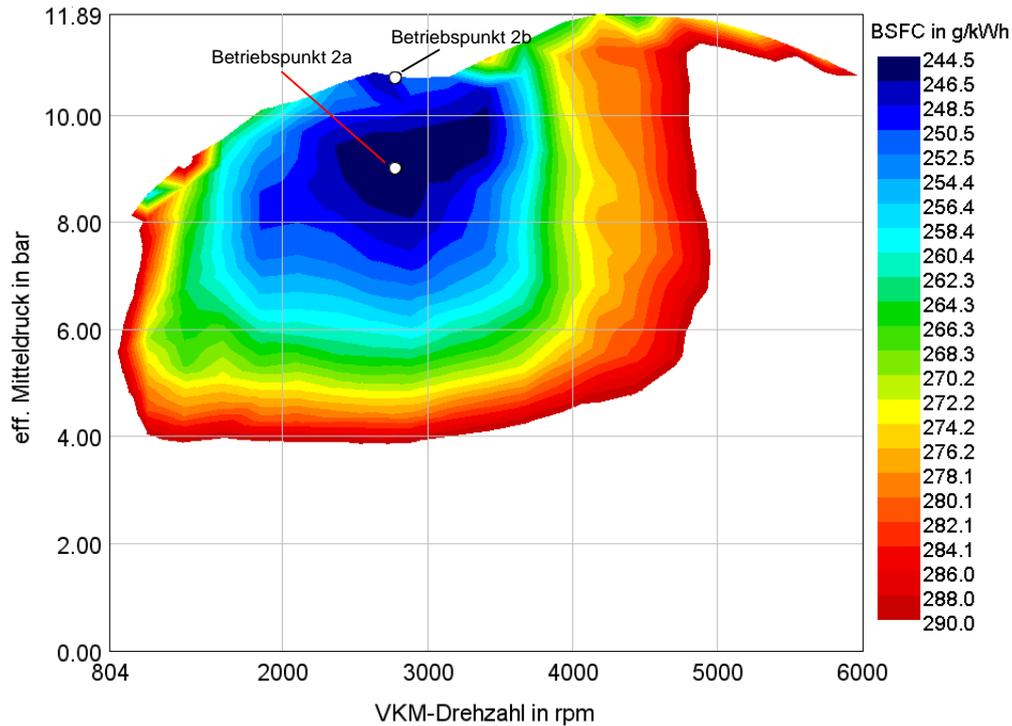


Abbildung 54: Motorkennfeld der VKM und Betriebspunkte während dem Laden im Stillstand

Die Drehzahlen, Verbräuche und Leistungen sind zusammengefasst in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Drehzahlen, spezifische Verbräuche und Leistungen in den beiden Betriebspunkten

	Betriebspunkt 2a	Betriebspunkt 2b
Drehzahl VKM	2800 rpm	2800 rpm
Drehzahl GEN	10000 rpm	10000 rpm
spez. Kraftstoffverbrauch	244 g/kWh	250 g/kWh
Leistung GEN	10 kW	12 kW

Mit diesem Betriebsmodus ist es möglich, eine hohe Ladeleistung zu erzielen und dabei die VKM im Verbrauchs-Optimum zu betreiben. Die einzige Einschränkung ist dabei, dass sich das Fahrzeug im Stillstand befinden muss.

3.4.4. Rekuperation

Ist das Fahrzeug in Bewegung, so ist dabei kinetische Energie vorhanden. Um das Fahrzeug verzögern zu können, muss diese kinetische Energie abgebaut werden. In herkömmlichen Fahrzeugen wird diese Energie über die Bremsbeläge und

Bremsscheiben abgebaut und damit das Fahrzeug abgebremst. Durch die elektrischen Komponenten des Hybridkonzeptes ist es möglich, diese kinetische Energie wieder zurückzugewinnen.

Um das Fahrzeug verzögern zu können, wird vom EM die gewünschte Leistung aufgenommen und in die Batterie gespeist. Reicht die Bremsleistung durch den EM nicht aus, oder ist der Ladezustand der Batterie zu hoch, um rekuperieren zu können, übernehmen herkömmliche Bremsen das Verzögern des Fahrzeuges.

In einer Simulation wurde das Fahrzeug von 100 km/h aus verzögert, und die gewünschte Verzögerung mit der Zeit gesteigert. Man erkennt in Abbildung 55, dass bis Sekunde 30 die Bremsleistung nur durch den EM aufgebracht wird. Jedoch übersteigt danach die gewünschte Bremsleistung die maximale Leistung des EM (blau) und die herkömmliche Bremse (grün) muss die restliche Energie abbauen.

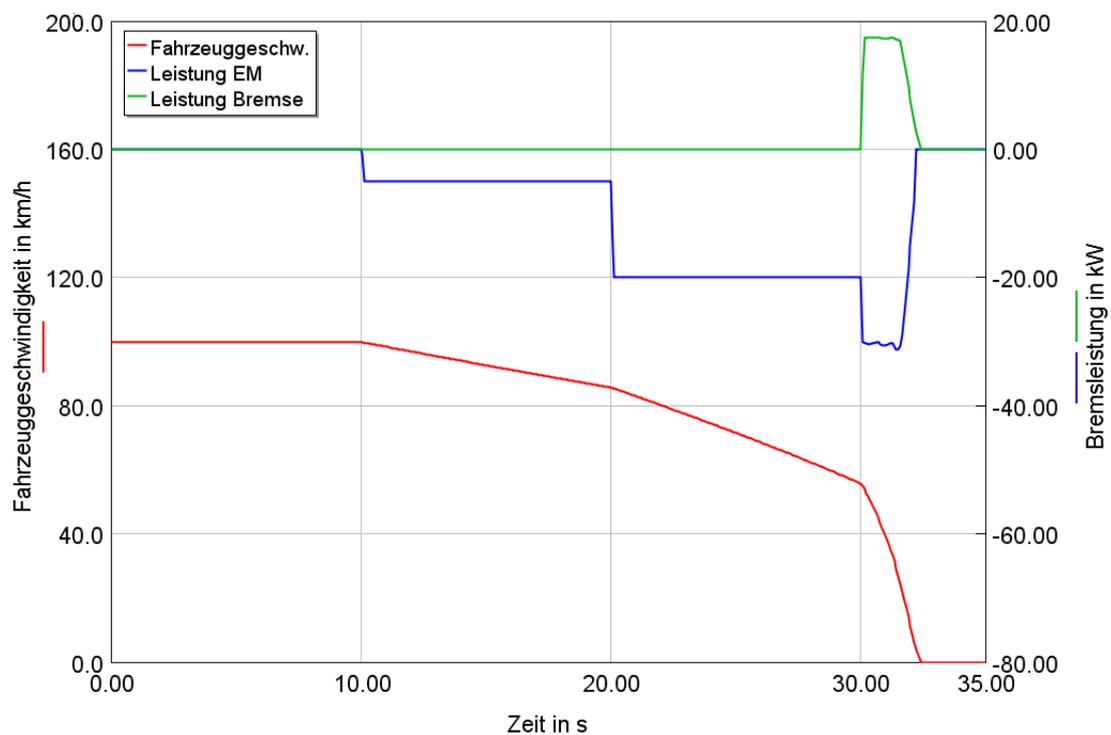


Abbildung 55: Leistungen des EM, der Bremse und Geschwindigkeitsverlauf während der Rekuperation

4. Simulation des Sapienter-Hybridkonzeptes:

In diesem Kapitel werden geeignete Betriebsmodi ausgewählt und eine Betriebsstrategie für die Simulation in Fahrzyklen entworfen. Mit dem Simulationsmodell und der gewählten Strategie werden spezifizierte Fahrzyklen simuliert und die Ergebnisse untersucht.

4.1. Simulation im NEFZ

Der NEFZ ist ein standardisierter Fahrzyklus und wird in Europa für Verbrauchs- und Emissionsgesetzgebung verwendet. Der in Abbildung 56 dargestellte Zyklus besteht aus einem Stadtzyklus, der viermal durchfahren wird, sowie einem Überlandzyklus. [6, p. 77] In der Simulation wurden jeweils der Stadtzyklus, der Überlandzyklus und der kombinierte Zyklus simuliert. Die Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln diskutiert.

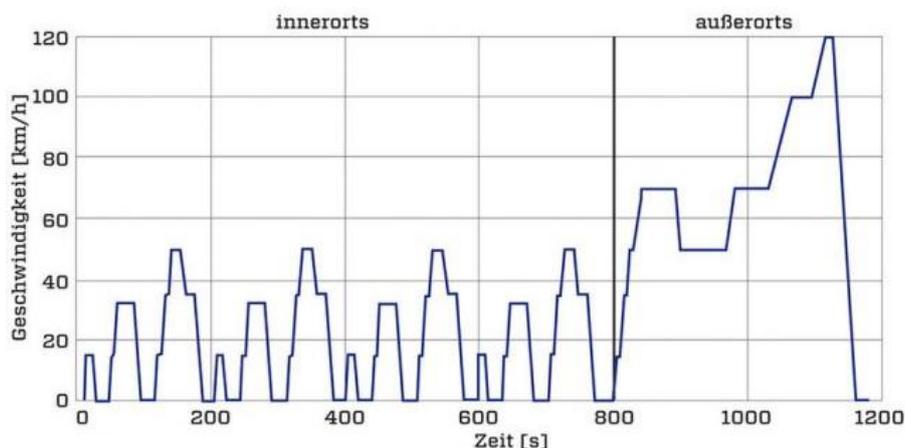


Abbildung 56: Geschwindigkeitsprofil des NEFZ [7]

4.1.1. Betriebsstrategie

Für die Simulation im NEFZ wurde die folgende Betriebsstrategie verwendet:

- Bis 20 km/h: E-Fahren mit dem EM
- >20 km/h: VKM-Fahren mit EM-Unterstützung, GEN im Stillstand
- Rekuperieren während des gesamten Zyklus
- Aufladen der Batterie im Stillstand

Für die Simulation wurde aufgrund der großen Momentenunterschiede an den Antriebsrädern auf eine Lastpunktanhebung verzichtet. Stattdessen wurde nach dem Fahrzyklus die Batterie durch Laden im Stillstand auf den Ausgangsladezustand

gebracht, um Aussagen über den Verbrauch treffen zu können. Der Verbrauch mit einer Lastpunktanhebung in der Betriebsstrategie wurde in einer eigenen Simulation in Kapitel 4.1.5 untersucht.

4.1.2. Simulation im NEFZ Stadtzyklus

In Abbildung 57 sind die während des Stadtzyklus aktiven Betriebsmodi eingezeichnet. Bis zu einer Geschwindigkeit von 20 km/h wird nur elektrisch über den E-Motor angetrieben. Bei höheren Geschwindigkeiten wie ab Sekunde 60 und 125 wird der Betriebsmodus VKM-Fahren mit EM-Unterstützung aktiv und das Fahrzeug durch die VKM und wenn nötig zusätzlich über den EM angetrieben. Während Bremsvorgängen, in Abbildung 57 grün dargestellt, wird rekuperiert und am Ende des Zyklus wird ab ca. Sekunde 190 über den GEN die Batterie wieder aufgeladen.

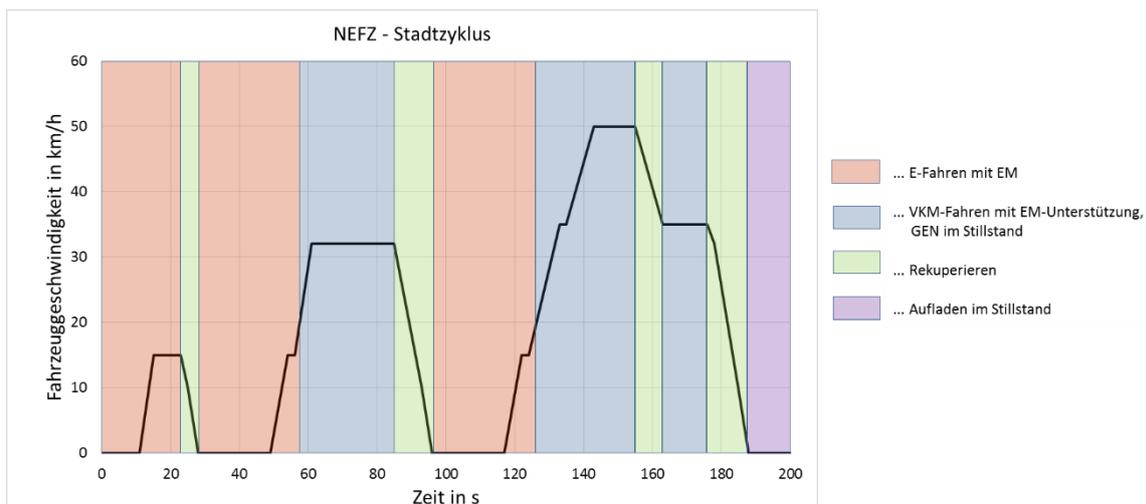


Abbildung 57: Darstellung der aktiven Betriebsmodi im NEFZ-Stadtzyklus

Die Leistungen des EM (grün) und der VKM (rot) im Fahrzyklus sind in Abbildung 58 abgebildet. Bis zu einer Geschwindigkeit von 20 km/h wird die gesamte Leistung vom EM erbracht, darüber von der VKM mit Unterstützung des EM. Man erkennt, dass während den Beschleunigungen der EM zusätzliche Leistung erbringen muss, um dem Fahrzyklus zu folgen während bei Konstantfahrten nur die VKM Leistung erbringt. Beides ist in Abbildung 58 als Beispiel eingezeichnet. Bei Bremsvorgängen wird mithilfe des EM Energie rekuperiert und in die Batterie zurück gespeist, erkennbar an der negativen Leistung des EM. In Abbildung 59 ist der Ladezustand der Batterie aufgetragen. Die Rekuperationsvorgänge sowie das Aufladen der

Batterie im Stillstand am Ende des Zyklus sind an den steigenden Flanken erkennbar.

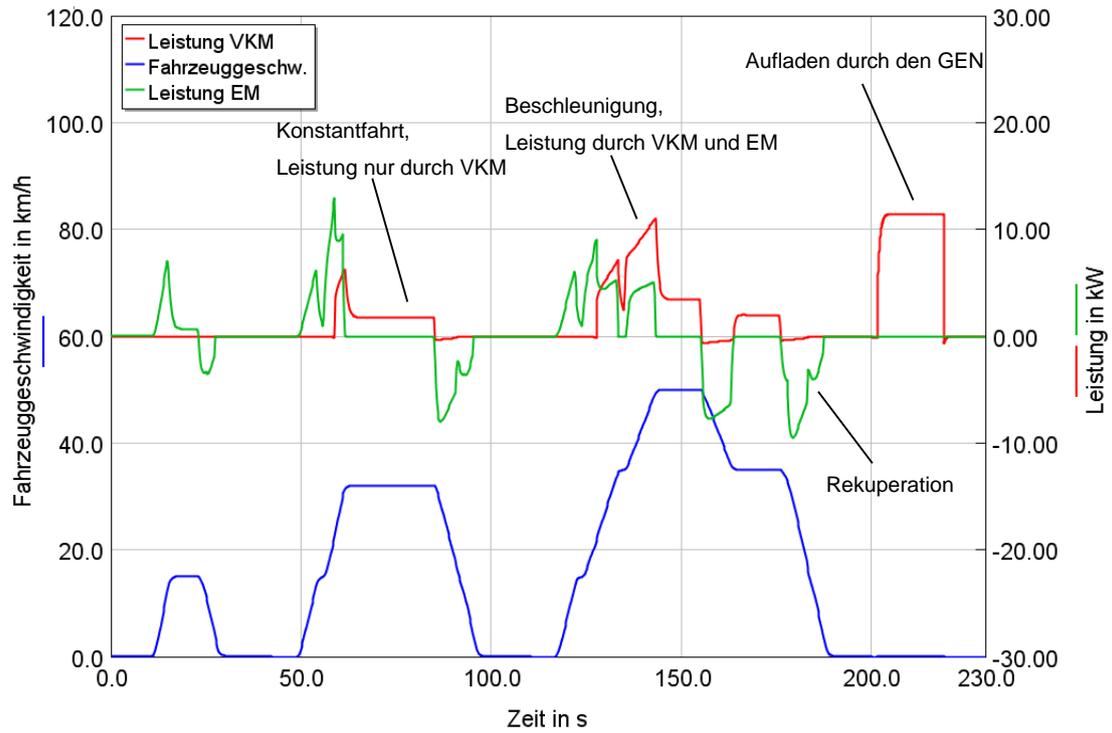


Abbildung 58: Leistung VKM, EM und Geschwindigkeitsprofil im NEFZ-Stadtzyklus

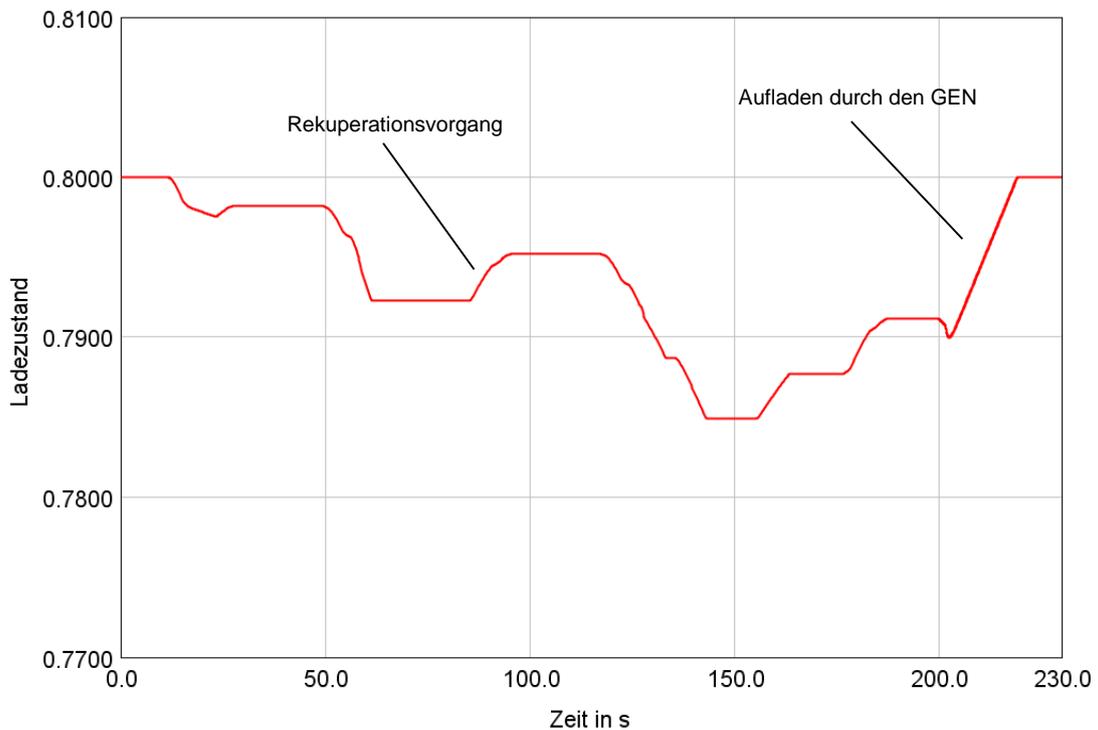


Abbildung 59: Ladezustand der Batterie im NEFZ-Stadtzyklus

Mit den gewählten Komponenten und der beschriebenen Betriebsstrategie ist in dem NEFZ-Stadtzyklus ein Verbrauch von **4,2 L/100km** möglich.

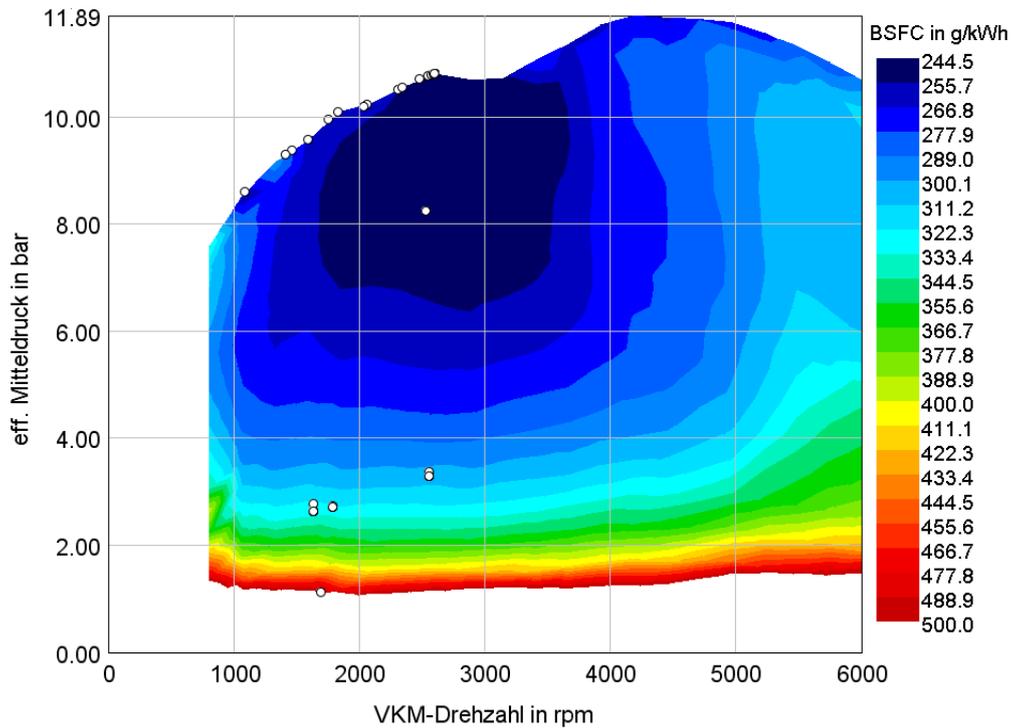


Abbildung 60: Motorkennfeld der VKM und Betriebspunkte im NEFZ-Stadtzyklus

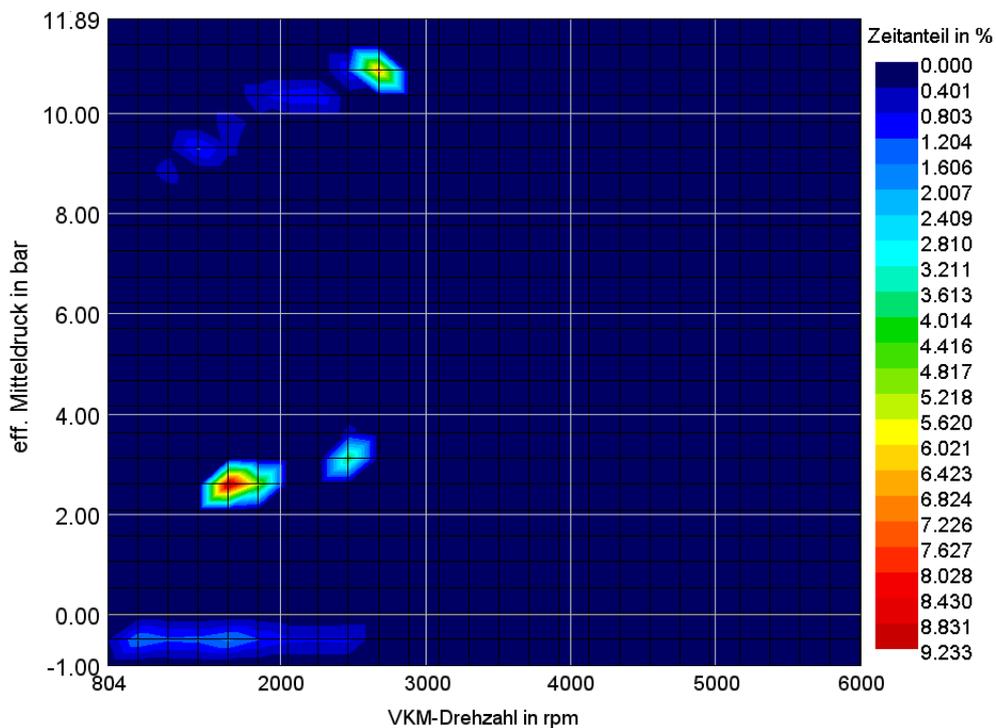


Abbildung 61: zeitliche Verteilung der VKM-Betriebspunkte im NEFZ-Stadtzyklus

Betrachtet man das Motorkennfeld in Abbildung 60 und die zeitliche Verteilung der Betriebspunkte in Abbildung 61 so erkennt man, dass die Bereiche mit sehr

schlechten Wirkungsgraden unter 2 bar effektivem Mitteldruck durch die klein dimensionierte VKM vermieden werden. Dadurch ergibt sich im Zyklus ein durchschnittlicher spezifischer Verbrauch der VKM von **270 g/kWh**.

4.1.3. Simulation im NEFZ Überlandzyklus

In Abbildung 62 wird die Aufteilung der Betriebsmodi für den Überlandzyklus dargestellt. Für diesen Zyklus wurde dieselbe Betriebsstrategie wie für den Stadtzyklus in Kapitel 4.1.2 verwendet. Auch in diesem Zyklus wurde die Batterie nach dem Zyklus im Stillstand des Fahrzeuges durch Betrieb der VKM im Optimum aufgeladen.

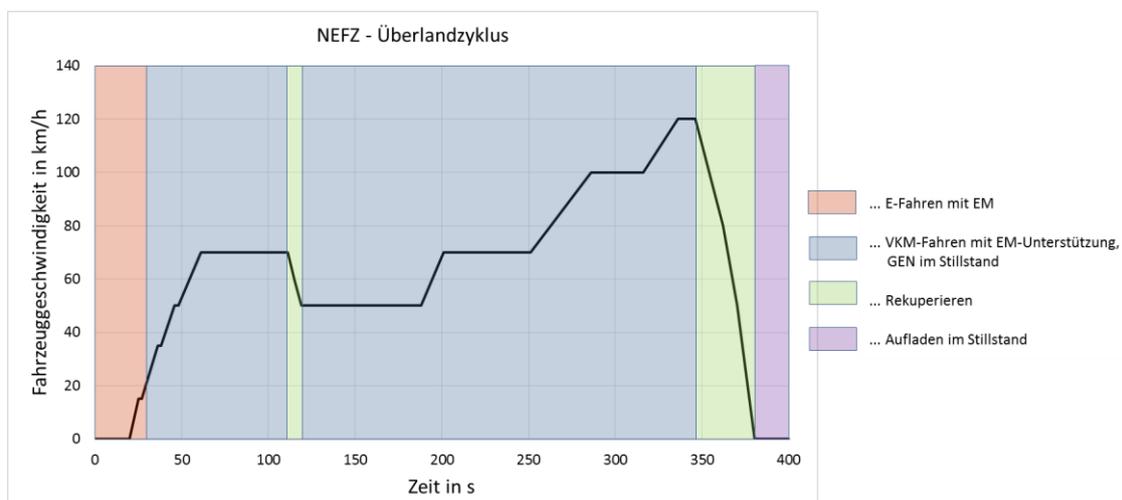


Abbildung 62: Darstellung der aktiven Betriebsmodi im NEFZ-Überlandzyklus

In diesem Zyklus reicht die Leistung der VKM alleine nicht aus und der EM muss zusätzliche Leistung für den Antrieb des Fahrzeuges erbringen. Erkennbar ist dies in Abbildung 63 an dem Verlauf der Leistung der VKM (blau), des EM (grün) und des GEN (pink). Während bei Konstantfahrten nur die VKM Leistung erbringt, so muss bei Beschleunigungen der EM ebenfalls Leistung erbringen, um dem Geschwindigkeitsprofil folgen zu können. Ab Sekunde 400 erkennt man das Laden der Batterie im Stillstand durch die positive VKM-Leistung und der entgegengesetzten negativen Leistung des GEN.

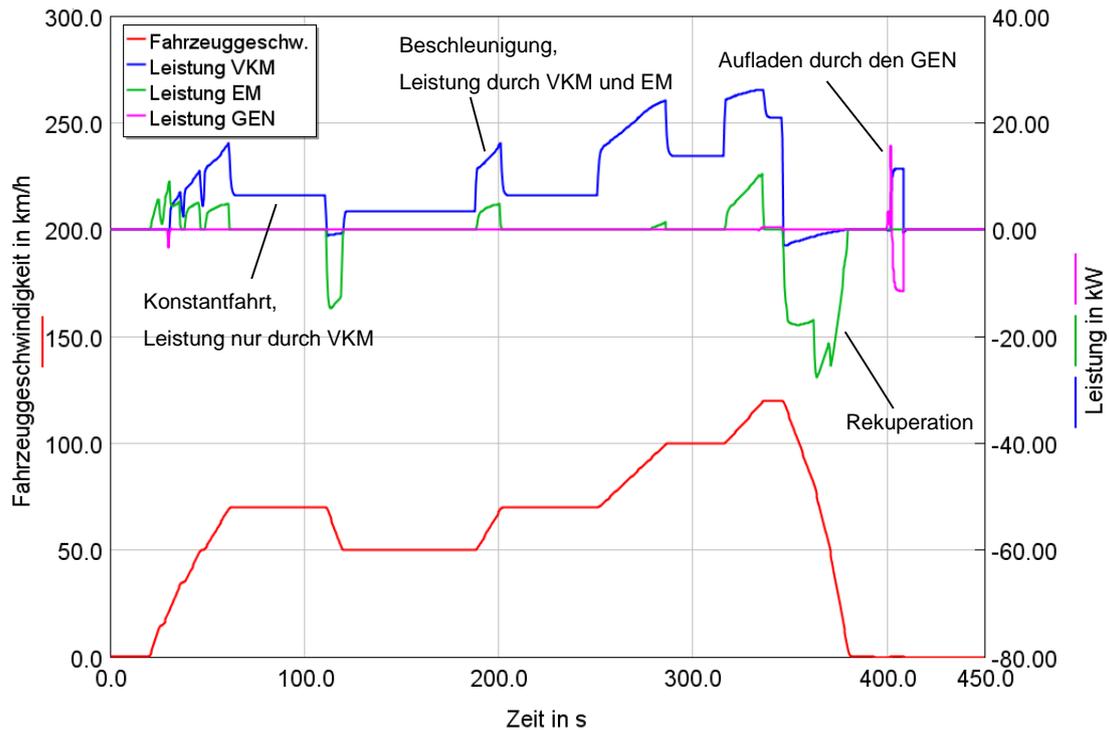


Abbildung 63: Leistungen VKM, EM, GEN und Geschwindigkeitsprofil im NEFZ-Überlandzyklus

In diesem Zyklus werden höhere Geschwindigkeiten als im Stadtzyklus erreicht und längere Konstantfahrten simuliert. Dadurch stellen sich die in [Abbildung 64](#) und [Abbildung 65](#) gezeigten Betriebspunkte ein. In der zeitlichen Verteilung der Betriebspunkte und im Geschwindigkeitsverlauf des Zyklus erkennt man, dass in dem Zyklus lange Konstantfahrten gefahren werden und sich damit durch die weniger hohen Drehmomentanforderungen an die VKM ein schlechterer durchschnittlicher spezifischer Verbrauch von **285 g/kWh** ergibt. Im Vergleich zum Stadtzyklus ergibt sich somit ein um 15 g/kWh höherer durchschnittlicher spezifischer Verbrauch. Durch den schlechteren spezifischen Verbrauch und durch die höheren Geschwindigkeiten und somit höheren Leistungsanforderungen im Überlandzyklus ergibt sich ein höherer Verbrauch von **4,9 L/100km** im Gegensatz zum Stadtzyklus mit 4,2 L/100km.

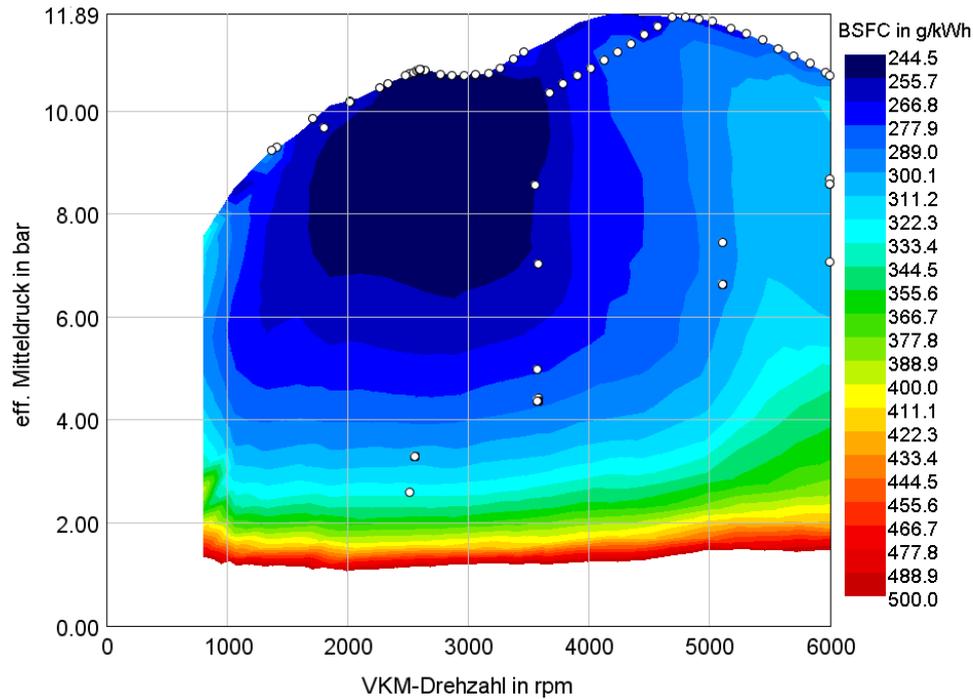


Abbildung 64: Motorkennfeld der VKM und Betriebspunkte im NEFZ-Überlandzyklus

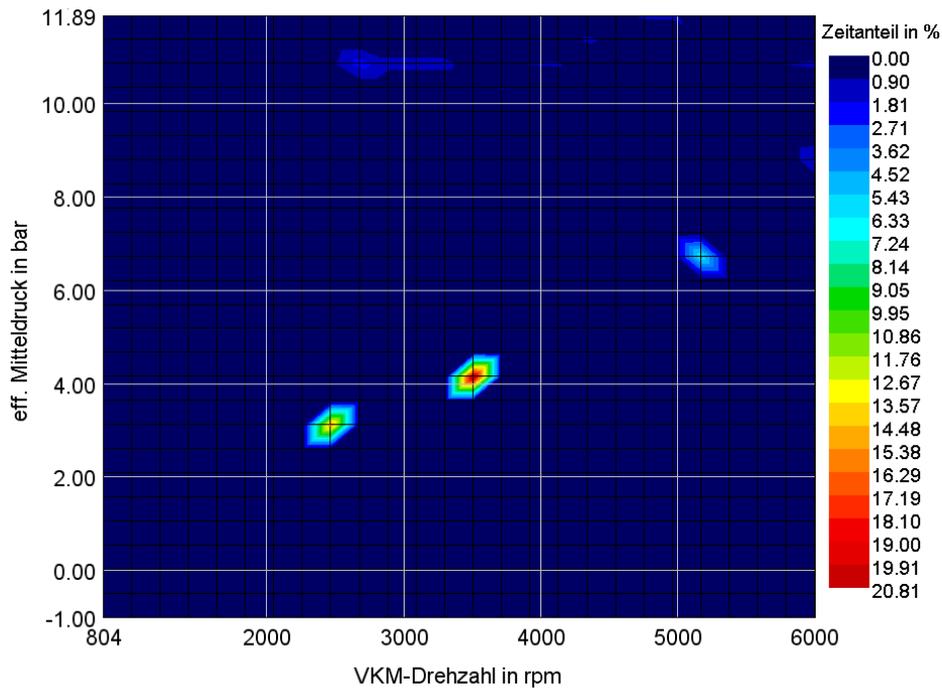


Abbildung 65: zeitliche Verteilung der VKM-Betriebspunkte im NEFZ-Überlandzyklus

In Abbildung 66 ist der Verlauf des Batterieladezustands im Fahrzyklus dargestellt. Durch Rekuperation kann sehr viel elektrische Energie wieder in die Batterie eingespeist werden und am Ende des Zyklus ab Sekunde 400 muss nur sehr wenig Energie über die VKM und den GEN in die Batterie geladen werden.

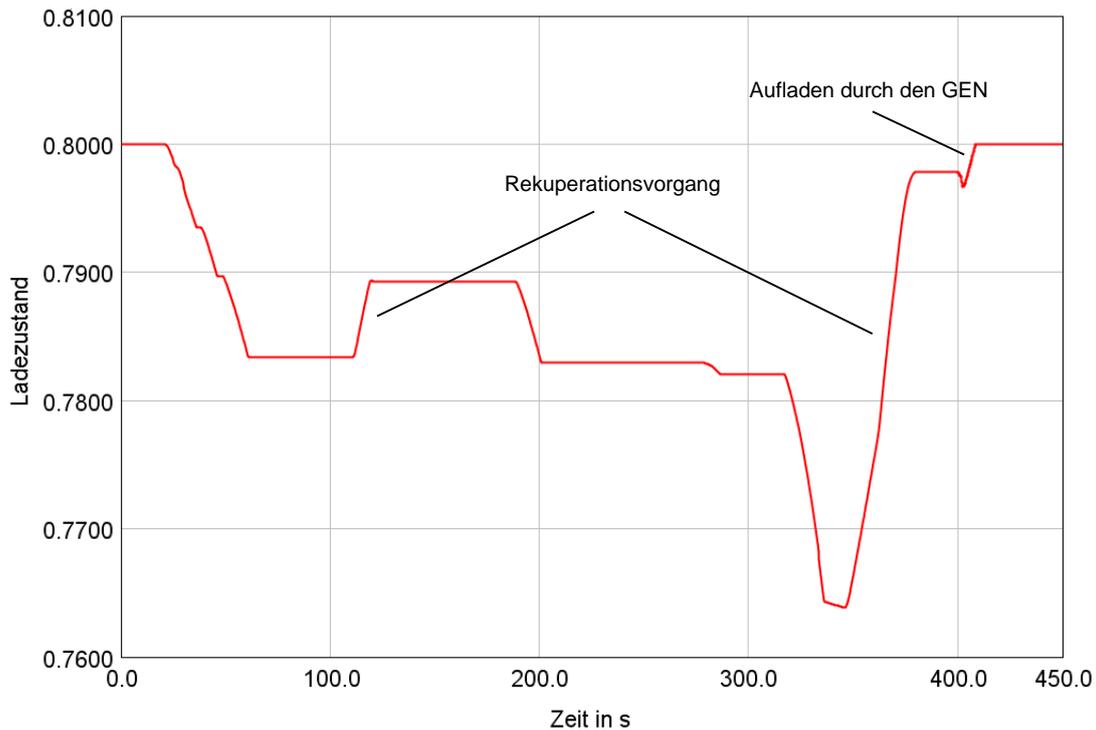


Abbildung 66: Ladezustand der Batterie im NEFZ-Überlandzyklus

4.1.4. Simulation im kombinierten NEFZ

In der Simulation im kombinierten NEFZ (Abbildung 56) wurde der Fahrzyklus mit denselben Betriebsstrategien wie in den vorigen zwei Kapiteln simuliert. Die Batterie wurde ebenfalls am Ende des Fahrzyklus im Stillstand des Fahrzeuges aufgeladen.

Im kombinierten Fahrzyklus erreicht das Konzept einen Verbrauch von **4,5 L/100km**. Die Leistungen der VKM (blau), des EM (grün) und des GEN (pink) sind in Abbildung 67 dargestellt. Die negativen Leistungen am EM stellen die Rekuperationsvorgänge dar, sowie die negative Leistung am GEN am Ende des Zyklus die Ladeleistung im Stillstand.

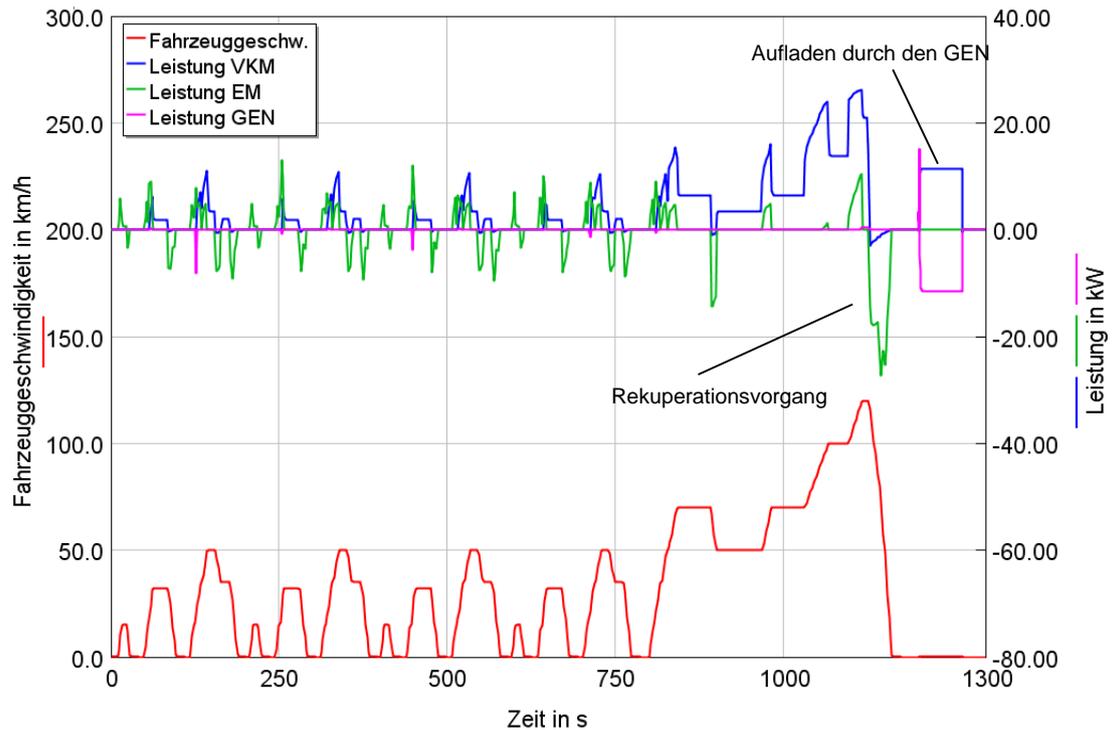


Abbildung 67: Leistungen VKM, EM, GEN und Geschwindigkeitsprofil im NEFZ

Der Verlauf des Batterieladezustandes ist in Abbildung 68 dargestellt. An den steigenden Flanken erkennt man die Rekuperationsvorgänge sowie am Ende des Zyklus das Laden der Batterie im Stillstand. Um diesen Fahrzyklus abfahren zu können, werden nur ca. 7% der Batteriekapazität benötigt.

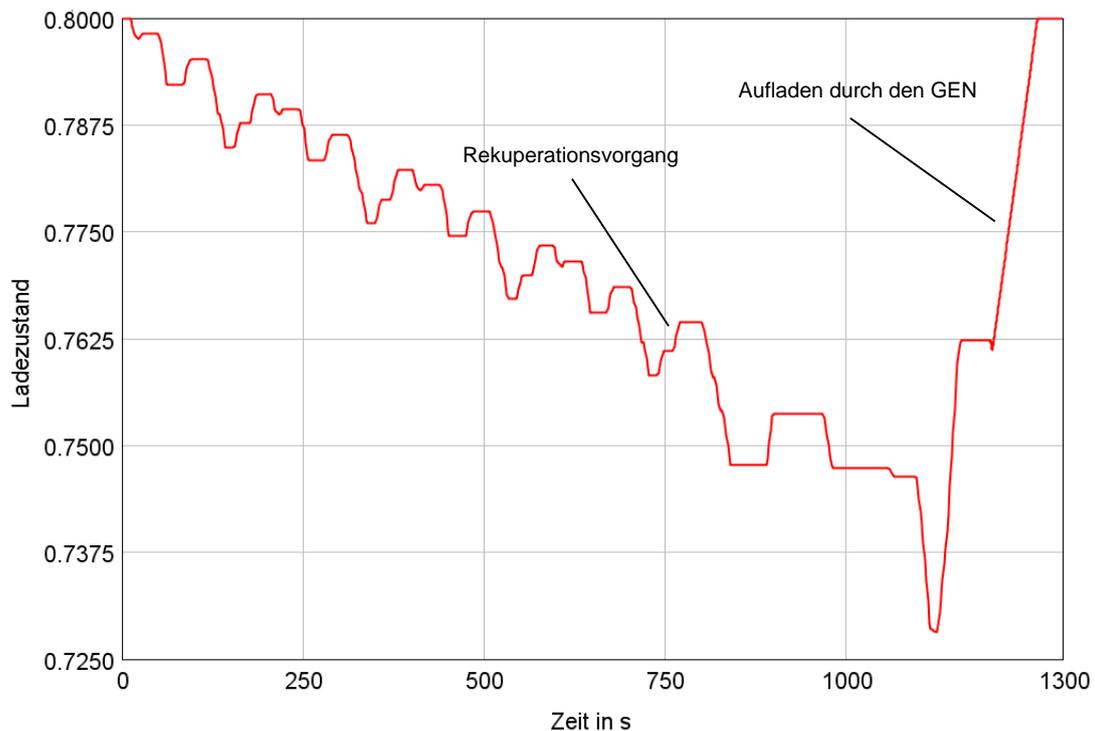


Abbildung 68: Ladezustand der Batterie im NEFZ

Der durchschnittliche spezifische Verbrauch der VKM ergibt sich im NEFZ zu **280 g/kWh**. Die Betriebspunkte und die zeitliche Verteilung sind in Abbildung 69 und Abbildung 70 dargestellt.

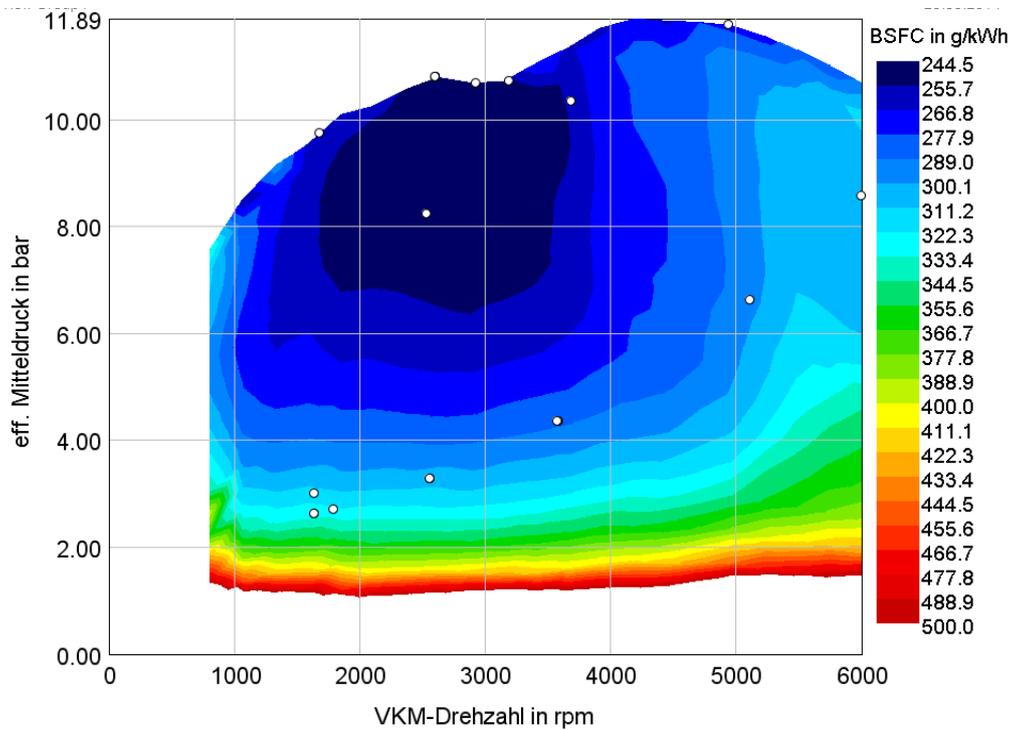


Abbildung 69: Motorkennfeld der VKM und Betriebspunkte im NEFZ

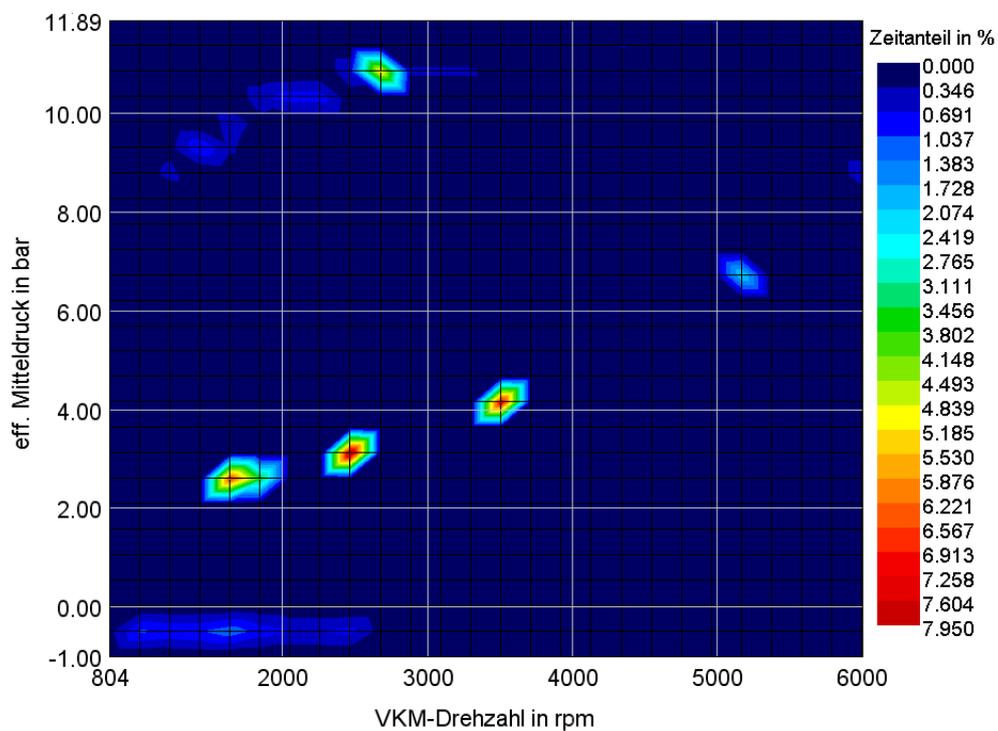


Abbildung 70: zeitliche Verteilung der VKM-Betriebspunkte im NEFZ

Untersucht man wo im Fahrzeug die Verluste während dem Fahrzyklus auftreten, so ergeben sich die in Tabelle 6 dargestellten Werte. Während die meiste Energie durch den Luftwiderstand (Aerodynamische Verluste) und den Rollwiderstand verloren geht, so betragen die Verluste in Getriebe und Übersetzungen nur 12,7%. Dies entspricht im NEFZ in etwa einem theoretischen Mehrverbrauch von 0,5 L/100km. Durch die Rekuperationsvorgänge mit dem EM wird sehr viel Bremsenergie zurückgewonnen und an der Bremse nur sehr wenig Energie abgebaut.

Tabelle 6: Fahrzeugverluste im NEFZ

	Energie	%-Anteil
Aerodynamische Verluste	-1550 kJ	42%
Verluste am Reifen (Rollwid.)	-1619 kJ	45%
Bremsen	-12 kJ	0,3%
Verluste in Getriebe und Übersetzungen	-468 kJ	12,7%
	-3649 kJ	100%

4.1.5. Simulation im NEFZ mit Lastpunktanhebung

Trotz des negativen Einflusses der ungleichen Momentenverteilung an den Antriebsrädern während einer Lastpunktanhebung, wie in Kapitel 3.4.2 ausführlich beschrieben, wurde eine Lastpunktanhebung im NEFZ simuliert. Wie in Abbildung 47 dargestellt, ergibt sich durch eine Lastpunktanhebung aufgrund der klein dimensionierten VKM und des schlechten Wirkungsgrades des elektrischen Zweiges kein direkter Verbrauchsvorteil. Eine Lastpunktanhebung ist in diesem Konzept nur sinnvoll, um die Batterie während der Fahrt wieder aufzuladen.

In dieser Simulation wurde die Strategie für den NEFZ adaptiert:

- Bis 20 km/h: E-Fahren mit dem EM
- >20 km/h: VKM-Fahren mit EM-Unterstützung und **Lastpunktanhebung**, GEN im Stillstand
- Rekuperieren während des gesamten Zyklus

Die Lastpunktanhebung war in der Simulation im NEFZ hauptsächlich während der vier Stadtzyklen aktiv, da dort durch die geringe Leistungsanforderung das größte Potential zur Wirkungsgradsteigerung der VKM besteht. Wie in Abbildung 71 am

Ladezustand der Batterie erkennbar, kann durch eine Lastpunktanhebung während der Stadtzyklen und durch Rekuperationsvorgänge genug elektrische Energie erzeugt werden, um den restlichen NEFZ ohne Ladevorgänge abzufahren. Am Ende des Zyklus stellt sich der Anfangsladezustand ein und es ist kein Aufladen der Batterie im Stillstand nötig.

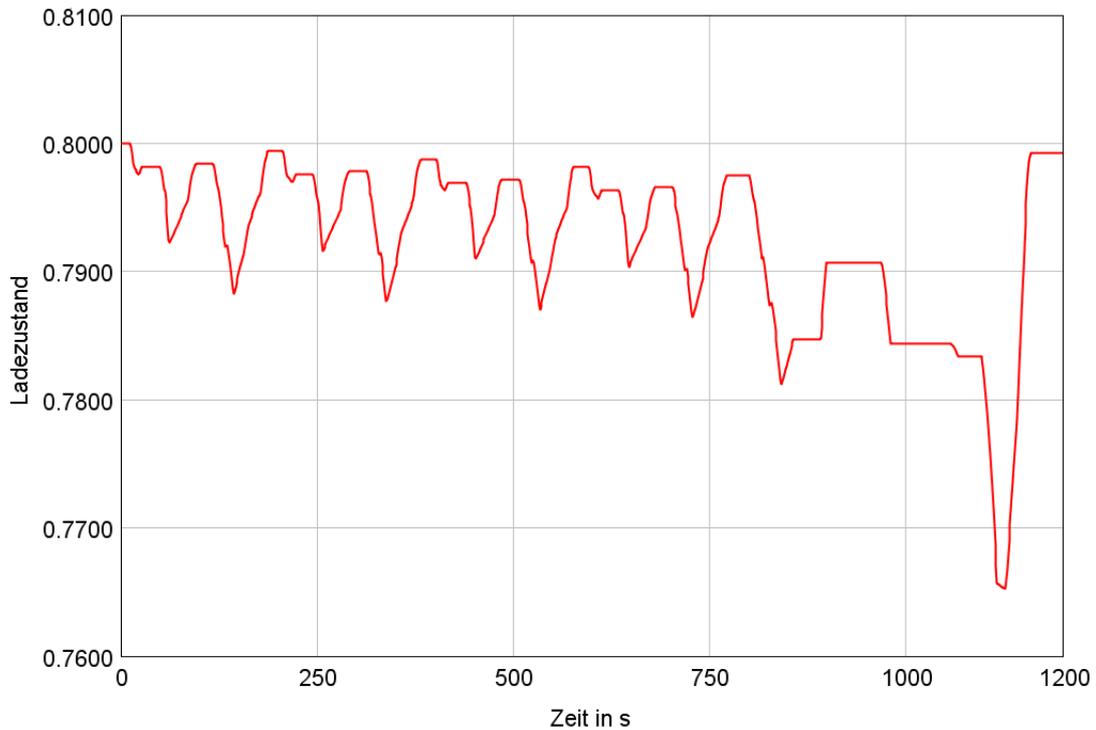


Abbildung 71: Ladezustand der Batterie im NEFZ mit Lastpunktanhebung

Vergleicht man die zeitliche Verteilung der Betriebspunkte der VKM in [Abbildung 72](#) und [Abbildung 73](#) so erkennt man, dass die Betriebspunkte durch die LPA zu höheren Lasten und somit in effizientere Bereiche verschoben wurden. In der Simulation ergibt sich dadurch ein durchschnittlicher spezifischer Verbrauch von **273 g/kWh**, anstatt 280 g/kWh ohne LPA.

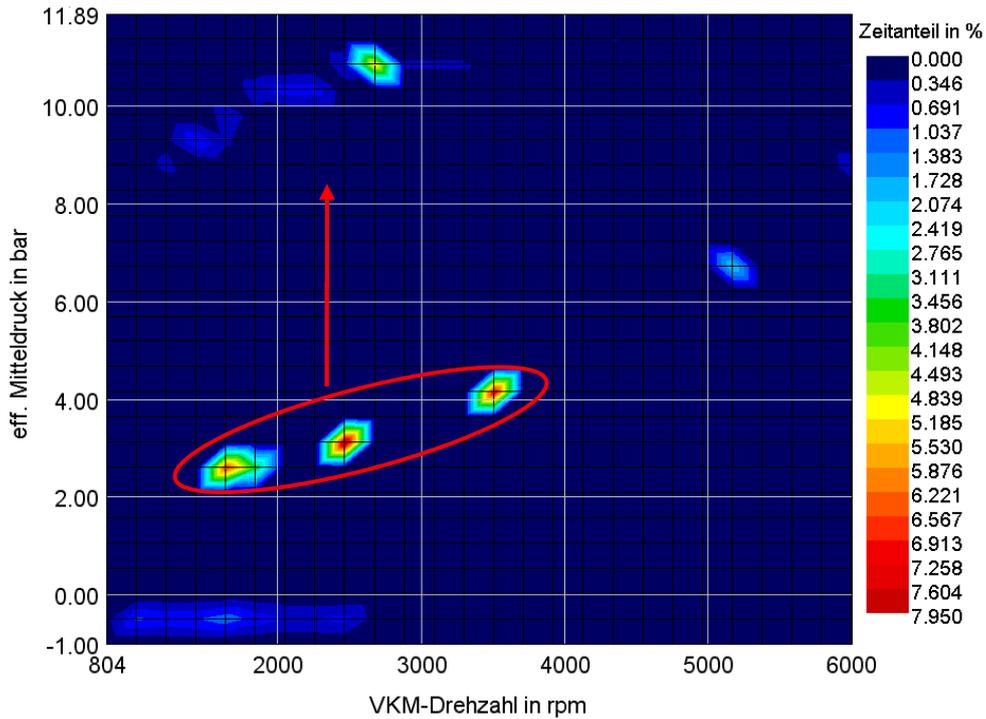


Abbildung 72: zeitliche Verteilung der VKM-Betriebspunkte ohne LPA

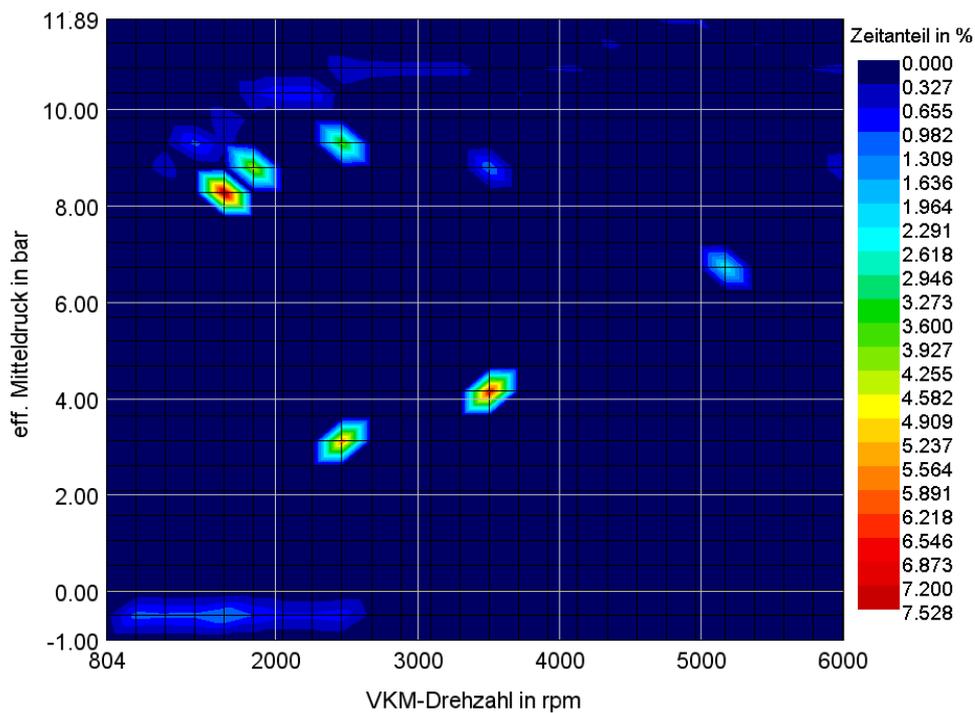


Abbildung 73: zeitliche Verteilung der VKM-Betriebspunkte mit LPA

Betrachtet man die Energieverluste zwischen der VKM und dem EM, die während einer Lastpunktanhebung auftreten, so setzt sich der mechanische Gesamtwirkungsgrad aus dem Wirkungsgrad von der VKM zum rechten Vorderrad $\eta_{\text{VKM, Rad}} = 88,2\%$ und dem Wirkungsgrad vom linken Vorderrad zum EM

$\eta_{EM,Rad} = 98\%$ zusammen und es ergibt sich ein mechanischer Wirkungsgrad von der VKM zum EM von $\eta = 0,882 \cdot 0,98 = 86,4\%$ (siehe [Abbildung 74](#)). Wird die Batterie durch den Betriebsmodus Aufladen im Stillstand geladen, so treten weniger mechanische Verluste auf und es ergibt sich ein Wirkungsgrad von 90% (siehe Kapitel 3.3.1).

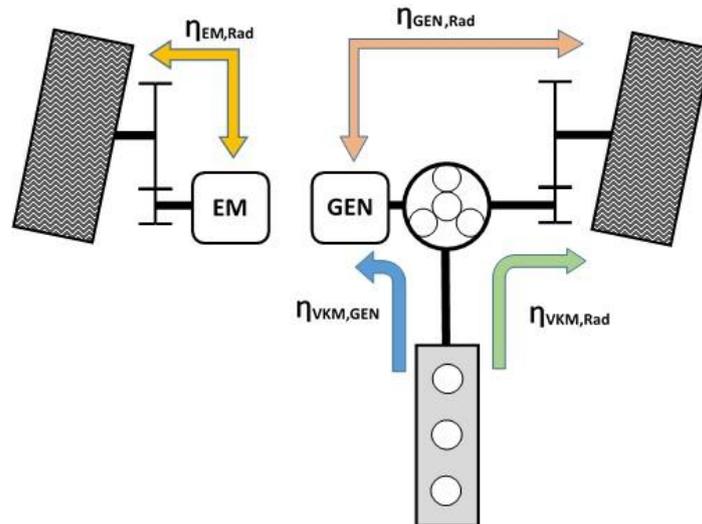


Abbildung 74: Darstellung der mechanischen Wirkungsgradketten im Antriebsstrang

Zusätzlich zu den höheren mechanischen Verlusten wird bei der Lastpunktanhebung durch das geringe Drehmoment der EM in Bereichen mit sehr schlechtem Wirkungsgrad betrieben (siehe [Abbildung 51](#)). Dies führt dazu, dass das Laden der Batterie durch Lastpunktanhebung mit einem schlechten Gesamtwirkungsgrad verbunden ist und somit das Aufladen im Stillstand vom Verbrauch vorteilhafter ist.

Durch eine Lastpunktanhebung kann zwar der durchschnittliche spezifische Verbrauch der VKM verbessert und die Batterie während der Fahrt aufgeladen werden, jedoch egalisieren sich diese Verbesserungen durch die höheren Verluste die dabei auftreten. Im NEFZ verschlechtert sich mit der Strategie der Lastpunktanhebung der Verbrauch des Fahrzeuges auf **4,7 L/100km** (4,5 L/100km ohne LPA). Durch den Umstand des schlechteren Gesamtverbrauches und der ungleichen Momentenverteilung an den Antriebsrädern, ist eine Lastpunktanhebung kein geeigneter Betriebsmodus für dieses Konzept.

4.2. Simulation im US06

Am Geschwindigkeitsprofil des Fahrzyklus US06 in Abbildung 75 erkennt man die hohe Leistungsanforderung an das Fahrzeug. Hohe Beschleunigungen, hohe Geschwindigkeiten sowie hohe Schwankungen der Geschwindigkeit zeichnen den US06-Zyklus aus. Somit eignet sich der US06 gut, um den Verbrauch eines Fahrzeuges bei hohen Leistungen zu bewerten. [8]

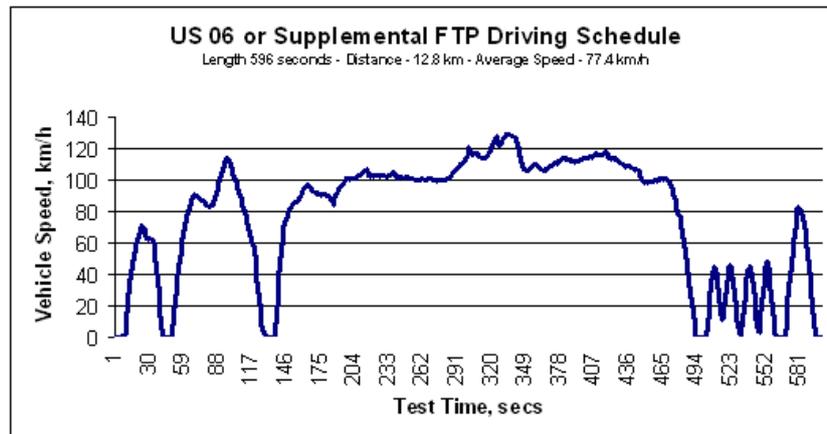


Abbildung 75: Geschwindigkeitsprofil des US06 Fahrzyklus [9]

Bei der Simulation des Fahrzyklus wurde dieselbe Betriebsstrategie wie im NEFZ ohne Lastpunktanhebung verwendet. Das Fahrzeug wird bis zu einer Geschwindigkeit von 20 km/h elektrisch betrieben und ab dieser mit der VKM unterstützt durch den EM. Durch Rekuperationsvorgänge und durch Aufladen im Stillstand am Ende des Zyklus (ab ca. Sekunde 600) wird der Batterieladezustand wieder auf den Ausgangswert gebracht.

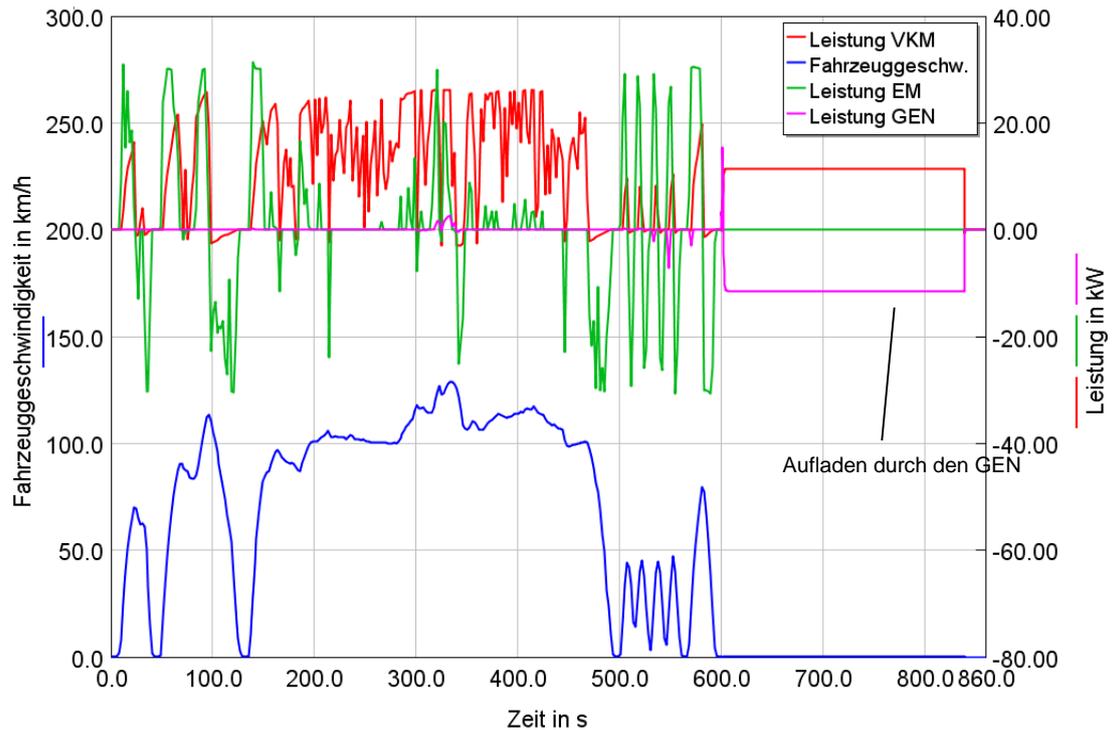


Abbildung 76: Leistungen VKM, EM, GEN und Geschwindigkeitsprofil im US06-Zyklus

In Abbildung 76 sind die Leistungen der VKM (rot), des EM (grün) sowie des GEN (pink) eingezeichnet. Durch die hohe Leistungsanforderung im US06-Zyklus muss der EM sehr viel Leistung zur Unterstützung der VKM zum Antrieb des Fahrzeuges abgeben. Dies ist auch an dem geringen Ladezustand der Batterie von 63% nach dem Zyklus bei Sekunde 600 in Abbildung 77 erkennbar.

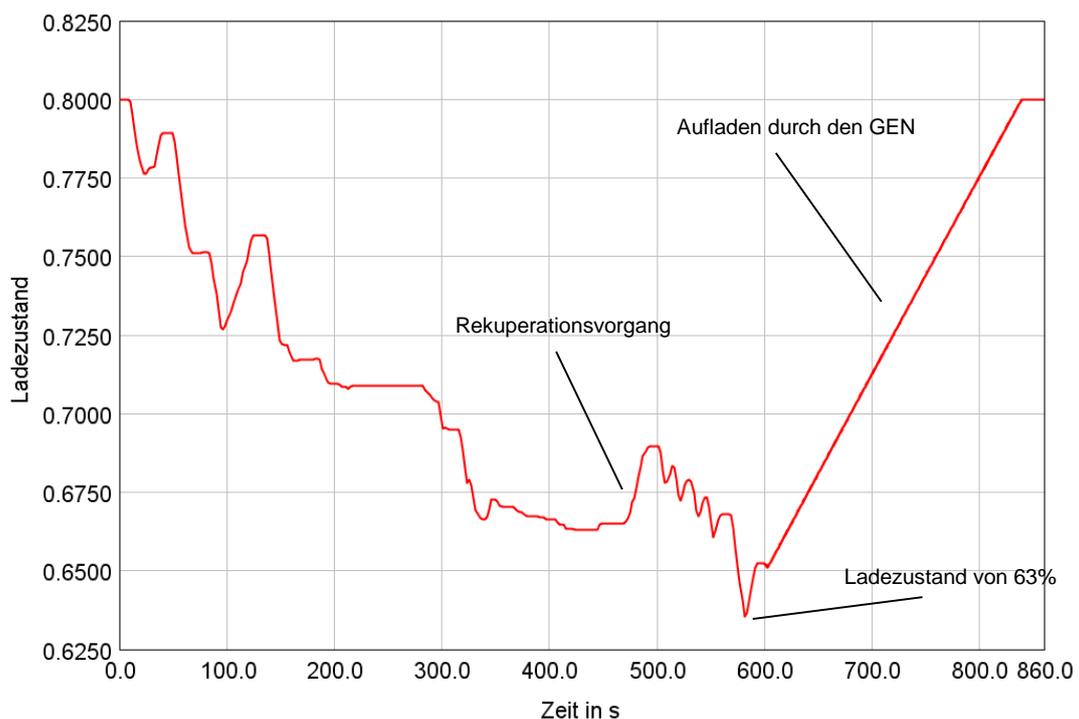


Abbildung 77: Ladezustand der Batterie im US06-Zyklus

Mit dem neuen Hybridkonzept ergibt sich im Fahrzyklus US06 ein Verbrauch von **7,3 L/100km**. Dieser Verbrauch wird in Kapitel 5.2.2 beim Vergleich mit einem parallelen Hybridkonzept weiter diskutiert. Der spezifische Verbrauch der VKM beträgt dabei 281 g/kWh.

4.3. Maximale Beschleunigung des Hybridkonzeptes

Um das Beschleunigungsverhalten des Hybridkonzeptes mit den definierten Komponenten zu untersuchen, wurde eine Simulation mit maximaler Antriebsleistung bis zu einer Geschwindigkeit von 160 km/h durchgeführt. Die Strategie hierbei war, dass bis zu einer Geschwindigkeit von 20km/h sowohl der EM, als auch der GEN, wie in Kapitel 3.4.1 bei den Betriebsstrategien beschrieben, die maximale Leistung abgeben. Über einer Geschwindigkeit von 20 km/h wird die VKM gestartet und gibt zusammen mit dem EM die maximale Leistung ab. Aufgrund der Drehzahlverhältnisse im Planetengetriebe muss ab einer Geschwindigkeit von 120 km/h der GEN motorisch betrieben werden und gibt ebenfalls Leistung ab. Der Leistungsverlauf der VKM (rot), des EM (blau) und des GEN (pink), sowie der Geschwindigkeitsverlauf des Fahrzeuges ist in Abbildung 78 dargestellt.

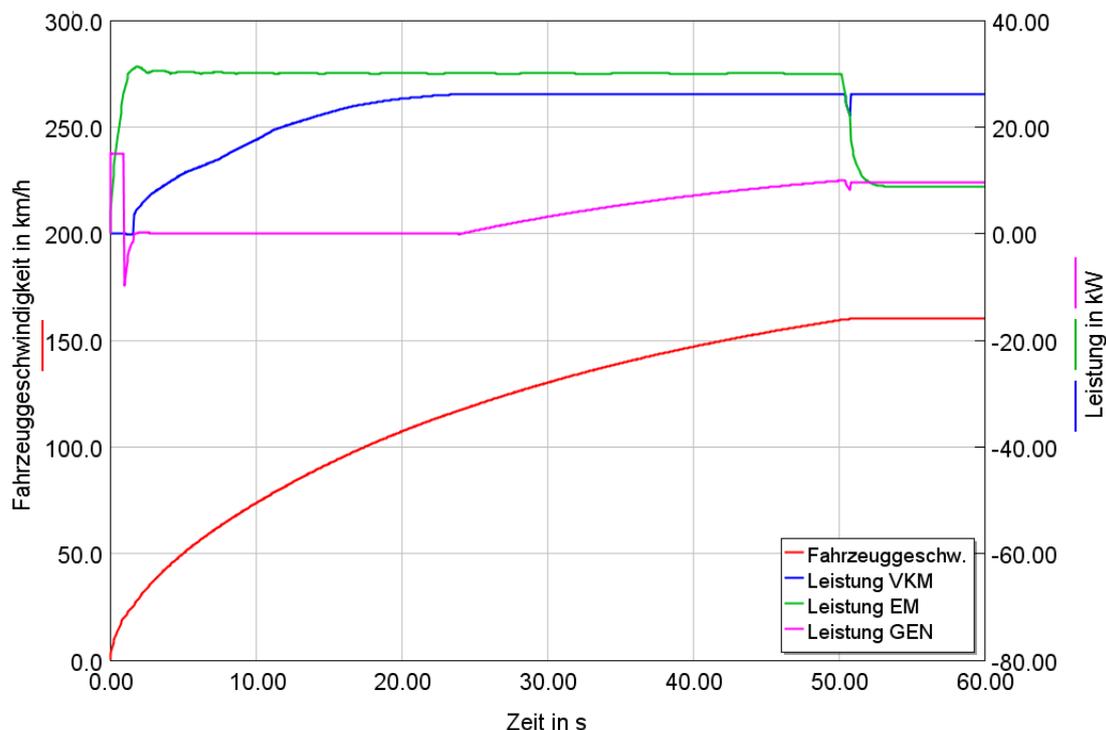


Abbildung 78: Leistungen VKM, EM, GEN und Geschwindigkeit bei maximaler Beschleunigung

Mit dieser Strategie und den Komponenten ist eine Beschleunigung von 0-100 km/h in **17 s** möglich. Das Beschleunigungsverhalten ist damit ausreichend für den Einsatz als Stadtfahrzeug. Zum Vergleich braucht der VW Polo in der 51 kW Variante 14,1 s, um auf 100 km/h zu beschleunigen [3].

4.4. Zusammenfassung der Simulationen

Die Simulationen in diesem Kapitel haben die Funktionsweise des Sapienter-Hybridkonzeptes veranschaulicht und gezeigt, welche Verbräuche im NEFZ sowie im US06 Fahrzyklus möglich sind. Um die Verbräuche in den Fahrzyklen bewerten zu können, wird im nächsten Kapitel ein paralleles Hybridkonzept simuliert und die Ergebnisse mit dem Sapienter-Hybridkonzept verglichen.

5. Vergleich zu parallelem Hybridkonzept

Um das Sapienter-Hybridkonzept bewerten zu können, wurde zum Vergleich ein Simulationsmodell eines parallelen Hybrid aufgebaut. Dabei wurde ein paralleles Hybridkonzept mit zwei Trennkupplungen und einem Schaltgetriebe wie in [Abbildung 79](#) schematisch dargestellt verwendet. Es wurde jeweils ein Simulationsmodell mit denselben Komponenten wie im Sapienter-Hybridkonzept sowie eines mit leistungsstärkerer VKM aufgebaut und in den beiden Fahrzyklen NEFZ und US06 simuliert.

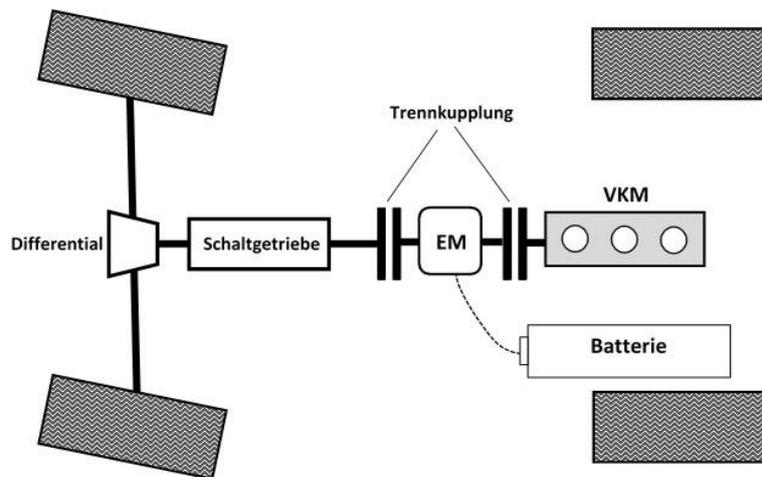


Abbildung 79: Schematische Darstellung des Parallelhybridkonzeptes

5.1. Wirkungsgradvergleich mit parallelem Hybrid

Betrachtet man die mechanischen Wirkungsgrade im parallelen Hybrid, so ergibt sich die in [Abbildung 80](#) dargestellten mechanischen Wirkungsgradketten.

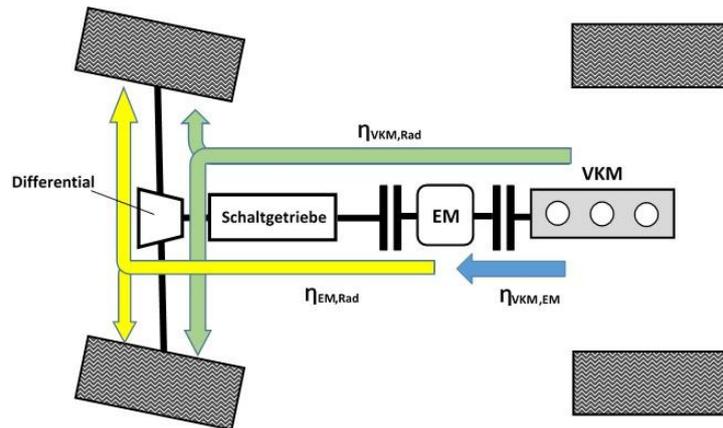


Abbildung 80: Mechanische Wirkungsketten im parallelen Hybridkonzept

Nimmt man als Wirkungsgrad für das Schaltgetriebe $\eta_{\text{Getr.}} = 98\%$ [10, p. 138] an und für das Differential denselben Wirkungsgrad wie für das Planetengetriebe in Kapitel 3.2.6 von $\eta_{\text{Diff}} = 90\%$ an und vernachlässigt man die Verluste in den Trennkupplungen, so ergeben sich die folgenden Wirkungsgrade:

$\eta_{\text{VKM,Rad}} = 0,98 \cdot 0,9 = 88,2\%$... Wirkungsgrad von der VKM zu den Radachsen

$\eta_{\text{EM,Rad}} = 0,98 \cdot 0,9 = 88,2\%$... Wirkungsgrad vom EM zu den Radachsen

$\eta_{\text{VKM,EM}} = 100\%$... Wirkungsgrad von der VKM zum EM

Im Vergleich zum Sapienter-Hybridkonzept ergeben sich die in Tabelle 7 angeführten Werte der Wirkungsketten und werden anschließend kurz beschrieben.

Tabelle 7: Wirkungsgradvergleich zwischen Sapienter- und parallelem Hybridkonzept

	Paralleles Konzept	Sapienter-Konzept
$\eta_{\text{VKM,Rad}}$	88,2%	88,2%
$\eta_{\text{EM,Rad}}$	88,2%	98%
$\eta_{\text{VKM,EM/GEN}}$	100%	90%

$\eta_{\text{VKM,Rad}}$: Der Wirkungsgrad von der VKM zu den Radachsen kann in beiden Konzepten als ident angenommen werden.

$\eta_{\text{EM,Rad}}$: Bei dem Wirkungsgrad zwischen dem EM und den Radachsen ergeben sich große Unterschiede zwischen den beiden Konzepten. Während im Sapienter-Hybridkonzept zwischen EM und Radachse sich durch nur eine Getriebestufe ein hoher Wirkungsgrad ergibt, ergeben sich beim parallelen Konzept durch das

Schaltgetriebe und das Differential höhere Verluste. Dadurch treten beim elektrischen Antrieb durch den E-Motor sowie bei der Rekuperation von Bremsenergie im parallelen Hybridkonzept wesentlich mehr Verluste auf.

$\eta_{\text{VKM,EM/GEN}}$: Der Wirkungsgrad zwischen der VKM und dem E-Motor bzw. zum GEN ist ausschlaggebend für die Verluste, die während des Aufladens der Batterie entstehen. Während beim parallelen Konzept keine mechanischen Verluste zwischen der VKM und dem EM auftreten (Kupplungsverluste vernachlässigt), so ist beim Sapienter-Konzept im Planetengetriebe zwischen VKM und GEN mit Wirkungsgradeinbußen zu rechnen.

Wie aus dem Vergleich zu entnehmen, ergeben sich im parallelen Hybridkonzept Nachteile durch den niedrigeren Wirkungsgrad vom EM zu den Radachsen, welcher sich beim elektrischen Antrieb sowie auch beim Rekuperieren negativ auf den Verbrauch auswirkt. Vorteilhaft im parallelen Hybridkonzept ist jedoch, dass beim Aufladen der Batterie über den EM so gut wie keine mechanischen Verluste auftreten im Gegensatz zu den Verlusten durch das Planetengetriebe im Sapienter-Hybridkonzept.

Wie sich diese Vor- und Nachteile auf den Verbrauch in verschiedenen Fahrzyklen auswirken, wird in den nachfolgenden Kapiteln analysiert.

5.2. Parallelhybrid mit gleichen Komponenten

In diesem Simulationsmodell wurden dieselben Komponenten wie in Kapitel 3.2 beschrieben verwendet. Als Betriebsstrategie für die Simulation wurden für den parallelen Hybrid folgende Betriebsmodi verwendet:

- Bis 20 km/h: E-Fahren mit dem EM
- >20 km/h: VKM-Fahren mit EM-Unterstützung und Lastpunktanhebung
- Rekuperieren während des gesamten Zyklus

Durch die Anordnung des EM zwischen der VKM und dem Schaltgetriebe im parallelen Hybridkonzept ist eine Lastpunktanhebung sehr einfach durchzuführen und wird während der Simulation zum Aufladen der Batterie genutzt.

5.2.1. Simulation im NEFZ

Im NEFZ erreicht das parallele Hybridkonzept einen Verbrauch von **4,8 L/100km** und hat dadurch nur einen gering schlechteren Verbrauch als das neue Konzept (4,5 L/100km). Betrachtet man die zeitliche Verteilung der VKM-Betriebspunkte des parallelen Konzeptes in Abbildung 81 mit dem des Sapienter-Hybridkonzeptes in Abbildung 82 so erkennt man, dass die Betriebspunkte durch die Lastpunktanhebung und durch das vorhandene Schaltgetriebe im parallelen Konzept zu höheren Lasten und somit in Bereiche mit besserem spezifischen Verbrauch geschoben werden. Der durchschnittliche spezifische Verbrauch im parallelen Konzept ergibt sich zu **265 g/kWh** (280 g/kWh im Sapienter-Konzept).

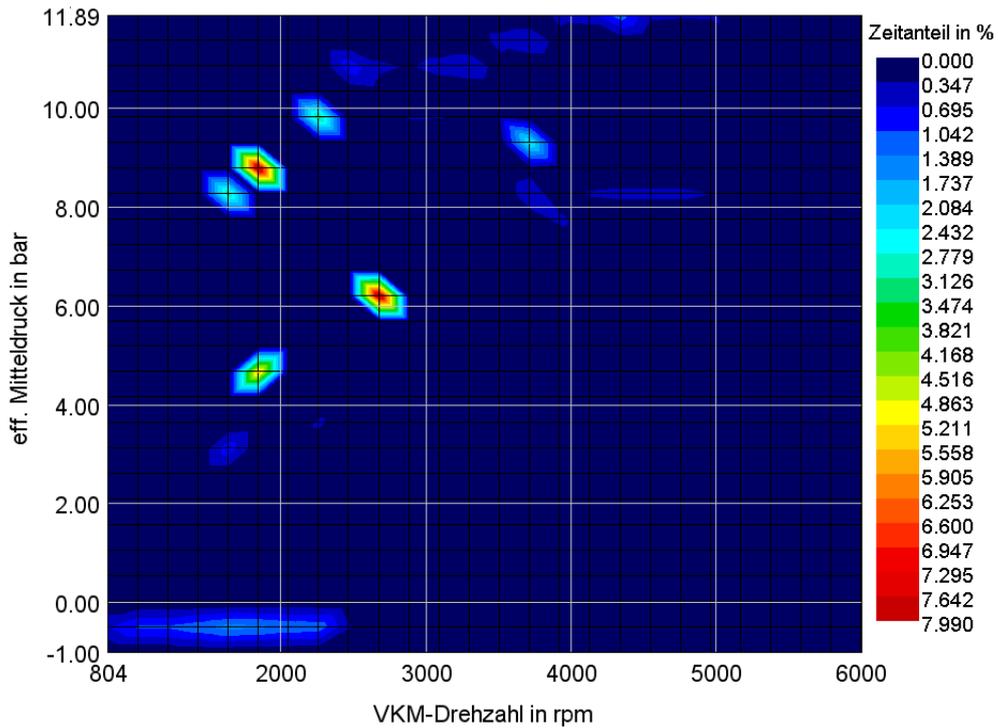


Abbildung 81: Zeitliche Verteilung der VKM-Betriebspunkte bei parallelem Hybrid im NEFZ

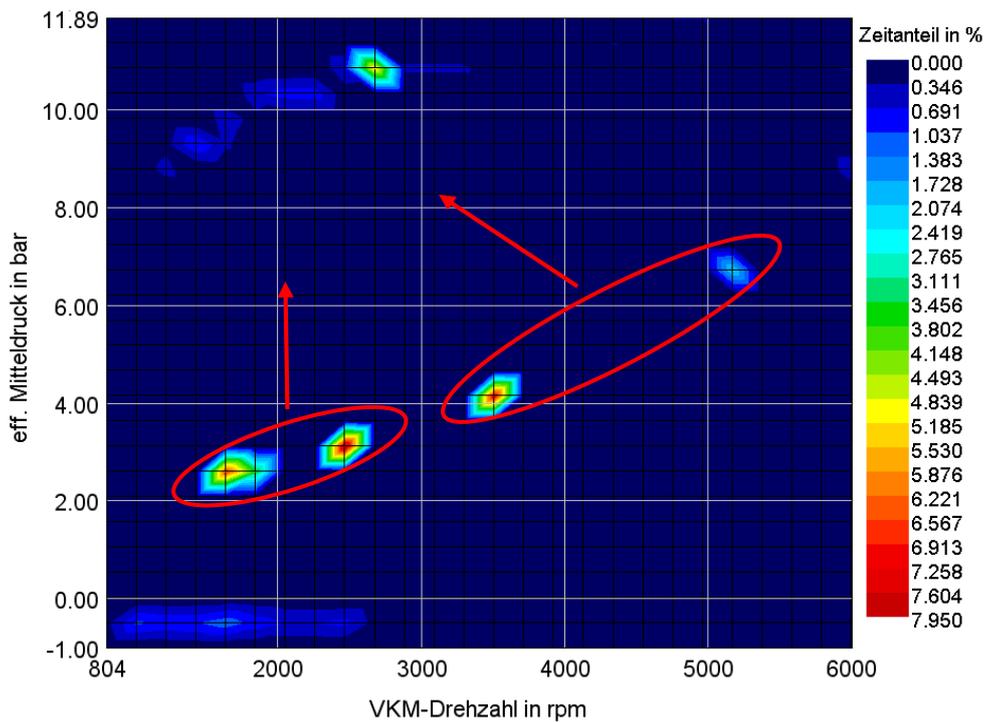


Abbildung 82: Zeitliche Verteilung der VKM-Betriebspunkte des Sapienter-Hybridkonzepts im NEFZ

Im parallelen Hybridkonzept hat zwar die VKM einen besseren spezifischen Verbrauch als im Sapienter-Hybridkonzept, doch durch den um ca. 10% schlechteren mechanischen Wirkungsgrad zwischen dem EM und der Radachse (Kapitel 3.3.1),

der für die Verluste beim elektrischen Antreiben sowie beim Rekuperieren ausschlaggebend ist, verschlechtert sich der Gesamtverbrauch im parallelem Konzept gegenüber dem Sapienter-Hybridkonzept.

5.2.2. Simulation im US06

Wird das parallele Hybridkonzept im US06 Fahrzyklus simuliert, so ergibt sich ein Verbrauch von **7,7 L/100km** (Sapienter-Konzept 7,3 L/100km). Durch die höhere Leistungsanforderung im US006 und durch die klein dimensionierte VKM muss im Vergleich zum NEFZ mehr Leistung über den EM und somit über den wirkungsgradschlechteren elektrischen Zweig für den Vortrieb erbracht werden. Aufgrund des schlechteren Wirkungsgrades zwischen dem EM und der Radachse des parallelen Konzeptes vergrößert sich der Verbrauchsunterschied, im Vergleich zum Sapienter-Konzept, je mehr Leistung vom EM zum Antrieb gefordert wird.

Zur Erklärung dient Abbildung 83, in der der Gesamt-Wirkungsgrad des Antriebsstranges über der Leistungsanforderung an das Fahrzeug aufgetragen wird. Je mehr Leistung gefordert wird, desto mehr muss aufgrund der schwachen VKM über den wirkungsgradärmeren elektrischen Zweig geführt werden und desto schlechter ist der gesamte Wirkungsgrad. Kann bei geringer Leistungsanforderung die gesamte Leistung über die VKM erbracht werden, so ist mit dem parallelen Hybridkonzept durch das Schaltgetriebe und durch die Lastpunktanhebung ein effizienterer Betrieb der VKM als im Sapienter-Konzept möglich. Durch die höheren mechanischen Verluste zwischen EM und Radachse beim parallelen Konzept, verschlechtert sich der Gesamtwirkungsgrad jedoch gegenüber dem neuen Konzept wenn höhere elektrische Leistungen gefordert werden und der Verbrauchsunterschied zwischen den beiden Konzepten vergrößert sich. Wie in Abbildung 83 eingezeichnet und mit der Simulation bestätigt ergibt sich im NEFZ, in dem moderate Leistungen gefordert werden, ein geringer Verbrauchsunterschied. Im Gegensatz wird im US06, in dem hohe Leistungen gefordert werden, der Unterschied im Verbrauch deutlicher.

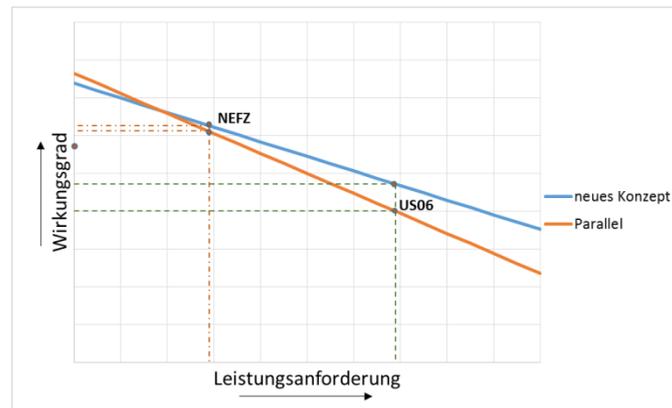


Abbildung 83: Wirkungsgradverlauf über der Anforderung an die Antriebsleistung

5.3. Paralleler Hybrid mit stärkerer VKM

Um das Sapienter-Konzept mit einem leistungsstärkeren Parallel-Hybrid vergleichen zu können, wurde das entsprechende Simulationsmodell angepasst und die maximale Leistung der VKM auf 75 kW erhöht. Der Verlauf der Leistung und des Drehmoments der VKM wird in Abbildung 84 dargestellt. Die Überlegung dabei war, dass bei hohen Leistungsanforderungen, wie sie im US06 Fahrzyklus auftreten, durch die größer dimensionierte VKM weniger Leistung über den wirkungsgradarmen elektrischen Zweig geführt werden muss als im Sapienter-Hybridkonzept mit schwacher VKM und sich somit ein Verbrauchsvorteil einstellt. Bei geringerer Leistungsanforderung sollten durch eine Lastpunktanhebung die Betriebspunkte der VKM in optimale Bereiche geschoben werden und somit der spezifische Verbrauch gesenkt werden.

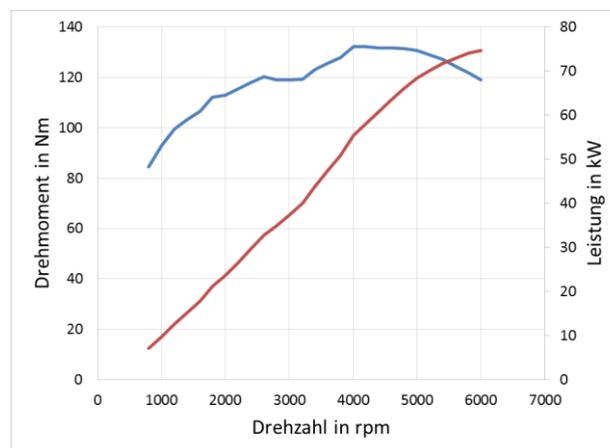


Abbildung 84: Drehmoment und Leistung der VKM mit 75 kW

5.3.1. Simulation im NEFZ

Die Betriebsstrategie im NEFZ wurde so gewählt, dass die vier Stadtzyklen elektrisch gefahren werden und im Überlandzyklus die Batterie durch eine Lastpunktanhebung während des VKM-Betriebes aufgeladen wird. In [Abbildung 85](#) sind die Leistungen der VKM (blau) und des EM (grün) über der Zeit aufgetragen und man kann sehr gut die Lastpunktanhebung ab Sekunde 800 an der positiven VKM-Leistung und der negativen EM-Leistung erkennen.

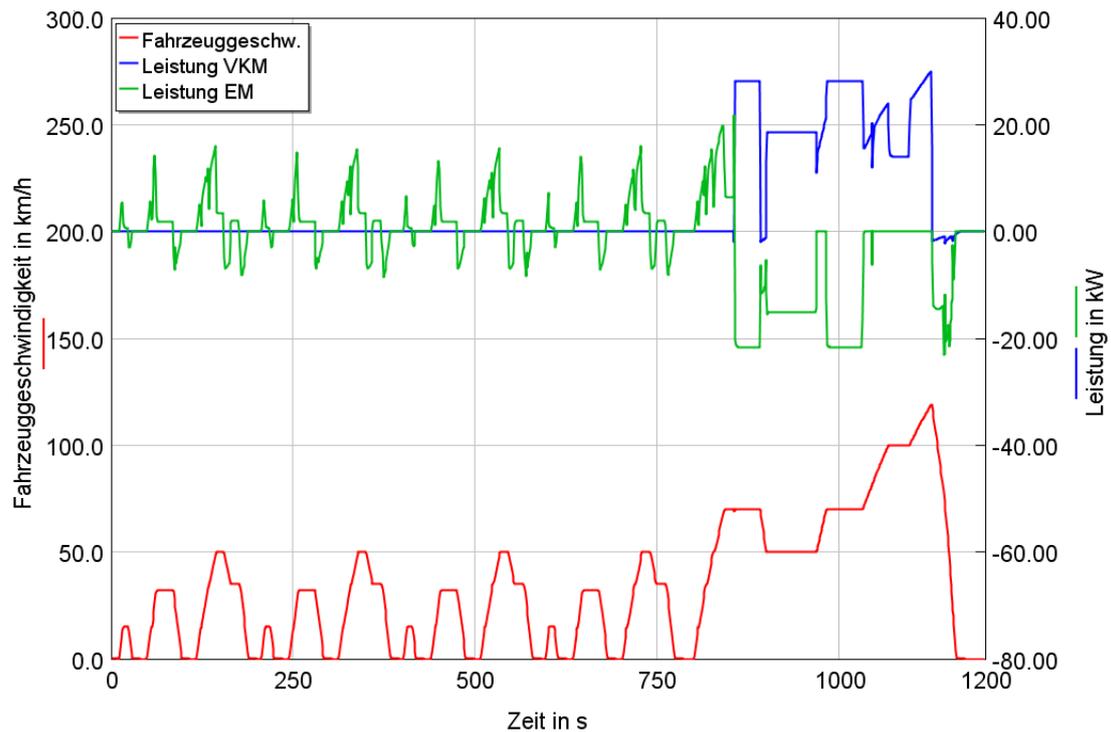


Abbildung 85: Leistungen VKM, EM und Geschwindigkeitsprofil im NEFZ

Mit dieser Betriebsstrategie ist mit der leistungsstärkeren VKM ein Verbrauch von **5 L/100km** im NEFZ möglich (4,5 L/100km im Sapienter-Konzept). Der spezifische Verbrauch der VKM stellt sich dabei auf 254 g/kWh ein. Die zeitliche Verteilung der Betriebspunkte der VKM wird in [Abbildung 86](#) gezeigt. Man erkennt, dass trotz der leistungsstarken VKM durch Lastpunktanhebung Betriebspunkte mit gutem Wirkungsgrad möglich sind. Trotz des geringen spezifischen Verbrauches der VKM stellt sich ein schlechterer Verbrauch als im Sapienter-Konzept ein und die leistungsstärkere VKM bringt keine Verbrauchsvorteile im NEFZ.

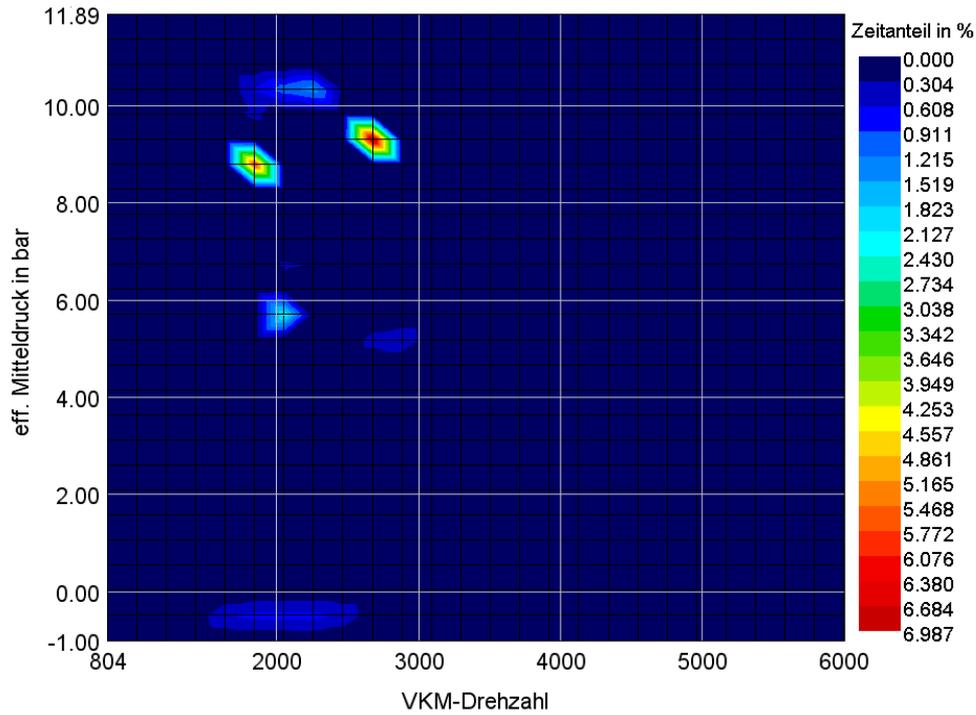


Abbildung 86: zeitliche Verteilung der Betriebspunkte der VKM mit 75 kW im NEFZ

5.3.2. Simulation im US06

Das parallele Konzept mit stärkerer VKM wurde auch im US06 Fahrzyklus, in dem mehr Leistung gefordert wird, simuliert. Durch die gewählte Betriebsstrategie wird das Fahrzeug in den ersten Rampen des Zyklus elektrisch angetrieben und anschließend bis zum Ende des Fahrzyklus durch die VKM mit Lastpunktanhebung. Es ergeben sich dabei die in [Abbildung 87](#) dargestellten Leistungen über der Zeit.

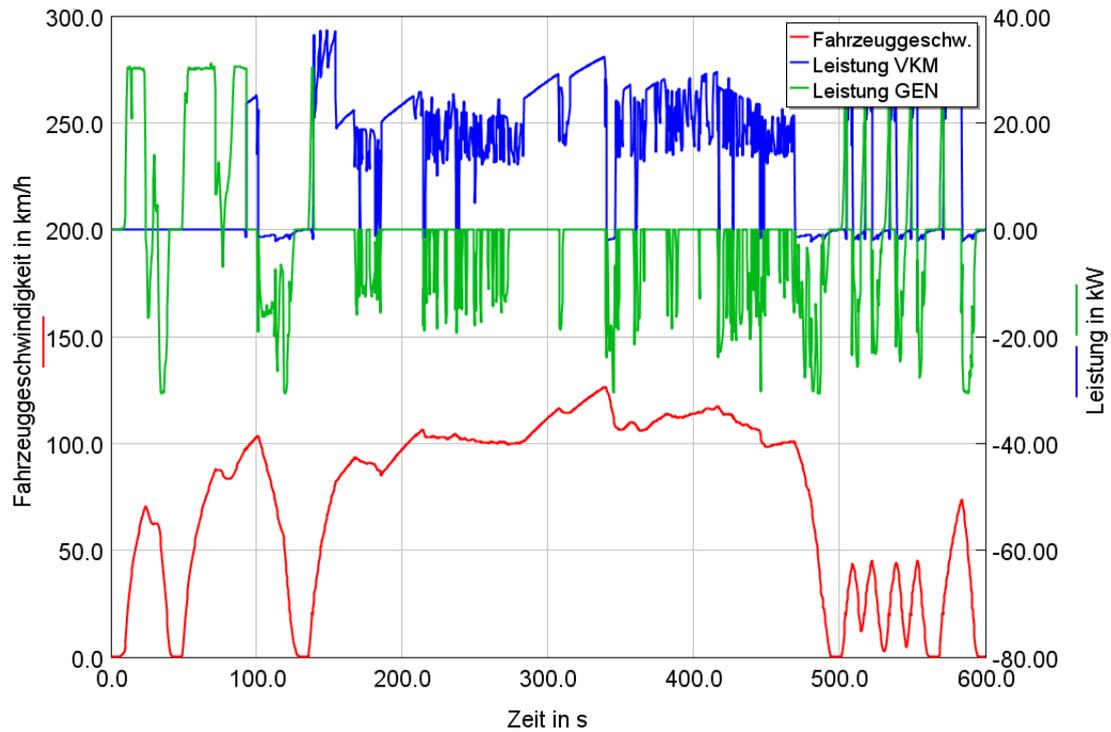


Abbildung 87: Leistung der VKM und des EM im US06-Zyklus

Im US06 Fahrzyklus wird mit den gewählten Komponenten ein Verbrauch von **6 L/100km** (Sapienter-Konzept 7,3 L/100km) bei einem spezifischen Verbrauch der VKM von 256 g/kWh erreicht. In [Abbildung 88](#) wird die zeitliche Verteilung der VKM-Betriebspunkte gezeigt und man erkennt, dass im US06 durch Lastpunktanhebung ebenfalls ein guter spezifischer Verbrauch mit der leistungsstärkeren VKM möglich ist.

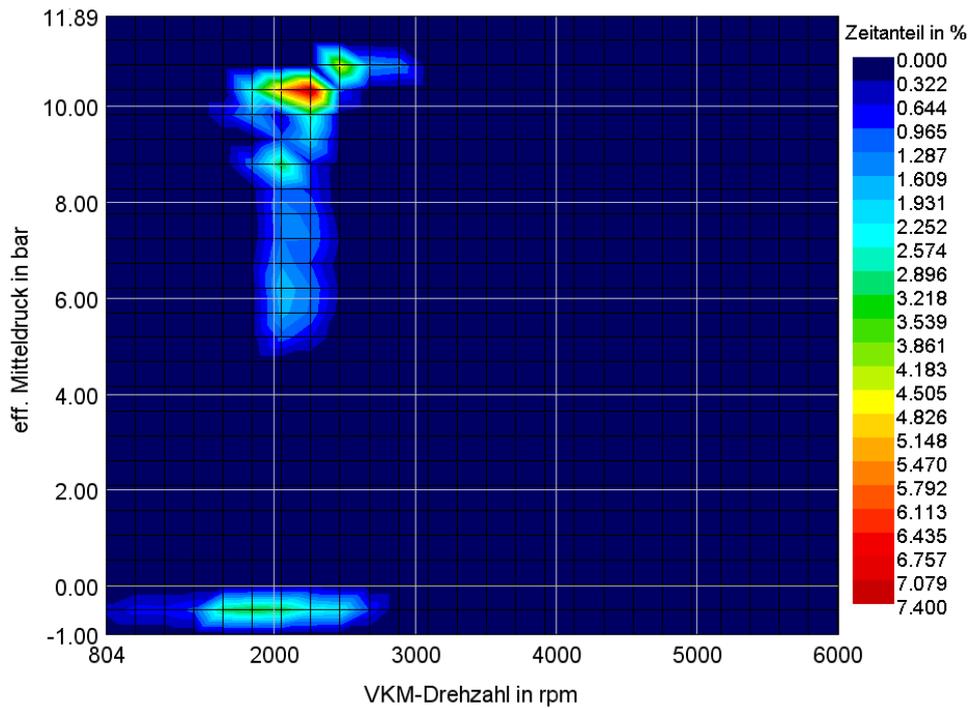


Abbildung 88: zeitliche Verteilung der Betriebspunkte der VKM mit 75 kW im US06

Mit dieser Simulation wurde gezeigt, dass durch die leistungsstärkere VKM ein erheblicher Verbrauchsvorteil gegenüber dem Sapienter-Konzept besteht, wenn höhere Leistungen gefordert werden. Dieser ist darin begründet, dass mit einer größer dimensionierten VKM nur bei Verbrauchsvorteilen durch eine Lastpunktanhebung Leistung über den wirkungsgradärmeren elektrischen Zweig geführt wird. Den geringen Lastpunkten durch das höhere maximale Drehmoment der VKM wird durch eine Lastpunktanhebung entgegen gewirkt und dadurch ist es trotzdem möglich, die VKM in wirkungsgradgünstigen Bereichen zu betreiben.

Im neuen Konzept ist es durch die schwache VKM unumgänglich, Antriebsleistung durch den EM zu erbringen und somit treten bei hohen Leistungsanforderungen, an denen hohe elektrische Leistungen gefordert werden, hohe Verluste durch den schlechten elektrischen Wirkungsgrad auf.

6. Bewertung des Sapienter-Hybridkonzeptes

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse zusammengefasst und das neuartige Sapienter-Hybridkonzept bewertet. Dabei wird neben der Bewertung des Verbrauchsvorteiles auch kurz auf die Fahrdynamik eingegangen, sowie mögliche Einsatzgebiete des Sapienter-Hybridkonzeptes vorgeschlagen.

6.1. Bewertung des Verbrauchsvorteiles

Wie in den Simulationen gezeigt, ist bei geringen Leistungsanforderungen wie sie im NEFZ auftreten ein geringerer Verbrauch gegenüber einem Parallel-Konzept möglich. Durch die hohen Lastpunkte der VKM bei Konstantfahrten, die auf Beschleunigungsvorgängen beschränkte Leistungsanforderung am EM und durch das effiziente Aufladen der Batterie im Stillstand ist ein Verbrauch im NEFZ von 4,5 L/100km möglich.

Bei höheren Leistungsanforderungen, wie sie im US06-Fahrzyklus auftreten, verschlechtert sich jedoch der Verbrauch durch den geringen elektrischen Wirkungsgrad und den hohen Leistungen am EM auf 7,3 L/100km. Wie aus Tabelle 8 zu entnehmen, ist mit einem Parallel-Hybridkonzept mit der gleichen VKM ein schlechterer Verbrauch zu erwarten. Durch eine stärkere VKM im Parallel-Hybridkonzept kann der Verbrauch im US06 um einiges verbessert werden und zeigt, dass bei hohen Leistungen der Vorteil des Sapienter-Hybridkonzeptes verschwindet.

Würde man die VKM-Leistung des Sapienter-Konzeptes erhöhen, so würde das unweigerlich die Lastpunkte der VKM in niedere Bereiche und somit zu schlechteren Wirkungsgraden verschieben. Dadurch würde der Vorteil der hohen Last an der VKM im Sapienter-Konzept verschwinden und der Verbrauch im NEFZ würde erhöht werden. Eine stärkere VKM-Leistung steht somit im Widerspruch zur ursprünglichen Idee des Sapienter-Konzeptes.

Tabelle 8: Verbräuche der simulierten Konzepte im NEFZ und US06

	NEFZ		US06	
	Verbrauch	spez. Verbrauch	Verbrauch	spez. Verbrauch
Sapienter-Hybridkonzept	<u>4,5 L/100km</u>	280 g/kWh	7,3 L/100km	281 g/kWh
Parallel-Hybrid mit gleichen Komponenten	4,8 L/100km	265 g/kWh	7,7 L/100km	265 g/kWh
Parallel-Hybrid, 75kW VKM	5,0 L/100km	254 g/kWh	<u>6,0 L/100km</u>	256 g/kWh

Aus diesen Erkenntnissen ist zu entnehmen, dass das Sapienter-Konzept in Fahrzeugen die geringen Leistungsanforderungen ausgesetzt sind und die sich bei geringen bis mittleren Geschwindigkeiten, wie sie im Stadtverkehr auftreten, bewegen, Verbrauchsvorteile bringt. Bei hohen Leistungen verschwindet dieser Vorteil und es tritt im Vergleich ein viel höherer Verbrauch auf.

In Abbildung 89 wird der Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstranges über der Leistungsanforderung an das Fahrzeug für die drei simulierten Konzepte aufgetragen. Zusätzlich wird noch der Wirkungsgrad, der sich in den verschiedenen Fahrzyklen ergibt, hervorgehoben. Der Wirkungsgrad des Sapienter-Konzepts, sowie des parallelen Konzepts mit den gleichen Komponenten wird mit steigender Leistungsanforderung geringer, da bei höherer Leistungsanforderung die VKM zu schwach ist und somit mehr Leistung über den wirkungsgradärmeren elektrischen Zweig geführt werden muss. Beim Parallel-Konzept mit der stärkeren VKM kann die höhere Leistungsanforderung durch die VKM alleine gedeckt werden und es ist keine Leistung aus dem wirkungsgradarmen elektrischen Zweig notwendig. Bei geringerer Leistungsanforderung kann durch eine Lastpunktanhebung der Gesamtwirkungsgrad des leistungsstärkeren Parallel-Hybrid verbessert werden und es ergibt sich ein nahezu konstanter Gesamtwirkungsgrad über der Leistungsanforderung. Wie aus Abbildung 89 erkennbar, ist bei geringer Leistungsanforderung wie im NEFZ mit dem Sapienter-Konzept der höchste Wirkungsgrad erzielbar. Bei höheren Leistungsanforderungen wie im US06-Zyklus nimmt der Wirkungsgrad des Sapienter-Konzeptes ab und der Vorteil einer leistungsstärkeren VKM im Parallel-

Konzept führt zu einem eindeutig geringeren Verbrauch, wie die Simulationsergebnisse zeigen.

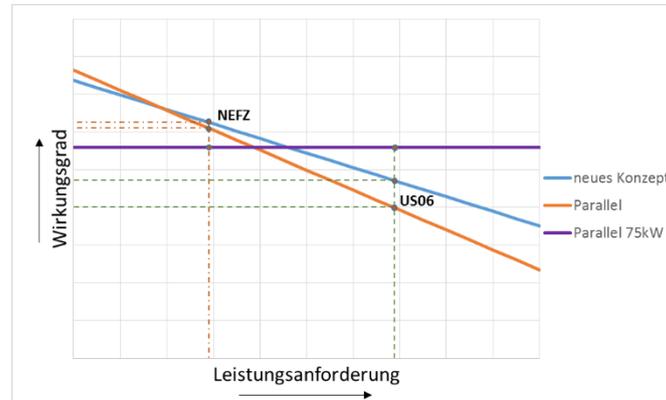


Abbildung 89: Wirkungsgradverlauf über der Anforderung an die Antriebsleistung

6.2. Bewertung der Fahrdynamischen Eigenschaften

Aufgrund des Wegfalls des Differentialgetriebes ergeben sich beim Betrieb des Sapienter-Konzeptes unterschiedliche Drehmomente an den Antriebsrädern. Am rechten Vorderrad wird das Drehmoment über die VKM aufgebracht während am linken Vorderrad über den EM Drehmoment auf die Straße übertragen wird.

Bei Beschleunigungsvorgängen, bei denen viel Leistung vom EM gefordert wird, ergibt sich am linken Vorderrad ein höheres Drehmoment als am rechten während bei ebenen Konstantfahrten, in denen nur die VKM Leistung abgibt, nur Drehmoment auf dem rechten Vorderrad auftritt.

Bei Rekuperationsvorgängen wirkt am linken Vorderrad negatives Drehmoment das als Bremsmoment wirkt, während das rechte Vorderrad nur durch die mechanische Bremse gebremst werden kann.

Wird in der Betriebsstrategie eine Lastpunktanhebung verwendet, so wirkt über die VKM am rechten Vorderrad positives Drehmoment während der EM durch Leistungsaufnahme negatives Drehmoment am linken Vorderrad bewirkt. Dadurch tritt ein hoher Drehmomentunterschied an den beiden Antriebsrädern auf.

Durch diese Umstände ergeben sich die in [Abbildung 90](#) und [Abbildung 91](#) dargestellten Drehmomentverläufe des linken (rot) und des rechten Vorderrades

(blau) während der Fahrzyklen NEFZ und US06. Man erkennt, dass das Drehmoment am linken Vorderrad (rot) durch die hohe erforderliche Leistung des EM beim Beschleunigen, sowie durch die Rekuperation von Bremsenergie während Verzögerungen in die positive sowie negative Richtung hohe Werte annimmt. Im Vergleich dazu treten am rechten Vorderrad (blau) durch die geringe Leistung der VKM nur moderate Drehmomente auf. Durch die höhere Leistungsanforderung im US06 ist der Drehmomentunterschied zwischen den beiden Antriebsrädern deutlich stärker als im NEFZ.

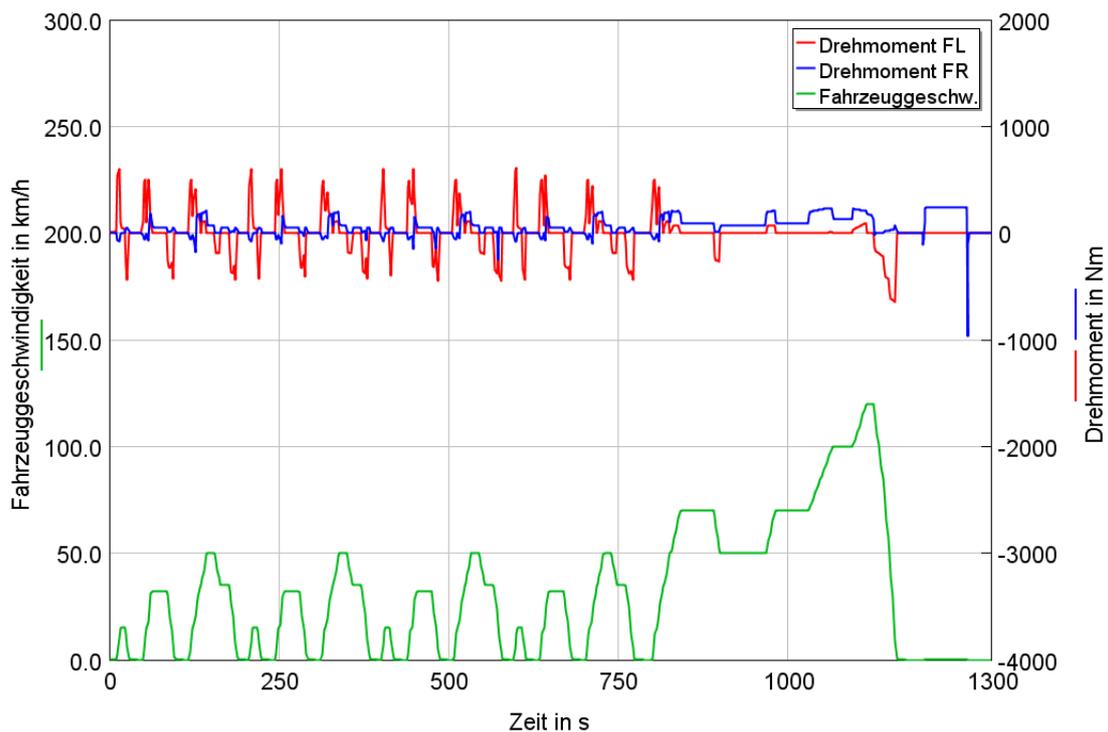


Abbildung 90: Drehmoment an den Antriebsrädern im NEFZ

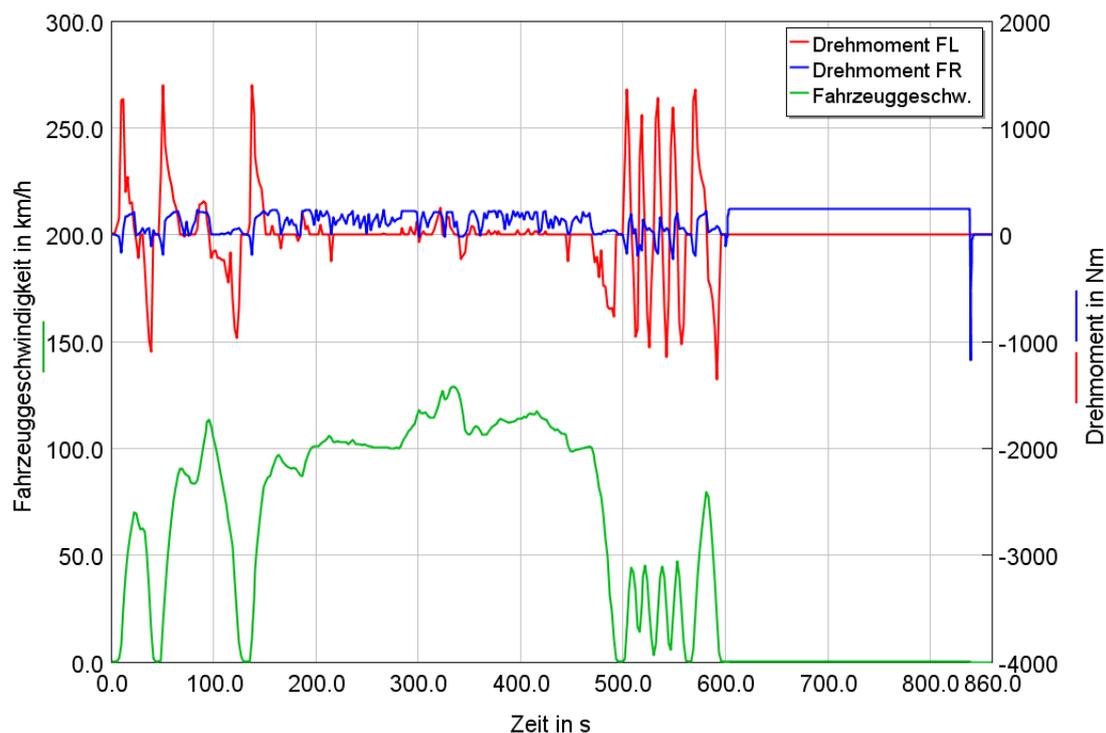


Abbildung 91: Drehmoment an den Antriebsrädern im US06-Zyklus

Diese Drehmomentunterschiede an den Antriebsrädern beeinflussen die fahrdynamische Stabilität während der Fahrt und können die Kurvenstabilität sowie die Fahrbarkeit des Fahrzeuges beeinträchtigen. Zusätzlich können sich die unterschiedlichen Antriebs- und Bremsmomente als störende Momente am Lenkrad negativ auf den Komfort auswirken. Für den Betrieb des Fahrzeuges ist es somit notwendig, diesen negativen Einflüssen durch eine geeignete Fahrzeugkonstruktion entgegen zu wirken.

6.3. Mögliches Einsatzgebiet des neuen Hybridkonzeptes

Wie aus den Simulationsergebnissen zu entnehmen, bringt das neue Hybridkonzept nur bei geringen Leistungsanforderungen einen Verbrauchsvorteil. Dadurch eignet sich das Konzept gut für einen Klein-PKW, der hauptsächlich innerstädtisch betrieben wird. Durch den guten mechanischen Wirkungsgrad während Rekuperationsvorgängen kann viel Bremsenergie rückgewonnen werden und bringt Vorteile im Stop-and-Go Verkehr gegenüber anderen Konzepten.

Bei hohen Geschwindigkeiten und hohen Beschleunigungen verschlechtert sich der Verbrauch aufgrund des geringen elektrischen Wirkungsgrades enorm und die

Fahrstabilität wird durch die Drehmomentunterschiede an den Antriebsrädern bei hohen Leistungsanforderungen stärker negativ beeinflusst. Somit ist das Sapienter-Konzept für Fahrzeuge die hohen Leistungsanforderungen ausgesetzt werden nicht sinnvoll und bringt keine Verbrauchsvorteile.

7. Zusammenfassung

Mit dieser Arbeit wurde ein weitgehender Überblick über die Möglichkeiten und Potentiale des neuartigen Sapienter-Hybridkonzeptes geschaffen. Es wurden aus der vorgestellten Konzept-Idee geeignete Komponenten für das Hybridfahrzeug abgeleitet und für die Umsetzung des Antriebskonzeptes passend dimensioniert. Neben der Beschreibung der mit dem Konzept möglichen Betriebsmodi wurden Betriebsstrategien ausgearbeitet, mit denen das Hybridkonzept kraftstoffsparend betrieben werden kann. Mithilfe des Software Paketes GT Suite 7.3 wurde ein Längsdynamik-Simulationsmodell erstellt, mit dem Simulationen zur Bewertung des Konzeptes durchgeführt wurden. Um den Kraftstoffverbrauch, sowie die Potentiale und Eigenschaften des Konzeptes bewerten zu können, wurden unterschiedliche Fahrzyklen simuliert und die Ergebnisse dokumentiert. Zu Vergleichszwecken wurde ein Simulationsmodell für einen Parallel-Hybrid erstellt und die Eigenschaften sowie die Kraftstoffverbräuche in den Fahrzyklen mit dem Sapienter-Konzept verglichen. Als Abschluss wurden die Ergebnisse zusammengefasst, das Hybridkonzept hinsichtlich der Fahreigenschaften bewertet und mögliche Einsatzgebiete des Sapienter-Hybridkonzeptes vorgeschlagen. Mit dieser Arbeit wurde die von Prof. Fiala vorgeschlagene Konzept-Idee für einen hybriden Antriebsstrang ausführlich untersucht, ein guter Überblick über die Möglichkeiten und Potentiale des Konzeptes gegeben und eine Grundlage für weiterführende Studien über das neuartige hybride Antriebskonzept geschaffen.

8. Literaturverzeichnis

- [1] P. Hofmann: Hybridfahrzeuge. Wien: Springer-Verlag, ISBN: 978-3-211-89190-2, 2010.
- [2] R. Fischer; et. al.: Das Getriebebuch. Wien: Springer-Verlag, ISBN: 978-3-7091-0876-5, 2012.
- [3] Volkswagen Österreich: website: www.volkswagen.at, [Online] www.volkswagen.at/media/Kwc_Basic_DownloadTag_Component/339-2074-downloads-47575-downloadTag/default/ab27a7f64ca7a46f0a7cdf0a62fe05b2/1399959592/polo_p_reisliste_01_2014_web.pdf. [Zugriff am 6 August 2014].
- [4] A. Miller; et. al.: „The GM "Voltec" 4ET50 Multi-Mode Electric Transaxle,“ *SAE Int. J. Engines*, 4 12 2011.
- [5] E. Kirchner: Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-540-35288-4, 2007.
- [6] H. Wallentowitz und K. Reif: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, ISBN: 978-3-528-03971-4, 2006.
- [7] Street-Magazine: website: street-magazine.com, [Online] http://street-magazine.com/wp-content/uploads/3._NEFZ.jpg. [Zugriff am 7 Juli 2014].
- [8] Transport Canada: website: www.tc.gc.ca, [Online] <http://www.tc.gc.ca/eng/programs/environment-etv-pagepolo-testplan-eng-1772.htm>. [Zugriff am 16 Juli 2014].
- [9] Transport Canada: website: www.tc.gc.ca, [Online] <http://www.tc.gc.ca/media/images/programs/prius04.gif>. [Zugriff am 16 Juli 2014].
- [10] J. Looman: Zahnradgetriebe. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-540-89459-9, 2009.