

Dissertation

Electric Vehicle with Combustion Engine Assist

Das EV-CEA-Konzept

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften

vorgelegt dem
**Institut für Verbrennungskraftmaschinen und
Thermodynamik**

Dipl.-Ing. Christian BACHER

15. Januar 2014

Erstgutachter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut EICHLSEDER

Zweitgutachter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian BEIDL

In Liebe und Dankbarkeit meiner Familie gewidmet

Vorwort & Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der IVD Prof. Hohenberg GmbH in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz.

Für die Ermöglichung und Betreuung der Dissertation möchte ich mich beim Geschäftsführer der IVD Prof. Hohenberg GmbH, Herrn em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Günter Hohenberg und beim Vorstand des Institutes für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder recht herzlich bedanken.

Weiters gilt mein besonderer Dank Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Beidl für die Übernahme der Zweitbegutachtung, sowie den Kollegen am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der TU Darmstadt für die außerordentlich gute Zusammenarbeit.

Ich danke auch allen Kollegen bei IVD und der Fa. qpunkt für die Unterstützung und das sehr angenehme Arbeitsklima.

Ein besonderer Dank gilt des Weiteren der Fa. tectos, und der Fa. AVL LIST. Nur durch ihre Unterstützung konnte die Arbeit in der vorliegenden Qualität realisiert werden.

Auch dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) bin ich zu Dank verpflichtet, da durch die Förderung der CEA-Konzeptentwicklung über die Österreichische Forschungsgesellschaft (FFG) ein wesentlicher Beitrag zur Umsetzung dieser Arbeit geleistet wurde.

Ein großer Dank gebührt insbesondere auch folgenden Personen:

Peter Salmutter für das kritische Korrekturlesen der Arbeit und seinen konstruktiven Vorschlägen.

Meiner Familie und meinen Freunden, die mir durch ihre Unterstützung immer den Rücken gestärkt haben.

Und zu guter Letzt meiner Frau Susanne. Ihr Verständnis, ihre Unterstützung und ihre Geduld während der letzten Jahre waren von unschätzbarem Wert und letztlich der Schlüssel für den erfolgreichen Abschluss meiner Arbeiten.

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

Kurzfassung

Diese Dissertation befasst sich mit der Entwicklung eines kompakten Hybridantriebsstrangs für Fahrzeuge aus dem A-C-Segment, dem sogenannten „Electric Vehicle with Combustion Engine Assist Konzept“ oder kurz „EV-CEA-Konzept“. Zur Herleitung der EV-CEA-Hybridarchitektur wurden vorhandene Hybridkonzepte untersucht und im Sinne einer intelligenten Vereinfachung auf die wesentlichen Komponenten reduziert. Dabei hat sich herausgestellt, dass eine parallele Antriebsstrangstruktur einer seriellen vorzuziehen ist. Des Weiteren nutzt das Konzept nur einen Elektromotor, was entscheidende Vorteile hinsichtlich Packaging, Gewicht und Kosten bringt. Zur Bewertung wurde eine Basis-Betriebsstrategie entwickelt und das System mit Hilfe zweier Simulationsprogramme untersucht. Das Ergebnis zeigt, dass der Einsatz des Verbrennungsmotors insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten sinnvoll ist, und die parallele Antriebsstrangstruktur bei mittleren und höheren Geschwindigkeiten entscheidende Wirkungsgradvorteile gegenüber dem seriellen Range-Extender-Betrieb besitzt. Auch konnte nachgewiesen werden, dass die ermittelten Systemkomponenten, mit denen das Konzept real aufgebaut wurde, für den Betrieb im Neuen Europäischen Fahrzyklus und auf der Autobahn ausreichend dimensioniert sind. Als entscheidende Herausforderung bei der Konzeptrealisierung haben sich die auftretenden Drehschwingungen durch den Einsatz eines 2-Zylinder-Verbrennungsmotors herausgestellt. Zur Lösung dieser Problematik wurden im Rahmen der EV-CEA-Entwicklungsarbeiten gemeinsam mit der Technischen Universität Darmstadt und der Fa. tectos zwei Ansätze entwickelt. In der ersten Variante, im sogenannten EV-CEA-Basisaufbau, werden diese durch eine weiche Koppelung von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor gedämpft. In der zweiten Variante, im sogenannten directE-Aufbau, erfolgt eine Drehschwingungsbeeinflussung durch den Elektromotor.

Zur Verifikation der Simulationsergebnisse und zur Funktionsuntersuchung wurde das Konzept real mit am Markt vorhandenen Komponenten inklusive eines Entwicklungsprüfstandes aufgebaut. Dabei wurde beim Prüfstand insbesondere auf einen kompakten und modularen Aufbau Wert gelegt. Die Prüfstandsuntersuchungen ergaben, dass ein Starten der Verbrennungskraftmaschine durch einen Starter und Zukoppeln bei Synchrondrehzahl anderen Varianten vorzuziehen ist. Hinsichtlich der Zertifizierung konnte eine Diskrepanz zwischen einer zertifizierungsoptimalen und kundenoptimalen Betriebsstrategie ermittelt werden. Aber auch im zweiten Fall wurde das CO₂-Ziel von weniger als 50 g/km erreicht. Nachteilig haben sich die Schleppverluste der eingesetzten permanenterregten Synchronmaschine herausgestellt. Hier ist eine fremderregte Maschine der Permanenterregten vorzuziehen. Der Drehschwingungsvergleich des 2-Zylinder-Verbrennungsmotors gegenüber einem 3-Zylinder-Verbrennungsmotor zeigt, wie zu erwarten, in Kombination mit der EV-CEA-Konzeptanordnung deutliche Vorteile des 3-Zylinder-Verbrennungsmotors. Hinsichtlich Packaging kann keine eindeutige Tendenz abgeleitet werden.

Abstract

This thesis deals with the development of a compact hybrid powertrain for vehicles in the A- to C-segment, the so-called „Electric Vehicle with Combustion Engine Assist concept“ or, in abbreviated form, „EV-CEA-concept“. To derivate the architecture of the EV-CEA-concept, existing hybrid concepts were reduced to their essential components. So the EV-CEA-concept uses a parallel drivetrain structure with just one electric motor. This provides advantages concerning packaging, weight and costs. To evaluate the concept, a basic-operation-strategy was developed and the system was investigated by using two different simulation models. The results show that the combustion engine should be used at higher vehicle speeds. The results also show that the parallel drivetrain structure provides efficiency advantages especially at medium and high velocities compared to serial drivetrain structures. Furthermore, proof was found that the power of the determined system components which are used in the EV-CEA-prototype suffices to operate the concept in the New European Driving Cycle and on highways. The main problem in the concept realization has become the torsional vibrations, which are caused in the use of the 2-cylinder-engine. In the course of the EV-CEA-concept development works, together with the Technische Universität Darmstadt and the company tectos, two approaches have been developed to solve this problem. In the first EV-CEA-version (Basis-Version) the torsional vibrations were damped by a soft connection between combustion engine and the electric motor. In the second version the torsional vibrations of the 2-cylinder-engine are influenced by the electric motor.

To verify the simulation results, the EV-CEA-concept was build up by using available components. In addition a compact and modular development-test-bench was built up. Regarding the starting process of the EV-CEA-concept investigations on the test bench show that a conventional starter should be used and the clutch should be closed at synchronous speed of the crankshaft and electric motor. The investigation of the EV-CEA-certification shows a discrepancy between the certification-optimized strategy and the customer-optimized strategy. However, even with the customer-optimized strategy the CO₂-target (lower than 50 g/km) was reached. Because of the high drag losses the permanent-magnet synchronous machine shows disadvantages while combustion engine operation. Therefore, an externally excited machine should be preferred. The comparison of the 2-cylinder-engine with a 3-cylinder-engine shows as expected a clear advantage of the 3-cylinder-engine regarding the torsional vibrations. Concerning the packaging no clear tendency could be detected.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort & Danksagung	I
Eidesstattliche Erklärung	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Nomenklatur	VII
Einleitung	1
1 Hybridisierung - Allgemeine Gesichtspunkte	3
1.1 Politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen	3
1.2 Das Batteriefahrzeug als Lösung?	6
1.2.1 Reichweitenproblematik rein elektrisch betriebener Fahrzeuge . . .	7
1.2.2 Erhöhung der Reichweite durch Hybridisierung	9
1.3 Die historische Entwicklung des Hybridantriebs	11
1.4 Klassifizierung der Hybridfahrzeugantriebe	15
1.4.1 Klassifizierung hinsichtlich Systemtopologie	15
1.4.2 Klassifizierung hinsichtlich Systemleistung	21
1.4.3 Der Plug-In-Hybrid	25
1.5 Zertifizierung von Hybridfahrzeugen innerhalb der Europäischen Union . .	26
2 EV-CEA-Konzeptfindung	30
2.1 Hybridisierungswege	30
2.2 EV-CEA-Basiskonzept	32
2.3 EV-CEA-Betriebsmodi	35
2.4 Ermittlung geeigneter Systemkomponenten	37
2.4.1 Verbrennungskraftmaschine	38
2.4.2 Elektromotor	42
2.4.3 Kupplung	51
2.4.4 Getriebe	52
2.4.5 Batterie	53
3 EV-CEA-Konzeptsimulation	56
3.1 Das IVD/TUD-Simulationsmodell	56
3.1.1 Fahrereinflussmodellierung	57
3.1.2 Verlustmodell-Ansatz	58
3.2 InMotion powered by Carmaker	59

3.3	Das EV-CEA-Basisfahrzeug	59
3.4	Entwicklung einer Basis-Betriebsstrategie	60
3.5	Integration des EV-CEA-Konzeptes und der Betriebsstrategie in InMotion	62
3.6	Ermittlung des Leistungsbedarfs von VKM und E-Motor	65
3.6.1	Leistungsbedarf im NEDC	65
3.6.2	Leistungsbedarf bei Autobahnfahrt	66
3.7	Aufteilung der Antriebsleistung bei Autobahnfahrt	68
3.8	Volllastbeschleunigung	69
3.9	Vergleich serieller und paralleler RE-Betrieb	70
3.10	Drehschwingungsuntersuchung	72
3.10.1	Simulatorische Untersuchung des EV-CEA-Basisaufbaus	74
3.10.2	Theoretische Betrachtung der Drehschwingungsberuhigung mittels directE	77
4	Konzeption und Aufbau von Demonstrator und Prüfstand	80
4.1	Konzeption und Aufbau des EV-CEA-Demonstrators	80
4.2	Konzeption und Aufbau des modularen Systemprüfstandes	83
4.2.1	Ansteuerung der Systemkomponenten	86
4.2.2	Aufbau der Messtechnik	89
4.2.3	Erweiterung zum XiL-Systemprüfstand	91
4.3	Ermittlung der notwendigen Daten zur Drehschwingungsuntersuchung	92
4.4	Überprüfung der Trägheitsmomente mittels Auslaufversuch	95
5	Funktionsuntersuchung des EV-CEA-Konzeptes (Proof of concept)	99
5.1	Eigenfrequenzen EV-CEA-Basisaufbau	99
5.2	Analyse der VKM-Zuschaltvarianten	102
5.3	Untersuchung der EV-CEA-Betriebsstrategie	105
5.3.1	Reichweite mit elektrischer Verfügbarkeit	106
5.3.2	Zertifizierungsergebnisse des EV-CEA-Konzeptes	107
5.3.3	Katalysatortemperatur und Emissionen im Testzyklus	108
5.4	Schleppverluste des Elektromotors bei VKM-Betrieb	111
5.5	Verluste durch pulsierende Beaufschlagung des Elektromotors	112
6	2-Zylinder vs. 3-Zylinder-Motor	115
6.1	Vergleich hinsichtlich Drehschwingungen	115
6.2	Vergleich hinsichtlich Packaging	120
7	Zusammenfassung und Ausblick	121
	Abbildungsverzeichnis	123
	Literaturverzeichnis	126
	Anhang	133

Nomenklatur

Abkürzungen

ASM	Asynchronmaschine
BMVIT	Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
BMWA	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
CAD	Computer-Aided Design
CEA	Combustion Engine Assist
CIT	Carmaker Interface Toolbox
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EiL	Engine in the Loop
EV	Electric Vehicle
FFG	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
GM	Gleichstrommaschine
GRM	geschaltete Reluktanzmaschine
HEV	Hybrid Electric Vehicle
LE	Leistungselektronik
Li-Ion	Lithium Ionen
NEDC	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NOVC-HEV	Not Off Vehicle Charging - Hybrid Electric Vehicle
OEM	Original Equipment Manufacturer
OVC-HEV	Off Vehicle Charging - Hybrid Electric Vehicle
PCU	Power Control Unit
PHEV	PlugIn-Hybrid Electric Vehicle

PMSM	permanenterregte Synchronmaschine
RE	Range Extender
SM	Synchronmaschine
SOC	State of charge
SUV	Sport Utility Vehicle
TDI	Dieselmotor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung
UDC	Urban Driving Cycle
VCL	Vehicle Control Layer
VKM	Verbrennungskraftmaschine

Griechische Formelzeichen

α_{act}	Aktuelle Gaspedalstellung	[°]
$\ddot{\phi}_1$	Winkelbeschleunigung Masse 1	[rad/s ²]
$\ddot{\phi}_2$	Winkelbeschleunigung Masse 2	[rad/s ²]
$\ddot{\phi}_3$	Winkelbeschleunigung Masse 3	[rad/s ²]
$\dot{\phi}_1$	Winkelgeschwindigkeit Masse 1	[rad/s]
$\dot{\phi}_2$	Winkelgeschwindigkeit Masse 2	[rad/s]
$\dot{\phi}_3$	Winkelgeschwindigkeit Masse 3	[rad/s]
ϕ_1	Winkel Masse 1	[rad]
ϕ_2	Winkel Masse 2	[rad]
ϕ_3	Winkel Masse 3	[rad]
Θ	Massenträgheit	[kgm ²]
Θ_1	Massenträgheit Masse 1	[kgm ²]
Θ_2	Massenträgheit Masse 2	[kgm ²]
Θ_3	Massenträgheit Masse 3	[kgm ²]
Θ_{ges}	Gesamtmassenträgheit	[kgm ²]

Lateinische Formelzeichen

c_{12}	Federsteifigkeit Feder 12	[Nm/rad]
----------	---------------------------	----------

c_{23}	Federsteifigkeit Feder 23	$[Nm/rad]$
d_{12}	Dämpfungskonstante Dämpfer 12	$[Nm/rad]$
d_{23}	Dämpfungskonstante Dämpfer 23	$[Nm/rad]$
D_e	elektrische Reichweite	$[km]$
D_{NEDC}	Länge eines NEDC-Testzyklusses ($\approx 11km$)	$[km]$
D_{OVC}	Reichweite aus Mischbetrieb	$[km]$
HG	Hybridisierungsgrad	$[\%]$
I	Strom	$[A]$
M_{iA}	Zertifizierungsergebnis Modus A (CO_2, CO, NO_x, HC)	$[-]$
M_{iB}	Zertifizierungsergebnis Modus B (CO_2, CO, NO_x, HC)	$[-]$
M_{ie}	Zertifizierungsergebnis (D_e) (CO_2, CO, NO_x, HC)	$[-]$
M_{iOVC}	Zertifizierungsergebnis (OVC) (CO_2, CO, NO_x, HC)	$[-]$
$Md_{requested}$	Angefordertes Drehmoment	$[Nm]$
N	Anzahl der vollständig gefahrenen NEDCs	$[-]$
n_{EM}	Elektromotordrehzahl	$[min^{-1}]$
n_{VKMmin}	minimale Verbrennungsmotordrehzahl	$[min^{-1}]$
P_{EM}	Elektrische Leistung	$[kW]$
P_{LG}	Elektrisches Leistungsgewicht	$[\frac{kW}{t}]$
P_{me}	Effektiver Mitteldruck	$[bar]$
P_{mi}	Indizierter Mitteldruck	$[bar]$
P_{mr}	Reibmitteldruck	$[bar]$
$P_{mSchlepp}$	Schleppmitteldruck	$[bar]$
P_{mV-HD}	Kompressions- und Expansionsmitteldruck	$[bar]$
P_{mV-LW}	Ladungswechselmitteldruck	$[bar]$
R_{Cu}	Kupferwiderstand	$[\omega]$
SOC_{Min}	minimaler State of Charge	$[\%]$
V_H	Hubvolumen	$[m^3]$

Einleitung

Der Klimawandel und dessen Folgen führen zu einem stetig steigenden Umweltbewusstsein. Daraus resultieren Forderungen zur Verringerung der anthropogen verursachten Treibhausmissionen, wobei auch der Verkehr einen, im Vergleich zu anderen Emittenten zwar verhältnismäßig geringen, aber doch entscheidenden Anteil am Ausstoß des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid beiträgt (siehe dazu auch [7]). Der Gesetzgeber wirkt dieser Problematik durch Vorgabe von strengeren gesetzlichen Verbrauchs- und Emissionsgrenzwerten von Kraftfahrzeugen entgegen. Doch auch die Aussicht auf Verknappung fossiler Energieträger stärkt die Forderung nach effizienteren Antriebskonzepten.

Das große Ziel muss lauten: auch für die Zukunft die heutige individuelle Mobilität aufrecht zu erhalten. Dies kann jedoch nur durch umfangreiche Investitionen in die Entwicklung effizienterer und emissionsärmerer Verbrennungsmotoren und/oder alternativer Antriebskonzepte erreicht werden.

Neben Downsizing und Downspeeding des Verbrennungsmotors stehen Hybridkonzepte im Fokus der heutigen Antriebsentwicklung. Eine Kombination von Elektro- und Verbrennungsmotor ermöglicht die Vorteile beider Antriebsarten zu verbinden, wobei sich der Elektromotor zweifelsfrei besser bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten und kurzen Fahrstrecken wie im Stadtverkehr eignet. Bei höheren Geschwindigkeiten und längeren Strecken hingegen ist und bleibt der Verbrennungsmotor in Verbindung mit flüssigen Kraftstoffen als Energieträger überlegen.

Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Konzeptentwicklung eines neuartigen, elektrifizierten Antriebstrangs für ein Fahrzeug aus dem A-C-Segment, welches die Vorteile von Verbrennungs- und Elektromotor kombiniert. Dazu soll ausgehend von am Markt vorhandenen Hybridkonzepten, nach dem Grundsatz der intelligenten Vereinfachung (Intelligent Simplicity) ein Konzept abgeleitet werden, das den Anforderungen an ein Stadtfahrzeug trotz einer wesentlichen Systemvereinfachung und damit einhergehender Kostenreduktion weiterhin erfüllt. Wesentlich ist auch, dass der E-Motor die dominierende Antriebsquelle darstellen soll und somit bei Bedarf auf das mehrstufige Getriebe verzichtet werden kann.

Aufbau der Arbeit

Der erste Abschnitt der Dissertation stellt die gesellschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen dar. Anschließend werden die Problemkreise von reinen Elektrofahrzeugen diskutiert und das Potential zur Erhöhung der Reichweite durch Hybridisierung dargestellt. Darauf folgt eine historische Betrachtung der Hybridfahrzeugentwicklung, welche mit einer Beschreibung des momentanen Stands der Technik und den aktuellen Trends in der Hybridisierung endet. Im Anschluss erfolgt eine Übersicht über die Klassifizierung von Hybridfahrzeugen. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einem Überblick über den Zertifizierungsvorgang von Hybridkonzepten innerhalb der Europäischen Union.

Der zweite Teil befasst sich mit den Möglichkeiten der Hybridisierung und der Definition des CEA-Basis-Konzeptaufbaus als Ergebnis der Studie. Danach wird eine Beschreibung der aus dem Konzept resultierenden Betriebsmodi durchgeführt und geeignete Systemkomponenten zum Aufbau des EV-CEA-Demonstrators ermittelt.

Im dritten Abschnitt erfolgt eine simulatorische Untersuchung des Konzeptes. Beginnend mit einer Beschreibung der verwendeten Simulationsmodelle und der Entwicklung einer geeigneten Betriebsstrategie erfolgt eine Ermittlung des Leistungsbedarfs im NEDC-Testzyklus und bei Autobahnfahrten. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einer schwingungstechnischen Untersuchung des Prüfstandaufbaus und einer Beschreibung eines, im Projekt als „directE“ bezeichneten, innovativen Drehschwingungsberuhigungskonzeptes.

Abschnitt vier und fünf beschreiben den Versuchsaufbau und die experimentellen Arbeiten am Motorenprüfstand. Ziel dieser Kapitel ist das Funktionsmuster mit der dazugehörigen Ansteuerung am Prüfstand aufzubauen und zu untersuchen. Des Weiteren werden die Messergebnisse den Ergebnissen der in Abschnitt drei durchgeführten Simulationen gegenübergestellt und diese so validiert.

Zur Klärung der Fragestellung, ob die Vorteile eines 2-Zylinders die dazu notwendigen Aufwendungen rechtfertigen, oder ob ein 3-Zylinder-Verbrennungsmotor dem 2-Zylinder vorzuziehen ist, wird im letzten Abschnitt ein 2-Zylinder-Verbrennungsmotor einem 3-Zylinder gegenübergestellt und hinsichtlich Drehungleichförmigkeit und Packaging verglichen.

Kapitel 1

Hybridisierung - Allgemeine Gesichtspunkte

Im ersten Kapitel werden die allgemeinen Gesichtspunkte der Hybridisierung beleuchtet. So soll eine Basis für die weiteren Abschnitte geschaffen werden.

1.1 Politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen

Der natürliche CO₂-Kreislauf der Erde wird von Menschen verursachten Treibhausemissionen beeinflusst. Dieser Zusammenhang gilt nach Untersuchungen von Eiskernbohrungen in der Antarktis als erwiesen [56]. Die Auswirkungen hinsichtlich Klimaerwärmung sind dabei massiv. Zwar sind die anthropogenen Treibhausemissionen gegenüber dem natürlichen CO₂-Kreislauf gering, trotzdem gerät dadurch das System aus dem Gleichgewicht und verursacht einen deutlichen Anstieg der Erdtemperatur [4]. Im zusammenfassenden UNO Klimabericht von 2007 ist diese Problematik durch einen Vergleich der jährlichen mittleren Erdtemperatur mit und ohne anthropogenen Treibhausemissionen dargestellt (Abbildung 1.1). Der erhöhte Temperaturanstieg durch den anthropogenen Einfluss ist offensichtlich.

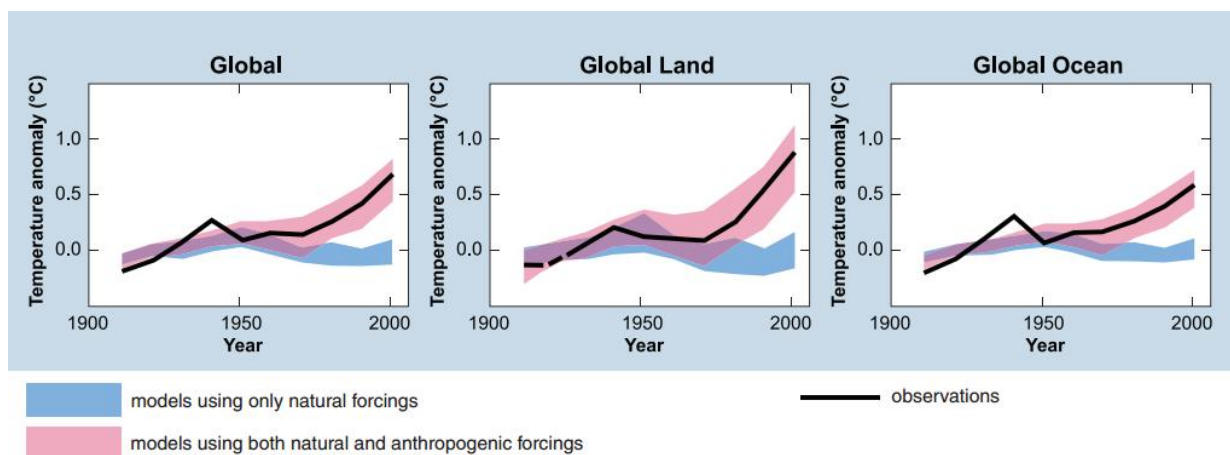


Abbildung 1.1: Vergleich der Erderwärmung mit/ohne anthropogenem Einfluss [14]

Die Angst von den negativen Auswirkungen dieses Temperaturanstiegs führt zu einem stärkeren Umweltbewusstsein und zwingt den Gesetzgeber schließlich zu entsprechenden Gegenmaßnahmen. Diese treffen auch den Verkehr maßgeblich. Zwar macht dieser nur rund 26% der gesamten anthropogenen Treibhausgasemissionen aus (Abbildung 1.2 - links), hat jedoch im Vergleich zwischen 1990 und 2011 stark zugelegt (Abbildung 1.2 - rechts). Greift die Politik hier nicht ein, wird sich dieser Trend insbesondere international weiter fortsetzen. Denn, wie ein aktueller Bericht des „International Monetary Fund“ zeigt, gibt es einen starken Zusammenhang zwischen der Wirtschaftsleistung eines Landes und der Fahrzeugdichte. Das Wachstumspotential ergibt sich insbesondere in Schwellenländern und deren rapiden Anstieg der Mittelschichten [45].

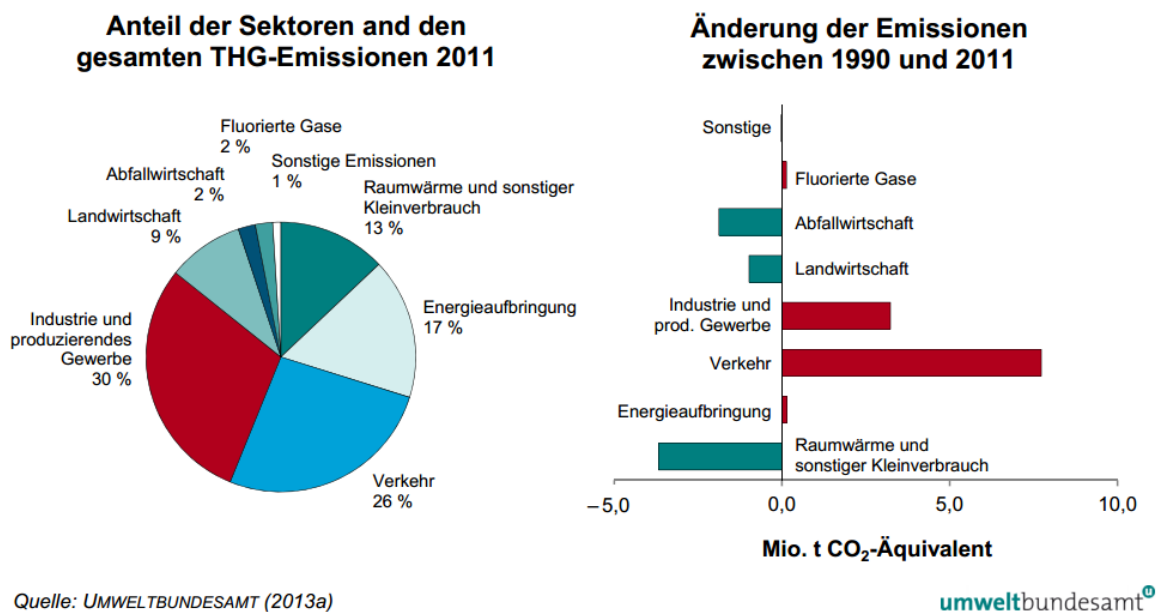


Abbildung 1.2: Anteile der Treibhausgasemissionen nach Sektor [3]

Die Politik versucht dieser Problematik durch Maßnahmen zur Förderung von Fahrzeugen mit geringen CO₂-Emissionen entgegenzuwirken. Diese Maßnahmen machen sich in Form einer Reduktion der maximal erlaubten CO₂-Emissionen und durch spezielle Anreize für Fahrzeughersteller (sogenannten „Supercredits“) bemerkbar. Beide Punkte werden im Folgenden kurz beschrieben.

CO₂-Grenzwerte beim Pkw

Wie auf der Internetpräsenz des Umweltbundesamtes angeführt, wurde am 23. April 2009 die neue Verordnung zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen veröffentlicht. Darin wurde ein CO₂-Grenzwert von 130 g/km für 2012 festgelegt. Ursprünglich bestand der Vorschlag den Grenzwert auf 120 g/km zu reduzieren. Der Bonus von 10 g/km ist auf die zusätzlichen Maßnahmen zurückzuführen, die nicht unmittelbar

mit Motor bzw. Antriebsstrang zusammenhängen (z.B. der Einsatz von Biokraftstoffen) [3].

Ab 2012 müssen Autohersteller für einen bestimmten Prozentsatz der Neuwagenflotte den durchschnittlichen Grenzwert von 130g/km einhalten. Der Prozentsatz wird bis 2015 kontinuierlich erhöht:

- 65% der gesamten Fahrzeugflotte ab 2012
- 75% der gesamten Fahrzeugflotte ab 2013
- 80% der gesamten Fahrzeugflotte ab 2014
- 100% der gesamten Fahrzeugflotte ab 2015

Der Fahrzeughersteller kann dabei selbst entscheiden welche Fahrzeuge zur Berechnung herangezogen werden. Überschreitet ein OEM die Grenzwerte sind Strafzahlungen für jedes verkaufte Fahrzeug fällig:

- 5 Euro für das erste Gramm
- 15 Euro für das zweite Gramm
- 25 Euro für das dritte Gramm
- 95 Euro für jedes weitere Gramm

Auch hier ist eine stufenweise Erhöhung der Strafen vorgesehen. Ab 2018 gilt die hohe Strafe von 95 Euro schon ab dem ersten Gramm CO₂. Ab 2020 gilt eine CO₂-Grenze von 95g/km wobei ab 2015 (wie in der Aufstellung oben bereits angeführt) alle Fahrzeuge der Flotte in die Berechnung mit aufgenommen werden.

Supercredits

Fahrzeughersteller bekommen durch sogenannte „Supercredits“ Boni für sparsame Autos. Diese Boni gelten für Fahrzeuge mit weniger als 50 g/km CO₂-Ausstoß und werden momentan mit dem Faktor 3,5 multipliziert. Das bedeutet, dass 3,5 konventionelle Fahrzeuge mit jeweils bis zu 190 g/km CO₂ mit dem Verkauf von nur einem Elektrofahrzeug ohne Überschreitung des Flottendurchschnitt-Grenzwertes verkauft werden können.

Abbildung 1.3: CO₂-Emissionen mit/ohne Multiplikator [1]

In Abbildung 1.3 ist dies nochmals grafisch für Multiplikatoren von 1 und 2 angeführt. Die linke Spalte gilt für einen Multiplikator von 1. Die Flottenemissionen entsprechen dem arithmetischen Mittelwert beider Fahrzeuge. In der rechten Spalte ist der Sachverhalt mit einem Multiplikator von 2 dargestellt. In diesem Fall wird der reale Verkauf mit dem Faktor 2 multipliziert. Daraus ergibt sich ein weiterer virtueller Verkauf, die gemeinsam den Verkauf von zwei SUV-Fahrzeuge decken. Bis 2015 soll dieser Wert auf 1,5 und bis 2019 auf 1 gesenkt werden [3].

1.2 Das Batteriefahrzeug als Lösung?

Die Erwartungshaltung an die Elektromobilität zur Lösung der CO₂-Problematik ist nach wie vor sehr hoch. Das rein elektrisch betriebene Fahrzeug wird seit jeher von vielen als Königsweg nachhaltiger Automobilität gesehen [2]. Aktuelle Erfahrungsberichte bestätigen überdies, dass elektrisches Fahren vom Nutzer positiv wahrgenommen wird [48]. Andererseits kann man nach dem großen Hype der vergangenen Jahre in letzter Zeit eine gewisse Ernüchterung beobachten. Es scheint so, als würde sich die bittere Erkenntnis, dass sich das reine E-Fahrzeug im Alltag nur für begrenzte Anwendungen eignet, immer mehr durchsetzen. Einen eindeutigen Beweis liefert hier die Zurückhaltung der Kunden. Obwohl schon eine Reihe von Fahrzeugen am Markt angeboten und vom Gesetzgeber entsprechend gefördert werden, hinken die Absatzzahlen den Erwartungen deutlich hinterher. Das Ziel, eine Million Elektrofahrzeuge in Deutschland bis 2020 zu verkaufen, wird ohne Lösungen die eine höhere Marktakzeptanz aufweisen, wohl nicht erreicht werden können. Die Zurückhaltung ist im Wesentlichen auf die folgenden zwei Problemkreise zurückzuführen: Einerseits führt die geringe Speicherdichte des elektrischen Energiespeichers zu einer deutlichen Einschränkung der Fahrzeugreichweite im Vergleich zu konven-

tionellen Antriebssystemen, andererseits stehen auch die hohen Kosten einer erfolgreichen Marktdurchdringung entgegen. Im folgenden Abschnitt werden diese beiden Problemkreise näher behandelt.

1.2.1 Reichweitenproblematik rein elektrisch betriebener Fahrzeuge

Wie bereits in [5] dargestellt, besitzen heute verfügbare elektrochemische Energiespeicher über eine weitaus geringere Energiedichte als Benzin oder Diesel. Moderne Lithium-Ionen (Li-Ion) Akkumulatoren erreichen etwa 160 Wh/kg, während Benzin oder Diesel im gravimetrischen Vergleich um etwa den Faktor fünfundsiebzig höhere Energiedichten von rund 12.000 Wh/kg [34] aufweisen. Unter Berücksichtigung durchschnittlicher Wirkungsgrade folgt somit eine Batteriemasse von etwa 870 kg, möchte man dieselbe Energie wie mit 50 l Kraftstoff (entspricht ca. 38 kg Benzin) zum Vortrieb des Fahrzeuges aufbringen [47].

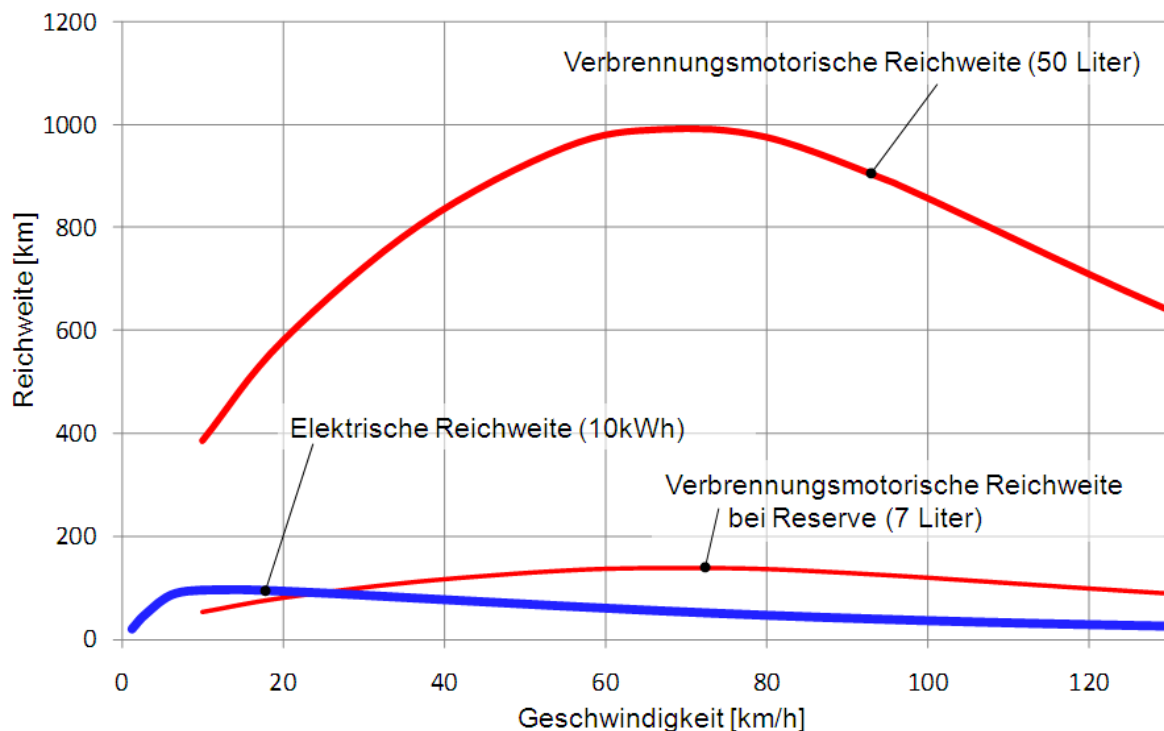


Abbildung 1.4: Verbrennungsmotorische vs. elektrische Reichweite

Geht man, unter Beachtung vertretbarer Kosten, von einer nominellen Batteriekapazität von 10 kWh aus, ergibt sich die in Abbildung 1.4 dargestellte Reichweite des Elektrofahrzeuges bei konstanter Geschwindigkeit. Zum Vergleich sind auch die Reichweiten eines konventionellen Benzinfahrzeuges mit vollem Tank und mit Reserve eingezeichnet. Es zeigt sich, dass die maximale Reichweite des Elektrofahrzeuges nur bei niedrigen Geschwindigkeiten zumindest die Reserve-Reichweite von konventionellen Fahrzeugen erreichen kann.

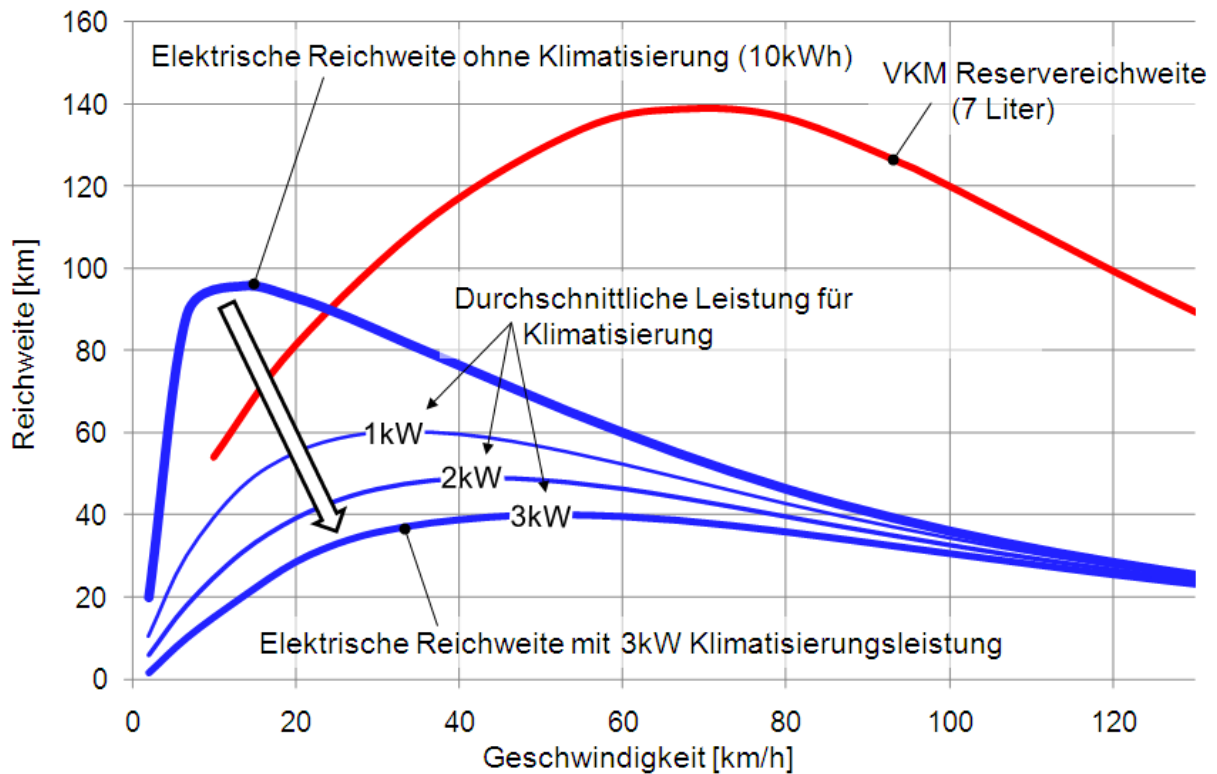


Abbildung 1.5: Reduzierte Reichweite durch Klimatisierung

Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten sinkt die Reichweite aufgrund der ansteigenden Verluste durch den Fahrwiderstand zunehmend und kann auch nicht mehr die Reservereichweite des konventionellen Fahrzeuges erreichen. Bei der Verbrennungskraftmaschine tritt dieser Effekt nicht auf, da der ansteigende Wirkungsgrad die Verluste durch den Fahrwiderstand teilweise kompensiert (Siehe auch [6]). Elektrofahrzeuge sind daher eher im unteren Geschwindigkeitsbereich, in dem höhere Reichweiten erreicht werden, sinnvoll.

Da unter realen Umgebungsbedingungen zusätzliche Leistung zur Klimatisierung der Fahrgastzelle benötigt wird, erfolgt eine weitere Verminderung der maximalen Fahrstrecke. Untersucht man die Auswirkung der Klimatisierung auf den Energiebedarf für eine Reichweite von 100 km, so ergibt sich bei konstanter Geschwindigkeit für einen mittleren Leistungsbedarf von 1 bis 3 kW die in Abbildung 1.5 dargestellte drastische Verminderung. Wie ersichtlich kann nun auch bei niedrigen Geschwindigkeiten die Reserve-Reichweite des verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeuges nicht mehr erreicht werden.

Letztlich hängt der markttechnische Erfolg von Elektrofahrzeugen von der Kundenakzeptanz ab. Geht man davon aus, dass der Kunde beim Fahrzeugkauf die für ihn in Frage kommenden Fahrzeuge vergleichend gegenüberstellt, zeigen sich weitere Schlüsselkriterien, welche gegen eine breite Etablierung der Elektromobilität sprechen. Um dies zu verdeutlichen, wurde ein Vergleich eines konventionellen Fahrzeuges mit seinem elektrifizierten Pendant durchgeführt (Siehe auch Abbildung 1.6).

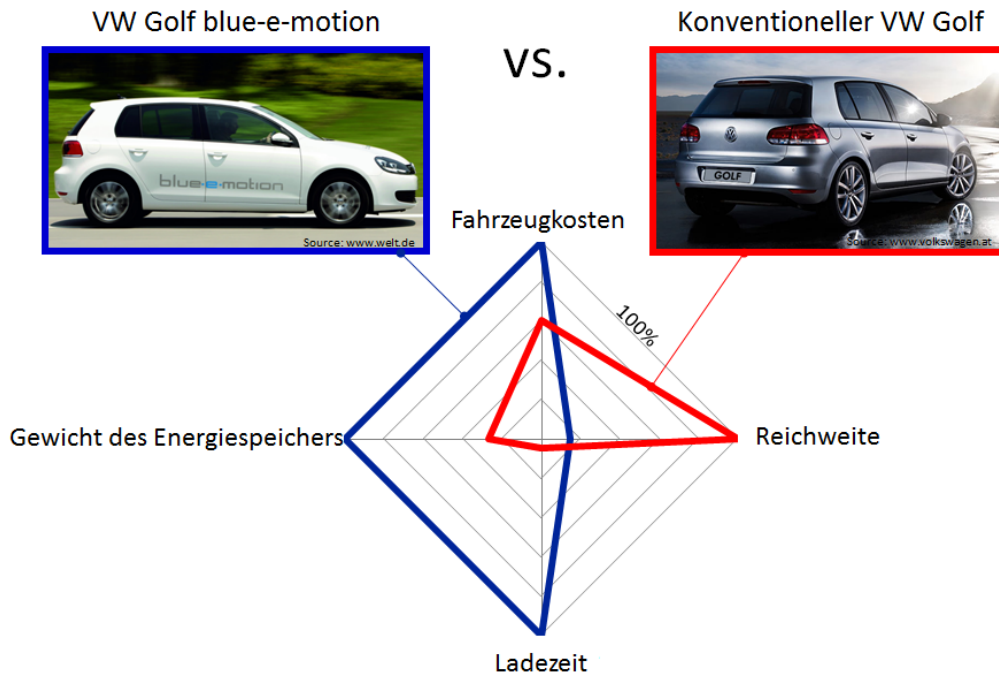


Abbildung 1.6: Vergleich: Elektromotorischer Antrieb vs. konventioneller Antrieb [6]

Während die Reichweite des Elektrofahrzeuges nur bei etwa 20% der des verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeuges liegt, liegt der Kaufpreis um etwa 40% höher. Das Batteriegewicht beträgt etwa 170 kg und liegt somit um etwa 75% höher als das Gewicht von Kraftstoff inkl. Peripherie. Ein weiteres Schlüsselkriterium zeigt sich beim Vergleich der Ladezeiten. Der deutlich langsamere Ladevorgang des Elektrofahrzeuges gegenüber konventionellen Fahrzeugen führt zu einer relevanten Einschränkung der Nutzungsflexibilität.

Zur Etablierung der Elektromobilität müssen alle vier Aspekte gleichzeitig ausgeglichen werden. Es ist beispielsweise nicht ausreichend, die Reichweite isoliert zu betrachten und durch Batterieergrößerung an die des benzinbetriebenen Fahrzeuges anzupassen, wenn damit ein erheblicher Anstieg von Kosten, Gewicht und Ladezeit zu erwarten ist. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung treffen nicht nur auf das untersuchte Fahrzeug zu, sondern besitzen allgemeine Gültigkeit. Der VW Golf wurde stellvertretend ausgewählt, da er aufgrund seiner fortschrittlichen Technologie und Aktualität als Benchmark angesehen werden kann.

1.2.2 Erhöhung der Reichweite durch Hybridisierung

Nimmt man an, dass durch einen entscheidenden technologischen Fortschritt die Energiedichte von Batterien verdoppelt werden könnte, ergibt sich ausgehend von 10 kWh und mit gleichbleibender Batteriegröße die in Abbildung 1.7 (blauer Bereich) dargestellte Erhöhung der maximalen Fahrstrecke.

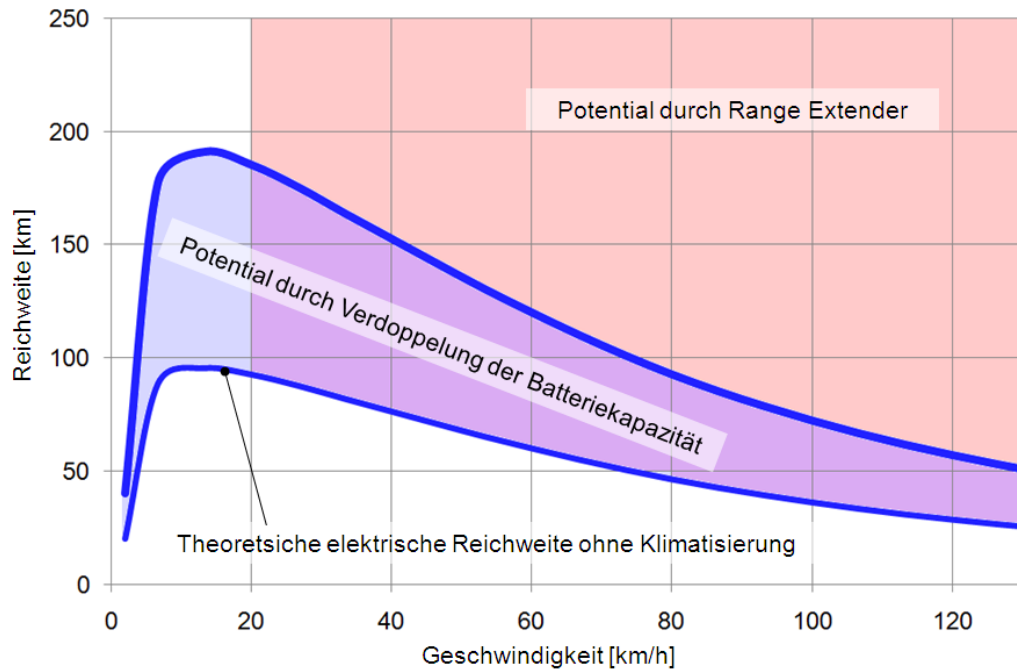


Abbildung 1.7: Reichweitenerhöhung durch Verdoppelung der Batteriekapazität

Wie ersichtlich können so akzeptable Reichweiten bei niedrigen Geschwindigkeiten erreicht werden. Die ungenügende Reichweite bei höheren Geschwindigkeiten bleibt jedoch erhalten, sodass diese Maßnahme hier nicht ausreicht.

Es bietet sich hier nun jedoch an, diese mit Hilfe einer Verbrennungskraftmaschine, einem sogenannten Range Extender (RE) zu erweitern (roter Bereich). Da die Verbrennungskraftmaschine bei mittleren bis höheren Lasten akzeptable Wirkungsgrade besitzt, und durch die hohe Energiedichte von flüssigen Kraftstoffen ein hohes Reichweitenpotential vorhanden ist, macht hier eine Kombination der beiden Antriebe, zumindest aus heutiger Sicht, Sinn. So könnte sich schließlich auch das Elektrofahrzeug (mit Range Extender bzw. das Hybridfahrzeug) in vielen Anwendungsfällen als Erstfahrzeug oder zumindest Zweitfahrzeug etablieren.

Letztlich kann als Fazit festgehalten werden, dass die reine Elektromobilität wenn, nur für kleinere Fahrzeuge im Stadtbetrieb (bei niedrigen Geschwindigkeiten und geringeren Fahrstrecken) sinnvoll ist. Des Weiteren ist es naheliegend, über eine verbrennungsmotorische Unterstützung, den sogenannten Range Extender (also durch Hybridisierung), die E-Mobilität zu unterstützen. Das große Ziel lautet hierbei: „Das Beste aus beiden Welten“. Durch eine geschickte Kombination von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor kann im Stadtbereich lokal der emissionsfreie elektrische Betrieb und außer Orts größere Reichweiten mit akzeptablen Wirkungsgraden durch den verbrennungsmotorischen Betrieb erreicht und so auch in Zukunft die strengen Grenzwerte des Gesetzgebers eingehalten werden.

Dabei stellt die Idee, die Reichweite von Elektrofahrzeugen durch Hybridisierung zu erweitern, keine neue Idee dar. Wie das folgende Kapitel zeigt, sind die ersten Schritte der Hybridisierung bereits um Ende des 18. Jahrhunderts zu finden.

1.3 Die historische Entwicklung des Hybridantriebs

Das Wort „Hybrid“ hat seinen Ursprung aus dem Griechischen, bedeutet so viel wie „gemischt, von zweierlei Herkunft“ und bezieht sich in der hier behandelten Thematik auf die Art des Antriebs bzw. Energiebereitstellung. Eine UNO-Definition besagt: „Ein Hybridfahrzeug ist ein Fahrzeug, in dem mindestens zwei Energieumwandler und zwei im Fahrzeug eingebaute Energiespeichersysteme vorhanden sind, um das Fahrzeug anzutreiben“. Dabei ist nicht festgelegt, welche Antriebe kombiniert werden müssen (siehe auch [4] bzw. [58]).

Die Entwicklung der Hybridantriebe hat bereits eine lange Geschichte. Bereits Ende des 18. Jahrhunderts wurde das erste Hybridkonzept umgesetzt und in den Jahren darauf weitere Konzepte vorgestellt. Mit der folgenden Aufstellung soll ein grober Überblick über die wichtigsten Entwicklungsschritte in der Geschichte der Hybridisierung gegeben werden.

1899 wurde in Barcelona das erste Hybridfahrzeug namens „La Cuadra“ gebaut [64]. Dieses Fahrzeug besaß zum Antrieb einen 3 kW Elektromotor. Als Range Extender kam ein 5 PS starker Benzinmotor zum Einsatz, der gekoppelt mit einem Dynamo, die Batterien speiste. Das erste Hybridfahrzeug war demnach ein serieller Hybrid.

1900 folgte der von Ferdinand Porsche konstruierte und von der Wiener Kutschenfabrik „Lohner“ gebaute „Semper Vivus“, ein Elektrofahrzeug, welches als Antrieb zwei elektrische Radnabenmotoren an den Vorderrädern nutzte. Der Wirkungsgrad soll angeblich bei über 80 % gelegen haben [8]. Mit einer 410 kg schweren Bleibatterie erreichte man 50 km/h Höchstgeschwindigkeit und bis zu 50 km Reichweite bei einer Normleistung von rund 2,5 PS pro Motor.



Abbildung 1.8: Der Mixte von Lohner [28]

1902 wurde der Mixte-Wagen als Weiterentwicklung des „La Cuadra“ vorgestellt (Abbildung 1.8). Bei diesem Fahrzeug handelte es sich um einen seriellen Hybrid, bei dem der Bleiakku durch einen von Daimler entwickelten Verbrennungsmotor geladen wurde.

Alle diese Fahrzeuge hatten eines gemeinsam: Sie waren viel zu teuer und waren daher nicht von wirtschaftlichem Erfolg gekrönt. Auch in den Jahren danach erfolgten noch weitere Versuche ein serientaugliches, wirtschaftlich rentables Hybridfahrzeug auf den Markt zu bringen. Leider waren jedoch auch diese aufgrund der hohen Kosten am Markt nicht konkurrenzfähig [64].

1912 wurde in den USA (in Europa 1919) der Starter-Motor eingeführt, welcher anstatt der Handkurbel einen elektrischen Motorstart ermöglichte. Dies läutete schließlich auch die Erfolgsgeschichte des Verbrennungsmotors ein [46].

1994 war Audi mit dem Modell Audi 80 duo erster gewerblicher Anbieter eines Hybridfahrzeuges. Jedoch kostete auch dieses Modell so viel, dass es letztendlich auch unverkäuflich war.

1997 unternahm Audi mit dem Modell A4 duo den vorerst letzten Versuch. Das Fahrzeug besaß einen 66 kW TDI-Motor und einen 21 kW Elektromotor. Aber auch dieses Fahrzeug war ein wirtschaftlicher Fehlschlag. Es wurde nur 90-mal gefertigt und Audi zog sich schließlich als Konsequenz für die nächsten sieben Jahre aus der Hybridentwicklung zurück [17].

Toyota schaffte es jedoch noch im selben Jahr das bisher erfolgreichste Hybridfahrzeug - den Prius I - serienmäßig auf den Markt zu bringen. Der Erfolg hielt an; 2009 war der Prius das meistverkaufte Fahrzeug in Japan. Der Boom wurde allerdings durch steuerliche Anreize entscheidend unterstützt, da japanische Bürger bis zu 11.500 Euro an staatlicher Förderung beim Kauf erhielten [21].



Abbildung 1.9: Der neue Toyota Prius Hybrid [32]

2009 ist bereits die dritte Version des Fahrzeuges am Markt erschienen (Abbildung 1.9). Dabei wurde das Vorgängerhybridsystem zu 90% überarbeitet und somit eine Gewichts- einsparung von 20 % erreicht [59]. Der Antriebsstrang vereint einen seriellen und parallelen Hybrid zu einem sogenannten Misch-Hybrid bzw. Leistungsverzweigten Hybrid (siehe auch 1.4.1). Der 4-Zylinder Verbrennungsmotor wird wie bereits seine Vorgänger im Atkinson- Prozess betrieben und leistet 73 kW. Die beiden Elektromotoren leisten 50 kW (Generator) und 60kW (Elektromotor). Eine schematische Darstellung des Antriebstrangs ist in Abbil- dung 1.10 dargestellt.

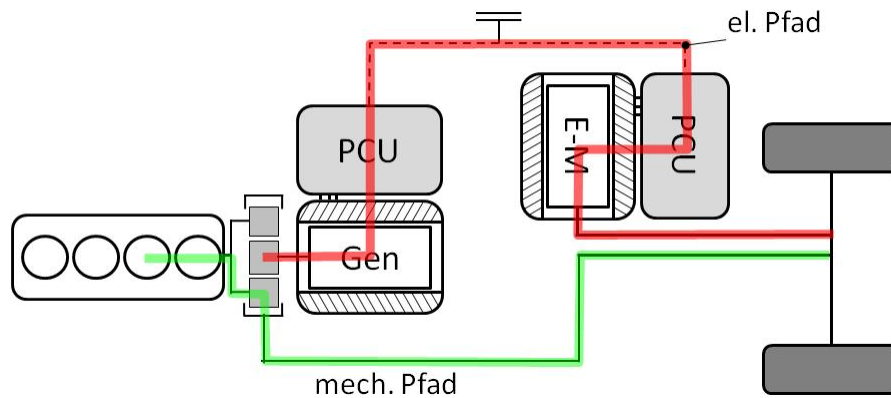


Abbildung 1.10: Der Toyota Prius Hybrid Antriebsstrang

Auf Basis dieser Generation wurde 2012 auch eine Plug-In-Variante vorgestellt, die laut Hersteller rund 20 km rein elektrische Reichweite aufweist. Im Elektromode erreicht das Fahrzeug eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Im Mischbetrieb liegt diese bei 180 km/h. Die Ladezeit der Lithium-Ionen-Batterie beträgt an 230 V rund 1,5 Stunden. Der Verbrauch wird mit 2,6 l/100km im Normzyklus angegeben, was einem CO₂-Ausstoß von rund 59 g/km entspricht [32].

Seit 2009 bietet auch Mercedes, als erster deutscher Fahrzeughersteller, mit dem „S 400 Blue Hybrid“ einen Mildhybrid in Serie an (zur Klassifizierung siehe Kapitel 1.4.2). Als Besonderheit wird die damals erstmalig im Automobil-Serieneinsatz verwendete Lithium-Ionen-Batterie angegeben. Ein 3,5-Liter-Benzinmotor stellt 205 kW zur Verfügung, was mit dem 15 kW starken Elektromotor eine kombinierte Leistung von 220 kW ergibt. Das Fahrzeug erreichte für diese Fahrzeug- und Leistungsklasse den damals weltweit niedrigsten CO₂-Ausstoß von nur 190 g/km.



Abbildung 1.11: Mercedes S 400 Blue Hybrid [22]

Als letztes Fahrzeug im Rahmen dieser chronologischen Auflistung sei der Mercedes E 300 BlueTEC HYBRID erwähnt. Dieser kam 2011 als erster Dieselhybrid auf den Markt. Bei einer Systemleistung von 170 kW erreicht das Fahrzeug 109 g/km an CO₂-Emissionen.

Die Daten der letztgenannten Fahrzeuge betreffen zwar hauptsächlich Fahrzeuge aus dem Hochpreissegment, zeigen aber trotzdem das Potential der Hybridisierung. Schließlich kann zusammengefasst werden, dass insbesondere in den letzten Jahren wesentliche Fortschritte in der Hybridentwicklung gemacht wurden. Diese Entwicklung ist im Wesentlichen auf öffentliche Förderungen und Regulierung der CO₂-Emissionen in den letzten Jahren zurückzuführen.

In Abbildung 1.12 ist die chronologische Entwicklung der am Markt befindlichen Mild- und Voll-Hybridfahrzeuge beginnend von 1997 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass es insbesondere in den letzten 5 Jahren zu einer deutlichen Verbreitung gekommen ist. Zwischen 2008 und 2010 sind die meisten Hybridfahrzeuge im Hochpreissegment zu finden. Dies ist grundsätzlich auf die folgenden zwei Gründe zurückzuführen: Erstens sind in diesem Fahrzeugsegment die größten CO₂-Einsparungen durch Hybridisierung möglich und zweitens können die hohen Kosten der Hybridisierung in der Ober- bzw. Luxusklasse einfacher in den Markt eingeführt werden. Bei diesen Fahrzeugen handelt es sich zum Beispiel um: BMW ActiveHybrid X6, Mercedes S 400 Blue Hybrid, Porsche Cayenne S Hybrid oder VW Touareg Hybrid. Nur der Prius 3 und zwei weitere Mild-Hybrid-Vertreter (Honda CR-Z Hybrid, Honda Insight 2009) sind im mittleren bis unteren Preissegment positioniert. Des Weiteren verdeutlicht sich eine Tendenz zu parallelen Vollhybridsystemen.

Die durchschnittlichen Flottenemissionen zeigen seit 1995 eine stetig fallende Tendenz. Diese wird durch die EU Grenzwerte von 120 g/km 2012 und 95 g/km 2020 weiter verschärft.

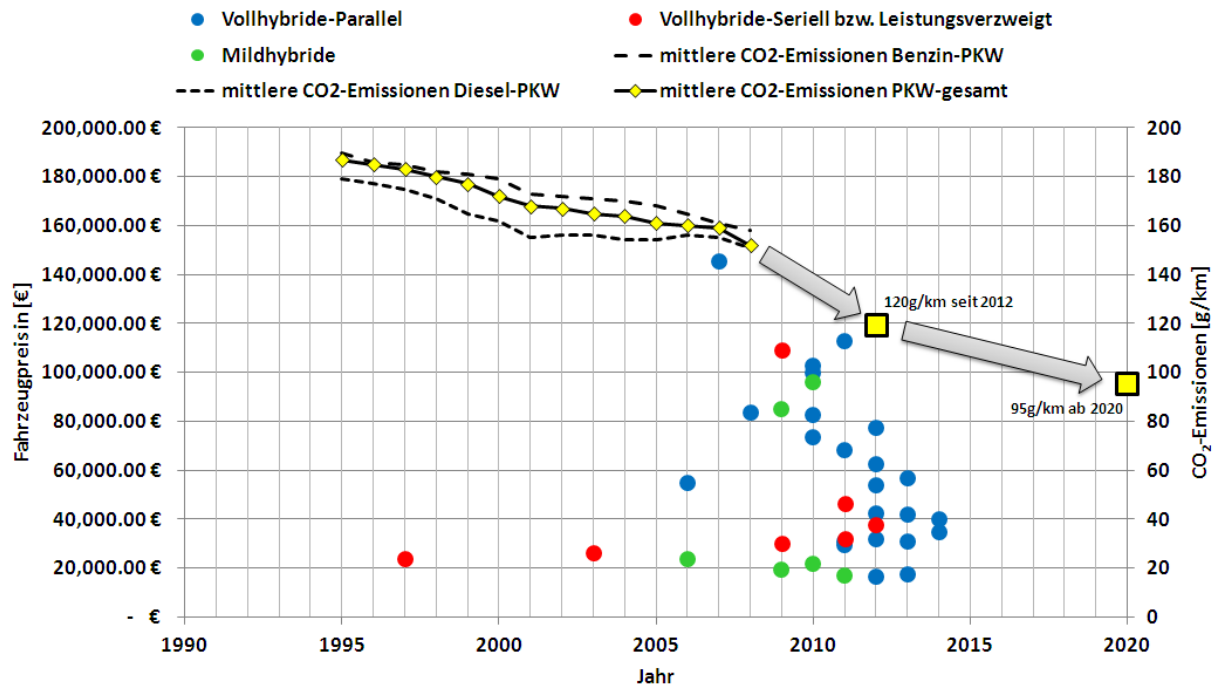


Abbildung 1.12: Entwicklung des europäischen Hybridmarktes

Man darf gespannt sein, wie sich der Hybridmarkt in Zukunft fortsetzen wird. Eines ist jedoch klar: Das Hybridfahrzeug ist am Markt angekommen und hat das Potential wesentliche Stückzahlen am Markt zu erreichen. Allem voran hat Toyota dies mit dem Prius-Konzept bereits bewiesen. Der Antrieb von morgen wird daher mit Sicherheit eine verstärkte Hybridisierung aufweisen. Reine Elektrofahrzeuge hingegen sind und bleiben in naher Zukunft aufgrund ihrer begrenzten Reichweite nur für Nischenanwendungen attraktiv.

1.4 Klassifizierung der Hybridfahrzeugantriebe

Einen entscheidenden Punkt im Rahmen dieser Arbeit stellt die Entscheidung zur richtigen Hybridtopologie für das CEA-Konzept dar. Aus diesem Grund ist es von besonderer Bedeutung über die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Anordnungsmöglichkeiten der Antriebsmotoren Bescheid zu wissen. Mit der folgenden Analyse der Systemvarianten soll eine geeignete Basis zur Entscheidungsfindung geschaffen werden.

1.4.1 Klassifizierung hinsichtlich Systemtopologie

Hinsichtlich der Anordnung der Systemkomponenten können grundsätzlich drei verschiedene Hybridvarianten unterschieden werden:

Serieller Hybrid

Beim seriellen Hybrid wird der Vortrieb über einen oder mehrere Elektromotoren (Tandem- oder Radnabenantrieb) realisiert. Zwischen Verbrennungsmotor und Antriebsachse besteht keine mechanische Verbindung. Die VKM ist direkt mit einer Elektromaschine verbunden und wird zur Stromerzeugung eingesetzt (Abbildung 1.13).

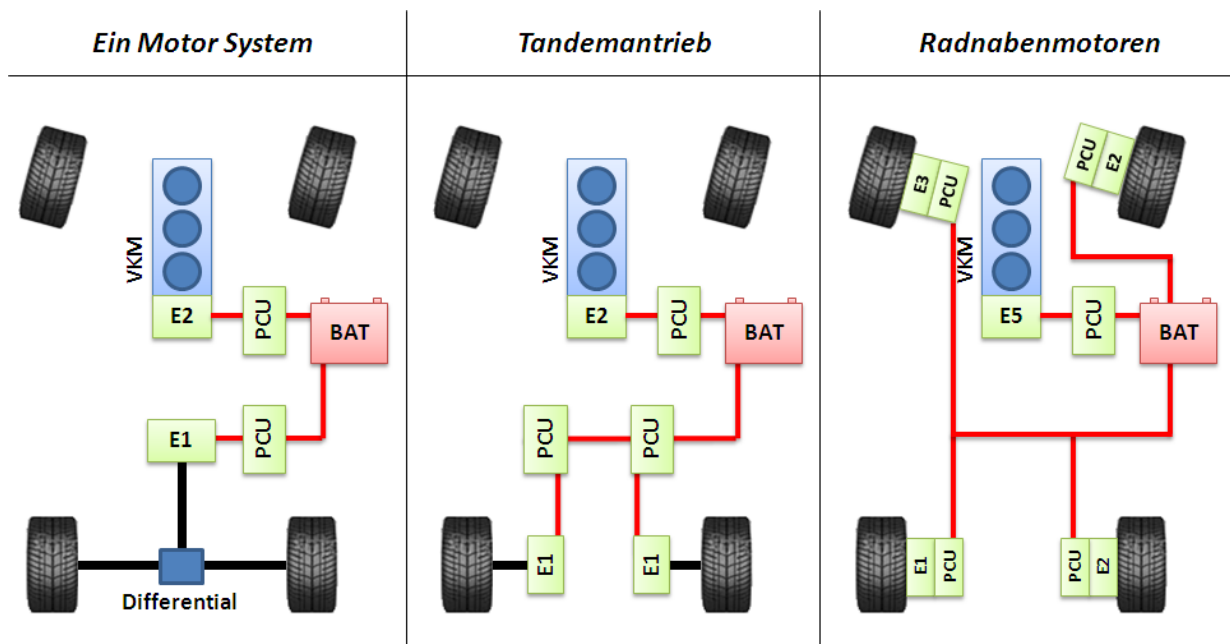


Abbildung 1.13: Serielle Hybridtopologien

Ein wesentlicher Vorteil dieser Topologie ist, dass die Stromerzeugung weitestgehend unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit variiert werden kann. Des Weiteren kann eine emissionsoptimierte Startstrategie problemlos umgesetzt werden. Der stationäre Betrieb verhindert dynamische Emissionsspitzen und ist im Wirkungsgrad insbesondere bei niedrigen Lastzuständen von Vorteil. Da Verbrennungskraftmaschine und Generator eine abgekoppelte Einheit darstellen kann die Einbauposition frei variiert werden. Dies ist insbesondere beim Aufrüsten von reinen Elektrofahrzeugen mit einem kleinen, zusätzlichen Ladesystem (Range Extender) vorteilhaft. Durch den rein elektrischen Antrieb kann auf ein Getriebe verzichtet werden.

Dem Vorteil des günstigen Packagings stehen allerdings auch Nachteile gegenüber: Die Dimensionierung der VKM – Generatorkombination bedingt aufgrund der Position der Wirkungsgradbestpunkte bei den untersuchten Motoren eine Überdimensionierung der Verbrennungskraftmaschine in der Größenordnung der doppelten Systemleistung. Daraus resultiert gegenüber der Range-Extender-Leistung eine verhältnismäßig große Verbrennungskraftmaschine, was sich wiederum nachteilig auf das Packaging und Gewicht auswirkt.

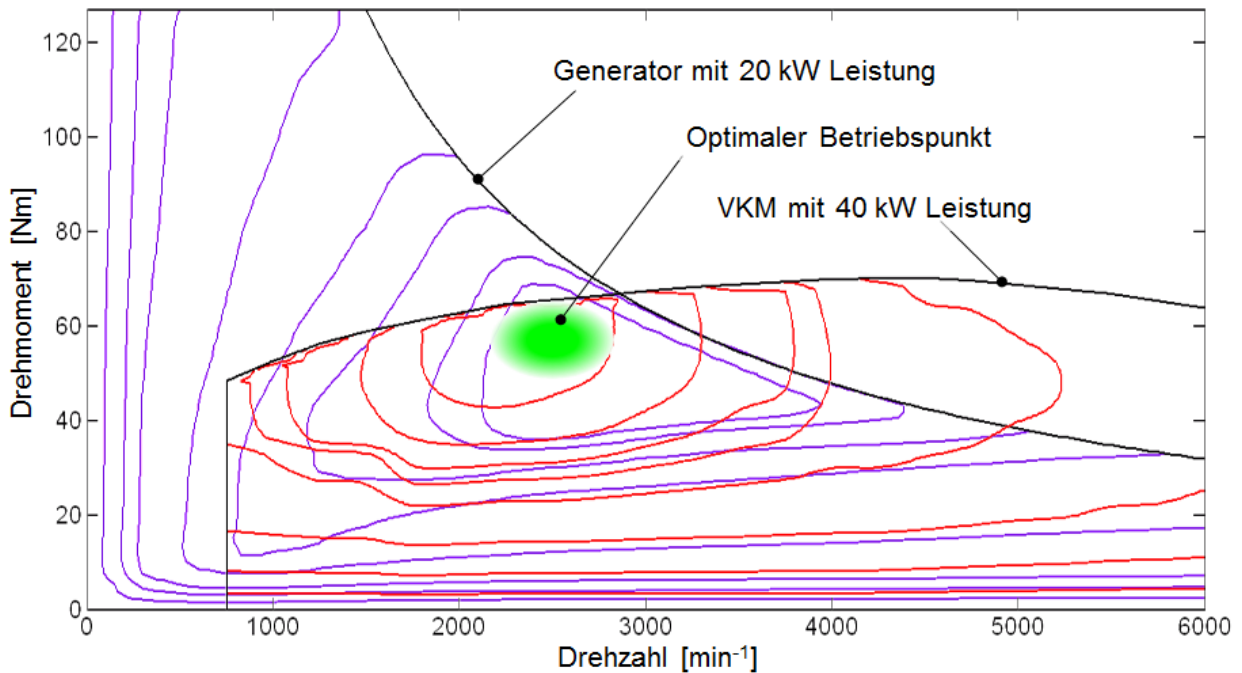


Abbildung 1.14: Auslegung eines seriellen Range Extenders

In Abbildung 1.14 ist beispielhaft eine Kombination von VKM und Generator mit einer Range Extender Leistung von etwa 20 kW angegeben. Wie ersichtlich, muss die Verbrennungskraftmaschine auf etwa 40 kW Maximalleistung ausgelegt werden um das Gesamtsystem im optimalen Wirkungsgrad betreiben zu können.

Ein weiterer Nachteil ist das meist ungünstigere CO_2 -Emissionsverhalten aufgrund der doppelten Energieumwandlung des seriellen Betriebes im Gegensatz zum direkten verbrennungsmotorischen Durchtrieb. Bei kurzer Einschaltdauer kann dies zwar weitestgehend vernachlässigt werden, aber bei einer Zusatzreichweite von beispielsweise 200 km wäre der Range Extender zu 80 % der Fahrstrecke in Betrieb. Bei längeren Fahrten sind daher der Verbrauch und die Emissionen des Range Extenders relevant. In Abbildung 1.15 ist dieser Sachverhalt grafisch dargestellt. Im linken oberen Bild ist der Wirkungsgradunterschied des seriellen Betriebes zum parallelen Betrieb (direkter Durchtrieb) für durchschnittlichen (mittleren) Betriebszustand eingezeichnet. Im seriellen Betrieb wird die VKM im Optimalfall im Bestpunkt mit einem Wirkungsgrad von 32 % betrieben. Zusammen mit dem Generator (Wirkungsgrad 90 %) führt dies zu einem Range-Extender-Wirkungsgrad von etwa 29 %. Über die Batterie (Wirkungsgrad = 97 %) und Antriebsmotor (durchschnittlicher Wirkungsgrad = 80 %) führt dies zu einem Gesamtwirkungsgrad von etwa 22 %. Im direkten Durchtrieb kann die Verbrennungskraftmaschine im mittleren/oberen Lastbereich betrieben werden. Dies führt zu einem durchschnittlichen Gesamtwirkungsgrad von etwa 28 % und somit zu einem Verbrauchsvorteil von über 20 % gegenüber dem seriellen Betrieb. Des Weiteren kann der serielle RE-Betrieb je nach Ladezustand der Batterie und momentanen Fahrzustand (HVH-Problematik) nicht immer im Bestpunkt erfolgen, wodurch der Wirkungsgradvorteil des direkten Durchtriebs noch weiter erhöht wird.

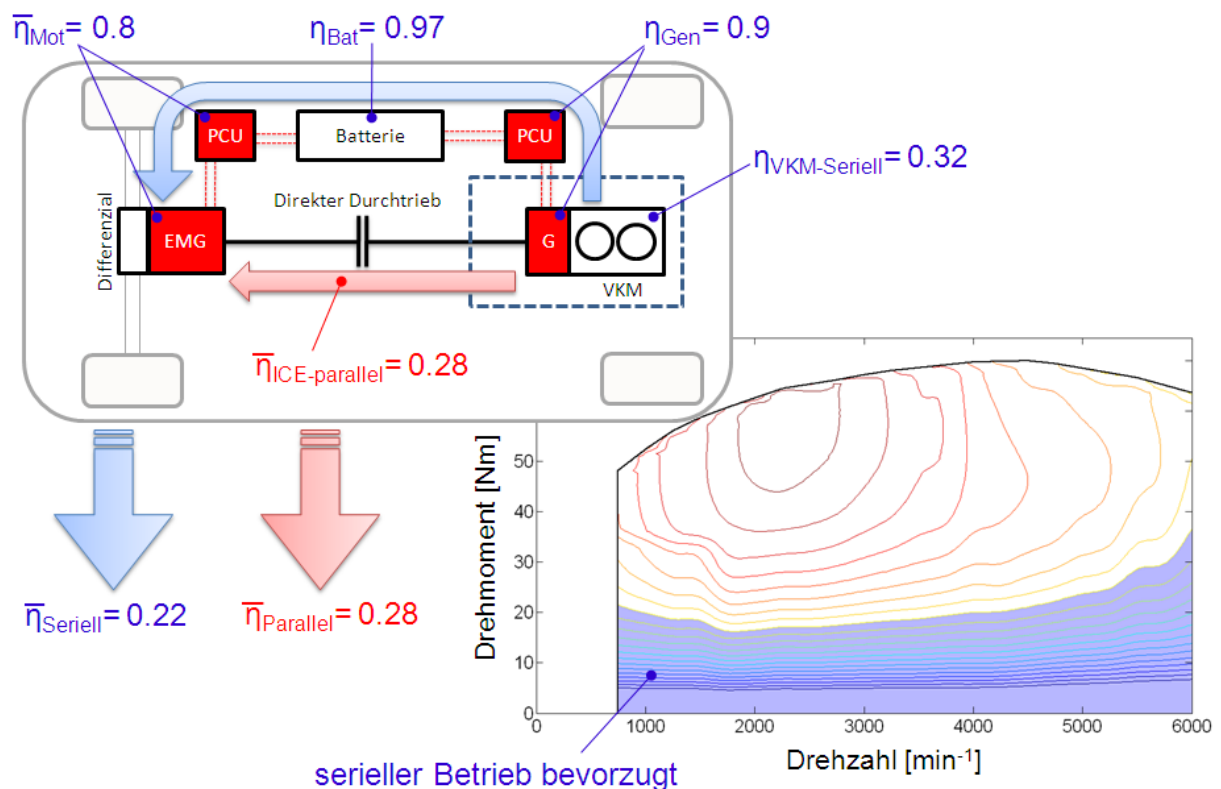


Abbildung 1.15: Serieller vs. paralleler Betrieb

Es ist nun allerdings zu beachten, dass der verbrennungsmotorische Wirkungsgrad mit geringer werdender Last (langsameren Geschwindigkeiten) abnimmt und so insgesamt unter den seriellen Wirkungsgrad sinken kann. Das in Abbildung 1.15 eingezeichnete Kennfeld zeigt diesen Bereich. Liegen die Betriebspunkte innerhalb der blau hinterlegten Fläche, so ist ein serieller Betrieb dem parallelen zu vorzuziehen. Beim angeführten Berechnungsbeispiel wurde vereinfacht angenommen, dass im seriellen Betrieb die gesamte vom Range Extender erzeugte Energie über die Batterie zum Antriebsmotor geführt wird. Da jedoch die momentan benötigte Antriebsleistung direkt an den Antriebsmotor abgegeben wird und somit nicht den Umweg über die Batterie vollzieht, steigt der Wirkungsgrad etwas an. Insbesondere bei höheren Lastzuständen bleibt jedoch ein klarer Vorteil des parallelen Betriebs vorhanden.

Paralleler Hybrid

Beim parallelen Hybrid ist, im Gegensatz zum seriellen Hybrid, ein direkter Antrieb der Antriebsachse durch den Verbrennungsmotor möglich. Dabei kann die Leistungen von VKM und Elektromotor in verschiedenen Formen überlagert werden (Abbildung 1.16).

Ein wesentlicher Vorteil dieser Variante ist, dass im Gegensatz zur seriellen Anordnung nur ein Elektromotor benötigt wird, der wahlweise als Elektromotor oder als Generator arbeiten

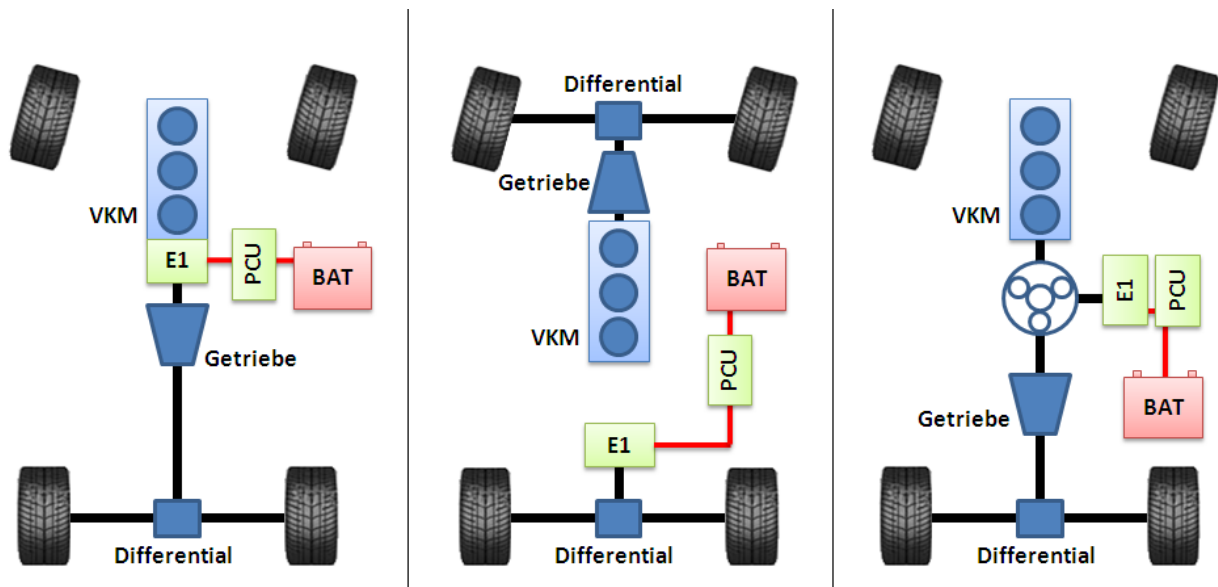


Abbildung 1.16: Parallele Hybridtopologien

kann. Dies bringt wesentliche Vorteile hinsichtlich Kosten und Komplexität. Wie bereits im vorigen Kapitel dargestellt, können mit dieser Anordnung insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten bessere Wirkungsgrade erreicht werden. Bekannte Vertreter dieser Topologie sind: VW twinDRIVE (2 Elektromotoren), Porsche Cayenne Hybrid, VW Touareg Hybrid, BMW ActiveHybrid 7 usw.

Eventuelle Nachteile wie z.B. höhere Abgasemissionen können aus dem instationären Betrieb der Verbrennungskraftmaschine resultieren.

Leistungsverzweigter Hybrid

Der leistungsverzweigte Hybrid teilt die Leistung auf einen elektrischen und einen mechanischen Pfad auf und kann grundsätzlich in die in Abbildung 1.17 dargestellten 3 Varianten unterteilt werden.

Beim kombinierten Hybrid befindet sich zwischen den beiden Elektromotoren eine Kupplung. Diese Anordnung erlaubt eine serielle und parallele Betriebsweise der Verbrennungskraftmaschine.

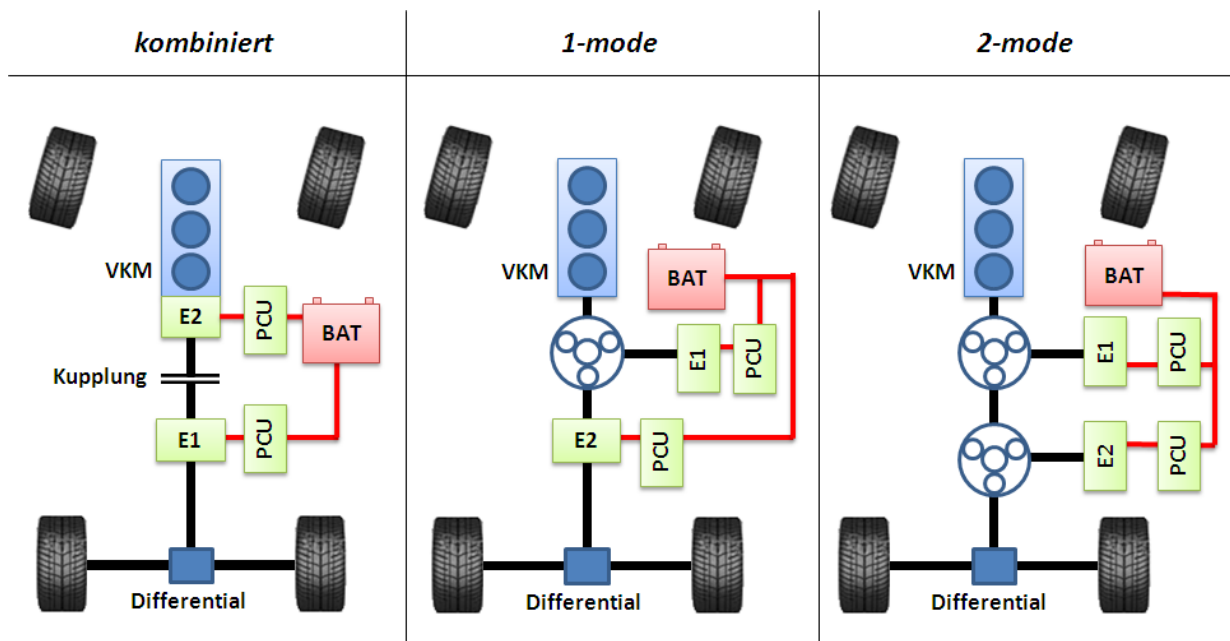


Abbildung 1.17: Leistungsverzweigte Hybridtopologien

Bei den beiden anderen Topologien ist kein Getriebe notwendig, da dies durch die beiden Elektromotoren in Kombination mit einem Planetengetriebe umgesetzt wird. Bekannte Vertreter dieser Varianten sind z.B.: Toyota Prius, Lexus RX 400h, Lexus LS 600h sowie Konzepte die als Triebstrangeinheit, wie das in Allianz von GM/Daimler Chrysler und BMW aufgebaute Two-Mode-Hybridkonzept. Diese Systeme bringen hinsichtlich Betriebsmodi die größte Freiheit, können ohne Einschränkungen zu konventionellen Fahrzeugen betrieben werden und verfügen zusätzlich über eine entsprechend große elektrische Reichweite. Allerdings sind Komplexität und Kosten dieser Konzepte im Allgemeinen als sehr hoch einzustufen.

1.4.2 Klassifizierung hinsichtlich Systemleistung

Eine weitere Klassifizierung unterschiedlicher Hybridkonzepte kann hinsichtlich der elektrischen Leistung im Antriebsstrang erfolgen. Die Einteilung erfolgt entsprechend der drei nachstehend angeführten Kategorien:

- Micro-Hybrid
- Mild-Hybrid
- Full-Hybrid

Nachfolgend wird eine weitere Fahrzeugkategorie definiert, bei der die Batterie extern über das Stromnetz geladen werden kann.

Eine gängige Möglichkeit um ein Fahrzeug einer Kategorie zuzuordnen, erfolgt über die sogenannte Hybridisierungsrate (HR). Sie wird aus dem Verhältnis der elektrischen Leistung zur Gesamtleistung berechnet (Gleichung 1.1):

$$HR = \frac{\text{Elektrische Leistung}}{\text{Elektrische Leistung} + \text{Leistung des Verbrennungsmotors}} * 100[\%] \quad (1.1)$$

Zwei weitere Varianten erfolgen über die absolute elektrische Antriebsleistung (P_{EM}) oder anhand des elektrischen Leistungsgewichts (P_{LG}) [24] [52] und Gleichung 1.2.

$$P_{LG} = \frac{\text{Elektrische Leistung in [kW]}}{\text{Fahrzeugmasse in [t]}} * 100[\%] \quad (1.2)$$

In Tabelle 1.1 sind die Bereiche der Klassifizierungen zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 1.1: Hybridklassifizierung nach elektrischer Leistung im Antriebsstrang

	Microhybrid	Mildhybrid	Fullhybrid
Hybridisierungsrate (HR)	> 5 %	> 10 %	> 25 %
Elektrische Leistung (P_{el})	< 6 kW	6 – 20 kW	> 40 kW
Elektrisches Leistungsgewicht (P_{LG})	2,7 – 4 kW/t	6 – 14 kW/t	> 20 kW/t

Micro-Hybrid

Micro-Hybride bilden die erste Stufe der Hybridisierung. Im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug gibt es nur geringfügige Modifikationen, welche im Allgemeinen über Änderungen am konventionellen Anlasser basieren. Dieser wird entweder durch eine leistungsfähigere Variante oder durch einen Riemenstarter/Generator ersetzt.

Durch diese Modifikationen können im Wesentlichen zwei Funktionen realisiert werden:

- Start/Stop
- Optimierter Generatorbetrieb

Durch diese beiden Funktionen kann eine Verbrauchseinsparung von 5-10 % erwartet werden.

Mild-Hybrid

Mild-Hybrid-Fahrzeuge nutzen eine E-Maschine in der Größenordnung von etwa 10-20 kW die im Allgemeinen zwischen Motor und Getriebe positioniert wird. Mit dieser Hybridisierungsrate können zusätzlich zu Start/Stop und optimiertem Generatorbetrieb folgende Hybridfunktionalitäten realisiert werden:

- Boosten
- Rekuperation
- Lastpunktverschiebung

Bei dieser Hybridisierungsstufe kann der Startvorgang des Verbrennungsmotors durch die leistungsstarke E-Maschine schnell und ohne Komforteinbußen von statten gehen. Des Weiteren kann eine Verbrauchseinsparung zwischen 15 % und 20 % erreicht werden (vgl. [39]).

Full-Hybrid

Der Full-Hybrid entspricht der höchsten Klasse der Elektrifizierung. Neben den Funktionen von Micro- und Mildhybrid ist mit diesem Fahrzeugtyp auch rein elektrisches fahren möglich. Durch diesen Grad der Elektrifizierung kann eine Verbrauchseinsparung von über 20 % erreicht werden. Des Weiteren können in dieser Hybridisierungsstufe unterschiedlichste Hybridtopologien (seriell, parallel, gemischt und leistungsverzweigt) umgesetzt werden.

Klassifizierung aktueller Hybridkonzepte

Derzeit ist hinsichtlich der Klassifizierung von Hybridfahrzeugen eine gewisse Willkür der Fahrzeughersteller zu erkennen. In den Abbildungen 1.18 bis 1.20 ist die Klassifizierung aktueller Hybridfahrzeuge nach den oben genannten Kriterien dargestellt. Die unterschiedlichen Farben definieren die vom Fahrzeughersteller angegebenen Hybridvarianten:

- Blau = Mild-Hybrid
- Rot = Full-Hybrid mit einer RW von rund 2-4 km
- Grün = Full-Hybrid mit einer RW von über 20 km

Abbildung 1.18 zeigt die Klassifizierung nach der Hybridisierungsrate. Hier ist eine deutliche Diskrepanz der vom Fahrzeughersteller vorgenommenen Fahrzeugdefinitionen zur in der Fachwelt üblichen Klassifizierung ersichtlich. Viele als Vollhybrid definierte Fahrzeuge fallen in den Bereich der Mild-Hybrid-Klassifizierung. Auch die Grenze zwischen Micro- und Mild-Hybriden wird von mehreren Fahrzeugherstellern nicht eingehalten.

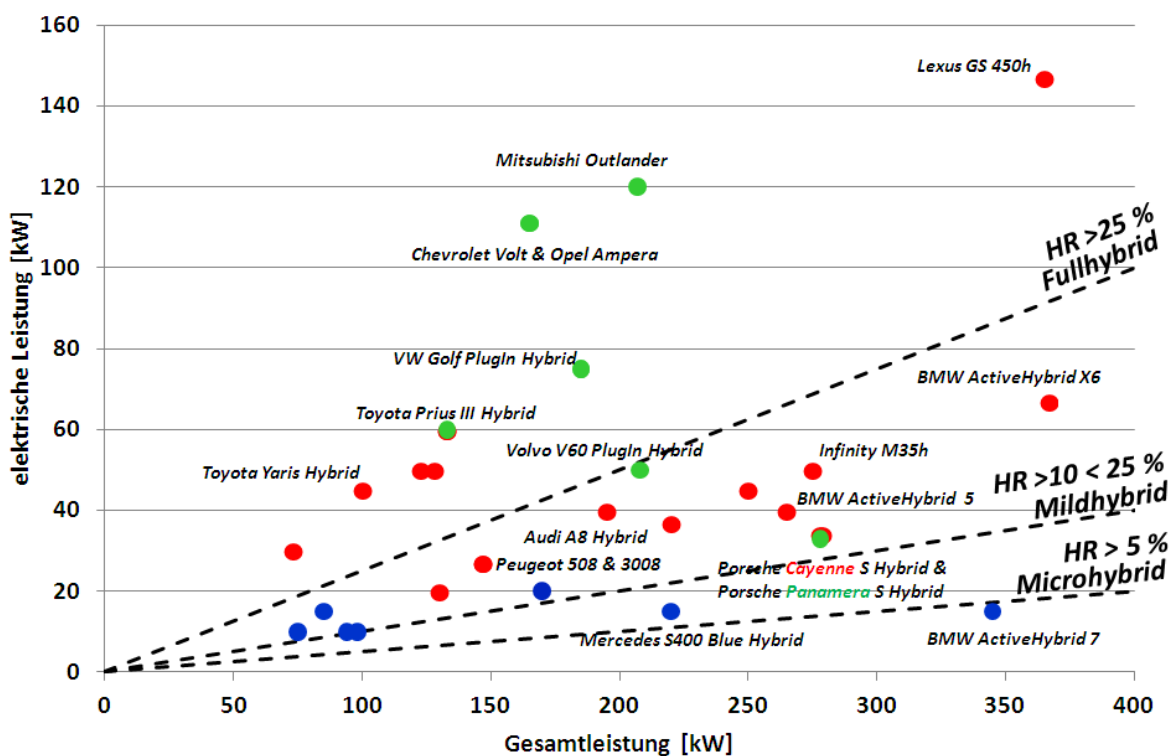


Abbildung 1.18: Hybridklassifizierung nach Hybridisierungsgrad

In Abbildung 1.19 ist die Klassifizierung nach der elektrischen Leistung angeführt. Von allen drei Varianten ist die Übereinstimmung hier am besten. In dieser Klassifizierungsvariante ist allerdings der Bereich zwischen 20 kW und 40 kW nicht eindeutig definiert. Nimmt man als Grenze 40 kW an, fällt das eine oder andere Fahrzeug aus der Reihe.

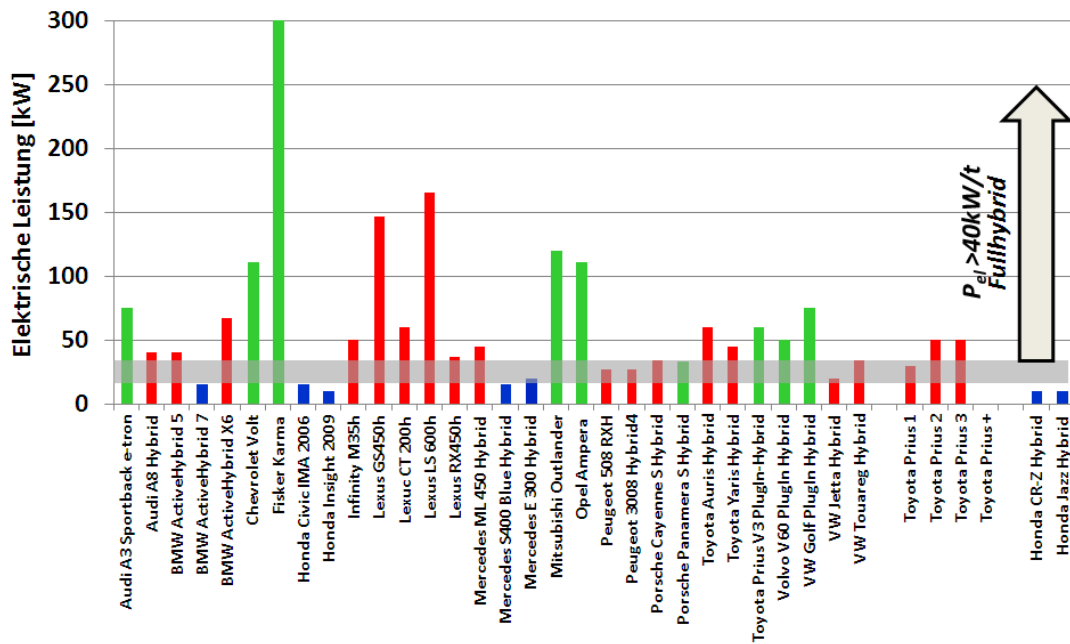


Abbildung 1.19: Hybridklassifizierung nach der elektrischen Leistung

In Abbildung 1.20 ist die Klassifizierung nach dem Leistungsgewicht angeführt. Die Übereinstimmung ist deutlich besser als bei der Hybridisierungsrate, aber schlechter gegenüber der vorigen Variante. In der Definition ist ebenfalls der Bereich zwischen 14 kW/t und 20 kW/t nicht eindeutig abgegrenzt. Werden 20 kW/t als Grenze angenommen, fallen einige Fahrzeuge aus der Reihe.

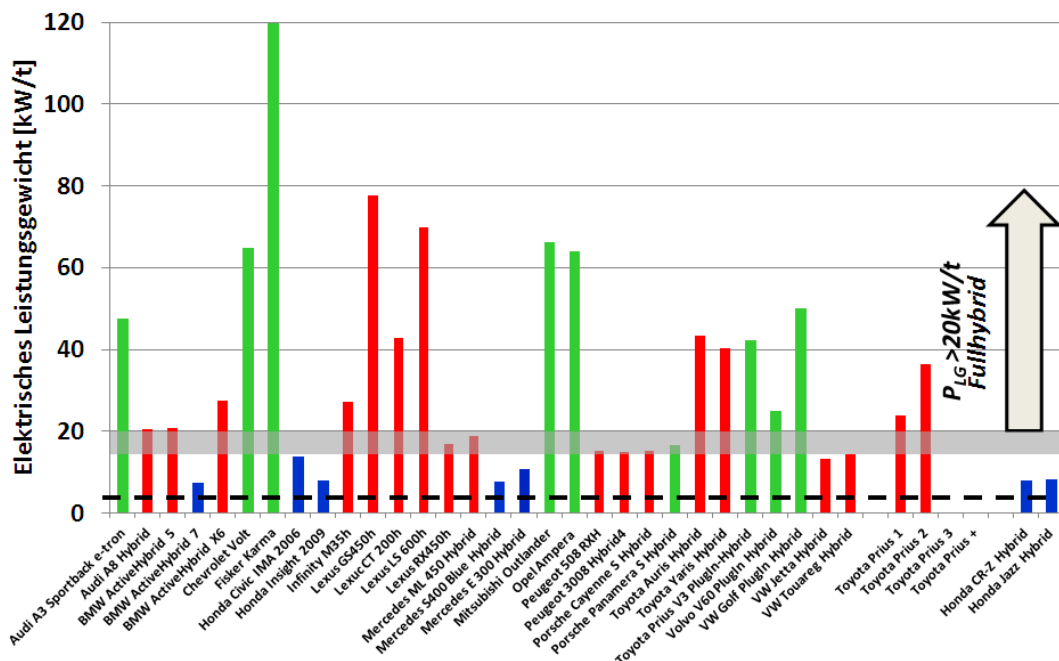


Abbildung 1.20: Hybridklassifizierung nach Leistungsgewicht

Die allgemeine Differenz zu den Klassifizierungsrichtlinien ergibt sich im Wesentlichen aus der Tatsache, dass Fahrzeughersteller ihre Fahrzeuge als Full-Hybrid definieren sobald eine bestimmte Strecke rein elektrisch gefahren werden kann. Eine Mindestreichweite ist zum heutigen Zeitpunkt nicht definiert, sodass auch Fahrzeuge mit geringen Reichweiten (z.B. 2 km) als Full-Hybride definiert werden. Soll ein Hybridfahrzeug innerhalb der Stadt (also bei niedrigen Geschwindigkeiten) hauptsächlich elektrisch betrieben werden, muss allerdings eine gewisse elektrische Mindestreichweite vorhanden sein. Statistiken belegen, dass rund 70 % der täglichen Fahrten weniger als 50 km lang sind [5]. Full-Hybrid-Fahrzeuge mit einer solchen Reichweite haben daher großes Potential die CO₂-Emissionen entscheidend zu verringern. Im Allgemeinen besitzen diese Fahrzeuge die Möglichkeit die Batterie extern zu laden. Sogenannte „Plug-In-Hybride“ werden in Folge kurz beschrieben.

1.4.3 Der Plug-In-Hybrid

Bei einem Plug-In-Hybrid Electric Vehicle (PHEV) kann die Batterie auch extern über das Stromnetz geladen werden. Im Allgemeinen handelt es sich um Full-Hybrid-Fahrzeuge, mit denen über längere Strecken rein elektrisch gefahren werden kann und die daher über eine größere Batteriekapazität verfügen. Diese Fahrzeuge ermöglichen einen lokal emissionsfreien Betrieb und weisen im Allgemeinen zusätzlich eine hohe verbrennungsmotorische Reichweite auf, was einer optimalen Nutzung beider Antriebsarten entspricht.

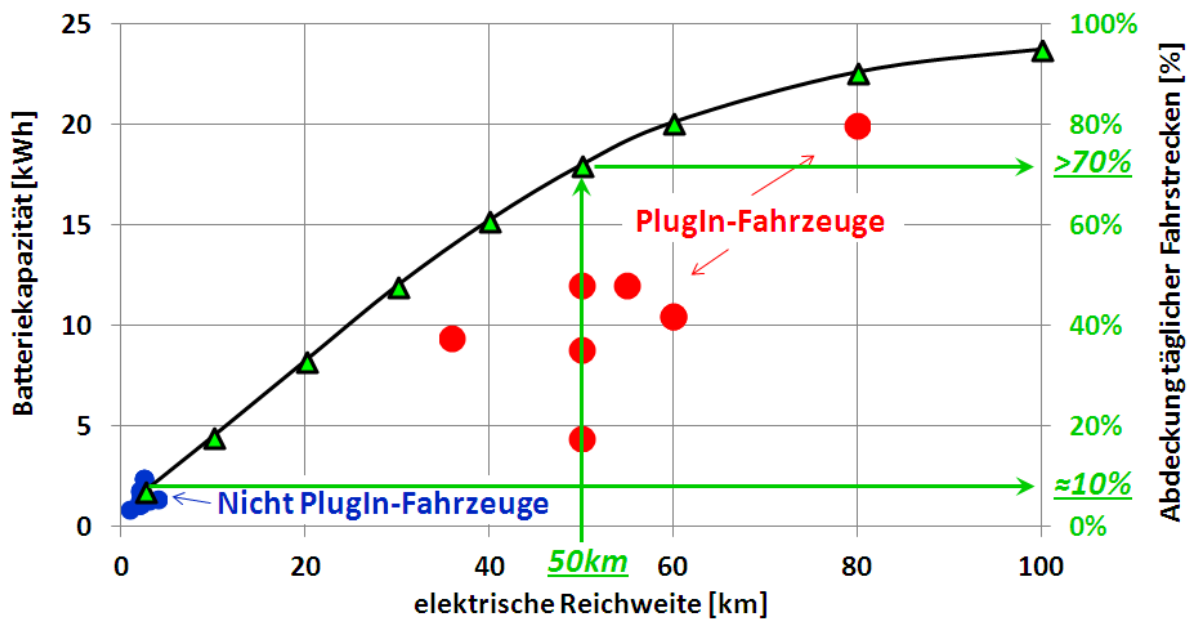


Abbildung 1.21: Reichweite Plug-In-Hybrid vs. konventionellen Full-Hybrid

In Abbildung 1.21 ist die Batteriekapazität und die Reichweite aktueller Plug-In-Hybridkonzepte der Reichweite und Kapazität von Full-Hybridkonzepten ohne Plug-In-Funktionalität gegenübergestellt. Untersucht man, wieviel Prozent der in einer Studie erhobenen täglichen Fahrstrecken (siehe [36]) mit beiden Fahrzeugkonzepten rein elektrisch gefahren werden können, so erkennt man, dass PlugIn-Hybride (bei einer elektrischen Reichweite von rund 50 km) bereits rund 70 % aller täglich gefahrenen Strecken abdecken

können. Full-Hybridkonzepten ohne Plug-In-Funktionalität erreichen hingegen aufgrund ihrer geringen Batteriekapazität nur eine geringe Abdeckung von rund 10 %.

1.5 Zertifizierung von Hybridfahrzeugen innerhalb der Europäischen Union

In der Europäischen Union werden grundsätzlich die in Abbildung 1.22 dargestellten Fahrzeugklassen unterschieden. Die Untersuchung wird bei allen Fahrzeugklassen auf Basis des NEDC-Testzyklusses durchgeführt, wobei bei der Überprüfung die CO₂- und Schadstoffemissionen, der Kraftstoff- und Stromverbrauch sowie die elektrische Reichweite bestimmt werden.

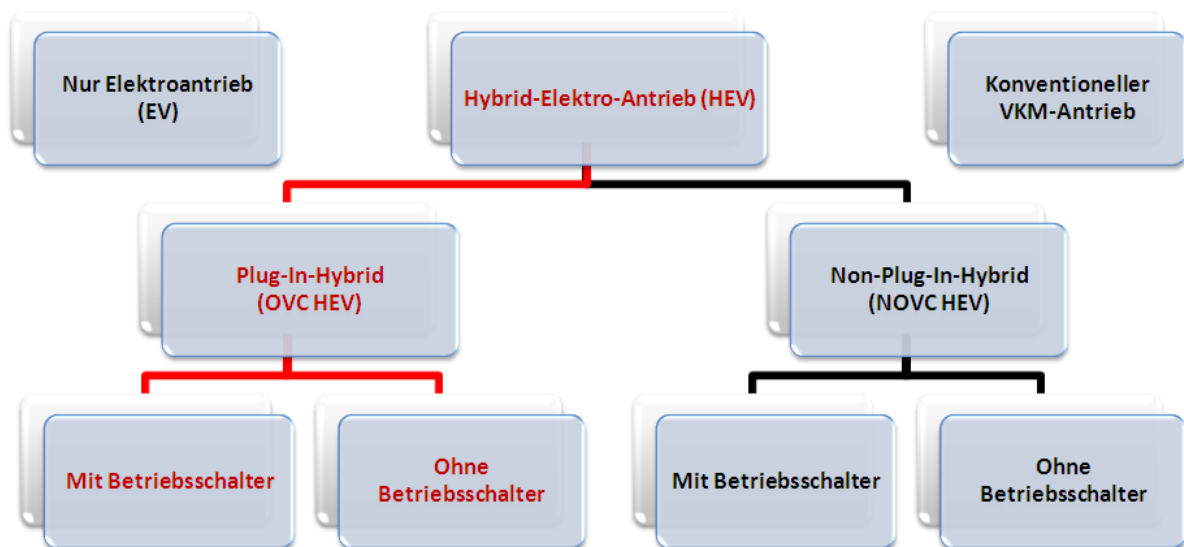


Abbildung 1.22: Verschiedene Fahrzeugklassen bei der EU-Fahrzeugzertifizierung [10]

Da mit dem EV-CEA-Konzept ein rein elektrischer Betrieb bei niedrigen Geschwindigkeiten über größere Reichweiten möglich sein soll, ist es hinsichtlich Klassifizierung als Plug-In-Vollhybridkonzept einzuordnen und demnach als „Off Vehicle Charging - Hybrid Electric Vehicle“ (OVC-HEV) zu definieren. Die Zertifizierung ist nach Regelung R101 der UN/ECE daher in drei Stufen zu absolvieren (siehe Abbildung 1.23).

Der erste Schritt in der Zertifizierung ist die Bestimmung der Reichweite. Dabei werden zwei Alternativen unterschieden. In Alternative 1 werden mit anfangs voller Batterie mehrere NEDCs hintereinander rein elektrisch gefahren, bis keine 50 km/h vom Fahrzeug erreicht werden können. Dann wird das Fahrzeug ausgerollt. Der zurückgelegte Weg entspricht der elektrischen Reichweite (D_e).

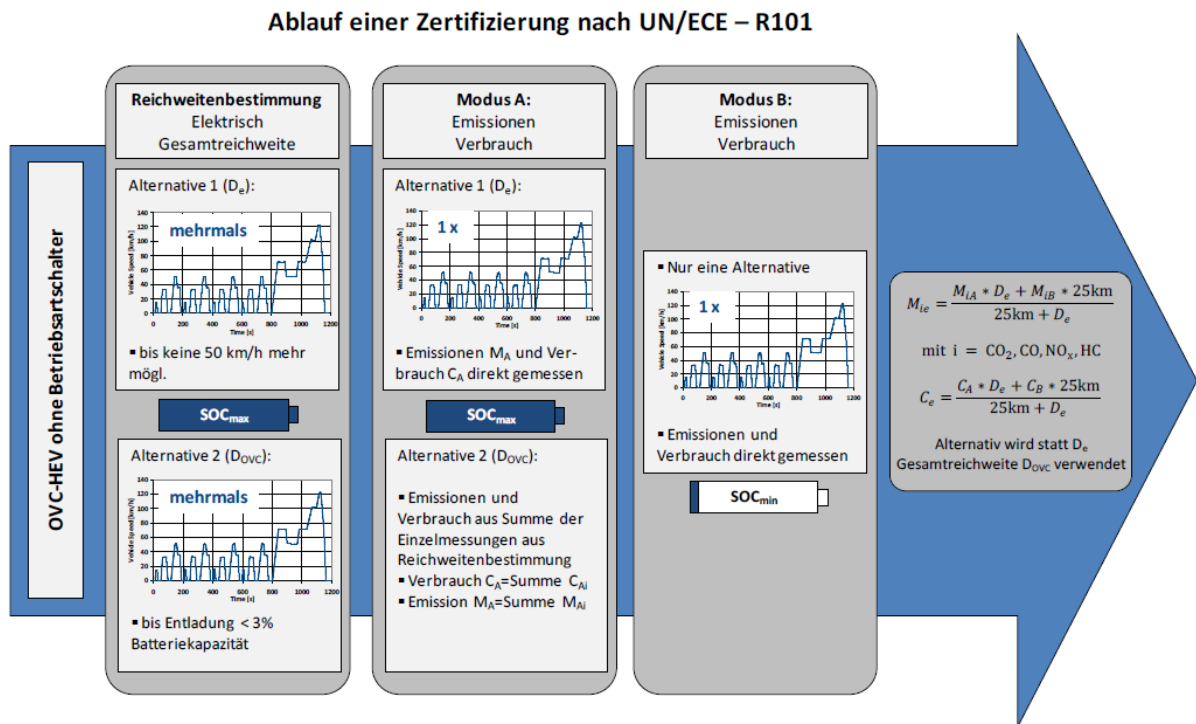


Abbildung 1.23: Zertifizierungsablauf nach UN/ECE-R101 [10]

In Alternative 2 ist zur Ermittlung der Gesamtreichweite (D_{OVC}) ein Mischbetrieb (VKM und Elektromotor) zulässig. Zur Zertifizierung werden mehrere NEDCs mit einer anfänglich vollen Batterie gefahren, bis die jeweils gemessene Entladung der Batterie beim $N + 1$ -ten Zyklus nicht mehr als 3 % der Nominalkapazität der vollen Batterie beträgt. Die Gesamtreichweite D_{OVC} entspricht der summierten Länge aller N vollständig gefahrenen NEDCs (siehe auch [10] und Gleichung 1.3).

$$D_{OVC} = N * D_{NEDC} \quad (1.3)$$

Nach einer erfolgreichen Bestimmung der Reichweite, startet in den nächsten zwei Schritten (Modus A und Modus B) die eigentliche Emissions- und Verbrauchsermittlung. Modus A kann wiederum in zwei Alternativen erfolgen. In Alternative 1 wird der Prüfzyklus und die Messung mit Auslösen des Anlassvorgangs gestartet und ein NEDC durchfahren. Die Prüfung endet mit dem Ende des Zyklusses. Die gewonnenen Messwerte für CO_2 - und Schadstoffemissionen M_1 sowie Kraftstoffverbrauch C_1 sind das Ergebnis im Modus A. In Alternative 2 erfolgt keine neue Fahrt, sondern es werden die Ergebnisse aus Alternative 2 der Reichweitenbestimmung verwendet. Das bedeutet, die Emissionen und der Verbrauch sind die Summe aus allen N vollständig gefahrenen Prüfzyklen.

Im dritten Schritt (Modus B) erfolgt eine Ermittlung von Verbrauch und Emissionen in einem NEDC-Zyklus mit vollständig entladener Batterie (SOC_{Min}).

Das Gesamtergebnis der Emissions- und Verbrauchswerte wird aus den Einzelergebnissen

aus Modus A und Modus B mit der Formel 1.4 (Bei elektrischer Reichweite D_e) oder Formel 1.5 (Bei elektrischer Reichweite D_{OVC}) ermittelt.

$$M_{ie} = \frac{M_{iA} * D_e + M_{iB} * 25km}{25km + D_e} \quad (1.4)$$

$$M_{iOVC} = \frac{M_{iA} * D_{OVC} + M_{iB} * 25km}{25km + D_{OVC}} \quad (1.5)$$

Der Index i steht als Ersatz für: CO_2 , CO, NO_x , HC

Wie aus den beiden Formeln ersichtlich, erfolgt eine Gewichtung der Ergebnisse aus Modus B mit dem konstanten Faktor von 25 km. Der Einfluss der Messergebnisse aus Modus B ist also umso geringer, je höher die elektrische oder OVC-Reichweite ist. Das bedeutet, dass mit höher werdender Reichweite D_e bzw. D_{OVC} der Verbrauch und die Emissionen sinken.

Ein besonderer Gesichtspunkt ergibt sich ab einer elektrischen Reichweite von 11 km. Ab diesem Wert kann ein NEDC vollständig elektrisch gefahren werden und Verbrauch und Emissionen aus Modus A sind null. Formel 1.4 verkürzt sich ab dieser Reichweite auf Formel 1.6:

$$M_{ie} = \frac{M_{iB} * 25km}{25km + D_e} \quad (1.6)$$

Es ist nun ein weiterer interessanter Punkt ersichtlich. Bei einer elektrischen Reichweite von 25 km werden die Zertifizierungswerte gegenüber der realen Ergebnisse aus den Messfahrten um 50 % reduziert. Dieser Punkt ist hinsichtlich Kosten/Nutzen-Verhältnis im Rahmen der Zertifizierung als Optimum anzusehen. In Abbildung 1.24 ist die prozentuale Reduzierung der Zertifizierungsergebnisse über die elektrische Reichweite aufgetragen.

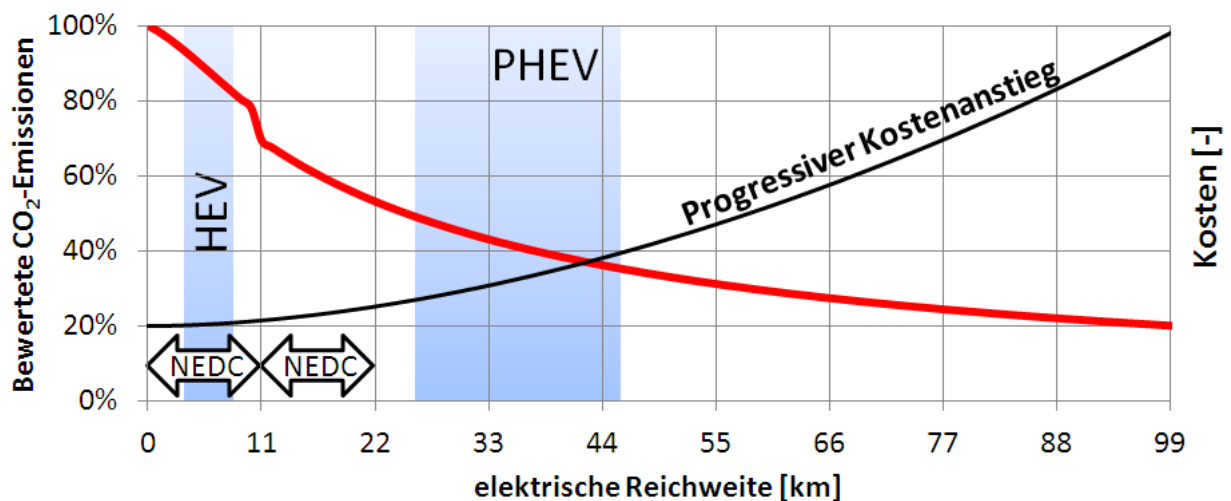


Abbildung 1.24: Zertifizierte CO_2 -Emissionen abhängig von elektrischer Reichweite [10]

Full-Hybrid Fahrzeuge (HEV) mit einer Reichweite von rund 5 km erreichen durch diese Regelung nur einen verhältnismäßig geringen Bonus. Plug-In-Hybride (PHEV) mit einer Reichweite von über 25km erhalten hingegen einen Zertifizierungsbonus der die Emissionen um mindestens 50 % reduziert. Der Bonuszuwachs nimmt allerdings mit zunehmender Reichweite ab. Da auch Kosten und Gewicht der Hybridisierung sowie die Ladezeit aufgrund der verhältnismäßig geringen Energiedichte der Batterie progressiv ansteigen, ist eine sinnvolle Auslegung der elektrischen Reichweite von PHEV auf Basis der Zertifizierung nach oben begrenzt und liegt unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Fahrstrecken in Deutschland im Bereich von rund 50 km.

Betrachtet man den absoluten CO₂-Bonus bei 25km elektrischer Reichweite über die Höhe der realen CO₂-Fahrzeugemissionen, so ist es aus Sicht des Fahrzeugherstellers zielführend, speziell Fahrzeuge mit hohen realen CO₂-Emissionen als PlugIn-Vollhybride mit entsprechend hoher elektrischer Reichweite auszuführen, da der absolute Bonus linear mit den realen Emissionen ansteigt. Auch die zusätzlichen Kosten durch die Hybridisierung fallen in diesem Fahrzeugsegment (meist Fahrzeuge aus der Ober-, Sport- und Luxusklasse) anteilmäßig geringer aus.

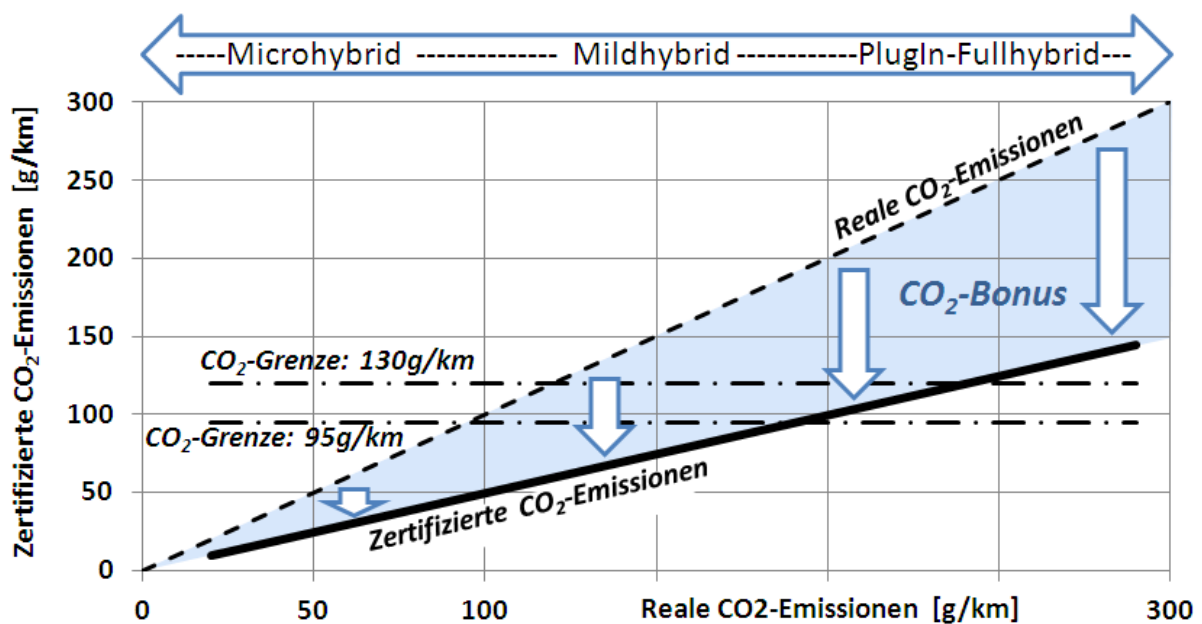


Abbildung 1.25: CO₂-Bonus abhängig vom Fahrzeugsegment

Für kleinere Fahrzeuge mit niedrigeren CO₂-Emissionen kann hingegen nur eine geringere absolute Reduzierung der CO₂-Emissionen erreicht werden. Daher ist auch das Kosten/Nutzen-Verhältnis der Hybridisierung dieser Fahrzeuge geringer. Bei Fahrzeugherstellern ist bei diesen Fahrzeugen aufgrund des geringeren Kosten/Nutzen-Verhältnisses und aufgrund von Sicherheitsvorteilen, ein Trend zu Niedervoltssystemen (48 V) erkennbar.

Weitere CO₂-Einsparungen können insbesondere bei kleinen Fahrzeugen z.B. durch Einsatz von Erdgas statt Benzin als Kraftstoff erreicht werden.

Kapitel 2

EV-CEA-Konzeptfindung

Im Rahmen dieses Kapitels erfolgt die Konzeptfindung des EV-CEA-Hybridantriebsstrangs. Ausgehend von einer Betrachtung der Möglichkeiten zur Hybridisierung und den aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen werden die Anforderungen an das EV-CEA-Konzept abgeleitet und eine Basistriebstrangtopologie ermittelt. Abschließend erfolgt eine Identifikation geeigneter Systemkomponenten.

2.1 Hybridisierungswege

Wie bereits in [9] dargestellt, können grundsätzlich zwei Hybridisierungswege unterschieden werden (Abbildung 2.1).

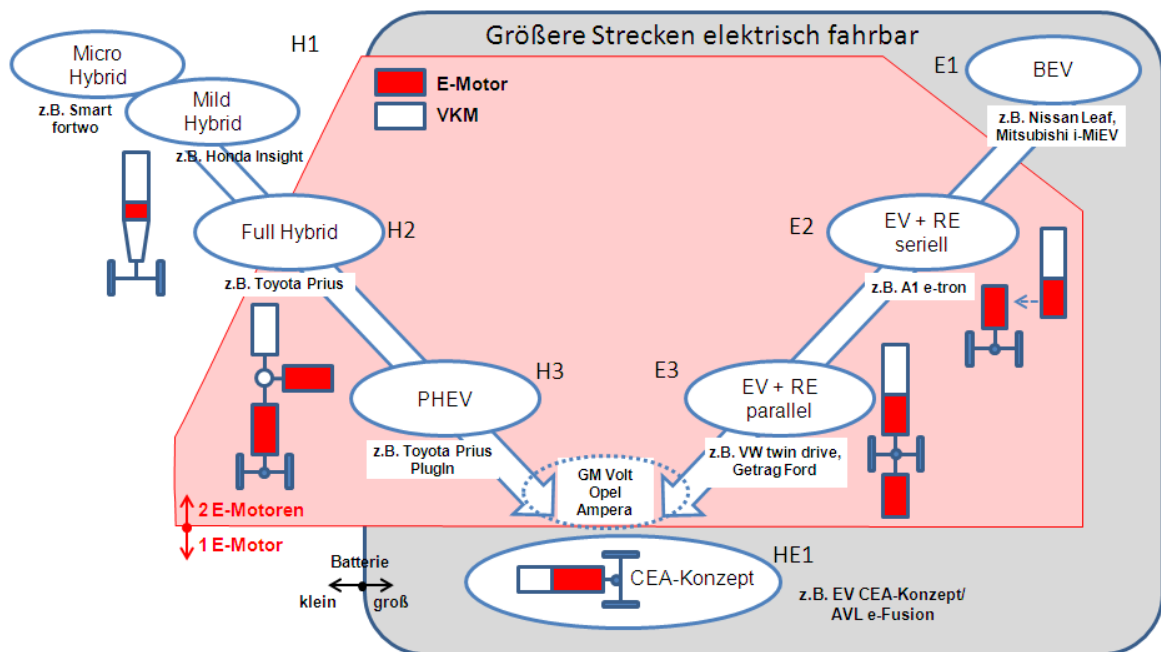


Abbildung 2.1: Möglichkeiten der Hybridisierung [9]

Zum einen ist eine Hybridisierung durch Implementierung von elektrischen Antriebskomponenten in konventionellen Fahrzeugen möglich (Abbildung 2.1 - linker Pfad), zum anderen über Verbrennungsmotorisierung von elektrischen Fahrzeugen (Abbildung 2.1 - rechter

Pfad). Während sich der erste Pfad mit dem Ziel entwickelte, verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge durch die Elektrifizierung wirtschaftlicher betreiben zu können, stützt sich die Entstehung des zweiten Pfades auf die Notwendigkeit höherer Reichweiten.

Letztendlich führen beide Wege in ihrer stärksten Ausprägung zu komplexen Fahrzeugkonzepten, welche ohne Einschränkungen zu konventionellen Fahrzeugen betrieben werden können und zusätzlich über eine entsprechend große elektrische Reichweite verfügen.

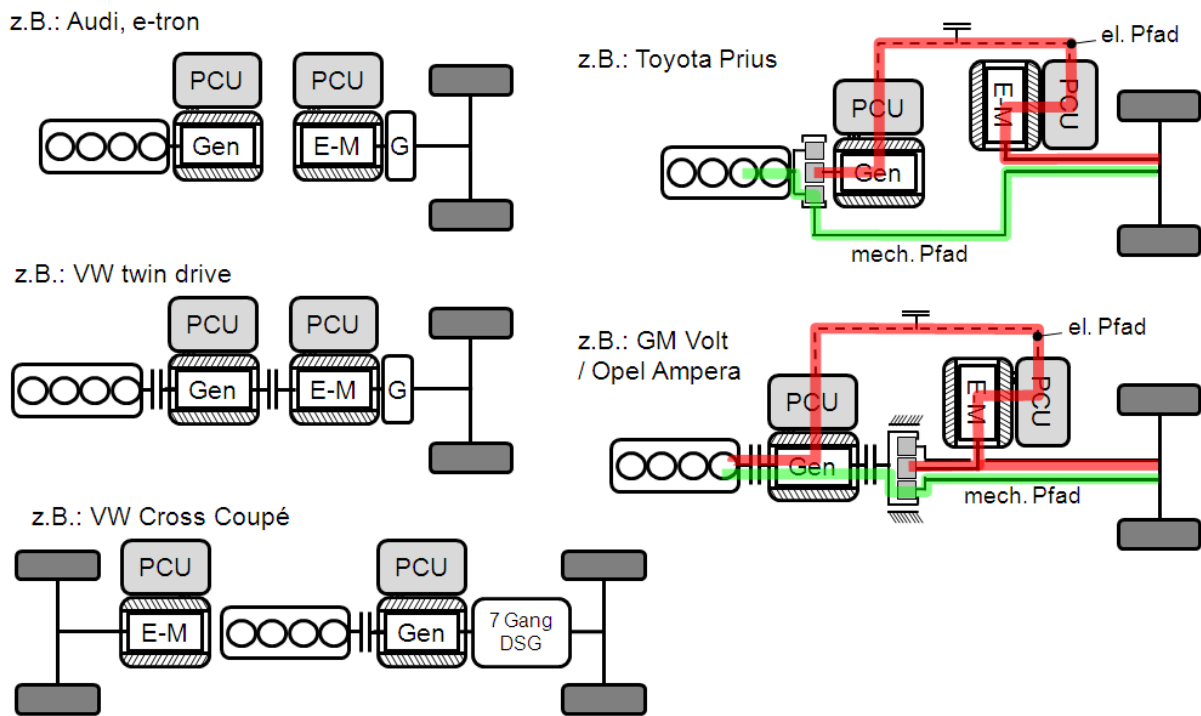


Abbildung 2.2: Detailbetrachtung der Hybridkonzepte

Diese Konzepte sind zum einen das Prius-Konzept und zum anderen die beiden VW-Konzepte (twin drive und Cross Coupé). Opel Ampera und GM Volt können als Zwischenvarianten angesehen werden. Bei all diesen Fahrzeugen liegt der Unterschied im Detail – alle Varianten sind in ihren Hauptkomponenten annähernd gleich, wobei einmal die Verbindung von RE und Antrieb über ein Planetengetriebe erfolgt (GM Volt und Prius) oder direkt, wie z.B. beim VW twin drive. Der Range-Extender-Betrieb kann bei fast allen Konzepten sowohl seriell als auch parallel erfolgen (eine Ausnahme ist hier das VW Cross Coupé) (Abbildung 2.2). Alle Konzepte bieten als wesentliche Voraussetzung eines Elektrofahrzeuges die Möglichkeit des rein elektrischen Fahrens, ob diese nun „Elektrofahrzeug mit Range Extender“ oder „Hybridfahrzeug“ genannt werden ist letztlich für den Anwender egal.

2.2 EV-CEA-Basiskonzept

Ausgehend von dem im vorigen Kapitel angeführten Konzepten und den aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen soll nach dem Grundsatz der intelligenten Vereinfachung (Intelligent Simplicity) das „Electric Vehicle with Combustion Engine Assist“-Konzept (EV-CEA-Konzept) als Hybridantriebskonzept für Fahrzeuge aus dem A-C-Segment entwickelt werden. Aus der Positionierung werden folgende Anforderungen an das EV-CEA-Konzept gestellt:

- Zertifizierte CO₂-Emissionen < 50g/km
- Akzeptable Reichweiten auch bei höheren Geschwindigkeiten
- Kompakter Triebstrang und hohe Wirkungsgrade
- Optimales Kosten/Nutzen-Verhältnis

CO₂-Emissionen < 50g/km

Um das CO₂-Ziel von < 50 g/km zu erreichen muss das EV-CEA-Konzept als Stadtfahrzeug über eine entsprechende elektrische Reichweite verfügen. Wie aus dem Kapitel 1.2.2 hervorgeht, ist es zielführend innerstädtisch elektrisch und außerstädtisch verbrennungsmotorisch zu fahren. Dies bedingt eine entsprechend große Dimensionierung von Elektromotor und Leistungselektronik für den innerstädtischen Betrieb. Aber auch die Batterie muss aufgrund der geforderten elektrischen Reichweite und den Leistungsanforderungen des Elektromotors entsprechend groß ausgelegt werden.

Akzeptable Reichweiten auch bei höheren Geschwindigkeiten

Des Weiteren wurde in Abschnitt 1.2.2 gezeigt, dass die Reichweite von Elektrofahrzeugen durch die Kombination mit einem Verbrennungsmotor entscheidend erhöht werden kann. Da mit dem EV-CEA-Konzept auch außerstädtisch bei höheren Geschwindigkeiten akzeptable Reichweiten erreicht werden sollen, ist der Einsatz eines parallel gekoppelten Verbrennungsmotors demnach auch hier sinnvoll.

Kompakter Triebstrang und hohe Wirkungsgrade

Hier stellt sich insbesondere die Frage, ob die Verbrennungskraftmaschine seriell oder parallel in den Triebstrang integriert werden soll. Im Allgemeinen werden im außerstädtischen, verbrennungsmotorischen Betrieb höhere Lasten gefordert. Aus diesem Grund ist eine parallele Koppelung der seriellen vorzuziehen (siehe auch 1.4.1). Auch hinsichtlich des kompakten Aufbaus ist ein paralleler Hybrid durch Wegfall des sonst benötigten zweiten Elektromotors gegenüber dem seriellen Konzept von Vorteil. Außerdem ergänzen sich die unterschiedlichen Leistungscharakteristiken der beiden Antriebsarten günstig für den

Fahrzeugbetrieb (weitgehend konstante Leistung des Elektromotors und in erster Näherung konstantes Drehmoment des Verbrennungsmotors über der Drehzahl).

Wie in Abschnitt 1.4.1 dargestellt, wäre hinsichtlich des Wirkungsgrades bei geringen verbrennungsmotorischen Lasten eine serielle Anordnung zu bevorzugen. Beim EV-CEA-Konzept werden diese Betriebspunkte jedoch elektrisch abgedeckt.

Optimales Kosten/Nutzen-Verhältnis

Beim EV-CEA-Konzept ermöglicht die parallele Anordnung eines leistungsstarken Elektromotors den Wegfall der zweiten E-Maschine mit all den sich damit ergebenden Vorteilen bei ähnlicher Reichweite und Wirkungsgrad gegenüber den deutlich aufwändigeren Lösungen mit zwei E-Motoren. Auch hinsichtlich der Funktionalitäten gibt es gegenüber 2-Motoren-Konzepten nur geringe Einschränkungen. Zwar steigen die Anforderungen an die Betriebsstrategie hinsichtlich des Energiemanagements, dies stellt jedoch mit dem heutigen Entwicklungsstand kein Hindernis mehr dar (Stichwort: Vernetztes Fahren).

Durch diese kostenoptimierte Hybridisierung bei gleichzeitig maximaler Nutzung der gesetzlichen Förderungen kann ein optimales Kosten/Nutzen Verhältnis erreicht werden.

Entsprechend den abgeleiteten Erkenntnissen ergibt sich schließlich der in Abbildung 2.3 dargestellte Basisaufbau des EV-CEA-Konzeptes. Der Verbrennungsmotor ist direkt über eine Kupplung mit dem Elektromotor verbunden. Auf der Abtriebsseite wird über einen Schwingungsdämpfer das Getriebe gekoppelt. Wird zwischen Getriebe und Elektromotor eine weitere Kupplung verbaut, ist auch ein serielles Laden bei Fahrzeugstillstand möglich. Hinsichtlich Klassifizierung ist das EV-CEA-Konzept als PHEV mit paralleler

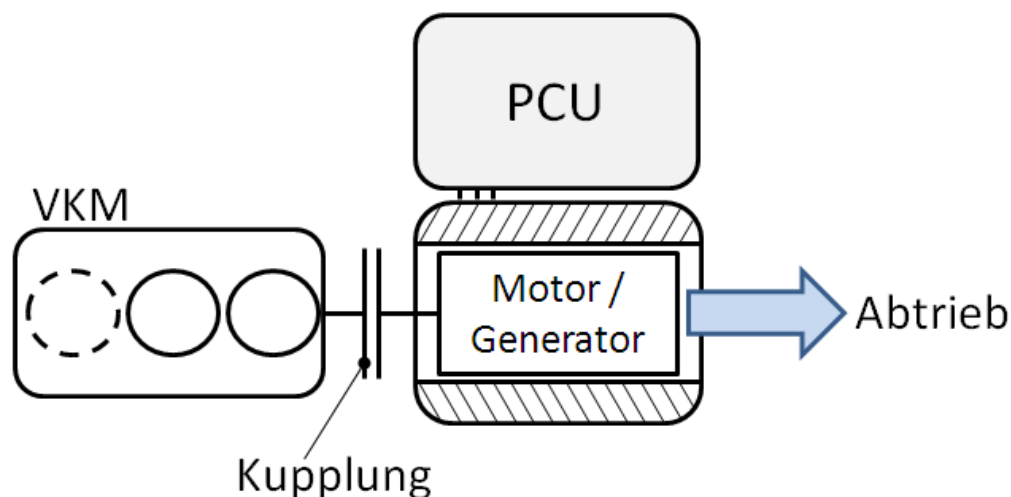


Abbildung 2.3: Basisaufbau EV-CEA-Konzept

Hybridtopologie einzuordnen. Da das Fahrzeug jedoch überwiegend innerstädtisch elektrisch betrieben werden soll und die Verbrennungskraftmaschine nur in seltenen Fällen im außerstädtischen Betrieb dazugeschaltet wird, ist die Bezeichnung „Elektrofahrzeug mit verbrennungsmotorischer Unterstützung“ der obigen vorzuziehen. Aber auch hier gilt:

Das EV-CEA-Konzept bietet als wesentliche Voraussetzung eines Elektrofahrzeuges die Möglichkeit des rein elektrischen Fahrens, ob dieses nun „Elektrofahrzeug mit verbrennungsmotorischer Unterstützung“ oder „Hybridfahrzeug“ genannt wird ist letztlich für den Anwender egal.

Vergleich zu anderen Konzepten

Stellt man die Funktionalität, Potentiale und die Gesamtkosten unterschiedlicher Hybridkonzepte gegenüber, wird der Kosten/Nutzen-Vorteil des EV-CEA-Konzeptes deutlich (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung der Hybridkonzepte

	(Micro) Mild Hybrid	Full Hybrid LVZ	PHEV LVZ	EV + RE seriell	EV + RE parallel	EV-CEA Konzept
<i>Start/Stop</i>	+	+	+		+	+
<i>Rekuperation</i>	+	++	++	++	++	++
<i>Lastpunktverschiebung</i>	(-) o	++	++		+	+
<i>Boost</i>	(-) o	+	+	-	++	++
<i>Elektrisch Fahren (<20km)</i>	--	-	+	+	+	+
<i>Seriell laden</i>	-	++	++	++	++	+
<i>CO₂-Potential</i>	o	+	++	+	++	++
<i>Fahrspaß</i>	(o)+	+	+	o	++	++
<i>Kosten Gesamtsystem</i>	++	-	--	-	-	+
<i>Kosten/Nutzen Verh.</i>	+	+	+	o	+	++

Bei den Konzepten: Full-Hybrid-LVZ, PHEV-LVZ und EV + RE parallel können alle Hybridfunktionen umgesetzt werden. Auf Basis der Nutzungsveränderlichkeit wird der Kunde diesen Fahrzeugtyp daher sicherlich akzeptieren. Allerdings hat man damit auch nahezu zwei vollständige Antriebssysteme im Fahrzeug verbaut, und in Verbindung mit einer ausrei-

chend großen Batterie für die elektrische Reichweite (PHEV) steigen die Systemkosten drastisch an, sodass das Absatzpotenzial dieser Fahrzeuge begrenzt ist.

Die Nachteile des EV + RE seriell wurden bereits in Abschnitt 1.4.1 diskutiert. Diese beruhen hauptsächlich auf der großen Verbrennungskraftmaschine und den erhöhten Energieumwandlungsverlusten insbesondere bei höheren Lasten im Vergleich zu parallelen Hybridkonzepten.

Bei Mild-Hybrid-Konzepten können die Funktionen aufgrund der niedrigen elektrischen Leistung nur eingeschränkt umgesetzt werden. Allerdings resultiert daraus im Vergleich zu den anderen Hybridvarianten der geringste Kostenanstieg. Hinsichtlich Kosten/Nutzen-Verhältnis ist dieses Konzept allerdings hinter dem EV-CEA-Konzept einzugliedern.

Abgrenzung des EV-CEA-Konzeptes zu konventionellen Parallelhybridkonzepten mit einem Elektromotor

Das EV-CEA-Konzept stellt nach dem topologischen Aufbau einen klassischen parallelen Antriebsstrang mit einem Elektromotor dar. Im Unterschied zu bereits am Markt vorhandenen Vollhybridkonzepten, wie z.B. dem Porsche Cayenne Hybrid, nutzt das EV-CEA-Konzept als Stadtfahrzeug den Elektromotor als primäre Antriebsquelle. Der Verbrennungsmotor wird nur unterstützend bei höheren Geschwindigkeiten zugeschaltet. Daraus resultiert eine verhältnismäßig kleine Verbrennungskraftmaschine mit zwangsläufig geringen Zylinderzahlen was zu wesentlichen Unterschieden in der Triebstrangauslegung führt. Des Weiteren ergeben sich aus den grundlegend unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten unterschiedliche Betriebsstrategien, was zu wiederum unterschiedlichen Anforderungen an die Systemkomponenten führt.

2.3 EV-CEA-Betriebsmodi

Mit der im vorigen Kapitel hergeleiteten EV-CEA-Hybridtopologie können die in Abbildung 2.4 dargestellten Betriebsmodi realisiert werden.

Mode 1

Bei geöffneter Kupplung zwischen VKM und Elektromotor ist ein rein elektrischer Betrieb ohne Schleppverluste der Verbrennungskraftmaschine möglich.

Mode 2

Ist die Kupplung zwischen Verbrennungs- und Elektromotor geschlossen, kann ein paralleler Antrieb durch beide Motoren erfolgen. Dieser Mode ist insbesondere bei: Boost, Lastpunktverschiebung und niedrigen SOC-Ständen der Batterie interessant.

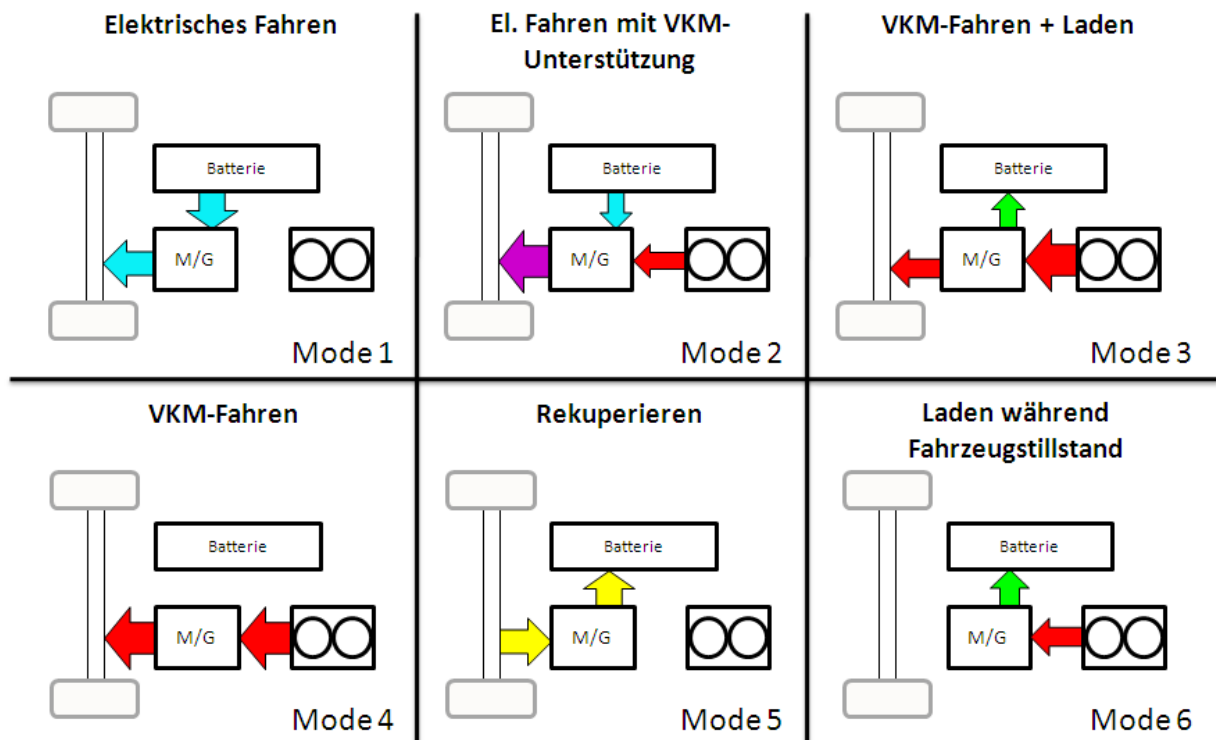


Abbildung 2.4: Die EV-CEA-Betriebsmodi

Mode 3

In diesem Mode kann die Batterie während der Fahrt geladen werden. Dazu wird von der VKM ein erhöhtes Drehmoment gefordert und der Überschuss durch den Elektromotor abgebremst. Diese Lastpunktverschiebung ist ebenfalls bei niedrigen SOC-Ständen der Batterie interessant.

Mode 4

Ist die Kupplung zwischen VKM und Elektromotor geschlossen, kann auch ein rein verbrennungsmotorischer Betrieb erfolgen. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass sich in diesem Betriebsmodus der Elektromotor mit dreht. Die daraus resultierenden Konsequenzen werden in Abschnitt 5.4 diskutiert.

Mode 5

Ist Bremsleistung nötig, kann der Elektromotor als Generator arbeiten und somit die überschüssige Energie rekuperiert werden. Die Kupplung zwischen Verbrennungs- und Elektromotor ist in diesem Mode geöffnet um unnötige Verluste durch Schleppen des Verbrennungsmotors zu vermeiden.

Mode 6

Während Stillstandsphasen ist es möglich durch Öffnen der zweiten Kupplung zwischen Elektromotor und Antriebsachse die Batterie zu laden. VKM und Elektromotor verhalten sich in diesem Mode wie ein serieller Range Extender.

Ein Nachteil ergibt sich aus der fehlenden Lademöglichkeit bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten (unter ca. 20 km/h, wenn die Elektromotordrehzahl (n_{EM}) kleiner als die minimale Verbrennungsmotordrehzahl (n_{VKMmin}) ist). Dieser Nachteil lässt sich jedoch durch eine entsprechend angepasste Betriebsstrategie ausgleichen (siehe Kapitel 3.4). Ist für bestimmte Anforderungen ein verbrennungsmotorisches Anfahren erforderlich, wäre auch ein Alternativkonzept mit Wandler denkbar.

2.4 Ermittlung geeigneter Systemkomponenten

In den kommenden Abschnitten erfolgt eine Identifikation geeigneter EV-CEA-Systemkomponenten auf Basis deren Vor- und Nachteile hinsichtlich der Systemanforderungen. Des Weiteren sollen geeignete Komponenten zum Aufbau eines EV-CEA-Demonstrators ermittelt werden. Das wesentliche Ziel dieses Aufbaues ist, das Potential des EV-CEA-Konzeptes zu untersuchen und schließlich einen Funktionsnachweis des Konzeptes zu liefern. Um das Kosten- und Entwicklungsrisiko des Aufbaus zu verringern, wird dies mit am Markt vorhandenen Komponenten durchgeführt. Die Auswahl wird daher entscheidend von der Komponentenverfügbarkeit beeinflusst.

Wie bereits in [38] dargestellt, setzt das zur Reduzierung von Entwicklungs- und Produktionskosten in der Automobilindustrie konsequent eingesetzte Baukastenprinzip eine klare Modularisierung voraus. Das EV-CEA-Hybridkonzept wurde aus diesem Grund zur Ermittlung geeigneter Systemkomponenten in die folgenden Module unterteilt (Abbildung 2.5). Die Module Getriebe und Batterie sind als keine direkten Bestandteile des Konzeptes, sondern als Schnittstellen zum Fahrzeug zu sehen. Im Rahmen dieser Untersuchung soll jedoch auch hier eine Auslegungsempfehlung gegeben werden.

- Verbrennungsmotor-Modul (VKM-Modul)
- Modul Elektromotor + Leistungselektronik
- Kupplungs-Modul
- (Batterie-Modul und Getriebe-Modul)

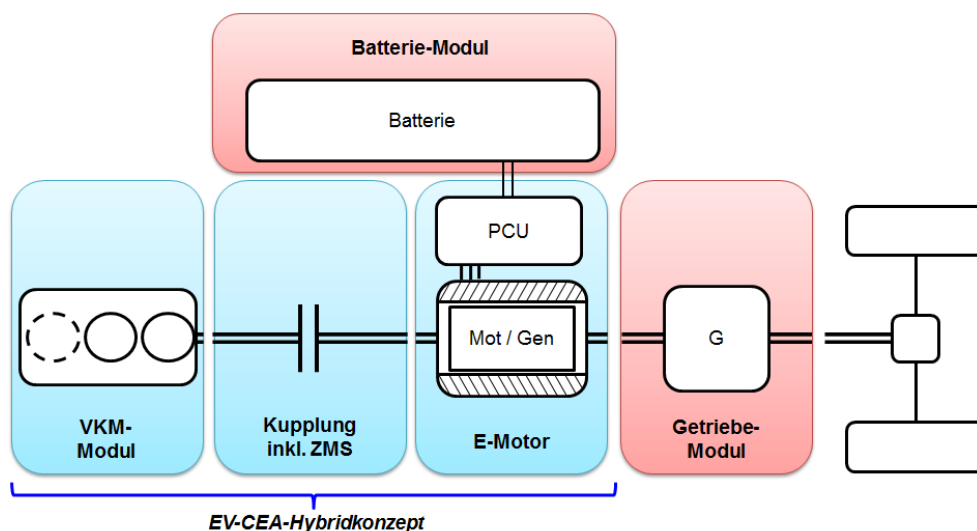


Abbildung 2.5: Modularisierung des EV-CEA-Konzeptes

2.4.1 Verbrennungskraftmaschine

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs hat entscheidende Auswirkungen auf die Motorenentwicklung. Downsizing der Verbrennungskraftmaschine im Sinne der Effizienzsteigerung führt zwangsweise zu einer Verringerung der Zylinderzahl (der reduzierte Fahrspaß kann bei einer parallelen Hybridtopologie durch „Boosten“ wieder erhöht werden). Aber auch der intermittierende Verbrennungsmotorbetrieb und Hybridfunktionen wie z.B.: Start/Stop oder Lastpunktverschiebung führen zu entscheidenden Änderungen im VKM-Anforderungskatalog:

- Start/Stop-Häufigkeit nimmt zu
 - Lagerverschleiß
 - Starter/Anlasser Verschleiß
 - kritische Drehzahl wird sehr häufig durchlaufen
 - * Nockenwellen – Antrieb
 - * NVH (Noise, Vibration, Harshness)
- längere Stillstandzeiten (Range Extender)
- Betriebspunktverschiebung (Steuerzeiten, Verbrennung)
- Abgasnachbehandlung (längere Stopzeiten)

Die Ermittlung einer geeigneten Verbrennungskraftmaschine für das EV-CEA-Konzept erfolgte im Rahmen einer Diplomarbeit [47]. In dieser wurde eine breite Recherche der am Markt befindlichen Ein- bis Dreizylinder Verbrennungsmotoren durchgeführt und schließlich drei geeignete Motoren für das Konzept identifiziert:

- Rotax 600 A.C.E
- Weber MPE 850
- Smart M 132

Weber MPE 850 DOHC NA

Im Rahmen des Zweizylinder-Konsortiums mit den Partnern: Robert Bosch GmbH, Weber Motor, TU Darmstadt und IVD Prof. Hohenberg GmbH wurde der Verbrennungsmotor Weber MPE 850 zu einem fortschrittlichen Automotive-Motor umgebaut und zum Aufbau des EV-CEA-Demonstrators zur Verfügung gestellt.

Der Zweizylinder Verbrennungsmotor ist für den Demonstratoraufbau besonders gut geeignet, da dieser gegenüber drei- und mehrzylinder-Motoren schwerer zu beherrschen ist und daher die höchsten Ansprüche hinsichtlich Drehschwingungsberuhigung fordert. In Tabelle 2.2 sind die Daten des Motors angeführt.

Tabelle 2.2: Daten des MPE 850 DOHC NA (Daten nach [9])

Weber MPE 850 DOHC	
Bauart	2-Zylinder Reihen-Viertakt-Ottomotor mit Saugrohreinspritzung, oder Direkteinspritzung + Turbo
Hubraum	850 cm ³
Drehmoment	>65 Nm von 1500 min ⁻¹ bis 6000 min ⁻¹
Nennleistung	46 kW bei 6000 min ⁻¹
Verdichtung	12,8:1
Zündfolge	360 °KW
Hub x Bohrung	68 mm x 89 mm
Ventilsteuerung	Vierventiltechnik, DOHC mit Rollenschlepphebel und hydraulischem Ventilspielausgleich, Phasensteller Ein- und Auslass
Motormanagement	Bosch MED 17.9
Gewicht	ca. 50 kg (trocken)
Direkteinspritzer	Zentrale Lage von Zündkerze und Injektor
Schmierung	Nassumpf Ölkreislauf mit Ölwanne

In Abbildung 2.6 ist der neue Verbrennungsmotor im Vergleich zur ursprünglichen Version angeführt.

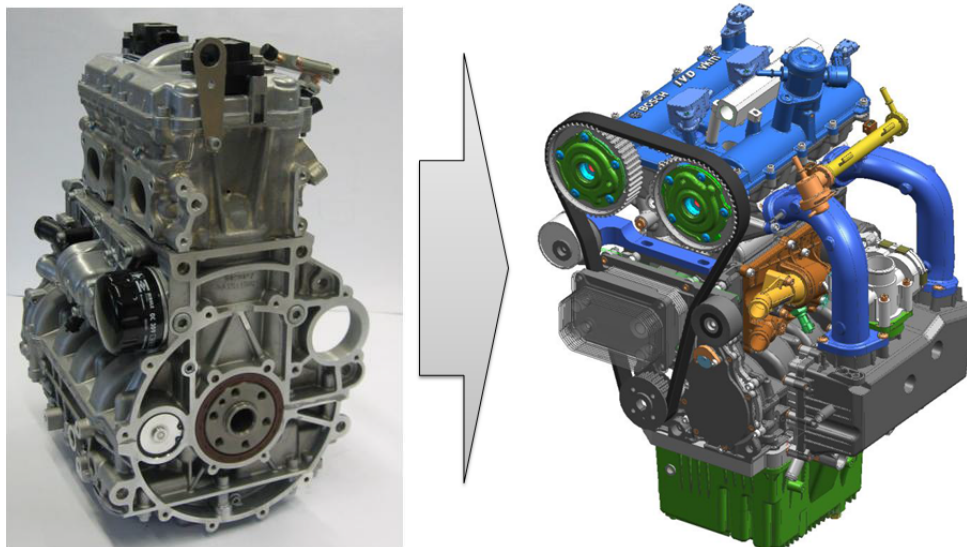


Abbildung 2.6: Der aufgerüstete 2 Zylindermotor: MPE 850 DOHC NA

Eine Grundbedatung des Verbrennungsmotors erfolgte im Hause der Fa. Bosch. Im Bestpunkt zeigt der Verbrennungsmotor einen spezifischen Verbrauchswert von 242 g/kWh (Abbildung 2.7).

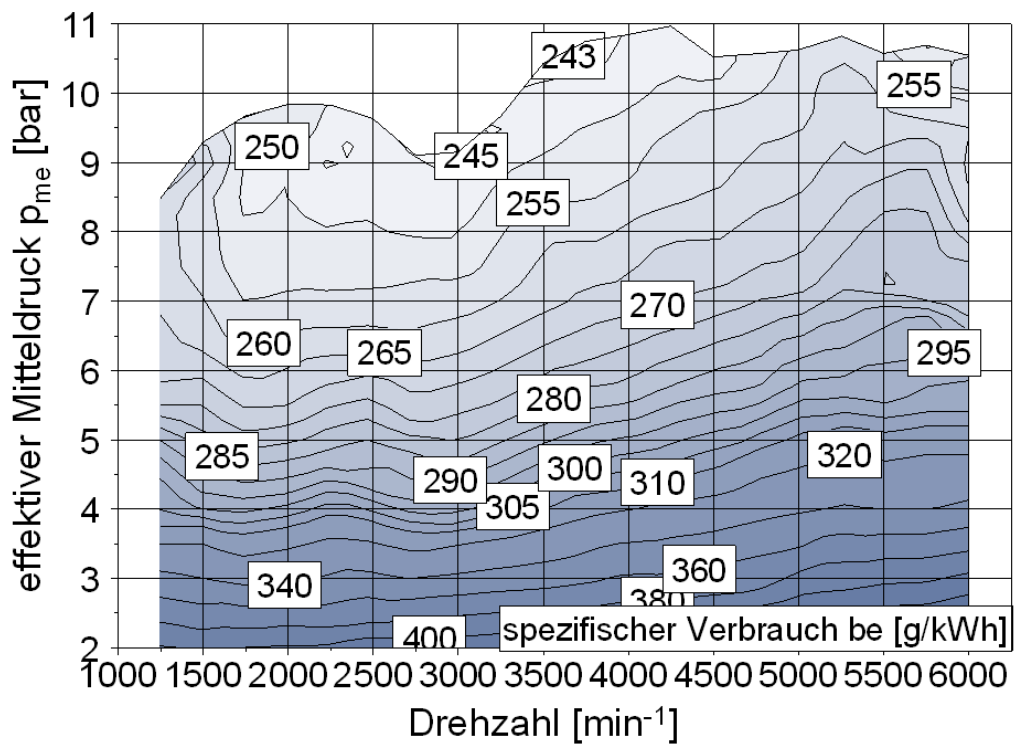


Abbildung 2.7: Spezifischer Verbrauch des MPE 850 DOHC NA [9]

Der Gesamtreibmitteldruck liegt zwischen 0,8 bar und 1,8 bar (Abbildung 2.8). Dies stellt im Vergleich zu ähnlichen Motorkonzepten einen guten Wert dar [49].

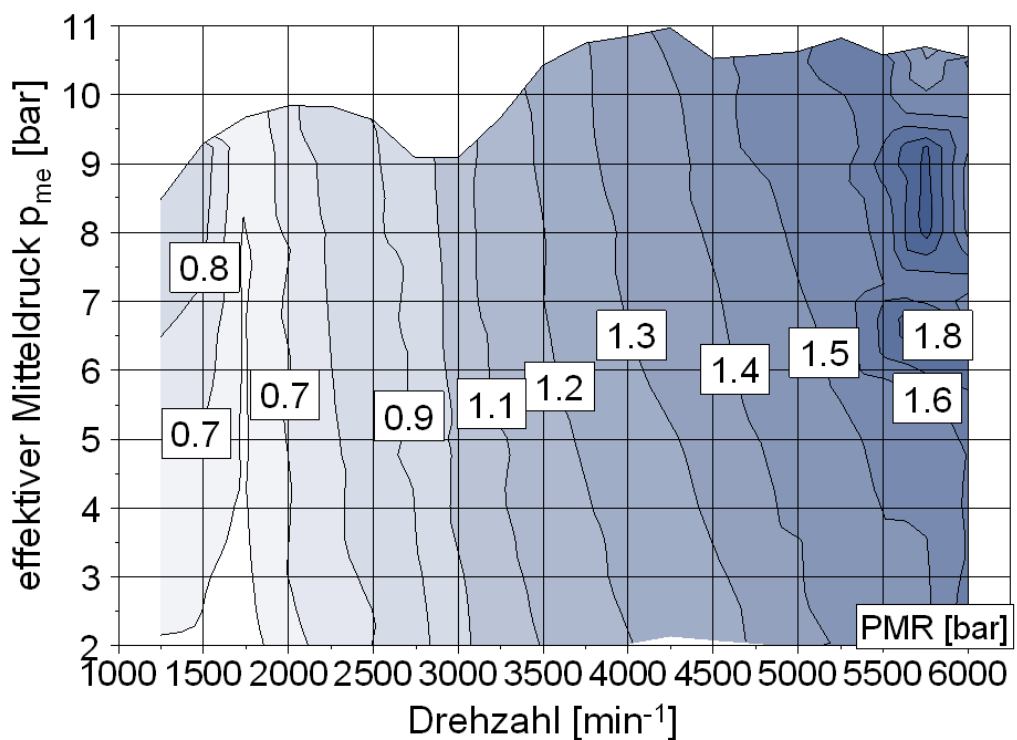


Abbildung 2.8: Reibmitteldruck des MPE 850 DOHC NA [9]

Der Motor wird im gesamten Kennfeld mit $\lambda = 1$ betrieben. Das bedeutet, dass auf eine Gemischanreicherung zum Bauteilschutz und Leistungssteigerung verzichtet wird. Im gesamten Kennfeld werden wirkungsgradoptimale Verbrennungsschwerpunkte erreicht (Abbildung 2.9).

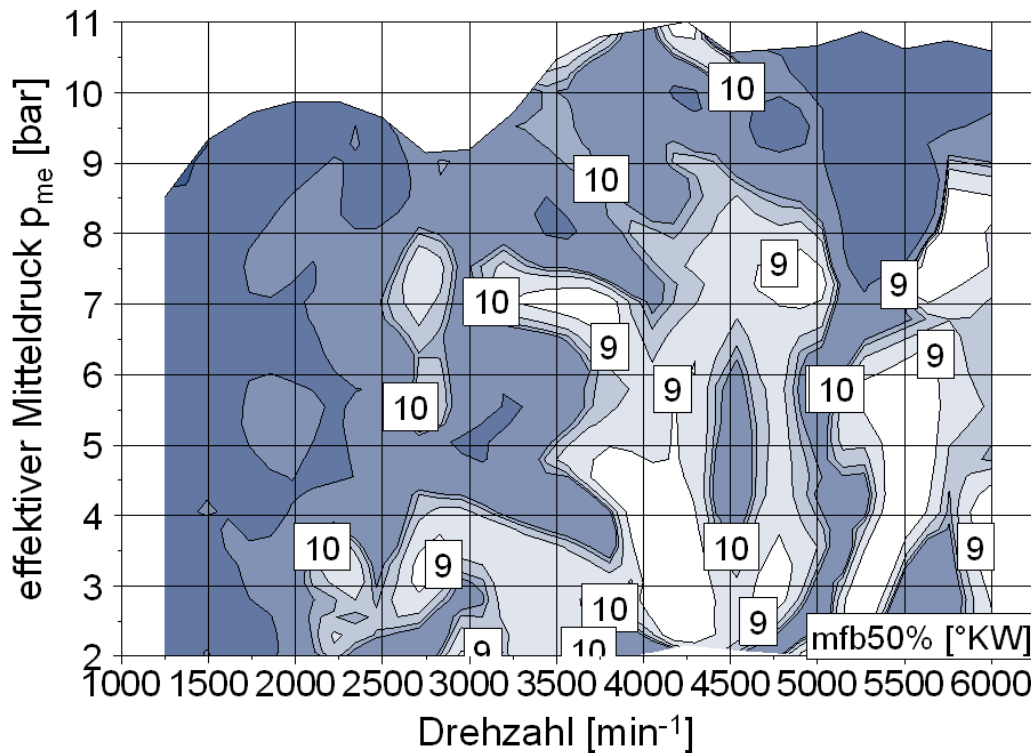


Abbildung 2.9: Verbrennungsschwerpunkt des MPE850 DOHC NA [9]

Eine Klopfbegrenzung liegt nicht vor. Die Brenndauer liegt trotz hoher Restgasraten im Teillastbereich (über 25 %) im gesamten Kennfeldbereich unter 30°KW . Dies ist hauptsächlich auf das hohe Turbulenzniveau im Brennraum und die Tumbleauslegung der Einlasskanäle zurückzuführen [9].

Die Entwicklungstätigkeiten des Verbrennungsmotors wurden bei Bosch im Rahmen einer Dissertation durchgeführt. Genaue Informationen zum Projekt können in [27] nachgelesen werden.

2.4.2 Elektromotor

Im Bereich Elektromotoren stellt die Industrie ein breites Spektrum an Maschinenkonzepten zur Verfügung. Da der Einsatz im Antriebsstrang jedoch besonders hohe und spezielle Anforderungen an den Elektromotor stellt, müssen zur Auswahl eines geeigneten Motors die Stärken und Schwächen der unterschiedlichen Maschinenkonzepte genau analysiert werden. Unabhängig von Einsatzort und -art im Antriebsstrang (z.B. serieller oder paralleler Betrieb), lassen sich allgemein gültig die folgenden wesentlichen Entscheidungskriterien ableiten (Tabelle 2.3 - links). Werden Einsatzort und -art der Maschine berücksichtigt, treten bestimmte Eigenschaften mehr oder weniger stark in den Vordergrund bzw. kommen weitere wichtige Anforderungen hinzu (Tabelle 2.3 - rechts).

Tabelle 2.3: Zu berücksichtigende Eigenschaften des Elektromotors

Allgemeine Anforderungen	Zusätzliche Anforderungen
<ul style="list-style-type: none"> • Wirkungsgradverlauf • Zuverlässigkeit • Leistungsdichte • Kosten • Regel-/Steuerbarkeit • Geräuschbildung • Technische Reife 	<ul style="list-style-type: none"> • Drehzahlbereich • Drehmomentdichte* • Optimaler Wirkungsgradbereich • Verluste im Leerlauf • Bauform • ...

* Hohes Drehmoment bei geringem Motorvolumen

Durch eine Grobselektion auf Basis einer Betrachtung bisheriger elektrifizierter Fahrzeugkonzepte lassen sich folgende Motoren als mögliche Kandidaten zum Einsatz im CEA-Konzept ableiten:

- Gleichstrommaschine (GM)
- Asynchronmaschine (ASM)
- Synchronmaschine (SM)
- permanenterregte Synchronmaschine (PMSM)
- geschaltete Reluktanzmaschine (GRM)

Um letztlich die richtige Entscheidung treffen zu können, werden die Eigenschaften dieser Maschinen in nächsten Schritt einer genaueren Untersuchung unterzogen.

Die Gleichstrommaschine

Die Gleichstrommaschine wurde insbesondere in den Anfängen der Elektrifizierung wie zum Beispiel im Semper Vivus (siehe Kapitel 1.3) verbaut. Das lag daran, dass es damals noch keine wirkliche Alternative gab und die Entwicklung des Asynchronmotors erst in den Anfängen war. Aufgrund der langen Geschichte ist der Motor heute sehr ausgereift und erlaubt eine sehr einfache und kostengünstige Regelung (Abbildung 2.10).

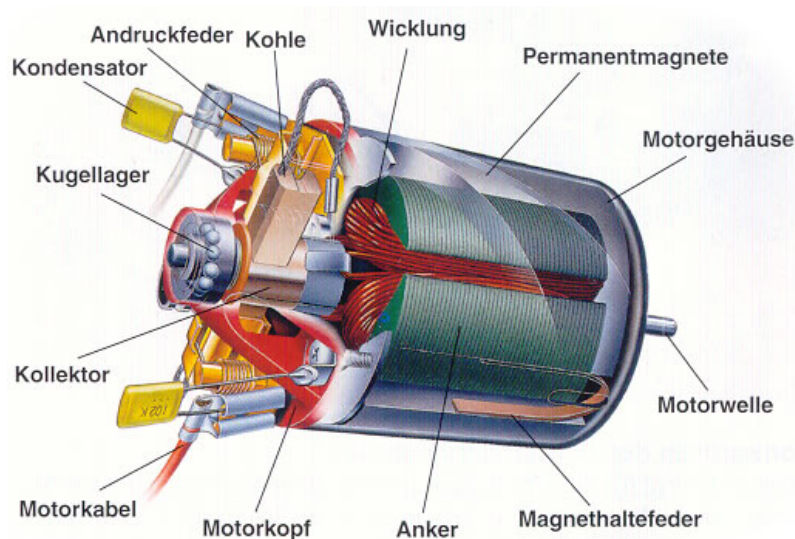


Abbildung 2.10: Aufbau einer Gleichstrommaschine [33]

Ein wesentlicher Nachteil der Maschine sind die benötigten Schleifkontakte am Kommutator mit denen der elektrische Kontakt zum Rotor hergestellt wird. Die verwendeten Kohlebürsten begrenzen den Strom und somit auch die Überlastfähigkeit. Sie erhöhen auch den Wartungsaufwand sowie die Verschleißanfälligkeit der Maschine. Bei höheren Leistungen, welche insbesondere bei Vollhybridsystemen notwendig sind, wird zusätzlich eine Wendepol- und Kompensationswicklung benötigt, was zu einer Erhöhung des Bauraums und der Kosten führt.

Durch Einsatz von Permanentmagneten (Permanentenerregung) anstatt einer Erregerwicklung kann die Leistungsdichte und der Wirkungsgrad erhöht werden. Beides ist jedoch trotz Permanentenerregung den Drehstrommaschinen unterlegen. Der Wirkungsgradnachteil ist im Wesentlichen auf den erheblichen Anteil an Bürstenverlusten, insbesondere im kleineren Leistungsbereich zurückzuführen. Die beim Einsatz von Permanentmagneten resultierende fehlende Möglichkeit der Feldschwächung erweist sich im Fahrzeugeinsatz zusätzlich als ungünstig.

Die Asynchronmaschine

Die Asynchronmaschine ist eine Drehstrommaschine und hat aufgrund ihrer Vorteile hinsichtlich Robustheit, Anschaffungs- und Wartungskosten, Leistungsdichte und Wirkungsgrad die Gleichstrommaschine weitestgehend verdrängt. Der Motor besteht aus einem Stator mit eingelegter Ständerwicklung, die als Mehrphasenwicklung ausgeführt ist (Abbildung 2.11).

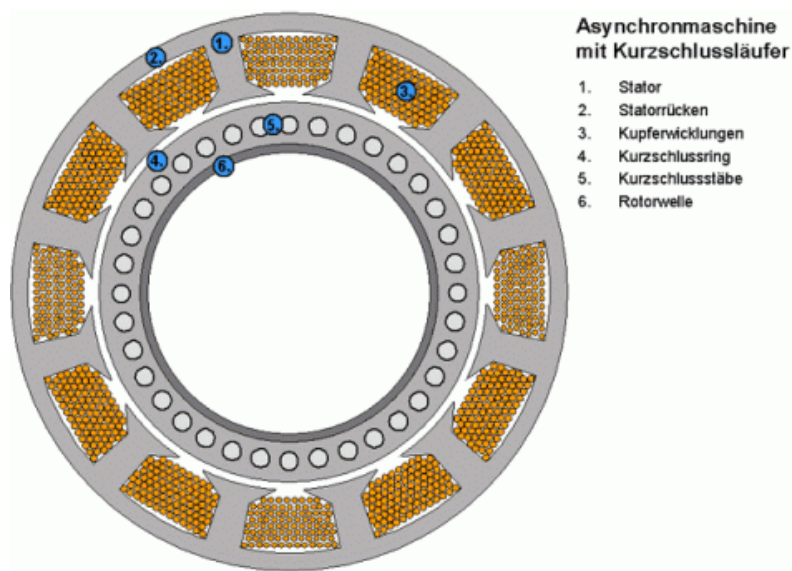


Abbildung 2.11: Die Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer [17])

Der Läufer wird entweder als Kurzschlussläufer (Käfigläufer) oder als Schleifringläufer ausgeführt (siehe Abbildung 2.12). Beim Kurzschlussläufer besteht die Wicklung aus gut leitenden Leiterstäben welche an den Enden mittels Kurzschlussringen kurzgeschlossen sind. Da diese Ausführung sehr robust ist, können Drehzahlen bis zur fünffachen Eckdrehzahl erreicht werden.

Der Schleifringläufer ist grundsätzlich gleich aufgebaut wie der Kurzschlussläufer, mit dem Unterschied, dass die Läuferwicklungen nicht kurzgeschlossen sind sondern über die Schleifringe nach außen geführt werden. Dadurch besteht die Möglichkeit durch Änderung des Stroms (über Widerstände) Drehzahl und Anlaufmoment zu variieren. Wie auch bei der Gleichstrommaschine sind die beim Schleifringläufer benötigten Bürsten sehr wartungsintensiv und daher nur bedingt zum Einsatz in Fahrzeugen geeignet. Für die folgenden Untersuchungen werden demnach nur Asynchronmaschinen mit Kurzschlussläufer untersucht.

Zur Bereitstellung der phasenverschobenen Wechselströme wird ein Umrichter benötigt, welcher die Ströme mittels feldorientierter Regelung in die E-Maschine speist.

Die Hauptverluste stellen ohmsche Verluste in der Statorwicklung und den Rotorstäben dar.

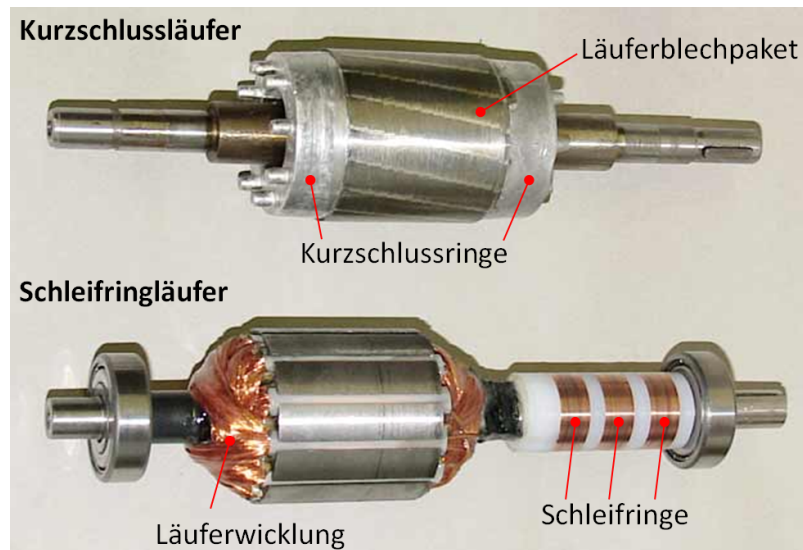


Abbildung 2.12: Kurzschluss- und Schleifringläufer (Abgeänderte Darstellung aus [23])

Aufgrund des nötigen Magnetisierungsstroms sind diese insbesondere im Grunddrehzahlbereich entscheidend. Bei hohen Drehzahlen (im Feldschwächungsbereich) zeichnet sich die Maschine jedoch aufgrund der Feldschwächungsmöglichkeit durch ihren guten Wirkungsgrad aus.

Ein wesentlicher Nachteil der Asynchronmaschine stellt die Erwärmung des Rotors aufgrund der Rotorverluste dar. Da eine effektive Kühlung des Rotors äußerst schwierig ist, wird die Überlastfähigkeit der Maschine durch die Rotorerwärmung begrenzt [29]. Die Asynchronmaschine gehört wie die Gleichstrommaschine zu den ausgereiftesten Maschinenarten.

Die Synchronmaschine

Bei der Drehstrom-Synchronmaschine wird ein konstant magnetisierter Rotor von einem Drehfeld im Stator mitgenommen. Im Gegensatz zur Asynchronmaschine läuft der Rotor dabei verknüpft über die Polpaarzahl synchron zur Erregerfrequenz. Das konstante Magnetfeld im Rotor kann entweder über eine Erregerwicklung oder über Permanentmagnete erfolgen. Im zweiten Fall spricht man von einer permanentenerregten Synchronmaschine welche aufgrund ihrer Relevanz im Anschluss speziell behandelt wird.

Die fremderregte Synchronmaschine besitzt aufgrund der Rotorkontaktierung die selben nachteiligen Eigenschaften wie die Asynchronmaschine mit Schleifringläufer. Die notwendigen Schleifkontakte verursachen Verschleiß, welcher zwar durch den relativ geringen Erregerstrom geringer ist, aber trotzdem zu einem erhöhten Wartungsaufwand führt.

Die Möglichkeit zur freien Regelung der Rotor- und Statorströme führt jedoch zu einem sehr guten Wirkungsgrad in allen Betriebsbereichen, der im Wesentlichen über dem Wir-

kungsgrad der Asynchronmaschine einzustufen ist [35]. Im Vergleich zur permanentenerregten Synchronmaschine wird durch die Möglichkeit der Rotorstromabschaltung ein erhöhter Sicherheitsanspruch erreicht.

Die permanenterregete Synchronmaschine

Die permanenterregete Synchronmaschine, als Variante der Synchronmaschine wird aufgrund ihrer Relevanz an dieser Stelle gesondert betrachtet. Bei diesem Motor erfolgt die Rotormagnetisierung über Permanentmagnete, was zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades (geringere ohmsche Verluste) und der Leistungsdichte (hohe Energiedichte der Magnete) führt 2.13.

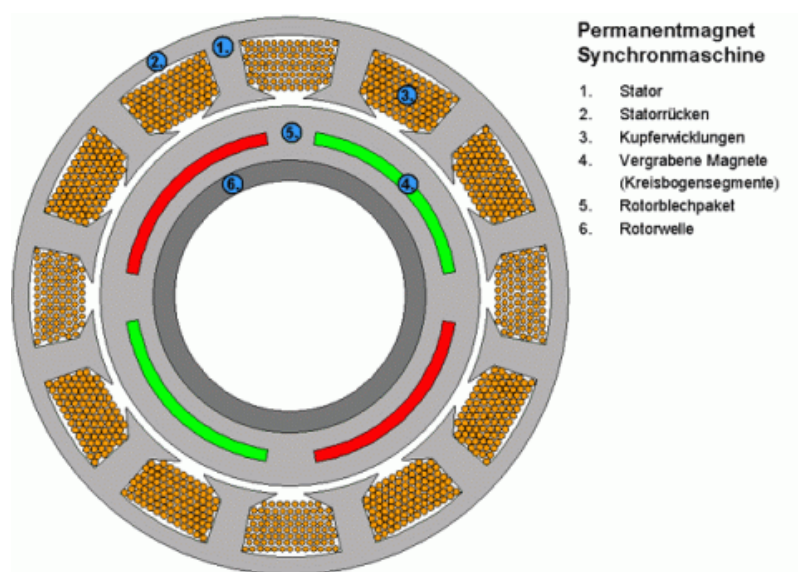


Abbildung 2.13: Aufbau der permanenterregeten Synchronmaschine [17])

Die Verwendung von Permanentmagneten ergibt einen größeren magnetischen Luftspalt. Das hat den Vorteil, dass der mechanische Luftspalt größer als bei ASM und GRM ausgeführt werden kann [29]. Dadurch wird die Maschine entsprechend unempfindlicher gegen Vibrationen und Stöße, was insbesondere bei verbrennungsmotornahem Einbau vorteilig ist.

Bei einer korrekten Auslegung sind die Rotorverluste gering. Wesentliche Verluste treten nur im Stator auf. Dort kann die Erwärmung relativ einfach über eine entsprechende Wassermantelkühlung abgeführt werden.

Ein Feldschwähebetrieb kann nur mit einer zusätzlichen feldschwächenden Stromkomponente realisiert werden. Das führt im Vergleich zu ASM und GRM zu schlechteren Wirkungsgraden bei höheren Drehzahlen [29].

Als Nachteil sind die hohen Kosten der Seltenerdmetalle anzuführen. Ein weiterer wesentlicher negativer Gesichtspunkt ist hinsichtlich der Sicherheit anzuführen. Das Magnetfeld des Rotors kann bei der permanenten erregten Synchronmaschine, im Gegensatz zu allen anderen hier angeführten Vertretern, nicht abgeschaltet werden.

Trotz dieser Nachteile ist die PMSM die momentan am häufigsten eingesetzte Elektromaschine bei parallelen Fahrzeugkonzepten.

Die geschaltete Reluktanzmaschine (GRM)

Die GRM besitzt einen rein passiven Rotor mit ausgeprägten Zähnen ohne Wicklungen oder Magnete. Der Stator ist ebenfalls mit mehreren Zähnen bestückt, die im Gegensatz zum Rotor jedoch mit Wicklungen ausgeführt sind, welche mit einem Drehfeld beaufschlagt werden (Abbildung 2.14).

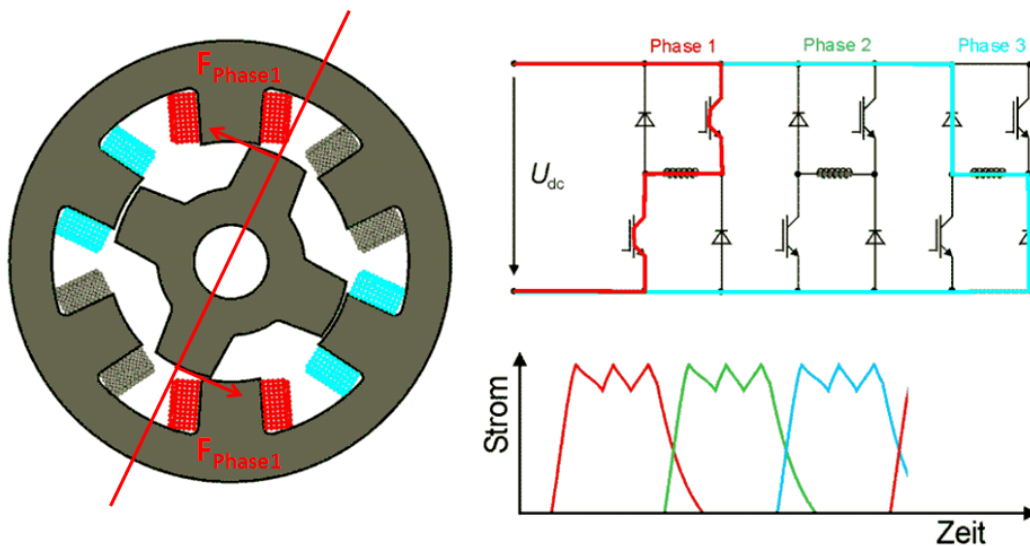


Abbildung 2.14: Die geschaltete Reluktanzmaschine [17])

Das Wirkprinzip beruht auf der Erzeugung eines Reluktanzmomentes. Als Reluktanz wird der magnetische Widerstand in einem magnetischen Kreis bezeichnet. Der Luftspalt bildet gegenüber dem Eisen den größten magnetischen Widerstand im magnetischen Kreis. Dies führt bei gezielter Bestromung des Stators aufgrund des Drehmomentes zu einer kontinuierlichen Drehbewegung des Rotors. Trotz der Tatsache, dass der Rotor ohne Wicklung und Magnete auskommt, erwärmt sich dieser aufgrund der hohen elektromagnetischen Ausnutzung stark.

Die erreichbaren Leistungsdichten und Wirkungsgrade sind mit der ASM vergleichbar [29]. Damit die hohen Leistungsdichten erreicht werden können, wird eine hohe Luftspaltinduktion (hoher Strom) und ein kleiner Luftspalt benötigt. Gemeinsam mit der blockförmigen

Bestromung entstehen so jedoch große radiale Kräfte die Schwingungen anregen, eine starke Geräuschabstrahlung und, insbesondere bei niedrigen Drehzahlen, eine hohe Drehmomentwelligkeit erzeugen [44].

Ein akzeptabler Betrieb der GRM kann nur durch einen sehr hochauflösenden Rotorlagegeber kombiniert mit einer sehr komplexen hochdynamischen Regelung realisiert werden. Eine weitere Reduzierung der Drehmomentwelligkeit über abgerundete Statorzahnköpfe oder ein versteifter Stator geht zu Lasten der Leistungsdichte [29].

Aufgrund ihres einfachen Aufbaus, verfügen diese Maschinen jedoch über eine hohe Zuverlässigkeit und Leistungsdichte bei gleichzeitig geringen Kosten.

Wirkungsgradvergleich

Wie in Abbildung 2.15 ersichtlich, besitzen die unterschiedlichen Motorkonzepte auch deutliche Unterschiede hinsichtlich des optimalen Wirkungsgradbereiches. Je nach Auslegung des gesamten Triebstrangkongzeptes wie z.B. Anzahl der Getriebestufen oder Koppelung des Elektromotors mit oder ohne Übersetzungsstufe, resultieren unterschiedliche Betriebspunkte der E-Maschine, welche schließlich unterschiedliche Bestpunkttagen erfordern.

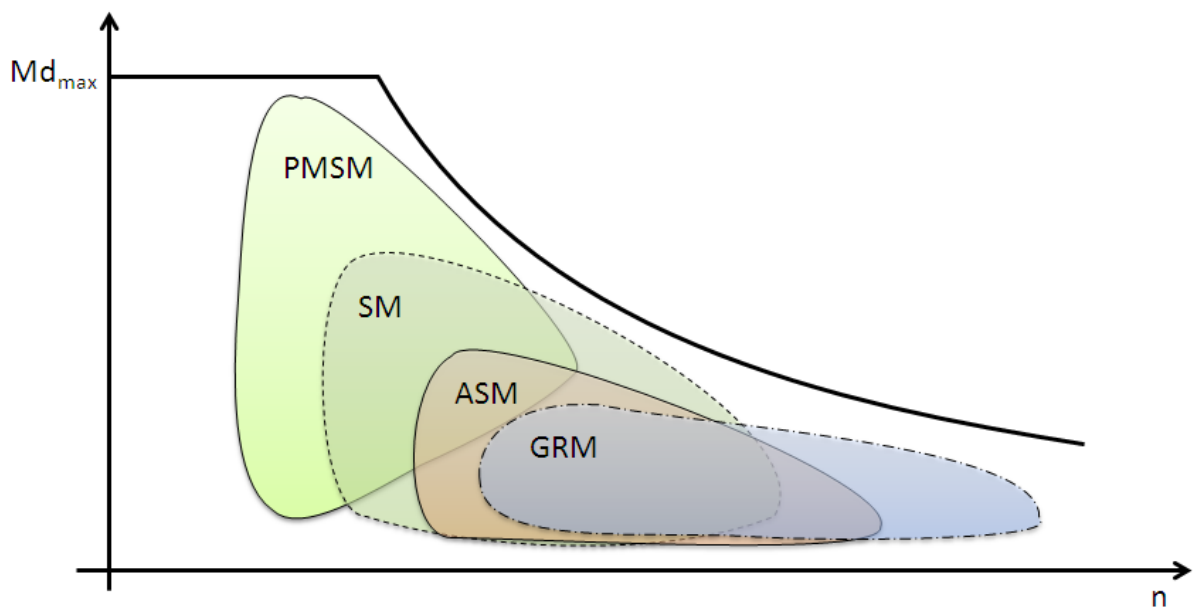


Abbildung 2.15: Vergleich der Wirkungsgradoptima (nach [29])

Die permanent erregte Synchronmaschine IMG 300 von Bosch

Zum Aufbau des EV-CEA-Demonstrators wird eine permanent erregte Synchronmaschine von Bosch mit der Bezeichnung IMG 300 verwendet. Zur Ansteuerung der Maschine wird die originale Bosch Leistungselektronik (LE) eingesetzt, welche dazu von der Fa. Bosch geöffnet und eine Ansteuerung über CAN-Bus und analoger Schnittstelle zur Verfügung gestellt (Abbildung 2.16) wurde.

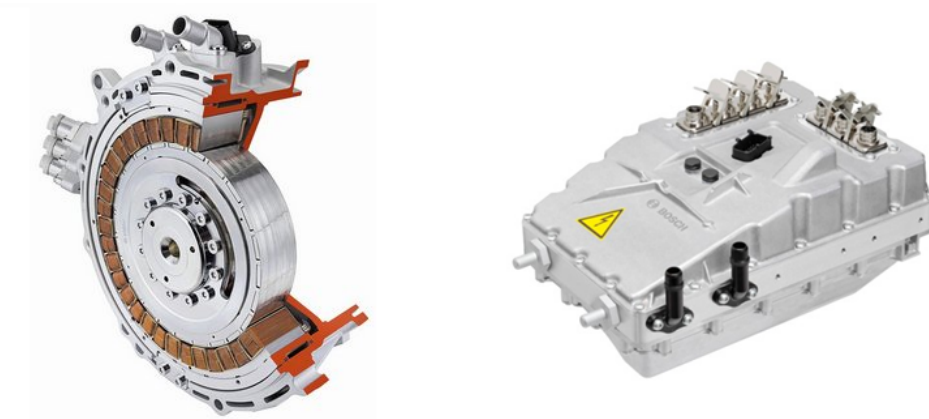


Abbildung 2.16: Bosch IMG 300 inkl. Leistungselektronik [18]

Wie bereits in Abschnitt 2.2 dargestellt wird beim CEA-Konzept eine parallele Anordnung von Verbrennungsmotor und Elektromotor verfolgt, bei der der Elektromotor direkt (also ohne Übersetzungsstufe) mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt ist. Die Betriebsstrategie sieht vor, dass innerstädtisch (also bei niedrigen Geschwindigkeiten) elektrisch und außerstädtisch (bei höheren Geschwindigkeiten) verbrennungsmotorisch gefahren wird. Dem guten Wirkungsgrad und der kompakten Bauweise durch die Permanent erregung stehen allerdings auch drei wesentliche Nachteile beim Einsatz im EV-CEA-Konzept gegenüber:

Schleppverluste im Leerlauf

Durch die parallele Anordnung von VKM und E-Motor im EV-CEA-Konzept wird der Elektromotor beim verbrennungsmotorischen Betrieb mitgeschleppt. Dadurch entstehen nicht unerhebliche Leerlaufverluste durch die E-Maschine. Um diese in der Simulation berücksichtigen zu können, wurde das Verlustkennfeld des Motors an der Technischen Universität Darmstadt vermessen (Abbildung 2.17 - Messpunkte). Um das Kennfeld schließlich in der Simulation individuell einsetzen zu können, wurde das Verlustleistungskennfeld über konstante Drehzahlen mittels Polynomfunktionen gefittet (Abbildung 2.17 - Linien). Wie ersichtlich wird bei hohen Drehzahlen eine Leerlaufverlustleistung von über 2 kW erreicht. Jegliche Anstrengungen der Reibleistungsverminderung der Verbrennungskraftmaschine würden so wieder zunichte gemacht werden.

Sicherheitsproblematik durch Permanent erregung

Da durch die Permanent erregung der Rotor nicht abgeschaltet werden kann, besteht insbe-

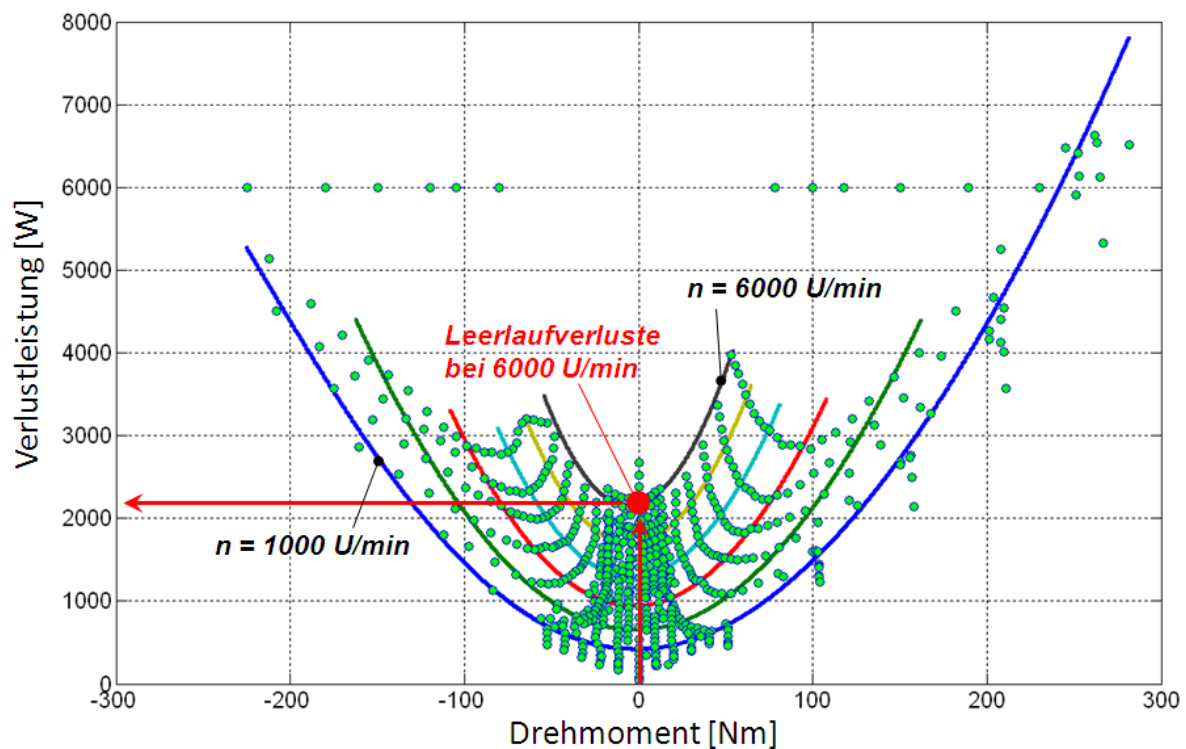


Abbildung 2.17: Das Verlustkennfeld des IMG 300 [51]

sondere im Generatorbetrieb die Problematik, dass bei Überlast die Maschine durchgehen kann. Aber auch im Motorbetrieb kann die Maschine bei Überlast außer Tritt fallen, was zu einer sehr aufwendigen Regelungsstrategie der Leistungselektronik führt.

Teure Seltenerd­magnete

Seltenerd­magnete besitzen eine sehr hohe Energiedichte, wodurch sehr gute Wirkungsgrade der E-Maschine erreicht werden. Allerdings ist die Fördermenge der Rohstoffe sehr gering, was den Magnet sehr teuer macht.

All diesen Problematiken kann durch eine Fremderregung des Rotors entgegengewirkt werden. Allerdings führt dies wiederum zu Nachteilen im Wirkungsgrad und Bauraum.

Derzeit herrscht bei Fahrzeugherstellern im Allgemeinen noch große Verunsicherung welche Maschine bevorzugt eingesetzt werden soll. Da unterschiedliche Hybridkonzepte unterschiedliche Eigenschaften erfordern, wird es schließlich nicht eine einzige Lösung geben. Wie soeben am Beispiel des EV-CEA-Konzeptes gezeigt, ist es beispielsweise hinsichtlich der Leerlaufverluste vorteilhaft, wenn der Rotor abgeschaltet werden kann also nicht permanent­erregt ist. Bei reinen Elektrofahrzeugen und seriellen Hybridkonzepten besteht dieses Problem im Allgemeinen nicht. Auch Hoch- und Niedervoltkonzepte erfordern unterschiedliche Maschineneigenschaften welche für jedes Konzept gesondert ermittelt werden müssen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist es noch nicht absehbar welche Lösungen sich in Zukunft in den unterschiedlichen Bereichen durchsetzen werden.

2.4.3 Kupplung

Das EV-CEA-Konzept als Mega-City-Vehicle wird primär als Elektrofahrzeug betrieben. Nur bei höheren Geschwindigkeiten oder kritischen SOC-Ständen wird die Verbrennungskraftmaschine gestartet und übernimmt den Antrieb. Aus diesem unüblichen Betriebsverhalten resultieren besondere Anforderungen an die Kupplung als Drehmomentübertrager. Des Weiteren muss die Kupplung als integraler Bestandteil des Konzeptes an die Anforderungen aus dem Drehschwingungsberuhigungs-Konzept angepasst werden. Schließlich können die Aufgaben der Kupplung gedanklich in die folgenden Funktionsgruppen unterteilt werden:

- Drehmomentübertrager mit zwei schaltbaren Wirkrichtungen
 - Wirkrichtung 1: VKM treibt E-Motor
 - Wirkrichtung 2: E-Motor treibt VKM (VKM-Start - optional)
- Mechanisch trennbare Kupplung
 - Möglichst geringe Restreibung im ausgekuppelten Zustand
 - Ruckfreier Einkuppelvorgang (NVH)
- Drehschwingungstilger
 - Anforderungen aus Drehschwingungsberuhigungs-Konzept
 - Anforderungen abhängig vom VKM-Typ (Motorträgheit, Drehungleichförmigkeit)
 - Möglichst kleine Wirkungsgradeinbußen (kleine Dämpfungskonstanten)

Insbesondere aus der Funktion als Drehschwingungstilger resultieren beim EV-CEA-Konzept besondere Anforderungen, da der Einsatz des 2-Zylinder Verbrennungskraftmotors zu einem gegenüber mehrzylindrigen Verbrennungskraftmaschinen veränderten Anregungsspektrum führt, was in Folge schließlich zu NVH-Problemen im Triebstrang führen kann. Beim EV-CEA-Konzept ist daher eine schwingungstechnische Auslegung des Gesamtkonzeptes entscheidend.

Anforderungen aus dem Drehschwingungsberuhigungs-Konzept

Wie in Kapitel 3.10 dargestellt, werden im Rahmen der EV-CEA-Konzeptentwicklung zwei Varianten zur Drehschwingungsberuhigung verfolgt:

1. ZMS zwischen VKM und Elektromotor (Porsche Cayenne Hybrid)
2. ZMS nach dem Elektromotor (VW Jetta Hybrid) und directE

Je nach dem angewendeten Konzept muss daher die Kupplung entweder drehsteif oder drehweich ausgeführt werden. Für den Demonstratoraufbau ist es zielführend eine Kuppelung einzusetzen, mit der sich beide Varianten einfach umsetzen lassen. Des Weiteren ist es vorteilhaft, wenn diese zu jedem Zeitpunkt geschlossen und geöffnet werden kann. Zum Aufbau des EV-CEA-Demonstrators wurde daher die originale Reibkupplung von Porsche passend zum Elektromotor verwendet. Der Aufbau und die Ansteuerung der Kupplung ist in Kapitel 4 dargestellt.

Im Rahmen der Kupplungsentwicklung für das EV-CEA-Konzept ist noch großes Potential vorhanden. Dahingehende Untersuchungen sind nicht Teil dieser Arbeit, werden jedoch in weiterführenden Entwicklungsarbeiten einen Schwerpunkt darstellen.

2.4.4 Getriebe

Mit zunehmender Elektrifizierung des Antriebsstrangs kann aufgrund der Drehmomenteigenschaften des Elektromotors die Anzahl der Gangstufen reduziert werden. In Abbildung 2.18 ist dieser Sachverhalt schematisch dargestellt. Ausgehend vom konventionellen Fahrzeug mit 6 Gangstufen (linke Grenze im Diagramm) sinkt mit zunehmenden Anteil der elektrischen Antriebsleistung die Anzahl der benötigten Gangstufen ab, da in immer weiteren Bereichen elektrisch gefahren bzw. die Verbrennungskraftmaschine unterstützt werden kann. Übernimmt der Elektromotor den Großteil der Antriebsleistung, ist theoretisch nur mehr eine Getriebestufe notwendig. Hinsichtlich Steigfähigkeit, Beschleunigungsvermögen und Wirkungsgrad ist es allerdings vorteilhaft ein 2-Gang-Getriebe zu verwenden [63].

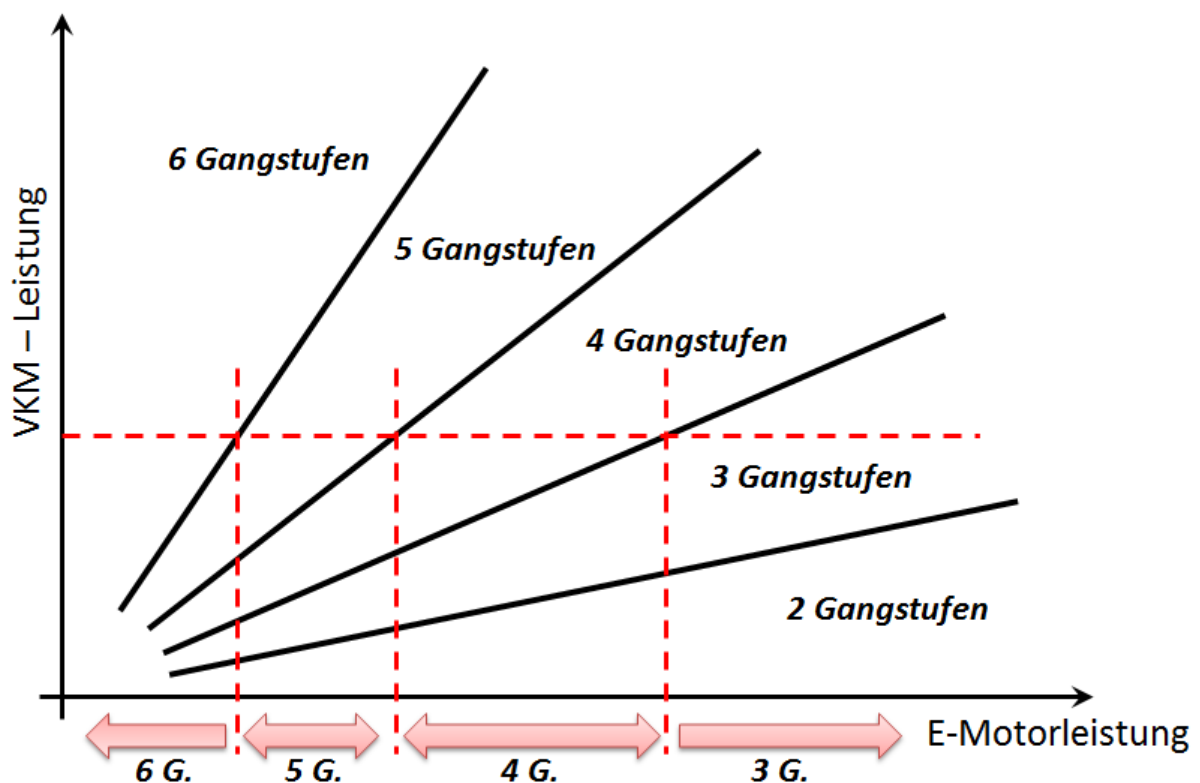


Abbildung 2.18: Schematische Darstellung der Getriebestufenauslegung

Beim EV-CEA-Konzept ist wie bei vergleichbaren Elektrofahrzeugen aufgrund der großen E-Maschine ebenfalls nur ein Getriebe mit einem festen Übersetzungsverhältnis erforderlich. Aus den oben angeführten Gründen ist allerdings auch hier ein 2-Gang-Getriebe vorteilhaft. Zusätzlich resultiert, wie bereits in Kapitel 2.3 dargestellt, aus der parallelen Verbindung der Verbrennungskraftmaschine mit nur einem Elektromotor die Problematik, dass der Anfahrvorgang nur bedingt mittels der VKM durchgeführt werden kann. Denn je nach Auslegung der Getriebestufen müsste bis zu einer relativ hohen Geschwindigkeit mit schleifender Kupplung gefahren oder generell ein alternatives Kopplungselement von VKM und Elektromotor (wie z.B. Drehmomentwandler) verwendet werden.

In Abbildung 2.19 ist dieser Sachverhalt für eine und zwei Getriebestufen schematisch dargestellt.

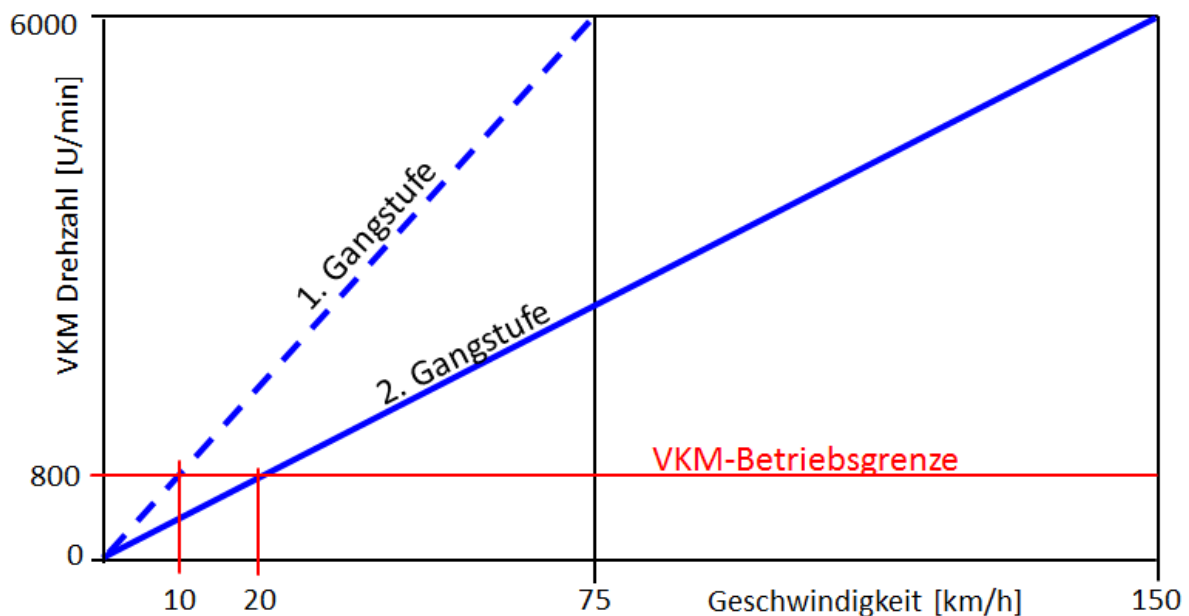


Abbildung 2.19: VKM-Betriebsgrenzen bei einer oder zwei Getriebestufen

Ist nur eine Getriebestufe vorhanden, welche auf eine maximale Geschwindigkeit von 150 km/h ausgelegt ist, kann die Verbrennungskraftmaschine theoretisch erst ab einer Geschwindigkeit von rund 20 km/h langsam zugeschaltet werden. Bei 2 Getriebestufen verringert sich diese Grenzgeschwindigkeit auf theoretisch 10 km/h.

Letztendlich wird der Fahrzeughersteller in der Getriebeauswahl auch wesentlich durch wirtschaftliche Kriterien beeinflusst, sodass in vielen Fällen das Hybridkonzept an vorhandene Getriebemodule angepasst wird. Der mittelfristige Trend zeigt hier eine Tendenz zu mehreren Getriebestufen (> 6). Langfristig kann allerdings aufgrund steigender Stückzahlen -und der damit einhergehenden Kostenreduktion- erwartet werden, dass die Anzahl der Getriebestufen dem aktuellen Trend der Zylinderreduktion bei Verbrennungsmotoren folgen wird [30].

2.4.5 Batterie

Wie bereits in Kapitel 1.2.1 dargestellt, ist die verhältnismäßig geringe Energiedichte von Batterien gegenüber fossilen Energieträgern nach wie vor als eines der größten Probleme im Rahmen der Elektrifizierung anzusehen. Da die Größe der Batterie untrennbar mit der elektrischen Reichweite des Fahrzeuges verbunden ist, ist die Auslegung der maximal möglichen elektrischen Fahrstrecke ein entscheidendes Kriterium. Eine kleine Batterie verringert zwar die Kosten des Gesamtkonzeptes, führt jedoch auch zu einem geringen Zertifizierungsbonus

seitens des Gesetzgebers. Eine zu große Batterie führt zu überhöhten Kosten und schließlich zu einem System, das am Markt nicht konkurrenzfähig ist. Bei der Auslegung der Batterie ist es demnach sehr wichtig, einen geeigneten Kompromiss zwischen der verfügbaren elektrischen Reichweite, dem angestrebten Zertifizierungsbonus, der Ladezeit und der Kosten zu finden.

Beim EV-CEA-Konzept ergibt sich die notwendige Batteriekapazität aus der Forderung des überwiegend elektrischen Betriebs im städtischen Bereich. Wie bereits in Abschnitt 3.6 gezeigt, erreicht man hinsichtlich Zertifizierung bei einer elektrischen Reichweite von 25 km das beste Kosten/Nutzen-Verhältnis. Des Weiteren zeigt eine Statistik über die täglich gefahrenen Strecken in Deutschland, dass mit einer elektrischen Reichweite von rund 50 km bereits über 70 % der täglich gefahrenen Fahrstrecken abgedeckt werden (Abbildung 2.20) können.

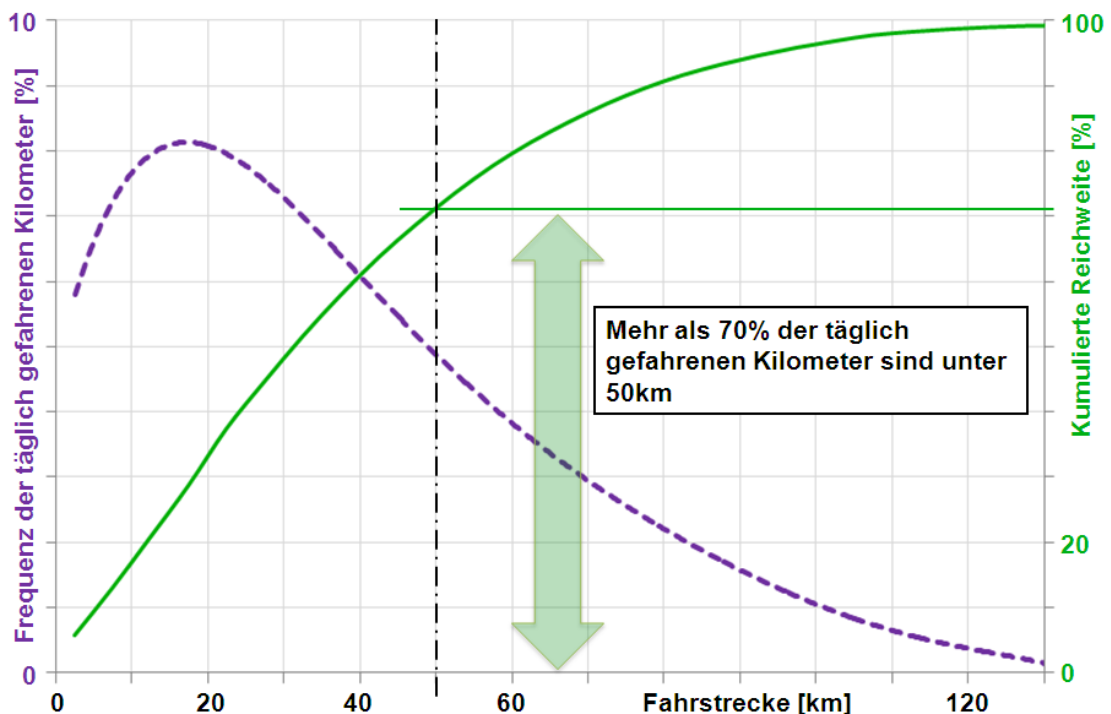


Abbildung 2.20: Übersicht täglich gefahrener Kilometer [36]

Es ist demnach zielführend die elektrische Reichweite des EV-CEA-Konzeptes innerhalb dieses Bereiches, also zwischen 25 km und 50 km Reichweite, auszulegen. Die dazu notwendige Batteriegröße ergibt sich aus den Fahrzeugeigenschaften.

Tendenzen in der Batterieentwicklung

Nach Publikationen der Boston Consulting Group [25] beliefen sich die Kosten von modernen Li-Ion-Akkumulatoren 2010 auf 800 EUR/kWh. Auch der Restwert ist aufgrund der zyklischen und/oder kalendarischen Alterung der Batterie problematisch. Schwacke schätzt

diesen nach 5 Jahren auf nur 10 % des Kaufpreises [13]. Ein Batterie-Leasing-Konzept verschiebt die Kosten, löst aber nicht das Problem. Eine von Roland Berger durchgeführte Grenzkostenanalyse [12] geht von einem derzeitigen Batteriepreis von 700 USD/kWh aus und zeigt ein deutliches, über Weiterentwicklung und Skaleneffekte erschließbares Kostensenkungspotenzial. Allerdings wurde auch eine klare Grenze nach unten von 265 USD/kWh ermittelt. Aktuelle Entwicklungsarbeiten zeigen jedoch ein weiteres Reduktionspotential auf bis zu 200 USD/kWh (siehe dazu auch Entwicklungsarbeiten Tesla S - [41]).

Trotz dieser Weiterentwicklungen bleibt jedoch ein vielfach unterschätzter Aspekt auf der Strecke - die Ladezeit. Die lange Dauer gegenüber konventionellen Fahrzeugen führt zu einer relevanten Einschränkung der Nutzungsflexibilität. In Abbildung 2.21 ist dies am Beispiel des in Kapitel 1.2.1 gezeigten Fahrzeugvergleichs dargestellt. Setzt man eine etwa 60 %ige Batteriekostenreduktion bei einer gleichzeitigen Verdoppelung der Batteriekapazität voraus, bleibt die Problematik der doppelten Ladezeit bestehen. Auch die Reichweite von konventionellen Fahrzeugen kann noch lange nicht erreicht werden.

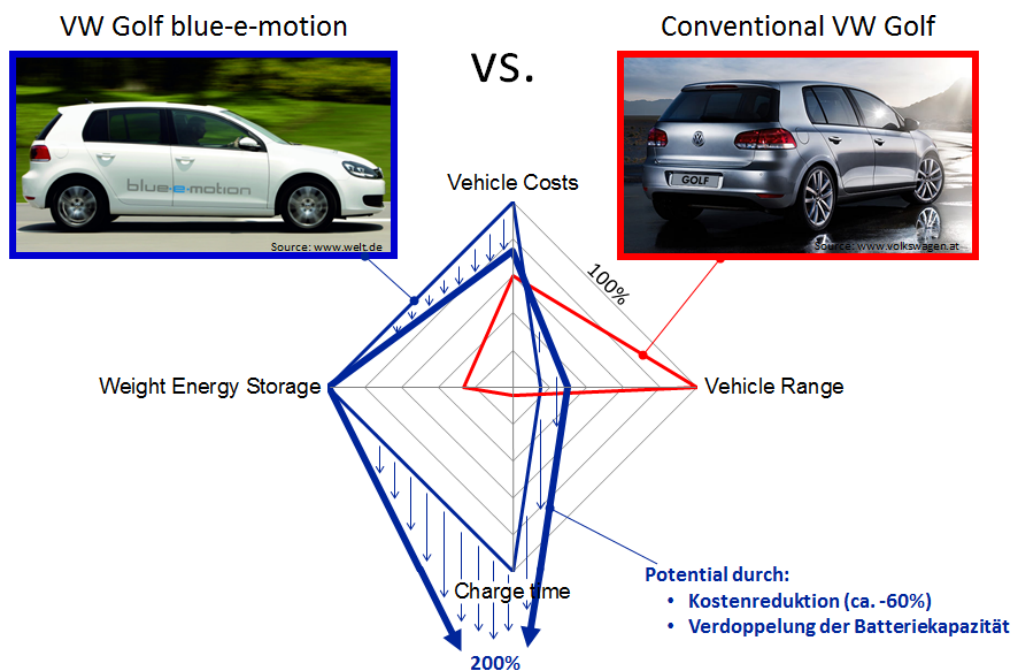


Abbildung 2.21: Problematik der Ladezeit [6]

Schnellladestrategien führen zu einer erhöhten Schädigung der Batterie und die benötigte Infrastruktur steht nur in den wenigsten Fällen zur Verfügung. Sie sind deshalb nur bedingt zur Problemlösung geeignet. Entscheidend ist, dass auch eine Verminderung der Batteriekosten allein nicht den Einsatz großer Batterien rechtfertigt. Zur Lösung der Problematik müssen weitere negative Aspekte wie Energiedichte und Ladezeit mit gelöst werden.

Kapitel 3

EV-CEA-Konzeptsimulation

In diesem Kapitel erfolgt eine simulatorische Untersuchung des EV-CEA-Konzeptes und eine Beschreibung der dafür eingesetzten Simulationsmodelle. Des Weiteren wird das für die Untersuchungen eingesetzte Basisfahrzeug vorgestellt und die für die Simulation benötigte Betriebsstrategie entwickelt. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einer Untersuchung der Drehschwingungen des EV-CEA-Prüfstands aufbau und eine theoretische Beschreibung des innovativen Drehschwingungsberuhigungskonzeptes - directE.

3.1 Das IVD/TUD-Simulationsmodell

Beim IVD/TUD-Modell handelt es sich um ein quasistationäres Simulationsmodell, welches als Eigenentwicklung auf MATLAB-Basis umgesetzt wurde (siehe dazu auch [4]). Die quasistationäre Berechnungsmethode ermittelt aus einem Geschwindigkeits- und Höhenverlauf für jeden Zeitschritt die jeweilige Leistungsanforderung und Betriebspunkte. Dieses Vorgehen hat den entscheidenden Vorteil, dass keine komplexen Differentialgleichungen gelöst werden müssen und ermöglicht dadurch eine hohe Rechengeschwindigkeit. Aufgrund dieser Eigenschaften ist dieses Simulationsmodell insbesondere für erste Komponentenauslegungen oder grundlegende Potentialabschätzungen geeignet.

In Abbildung 3.1 ist der Simulationsablauf des IVD-TUD-Modells grafisch dargestellt. Ausgehend vom vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil werden über ein Fahrwiderstandsmodell Leistung und Drehzahl an den Rädern berechnet. Über ein Triebstrangmodell, welches die Trägheiten, Reibverluste und Übersetzungsstufen beinhaltet, erfolgt die Berechnung von Leistung und Drehzahl am Getriebeausgang. Das Getriebemodell enthält eine Leistungsflussrechnung und ein Strategiemodell, welches die Auswahl der Gangstufen übernimmt. Über eine einfache Kupplungsmodellierung wird der Triebstrang ge- und entkoppelt. Anschließend erfolgt über ein Betriebsstrategiemodell die Aufteilung der benötigten Antriebsleistung an die beiden Antriebsmotoren. Um die Massenträgheiten der Verbrennungskraftmaschine berücksichtigen zu können, wird dabei auf das innere Moment bzw. indizierten Mitteldruck gerechnet. Die Motormodelle beinhalten die jeweiligen Kennfelder mit denen schließlich der Kraftstoff-, Energieverbrauch und die Rohemissionen berechnet werden. In einem Batteriemodell erfolgt die Berücksichtigung der Verluste durch den Lade- und Entladevorgang und es wird der SOC-Stand berechnet.

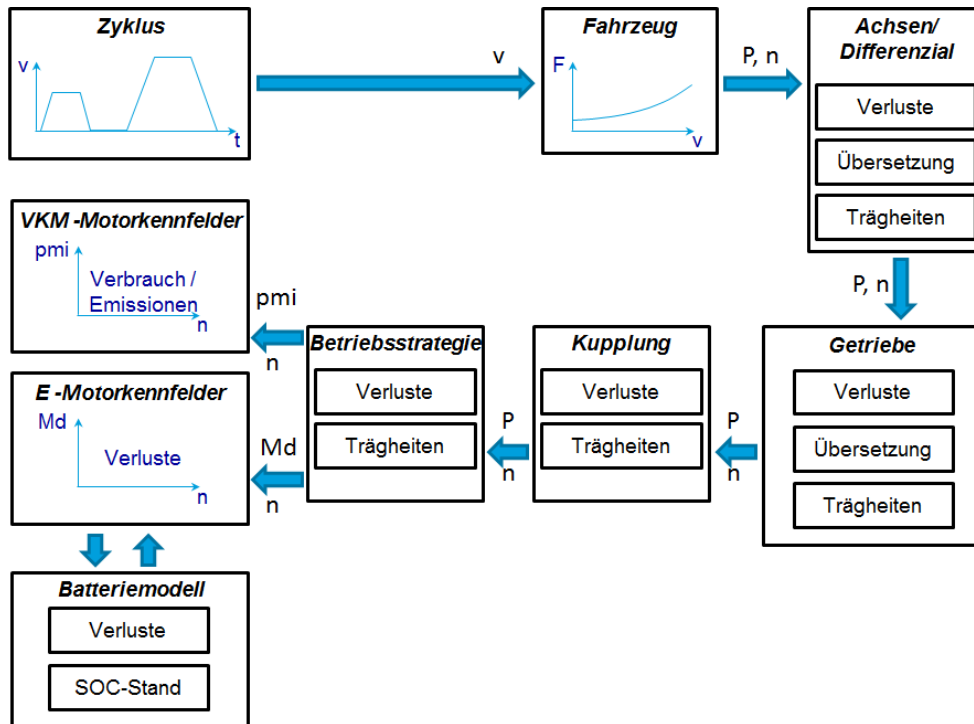


Abbildung 3.1: Rechenablauf des IVD-TUD-Modells [53] (Struktur nach [61])

3.1.1 Fahrereinflussmodellierung

Da im IVD-TUD-Modell aufgrund des Modellierungsansatzes kein Fahrerverhalten simuliert werden kann, berechnet das Modell die Ergebnisse exakt für das eingeebene Fahrprofil. Daraus resultieren insbesondere bei Vorgabe von Normzyklus-Profilen unstetige und daher unrealistische Leistungsflüsse. Dieser Problematik kann durch Glättung des vorgegebenen Geschwindigkeitsprofils oder durch Vorgabe von realen Geschwindigkeitsprofilen entgegengewirkt werden (Abbildung 3.2).

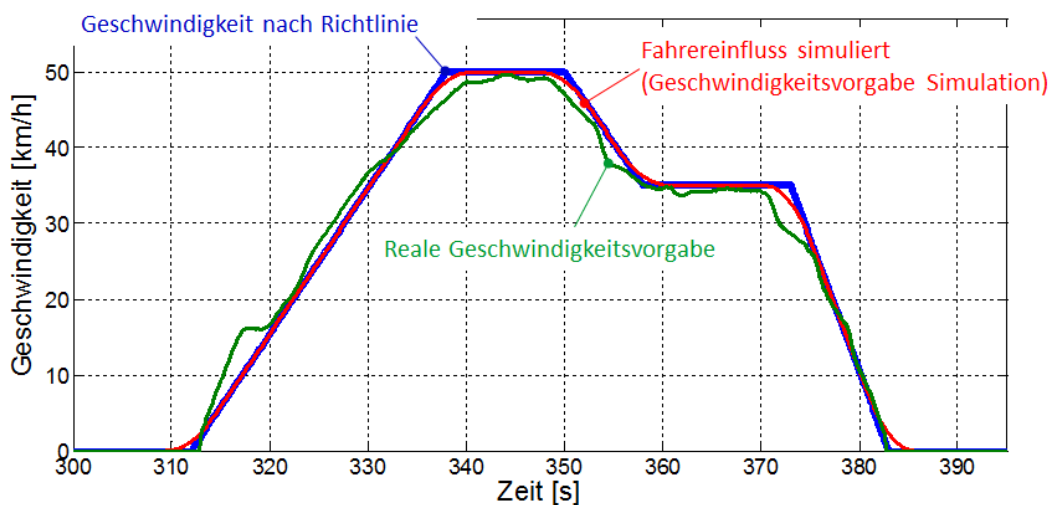


Abbildung 3.2: Modellierung des Fahrereinflusses in Zyklussimulationen

Mit der Glättung von Normzyklus-Profilen kann das Verhalten des Fahrers angenähert werden. Es ist allerdings darauf zu achten, dass sich der berechnete Geschwindigkeitsverlauf weiterhin innerhalb der Grenzgeschwindigkeiten befindet. Bei Vorgabe von realen Geschwindigkeitsverläufen aus Messungen, ist dieser Vorgang im Allgemeinen nicht notwendig, da solche Geschwindigkeitsprofile das reale Fahrerverhalten bereits implizieren. Je nach Güte des aufgenommenen Fahrprofils ist eventuell auch in diesen Fällen eine leichte Glättung des Geschwindigkeitsverlaufes vorteilhaft.

3.1.2 Verlustmodell-Ansatz

Als wesentlicher Entwicklungsschritt im Rahmen der EV-CEA-Konzeptentwicklung wurde in das IVD-TUD-Modell eine Verlustmodellierung implementiert. Dieser Modellierungsansatz hat im Gegensatz zur vorher angewandten Wirkungsgradmodellierung wesentliche Vorteile in der Genauigkeit der Ergebnisse, welche insbesondere in Leerlaufphasen in Erscheinung treten.

In Abbildung 3.3 ist der Unterschied vom Wirkungsgrad- zum Verlustmodellierungsansatz am Beispiel des Betrieb eines Elektromotors im UDC-Teil des NEDC-Testzyklusses dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Wirkungsgradmodellierung während der Stillstandsphasen zu falschen Ergebnissen führt, da Leerlaufverluste nicht berücksichtigt werden. Diese Problematik spielt insbesondere beim EV-CEA-Konzept durch die Parallele Anordnung von VKM und Elektromotor eine entscheidende Rolle (siehe auch Kapitel 2.4.2).

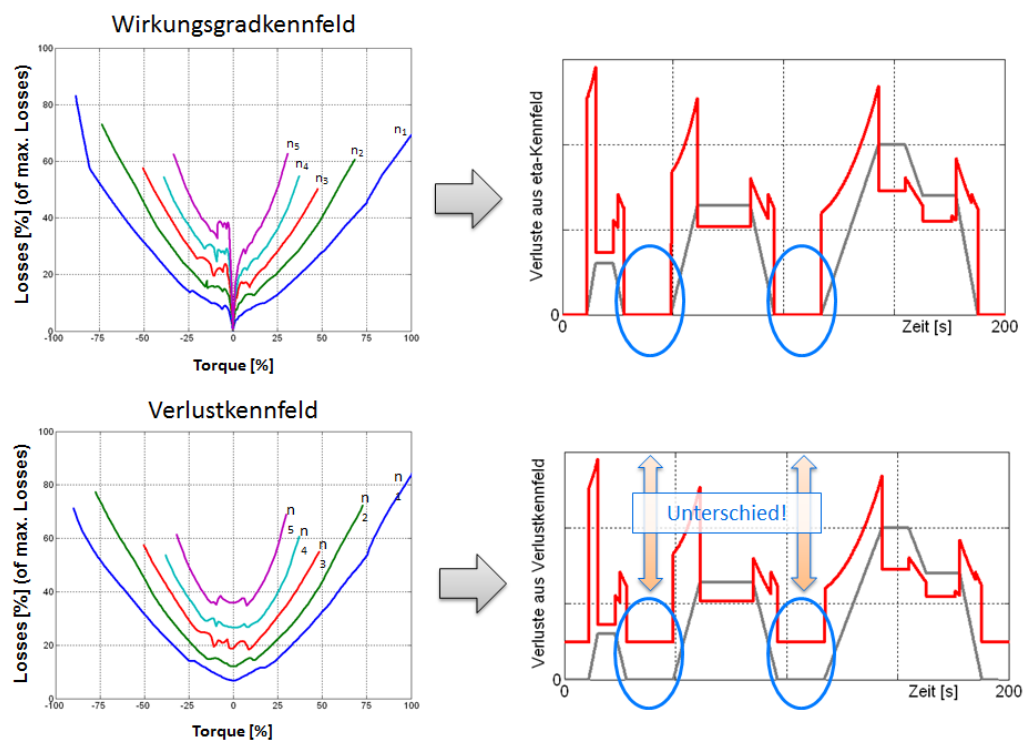


Abbildung 3.3: Verlustmodellierungsansatz am Beispiel Elektromotor

Eine detaillierte Beschreibung des IVD-TUD-Modells inklusive der letzten Entwicklungsschritte kann in den beiden Diplomarbeiten [4] und [65] nachgelesen werden.

3.2 InMotion powered by Carmaker

InMotion powered by Carmaker ist eine virtuelle Fahrzeugumgebung welche eine dynamische Simulation der Fahrzeug Längs- und Querdynamik in Echtzeit ermöglicht. Das Programm Carmaker als Fahrzeugsimulationsumgebung wurde von IPG Automotive GmbH entwickelt, in einer Kooperation mit der AVL List GmbH mit Prüfständen gekoppelt und hinsichtlich XiL-Simulation optimiert. Dieses Gesamtsystem kam am Prüfstand zum Einsatz. Das ermöglichte eine vollständige Simulation der Fahrzeuglängs- und Querdynamik in Echtzeit und darüber hinaus als XiL-System die Integration einzelner realer Komponenten in den Untersuchungsablauf.

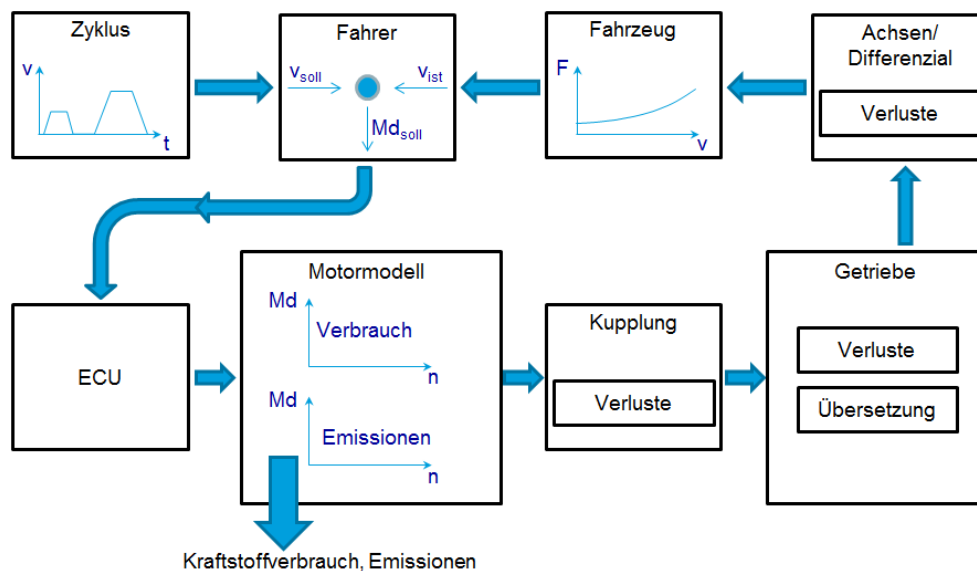


Abbildung 3.4: Rechenablauf InMotion powered by Carmaker

Als dynamisches Simulationsmodell bei dem ein Fahrermodell zur Abbildung des realen Fahrerverhaltens eingesetzt wird, unterscheidet sich der Berechnungsablauf wesentlich zur quasistationären Berechnung des IVD-TUD-Modells (siehe Abbildung 3.4 und Vergleich mit Abbildung 3.1). Diese Modellierungsart erlaubt eine realistische Abbildung des längs- und querdynamischen Fahrzeugverhaltens und eine Simulation komplexer Fahrmanöver (z.B. Überfahren der Bordsteinkante).

3.3 Das EV-CEA-Basisfahrzeug

Das EV-CEA-Konzept ist als kompaktes und kosteneffizientes Antriebssystem insbesondere für Fahrzeuge aus dem A-C-Segment geeignet. Aus diesem Grund wurde für die folgenden Untersuchungen der Fahrzeugaufbau des Elektrofahrzeuges Golf blue-e-motion von VW ausgewählt. In Abbildung 3.5 sind die wesentlichen Simulationsdaten des Fahrzeuges angeführt.

Fahrzeugbasis:

VW-Golf blue-e-motion

Leergewicht:

1300 kg

Frontfläche:2,133 m²**cw-Wert:**

0,3

**Getriebeübersetzung 1 (i_1):**

2,2988

Getriebeübersetzung 2 (i_2):

1,1494

Achsübersetzung (i_g):

4,1

Abbildung 3.5: Das Basisfahrzeug

Eine detaillierte Aufstellung der in der Dissertation verwendeten Simulationsdaten ist im Anhang angeführt.

3.4 Entwicklung einer Basis-Betriebsstrategie

Für den effizienten Einsatz von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor ist die Entwicklung einer geeigneten Betriebsstrategie von entscheidender Bedeutung. Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung einer Basis-Betriebsstrategie aufbauend auf den Erkenntnissen der bisherigen Untersuchungen.

Wie bereits in Abschnitt 1.2.1 und 1.2.2 dargestellt, ist der Einsatz des Elektromotors aufgrund des Wirkungsgrades insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten vorteilhaft. Gleichzeitig nimmt die elektrische Reichweite mit höher werdender Geschwindigkeit aufgrund des zunehmenden Fahrwiderstandes bei, im Vergleich zur Verbrennungskraftmaschine relativ konstantem Wirkungsgrad, entsprechend früh ab. Aus diesem Grund ist es zielführend, insbesondere niedrige Fahrgeschwindigkeiten elektrisch abzudecken. Bei höheren Geschwindigkeiten können hingegen durch den verbrennungsmotorischen Betrieb verhältnismäßig hohe Reichweiten bei gleichzeitig akzeptablen Verbrennungsmotorwirkungsgraden erreicht werden.

In Abbildung 3.6 ist dieser Sachverhalt anhand eines Vergleiches der elektrischen und verbrennungsmotorischen Reichweite bei Stationärfahrt über der Geschwindigkeit dargestellt. Wie ersichtlich, ist insbesondere bei Geschwindigkeiten unter etwa 30 km/h ein rein elektrischer Betrieb sinnvoll. Oberhalb von 50 bis 60 km/h ist ein verbrennungsmotorischer Betrieb aufgrund des Reichweitenvorteils dem elektrischen Betrieb vorzuziehen. Der Bereich dazwischen kann als Übergangsbereich ausgeführt werden, bei dem je nach SOC-Stand der Batterie ein verbrennungsmotorischer, elektrischer oder eine Kombination beider Varianten eingesetzt wird.

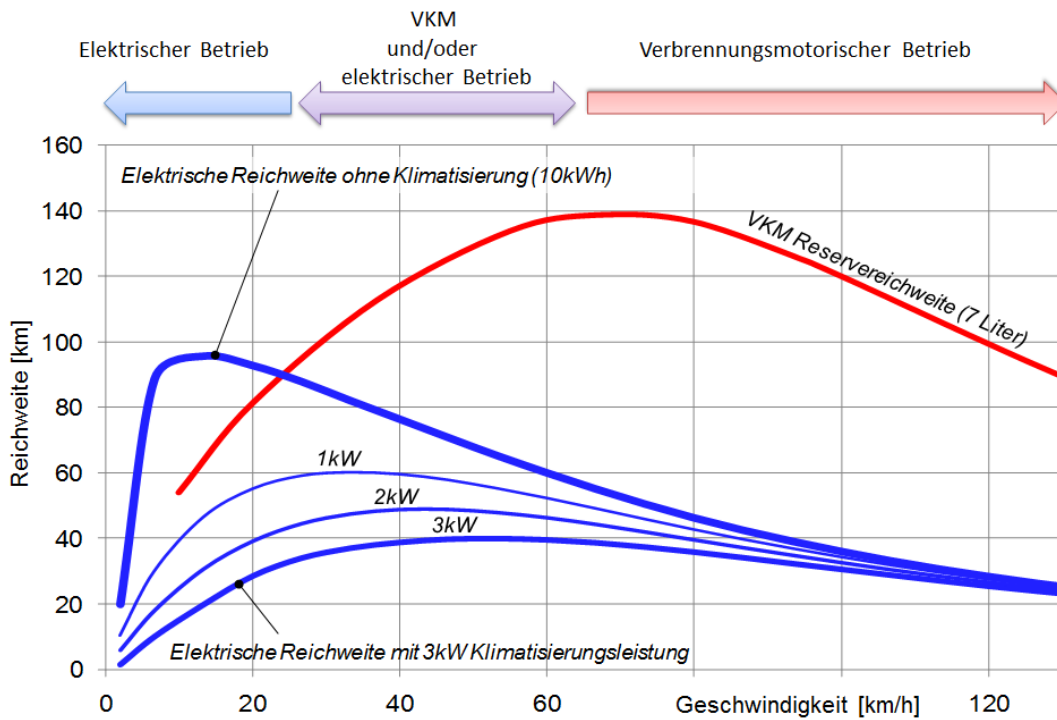


Abbildung 3.6: Theoretische Reichweite bei konstanter Geschwindigkeit mit Basisstrategie

Da ein verbrennungsmotorisches Anfahren beim EV-CEA-Konzept nur bedingt durchgeführt werden kann (siehe Kapitel 2.4.4), muss durch die Betriebsstrategie stets genug Energie für einen elektrischen Anfahrvorgang in der Batterie vorgehalten werden. Im Mischbereich wird daher je nach Auslegung der Getriebestufen die Schaltschwelle zwischen elektrischem und verbrennungsmotorischem Betrieb bei sinkendem SOC-Stand linear reduziert (Abbildung 3.7).

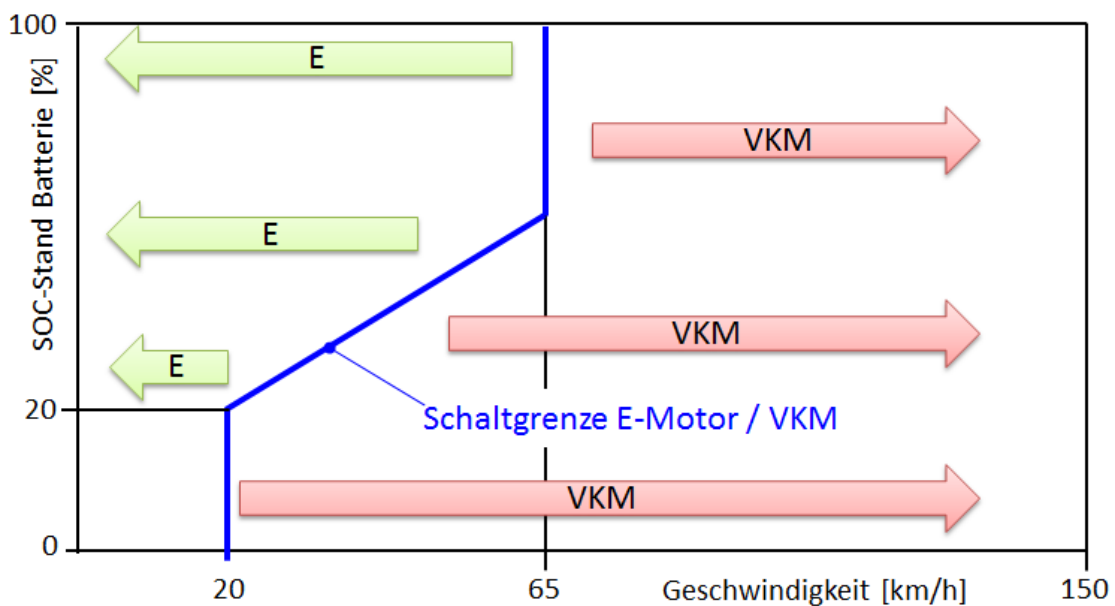


Abbildung 3.7: Basis Betriebsstrategie

Mit dieser Basis-Betriebsstrategie ist ein effizienter Einsatz von VKM und E-Motor gewährleistet. Zur Entwicklung einer für den realen Einsatz geeigneten Strategie sind jedoch weitere Entwicklungsarbeiten wie z.B. die Berücksichtigung der Katalysatortemperatur oder von Fahrzeugumfeldinformationen notwendig. Entsprechende Arbeiten werden momentan an der TU Darmstadt durchgeführt (siehe z.B. [15] und [67]).

3.5 Integration des EV-CEA-Konzeptes und der Betriebsstrategie in InMotion

InMotion stellt heute konventionelle Antriebskonzepte vorgefertigt als Module zur Verfügung, wobei diese als Drehmoment-Übertragungsmodelle ausgeführt sind. Hybridkonzepte können durch Adaption dieser Triebstränge unter Verwendung der sogenannten „Car-maker Interface Toolbox“ (CIT) realisiert werden, welches die Möglichkeit bietet, externe Drehmomente an konventionelle Triebstränge anzukoppeln. Die Berechnung der externen Drehmomente erfolgt durch Matlabmodelle, welche in den Berechnungsablauf integriert werden (siehe dazu auch [55]).

In Abbildung 3.8 ist die Adaptionierung eines konventionellen Triebstrangs zum EV-CEA-Konzept durch die Ergänzung von externen Drehmomenten schematisch dargestellt. Der externe Starter wird zur Modellierung unterschiedlicher VKM-Start-Szenarien benötigt.

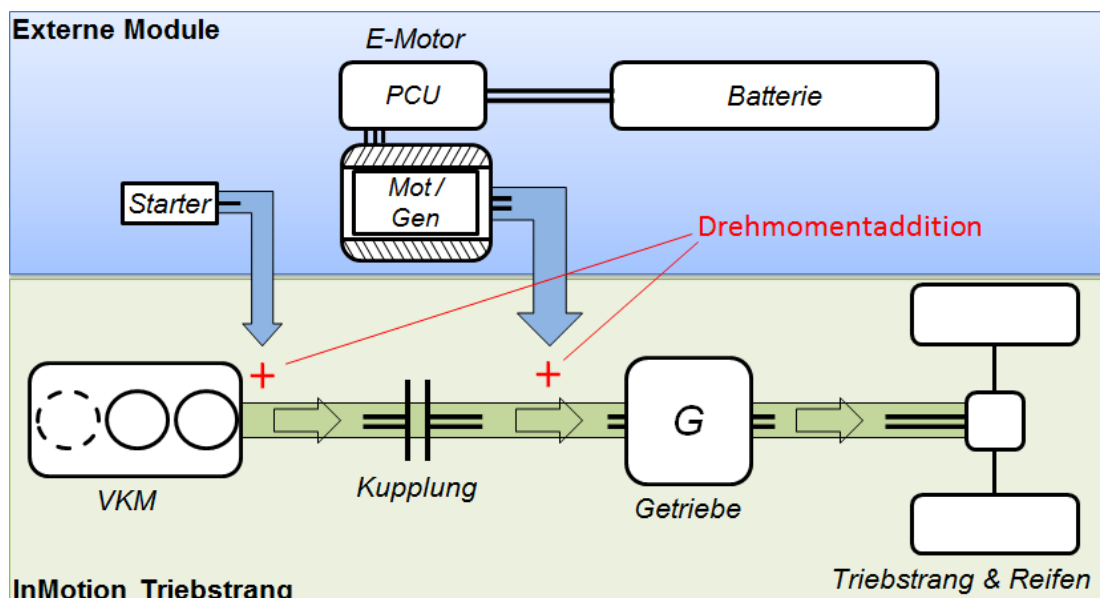


Abbildung 3.8: InMotion Triebstrangadaption

Um die Betriebspunkte der externen Komponenten zu jedem Zeitpunkt berechnen zu können, müssen die Matlabmodelle in den Berechnungsablauf integriert werden. Dies erfolgt über den sogenannten „Vehicle Control Layer“ (VCL) welcher über fünf verschiedene Instanzen verfügt, die während der Simulation sequentiell aufgerufen werden (Abbildung 3.9).

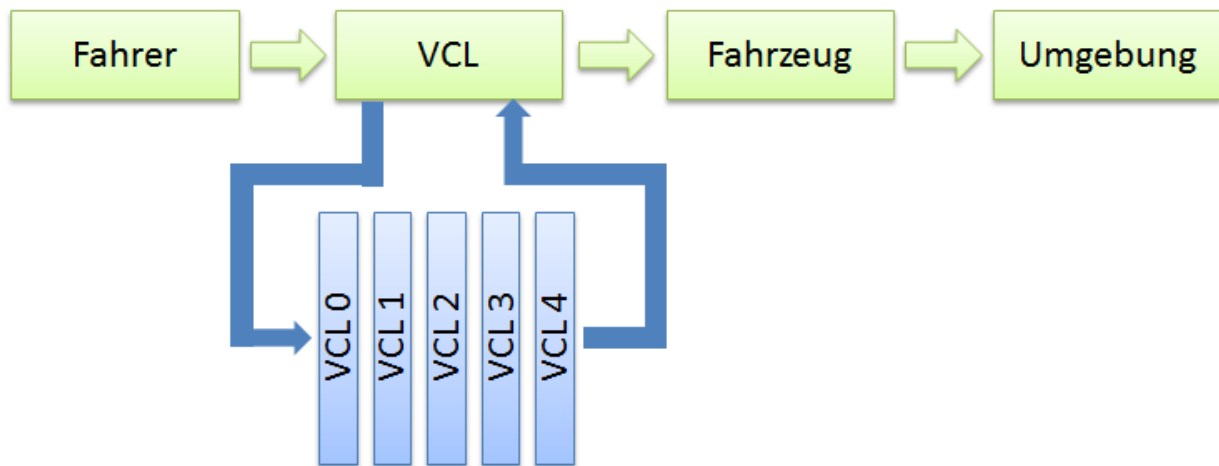


Abbildung 3.9: Der Vehicle Control Layer (adaptiert aus [31])

Im konkreten Fall werden in der Instanz Null zusätzliche Controller wie z.B. Hybridcontrol, Transmissioncontrol usw. implementiert, welche unterschiedliche Regelungsstrategien abhängig vom jeweiligen Fahrzeugzustand umsetzen.

Instanz Eins beinhaltet die zusätzlichen Triebstrangkomponenten welche abhängig von den Berechnungsergebnissen aus Instanz Null angesprochen werden. Sind alle Instanzen durchlaufen, werden die Ergebnisse an das eigentliche Fahrzeugmodell zurückgegeben und die restlichen Berechnungsschritte ausgeführt.

In Abbildung 3.10 ist der Kommunikationsfluss zwischen InMotion und den Matlabmodellen angeführt. Die externen Controller lesen die benötigten Daten aus und geben entsprechende Berechnungsergebnisse an die externen Triebstrangkomponenten weiter. Deren Ist-Zustände werden wiederum an die InMotion-Simulation übergeben.

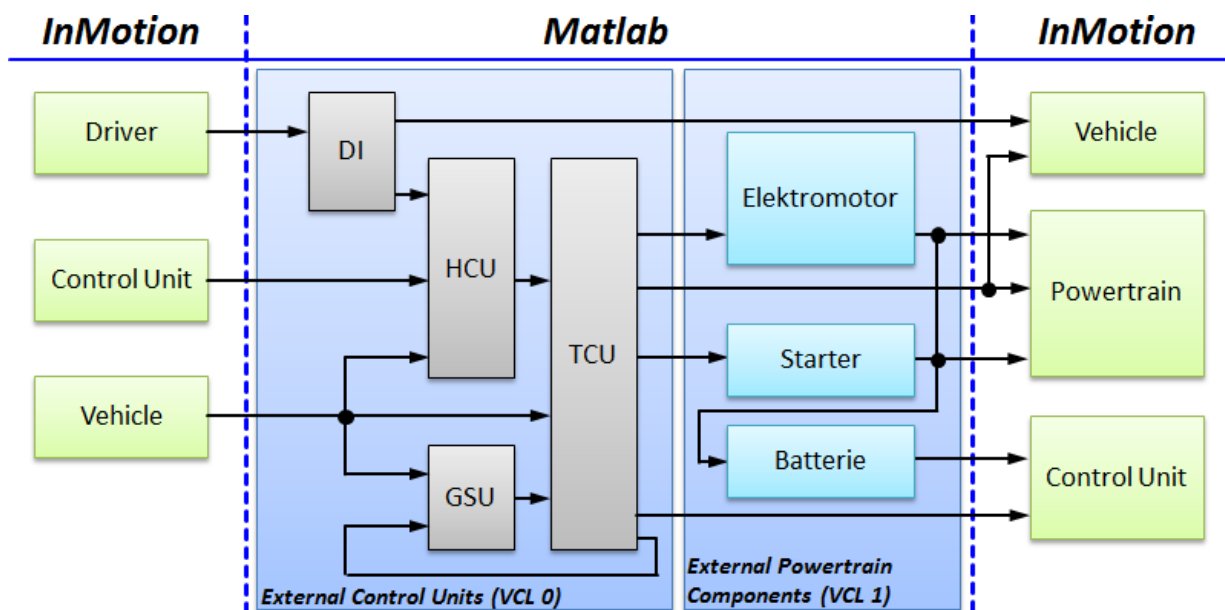


Abbildung 3.10: Implementierung der EV-CEA-Hybridstrategie (adaptiert aus [55])

Im Folgenden werden die Logiken der einzelnen Controller zur Realisierung der angewandten Betriebsstrategie kurz beschrieben.

Driver Interpreter (DI)

Im *Driver Interpreter* wird die Gaspedalstellung (entspricht einem Wert zwischen 0 und 1) in eine Drehmomentanforderung umgerechnet. Dazu wird das maximal verfügbare Drehmoment durch die beiden Antriebsmotoren zum aktuellen Zeitpunkt ermittelt. Dies erfolgt über das Auslesen des Volllastdrehmomentes von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor, abhängig von der momentanen Drehzahl und anschließender Multiplikation mit der aktuellen Gaspedalstellung (Gleichung 3.1).

$$Md_{\text{requested}} = (Md_{\text{VKM-max@n}} + Md_{\text{EM-max@n}}) * \alpha_{act} \quad (3.1)$$

Hybrid Control Unit (HCU)

Der Schwerpunkt der *Hybrid Control Unit* liegt in der Aufteilung des angeforderten Drehmomentes auf die beiden Antriebsmotoren durch Erfassung des momentanen Fahrzustandes (Geschwindigkeit, Fahrpedalstellung, SOC,...). In diesem Controller werden demnach die grundsätzlichen Eigenschaften der Betriebsstrategie realisiert. Des Weiteren erfolgt die Initiierung des Zu- und Abschaltvorganges der Verbrennungskraftmaschine durch die *Transmission Control Unit*.

Gear Selection Unit (GSU)

Die *Gear Selection Unit* ist für die Auswahl der zum Fahrzustand geeigneten Gangstufe verantwortlich. Dazu wird die momentane Drehzahl der Getriebeeingangswelle ausgelesen und entsprechend einer vorgegebenen Schaltschwelle der *Transmission Control Unit* eine gewünschte Gangstufe vorgegeben.

Transmission Control Unit (TCU)

In der *Transmission Control Unit* werden im Wesentlichen zwei Vorgänge realisiert: Zum Einen erfolgt das Zu- und Abschalten der Verbrennungskraftmaschine inklusive der korrekten Steuerung von Kupplung und Starter. Zum Anderen erfolgt das Einlegen der vorgegebenen Gangstufe wiederum inklusive dem Öffnen und Schließen der Kupplung. Die generierten Befehle werden an die nachgelagerten Komponenten weitergegeben.

Die Integration des EV-CEA-Konzeptes erfolgte auf Basis des „Hybridframeworks“, welches im Rahmen einer Kooperation mit dem Institut für Mechanik und Mechatronik der Technischen Universität Wien zur Verfügung gestellt wurde (siehe [55] und [31]). Dadurch konnte eine wesentliche Verkürzung der Entwicklungszeit gegenüber einem Neuaufbau erreicht werden.

3.6 Ermittlung des Leistungsbedarfs von VKM und E-Motor

Nach der erfolgreichen Integration des EV-CEA-Konzeptes in die beiden Simulationsmodelle konnte eine quasistationäre und dynamische Untersuchung erfolgen. Ziel dieses Abschnittes ist es, die Leistungsanforderungen an die Antriebskomponenten im NEDC und bei Autobahnfahrten zu ermitteln und den Leistungen der in Kapitel 2.4 ermittelten Systemkomponenten gegenüberzustellen.

3.6.1 Leistungsbedarf im NEDC

Mit dem EV-CEA-Konzept soll der Neue Europäische Fahrzyklus (NEDC) rein verbrennungsmotorisch aber auch rein elektrisch gefahren werden können. Entsprechend muss von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor jeweils die benötigte Antriebsleistung für den Betrieb zur Verfügung gestellt werden. Um den Leistungsbedarf zu ermitteln wurde das EV-CEA-Konzept mittels beider Simulationsprogramme im NEDC simuliert (Abbildung 3.11). Durch die zweifache Simulation konnte neben der Leistungsermittlung zusätzlich eine Validierung der Ergebnisse erfolgen.

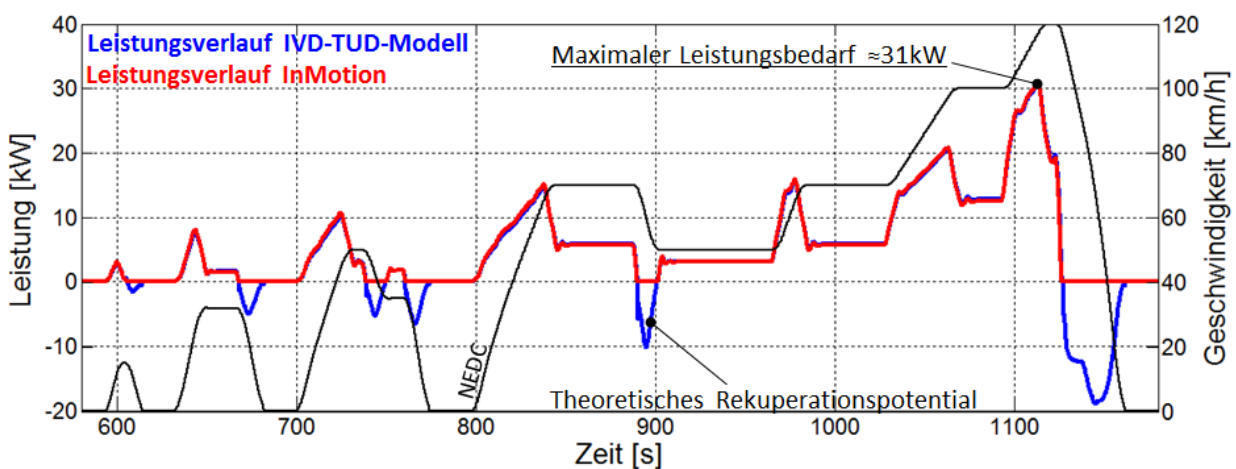


Abbildung 3.11: Leistungsbedarf im NEDC

Damit beide Ergebnisse untereinander vergleichbar sind, wurde der reale Geschwindigkeitsverlauf des simulierten Fahrzeuges aus InMotion als Geschwindigkeitsvorgabe im IVD-TUD-Modell herangezogen.

Wie in Abbildung 3.11 ersichtlich ergeben beide Programme den selben Leistungsbedarf. Der sich ergebende Unterschied während der Verzögerungsvorgänge liegt darin begründet, dass Rekuperationsvorgänge in InMotion nicht implementiert sind und die Bremsleistung durch Bremsen vernichtet wird. Das IVD-TUD-Modell zeigt hier hingegen das theoretische

Rekuperationspotential an, welches je nach Größe von Elektromotor und Batterie mehr oder weniger stark genutzt werden kann.

Das Ergebnis zeigt für den NEDC einen maximalen Leistungsbedarf von rund 31 kW an der Verbrennungsmotor- bzw. Elektromotorantriebswelle während des letzten Beschleunigungsvorganges von 100 auf 120 km/h des außerstädtischen Abschnitts.

3.6.2 Leistungsbedarf bei Autobahnfahrt

Eine bei Tagungen oft angesprochene Mindestanforderung an die Fahrzeugleistung ist es, den Autobahnabschnitt der A8 zwischen dem Albvorland bei Kirchheim unter Teck (DE) und Hohenstadt (DE) über den sogenannten Aichelberg mit mindestens 120 km/h fahren zu können (Abbildung 3.12). Diese Forderung liegt darin begründet, dass auf der vielbefahrenen Strecke geringere Fahrleistungen zu Behinderungen des Schwerverkehrs führen können. Dabei sind besonders jene Streckenabschnitte problematisch, bei denen über längere Zeit große Steigungen zu überwinden sind.

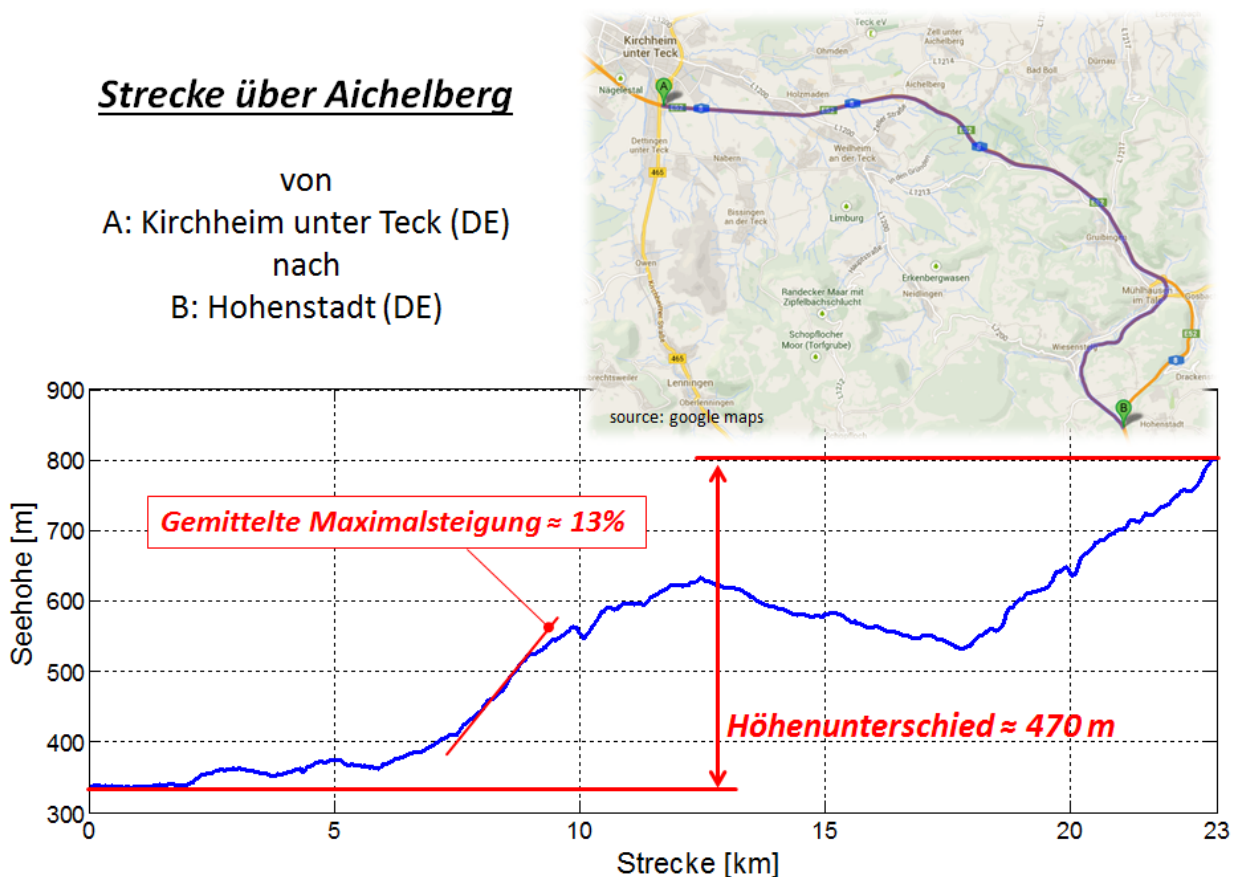


Abbildung 3.12: Der Aichelberg - Von Kirchheim unter Teck nach Hohenstadt (DE)

Ein solcher Streckenabschnitt liegt beispielsweise zwischen Kilometer 8 und 9 vor. In diesem Teilstück muss im Durchschnitt eine Steigung von rund 13% bewältigt werden. Berechnet

man den Leistungsbedarf der für diesen Abschnitt notwendig ist, ergibt sich für das EV-CEA-Konzept eine erforderliche Antriebsleistung von rund 78 kW (Abbildung 3.13).

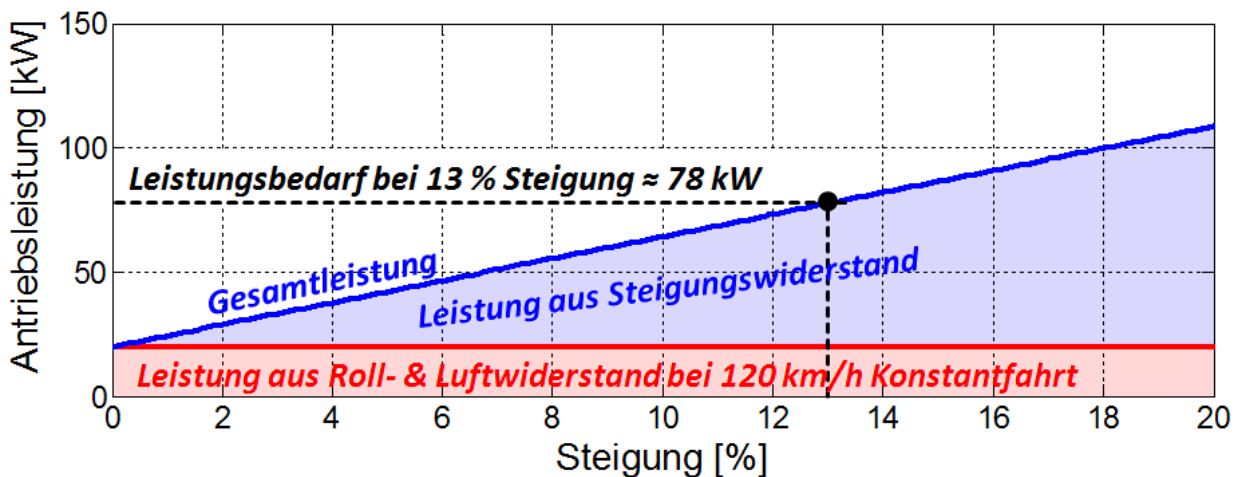


Abbildung 3.13: Leistungsbedarf über Steigung bei 120 km/h Konstantfahrt

Im Gegensatz zum Leistungsbedarf im NEDC kann hier jedoch die angeforderte Leistung durch den gleichzeitigen Betrieb beider Motoren aufgebracht werden.

Der in Kapitel 2.4 ermittelte Verbrennungsmotor besitzt eine Leistung von 46 kW bei einer Drehzahl von 6000 U/min. Bei 120 km/h ergibt sich durch die Getriebeauslegung (siehe Kapitel 2.4.4) eine Drehzahl von rund 4800 U/min bei annähernd konstantem Drehmoment (siehe Kapitel 2.4.1). Daraus resultiert eine Leistung von ca. 37 kW, welche von der Verbrennungskraftmaschine in diesem Betriebszustand aufgebracht werden kann. Die restlichen 41 kW müssen zur Aufrechterhaltung der Geschwindigkeit vom Elektromotor zur Verfügung gestellt werden. Es wird angenommen, dass der IMG 300 des EV-CEA-Konzeptes für rund 30 Sekunden mit einer Spitzenleistung von 45 kW betrieben werden kann und anschließend auf 34 kW reduziert wird. Durch die beiden Antriebsmotoren wird also zusammen eine Spitzenleistung von 82 kW und eine Dauerleistung von 71 kW zur Verfügung gestellt.

In Abbildung 3.14 sind die Ergebnisse der Leistungsuntersuchung für die Autobahnfahrt und den NEDC-Testzyklus zusammengefasst dargestellt. Die Anforderungen, welche sich durch die extremen Steigungsabschnitte der Autobahnfahrt ergeben, können mit der vorhandenen Dauerleistung nicht abgedeckt werden. Allerdings kann der Fahrzustand für etwa 30 Sekunden durch die Spitzenleistung aufrechterhalten werden, wodurch die Anforderungen als erfüllt angesehen werden können. Auch für den Betrieb des NEDC-Testzyklus sind beide Motoren ausreichend leistungsstark ausgelegt.

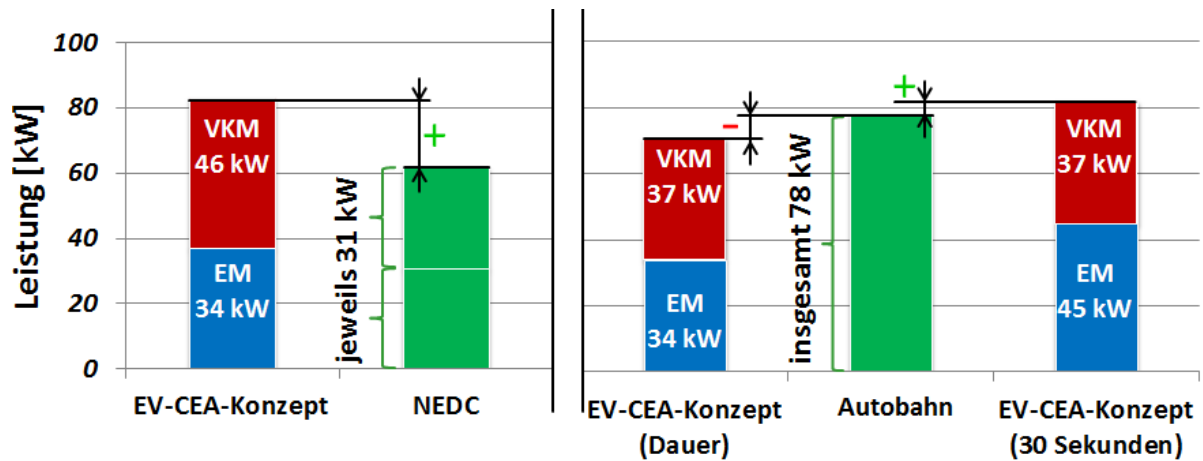


Abbildung 3.14: Gegenüberstellung: Leistungsbedarf vs. verfügbarer Leistung

3.7 Aufteilung der Antriebsleistung bei Autobahnfahrt

Die Berechnungen ergeben eine weitere interessante Erkenntnis: Soll der gesamte Autobahnabschnitt rein elektrisch gefahren werden, wird bei einem durchschnittlichen Elektromotorwirkungsgrad von $\eta_{EM} = 0,8$ und einem durchschnittlichen Batteriewirkungsgrad von $\eta_{Batt} = 0,97$ eine Energie von rund 7,5 kWh aus der Batterie entzogen. Auch im zwischenzeitlichen fallenden Streckenabschnitt ist aufgrund der hohen Geschwindigkeit kein wesentliches Rekuperationspotential vorhanden (Abbildung 3.15).

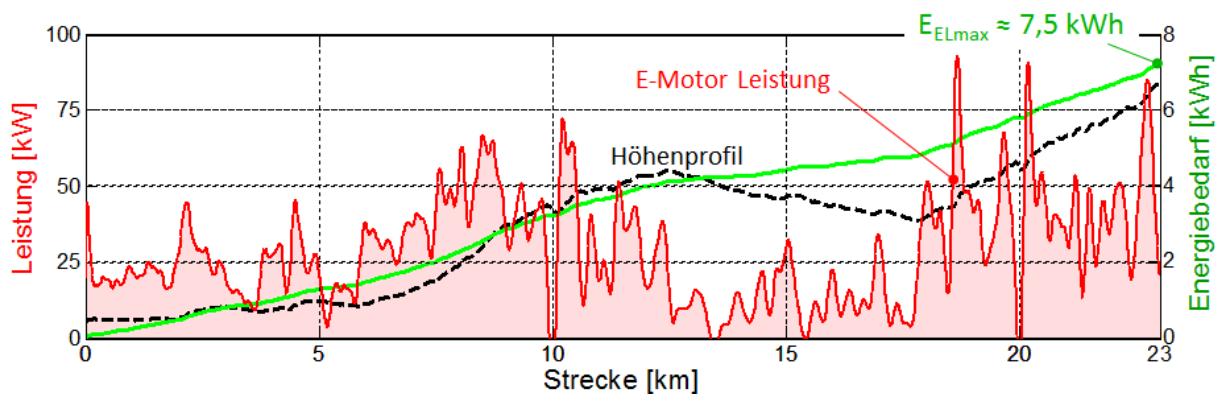


Abbildung 3.15: Energiebedarf Aichelberg

Durch eine prädiktive Betriebsstrategie kann die Antriebsleistung je nach Energiebedarf und Rekuperationspotential der restlichen Fahrstrecke auf Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor aufgeteilt werden. Im Extremfall kann mit der aktuellen Komponentenauslegung die benötigte elektrische Energie auf bis zu 1 kWh reduziert werden (Abbildung 3.16). Die zurückgehaltene elektrische Energie kann für innerstädtische Fahrten eingesetzt werden.

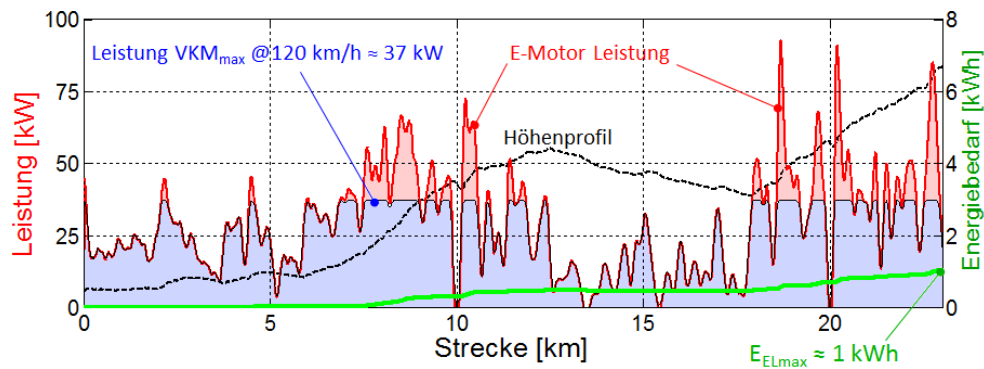


Abbildung 3.16: Leistung und Energie bei 120 km/h über den Aichelberg

Die berechneten Spitzenleistungen ergeben sich aus der Fahrzeugsimulation mit dem generierten Höhenprofil. Da jedoch von einer gewissen Ungenauigkeit des Höhenprofils ausgegangen werden muss, sind die Spitzenwerte als Näherungswerte anzusehen. Die Aussage der Untersuchung wird dadurch jedoch nur unwesentlich beeinflusst.

3.8 Vollastbeschleunigung

Ein wesentliches Kriterium für die Kundenakzeptanz eines Fahrzeuges stellt der Fahrspaß dar. Um diesen beurteilen zu können, wurde mit der aktuellen EV-CEA-Konzeptauslegung eine Vollastbeschleunigung durchgeführt (Abbildung 3.17).

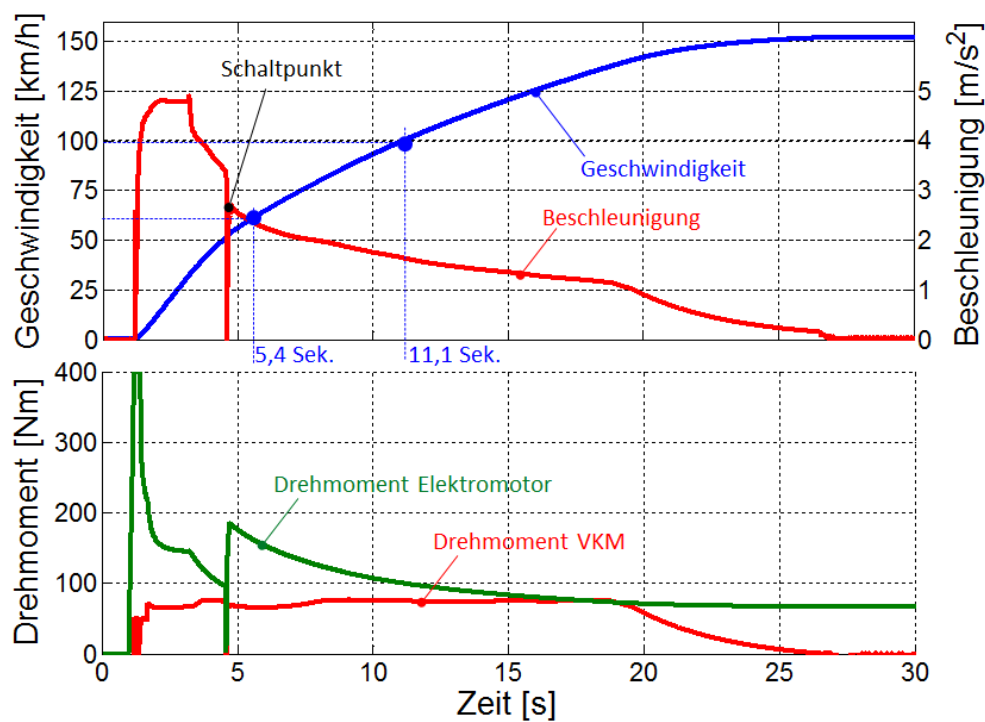


Abbildung 3.17: Vollastbeschleunigung EV-CEA-Konzept

Das EV-CEA-Basisfahrzeug beschleunigt mit der in Kapitel 2.4 ermittelten Motorisierung innerhalb 11,1 Sekunden von 0 auf 100 km/h. 60 km/h werden innerhalb 5,4 Sekunden erreicht. Mit diesen Beschleunigungswerten ist das EV-CEA-Konzept beim Vergleich mit aktuellen Hybrid- bzw. Elektrofahrzeugen (Abbildung 3.18) im Mittelfeld anzutreffen.

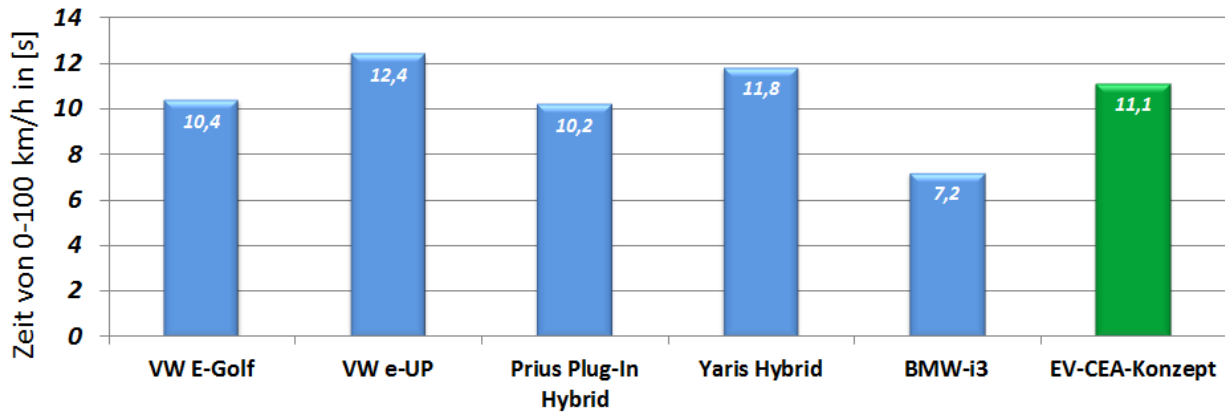


Abbildung 3.18: Vergleich der Beschleunigungswerte von 0 auf 100 km/h

3.9 Vergleich serieller und paralleler RE-Betrieb

Einen weiteren interessanten Punkt stellt der Vergleich des parallelen EV-CEA-Betriebs zu einem seriellen Range Extender Konzept dar. Wie bereits eingangs erwähnt, ist durch den direkten Durchtrieb des Verbrennungsmotors beim EV-CEA-Konzept und der dabei wegfallenden doppelten Umwandlungsverluste insbesondere bei mittleren und höheren Lastzuständen, ein deutlicher Wirkungsgradvorteil zu erwarten.

Durch die Antriebsstrangarchitektur des EV-CEA-Konzeptes können, wie bereits in Kapitel 2.3 und 3.4 beschrieben, grundsätzlich drei Antriebsvarianten unterschieden werden:

1. Elektrisches Fahren (Mode 1, siehe Kapitel 2.3)
2. Verbrennungsmotorisches Fahren (Mode 4, siehe Kapitel 2.3)
3. Elektrischer Antrieb mit verbrennungsmotorischer Unterstützung als Kombination aus 1 und 2 (Mode 2 und Mode 3, siehe Kapitel 2.3)

In Variante 2 und 3 wird die Antriebsleistung der Verbrennungskraftmaschine direkt, also ohne wesentliche Verluste auf die Antriebsräder übertragen. Eine gegebenenfalls gewünschte Überschussleistung kann wie bei einem seriellen Range Extender zum Laden der Batterie genutzt werden - der Elektromotor wird hierbei als Generator eingesetzt. Ist die verbrennungsmotorische Leistung zu gering, kann mit Hilfe des Elektromotors unterstützt werden - der Elektromotor arbeitet hierbei als parallel laufender zweiter Antriebsmotor.

Beim seriellen Betrieb wird die vom Elektromotor benötigte Energie durch die Verbrennungskraftmaschine indirekt, also über die elektrische Wirkungsgradkette (Verbrennungsmotor-Generator-PCU-Batterie-PCU-Elektromotor) zur Verfügung gestellt.

Zwar kann die Verbrennungskraftmaschine unabhängig vom Fahrzustand stationär in einem optimierten Betriebsbereich betrieben werden, der daraus resultierende Wirkungsgradvorteil wird jedoch in einem weiten Betriebsbereich durch die elektrischen und mechanischen Umwandlungsverluste wieder zunichte gemacht.

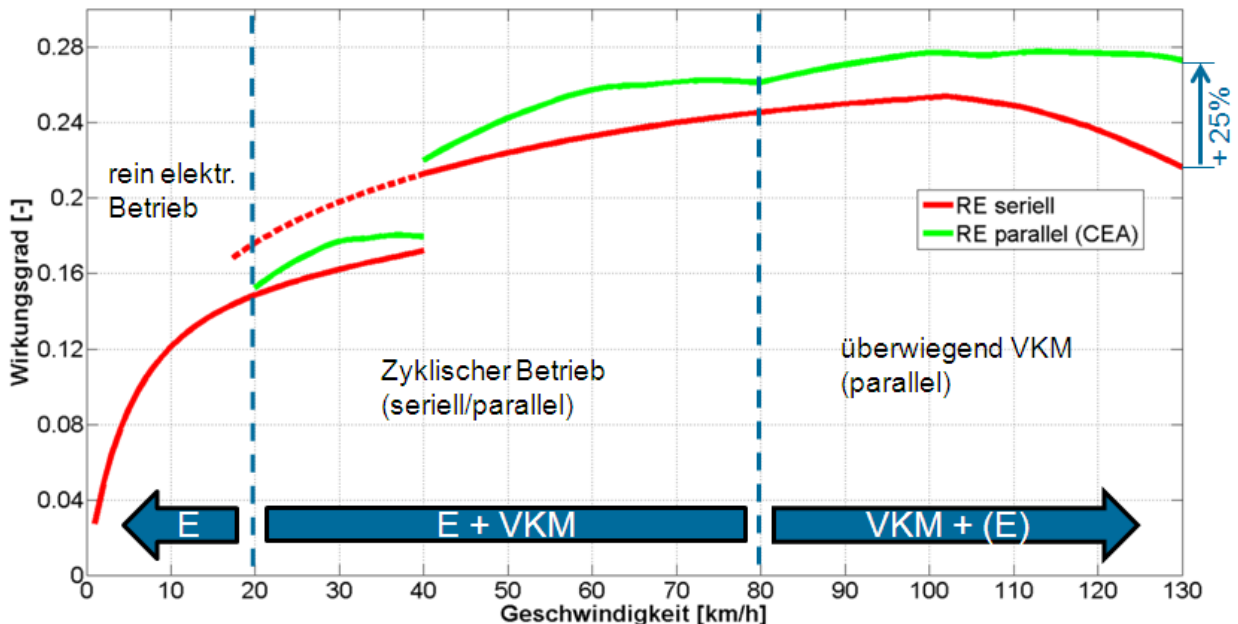


Abbildung 3.19: Betriebsstrategie bei Konstantfahrt [40]

Um dies am Beispiel des EV-CEA-Konzeptes darzustellen, wurde mittels Simulation der Wirkungsgrad im seriellen und parallelen Betrieb bei konstanter Geschwindigkeit ermittelt (Abbildung 3.19). Es ist deutlich zu erkennen, dass das EV-CEA-Konzept im mittleren und vor allem im oberen Geschwindigkeitsbereich überlegen ist. Bei Anfahrvorgängen und beim Fahren mit niedriger Geschwindigkeit fällt der Wirkungsgrad des EV-CEA-Konzeptes unter den Wirkungsgrad des seriellen Betriebes. Beim EV-CEA-Konzept erfolgt der Antrieb in diesem Betriebspunkten jedoch rein elektrisch (siehe Kapitel 3.4).

Der Wirkungsgradvorteil bei mittleren bis höheren Geschwindigkeiten resultiert aus dem Wirkungsgradkennfeld des Verbrennungsmotors (Abbildung 3.20). Im unteren Drehzahlbereich ist der hier untersuchte Verbrennungsmotor relativ ungünstig. Im mittleren Bereich kann durch den zyklischen Betrieb -ähnlich wie bei seriellen Konzepten- ein akzeptabler mittlerer Wirkungsgrad erzielt werden. Im oberen Geschwindigkeitsbereich ist der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors schließlich ausreichend hoch, so dass es günstiger ist, mit dem Verbrennungsmotor alleine das Fahrzeug anzutreiben. Der besondere Vorteil ist hier, dass die hohe Antriebsleistung nicht elektrisch aufgebracht werden muss und somit die Batteriegröße keine so entscheidende Rolle bei der Reichweite des Fahrzeuges darstellt [40].

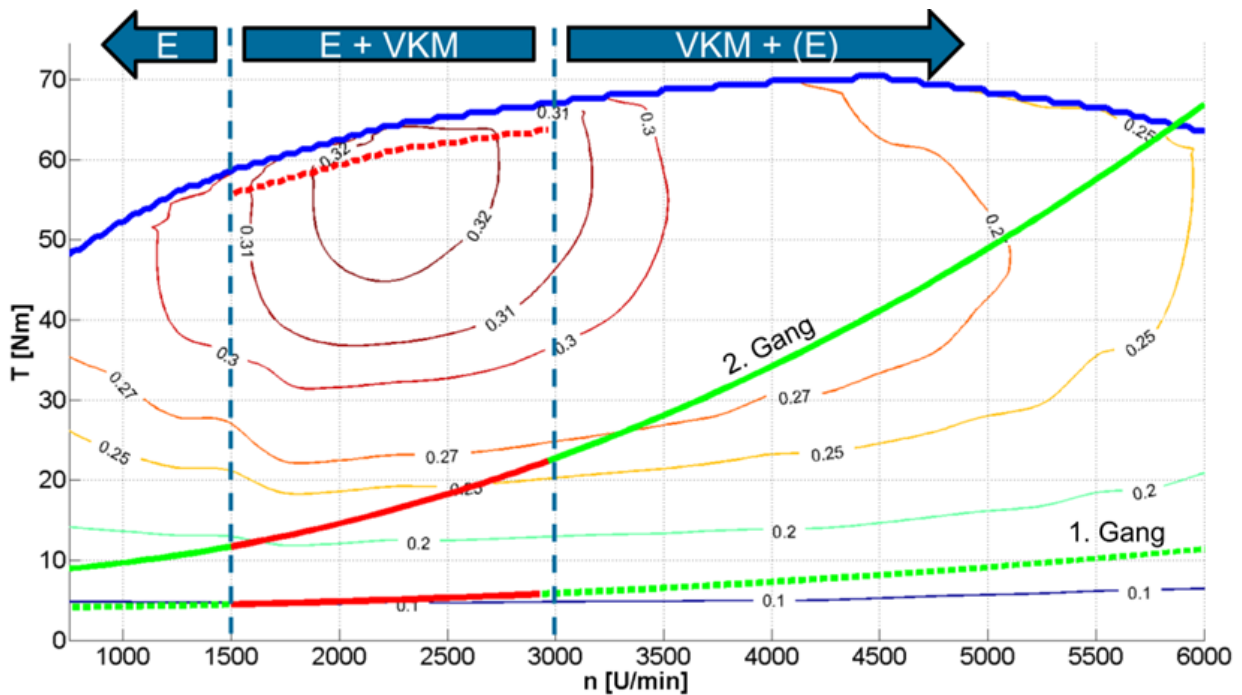


Abbildung 3.20: Betriebspunkte bei 40kW Verbrennungsmotorleistung [40]

Eine detaillierte Beschreibung des Berechnungsvorganges kann in [65] nachgelesen werden.

3.10 Drehschwingungsuntersuchung

Effizienzsteigerung bei Verbrennungskraftmaschinen wird heute im Wesentlichen durch sogenanntes Downsizing und Downspeeding erreicht (Abbildung 3.21). Downsizing beschreibt die konsequente Verkleinerung der VKM, was schließlich zur Verringerung der Zylinderzahlen führt. Beim Downspeeding erfolgt eine Verschiebung der VKM-Betriebspunkte in Bereiche mit besserem Wirkungsgrad. Beide Trends führen jedoch durch das geänderte Anregungsspektrum auch zu NVH-Problemen im Triebstrang, welche nur durch besondere Anstrengungen in der Weiterentwicklung der Dämpferelemente gelöst werden können ([26], [60], [62], [70]). Auch beim EV-CEA-Konzept wird ein konsequentes Downsizing durch Einsatz eines Zweizylinder-Verbrennungsmotors verfolgt. Soll das Konzept realisiert werden, muss demnach eine Lösung für dieses Problem gefunden werden.

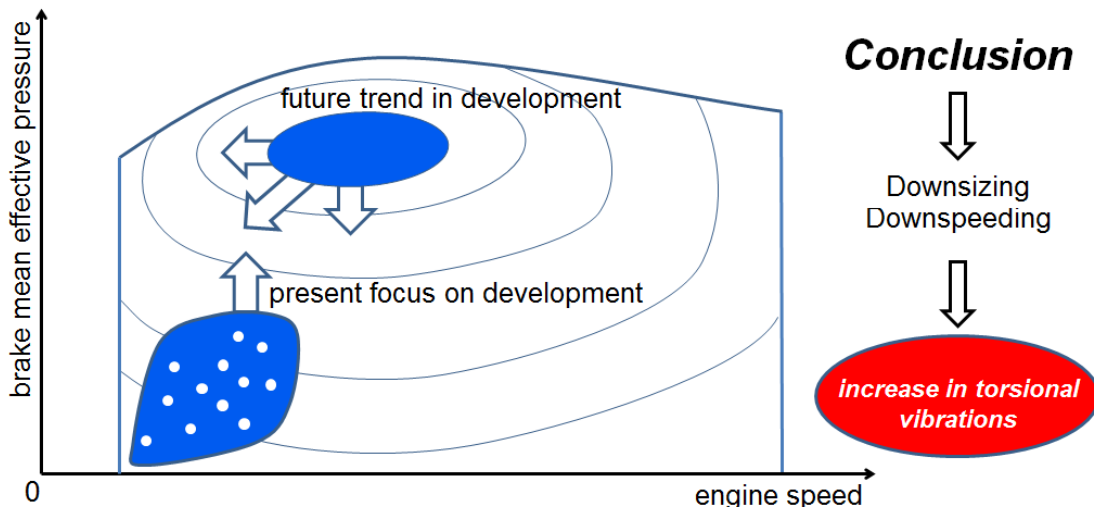


Abbildung 3.21: Entwicklungstrends der Antriebsentwicklung [38]

Wie bereits in [38] beschrieben, sind dazu insbesondere das Zweimassenschwungrad (ZMS) und dynamische Vibrationsdämpfer geeignet (Abbildung 3.22). Aber auch der Einsatz einer hydraulischen Kupplung wäre ein möglicher Ansatz. Das 2-Takt-Verfahren wäre ebenfalls eine denkbare Variante, kommt aber wegen der hohen Abgasemission nicht mehr in Frage [38].

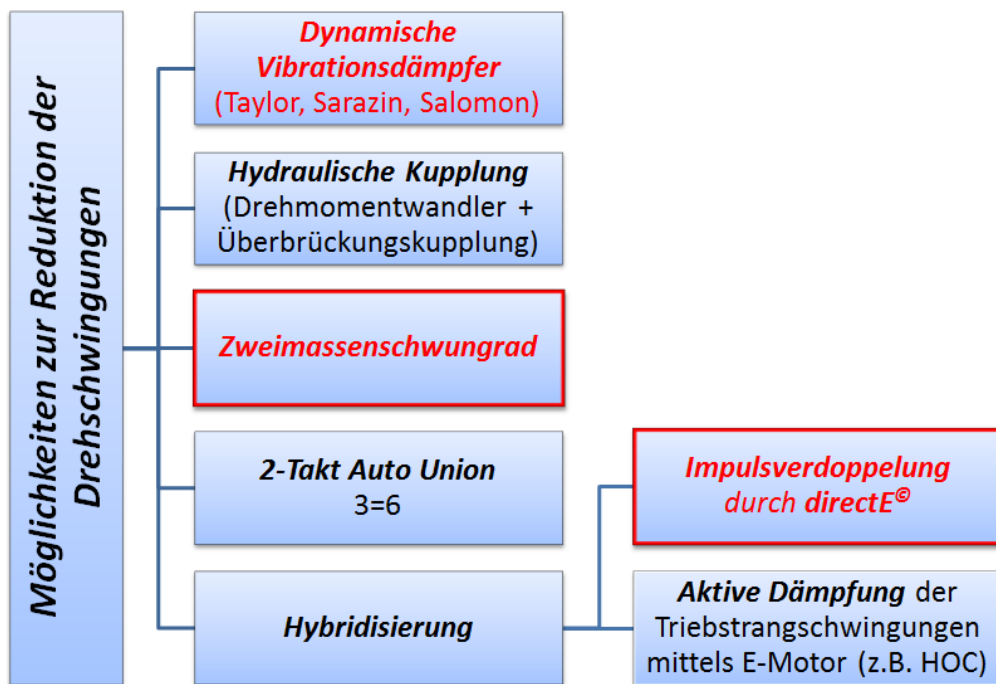


Abbildung 3.22: Möglichkeiten zur Reduktion der Drehschwingungen [38]

Die Entwicklungsarbeiten in den vorigen Kapiteln sehen als Koppelungselement zwischen Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor eine drehweiche Kupplungsscheibe vor. Aus dieser weichen Verbindung resultiert in Kombination mit der Verbrennungskraftmaschine

und dem Elektromotor ein Zweimassenschwinger, mit dem bei entsprechender Auslegung eine geeignete Drehschwingungsberuhigung realisiert werden kann.

Durch die parallele Anordnung von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor ergeben sich jedoch noch weitere Möglichkeiten die Triebstrangschwingungen positiv zu beeinflussen. Es ist beispielsweise denkbar, die Schwingungen aktiv durch den Elektromotor zu dämpfen. Wie auch in [38] angeführt wurden solche Verfahren in den letzten 10 Jahren bereits verstärkt verfolgt und eine positive Wirkung auf die Triebstrangberuhigung nachgewiesen ([66], [57], [54]). Mit Hilfe aufwendiger Regelungskonzepte konnten diese teilweise auch realisiert werden (siehe z.B. HOC-Verfahren [51] und [9]). Der praktische Einsatz wurde allerdings mit den damit verbundenen hohen elektrischen Verlusten durch die zweifache Energieumwandlung sowie den hohen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Elektromotoren verhindert.

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten am EV-CEA-Konzept wurde jedoch ein weiterer, neuer Ansatz zur Reduktion der Drehschwingungen mit Hilfe des Elektromotors entwickelt. Durch den sogenannten directE-Ansatz kann insbesondere bei Motoren mit geringen Zylinderzahlen (2 - 3 Zylinder) eine effiziente Drehschwingungsbeeinflussung durchgeführt werden.

Zur Lösung der Drehschwingungsproblematik sind demnach zwei EV-CEA-Varianten bzw. Prüfstandsaufbauten vorhanden, welche parallel bei der IVD Prof. Hohenberg GmbH und an der TU Darmstadt untersucht werden (Abbildung 3.23). Die Untersuchung der Drehschwingungsberuhigung ist dabei ein Schwerpunkt einer parallel laufenden Dissertation an der TU Darmstadt [20]. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Eigenfrequenzen des Basisaufbaus ermittelt und die Funktion des directE-Konzeptes beschrieben.



Abbildung 3.23: Die beiden EV-CEA-Prüfstandsvarianten

3.10.1 Simulatorische Untersuchung des EV-CEA-Basisaufbaus

Wie im vorigen Kapitel dargestellt, erfolgt beim EV-CEA-Basisaufbau die Drehschwingungsdämpfung durch eine drehweiche Verbindung von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor. Dazu wurde die Originalkupplung des Porsche Cayenne mit integriertem Schwingungsdämpfer verbaut (Abbildung 3.24).

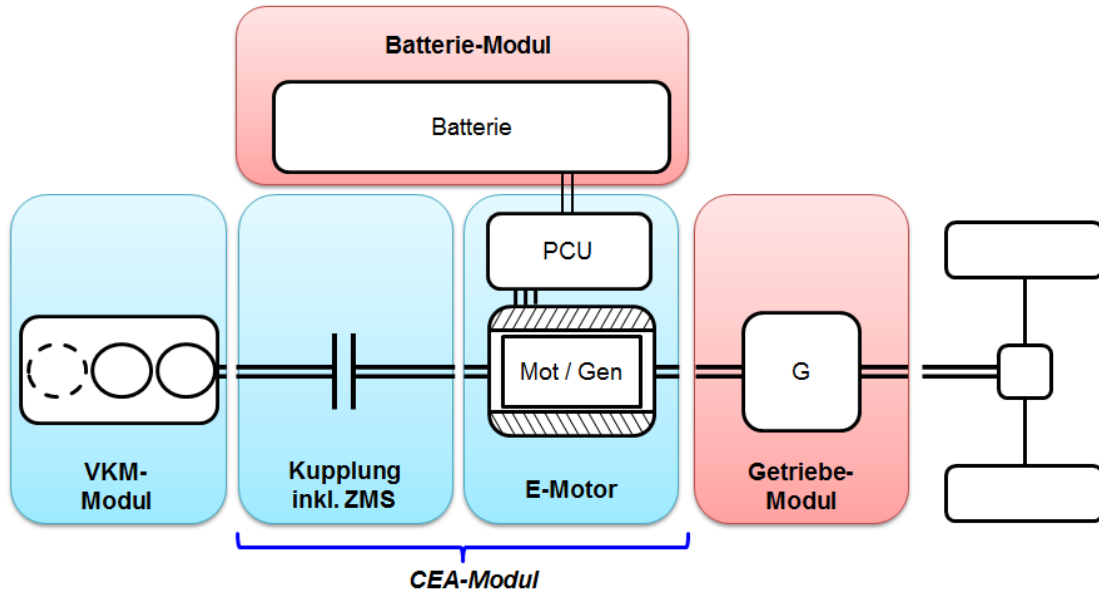


Abbildung 3.24: CEA-Konzept mit weicher Kupplung zwischen VKM und E-Motor

Für den Konzeptaufbau am Prüfstand wird eine tectos-Prüfstandswelle zur Koppelung der Prüfstandsbremse eingesetzt (siehe auch Kapitel 4.2). Durch die drehweiche Kupplungsscheibe zwischen VKM und Elektromotor und dem drehweichen Dämpfungsglied der eingesetzten tectos-Prüfstandswelle kann der Prüfandaufbau aus schwingungsdynamischer Sicht als Dreimassenschwinger abgebildet werden (Abbildung 3.25).

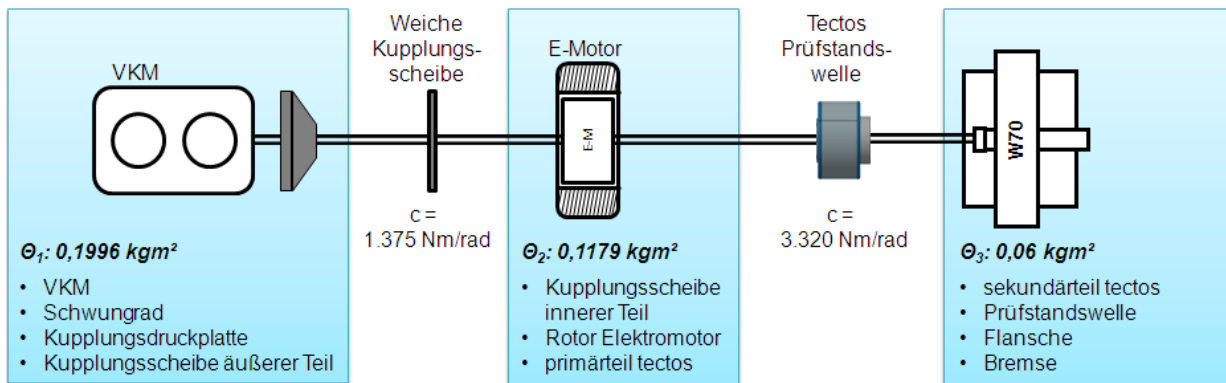


Abbildung 3.25: EV-CEA-Basisaufbau als Dreimassenschwinger

Die benötigten Massenträgheiten des Aufbaus wurden in Kapitel 4.2 im Rahmen der EV-CEA-Konzept- und Prüfstandsrealisierung ermittelt und überprüft. Die Federsteifigkeiten konnten beim jeweiligen Hersteller in Erfahrung gebracht werden.

Aus diesem Aufbau ergibt sich schließlich das in Abbildung 3.26 dargestellte vereinfachte Ersatzmodell, das mit Hilfe des d'Alembertschen Schnittprinzips zerlegt und die benötigten Differentialgleichungen erstellt werden können (Gleichung 3.2 bis 3.4).

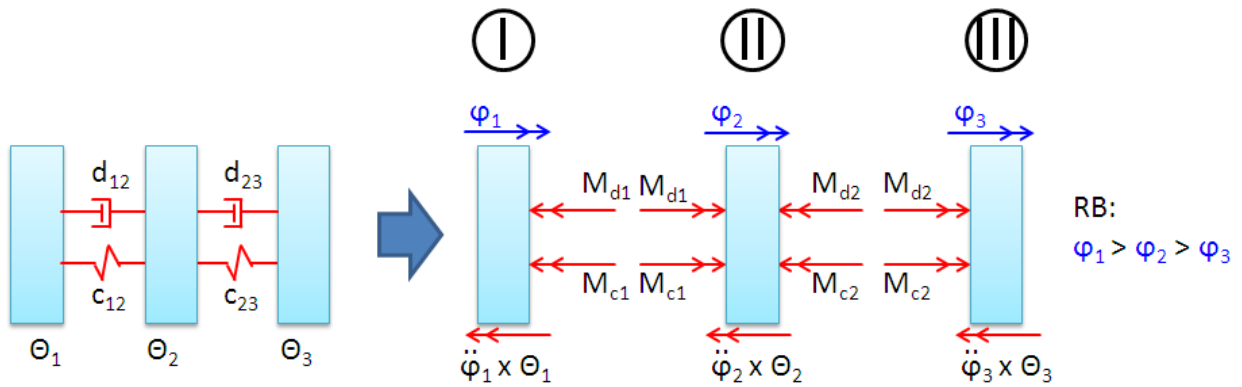


Abbildung 3.26: Ersatzmodell des Dreimassenschwingers

$$I : \Theta_1 * \ddot{\phi}_1 + d_{12} * (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) + c_{12} * (\phi_1 - \phi_2) = 0 \quad (3.2)$$

$$II : \Theta_2 * \ddot{\phi}_2 - d_{12} * (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) - c_{12} * (\phi_1 - \phi_2) + d_{23} * (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_3) + c_{23} * (\phi_2 - \phi_3) = 0 \quad (3.3)$$

$$III : \Theta_3 * \ddot{\phi}_3 - d_{23} * (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_3) - c_{23} * (\phi_2 - \phi_3) = 0 \quad (3.4)$$

Die Differentialgleichungen wurden in Matlab unter Verwendung eines linearen Ansatzes unter Annahme einer hinreichend kleinen Dämpfung gelöst. Dieses Vorgehen ist erlaubt, da durch die Dämpfung zwar die Vergrößerungsfunktion, nicht aber die Lage der Eigenfrequenz beeinflusst wird. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 3.27 in Form eines Bode-Diagramms dargestellt.

Wie ersichtlich, liegen die Eigenfrequenzen bei 18 Hz und 48 Hz wobei sich die erste aus der weichen Koppelung von VKM und Elektromotor und die zweite aus Masse und Federsteifigkeit der eingesetzten tectos-Prüfstandswelle sowie der Federsteifigkeit der Kupplung ergibt. Die Anregung dieser Eigenfrequenzen erfolgt durch den Zweizylinder-Verbrennungsmotor bei etwa 1000 U/min und 3000 U/min. Beide liegen innerhalb des Verbrennungsmotor-Betriebsbereiches und müssen daher im Prüfstandbetrieb entsprechend berücksichtigt werden.

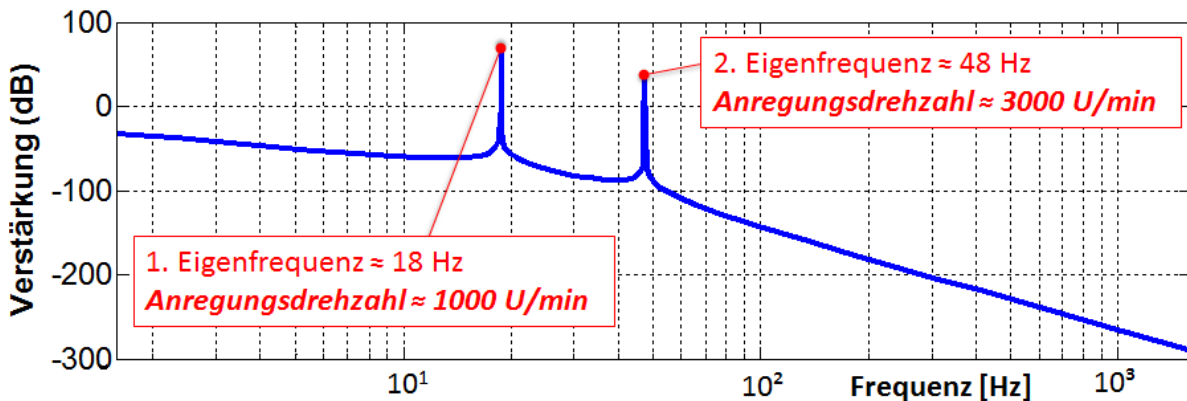


Abbildung 3.27: Eigenfrequenzen des EV-CEA-Basisaufbaus

Für den realen Betrieb ist es zielführend, die erste Eigenfrequenz unter die Betriebsdrehzahl zu senken. Dies ist entweder durch eine Senkung der Federsteifigkeit der Kupplungsscheibe oder durch eine Erhöhung der Schwungmassen möglich. Bei beiden Maßnahmen sind jedoch negative Effekte im Betriebsverhalten zu erwarten: Höhere Schwungmassen führen neben der allgemeinen Gewichtszunahme zu einer trägeren Dynamik des Triebstranges. Eine weichere Koppelung führt zu höheren Relativbewegungen zwischen der Primär- und Sekundärmasse. In Kombination mit der auftretenden Reibung zwischen den Verbindungsflächen und der Dämpfung muss hier mit höheren Verlusten gerechnet werden. Eine Lösung dieser Problematik stellt demnach immer eine Kompromisslösung dar.

Im Bereich der zweiten Eigenfrequenz sind durch die stark nichtlineare Dämpfung der Prüfstandswellen-Elastomerelemente keine großen Resonanzschwingungen zu erwarten. Die Ergebnisse müssen jedoch am Prüfstand durch eine langsame Annäherung an die Eigenfrequenz vor den Testläufen überprüft werden.

3.10.2 Theoretische Betrachtung der Drehschwingungsberuhigung mittels directE

Die directE-Drehschwingungsberuhigung basiert auf dem Prinzip einer aktiven Drehschwingungsbeeinflussung durch den Elektromotor. Dabei wird jedoch nicht versucht die Drehmomentschwankung der Verbrennungskraftmaschine auszugleichen, sondern die Frequenz der Anregung zu verdoppeln. Dies wird erreicht, indem zwischen den Drehmomentimpulsen der Verbrennungskraftmaschine mit dem Elektromotor Zwischenimpulse aufgebracht werden (Abbildung 3.28).

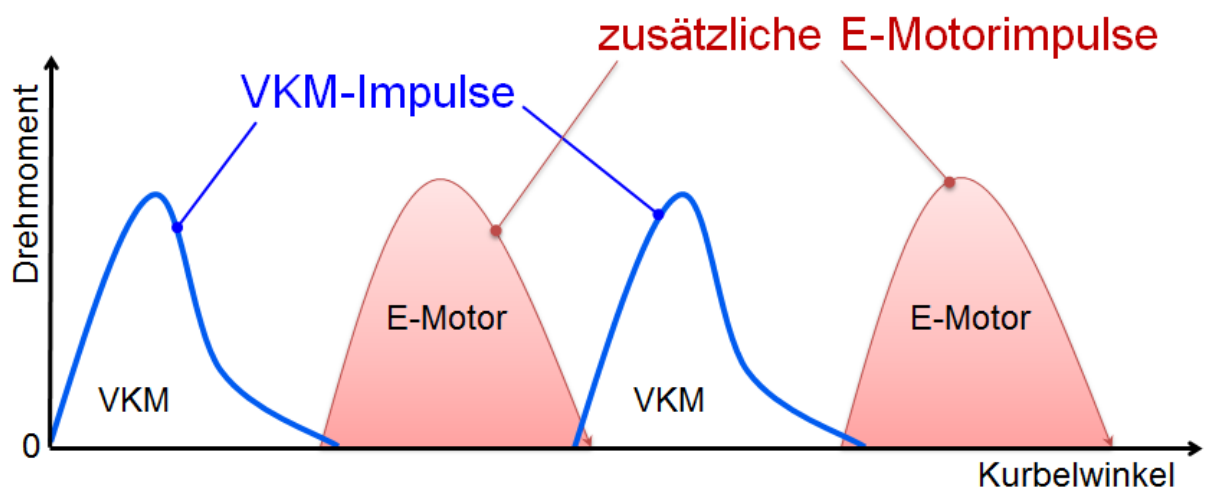


Abbildung 3.28: Frequenzverdoppelung durch directE [38]

Dadurch wird ähnlich dem Auto-Union-Konzept eine Verdoppelung der Zylinderzahl simuliert. Konkret wird im vorliegenden Fall aus der Anregung des Zweizylinder-Verbrennungsmotors ein Vierzylinder-Anregungsspektrum erzeugt.

Die Verbesserung des Schwingverhaltens wird dabei durch zwei Effekte erreicht. Zum ersten wird die Anregungsfrequenz durch die Zwischenimpulse verdoppelt, und zum zweiten kann die abgegebene Leistung des Verbrennungsmotors um die vom Elektromotor zusätzlich aufgebrauchte Leistung reduziert werden. Dadurch wird parallel zur Impulsverdoppelung eine Verringerung der Drehmomentamplituden erreicht.

In Abbildung 3.29 ist das Potential der Schwingungsreduktion durch das directE-Konzept anhand des Schwingwinkels am Elektromotor dargestellt. Berechnungen der Fa. tectos ergaben, dass durch dieses Prinzip mit einer realen Verbesserung der Schwingungen um den Faktor 4 bis 8 gerechnet werden kann (Abbildung 3.29).

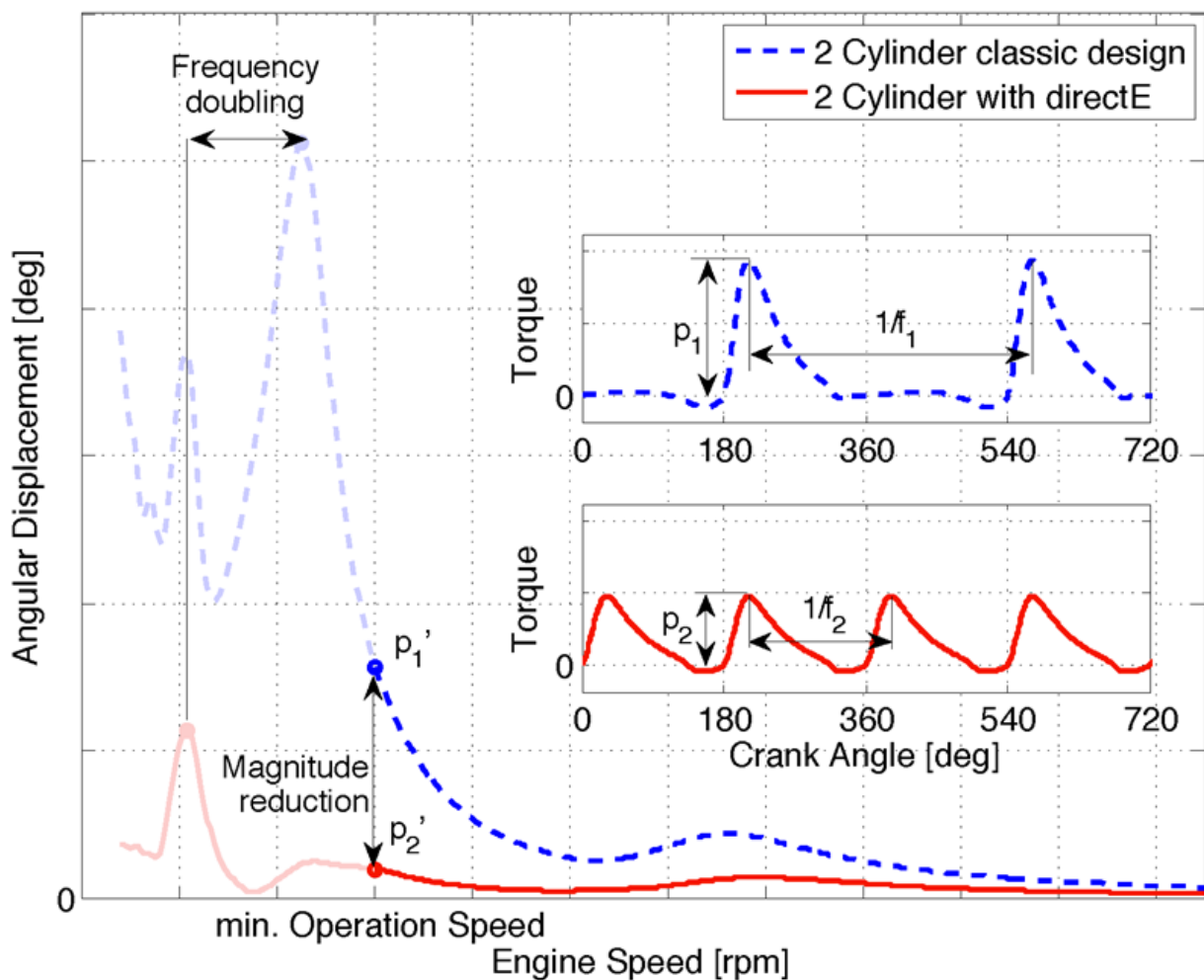


Abbildung 3.29: Drehungleichförmigkeit ZMS vs. directE [38]

Zur Realisierung des Konzeptes wird die Kupplung zwischen VKM und Elektromotor drehsteif ausgeführt. Daraus resultiert der Vorteil, dass der Elektromotor gesteuert über den Kurbelwinkel betrieben wird, und so auf ein komplexes Regelungskonzept verzichtet werden kann. Für den Aufbau wurde dazu die originale Kupplungsscheibe verschweißt (Abbildung 3.30). Eine schwingungstechnische Entkoppelung der resultierenden Drehschwingung wird mittels ZMS nach dem Elektromotor durchgeführt (Abbildung 3.31).

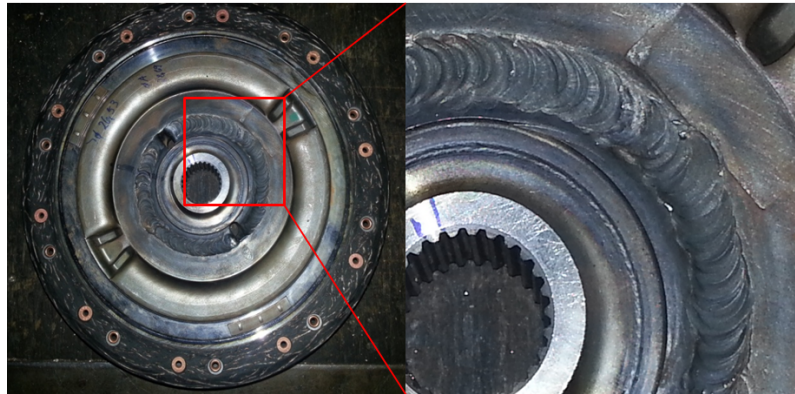


Abbildung 3.30: Drehsteife Kupplungsscheibe (Verschweißt) für directE-Aufbau [42]

Mit diesem Prinzip kann so, neben dem funktionalen Vorteil, auch auf die sonst notwendigen (teilweise sehr aufwändigen) technischen Lösungsvarianten wie z.B. großes Schwungrad und sehr drehweich ausgelegte Zweimassenschwungräder, kombiniert mit Fliehkraftpendeln, verzichtet werden. Darüber hinaus sind die heute verwendeten mechanischen Lösungen bei niedrigen Betriebsdrehzahlen (um 1000 U/min) trotz sorgfältiger Auslegung noch immer kompromissbehaftet [38]. Als Nachteil dieser Anordnung ist die stärkere Belastung der Kupplung anzuführen.

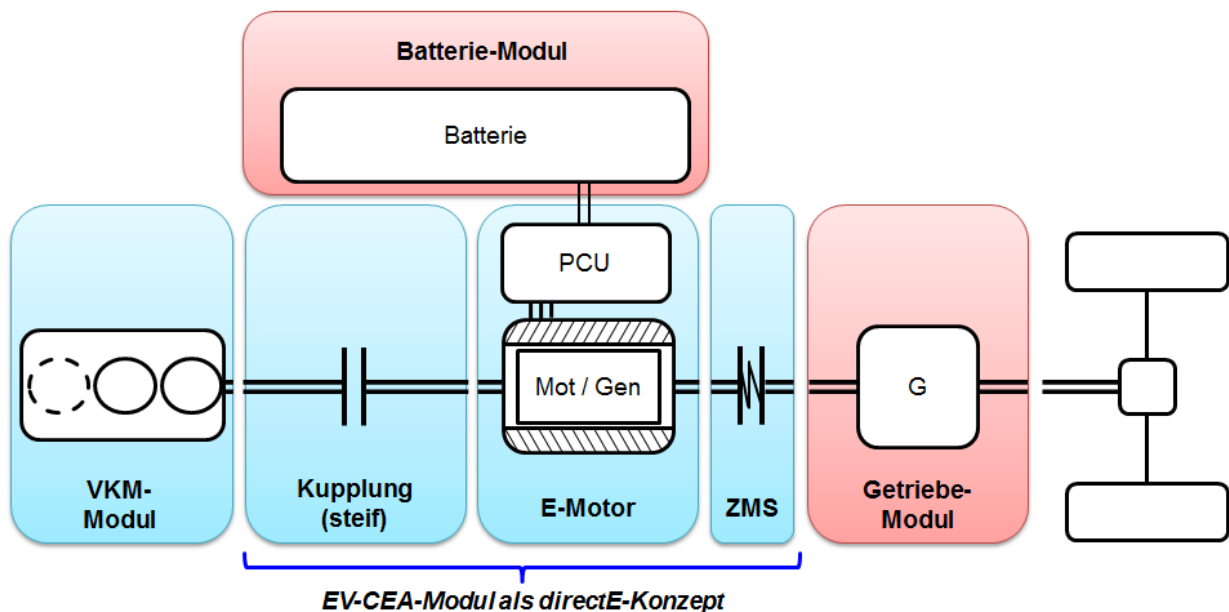


Abbildung 3.31: CEA-Konzept mit directE-Modul

Sowohl die Schwingungsdämpfung mit ZMS (EV-CEA-Basisvariante) als auch die aktive Drehmomentbeeinflussung durch den Elektromotor sind mit Verlusten behaftet. In der Basisvariante resultieren diese aus der Dämpfung bzw. Reibung der drehweichen Verbindung, beim directE-Konzept sind sie auf die elektrischen Verluste des Elektromotors zurückzuführen. Entscheidend ist, welches Verfahren die bessere Energiebilanz aufweist. Die Klärung dieser Fragestellung ist Schwerpunkt einer laufenden Dissertation an der TU Darmstadt (siehe [20]).

Kapitel 4

Konzeption und Aufbau von Demonstrator und Prüfstand

Zur messtechnischen Validierung der Simulationsergebnisse und zur Erbringung des Funktionsnachweises des Hybridkonzeptes wurde ein EV-CEA-Demonstrator und ein modularer Systemprüfstand aufgebaut.

Der Aufbau eines Demonstrators kann grundsätzlich entweder durch die Entwicklung neuer Bauteile oder durch die Verwendung von am Markt verfügbaren Komponenten erfolgen. Entscheidende Vorteile, welche sich aus der zweiten Variante ergeben, sind die wesentlich geringeren Kosten- und der entscheidend geringere Zeitaufwand gegenüber einer Neuentwicklung. Allerdings ist dieses Vorgehen auch mit dem Risiko verbunden, dass sich der Zusammenbau der Komponenten im ungünstigen Fall von sehr komplex bis hin zu - in einem vernünftigen Rahmen - als nicht umsetzbar herausstellen kann. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Ergebnisse auch auf die endgültige Version übertragen werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das EV-CEA-Konzept mit am Markt vorhandenen Komponenten aufgebaut. Wesentliche Aufgaben und Problemstellungen welche aus diesem Vorgehen resultierten und die entscheidenden Konstruktionsmerkmale des modularen Systemprüfstandes sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

4.1 Konzeption und Aufbau des EV-CEA-Demonstrators

Zur Realisierung des EV-CEA-Funktionsmusters mussten die in Kapitel 2.4 ermittelten Systemkomponenten (VKM, E-Motor und Kupplung) mittels CAD-Software digitalisiert werden. Dieser Schritt ist notwendig, um die zusätzlich benötigten Komponenten zur Koppelung der Antriebsmotoren und Lagerung des Gesamtkonzeptes konstruieren zu können.

Zur digitalen Erfassung mussten die Komponenten soweit wie möglich zerlegt werden. Sowohl bei der Kupplung als auch beim Elektromotor (aufgrund Permanentmagnete) war dies nur bis zu einem bestimmten Grad möglich. Eine Vermessung der zur Konstruktion notwendigen Hauptabmessungen und Flanschbilder konnte jedoch auch ohne einer vollständigen

Zerlegung erfolgen. Die Konstruktionszeichnung der Verbrennungskraftmaschine wurde von der Fa. Weber zur Verfügung gestellt (Abbildung 4.1).

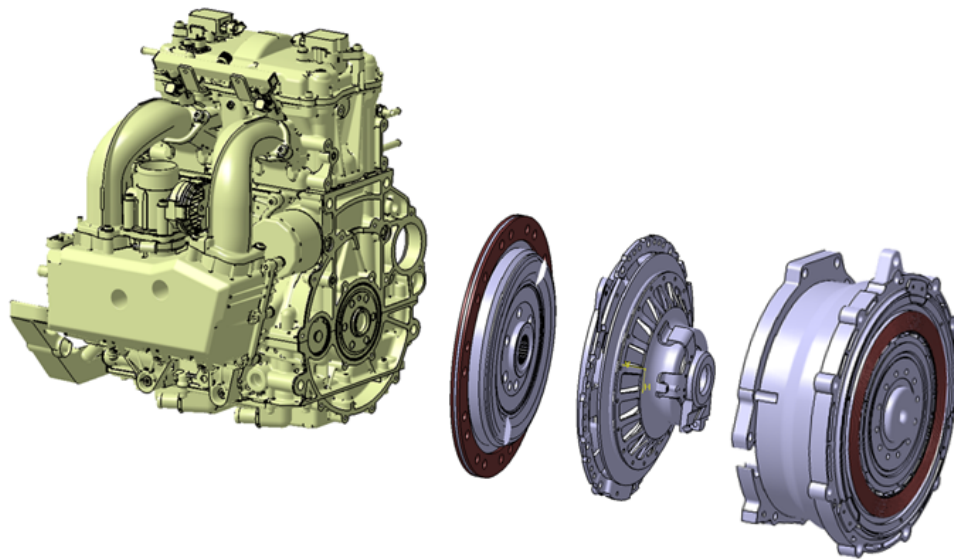


Abbildung 4.1: EV-CEA-Systemkomponenten in CAD

Aus der Verbindung von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor ergaben sich im Wesentlichen zwei Problemstellungen. Zum Einen sollte die Koppelung sehr kompakt umgesetzt werden, und zum Anderen musste eine korrekte Lagerung der Elektromotorwelle gewährleistet werden. Des Weiteren mussten für eine geeignete, kompakte Verbindung die folgenden Komponenten konstruiert und je nach Abstand von VKM und Elektromotor aufeinander abgestimmt werden:

- Schwungrad
- Starterkranz
- Lagerungshülse Pilotlager E-Motor
- Verbindungsflansch VKM und E-Motor
- Flansch E-Motor Ausgang

In der Serienapplikation erfolgt die Lagerung der Elektromotorwelle mittels eines Speziallagers in der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors. Leider konnte der originale Lagertyp nicht in die Kurbelwelle des 2-Zylinder-Motors integriert werden. Eine nach außen gelegte Führung könnte aufgrund Biegeschwingungen der Kurbelwelle zu Problemen an der Lagerstelle führen. Diese Variante würde auch einer kompakten Koppelung entgegenstehen.

Schließlich ist es gelungen, die Elektromotorwelle entsprechend der Serienkonfiguration mit Hilfe eines Speziallagers und der eigens konstruierten Lagerhülse in die Kurbelwelle des Verbrennungsmotors zu integrieren (Abbildung 4.2).

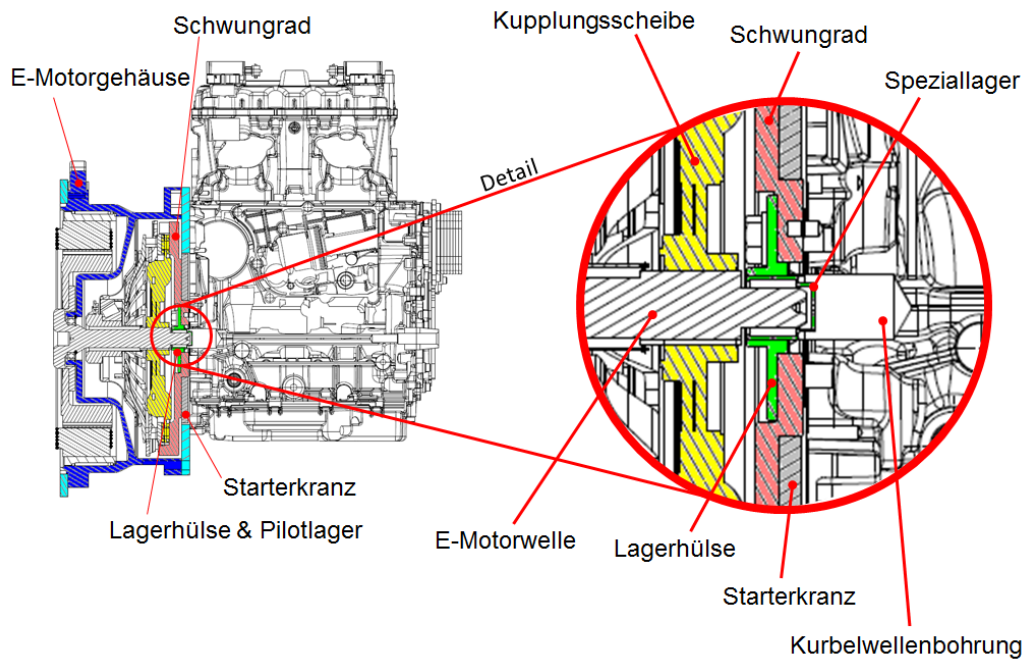


Abbildung 4.2: Verbindung VKM und Elektromotor

Ab diesem Zeitpunkt war auch der maximale und minimale Abstand des Elektromotors zur VKM gegeben und so konnte im nächsten Schritt eine geeignete Koppelung des Verbrennungsmotor- und E-Motorgehäuses gesucht werden.

Nach intensiven Überlegungen ist es gelungen die Verbindung mittels einer speziellen, beidseitig an das jeweilige Flanschbild angepasste, Zwischenscheibe von nur 10 mm Stärke zu lösen. Der Flansch enthält die Flanschbilder der beiden Antriebsmotoren und entsprechende Senkungen für eine überstandsfreie Aufnahme der Spezialschrauben (Abbildung 4.3).

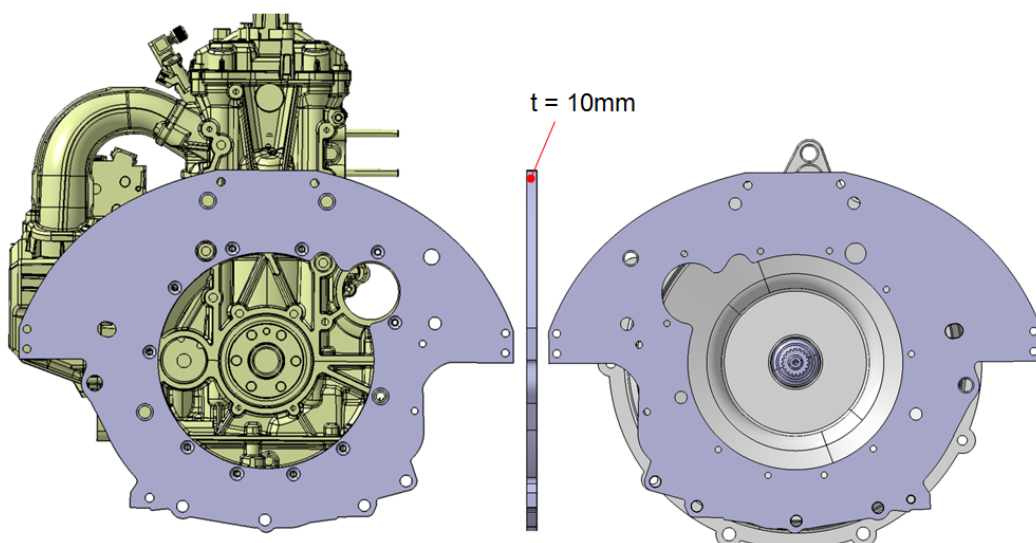


Abbildung 4.3: Verbindungsflansch VKM E-Motor

Zur Überprüfung der Koppelung wurde ein Probeflansch aus Kunststoff angefertigt. Nachdem die Funktion bestätigt werden konnte, wurde die Fertigung des kostenintensiven Flansches aus Aluminium in Auftrag gegeben. In Abbildung 4.4 ist das zusammengebaute EV-CEA-Konzept dargestellt. Wie ersichtlich ist es schließlich gelungen eine sehr kompakte Koppelung zu realisieren.

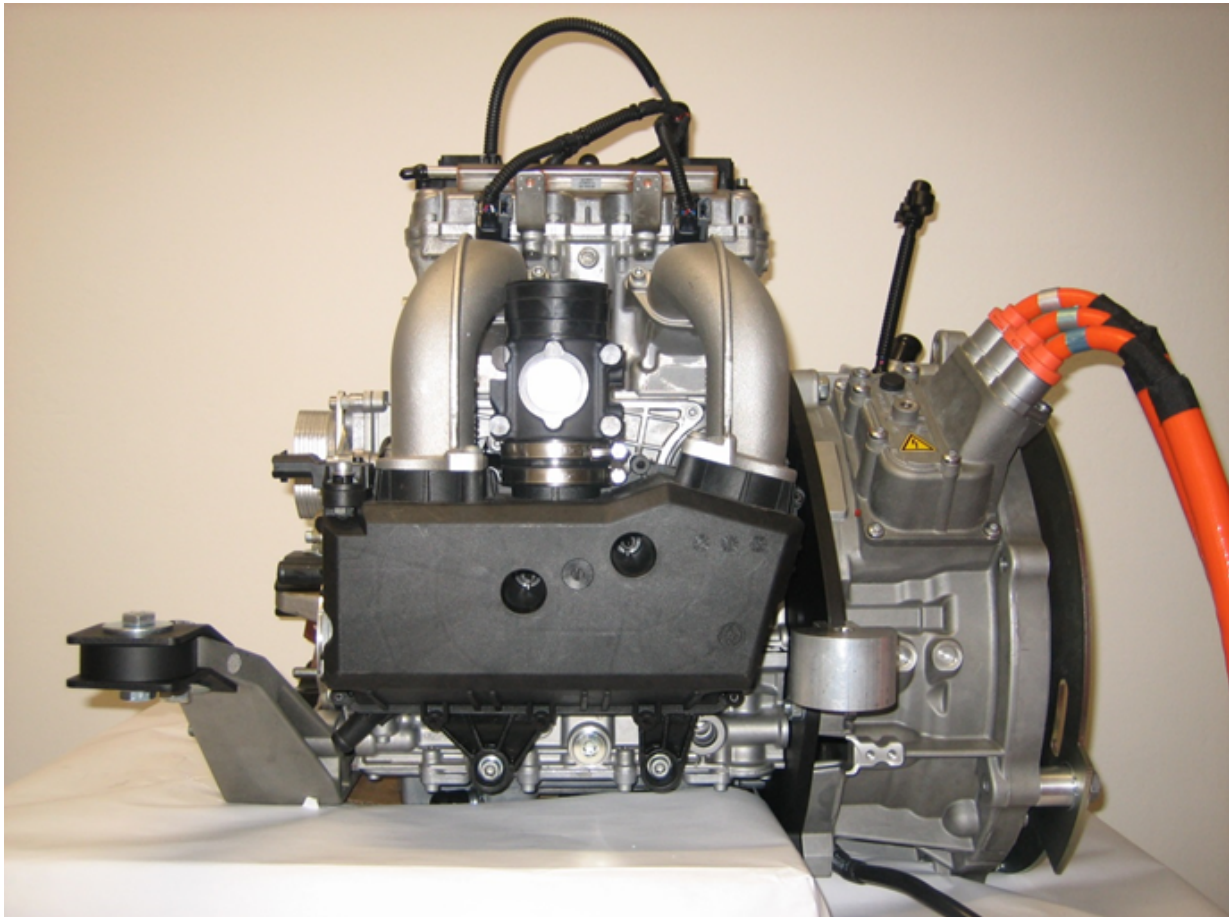


Abbildung 4.4: EV-CEA-Demonstrator

4.2 Konzeption und Aufbau des modularen Systemprüfstandes

Prüfstandsbetreiber und Fahrzeughersteller verwenden an ihren Prüfständen im Allgemeinen sogenannte Palettensysteme, bei denen ein Austausch der zu vermessenden Motoren schnell und ohne großen Aufwand erfolgen kann. Im Gegensatz dazu muss der zu konstruierende Systemprüfstand anderen Anforderungen genügen. Als Entwicklungsprüfstand für das EV-CEA-Konzept sollen damit sowohl das Gesamtkonzept als auch einzelne Systemkomponenten wie VKM oder Elektromotor separat vermessen werden können. Ein häufiges Wechseln der Komponenten ist nicht zu erwarten.

Damit das gesamte Prüfstandssystem samt Prüfling ohne großen Aufwand in unterschiedliche Prü fzellen (z.B. Klimazelle) transportiert werden kann, stellte auch hier eine kompakte Umsetzung einen wichtigen Punkt dar.

Der EV-CEA-Prüfstand wurde daher auf Basis eines massiven Grundgestells, bestehend aus Längs- und Querträgern aufgebaut (Abbildung 4.5). Die Verbindung der Träger erfolgt über Langlöcher, was eine freie Positionierung ermöglicht. Die Längsträger verfügen außerdem über Aufnahmeschienen für Betonplatten um das Gewicht des Grundgestells bei Bedarf erhöhen zu können. An den vier Ecken wurden Schwingungsdämpfer montiert, mit denen bei Bedarf das Prüfstandsgestell angehoben und vom Boden entkoppelt werden kann. Die massive Ausführung des Grundgestells ermöglicht einen relativ einfachen Transport des gesamten Prüfstands.

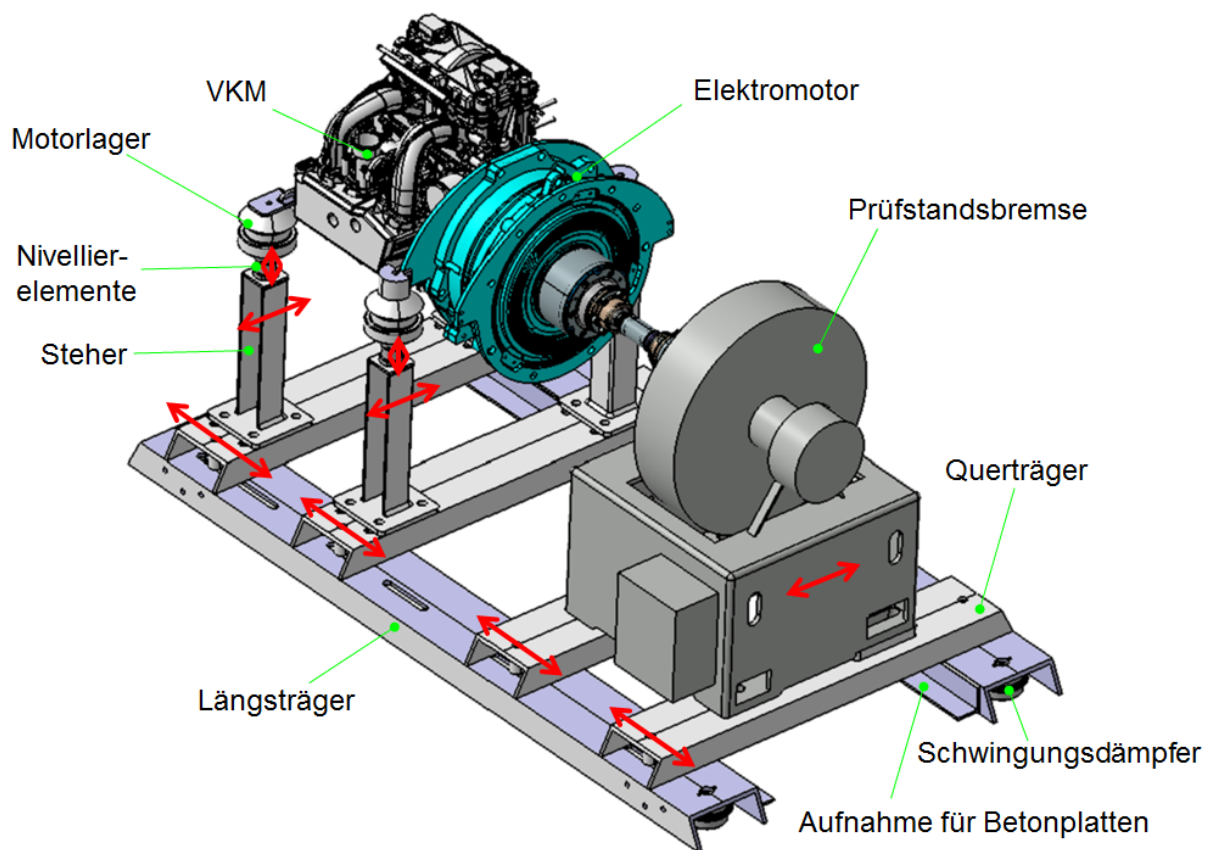


Abbildung 4.5: Grundgestell IVD-Systemprüfstand

Position und Länge der Langlöcher wurden so ausgeführt, dass sowohl das gesamte EV-CEA-Konzept, als auch die VKM oder der Elektromotor allein mit der Bremse verbunden und vermessen werden können (Abbildung 4.6).

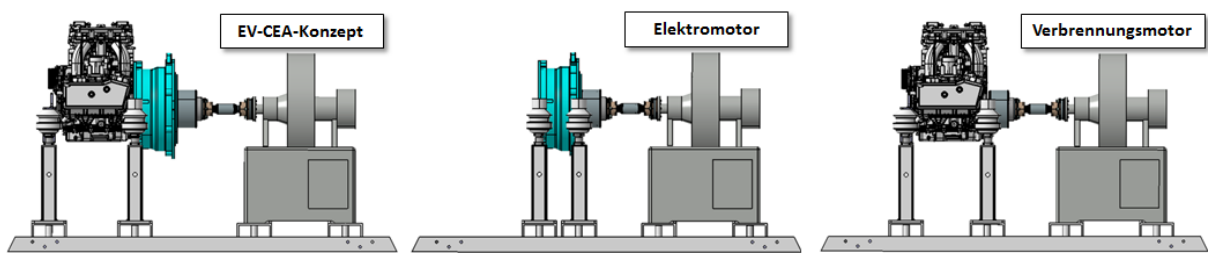


Abbildung 4.6: Modularer Prüfstands Aufbau

Die Verbindung der Systemkomponenten zur Bremse erfolgt über eine Prüfstandswelle der Fa. tectos. Diese Welle verfügt über ein Torsionselement, welches aus einer Klauenkupplung in Verbindung mit Elastomerelementen besteht. Der große Vorteil dieser Prüfstandswelle ist, dass durch den Austausch der Elastomerelemente relativ einfach Federsteifigkeit und Dämpfungsgrad variiert werden können.

Zur Montage von Peripheriekomponenten, wie z.B. Luftfilter oder Schaltkasten und zur Befestigung von Kabeln und Schläuchen, wurde um das Grundgestell ein Rahmen aus Item-Profilen konstruiert (Abbildung 4.7).

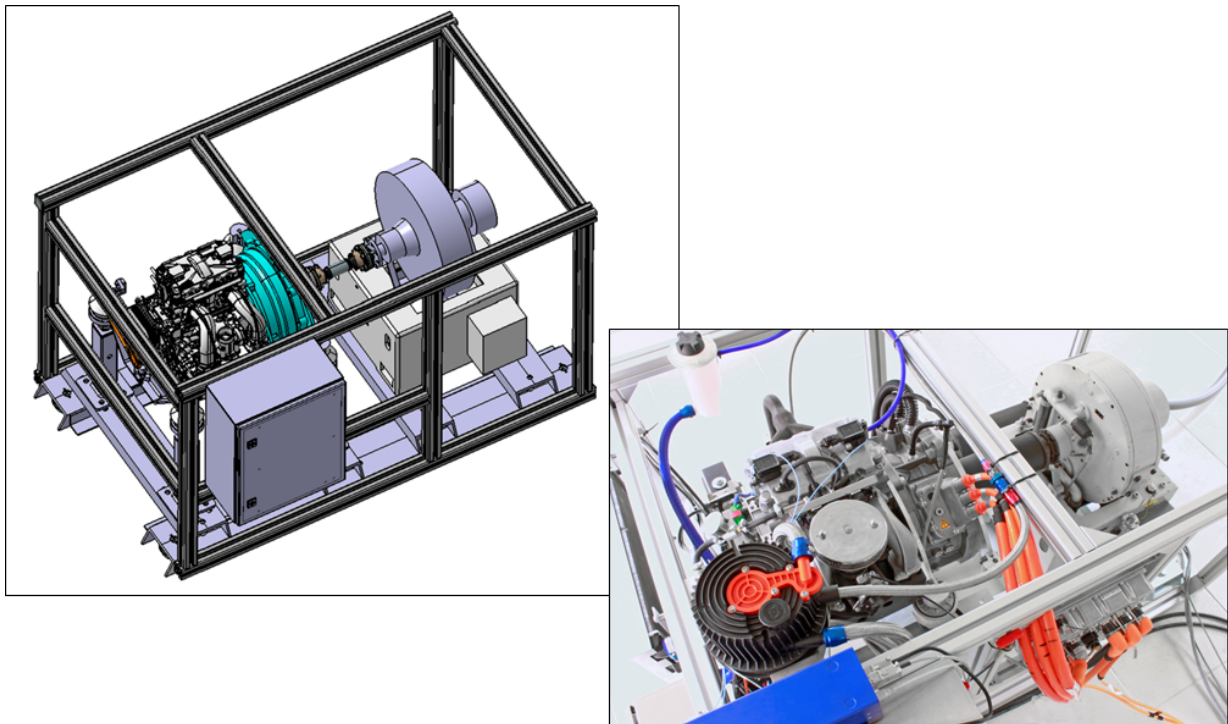


Abbildung 4.7: Der IVD-Systemprüfstand

Durch den modularen Prüfstands Aufbau konnten alle geplanten Messungen ohne Probleme durchgeführt werden. Auch die positiven Transporteigenschaften der kompakten Gesamteinheit wurden bereits getestet und bestätigt, als der Prüfstand auf der Testing Expo 2013 in Stuttgart ausgestellt wurde. Vor Ort konnte der Prüfstand im speziellen Leiter von

kleineren Universitäts- und Forschungsinstituten, welche ähnliche Anforderungen an ihre Prüfstände stellen, überzeugen.

4.2.1 Ansteuerung der Systemkomponenten

Um das EV-CEA-Konzept am Prüfstand betreiben zu können, musste eine Ansteuerung der Systemkomponenten und der Prüfstandsbremse realisiert werden.

Die gesamten Steuerungsfunktionen des Prüfstandes erfolgen softwareseitig mittels eines LabView-Systems, welches über eine CAN und eine analoge Schnittstelle mit dem Prüfstand verbunden ist (Abbildung 4.11).

Ansteuerung Elektromotor

Die Ansteuerung des Elektromotors wurde über die zum Elektromotor gehörende original Porsche Cayenne Leistungselektronik (PCU) realisiert. Eine Öffnung der PCU-CAN-Bus-Ansteuerung inklusive einer Restbussimulation stellte die Fa. Bosch im Rahmen des 2cc-Konsortiums zur Verfügung. Über die CAN-Bus-Ansteuerung erfolgt die Vorgabe der Betriebspunkte und der Betriebsart, die durch den PCU-internen Drehzahlregler neben dem Drehmomentbetrieb auch einen drehzahlgeregelten Betrieb ermöglicht. Als Stromquelle zur Speisung der Leistungselektronik bzw. des Elektromotors dient ein AVL-Batteriesimulator mit einer Maximalleistung von 120 kW (Abbildung 4.8).

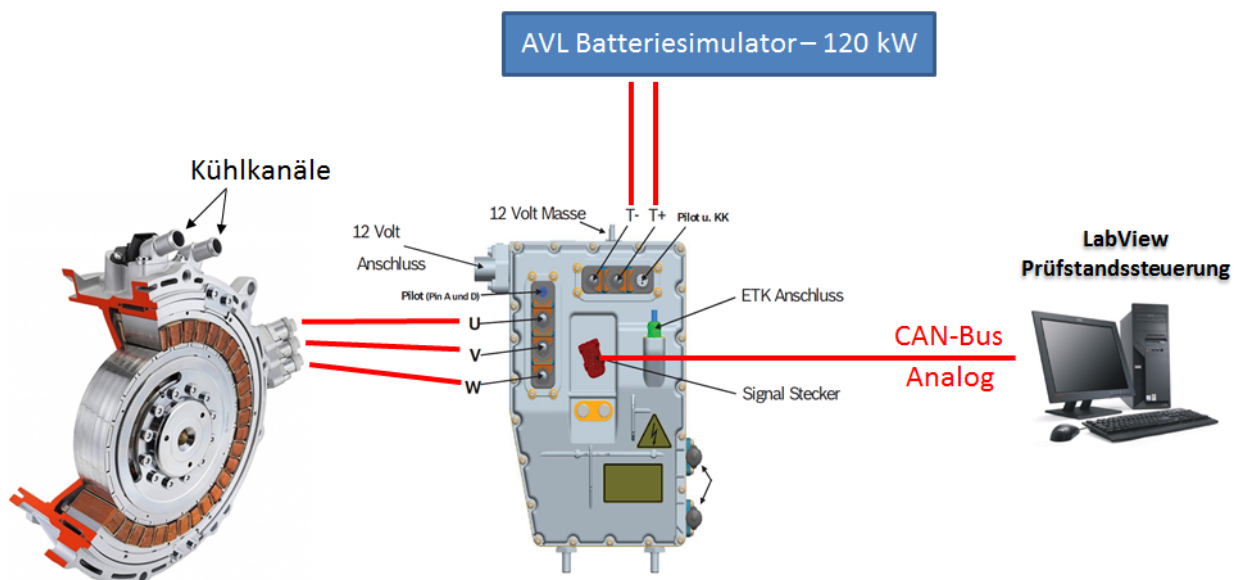


Abbildung 4.8: Elektromotoransteuerung

Ein Nachteil der Ansteuerung über den CAN-Bus ist die begrenzte Regelungsgeschwindigkeit, welche aus den grundsätzlichen Eigenschaften des CAN-Busses und den in der Leistungselektronik nachgeschalteten Filtern resultiert. Dies stellte sich insbesondere bei den Untersuchungen zur aktiven Drehschwingungsbeeinflussung mit Hilfe des Elektromotors als Nachteil heraus. Zur Realisierung einer schnellen Ansteuerung wurde daher von der Fa. Bosch zusätzlich ein analoger Signaleingang an der PCU zur Verfügung gestellt. Dem Vorteil der schnellen Regelungsgeschwindigkeit steht hier allerdings der Wegfall des PCU-internen Drehzahlreglers als Nachteil gegenüber. Zur Untersuchung der aktiven Drehschwingungsbeeinflussung ist jedoch nur eine Ansteuerung über ein Drehmomentsignal notwendig. Eine für weitere Untersuchungen eventuell benötigte Drehzahlregelung kann bei Bedarf softwaremäßig im LabView-System umgesetzt werden.

Ansteuerung der Verbrennungskraftmaschine

Die Kommunikation mit dem Bosch Steuergerät MED19 der Verbrennungskraftmaschine erfolgt über eine ETK-Steuergeräteschnittstelle mit Hilfe eines ETAS-Systems. Die softwareseitige Ansteuerung und Bedienung des Steuergerätes wird mit ETAS-Inca durchgeführt (Abbildung 4.9).

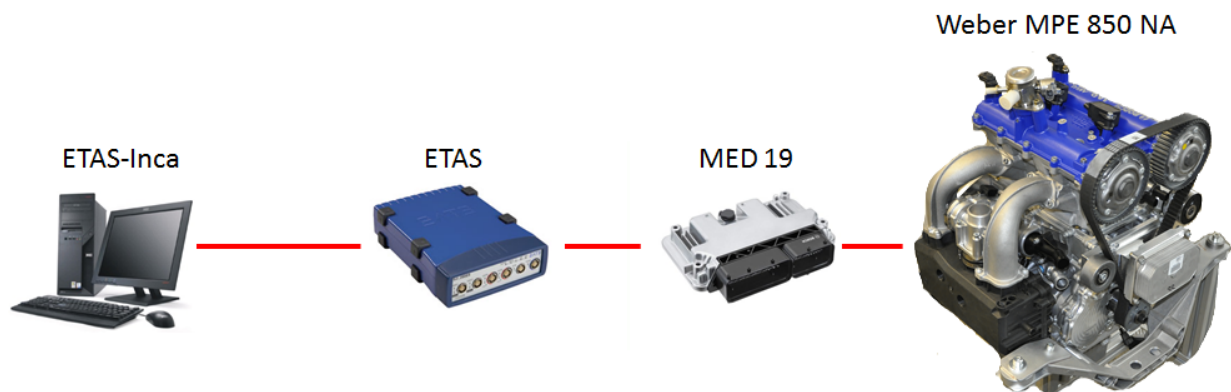


Abbildung 4.9: Ansteuerung der Verbrennungskraftmaschine

Die Ethernet-basierte ETK-Schnittstelle von ETAS stellt einen direkten, echtzeitfähigen Zugang zu den Variablen und Parametern im Steuergerät her. Dadurch können die Parameter der Verbrennungskraftmaschine jederzeit verändert werden, was insbesondere bei einer Verbrennungsmotorapplikation von Vorteil ist.

Wie bereits in Kapitel 2.4.1 beschrieben, wurde der MPE 850-Verbrennungsmotor der Fa. Weber parallel zur EV-CEA-Konzeptentwicklung von der Fa. Bosch zu einem fortschrittlichen Automotivemotor umgebaut und zur Realisierung des CEA-Konzeptes im Rahmen des Zweizylinder-Konsortiums inklusive einer Basisapplikation und der oben beschriebenen Hardware zur Ansteuerung des Motors zur Verfügung gestellt.

Ansteuerung Kupplung

Als Kupplung für den EV-CEA-Demonstratoraufbau wurde (wie bereits in Kapitel 2.4.3 beschrieben) die Serienkupplung und die Seriendruckplatte aus dem Porsche Cayenne Hybrid verwendet. Auch die Ansteuerung der Kupplung erfolgt über den serienmäßig verwendeten Spindelaktuator der Fa. FTE automotive.

Dieser Spindelaktuator ist über eine Ölleitung mit der Kupplungsdruckplatte verbunden. Durch eine Spindel erfolgt im Aktuator eine mechanische Umsetzung einer Servomotor-Drehbewegung in eine Kolben-Längsbewegung, mit der der benötigte Öldruck zum Aus- und Einrücken der Kupplungsdruckplatte realisiert wird.

Um den Aktuator nutzen zu können, musste die Kommunikationsschnittstelle geöffnet werden. Nach Rücksprache mit dem Hersteller des Aktuators wurden im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung die benötigten Informationen der Kommunikationsschnittstelle (.dbc-File und Pinbelegung des CAN-Busses) zur Verfügung gestellt.

Die Ansteuerung des Spindelaktuators vom Prüfstandsrechner erfolgt über CAN-Bus. Als Regelgröße des Aktuators wird der Verfahrensweg (in Drehwinkel) des Spindelaktuators herangezogen (Abbildung 4.10).

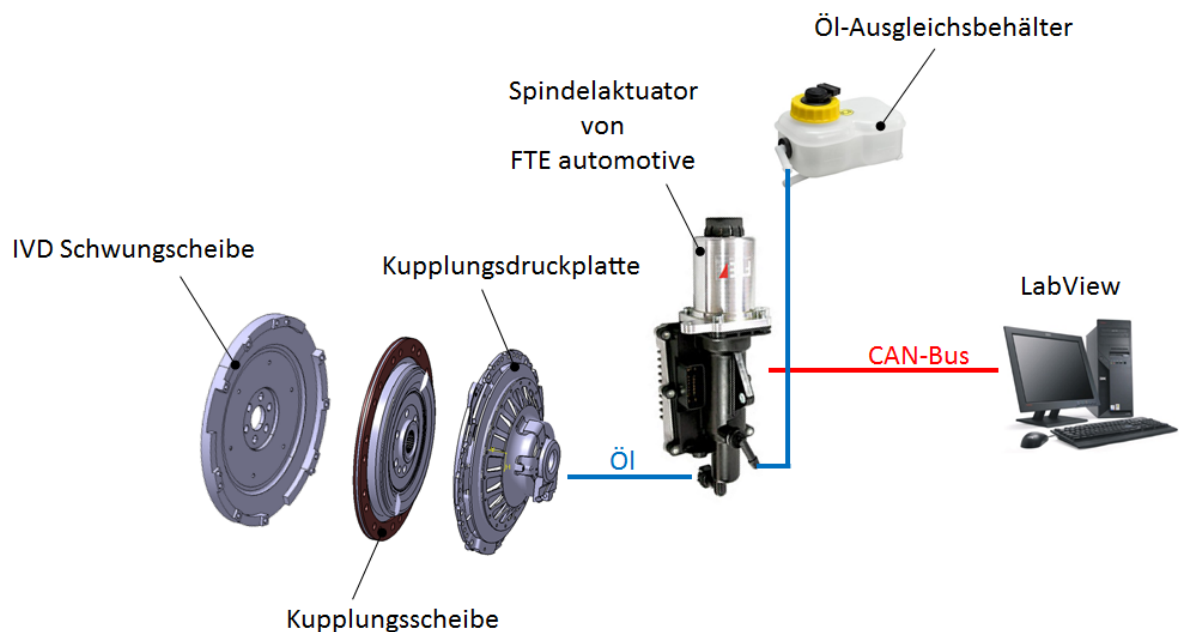


Abbildung 4.10: Ansteuerung der Kupplung

Zur Verhinderung einer Sicherheitsabschaltung von Seiten des Aktuators erfolgt eine permanente Überwachung des Druckes in der Kupplungszuleitung. Eine Überschreitung der zulässigen Werte wird durch die LabView-Software verhindert [42].

Ansteuerung der Prüfstandsbremse

Als Prüfstandsbremse steht eine Schenck W 70 Wirbelstrombremse mit einer Leistung von 70 kW zur Verfügung. Die Ansteuerung erfolgt über den Standard Schenck Bremsenrechner und einer analogen Vorgabe der Sollwerte über LabView.

Eine Übersicht der Prüfstandssteuerung inklusive der jeweiligen Steuer- und Regelgrößen sind in der Abbildung 4.11 zusammengefasst dargestellt.

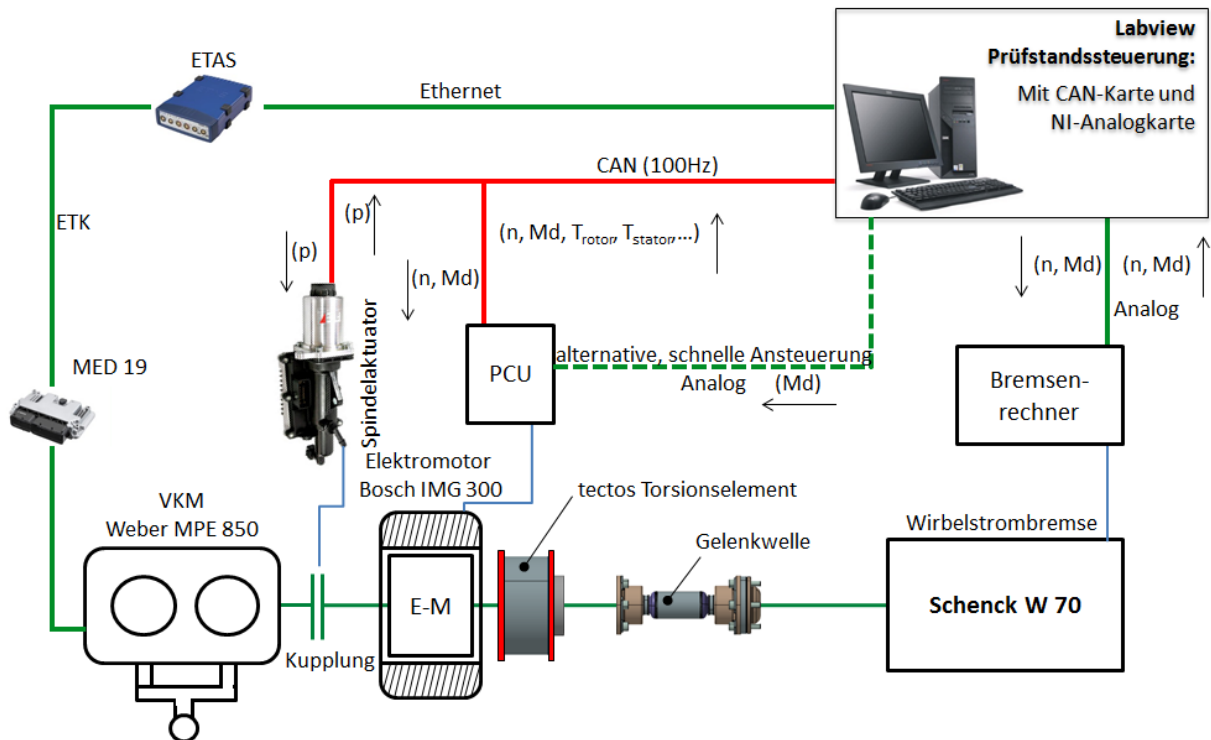


Abbildung 4.11: Übersicht der Prüfstandssteuerung

4.2.2 Aufbau der Messtechnik

Zur Untersuchung des EV-CEA-Konzeptes musste eine entsprechende Messtechnik am Prüfstand aufgebaut werden. Neben einer Zylinderdruckindizierung beider Zylinder erfolgte eine hochgenaue Erfassung des Kurbelwinkels bzw. der Drehzahl an Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor. Dies war insbesondere zur Untersuchung der Drehschwingungen notwendig. Die Kraftstoffversorgung und Verbrauchsmessung erfolgt über eine AVL-Kraftstoffwaage. Die Aufzeichnung der Messdaten wird mittels AVL-Indimodul 622 durchgeführt (Abbildung 4.12).

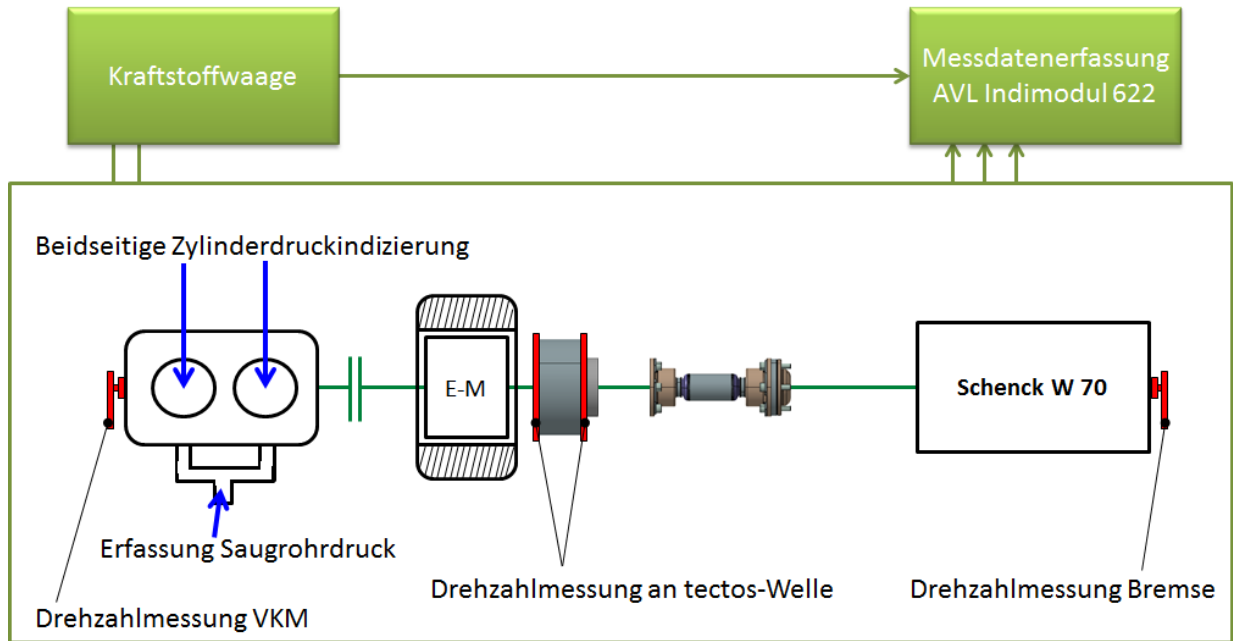


Abbildung 4.12: Kraft- und Wegsensorik in den Lagerstellen des EV-CEA-Konzeptes

Des Weiteren erfolgte zur Prüfstandsüberwachung und Komfortbewertung eine Erfassung der Wankbewegung. Realisiert wurde dies durch Implementierung von Kraft- und Wegsensoren in den Lagerstellen (Abbildung 4.13).

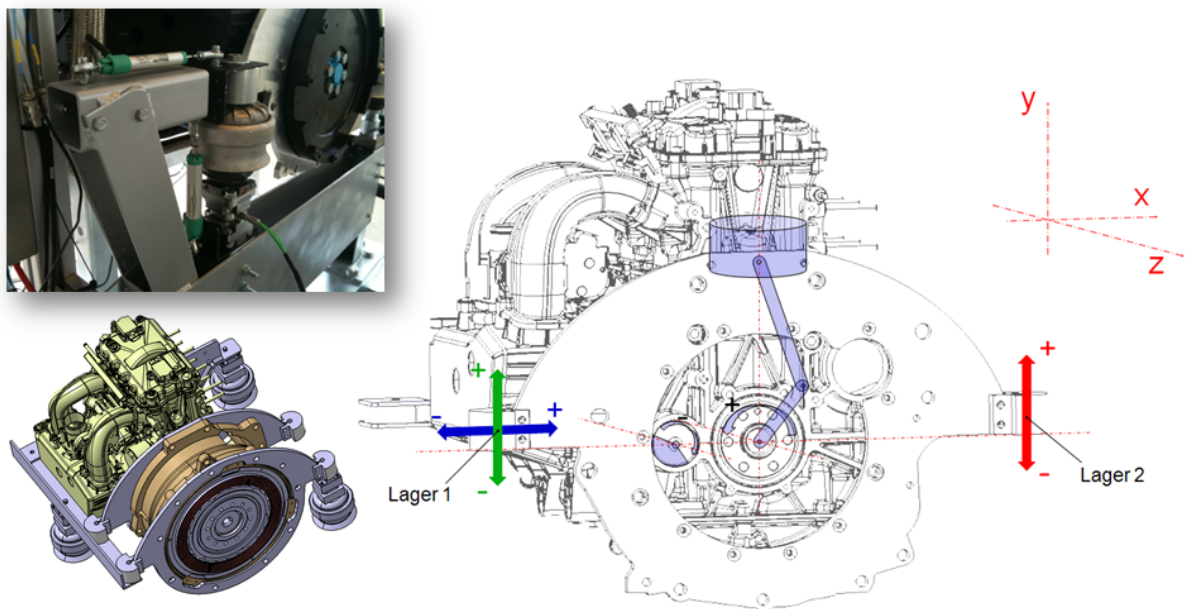


Abbildung 4.13: Kraft- und Wegsensorik in den Lagerstellen des EV-CEA-Konzeptes

4.2.3 Erweiterung zum XiL-Systemprüfstand

Zur Untersuchung des EV-CEA-Konzeptes im realen Fahrbetrieb wurde der Prüfstand um die Fahrzeugsimulationssoftware AVL InMotion powered by Carmaker erweitert. Die Anbindung an den Prüfstand erfolgt via CAN-Bus-Koppelung an die LabView-Prüfstandssteuerung (Abbildung 4.14).

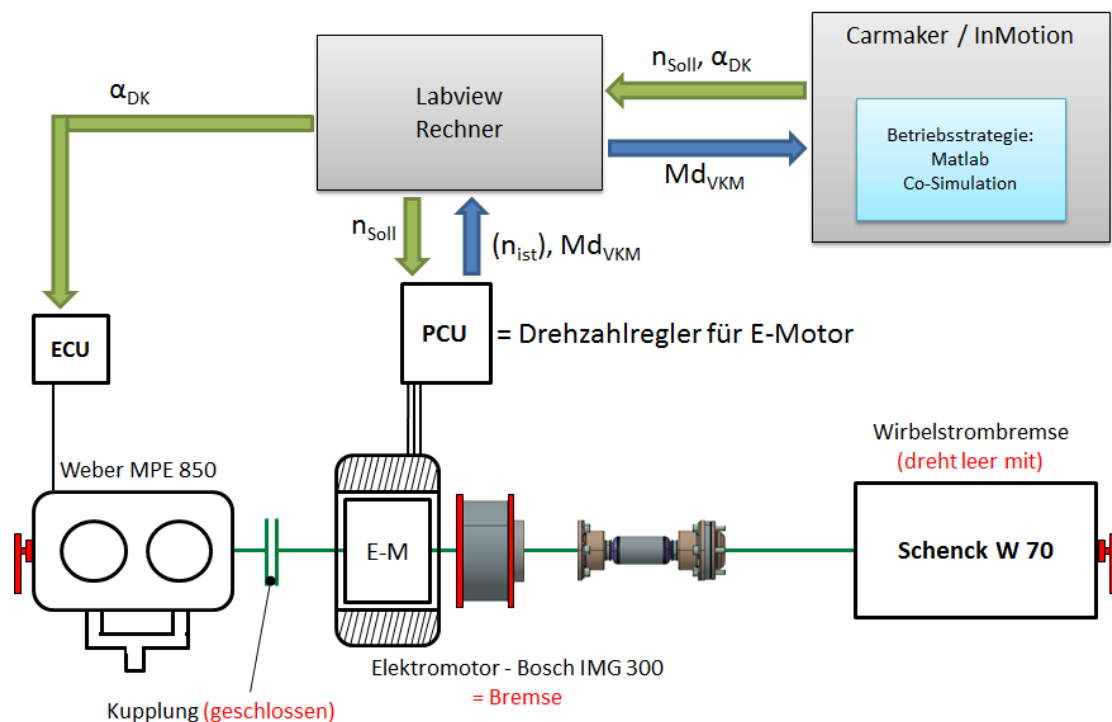


Abbildung 4.14: Erweiterung des Prüfstandes mit InMotion

InMotion berechnet, ausgehend vom Vergleich der momentanen IST-Geschwindigkeit mit der SOLL-Geschwindigkeit, über die Betriebsstrategie (siehe Kapitel 3.4) und das Fahrermodell die Drehmomentanforderung an die Antriebsmotoren und gibt dem Prüfstand über den Drosselklappenwinkel das Solldrehmoment der Verbrennungskraftmaschine vor. Gleichzeitig wird das IST-Moment und die IST-Drehzahl am Elektromotor gemessen und aus der Drehmomentbilanz die Drehzahl nachgeregelt.

Die Schnittstelle zwischen Realsystem und Simulationswelt wurde dabei bewusst zwischen VKM und Elektromotor gelegt, da die Wirbelstrombremse für eine Fahrzeugsimulation aufgrund der fehlenden Möglichkeit der Drehmomentbildung in Schubsituationen nicht geeignet ist. Das bedeutet, dass die E-Maschine die Bremse simuliert und das EV-CEA-Konzept am Prüfstand „Engine-in-the-loop“ vermessen werden kann. Die Wirbelstrombremse dreht leer mit, wobei das Trägheitsmoment der Bremse mathematisch kompensiert wird.

Zu einem späteren Zeitpunkt soll die Wirbelstrombremse durch eine Asynchronmaschine ersetzt werden. Dann können Verbrennungs- und Elektromotor als reale Komponenten „in the loop“ vermessen werden.

4.3 Ermittlung der notwendigen Daten zur Drehschwingungsuntersuchung

Um Schäden durch Schwingungsvorgänge am Prüfstand zu vermeiden, wurde vorab eine Berechnung der kritischen Eigenfrequenzen des Prüfstandaufbaus durchgeführt (siehe Kapitel 3.10). Zur Berechnung müssen Trägheiten, Federsteifigkeiten und Dämpfungskonstanten der einzelnen EV-CEA-Komponenten bekannt sein, deren Ermittlung im Folgenden beschrieben wird (Abbildung 4.15).

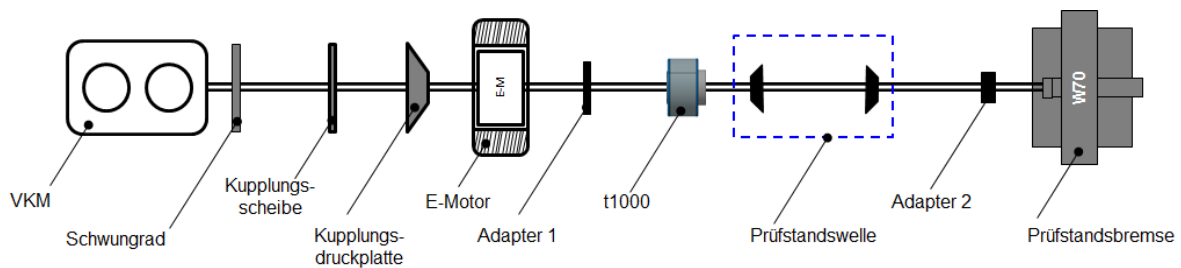


Abbildung 4.15: Die Komponenten des EV-CEA-Prüfstandsaufbaus

Die Massenträgheit des Schwungrades konnte mit Hilfe der CAD-Software berechnet werden. Die Massenträgheiten und Federsteifigkeiten von Kupplung und Druckplatte wurden von der Fa. LuK zur Verfügung gestellt (Abbildung 4.16).



Abbildung 4.16: Massenträgheit und Federsteifigkeit von Kupplungseinheit und Schwungrad

Auch die Massenträgheit des Elektromotor-Läufers wurde mittels CAD-Software ermittelt (Abbildung 4.17).

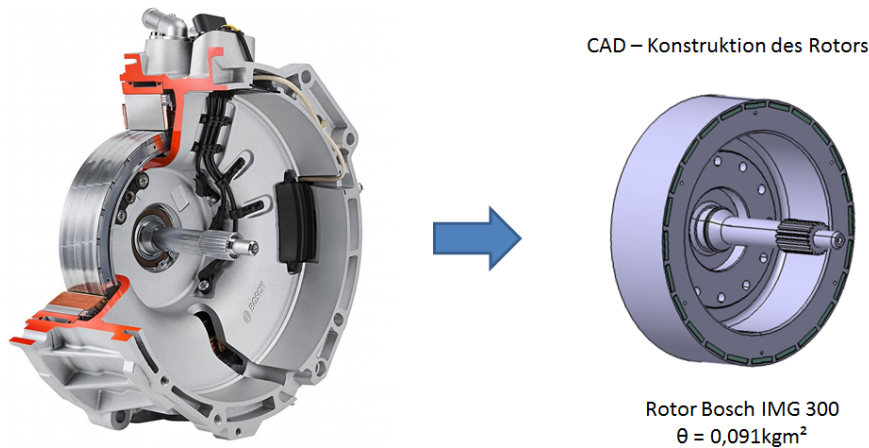


Abbildung 4.17: Massenträgheit des Elektromotor-Läufers

Zur Erhebung der Massenträgheit der Verbrennungskraftmaschine wurden von der Fa. Weber die auf die Kurbelwelle reduzierten Massenträgheitsmomente der einzelnen Motor-komponenten zur Verfügung gestellt. In Abbildung 4.18 sind die prozentualen Anteile der Einzelkomponenten dargestellt. Die Kurbelwelle trägt wie zu erwarten mit über 60% den größten Trägheitsanteil. Alle weiteren Komponenten machen im Einzelnen jeweils weniger als 10 % Anteil aus. Eine Berücksichtigung der Öl- und Wasserpumpenanteile ist rein praktisch nicht relevant. Der Einfluss der oszillierenden Massenkräfte (Kolben und osz. Pleuelanteil) verändert sich abhängig vom Kurbelwinkel. In der Grafik ist der Mittelwert des Massenträgheitmomentes als Näherung angegeben.

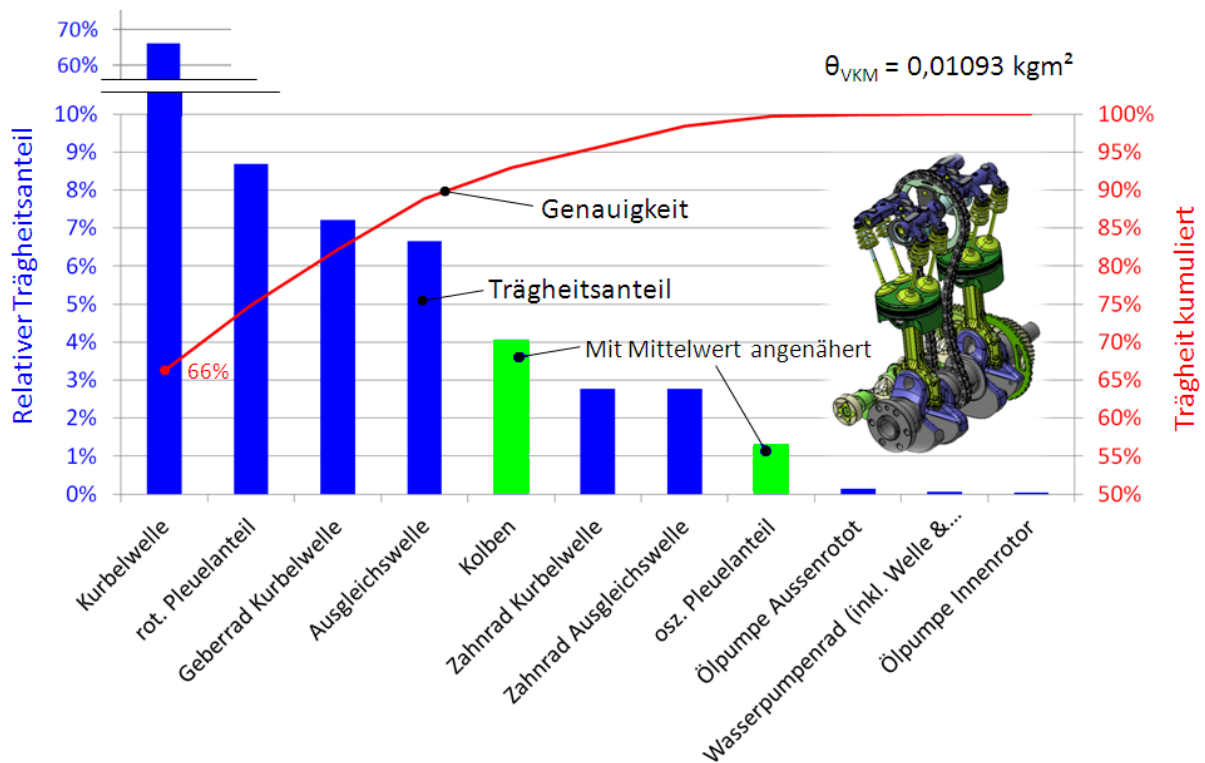


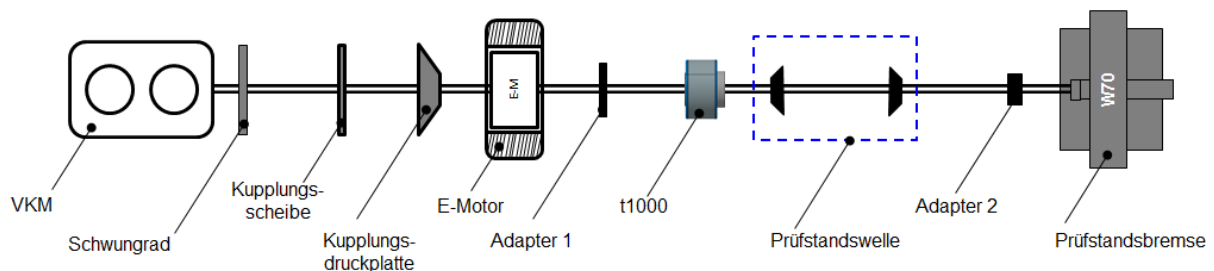
Abbildung 4.18: Massenträgheit des Elektromotor-Läufers

In Summe beträgt das Massenträgheitsmoment des Verbrennungsmotors ohne Schwungrad $0,0109\text{kgm}^2$. Die Kurbelwelle kann aufgrund ihrer massiven Ausführung als steif angenommen werden.

Die von der Fa. tectos zur Verfügung gestellte Prüfstandswelle t1000-800-2 wurde mit Elastomerelementen bestückt, welche eine Federsteifigkeit von $c = 3320\text{Nm/rad}$ aufweisen. Das Massenträgheitsmoment beträgt $\Theta = 0,0092\text{kgm}^2$. Die Dämpfungskonstante wird mit $d = 0,7\text{Nm/(rad/s)}$ angegeben. Zur beidseitigen Anbindung wurden zwei Adapter mit den Massenträgheiten $0,009\text{kgm}^2$ und $0,012\text{kgm}^2$ gefertigt.

Die Massenträgheit der Wirbelstrombremse wird mit $0,035\text{kgm}^2$ angegeben.

In Abbildung 4.19 sind die Massenträgheiten, Steifigkeiten und Dämpfungskonstanten des gesamten Prüfstandsbaus zusammengefasst dargestellt. Die Dämpfungskonstante der Kupplungsscheibe war nicht bekannt und wurde daher mit einem Mittelwert aus der Literatur abgeschätzt.



	Θ [kgm^2]	c [Nm/rad]	d [Nm/(rad/s)]
VKM	0,01093	--	--
Schwungrad	0,102	--	--
Kupplungsscheibe	0,04	Basisversion: 1.375 directE: steif	10-15*
Kupplungsdruckplatte	0,06	--	--
E-Motor	0,091	16.760	--
Adapter 1	0,009	--	--
tectos t1000	0,0092	3.320	0,7
Prüfstandswelle	0,0083	44.300	--
Adapter 2	0,012	--	--
Prüfstandsbremse	0,035	--	--

*Ermittelter, nicht verifizierter Wert aus ersten Untersuchungen

Abbildung 4.19: Massenträgheiten, Steifigkeiten und Dämpfungskonstanten des Prüfstandsbaus

4.4 Überprüfung der Trägheitsmomente mittels Auslaufversuch

Die Plausibilität der ermittelten Massenträgheiten wurde anhand von Auslaufversuchen an zwei Messaufbauten (Abbildung 4.20) verifiziert.

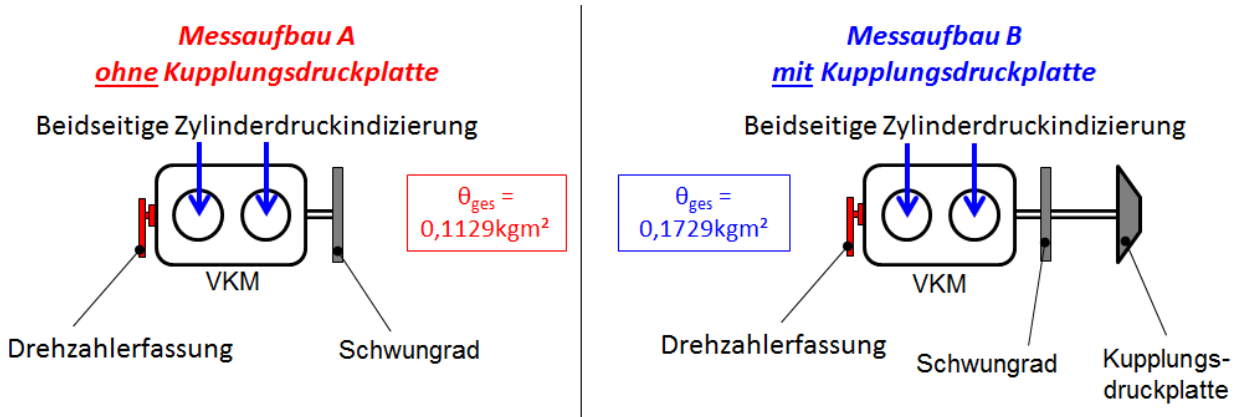


Abbildung 4.20: Prüfstands Aufbau für Auslaufversuch

Dieses Verfahren basiert auf einer Gegenüberstellung des Reibmitteldrucks, welcher auf zwei verschiedene Varianten ermittelt wird.

Im ersten Schritt erfolgt die direkte Bestimmung der Reibung aus der Zylinderdruckindizierung im Rahmen einer stationären Vermessung der Verbrennungskraftmaschine bei verschiedenen Drehzahlen (Abbildung 4.21).

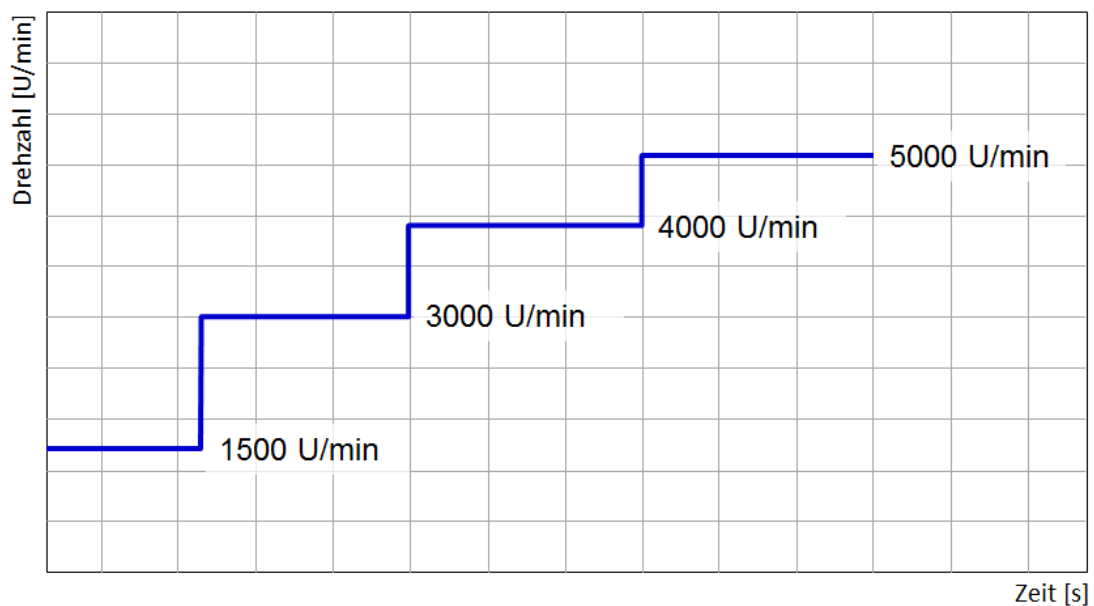


Abbildung 4.21: Ermittlung des Reibmitteldrucks aus Stationärmessungen

Die Berechnung erfolgt nach Gleichung 4.1 welche zeigt, dass sich der indizierte Mittel-
druck aus dem Reibmitteldruck und dem effektiven Mitteldruck zusammensetzt (siehe
auch [68]).

$$p_{mi} = p_{me} + p_{mr} \quad (4.1)$$

Da bei konstanter Drehzahl und offenem Wellenende der effektive Mitteldruck null ist, ist
der gemessene, indizierte Mitteldruck dem Reibmitteldruck (Gleichung 4.2) gleichzusetzen.
Oder über das Drehmoment ausgedrückt: Das indizierte Drehmoment aus der Verbrennung
wird rein zur Überwindung des Reibmomentes aufgewandt.

$$p_{mi} = p_{mr} + p_{mSchlepp} \quad (4.2)$$

Im zweiten Schritt erfolgt die Ermittlung des Reibmitteldrucks auf Basis des Auslaufver-
suchs. Beim diesem wird der Verbrennungsmotor gefeuert auf Maximaldrehzahl beschleu-
nigt und anschließend die Einspritzung abgeschaltet (Abbildung 4.22). Zur Auswertung
muss neben der exakten Erfassung der Drehzahl eine Druckindizierung an beiden Zylind-
dern erfolgen.

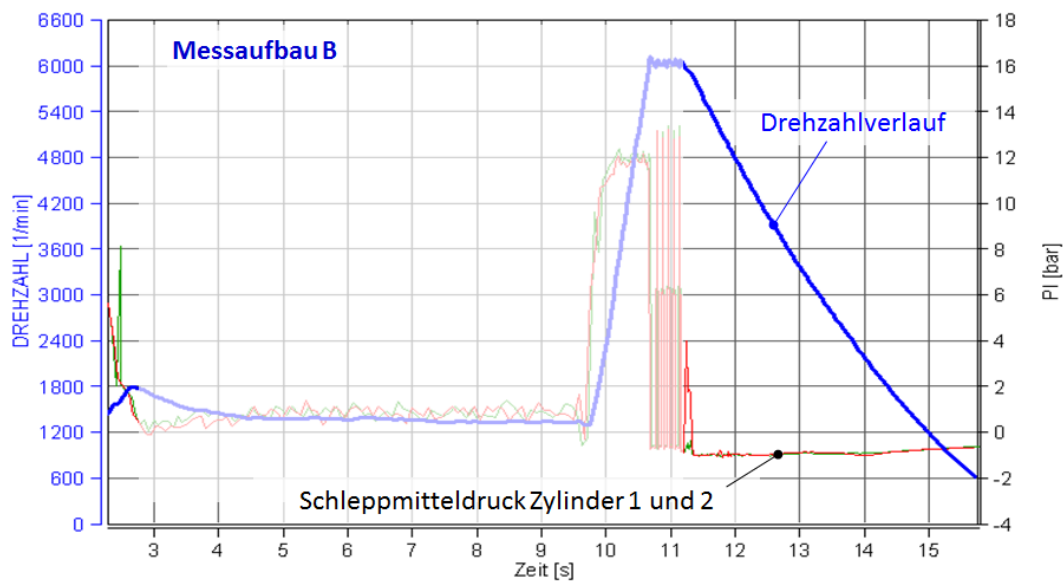


Abbildung 4.22: Drehzahlverlauf und Schleppmitteldruck bei Auslaufversuch

Der Drehzahlabfall wird aus den Schleppverlusten, welche sich aus Kompressions-,
Ladungswechsel- und Reibverlusten zusammensetzen, verursacht (Gleichung 4.3).

$$p_{schlepp} = p_{mV-HD} + p_{mV-LW} + p_{mr} \quad (4.3)$$

Die Steigung wird zusätzlich durch die Massenträgheit des Gesamtsystems beeinflusst. In
Abbildung 4.23 ist dies anhand einer Gegenüberstellung der Ausläufe beider Messaufbauten
dargestellt. Wie zu erwarten ist der Drehzahlanstieg und -abfall der Verbrennungskraftma-
schine ohne Kupplungsdruckplatte deutlich schneller.

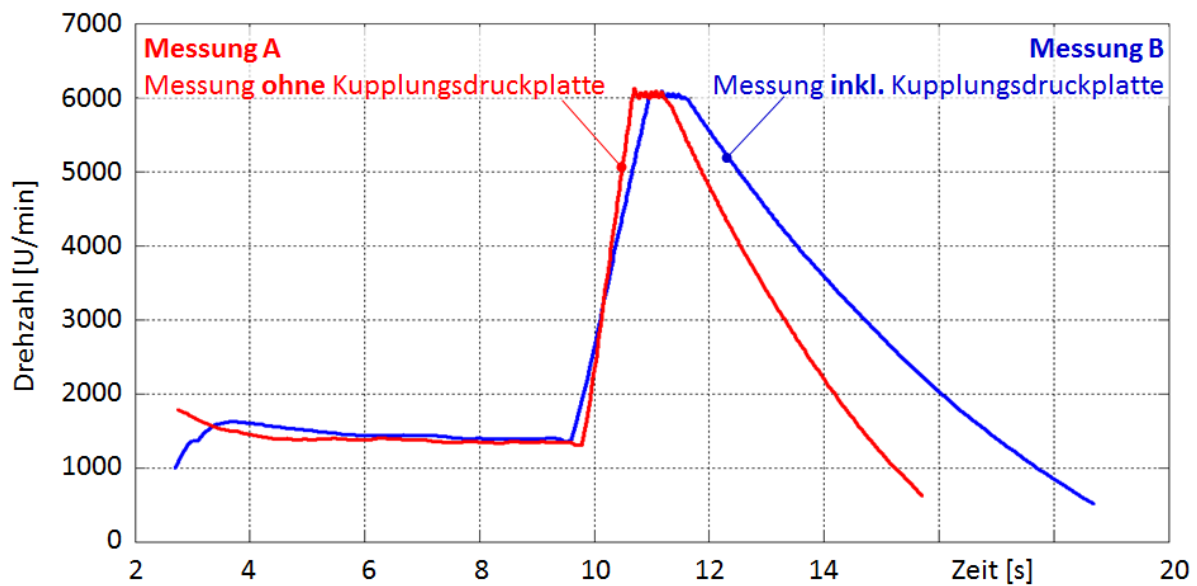


Abbildung 4.23: Auslaufversuch mit und ohne Kupplungsdruckplatte

Der Schleppmitteldruck kann also auch direkt aus dem Drehzahlabfall und den angenommenen Massenträgheiten des Gesamtsystems ermittelt werden (Gleichung 4.4).

$$p_{\text{mschlepp}} = \frac{\Theta * \ddot{\phi}}{V_H * 4 * \pi} \quad (4.4)$$

Durch die Zylinderdruckindizierung während des Auslaufversuches kann eine Quantifizierung der Kompressions- und Expansionsverluste aus der Hochdruckphase (HD-Phase) und die Ladungswechselverluste erfolgen und so die Unbekannten p_{mV-HD} und p_{mV-LW} aus Gleichung 4.3 ermittelt werden.

Berechnet man den Schleppmitteldruck aus dem Drehzahlabfall 4.4 und setzt in Gleichung 4.3 die ermittelten Verluste aus der Indizierung ein, kann eine Bestimmung des Reibmitteldrucks aus dem Auslaufversuch erfolgen (Gleichung 4.5).

$$p_{\text{mr}} = \frac{\Theta * \ddot{\phi}}{V_H * 4 * \pi} - (p_{mV-HD} + p_{mV-LW}) \quad (4.5)$$

Schließlich muss bei einer richtigen Annahme der Massenträgheiten der errechnete Reibmitteldruck aus dem Auslaufversuch mit dem gemessenen Reibmitteldruck aus der Stationärmessung übereinstimmen. Für die beiden in Abbildung 4.20 angeführten Messaufbauten ist das Ergebnis in Abbildung 4.24 dargestellt. Die Plausibilität der ermittelten Trägheitsmomente ist für beide Fälle gegeben.

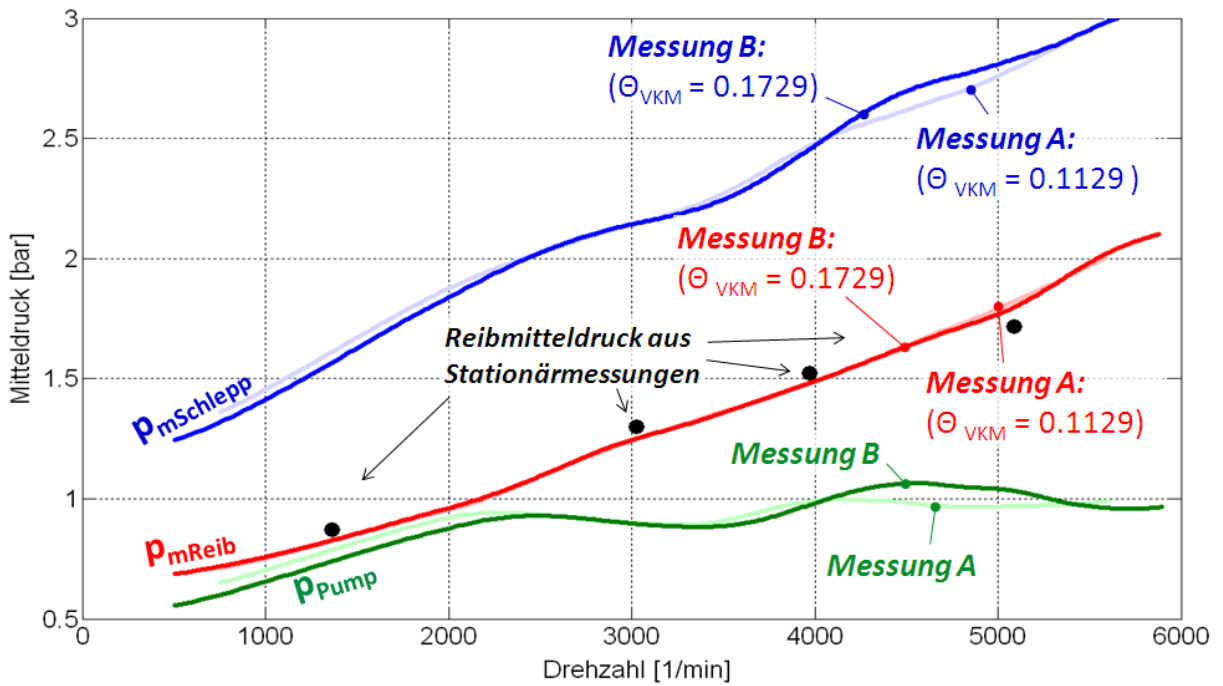


Abbildung 4.24: Gegenüberstellung des Reibmitteldrucks aus direkter Messung und Auslaufversuch

Kapitel 5

Funktionsuntersuchung des EV-CEA-Konzeptes (Proof of concept)

Zur Verifikation der Simulationsergebnisse und zur Erbringung des EV-CEA-Funktionsnachweises wurde das Konzept am Prüfstand untersucht.

Im ersten Schritt wurden dazu die in der Simulation ermittelten Prüfstandeigenfrequenzen verifiziert. Danach erfolgt eine Gegenüberstellung und Bewertung unterschiedlicher VKM-Zuschaltstrategien hinsichtlich Aufwand und Komfort. Unter Bezugnahme der eingesetzten EV-CEA-Basisbetriebsstrategie wird das Konzept im Anschluss in punkto Reichweite mit elektrischer Verfügbarkeit und bezüglich Zertifizierung bewertet. Des Weiteren wird die zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte wichtige Katalysatortemperatur im Zyklus untersucht.

Der zweite Abschnitt konzentriert sich auf die Eigenschaften des Elektromotors und geht auf die Schleppverluste durch die Permanentenerregung und die Verluste durch die pulsierende Beaufschlagung ein.

Mit einer Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile des eingesetzten 2-Zylinder Verbrennungsmotors im Vergleich zu einem 3-Zylinder Verbrennungsmotor befasst sich der dritte Teil dieses Kapitels. Dazu werden beide Motoren hinsichtlich ihrer Drehschwingungen und Abmessungen bewertet.

5.1 Eigenfrequenzen EV-CEA-Basisaufbau

Durch die in Kapitel 3.10 durchgeführte Drehschwingungsrechnung konnten zwei Eigenfrequenzen des Prüfstandaufbaus ermittelt werden. Die erste Eigenfrequenz, welche aus der drehweichen Verbindung von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor resultiert liegt durch das Anregungsspektrum des eingesetzten 2-Zylinder Verbrennungsmotors bei etwa 1000 U/min. Die zweite Eigenfrequenz liegt bei rund 3000 U/min und resultiert aus der Federsteifigkeit der eingesetzten tectos-Prüfstandswelle. Zur Verifikation des Simulationsergebnisses wurde das System am Prüfstand vermessen und der Schwingwinkel von Verbrennungsmotor, Elektromotor und Bremse über der Drehzahl aufgezeichnet (siehe Abbildung 5.1).

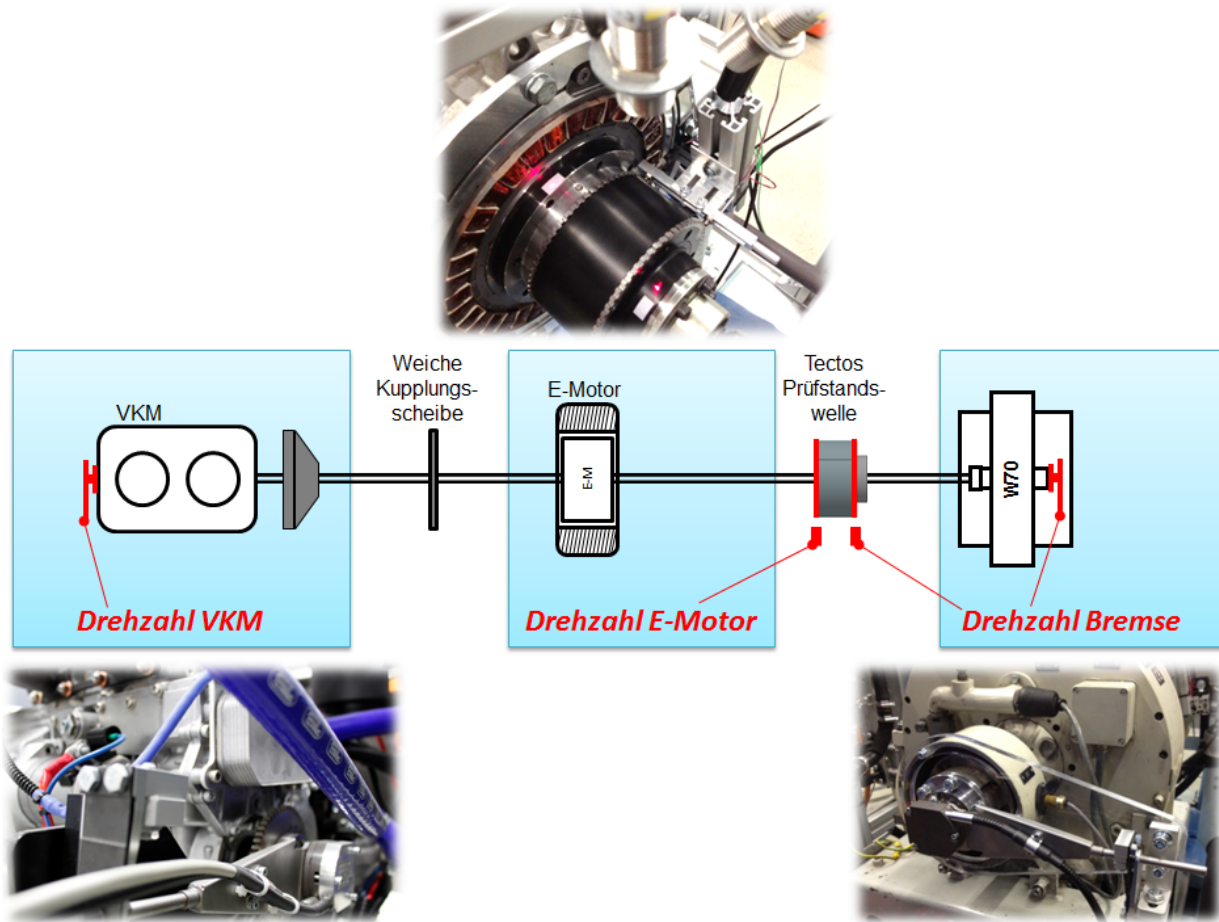


Abbildung 5.1: Schwingwinkel am Elektromotorausgang über der Drehzahl

Dazu wurde ausgehend vom sicheren Betriebspunkt bei 2000 U/min die Drehzahl bei zuerst minimaler Last der Verbrennungskraftmaschine nach oben und unten verändert (Abbildung 5.2). Danach wurde die Last erhöht und die Messung wiederholt.

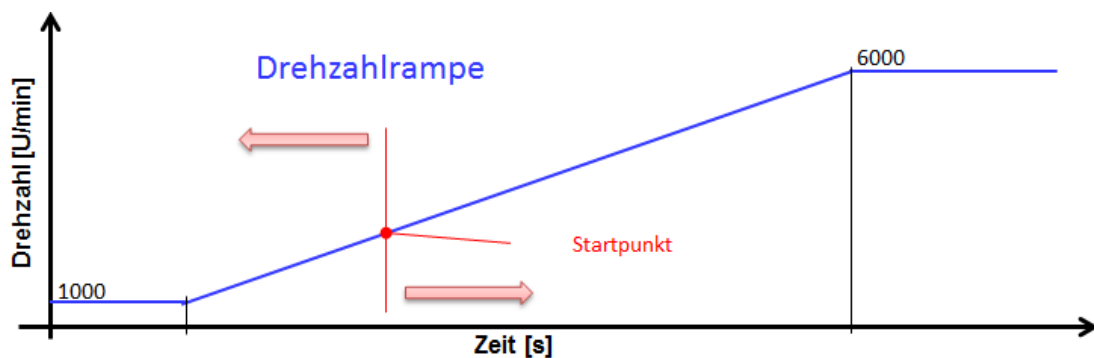


Abbildung 5.2: Messverfahren Eigenfrequenzmessung

In Abbildung 5.3 sind die Messergebnisse unter Vollast dargestellt. In Richtung der ersten Eigenfrequenz (1000 U/min) zeigen die Schwingungsamplituden an allen drei Messstellen (Verbrennungskraftmaschine, Elektromotor und Bremse) eine deutliche Überhöhung. Auch der maximale Differenzwinkel zwischen VKM und Elektromotor zeigt in diesem Bereich

einen deutlichen Anstieg. Ein längerer Betrieb im Bereich unter 1500 U/min ist mit der aktuellen Konfiguration daher nicht zu empfehlen.

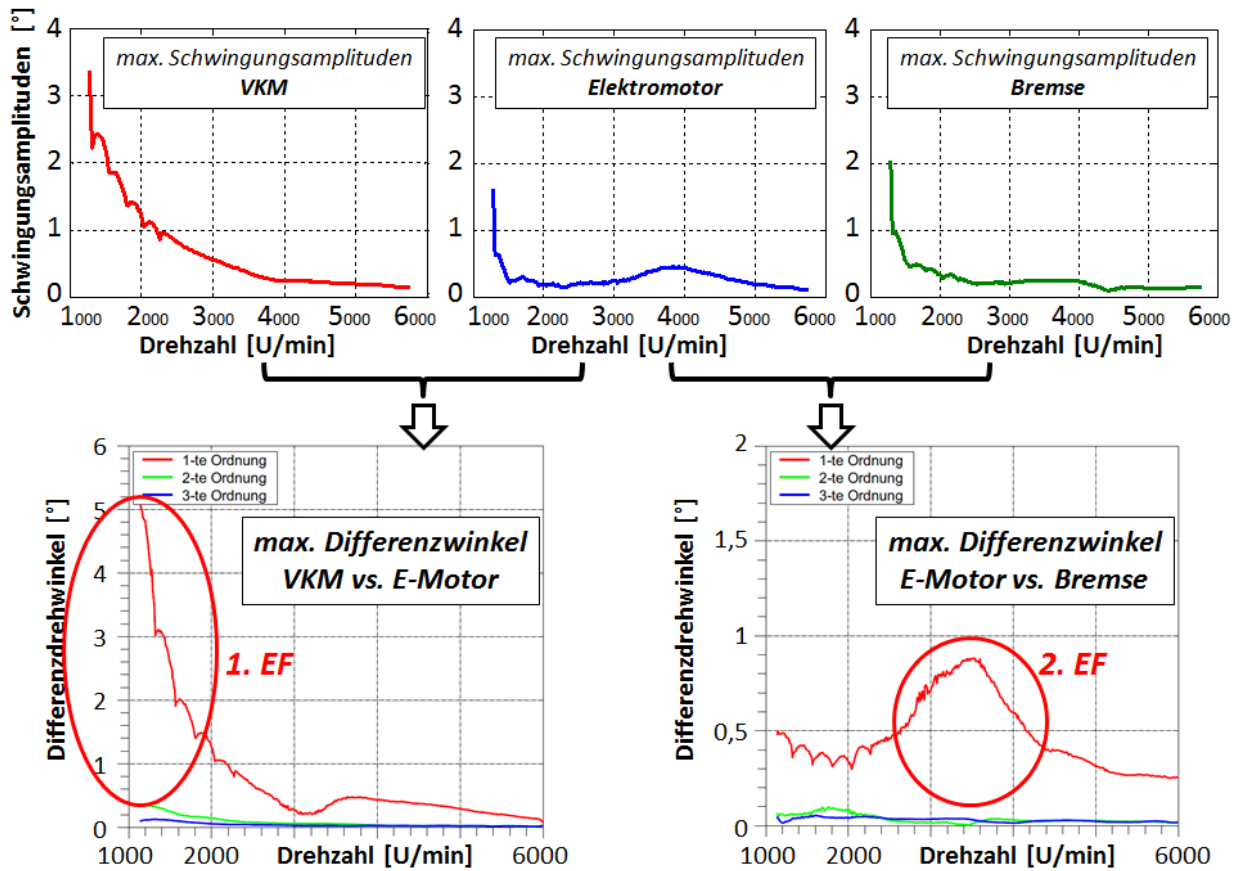
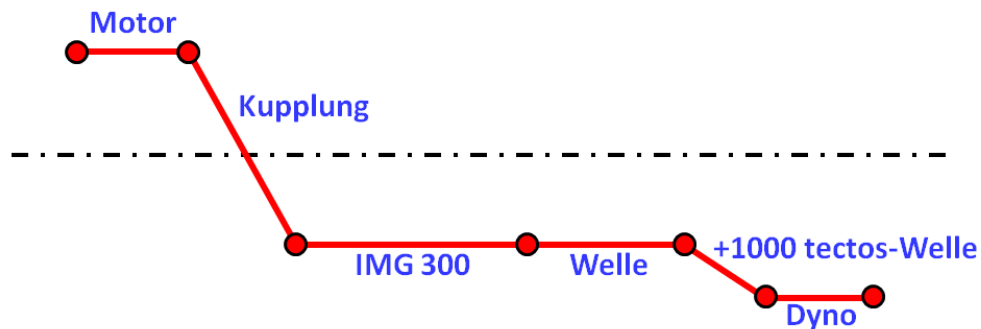


Abbildung 5.3: Schwingwinkel über der Drehzahl

Die zweite Eigenfrequenz ist nach den Berechnungen aus Kapitel 3.10 ab einer Drehzahl von etwa 3000 U/min zu erwarten. Auch in diesem Bereich zeigt die Schwingungsamplitude des Elektromotors eine Erhöhung. Eine Erhöhung ist auch deutlich am Differenzwinkel zwischen Elektromotor und Prüfstandsbremse erkennbar. Im Gegensatz zur ersten Eigenfrequenz ist diese jedoch aufgrund der starken, nichtlinearen Dämpfung der tectos-Prüfstandswelle als unkritisch einzustufen. Ein Betrieb in diesem Bereich ist daher eher unproblematisch.

Untersuchungen der Fa. tectos hinsichtlich der Eigenformen der ersten und zweiten Eigenfrequenz bestätigen die Messergebnisse (Abbildung 5.4).

1. Eigenfrequenz:



2. Eigenfrequenz:

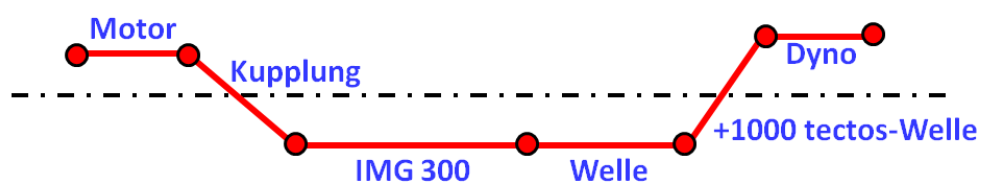


Abbildung 5.4: Eigenformen der ersten und zweiten Eigenfrequenz

Bei der ersten Eigenfrequenz schwingt der Verbrennungsmotor in der Kupplung gegen den Rest des Prüfstandes. In der zweiten Eigenfrequenz schwingt der Elektromotor zwischen Kupplung und t1000-tectos-Prüfstandswelle. Diese Eigenfrequenz ist daher abhängig von:

- Steifigkeit der Kupplung
- Gesamtmasse zwischen Kupplung und t1000-Prüfstandswelle
- Steifigkeit t1000-Prüfstandswelle

5.2 Analyse der VKM-Zuschaltvarianten

Ein wichtiges Kriterium hinsichtlich der Kundenakzeptanz des EV-CEA-Konzeptes stellt ein komfortabler Start und Einkuppelvorgang der Verbrennungskraftmaschine dar. Bei aktuellen Hybridfahrzeugkonzepten wird die Verbrennungskraftmaschine in vielen Fällen über den Elektromotor angeschleppt. Um dies ohne merkbare Drehmomentschwankungen an den Antriebsrädern umsetzen zu können, wurden enorme Entwicklungsleistungen in komplexe Kupplungsstrategien investiert. Dies wird insbesondere dann deutlich, wenn man die aktuellen Entwicklungen bei Porsche oder Mercedes betrachtet, wo durch ein komplexes und aufwendiges Zusammenspiel von Kupplung und Elektromotor ein ruckfreier Start der Verbrennungskraftmaschine realisiert wird (siehe z.B. [16]).

Beim CEA-Konzept soll der Kuppelvorgang im Sinne von „Intelligent Simplicity“ durch Einsatz eines gewöhnlichen Starters umgesetzt und so eine komplexe kostenintensive Regelung vermieden werden. Zur Bewertung dieses Startvorgangs wurden die folgenden drei

Start- und Koppelungsstrategien gemeinsam mit der Fa. tectos am Prüfstand untersucht und hinsichtlich der Drehmomentschwankung am Elektromotorausgang analysiert:

1. VKM-Start durch spontanes Schließen der Kupplung am laufenden Elektromotor
2. VKM-Start mit geschlossener Kupplung über Elektromotor (Hochschleppen)
3. VKM-Start über konventionellen Motorstarter und Schließen der Kupplung bei Synchrodrehzahl

Zur Bewertung der Startvorgänge werden die Schwingungsamplituden von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor herangezogen, da diese über die jeweiligen Federsteifigkeiten direkt proportional als Drehmomentschwankungen zu bewerten sind. Für eine komfortable Koppelung des Verbrennungsmotors sind insbesondere die Schwingungsamplituden am Elektromotorausgang verantwortlich. Hohe Amplituden würden hier zu einem merkbareren Rucken des Fahrzeuges führen.

VKM-Start durch spontanes Schließen der Kupplung am laufenden Elektromotor

Wird der Verbrennungsmotor durch spontanes Schließen der Kupplung während der elektrischen Fahrt hochgeschleppt (Impulsstart), muss mit deutlichen Schwingungen an der Elektromotor-Abtriebseite gerechnet werden (Abbildung 5.5). Das Ergebnis zeigt wie zu erwarten deutliche Schwingungsamplituden an der Elektromotor-Rotorwelle.

Werden diese Schwingungen an den Triebstrang übertragen, muss mit NVH-Nachteilen gerechnet werden.

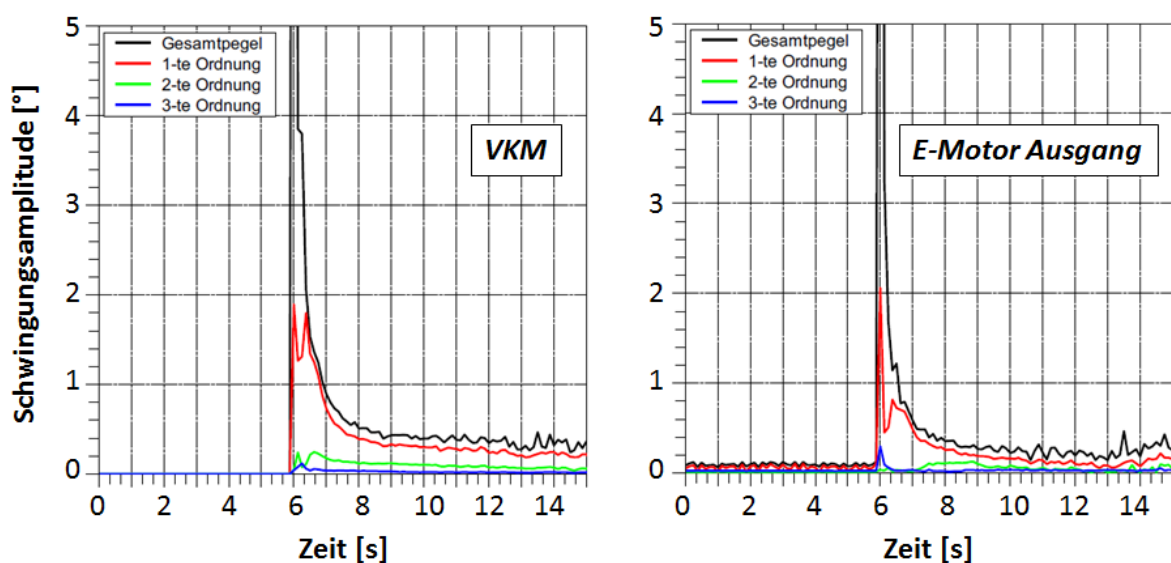


Abbildung 5.5: Zukuppeln des Motors an den laufenden Elektromotor

Eine Lösung dieser Problematik ist zwar durch eine aufwendige Schwingungskoppelung nach dem Elektromotor oder durch aufwendige Regelungsalgorithmen denkbar, entspricht aber nicht dem Grundsatz der intelligenten Vereinfachung, welcher an der Entwicklung des EV-CEA-Konzeptes einen entscheidenden Schwerpunkt darstellt.

VKM-Start mit geschlossener Kupplung über den Elektromotor

Im zweiten Versuch wurde der 2-Zylinder-Verbrennungsmotor bei geschlossener Kupplung durch den IMG 300 hochgeschleppt. Da innerhalb dieses Zeitraums der Elektromotor vom restlichen Triebstrang getrennt sein muss, kann diese Variante nur mit Hilfe einer zweiten Kupplung zwischen Elektromotor und Getriebe realisiert werden (Abbildung 5.6).

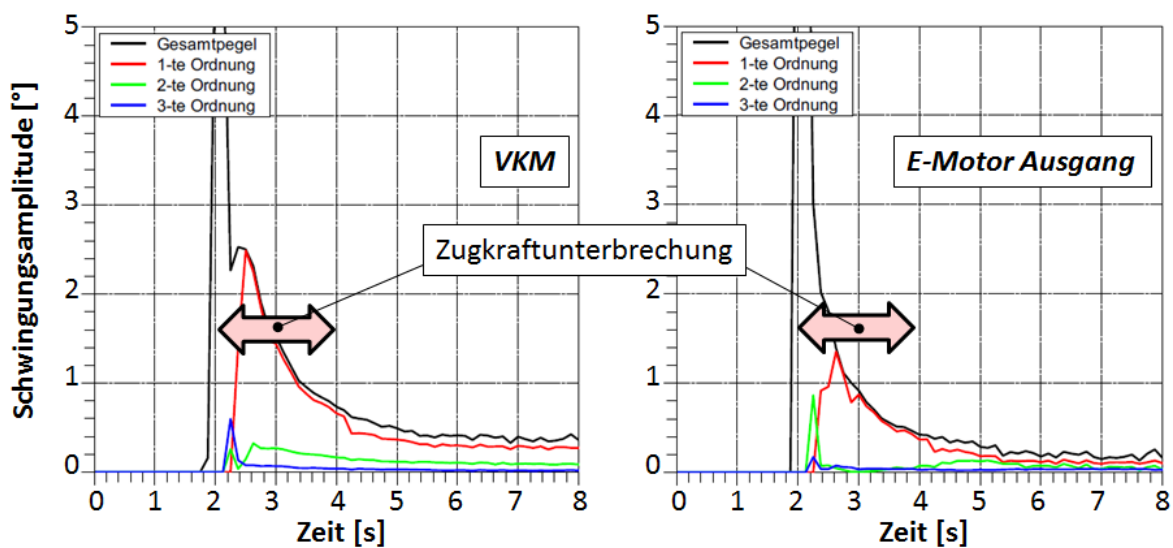


Abbildung 5.6: VKM-Start mit geschlossener Kupplung über IMG 300 (Hochschleppen)

In Abbildung 5.6 ist wiederum das Schwingverhalten in Frequenz und Amplitude dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass während des Startvorganges bis zum Erreichen der Leerlaufdrehzahl für einen Zeitraum von etwa zwei Sekunden, sowohl am vorderen Kurbelwellenende als auch am Elektromotorausgang deutliche Schwingungsamplituden vorhanden sind. Innerhalb dieses Zeitraumes kann keine Antriebsleistung an die Räder abgegeben werden.

Start der VKM über konventionellen Motorstarter und Schließen der Kupplung bei Synchrondrehzahl

In der dritten Variante wird die Verbrennungskraftmaschine über einen konventionellen Starter gestartet und auf die momentane Drehzahl des Elektromotors hochgeregelt. Ist die momentane Elektromotordrehzahl erreicht, wird die Kupplung geschlossen. Wie Abbildung 5.7 zeigt, kann durch diese Variante eine ruckfreie Koppelung von Verbrennungs-

kraftmaschine und Elektromotor realisiert werden. Wie am Ergebnis ersichtlich, sind am Elektromotor-Ausgang keine wesentlichen Drehmomentschwankungen erkennbar.

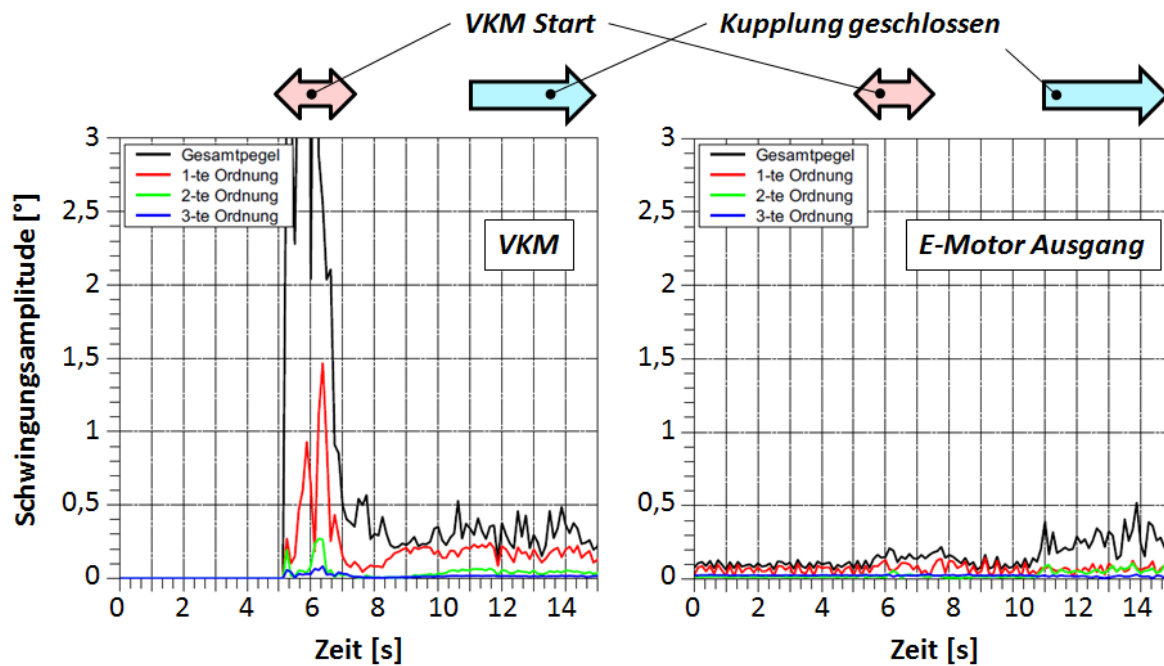


Abbildung 5.7: Einkuppeln der VKM bei Synchrondrehzahl

Das Zuschalten der Verbrennungskraftmaschine bei Synchrondrehzahl stellt für das EV-CEA-Konzept in dieser Untersuchung demnach den günstigsten Fall dar. Aber auch diese Variante ist mit nachteiligen Aspekten behaftet. So ist hier, gegenüber den beiden anderen Varianten, ein zusätzlicher Starter notwendig. Aber auch generell ist der Start des Verbrennungsmotors mittels Starter, insbesondere bei häufigen Zuschaltvorgängen, als nicht komfortabel anzusehen. Als Weiterentwicklungsmaßnahmen sind an dieser Stelle der Einsatz eines Riemenstartergenerators für einen schnelleren Startvorgang, oder die Anwendung eines Direktstarts bei Verwendung von direkteinspritzenden Ottomotoren denkbar.

5.3 Untersuchung der EV-CEA-Betriebsstrategie

In diesem Kapitel wird die in Kapitel 3.4 definierte Basis-Betriebsstrategie einer sequentiellen Betriebsstrategie gegenübergestellt. Bei der sequentiellen Betriebsstrategie erfolgt im Gegensatz zur EV-CEA-Basisstrategie ein rein elektrischer Betrieb bis zum Erreichen des minimalen Batterie-Ladezustandes. Erst danach wird der Verbrennungsmotor eingeschaltet. Die Bewertung der Betriebsstrategie wird auf Basis eines Vergleiches der „Reichweite mit elektrischer Verfügbarkeit“ und hinsichtlich der Zertifizierungsergebnisse durchgeführt. Der erste Vergleich zeigt, welche Betriebsstrategie den maximalen Kundennutzen repräsentiert. Der zweite liefert Informationen darüber, mit welcher Betriebsstrategie der maximale Zertifizierungsnutzen erreicht wird. Bei der sequentiellen Betriebsstrategie ist dies jene Reichweite, die durch den rein elektrischen Betrieb bis zum erstmaligen Start der Verbrennungskraftmaschine erreicht wird.

Abschließend wird das Aufwärm- und Abkühlverhalten des Katalysators bei Anwendung der EV-CEA-Betriebsstrategie im NEDC-Testzyklus untersucht.

5.3.1 Reichweite mit elektrischer Verfügbarkeit

Um den Vorteil dieser Betriebsstrategie gegenüber einem sequentiellen Betrieb bewerten zu können, wurde eine Reichweitensimulation im NEDC durchgeführt (Abbildung 5.8).

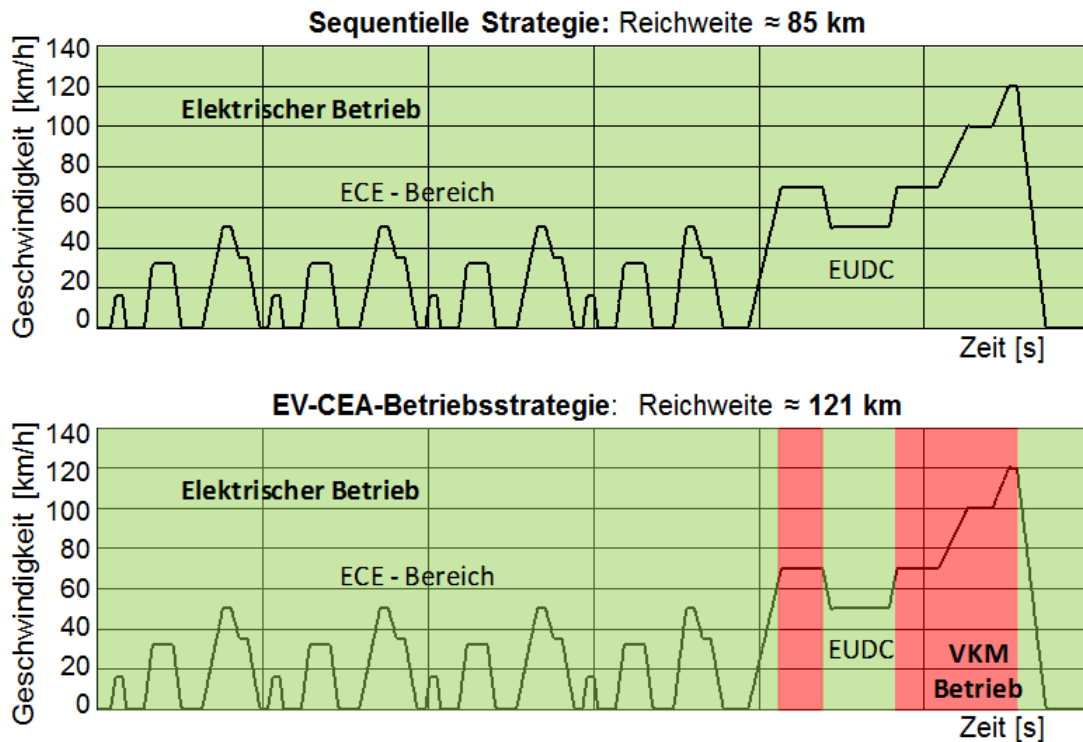


Abbildung 5.8: Vergleich sequentielle vs. EV-CEA-Basis-Betriebsstrategie [10]

Dabei ist als Reichweite mit elektrischer Verfügbarkeit jene Reichweite definiert, die mit einer vollen Batterieladung erreicht wird, solange elektrische Energie zur Aufrechterhaltung der Betriebsstrategie vorhanden ist. Kann die Betriebsstrategie aufgrund fehlender elektrischer Energie nicht mehr angewendet werden, ist die maximale Reichweite erreicht.

Wie in Abbildung 5.8 ersichtlich, kann durch die EV-CEA-Basisstrategie die Reichweite mit elektrischer Verfügbarkeit von 85 auf 121 km gesteigert werden. Das bedeutet, dass der Anteil der lokal emissionsfreien elektrischen Fahrten durch die EV-CEA-Basisstrategie und auch der Kundennutzen entscheidend zunehmen.

5.3.2 Zertifizierungsergebnisse des EV-CEA-Konzeptes

An der Technischen Universität Darmstadt wurde das EV-CEA-Konzept auf Basis der in Kap 1.5 beschriebenen Zertifizierungsverfahren untersucht (siehe auch [9]). Die beiden Zertifizierungsvarianten entsprechen einmal der sequentiellen Betriebsstrategie (De) und einmal der EV-CEA-Basisstrategie (OVC) (Abbildung 5.9).

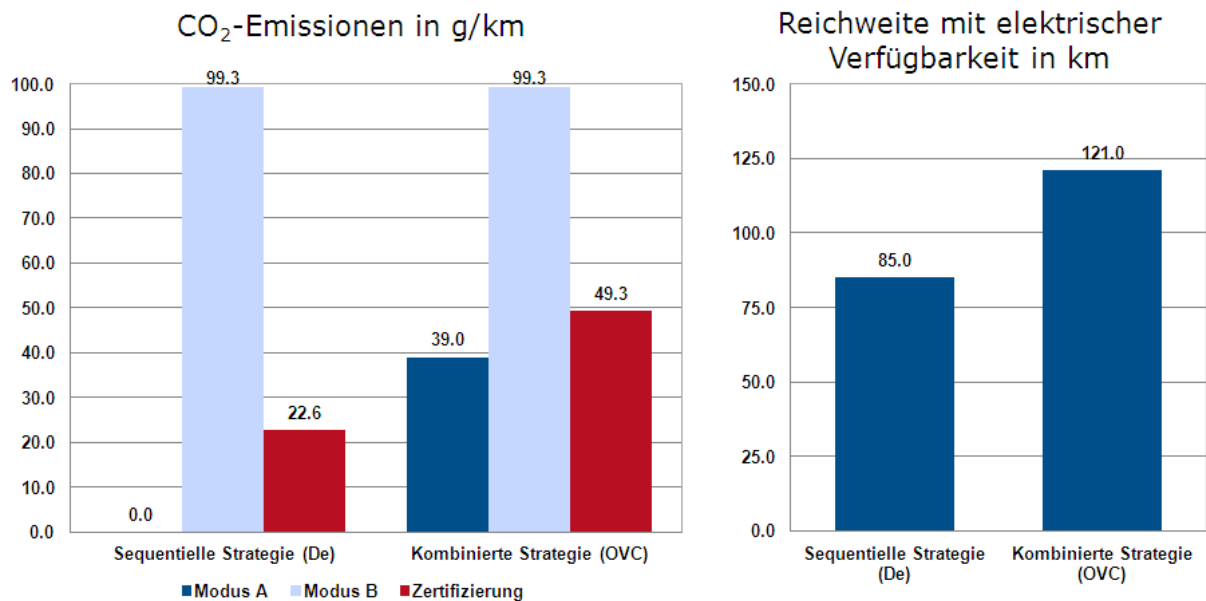


Abbildung 5.9: Zertifizierungsergebnisse EV-CEA-Konzept [10]

Das Ergebnis spiegelt die bereits in Kapitel 1.1 angesprochene starke Förderung von Fahrzeugen mit hoher rein elektrischer Reichweite seitens des Gesetzgebers wider.

Der Zertifizierungsverbrauch bei der sequentiellen Strategie (De) mit der eine elektrische Reichweite von 85 km erzielt wird, beträgt rund 1 l, was einem zertifizierten CO₂-Ausstoß von 22,6 g/km entspricht. Bei der EV-CEA-Strategie erreicht man trotz der höheren Reichweite von 121 km einen Zertifizierungswert von rund 2,2 l, was umgerechnet einem zertifizierten CO₂-Ausstoß von 49,3 g/km entspricht.

Dieser Vergleich führt zu der äußerst interessanten Erkenntnis, dass es hier eine Diskrepanz zwischen der kundenoptimalen und der zertifizierungsoptimalen Betriebsstrategie gibt [10]. Während mit der sequentiellen Betriebsstrategie die besseren Zertifizierungsergebnisse erreicht werden, resultiert aus der EV-CEA-Strategie ein maximaler Kundennutzen, da die für den Kunden nutzbare Reichweite mit elektrischer Verfügbarkeit ansteigt.

Dieses Ergebnis zeigt, dass der momentane Zertifizierungsvorgang aus dem Gesichtspunkt des Kunden nicht einer optimalen Lösung entspricht und in Zukunft diskutiert werden muss. Das in Kapitel 2.2 definierte Ziel von weniger als 50 g/km an CO₂-Emissionen kann jedoch in beiden Fällen erreicht werden.

Eine optimierte Betriebsstrategie berücksichtigt wesentlich mehr Informationen und ist

daher auch wesentlich komplexer als die hier zu Grunde gelegte Basis-Betriebsstrategie. Insbesondere durch die Anwendung von prädiktiven Verfahren, welche eine vorausschauende Fahrleistungsanforderung durchführen, erschließt sich erhebliches Potenzial zur Verbrauchs- und Emissionsminderung. Leider sind diese Betriebsstrategien momentan durch die gesetzlichen Randbedingungen nicht umsetzbar. Auch hier muss in Zukunft über eine Lösung diskutiert werden.

5.3.3 Katalysatortemperatur und Emissionen im Testzyklus

Die Elektrifizierung des Antriebstrangs hat entscheidende Auswirkungen auf den Betrieb der Verbrennungskraftmaschine, da durch die Hybridstrategie ein unregelmäßiger Einsatz des Verbrennungsmotors resultiert. Wird die Katalysatortemperatur beim Startvorgang nicht berücksichtigt, kann es unter negativen Umständen zu einem erhöhten Ausstoß an unverbrannten Rohemissionen gegenüber einem konventionellen VKM-Betrieb kommen. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn ein Zuschalten der Verbrennungskraftmaschine immer dann erfolgt, wenn die Katalysatortemperatur bereits wieder unterhalb die Light-Off-Temperatur gefallen ist.

Auch die Art der Zuschaltung hat einen entscheidenden Einfluss auf den Emissionsausstoß. Wird die VKM gleich nach dem Start im kalten Zustand stark belastet, kann dies, neben einer Beschädigung der Verbrennungskraftmaschine, zu einem wesentlich höheren Ausstoß an Rohemissionen führen.

Um das Emissionsverhalten des Hybridkonzeptes im NEDC-Testzyklus mit der aktuellen Basis-Betriebsstrategie bewerten zu können, wurde das EV-CEA-Konzept an der TU Darmstadt im NEDC-Testzyklus vermessen und Emissionen und Katalysatortemperatur aufgezeichnet (Abbildung 5.10 und 5.11).

Bei der angewandten EV-CEA-Betriebsstrategie wird die Verbrennungskraftmaschine bei 65 km/h gestartet und auf die Drehzahl des Elektromotors gebracht. Danach wird die Kupplung geschlossen und die Antriebsleistung von der Verbrennungskraftmaschine aufgebracht (siehe auch Kapitel 5.2). Durch diese Betriebsstrategie wird die Verbrennungskraftmaschine sofort nach dem Start bei relativ hoher Drehzahl und Last betrieben. Daraus resultieren ein rascher Anstieg der Katalysatortemperatur und eine, im Vergleich zu Startvorgängen bei konventionellem Betrieb, rasches Einsetzen der Konvertierung. Allerdings ist im Vergleich zum konventionellen Startvorgang aufgrund des höheren Massenstroms auch ein erhöhter Emissionsausstoß vorhanden [10].

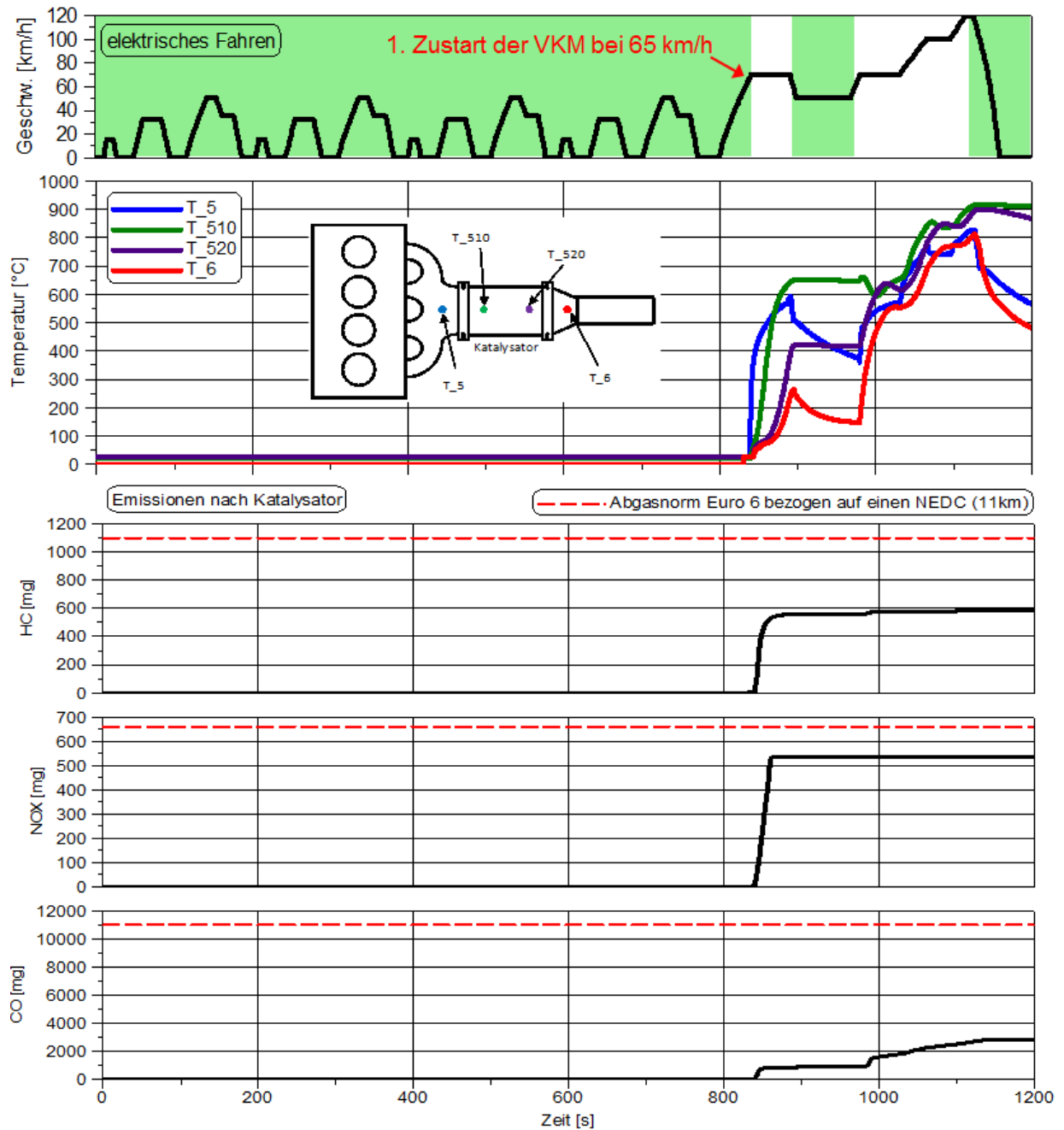


Abbildung 5.10: Katalysatorortemperatur im NEDC [10]

Wie in Abbildung 5.10 ersichtlich, kann bereits nach etwa 25 Sekunden eine Konvertierungsrate von annähernd 100 % erreicht werden und nach etwa 35 Sekunden ist bereits eine gute Durchwärmung des Katalysators beobachtbar.

Entscheidend ist auch das Verhalten der Katalysatorortemperatur nach Ausschalten der Verbrennungskraftmaschine bis zum nächsten Einschaltvorgang im darauffolgenden NEDC-Durchlauf inkl. der im Testablauf vorgeschriebenen zehnminütigen Wartezeit (Abbildung 5.11).

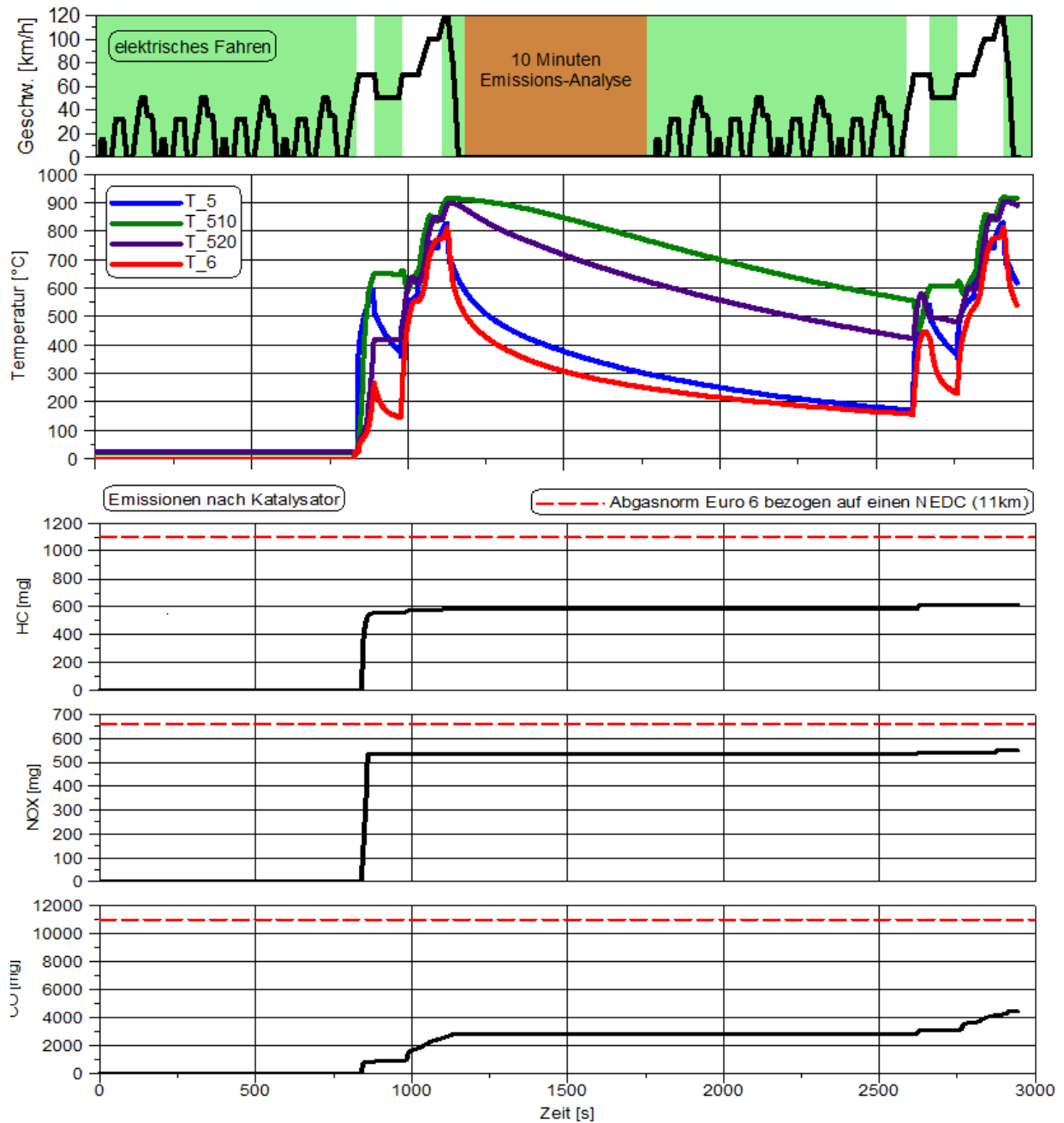


Abbildung 5.11: Katalysatortemperatur bei zwei aufeinanderfolgenden NEDC-Zyklen [10]

Wie ersichtlich, wird die Light-Off-Temperatur des Katalysators nicht unterschritten und es kann nur ein geringer Anstieg der Gesamtemissionen beobachtet werden. Schließlich können die gesetzlichen Grenzwerte für die Euro-6-Norm mit dieser Strategie sicher eingehalten werden.

Dieses Ergebnis kann allerdings nicht 1:1 auf den realen Betrieb übertragen werden. Um den von der Politik propagierten Weg zur Verringerung der CO₂-Emissionen auch unter realen Umgebungsbedingungen voranschreiten zu können, ohne dabei die derzeit geltende Abgasnorm zu verletzen, ist es notwendig, eine entsprechende thermische Konditionierung von Katalysator und Verbrennungskraftmaschine in das Thermomanagement des Fahrzeuges

aufzunehmen. Vorteilhaft hat sich hier der Einsatz eines Brennstoffzuheizers herausgestellt (siehe dazu auch [19]).

Die Untersuchung des Emissionsverhaltens von Hybridfahrzeugen ist Schwerpunkt einer an der TU Darmstadt laufenden Dissertation. Die Ergebnisse können nach Veröffentlichung in [67] nachgelesen werden.

5.4 Schleppverluste des Elektromotors bei VKM-Betrieb

Im Rahmen der EV-CEA-Konzeptuntersuchungen wurde als Elektromotor eine permanent-erregte Synchronmaschine von Bosch eingesetzt. Die Permanenterregung des Rotors führt zwar zu geringeren Verlusten gegenüber einer fremderregten E-Maschine, allerdings kann die E-Maschine dadurch nicht lastfrei geschaltet werden. Das bedeutet, dass beim verbrennungsmotorischen Betrieb des EV-CEA-Konzeptes der Elektromotor Verluste verursacht. Wie bereits in Kapitel 2.4.2 dargestellt, müssen bei höheren Drehzahlen zur Überwindung der Leerlaufverluste rund 2 kW eingesetzt werden (Abbildung 2.17).

In der Basis-Betriebsstrategie erfolgt ein verbrennungsmotorischer Betrieb bei höheren Drehzahlen. Das bedeutet, dass die E-Maschine speziell in diesem Bereich mit entsprechend hohen Verlusten geschleppt wird. Im NEDC-Testzyklus liegt dieser Bereich in etwa zwischen 3000 U/min und 5000 U/min (Abbildung 5.12).

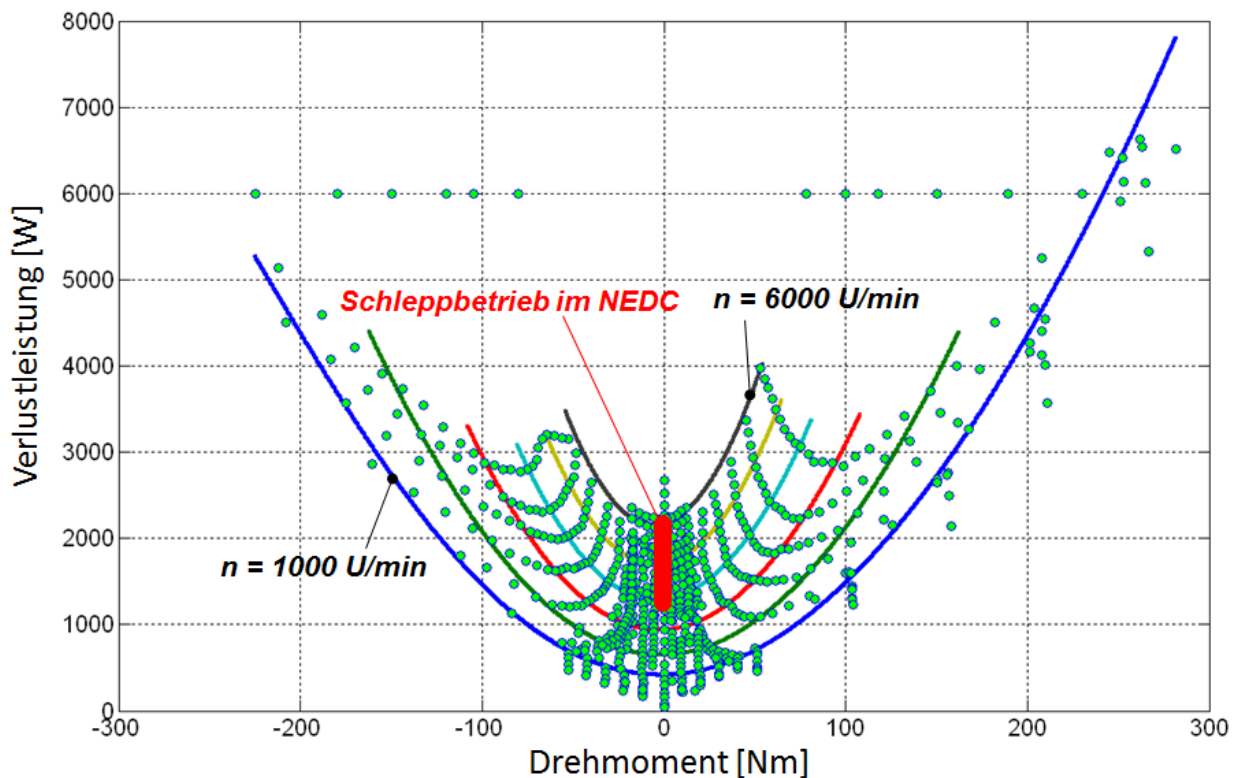


Abbildung 5.12: Elektromotor-Schleppbereich im NEDC

Berechnet man die Verlustleistung, welche im Schleppbetrieb entsteht, zeigt sich, dass kurzzeitig eine Leistung von rund 1500 W aufgebracht werden muss (Abbildung 5.13).

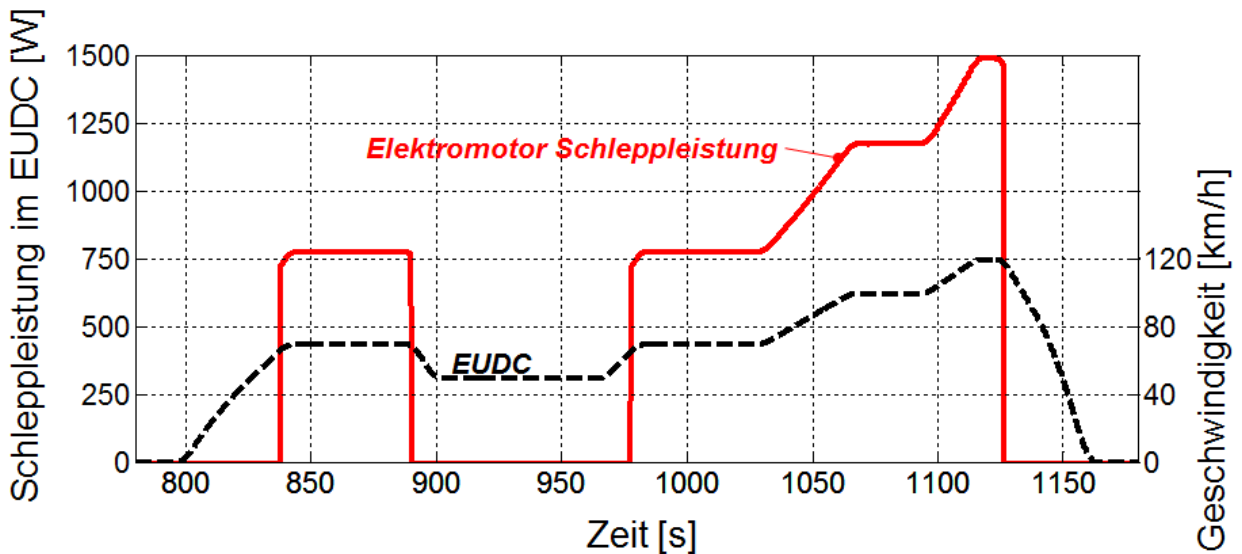


Abbildung 5.13: Elektromotor-Schleppverluste im EUDC

Aus diesem Ergebnis kann der folgende Schluss abgeleitet werden: Für den Einsatz in einer parallelen Hybridantriebstrangstruktur (also auch im EV-CEA-Konzept) ist hinsichtlich der Verluste ein fremderregter Elektromotor einer permanenterregten Maschine vorzuziehen, da der fremderregte Motor im verbrennungsmotorischen Betrieb abgeschaltet werden kann. Dadurch werden die Verluste, bis auf die Reibungs- und Ventilationsverluste des Motors, reduziert.

Für den Einsatz in einem reinen Elektrofahrzeug, bei dem diese Betriebszustände nicht auftreten, besitzt die permanenterregte Synchronmaschine aufgrund des höheren Wirkungsgrades jedoch entscheidende Vorteile gegenüber einer fremderregten Maschine.

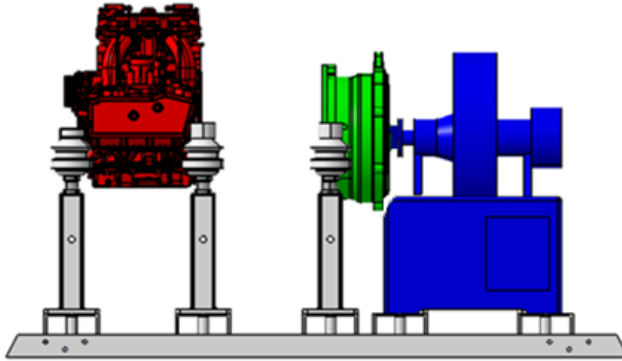
5.5 Verluste durch pulsierende Beaufschlagung des Elektromotors

Im Rahmen der EV-CEA-Konzeptuntersuchungen wurden zur simulatorischen Abbildung des Gesamtkonzeptes die Verluste des Elektromotors ermittelt (siehe Kapitel 2.4.2). Dazu wurde der Elektromotor an der TU Darmstadt am Prüfstand aufgebaut und vermessen (Abbildung 5.14, oben).

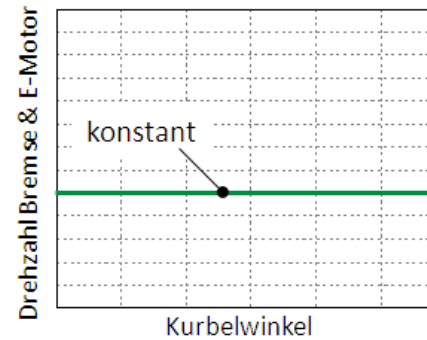
Gleichzeitig wurden im Zuge der Gesamtkonzeptuntersuchung die Verluste des Elektromotors im Zusammenspiel mit der Verbrennungskraftmaschine, also bei einer pulsierenden

Drehmomentbeaufschlagung untersucht (Abbildung 5.14, unten). Dabei konnten im Vergleich zur Vermessung mit gleichmäßigem Drehmoment höhere Verluste der E-Maschine beobachtet werden.

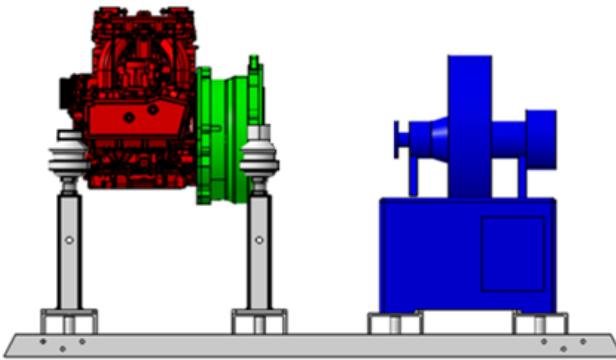
Messaufbau TU Darmstadt:



Drehzahl bei Bremsenmessung



Messaufbau IVD Graz:



Drehzahl bei VKM - Messung

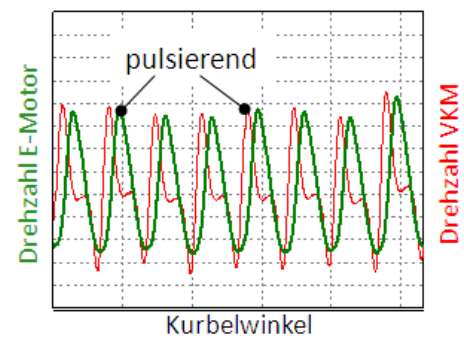


Abbildung 5.14: Aufbau der Elektromotor-Verlustleistungsmessung

In Abbildung 5.15 ist die Verlustleistung der beiden Messungen bei einer Drehzahl von 2000 U/min über der Last dargestellt. Wie ersichtlich zeigen die Verluste über das Elektromotor-Bremsmoment einen deutlich unterschiedlichen Verlauf. Um die Ursache dieser Abweichung zu ermitteln, wird momentan das Verhalten des Elektromotors bei verbrennungsmotorischer Beaufschlagung gemeinsam mit dem Institut für elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung der TU Graz im Rahmen einer Bachelorarbeit untersucht.

Erste Ergebnisse zeigen, dass die pulsierende Beaufschlagung zu einem Pendeln des Polradwinkels führt, wodurch sich die induzierte Polradspannung ändert, was schließlich zu einer Änderung (teilweise Erhöhung) des Stromflusses führt. Dies wirkt sich insbesondere bei höheren Drehmomenten aus. Durch den veränderten Stromfluss werden die Wärmeverluste quadratisch über die folgende bekannte Beziehung beeinflusst (Gleichung 5.1).

$$P_V = I^2 * R_{Cu} \quad (5.1)$$

In dieser Formel ist I der Strom, welcher aufgrund der induzierten Polradspannung in der

Kupferwicklung fließt. Mit R_{Cu} ist der Kupferwiderstand der Wicklungen definiert.

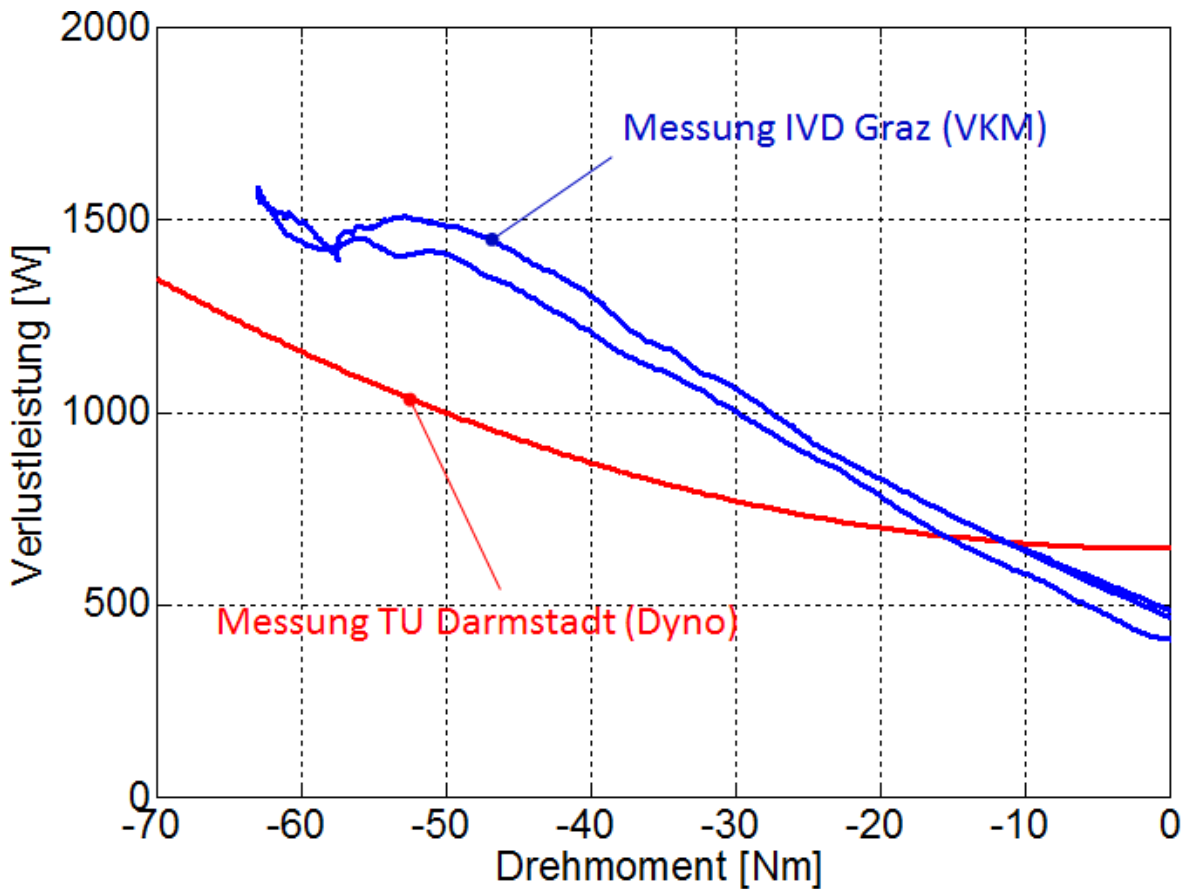


Abbildung 5.15: Erhöhte Verluste des Elektromotors durch pulsierende Drehmomentbeaufschlagung

Werden die gemessenen Ströme in der E-Maschine für beide Messaufbauten über ein Arbeitsspiel integriert, und mit Gleichung 5.1 die Kupferverluste berechnet, so ergibt sich eine erhöhte Verlustleistung bei höheren Bremsmomenten und pulsierender Beaufschlagung. Diese erhöhten Verluste führen zu höheren Rotortemperaturen, was die Permanentmagnete negativ beeinflusst. Zur Aufrechterhaltung des Drehmoments muss der Strom erhöht werden, was wiederum zu einer Erhöhung der Verluste führt.

Dieser Kreislauf führt schließlich zu einem deutlichen Anstieg der Gesamtverluste des Elektromotors bei einer pulsierenden Drehmomentbeaufschlagung.

Dieses Ergebnis stellt eine mögliche Ursache zur Erklärung der erhöhten Verluste dar. Eine endgültige Beschreibung Ursache inklusive deren Ermittlung kann nach Fertigstellung der Arbeiten in [42] nachgelesen werden.

Kapitel 6

2-Zylinder vs. 3-Zylinder-Motor

Eine wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung des EV-CEA-Konzeptes stellte die Beherrschung der Triebstrangschwingungen dar, welche aus dem Anregungsspektrum des eingesetzten 2-Zylinder-Verbrennungsmotors resultieren. Es stellt sich nun die Frage, ob die Vorteile eines 2-Zylinders die dazu notwendigen Aufwendungen rechtfertigen, oder ob ein 3-Zylinder-Verbrennungsmotor dem 2-Zylinder vorzuziehen ist. Um für diese Fragestellung eine Entscheidungsgrundlage zur Verfügung zu stellen, wird im Folgenden ein 2-Zylinder-Verbrennungsmotor einem 3-Zylinder gegenübergestellt und hinsichtlich Drehungleichförmigkeit und Packaging verglichen.

6.1 Vergleich hinsichtlich Drehschwingungen

Für den Drehschwingungsvergleich wurde der eingesetzte 2-Zylinder-Verbrennungsmotor einem aktuellen 3-Zylinder-Verbrennungsmotor gegenübergestellt, dessen Drehschwingungsverhalten aus messtechnischen Untersuchungen an der TU Darmstadt bekannt waren. Die grundlegenden Daten der beiden Motoren können aus Abbildung 6.1 entnommen werden.



2- Zylinder Verbrennungsmotor	3- Zylinder Verbrennungsmotor
	
Hubvolumen = 850ccm	Hubvolumen = 1200ccm
Nennleistung = 46 kW (@ 6000 U/min)	Nennleistung = 100 kW (@ 6000 U/min)
Maximalmoment = 65 Nm	Maximalmoment = 240 Nm

Abbildung 6.1: Daten des 2- und 3-Zylinder Verbrennungsmotors

Um die Drehschwingungen des 2-Zylinder-Verbrennungsmotors gegenüber dem 3-Zylinder bewerten zu können, muss eine Gegenüberstellung der Schwingungsamplituden im selben Betriebspunkt erfolgen. Dazu wurde ein Simulationsprogramm entwickelt, mit dem durch Vorgabe eines gewünschten Drehmomentes und der allgemeinen Motordaten der Zylinderdruckverlauf über ein Arbeitsspiel ermittelt wird. Daraus können über die Berücksichtigung der Massenträgheiten, die Schwingungsamplituden der Kurbelwelle berechnet werden. Zur

Verifikation der Simulationsergebnisse wurden diese den 3-Zylinder-Messergebnissen aus Darmstadt gegenübergestellt (Abbildung 6.3 und 6.4).

In Abbildung 6.2 ist der Prüfstandaufbau von den Messungen an der TU Darmstadt dargestellt. Wie ersichtlich wurde der Verbrennungsmotor zwecks Verschiebung der Resonanzdrehzahl mit einer verhältnismäßig großen Schwungmassenscheibe ausgestattet und über eine GNK-Elastikwelle mit einer Steifigkeit von 599 Nm/rad mit einer APA-Prüfstandswelle verbunden.

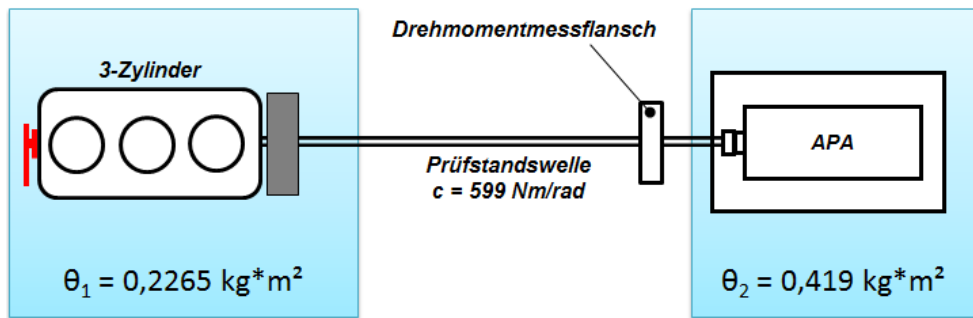


Abbildung 6.2: Prüfstandaufbau 3-Zylinder-Verbrennungsmotor an der TU Darmstadt

In Abbildung 6.3 sind die gemessenen Drehschwingungen der Kurbelwelle bei 1100 U/min und saugmotorischer Volllast (107 Nm) dargestellt. Wie ersichtlich, wird in diesem Betriebspunkt eine Schwingungsbreite (entspricht Abstand zwischen Maximal- und Minimalwert der Schwingung) der Kurbelwellenschwingung von über 5° erreicht.

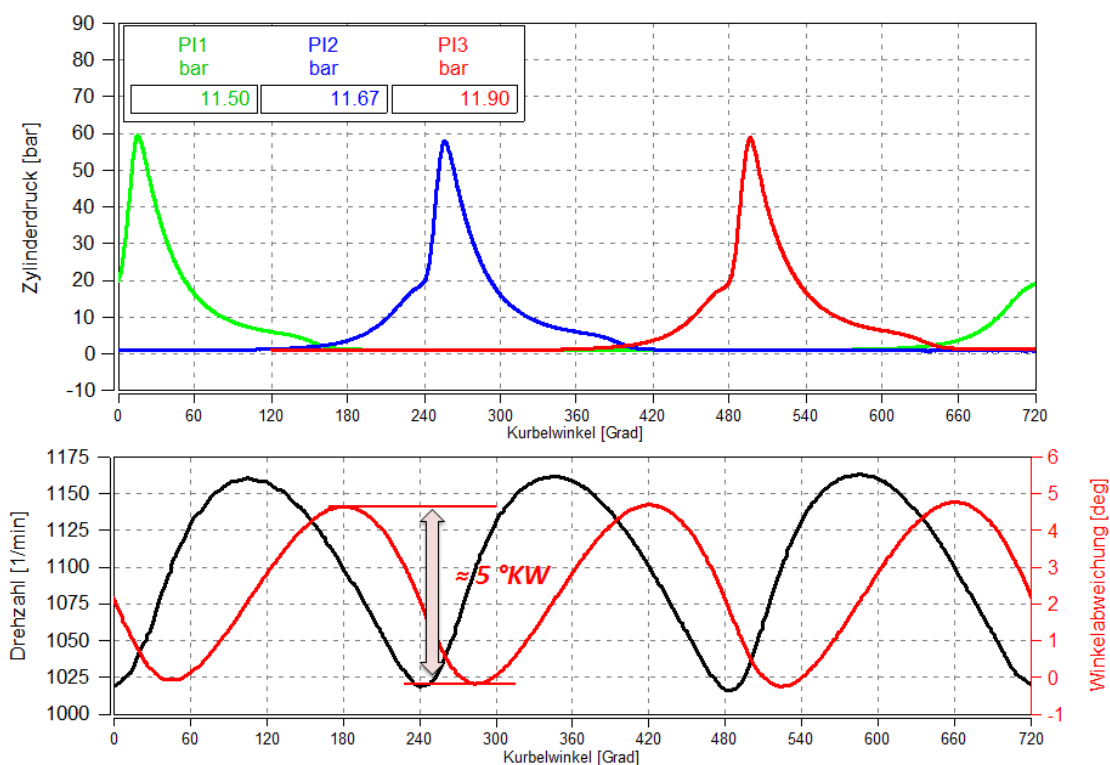


Abbildung 6.3: Drehschwingungen des 3-Zylinder-Verbrennungsmotors bei Volllast [50]

Bei halber saugmotorischer Volllast (54 Nm) schwankt die Kurbelwelldrehzahl zwischen rund 1150 U/min und rund 1025 U/min. Daraus ergibt sich eine Schwingungsweite der Kurbelwellenschwingung von 2,7° (Abbildung 6.4).

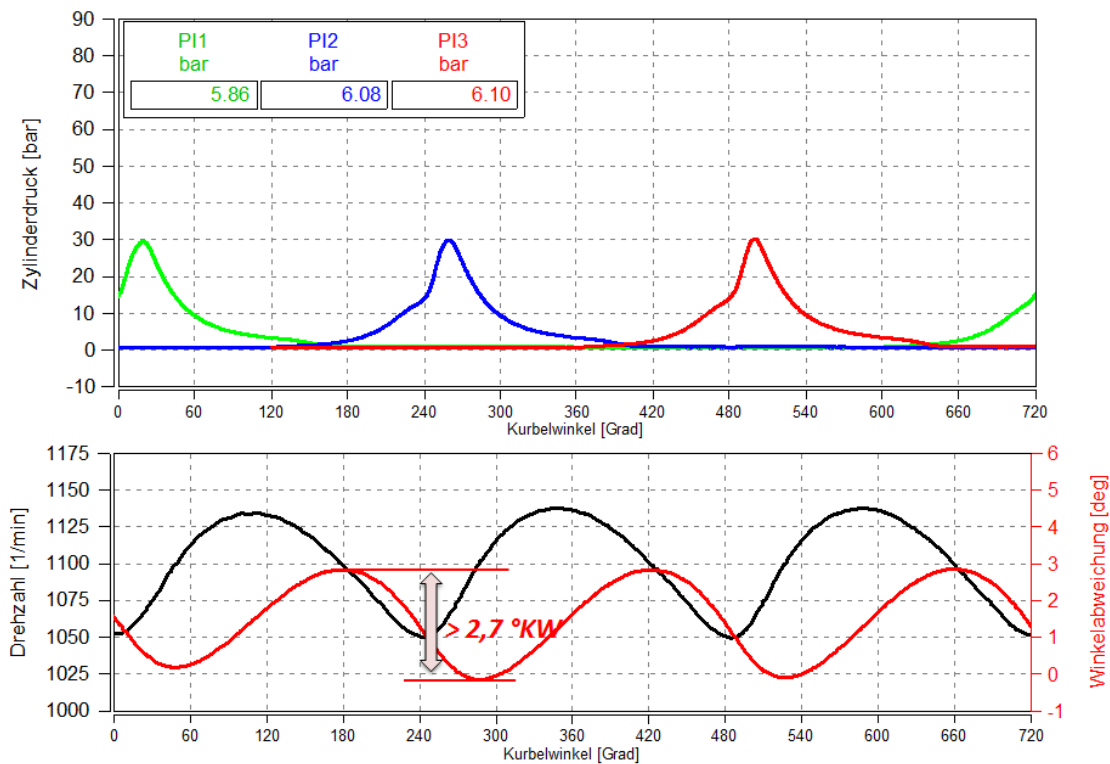


Abbildung 6.4: Drehschwingungen des 3-Zylinders bei halber saugmotorischer Volllast [50]

Um das Simulationsmodell validieren zu können, wurden beide Betriebspunkte unter Berücksichtigung des Prüfstandaufbaus nachgerechnet und dem gemessenen Verdrehwinkel gegenübergestellt (Abbildung 6.5).

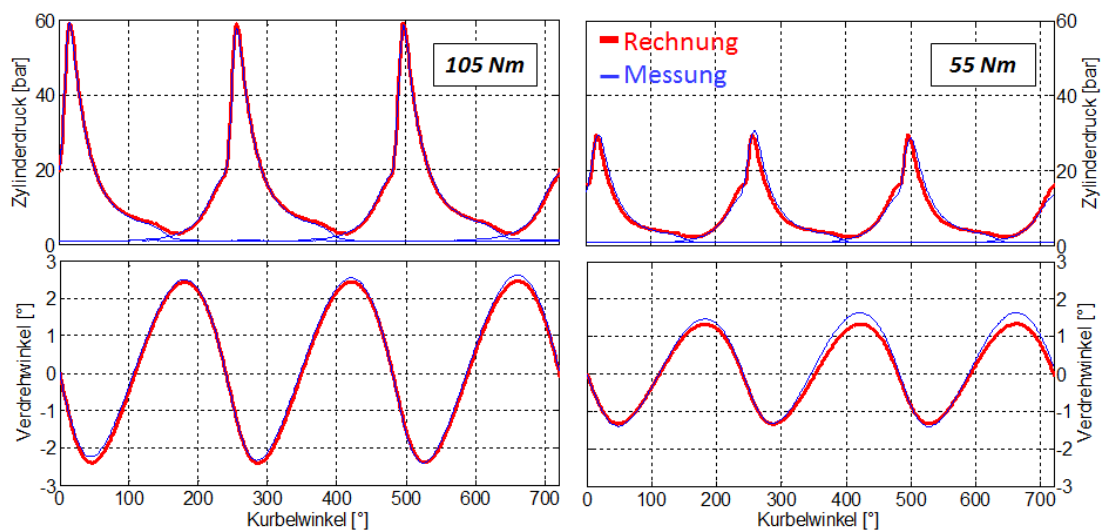


Abbildung 6.5: Vergleich Messung vs. Rechnung bei 105 Nm und 55 Nm

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung. Die auftretenden Abweichungen sind im Wesentlichen auf den in der Simulation verwendeten Zylinderdruckverlauf zurückzuführen. Dieser stellt einen über mehreren Zyklen gemittelten Druckverlauf dar.

Im nächsten Schritt wurden die Schwingungsamplituden aus der Anregung eines 2-Zylinder-Verbrennungsmotors den Amplituden aus einer 3-Zylinder-Anregung bei gleicher Leistung gegenübergestellt. Um das selbe mittlere Drehmoment zu erreichen, muss vom 2-Zylinder-Verbrennungsmotor ein höherer Mitteldruck aufgebracht werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.6 für den Betriebspunkt von rund 55 Nm und 1100 U/min dargestellt.

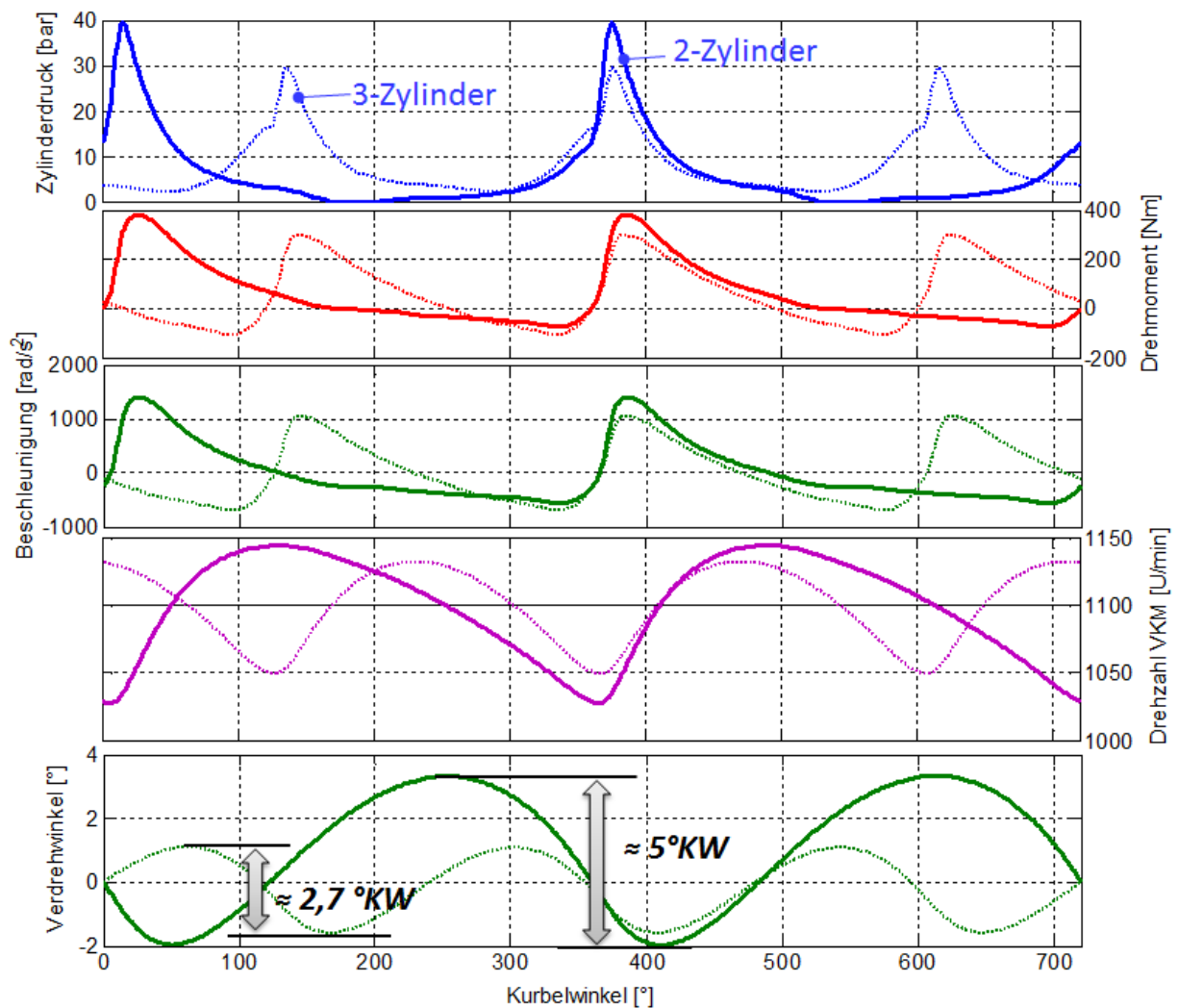


Abbildung 6.6: Vergleich 3- vs. 2-Zylinder-Verbrennungsmotor bei 1100 U/min und 70 Nm

Wie ersichtlich wird für das selbe Drehmoment beim 2-Zylinder-Verbrennungsmotor ein Spitzendruck von rund 40 bar benötigt. Der 3-Zylinder erreicht das Drehmoment bei einem Spitzendruck von rund 30 bar. Aus den Druckverläufen resultiert schließlich, abhängig vom Kurbelwinkel, das Drehmoment an der Pleuellager. Das Drehmoment führt über die Trägheit der rotatorischen Massen zu einer Beschleunigung und Verzögerung der Pleuellager. Beim 2-Zylinder-Motor wird in diesem Betriebspunkt eine Schwingungsbreite der Pleuellagerverdrängung von rund 5° erreicht. Die Pleuellagerverdrängung des 3-Zylinders schwankt

um rund 50 % weniger, mit rund 2,7°KW. Hinsichtlich der Schwingungsamplituden ist demnach wie erwartet ein deutlicher Vorteil des 3-Zylinder-Verbrennungsmotors gegenüber dem 2-Zylinder vorhanden.

Um nun die Amplituden des 2-Zylinder-Motors auf die Größe des 3-Zylinders zu reduzieren, müsste laut Simulationsmodell rund die doppelte Schwungmasse verbaut werden. Dieses Ergebnis wird von Berechnungen aus einer vorangegangenen Arbeit bestätigt. Dort wurden die erforderlichen Trägheitsmomente von 2- und 3-Zylinder-Motoren berechnet, welche zur Erreichung der Drehschwingungen eines 4-Zylinder- Verbrennungsmotors notwendig sind. Der 2-Zylinder benötigt dazu in etwa die doppelte Schwungmasse als der 3-Zylinder-Verbrennungsmotor (siehe auch [47], Seite 96).

Auswirkungen auf das EV-CEA-Konzept

Wie aus dem vorigen Abschnitt hervorgeht, können durch den Einsatz eines 3-Zylinder-Verbrennungsmotors die Schwingungsamplituden auf rund 50 % reduziert werden. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Anregungsfrequenz. Während der 2-Zylinder zwei Verbrennungsstöße pro Arbeitsspiel liefert, erzeugt der 3-Zylinder drei Verbrennungsstöße. Daraus resultiert, dass die Anregungsdrehzahl der kritischen ersten Eigenfrequenz des EV-CEA-Basisaufbaus um $\frac{2}{3}$ gesenkt werden kann (Abbildung 6.7).

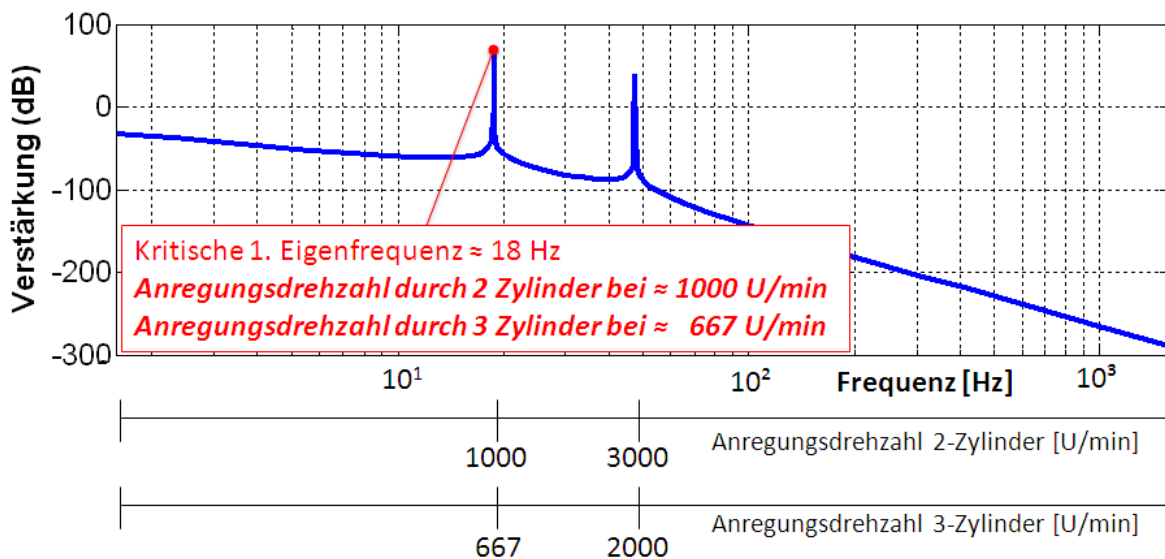


Abbildung 6.7: Eigenfrequenzanregung des EV-CEA-Basisaufbaus durch 2- und 3-Zylinder

Wie das Ergebnis zeigt, wird die erste Eigenfrequenz durch den 3-Zylinder bei einer Drehzahl von 667 U/min angeregt. Für einen unkritischen Betrieb des Konzeptes müsste die Federsteifigkeit im Vergleich zum 2-Zylinder nur mehr gering abgesenkt, oder die Trägheiten geringfügig erhöht werden. Daraus folgt eine einfachere Realisierung des Zweimassenschwingers. Die zweite unkritische Eigenfrequenz wird beim 3-Zylinder bereits bei 2000 U/min angeregt. Aufgrund der geringeren Schwingungsamplituden werden Resonanzamplituden jedoch geringer als aus den Messungen mit dem 2-Zylinder-Verbrennungsmotor (Kapitel

5.1) ausfallen. Hinsichtlich der Drehschwingungen ist demnach der Einsatz eines 3-Zylinder-Verbrennungsmotors gegenüber dem 2-Zylinder insbesondere beim EV-CEA-Konzept vorteilhaft.

6.2 Vergleich hinsichtlich Packaging

Beim EV-CEA-Konzept als Hybridantriebsstrang für Fahrzeuge aus dem A-C-Segment stellt eine kompakte Bauweise einen entscheidenden Faktor dar. Grundsätzlich ist zu erwarten, dass der Einsatz eines 2-Zylinder-Reihenmotors gegenüber einem 3-Zylinder-Reihenmotor durch Wegfall einer Zylindereinheit, hinsichtlich der Größe vorteilhaft ist. Vergleicht man allerdings real ausgeführte Motoren untereinander, so zeigt sich, dass der Größenvorteil des 2-Zylinders aufgrund der unterschiedlichen Konstruktionsvarianten keine allgemeine Gültigkeit aufweist (siehe auch [47]). In Abbildung 6.8 ist der Größenvergleich von real ausgeführten 2- und 3-Zylinder-Motoren schematisch dargestellt.

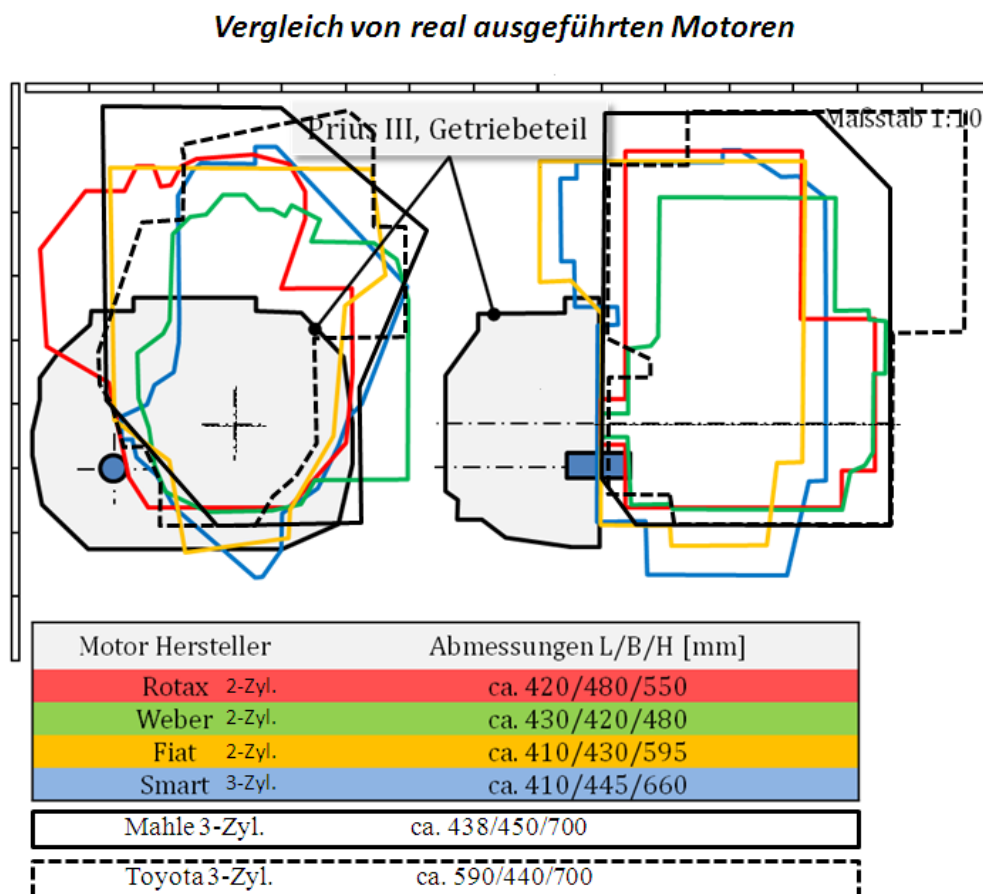


Abbildung 6.8: Größenvergleich von 2- und 3-Zylinder-Motoren (Abgeändert aus [47])

Zwar bestätigen in dieser Abbildung der Mahle- und der Toyota-Motor die theoretische Tendenz, der Smart 3-Zylinder ist jedoch im Größenvergleich zwischen den 2-Zylinder-Verbrennungsmotoren anzutreffen. Ein allgemeiner Packagingvorteil eines 2-Zylinder-Motors gegenüber einem 3-Zylinder ist entsprechend dieser Untersuchung demnach nicht ableitbar.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Die Angst vor den negativen Auswirkungen des Klimawandels führt zu einem stetig steigenden Umweltbewusstsein und zwingt den Gesetzgeber zu entsprechenden Maßnahmen, welche die Entwicklung von Fahrzeugen mit geringen CO₂-Emissionen fördern. Doch auch durch die Aussicht auf Verknappung der fossilen Energieträger wird die Forderung nach effizienteren Antriebskonzepten gestärkt.

Dabei wird das rein elektrisch betriebene Fahrzeug nach wie vor von vielen als Königsweg nachhaltiger Automobilität gesehen. Die bittere Erkenntnis, dass die reine Elektromobilität aufgrund der beschränkten Reichweite, wenn, nur für kleinere Fahrzeuge im Stadtbetrieb sinnvoll ist, setzt sich jedoch mehr und mehr durch. Eine Möglichkeit ist es hier, durch Einsatz eines Verbrennungsmotors, also Hybridisierung, die Elektromobilität zu unterstützen. Durch eine geschickte Kombination von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor können die Vorteile beider Antriebsarten optimal genutzt werden.

Das Ziel dieser Arbeit war es, einen kosteneffizienten, elektrifizierten Antriebsstrang für ein Fahrzeug aus dem A-C-Segment zu entwickeln, welcher die Vorteile von Verbrennungs- und Elektromotor optimal kombiniert. Zur Herleitung einer geeigneten Hybridarchitektur wurden dazu am Markt vorhandene Hybridkonzepte untersucht und im Sinne einer intelligenten Vereinfachung auf die wesentlichen Komponenten reduziert. Durch eine konsequente Fokussierung auf die Zielsetzung, rein elektrisches Fahren in urbanen und suburbanen Bereichen zu ermöglichen, darüber hinaus aber verbrennungsmotorische Unterstützung bereitzustellen, konnte schließlich ein kompaktes und kosteneffizientes Hybridkonzept abgeleitet werden. Mit nur einem E-Motor, moderater Batteriegröße und einem kleinen Verbrennungsmotor verfügt das sogenannte „EV-CEA-Konzept“ über einen, im Vergleich zu heute bekannten Hybrid- und RE-Lösungen mit zwei Elektromotoren, deutlichen Kosten- und Packagingvorteil und gegenüber seriellen Konzepten entscheidend bessere Verbrauchswerte im mittleren und oberen Geschwindigkeitsbereich.

Mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten EV-CEA-Betriebsstrategie wird der rein elektrische Betrieb bei niedrigen Geschwindigkeiten (Stadtbetrieb) und der verbrennungsmotorische Betrieb bei höheren Geschwindigkeiten (außerstädtischer Betrieb) umgesetzt. Durch diese Basis-Betriebsstrategie konnte die Reichweite mit elektrischer Verfügbarkeit

gegenüber einem sequentiellen Betrieb von 85 auf 121 km gesteigert werden. Das bedeutet, dass der Anteil der lokal emissionsfreien elektrischen Fahrten und damit auch der Kundennutzen entscheidend zunimmt. Allerdings zeigt das Zertifizierungsergebnis deutliche Vorteile der sequentiellen Strategie. Während mit der EV-CEA-Strategie trotz der höheren Reichweite ein Zertifizierungswert von rund 2,2 l (entspricht einem CO₂-Ausstoß von 49,3 g/km) erreicht wird, erreicht man mit der sequentiellen Betriebsstrategie einen Wert von 1 l (entspricht einem CO₂-Ausstoß von 22,6 g/km). Dies führt zu der äußerst interessanten Erkenntnis, dass es hier eine Diskrepanz zwischen der kundenoptimalen und der zertifizierungsoptimalen Betriebsstrategie gibt, denn während mit der sequentiellen Betriebsstrategie die besseren Zertifizierungsergebnisse erreicht werden, resultiert aus der EV-CEA-Strategie ein maximaler Kundennutzen, da die für den Kunden nutzbare Reichweite mit elektrischer Verfügbarkeit ansteigt.

Die Untersuchung des Leistungsbedarfs, welcher für den Betrieb im NEDC-Testzyklus und auf Autobahnen notwendig ist zeigt, dass für den NEDC Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor jeweils eine Leistung von rund 31 kW benötigen. Für den Autobahnbetrieb ist eine Gesamtleistung von rund 78 kW erforderlich. Beide Anforderungen können mit den ermittelten Systemkomponenten, welche zum Aufbau des Funktionsmusters verwendet wurden, erfüllt werden. Hinsichtlich der Vollastbeschleunigung (als Maß für den Fahrspaß) ist das Konzept im Vergleich zu anderen Hybridkonzepten im Mittelfeld anzutreffen.

Der Aufbau des EV-CEA-Konzeptdemonstrators mit am Markt vorhandenen Komponenten hat sich als geeignete Variante herausgestellt. Als Schwierigkeit stellte sich dabei die Koppelung der Komponenten heraus. Schließlich konnte jedoch durch intensive Überlegungen eine kompakte Lösung gefunden werden.

Durch den modularen Prüfstandaufbau war es möglich alle geplanten Messungen ohne Probleme durchzuführen. Auch die positiven Transporteigenschaften der kompakten Gesamteinheit wurde auf der Testing Expo 2013 getestet und bestätigt. Vor Ort konnte der Prüfstand insbesondere Leiter von kleineren Universitäts- und Forschungsinstituten, welche ähnliche Anforderungen an ihre Prüfstände stellen, überzeugen.

Aus dem aus Wirtschaftlichkeitsgründen eingesetzten Zweizylinder-Verbrennungsmotor resultiert ein Anregungsspektrum, welches zu NVH-Problemen im Triebstrang führt. Zur Lösung dieser Problematik wurden zwei EV-CEA-Konzeptvarianten vorgestellt. Das ist zum einen die sogenannte EV-CEA-Basisvariante, bei der die Drehschwingungen durch eine weiche, gedämpfte Koppelung von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor verringert werden. Die EV-CEA-Basisvariante wurde im Rahmen dieser Arbeit erstmals aufgegriffen und im hier untersuchten EV-CEA-Konzept angewendet und bewertet. Zum anderen wurde das von IVD Prof. Hohenberg weiterverfolgte, sogenannte directE-Konzept vorgestellt. Bei dieser Konzeptvariante wird das Anregungsspektrum des Verbrennungsmotors durch elektrische Drehmomentimpulse zwischen den Verbrennungsmotorimpulsen verdoppelt. Durch dieses Verfahren wird demnach aus dem Anregungsspektrum des eingesetzten 2-Zylinder-Verbrennungsmotors das Spektrum eines 4-Zylinder-Verbrennungsmotors erzeugt. Die Verbesserung des Schwingverhaltens wird dabei durch zwei Effekte erreicht. Zum einen wird die Anregungsfrequenz durch die Zwischenimpulse verdoppelt, und zum anderen kann die abgegebene Leistung des Verbrennungsmotors um die vom Elektromotor

zusätzlich aufgebrauchte Leistung reduziert werden. Dadurch erfolgt parallel zur Impulsverdoppelung eine Verringerung der Drehmomentamplituden. Eine schwingungstechnische Entkoppelung des restlichen Antriebstrangs kann durch ein verhältnismäßig einfaches ZMS zwischen Elektromotor und Getriebe erfolgen.

Der Drehschwingungsvergleich des 2-Zylinder-Verbrennungsmotors gegenüber einem 3-Zylinder zeigt, wie zu erwarten, insbesondere in Kombination mit der EV-CEA-Konzeptanordnung deutliche Vorteile des 3-Zylinder-Verbrennungsmotors. Dies liegt darin begründet, dass neben der Reduktion der Schwingungsamplituden, die Anregungsfrequenz der ersten System-Eigenfrequenz entscheidend in Richtung niedriger Drehzahlen verschoben werden kann. Hinsichtlich Packaging konnten keine eindeutigen Vorteile des 3-Zylinder abgeleitet werden.

Ausblick

Der derzeitige Trend der Elektrifizierung wird auch in Zukunft anhalten. Dabei stellt mittel- bis langfristig die Kombination von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor einen aussichtsreichen Weg zur Reduktion von Verbrauch und Emissionen dar. Die Elektrifizierung des Antriebstrangs führt jedoch aufgrund der zusätzlichen Komponenten im Allgemeinen zu einer Erhöhung der Fahrzeugkosten. Um auch in Zukunft die heutige individuelle Mobilität aufrecht erhalten zu können, muss dieser Kostenanstieg so gering wie möglich ausfallen. Durch die intelligente Vereinfachung komplexer Hybridkonzepte setzt das EV-CEA-Konzept genau an diesem Punkt an.

Ansatzpunkte zur Effizienzsteigerung bei Verbrennungskraftmaschinen stellen heute und in Zukunft das Downsizing und Downspeeding dar. Diese Kombination führt jedoch zu einem veränderten Anregungsspektrum, was in weiterer Folge zu NVH-Problemen im Triebstrang führen kann. Dieser Problematik kann nur durch besondere Anstrengungen in der Weiterentwicklung der Dämpferelemente gelöst werden. Aber auch die Elektrifizierung eröffnet hier weitere Möglichkeiten.

Aber, sowohl die Schwingungsdämpfung mit ZMS (wie in der EV-CEA-Basisvariante ausgeführt) als auch die aktive Drehmomentbeeinflussung durch den Elektromotor (z.B. HOC- oder directE-Verfahren), sind mit Verlusten behaftet. Es muss jetzt also untersucht werden, welches Konzept die bessere Energiebilanz aufweist. In Zukunft wird sich das effektivere System durchsetzen.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vergleich der Erderwärmung mit/ohne anthropogenem Einfluss [14]	3
1.2	Anteile der Treibhausemissionen nach Sektor [3]	4
1.3	CO ₂ -Emissionen mit/ohne Multiplikator [1]	6
1.4	Verbrennungsmotorische vs. elektrische Reichweite	7
1.5	Reduzierte Reichweite durch Klimatisierung	8
1.6	Vergleich: Elektromotorischer Antrieb vs. konventioneller Antrieb [6]	9
1.7	Reichweitenerhöhung durch Verdoppelung der Batteriekapazität	10
1.8	Der Mixte von Lohner [28]	11
1.9	Der neue Toyota Prius Hybrid [32]	12
1.10	Der Toyota Prius Hybrid Antriebsstrang	13
1.11	Mercedes S 400 Blue Hybrid [22]	14
1.12	Entwicklung des europäischen Hybridmarktes	15
1.13	Serielle Hybridtopologien	16
1.14	Auslegung eines seriellen Range Extenders	17
1.15	Serieller vs. paralleler Betrieb	18
1.16	Parallele Hybridtopologien	19
1.17	Leistungsverzweigte Hybridtopologien	20
1.18	Hybridklassifizierung nach Hybridisierungsgrad	23
1.19	Hybridklassifizierung nach der elektrischen Leistung	24
1.20	Hybridklassifizierung nach Leistungsgewicht	24
1.21	Reichweite Plug-In-Hybrid vs. konventionellen Full-Hybrid	25
1.22	Verschiedene Fahrzeugklassen bei der EU-Fahrzeugzertifizierung [10]	26
1.23	Zertifizierungsablauf nach UN/ECE-R101 [10]	27
1.24	Zertifizierte CO ₂ -Emissionen abhängig von elektrischer Reichweite [10]	28
1.25	CO ₂ -Bonus abhängig vom Fahrzeugsegment	29
2.1	Möglichkeiten der Hybridisierung [9]	30
2.2	Detailbetrachtung der Hybridkonzepte	31
2.3	Basisaufbau EV-CEA-Konzept	33
2.4	Die EV-CEA-Betriebsmodi	36
2.5	Modularisierung des EV-CEA-Konzeptes	37
2.6	Der aufgerüstete 2 Zylindermotor: MPE 850 DOHC NA	39
2.7	Spezifischer Verbrauch des MPE 850 DOHC NA [9]	40
2.8	Reibmitteldruck des MPE 850 DOHC NA [9]	40
2.9	Verbrennungsschwerpunkt des MPE850 DOHC NA [9]	41
2.10	Aufbau einer Gleichstrommaschine [33]	43
2.11	Die Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer [17])	44
2.12	Kurzschluss- und Schleifringläufer (Abgeänderte Darstellung aus [23])	45
2.13	Aufbau der permanenterregten Synchronmaschine [17])	46

2.14	Die geschaltete Reluktanzmaschine [17])	47
2.15	Vergleich der Wirkungsgradoptima (nach [29])	48
2.16	Bosch IMG 300 inkl. Leistungselektronik [18]	49
2.17	Das Verlustkennfeld des IMG 300 [51]	50
2.18	Schematische Darstellung der Getriebestufenauslegung	52
2.19	VKM-Betriebsgrenzen bei einer oder zwei Getriebestufen	53
2.20	Übersicht täglich gefahrener Kilometer [36]	54
2.21	Problematik der Ladezeit [6]	55
3.1	Rechenablauf des IVD-TUD-Modells [53] (Struktur nach [61])	57
3.2	Modellierung des Fahrereinflusses in Zyklussimulationen	57
3.3	Verlustmodellierungsansatz am Beispiel Elektromotor	58
3.4	Rechenablauf InMotion powered by Carmaker	59
3.5	Das Basisfahrzeug	60
3.6	Theoretische Reichweite bei konstanter Geschwindigkeit mit Basisstrategie	61
3.7	Basis Betriebsstrategie	61
3.8	InMotion Triebstrangadaption	62
3.9	Der Vehicle Control Layer (adaptiert aus [31])	63
3.10	Implementierung der EV-CEA-Hybridstrategie (adaptiert aus [55])	63
3.11	Leistungsbedarf im NEDC	65
3.12	Der Aichelberg - Von Kirchheim unter Teck nach Hohenstadt (DE)	66
3.13	Leistungsbedarf über Steigung bei 120 km/h Konstantfahrt	67
3.14	Gegenüberstellung: Leistungsbedarf vs. verfügbarer Leistung	68
3.15	Energiebedarf Aichelberg	68
3.16	Leistung und Energie bei 120 km/h über den Aichelberg	69
3.17	Volllastbeschleunigung EV-CEA-Konzept	69
3.18	Vergleich der Beschleunigungswerte von 0 auf 100 km/h	70
3.19	Betriebsstrategie bei Konstantfahrt [40]	71
3.20	Betriebspunkte bei 40kW Verbrennungsmotorleistung [40]	72
3.21	Entwicklungstrends der Antriebsentwicklung [38]	73
3.22	Möglichkeiten zur Reduktion der Dreheschwingungen [38]	73
3.23	Die beiden EV-CEA-Prüfstandsvarianten	74
3.24	CEA-Konzept mit weicher Kupplung zwischen VKM und E-Motor	75
3.25	EV-CEA-Basisaufbau als Dreimassenschwinger	75
3.26	Ersatzmodell des Dreimassenschwingers	76
3.27	Eigenfrequenzen des EV-CEA-Basisaufbaus	76
3.28	Frequenzverdoppelung durch directE [38]	77
3.29	Drehungleichförmigkeit ZMS vs. directE [38]	78
3.30	Drehsteife Kupplungsscheibe (Verschweißt) für directE-Aufbau [42]	79
3.31	CEA-Konzept mit directE-Modul	79
4.1	EV-CEA-Systemkomponenten in CAD	81
4.2	Verbindung VKM und Elektromotor	82
4.3	Verbindungsflansch VKM E-Motor	82
4.4	EV-CEA-Demonstrator	83
4.5	Grundgestell IVD-Systemprüfstand	84
4.6	Modularer Prüfstandsaufbau	85
4.7	Der IVD-Systemprüfstand	85

4.8	Elektromotoransteuerung	86
4.9	Ansteuerung der Verbrennungskraftmaschine	87
4.10	Ansteuerung der Kupplung	88
4.11	Übersicht der Prüfstandssteuerung	89
4.12	Kraft- und Wegsensorik in den Lagerstellen des EV-CEA-Konzeptes	90
4.13	Kraft- und Wegsensorik in den Lagerstellen des EV-CEA-Konzeptes	90
4.14	Erweiterung des Prüfstandes mit InMotion	91
4.15	Die Komponenten des EV-CEA-Prüfstandsaufbaus	92
4.16	Massenträgheit und Federsteifigkeit von Kupplungseinheit und Schwungrad	92
4.17	Massenträgheit des Elektromotor-Läufers	93
4.18	Massenträgheit des Elektromotor-Läufers	93
4.19	Massenträgheiten, Steifigkeiten und Dämpfungskonstanten des Prüfstand- aufbaus	94
4.20	Prüfstandsaufbau für Auslaufversuch	95
4.21	Ermittlung des Reibmitteldrucks aus Stationärmessungen	95
4.22	Drehzahlverlauf und Schleppmitteldruck bei Auslaufversuch	96
4.23	Auslaufversuch mit und ohne Kupplungsdruckplatte	97
4.24	Gegenüberstellung des Reibmitteldrucks aus direkter Messung und Auslauf- versuch	98
5.1	Schwingwinkel am Elektromotorausgang über der Drehzahl	100
5.2	Messverfahren Eigenfrequenzmessung	100
5.3	Schwingwinkel über der Drehzahl	101
5.4	Eigenformen der ersten und zweiten Eigenfrequenz	102
5.5	Zukuppeln des Motors an den laufenden Elektromotor	103
5.6	VKM-Start mit geschlossener Kupplung über IMG 300 (Hochschleppen) . .	104
5.7	Einkuppeln der VKM bei Synchrondrehzahl	105
5.8	Vergleich sequentielle vs. EV-CEA-Basis-Betriebsstrategie [10]	106
5.9	Zertifizierungsergebnisse EV-CEA-Konzept [10]	107
5.10	Katalysatortemperatur im NEDC [10]	109
5.11	Katalysatortemperatur bei zwei aufeinanderfolgenden NEDC-Zyklen [10] .	110
5.12	Elektromotor-Schleppbereich im NEDC	111
5.13	Elektromotor-Schleppverluste im EUDC	112
5.14	Aufbau der Elektromotor-Verlustleistungsmessung	113
5.15	Erhöhte Verluste des Elektromotors durch pulsierende Drehmomentbeauf- schlagung	114
6.1	Daten des 2- und 3-Zylinder Verbrennungsmotors	115
6.2	Prüfstandaufbau 3-Zylinder-Verbrennungsmotor an der TU Darmstadt . .	116
6.3	Drehschwingungen des 3-Zylinder-Verbrennungsmotors bei Volllast [50] . .	116
6.4	Drehschwingungen des 3-Zylinders bei halber saugmotorischer Volllast [50]	117
6.5	Vergleich Messung vs. Rechnung bei 105 Nm und 55 Nm	117
6.6	Vergleich 3- vs. 2-Zylinder-Verbrennungsmotor bei 1100 U/min und 70 Nm	118
6.7	Eigenfrequenzanregung des EV-CEA-Basisaufbaus durch 2- und 3-Zylinder	119
6.8	Größenvergleich von 2- und 3-Zylinder-Motoren (Abgeändert aus [47]) . . .	120

Literaturverzeichnis

- [1] ACHTERBERG, F. : Compliance by creative accounting - How 'supercredits' would undermine the EU's car CO₂ standards for 2020. In: *Greenpeace Report* (2013)
- [2] ADOLF, J. : Elektromobilität und Elektro-Hype - Potenziale, Performance, Alternativen. In: *Handbuch Elektromobilität* (2012)
- [3] ANDER, M. ; BEDNAR, W. ; GÖSSL, M. ; HAIDER, S. ; HELLER, C. ; JOBSTMANN, H. ; KÖTHER, T. ; LAMPERT, C. ; PAZDERNIK, K. ; POUPA, S. ; RIGLER, E. ; SCHIEDER, W. ; SCHINDLBACHER, S. ; SCHMID, C. ; SCHNEIDER, J. ; SCHMID-RUZICKA, S. ; SEUSS, K. ; STRANNER, G. ; STORCH, A. ; WEISS, P. ; WIESENBERGER, H. ; WINTER, R. ; ZECHMEISTER, A. ; ZETHNER, G. : Klimaschutzbericht 2013 / Umweltbundesamt. UmweltBundesAmt, 2013. – Forschungsbericht
- [4] BACHER, C. : *Validierungsbeispiel für ein Hybridantriebssystem (Vergleich Längsdynamik - Fahrzeugmessung zu Rechnung)*, TU Graz, Diplomarbeit, 2009
- [5] BACHER, C. ; HOHENBERG, G. : Electric Vehicle with Combustion Engine Assist (EV-CEA). In: *10th International Conference on Engines & Vehicles, Capri*, 2011
- [6] BACHER, C. ; HOHENBERG, G. : With electricity to ZEV? In: *TO ZEV - Highlighting the latest powertrain, vehicle and infomobility technologies* (2011)
- [7] BARROS, V. ; STOCKER, T. ; QIN, D. ; DOKKEN, D. ; EBI, K. ; MASTRANDREA, M. ; MACH, K. ; PLATTNER, G.-K. ; ALLEN, S. ; TIGNOR, M. ; MIDGLEY, P. : IPCC - Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: *Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York* (2012), S. 582
- [8] BARTSCH, M. ; DONCKER, R. W. D. ; AL., C. D.: *Elektromobilität - Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Achim Kampker and Dirk Vallee and Armin Schnettler - Springer Verlag, 2013
- [9] BEIDL, C. ; BUCH, D. ; HOHENBERG, G. ; BACHER, C. ; HAMMER, J. ; KUFFERATH, A. ; LEJSEK, D. ; EICHHORN, A. : Effizienter E-Fahrzeugantrieb mit dem kompakten CEA-Konzept - Combustion Engine Assist. In: *Der Antrieb von morgen - Auf der Suche nach der perfekten Energiekette, 7. MTZ-Fachtagung* (2012)

- [10] BEIDL, C. ; BUCH, D. ; WEICKGENANNT, P. ; HOHENBERG, G. ; BACHER, C. : Intelligentes Energie- und Betriebsmanagement für den kompakten CEA-Antrieb. In: *Antrieb von morgen - Sind kleine Motoren eine Lösung?, 8. MTZ-Fachtagung* (2013)
- [11] BEIDL, C. ; KLUIN, M. ; HOHENBERG, G. ; BACHER, C. : Elektrofahrzeuge mit oder ohne Range Extender - Wer bestimmt den Weg - Technologie, Kunde oder Gesetzgebung? In: *32. Internationales Wiener Motorensymposium*, Wien 2011
- [12] BERGER, R. : Electric Mobility - Challenges and opportunities for a future business model. In: *Powertrain 2020 - The Future Drives Electric* (2010)
- [13] BERGMANN, M. : *Schwacke Liste*. Internet. [http : //www.schwacke.de/](http://www.schwacke.de/). Version: August 2013
- [14] BERNSTEIN, L. ; BOSCH, P. ; CANZIANI, O. ; CHEN, Z. ; CHRIST, R. ; DAVIDSON, O. ; HARE, W. ; HUQ, S. ; KAROLY, D. ; KATTSOV, V. ; KUNDZEWICZ, Z. ; LIU, J. ; LOHMANN, U. ; MANNING, M. ; MATSUNO, T. ; MENNE, B. ; METZ, B. ; MIRZA, M. ; NICHOLLS, N. ; NURSE, L. ; PACHAURI, R. ; PALUTIKOF, J. ; PARRY, M. ; QIN, D. ; RAVINDRANATH, N. ; REISINGER, A. ; REN, J. ; RIAHI, K. ; ROSENZWEIG, C. ; RUSTICUCCI, M. ; SCHNEIDER, S. ; SOKONA, Y. ; SOLOMON, S. ; STOTT, P. ; STOUFFER, R. ; SUGIYAMA, T. ; SWART, R. ; TIRPAK, D. ; VOGEL, C. ; YOHE, G. : *Climate Change 2007: Synthesis Report / Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. 2007. – Forschungsbericht
- [15] BIER, M. : *Dissertationsvorhaben Maximilian Bier*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2014
- [16] BIRKHOFF, J.-M. : *Komfortobjektivierung und funktionale Bewertung als Methoden zur Unterstützung der Entwicklung des Wiederstartsystems in parallelen Hybridantrieben*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2013
- [17] BLESSING, U. C.: *Audi Duo Hybrid 1997*. Internet. [http : //www.hybrid – autos.info/Hybrid – Fahrzeuge/Audi/audi – duo – hybrid – 1997.html](http://www.hybrid-autos.info/Hybrid-Fahrzeuge/Audi/audi-duo-hybrid-1997.html). Version: Juli 2013
- [18] BOSCH, R. : *Elektromotor von Bosch für Hybridfahrzeuge*. [http : //www.bosch – presse.de/presseforum/](http://www.bosch-presse.de/presseforum/). Version: August 2013
- [19] BREINL, R. ; HERSCHOLD-PLIESSNIG, G. ; HOHENBERG, G. ; BACHER, C. : Thermomanagement-Konzept für kompakte Plug-in-Hybridantriebe. In: *Antrieb von morgen - Sind kleine Motoren eine Lösung?, 8. MTZ-Fachtagung* (2013)
- [20] BUCH, D. : *Drehschwingungsberuhigung von Hybridantrieben mit niedriger Zylinderzahl*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2014
- [21] BÜCHNER, W. : *Japan: Toyota Prius ist meistverkauftes Auto*. Internet. [http :](http://www.schwacke.de/)

- [//www.spiegel.de/auto/aktuell/japan – toyota – prius – ist – meistverkauftes – auto – a – 670788.html](http://www.spiegel.de/auto/aktuell/japan-toyota-prius-ist-meistverkauftes-auto-a-670788.html). Version: Januar 2010
- [22] CARSUK.NET: *Mercedes S 400 HYBRID*. Internet. [http : //www.carsuk.net/](http://www.carsuk.net/). Version: Juli 2013
- [23] CHMELA, H. ; WIEDERGUT, W. : *Grundlagen und Praxis der Freien Energie - Alternative Theorien und interessante Experimente*. Franzis Verlag, 2004
- [24] COREL, S. : *Alternative Antrieb für Automobile - Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger*. Bd. 2. Springer Verlag, 2008. – 344 S.
- [25] DINGER, A. ; MARTIN, R. ; MOSQUET, X. ; RABL, M. ; RIZOULIS, D. ; RUSSO, M. ; STICHER, G. : *Batteries for electric cars - Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020*. Electronic. [https : //www.bcgperspectives.com](https://www.bcgperspectives.com). Version: 2010
- [26] DRESIG, H. ; HOZWEISSIG, F. ; L., R. : *Maschinendynamik*. Bd. 6. Springer-Verlag, 2005
- [27] EICHHORN, A. : *Systematische Bewertung von 5 Brennverfahren an einem aufgeladenen 2-Zylinder Ottomotor*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2013
- [28] EUROPEANCARWEB: *European Car News*. Internet. [http : //www.europeancarweb.com/news](http://www.europeancarweb.com/news). Version: 05. Juli 2013
- [29] FINKEN, T. : *Fahrzyklusgerechte Auslegung von permanenterregten Synchronmaschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. Shaker Verlag, 2011
- [30] FISCHER, R. : Four are enough. In: *Innovative Automotive Transmissions, Hybrid & Electric Drives 2* (2012), S. 1242
- [31] FLECK, A. : HFW Model Reference / Technische Universität Wien. 2012. – Forschungsbericht
- [32] FREY, T. : *Prius-Wegweisend*. Internet. [http : //www.toyota.at/](http://www.toyota.at/). Version: Juli 2013
- [33] GIESLER, D. : *Aufbau des Elektro Motors*. Internet. [http : //www.bs – wiki.de/mediawiki/index.php?title = Elektromotor](http://www.bs-wiki.de/mediawiki/index.php?title=Elektromotor). Version: Juli 2013
- [34] GÖSCHEL, B. : Elektrifizierung Antrieb. In: *Ausgewählte Kapitel der Verbrennungskraftmaschine TU Graz* (2008)
- [35] HACKMANN, W. : Fremderregte Synchronmaschine im Einsatz als Achshybridantrieb. In: *Vortrag am Institut für Elektrische Energiewandlung, TU Darmstadt*
- [36] HAUTZINGER, H. ; MAYER, K. : Analyse von Änderungen des Mobilitätsverhaltens - insbesondere der PKW - als Reaktion auf geänderte Kraftstoffpreise / IVT - Im

- Auftrag für das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen Bonn. 2004. – Forschungsbericht
- [37] HOFMANN, P. : *Hybridfahrzeuge*. Springer Wien New York, 2010
- [38] HOHENBERG, G. ; BEIDL, C. ; HÖFLER, D. : *Drehschwingungsberuhigung von Hybridantrieben mit niedrigen Zylinderzahlen*. Wiener Motorensymposium, 2013
- [39] HOHENBERG, G. : Hybridvorlesung im Rahmen der Verbrennungskraftmaschinen / Technische Universität Darmstadt - Institut für Verbrennungskraftmaschinen. 2009. – Forschungsbericht
- [40] HOHENBERG, G. ; BACHER, C. ; BEIDL, C. ; BUCH, D. : Range Extended E-Mobility. In: *Innovative Fahrzeugantriebe 2012 - Perspektiven in Markt und Technologien*, 2012
- [41] INTERNATIONAL AVL CONFERENCE ENGINE & ENVIRONMENT 26th: Podiumsdiskussion. In: *Entwicklungsschritte bei Tesla S*, 2013
- [42] JANKOVIC, D. : Einfluss von Drehschwingungen auf die Verluste einer permanenterregten Synchronmaschine. In: *Bachelorthesis* (2013)
- [43] JANSSENS-MAENHOUT, G. : *Emission Database for Global Atmospheric Research*. European Commission - JRC Joint Research Centre, IES Institute for Environment and Sustainability, 2011
- [44] KASPER, K. ; FINGERHUTH, S. ; KLEMENZ, M. ; FIEDLER, J. ; DONCKER, R. D. ; VORLANDER, M. : Psychoacoustic quantities and their relevance for sound-quality optimization of switched reluctance machines. In: *Power electronics and applications - European Conference*, 2005
- [45] KLIMA, B. : *Vorentwicklungsprozess 'Teilelektrifizierung dieselmotorischer Fahrzeuge'*, Technische Universität Graz - Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Diss., 2012
- [46] KLOSS, A. : *Elektrofahrzeuge, vom Windwagen zum Elektromobil*. Berlin : VDE-Verlag, 1996
- [47] KNAPP, P. : *VKM Varianten für den Einsatz als kleiner RE in einem Elektrofahrzeug*, Technische Universität Graz, Diplomarbeit, 2010
- [48] LÜPKES, K. : Analyse des Fahrereinflusses auf die Emissionen und das Systemverhalten von Voll-Hybridfahrzeugen im Realverkehr / Bachelorthesis, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe, TU Darmstadt. 2011. – Forschungsbericht
- [49] MAHR, B. ; KORTE, V. ; BASSETT, M. ; WARTH, M. : Das Range-Extender-Konzept

- von MAHLE Powertrain. In: *6. MTZ Fachtagung. Der Antrieb von morgen* (Wolfsburg 2011)
- [50] MARTIN, S. : Untersuchungen am 3-Zylinder Verbrennungsmotor / Technische Universität Darmstadt. 2013. – Forschungsbericht
- [51] MESSENGER, G. : *Analysis and implementation of an active damping control of torque oscillation caused by a combustion engine in an automotive parallel range extender powertrain using the electric motor*, Technische Universität Darmstadt; Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe, Diplomarbeit, 2011
- [52] NAUNIN, D. : *Hybrid-, Batterie und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge*. Expert Verlag, 2007
- [53] NÖST, M. ; ROM, W. ; HOHENBERG, G. ; BACHER, C. : Simulation und Validierung von elektrischen Antrieben mit VKM-Unterstützung unter Berücksichtigung von Verkehrs- und Umweltinformationen - Range Extender und/oder Informationen per Infrastruktur-Fahrzeug-Kommunikation als Wegbereiter der E-Mobilität? In: *VDI-Fachkonferenz - Berechnung und Erprobung bei alternativen Antrieben* (2011)
- [54] NOTKER, A. : Active damping of drive train oscillations for an electrically driven vehicle. In: *IEEE/ASME transactions on mechatronics* 9 (2004)
- [55] OBERHUMMER, A. : *Modeling and Control of Hybrid Electric Vehicle Powertrains for Multibody Vehicle Simulation*, Technischen Universität Wien, Diplomarbeit, 2012
- [56] PETIT, J. R. ; TÖPFER, K. ; SORENSEN, S. : Vital Climate Graphics. In: *Intergovernmental Panel on Climate Change* (01.07.2013)
- [57] PIETRO, C. : Torque-oscillations damping in micro-cogeneration units with high brake mean pressure engines and pm-brushless generators. In: *2nd IEEE ENERGYCON Conference - Advances in Energy Conversion Symposium* (2012)
- [58] (RAHMENRICHTLINIE): RICHTLINIE 2007/46/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND DES RATES. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (5. September 2007)
- [59] RAU, M. : *Hybridantrieb - Doppelt fährt besser*. Internet. [http : //www.greengear.de/](http://www.greengear.de/). Version: Juli 2013
- [60] REICK, W. : Torsionsschwingungsisolierung im Antriebsstrang. Ein Wertungsversuch. In: *LUK-Kolloquium*, 2008
- [61] RUDOLF, P. ; MANFRED, K. ; THEODOR, S. : *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*. Springer, 2002
- [62] SARAZIN, R. : Vorrichtung zur Vermeidung der Torsionsschwingungen in Wellen mit-

- tels pendelnder Massen. In: *Patentschrift Nr. 597091 des Reichspatentamtes 597091* (1934), Nr. 597091
- [63] SCHNEIDER, E. ; FICKEL, F. ; CEBULSKI, B. ; LIEBOLD, J. : Hochintegrierte, modular skalierbare elektrische Antriebseinheit für E-Fahrzeuge. In: *19. Aachener Kolloquium* (2010)
- [64] SEIFFERT, R. : *Das Genie und sein Auftrag für eine Technik die sich nicht durchsetzte.* FAZ, 2000
- [65] STRAMETZ, F. : *Beitrag zur Simulation von Elektrofahrzeugen mit Range-Extender,* TU Graz, Diplomarbeit, 2014
- [66] THEISS, K. : *Verfahren zum Betreiben eines Hybridantriebes, insbesondere eines Kraftfahrzeuges.* 2011
- [67] WEICKGENANT, P. : *Dissertationsvorhaben Weickgenannt,* Technische Universität Darmstadt, Diss., 2014
- [68] WIMMER, A. U.-P. D. A.: *Skript: Thermodynamik des Verbrennungsmotors.* Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik - TU Graz, 2004
- [69] XIE, T. ; KNAACK, G. ; BRAATZ, N. : Zukünftiges Downsizing bei Ottomotoren-Potentiale und Grenzen von 2- und 3-Zylinder Konzepten. In: *30. Internationales Wiener Motorensymposium* (2009)
- [70] ZINK, M. ; HAUSER, M. : Das Fliehkraftpendel. Anwendung, Leistung und Grenzen drehzahladaptiver Tilger. In: *ATZ 07-08/2009 Jahrgang 111* (2009)

Anhang

InMotion – Simulationsdaten

Vehicle Data Set

File Close

Vehicle Body Bodies Engine Suspensions Steering Tires Brake Powertrain Aerodynamics Sensors Misc.

Vehicle Body: Flexible

Flexible Vehicle Body

Override internally computed vehicle body proportioning

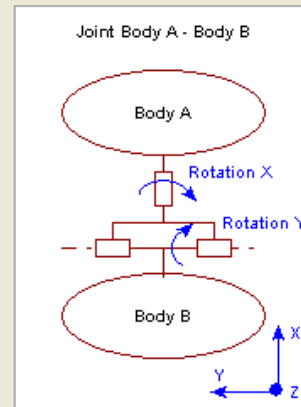
	x [m]	y [m]	z [m]	Mass [kg]	Ixx [kgm ²]	Iyy [kgm ²]	Izz [kgm ²]
Vehicle Body A	2.339	0.0	0.619	648.54	182.11	588.37	626.97
Vehicle Body B	2.339	0.0	0.619	501.55	182.11	588.37	626.97
Joint A - B	2.339	0.0	0.619				

Calculated vehicle overall mass [kg] **1300.00**

Stiffness

Mode: Characteristic Value

Stiffness [Nm/deg]	Rotation X (Torsion)		Rotation Y (Bending)	
	Angle [deg]	Torque [Nm]	Angle [deg]	Torque [Nm]
	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.5	2500.0	0.5	7500.0
	1.0	5000.0	1.0	15000.0
Amplification [-]	1.0		1.0	
Damping [Nms/deg]	100.0		100.0	
Amplification [-]	1.0		1.0	



Vehicle Data Set

File Close

Vehicle Body Bodies Engine Suspensions Steering Tires Brake Powertrain Aerodynamics Sensors Misc.

All Axles

Select all tires

Front Axle

Tire front left

Examples/RT_195_65R15

Tire front right

Examples/RT_195_65R15

Rear Axle

Tire rear left

Examples/RT_195_65R15

Tire rear right

Examples/RT_195_65R15

Twin Tires

Vehicle Data Set

File Close

- Vehicle Body
- Bodies
- Engine
- Suspensions
- Steering
- Tires
- Brake
- Powertrain**
- Aerodynamics
- Sensors
- Misc.

Powertrain Model: **Generic** Driveline Model: **Front drive**

General Powertrain Options

Integration Substeps:

Kind of OpenXWD: **With Engine**

Front drive

Engine Model

Model: **Look-Up Table** Engine Orientation: **Transverse**

Inertia [kgm ²]	0.064
Idle Speed [rpm]	774.6
Starter Torque [Nm]	50.0
Speed Starter Off [rpm]	774.6
Torque Ignition Off [Nm]	-80.0
Speed Range [rpm]	- Min. <input type="text" value="500.0"/>
	- Max. <input type="text" value="8000.0"/>
Max. Engine Torque [Nm]	<input type="text" value="300.0"/>
Build-up time [s]	<input type="text" value="0.0"/>

Idle Speed Control

Engine Mapping

Fuel Consumption

Vehicle Data Set

File Close

- Vehicle Body
- Bodies
- Engine
- Suspensions
- Steering
- Tires
- Brake
- Powertrain**
- Aerodynamics
- Sensors
- Misc.

Powertrain Model: **Generic** Driveline Model: **Front drive**

General Powertrain Options

Integration Substeps:

Kind of OpenXWD: **With Engine**

Front drive

Gearbox

Model: **Manual**

Inertia in [kgm ²]	0.001
Inertia out [kgm ²]	0.014
Synchronisation Time [ms]	50

Forward Gears

gear [-]	ratio [-]	eta [-]
1	2.2987	0.98
2	1.1494	0.98
3		
4		
5		
6		

Reverse Gears

gear [-]	ratio [-]	eta [-]
1	-4.385	0.98
2		

Engine Mapping

Fuel Consumption

Vehicle Data Set

File Close

Vehicle Body Bodies Engine Suspensions Steering Tires Brake **Powertrain** Aerodynamics Sensors Misc.

Powertrain Model: Generic Driveline Model: Front drive

Engine Model

Engine Mapping

Fuel Consumption

Clutch

Gearbox

Differential Front

Differential Center

Differential Rear

Differential HangOn

General Powertrain Options

Integration Substeps: 5

Kind of OpenXWD: With Engine

Differential Front

Mounting: Left to Right Model:

Inertia in [kgm²]: 0.001

Inertia out [kgm²]: 0.001

Inertia Cage [kgm²]: 0.0

Transmission [-]: 4.1

Friction coeff. [Nms/rad]: 10.0

Efficiency [-]: 0.980

External Torque off
 External Torque to Differential
 External Torque to Wheels

Front drive

Vehicle Data Set

File Close

Vehicle Body Bodies Engine Suspensions Steering Tires Brake Powertrain Aerodynamics Sensors **Misc.**

Vehicle Graphics: VW_Golf5.png

Movie Geometry: VW_Golf5.obj

Vehicle Outer Skin:	x [m]	y [m]	z [m]
Rear lower left point	0.0	0.727	0.28
Front upper right point	4.204	-0.766	1.513

Twin Tires Rear Axle since CarMaker Version 3.5 on Tab Tires.

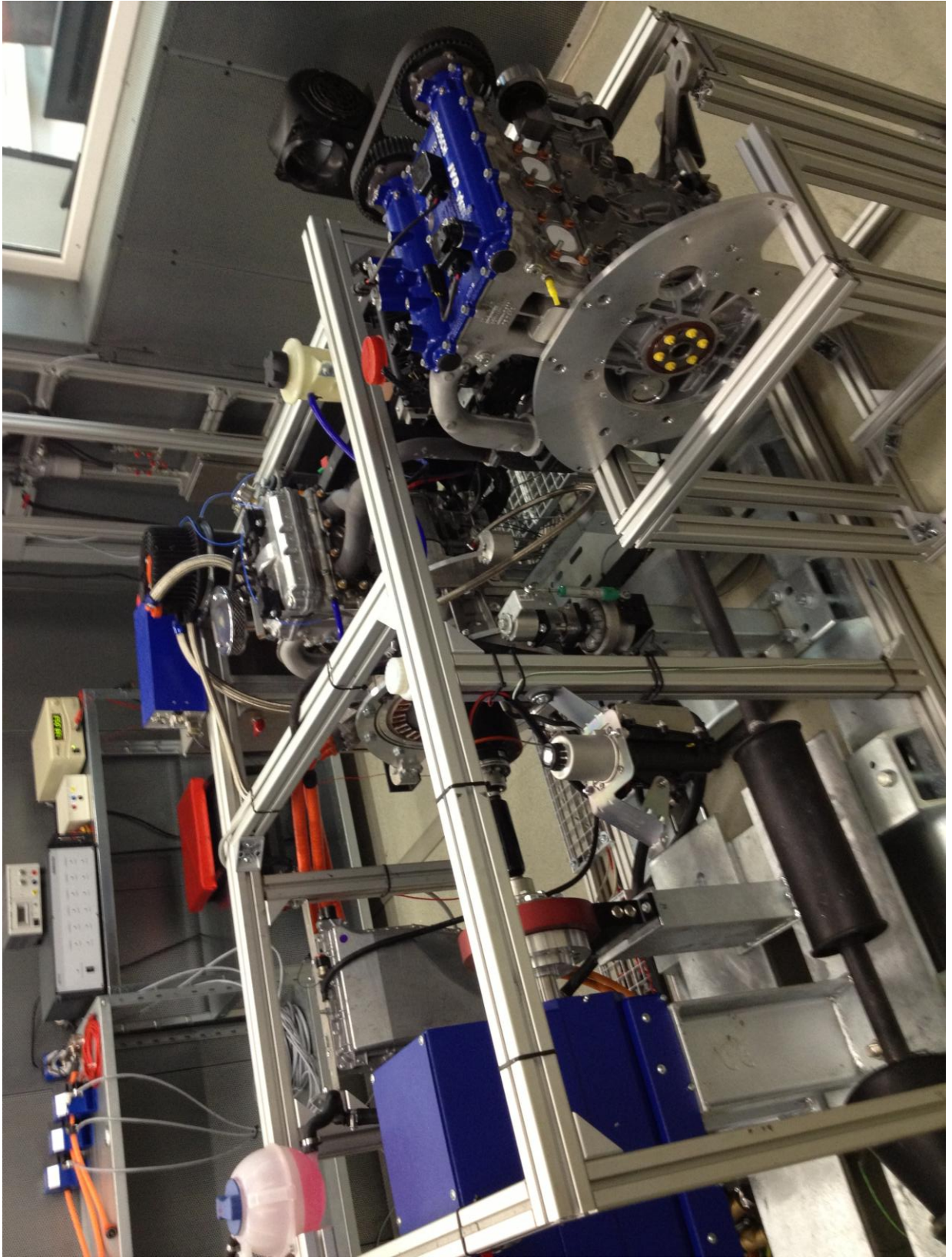
Description

Compact Car
length x width x height 4204.0 mm x 1759.0 mm x 1513.0 mm
wheel base 2578.0 mm
track width front 1540.0 mm
track width rear 1468.0 mm
part rear overhang 0.46
tire 195.0/60.0 R15.0

Additional Parameters

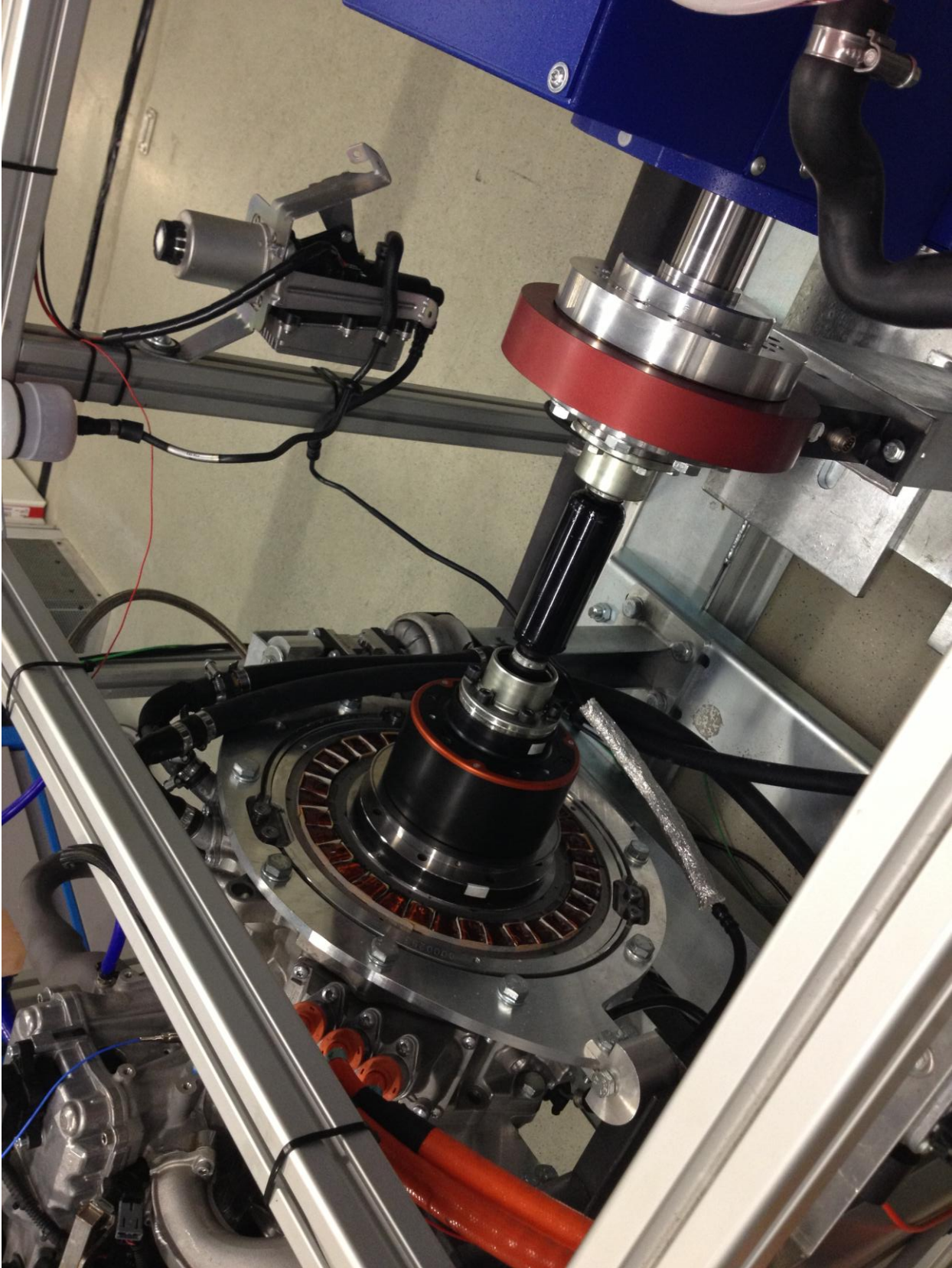
```
HFW.Controller_Params = CEA8C1.info
HFW.Powertrain_Params = CEA8PT1.info
VehicleControl.0.Kind = CEA_8_Control_1_1
VehicleControl.1.Kind = CEA_8_PT_1_1
```

IVD Entwicklungsprüfstand





tectos – Prüfstandswelle



t1000 SERIE

ELASTOMER-KLAUENKUPPLUNG



BESCHREIBUNG

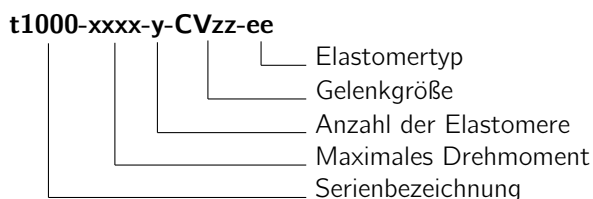
Die t1000 ist speziell für den Einsatz im Motorsport, Zweiradbereich sowie für Spezialanwendungen – wie z.B. Tests mit Zweimassenschwungrad oder originaler Fahrzeugkupplung – konzipiert. Diese Kupplung zeichnet sich durch ihr relativ geringes Gewicht, außerordentlich robustes Design, hohe Dämpfung und einfache Wartung aus.

Das Entwicklungsziel dieser Kupplung – sehr hohe Wechselmomente bei geringen Steifigkeiten zu übertragen – wurde in den verschiedenen Bauformen erreicht.

Durch das Bauprinzip der Kupplung ist es möglich, die Steifigkeit an verschiedenste Anforderungen anzupassen.

BEZEICHNUNG

Folgende Baugrößen mit 1 bis 3 Elastomeren stehen zur Verfügung:



EINSATZBEREICH

Drehmoment: bis zu 1500 Nm

Drehzahl: bis zu 10000 rpm

VORTEILE

- für höchste dynamische Belastungen
- schneller Elastomerwechsel durch kompakte und modulare Bauweise
- kein Elastomerversagen bei Überlast
- hohe Dämpfung und Lebensdauer
- Steifigkeitsanpassung durch spezifische Elastomerbestückung

FUNKTION

Durch die Bauform ist ein stark nichtlineares Verhalten der Kupplung gegeben. Die Konstruktionsart ermöglicht eine problemlose Anpassung an neue Gegebenheiten und eine extrem kurze Stillstandszeit beim Elastomerwechsel.



t1000 SERIE

ELASTOMER-KLAUENKUPPLUNG

t1000-800		Anzahl der Elastomere		
		1	2	3
Durchmesser	[mm]	152	152	152
Länge	[mm]	71,5	103,5	135,5
Massenträgheitsmoment	[kgm ²]	0,0059	0,0092	0,0124
Gewicht (nur Kupplung)	[kg]	2,6	3,8	5,0
Maximale Drehzahl	[rpm]		10000	
Nominelles Statisches Moment T_{KN}	[Nm]		800	
Maximales Statisches Moment $T_{K \max}$	[Nm]		3200	
Maximales Wechsellmoment $T_{KW \max}$	[Nm]		600	
Steifigkeitsbereich der Elastomere	[Nm/rad]	2000-12000	1000-6000	700-3000
Relative Dämpfung Ψ	[-]		1 - 2	
Maximaler Verdrehwinkel bei maximalem Moment	[°]	7,5	15	22,5
Elastomer Lebensdauer (Betriebsstunden)	[h]	Abhängig von den Einsatzbedingungen		
Maximale Betriebstemperatur für Elastomere aus Naturkautschuk*	[°C]		80	
Zahnzahl der Zahnkränze zur Drehzahlmessung**	[-]		64	

*Elastomere aus Silikon für höhere Betriebstemperaturen auf Anfrage

**Zahnkränze als Option erhältlich

t1000-1500		Anzahl der Elastomere		
		1	2	3
Durchmesser	[mm]	166	166	166
Länge	[mm]	71	104	137
Massenträgheitsmoment	[kgm ²]	0,0089	0,0138	0,0191
Gewicht (nur Kupplung)	[kg]	2,7	4,3	5,9
Drehzahl	[rpm]		10000	
Maximales Statisches Moment T_{KN}	[Nm]		1500	
Maximales Statisches Moment $T_{K \max}$	[Nm]		6000	
Maximales Wechsellmoment $T_{KW \max}$	[Nm]		1000	
Steifigkeitsbereich der Elastomere	[Nm/rad]	3000-14000	1500-7000	1000-4000
Relative Dämpfung Ψ	[-]		1 - 2	
Maximaler Verdrehwinkel bei maximalem Moment	[°]	5	10	15
Elastomer Lebensdauer (Betriebsstunden)	[h]	Abhängig von den Einsatzbedingungen		
Maximale Betriebstemperatur für Elastomere aus Naturkautschuk*	[°C]		80	
Zahnzahl der Zahnkränze zur Drehzahlmessung**	[-]		64	

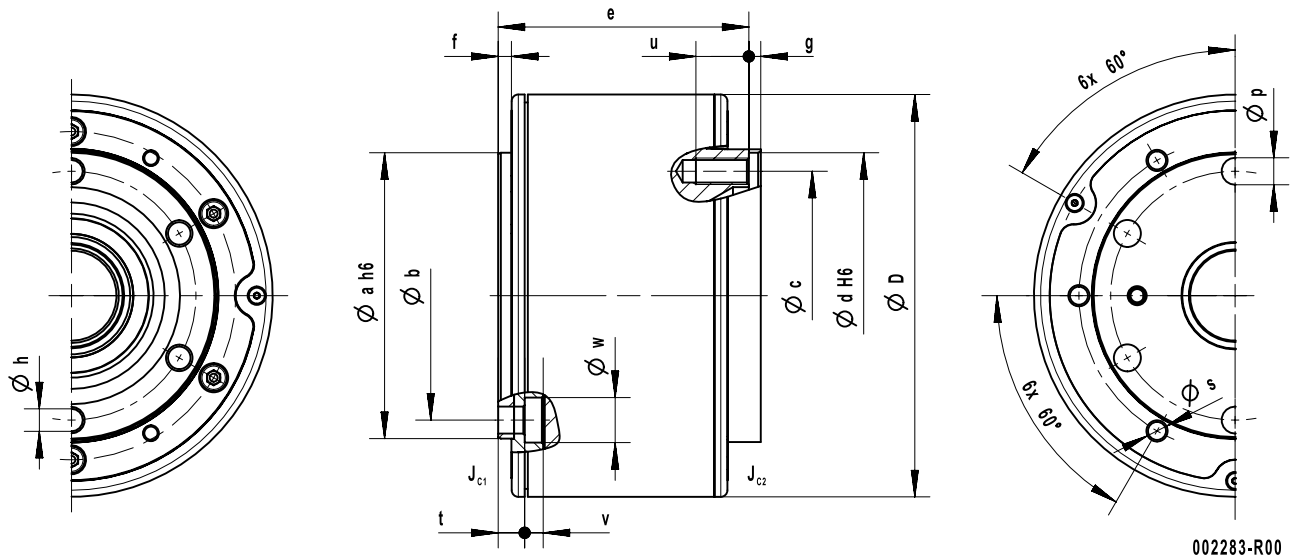
*Elastomere aus Silikon für höhere Betriebstemperaturen auf Anfrage

**Zahnkränze als Option erhältlich

Elastomere	Material	Shorehärte
Typ HN	Naturkautschuk	45 - 50° Shore A
Typ EN		50 - 55° Shore A
Typ WN		53 - 58° Shore A
Typ NN		63 - 68° Shore A
Typ SN (Standard)		73 - 78° Shore A
Typ UN		83 - 88° Shore A

t1000 SERIE

ELASTOMER-KLAUENKUPPLUNG



002283-R00

Kupplung	Gelenk	D [mm]	a (g5) [mm]	b [mm]	c [mm]	d (H6) [mm]	e [mm]	f [mm]	g [mm]	h [-]	p [mm]	s [-]
t1000-800-1	CV05	152	86	74	74	86	58,5	5	10,5	M8	9	M8
	CV10	152	94	80	80	94	58,5	5	4,5	M8	9	M8
	CV15	152	108	94	94	108	58,5	5	4,5	M10	10,5	M10
t1000-800-2	CV05	152	86	74	74	86	92,5	5	10,5	M8	9	M8
	CV10	152	94	80	80	94	92,5	5	4,5	M8	9	M8
	CV15	152	108	94	94	108	92,5	5	4,5	M10	10,5	M10
t1000-800-3	CV05	152	86	74	74	86	122,5	5	10,5	M8	9	M8
	CV10	152	94	80	80	94	122,5	5	4,5	M8	9	M8
	CV15	152	108	94	94	108	122,5	5	4,5	M10	10,5	M10

Kupplung	Gelenk	D [mm]	a (g5) [mm]	b [mm]	c [mm]	d (H6) [mm]	e [mm]	f [mm]	g [mm]	h [-]	p [mm]	s [-]
t1000-1500-1	CV10	166	94	80	80	94	55,35	5	4,5	M8	9	M8
	CV15	166	108	94	94	108	55,35	5	4,5	M10	10,5	M10
t1000-1500-2	CV10	166	94	80	80	94	88,35	5	4,5	M8	9	M8
	CV15	166	108	94	94	108	88,35	5	4,5	M10	10,5	M10
t1000-1500-3	CV10	166	94	80	80	94	121,35	5	4,5	M8	9	M8
	CV15	166	108	94	94	108	121,35	5	4,5	M10	10,5	M10

2013-05-29 <d1af0b4c42f2a57264e4becab3ea1c854a80f95b> DS DE 04

Messdatenerfassung



AVL COMBUSTION MEASUREMENT SYSTEMS

INDIMODUL GIGABIT™

POWERFUL AND COMPACT

The IndiModul™ is the perfect measurement instrument when a flexible and compact system is required for high sophisticated measurement tasks. The 8 high speed analogue inputs of the IndiModul™ can be used for a variety of applications in the field of combustion development. If more data acquisition channels are needed, the number can quite simply be quadruplicated by cascading 4 systems. The IndiModul™ is therefore an extremely flexible indicating system, offering the full performance of the IndiAdvanced series.

Your Benefits at a Glance

- Easy handling due to intuitive user interface
- Crank angle based data acquisition with simultaneous real-time evaluation of indicating and knock results (option: Real Time Knock Monitoring)
- Real time transfer of crank angle raw data (streaming) to PC memory for all typical test bed acquisition tasks and engine types
- Oscilloscope mode and single measurement in real-time, multi-channel digital voltmeter
- Event triggered measurement with pre and post history
- Channel individual measurement windows and measurement resolutions
- IndiPar: graphical parameterization for clear and easy access to hardware settings
- Numerous real-time result calculations available during measurement
- Built-in plausibility checks for a safe operation



AVL COMBUSTION MEASUREMENT SYSTEMS

Technical Data / Product Name

IndiModul Advanced GigaBit™

Product Description	Compact high speed data acquisition unit for crank angle related measurements in combustion engines.
Analog Input channels	8
Cascading	4 units (max. 32 channels)
Sampling Rate per Channel	14 Bit / 800kHz per channel
Resolution	0.025 / 0.05 / 0.1 / 0.2 / 0.5 / 1 °CA
On board memory	64 Mbyte (optional 256 Mbyte) for 8 channels
Analog Input Signal	+/- 10V
Digital In Channels	2 Input channels per acquisition module can be used as 8Bit and delta-t port
Digital Out Channels	8 output channels per acquisition module can be used as TTL or relais contact
Wait Input	TTL-compatible input socket for synchronization with other devices
Control Inputs	3 Inputs for CDM and Trigger signal
Pick Up In	Crank angle signal from Hall or inductive pick up
Differential input interface (optional)	Converter for analog signals into TTL level signals
CA marks output (optional)	Output for CA marks and trigger signal on different signal levels (TTL, LVDS, RS422)
Interface	GigaBit Ethernet interface to PC/Notebook
Recorder Channels (optional)	8 channel voltage input, ±10V (2 channels alternativ ±20V), 12 Bit/ 10 kHz resolution
DAC (optional)	16 channel voltage output DAC, ± 10V, 12 Bit resolution, accuracy ± 1 LSB
Testbed Connection	RS232 or TCP/IP
CAN Bus Output (optional)	CAN High Speed with Transceiver TJA1041, max. baud rate 1Mb/s
Special Measurement modes	Cold Start, Event Measurement, Event State, Continuous Monitoring, series measurement
Real Time Results	Single value, edge detection, heat release, IMEP, Knock, max. rise, maximum, minimum, mean value, polytropic coefficient, timing
Plausibility	Plausibility monitoring for indicating hardware and data with error output as Bit or message
SW Package	IndiCom Find more information about IndiCom: www.avl.com/indicom2
Temperature monitoring	temperature sensor for each data acquisition module, which activates an alarm tone and a pilot lamp when the temperature is exceeded
Temperature Range	-30 °C...50 °C
Dimensions W x H x D in mm/ Weight in kg	490 x 44 x 280/ 3
Power Supply	10,5...36 VDC
Application	The IndiModul Advanced GigaBit™ is the perfect measurement instrument when a small and compact system is needed. The IndiModul™ can be used at the test bed as well as in the vehicle.

Drehzahlerfassung

10 TECHNISCHE DATEN

10.1 GEBEREINRICHTUNG 365CC

Drehzahlbereich:	50 min ⁻¹ ... 20 000 min ⁻¹
Vibrationsfestigkeit axial und radial (gemessen am Winkelaufnehmerdeckel):	500 * 9,81 m/s ² (500 g) kurzzeitig bis 1000 g
Zulässige Umgebungstemperatur:	- 40° C ... + 70° C für die Elektronik - 40° C ... + 120° C für Mechanik und Optik im Stillstand Im Betrieb reduziert sich die zulässige Umgebungstemperatur um 2 °C je 1000 min ⁻¹
Zulässige Temperatur an der Montagefläche:	- 40° C ... + 100° C
Lebensdauer:	mind. 10 Millionen Umdrehungen bei 500 g Vibrationsbeanspruchung
Massenbelastung der Kurbelwelle:	je nach Anbaulage und Schutzschlauchlage ca. 300 g bei waagrechttem Haltearm ca. 350 g bei senkrechttem Haltearm
Trägheitsmoment der rotierenden Massen:	3,8 * 10 ⁻⁵ kgm ² Schwungmoment GD ² = 1,5 * 10 ⁻³ Nm ²
Schutzarzt:	IP54

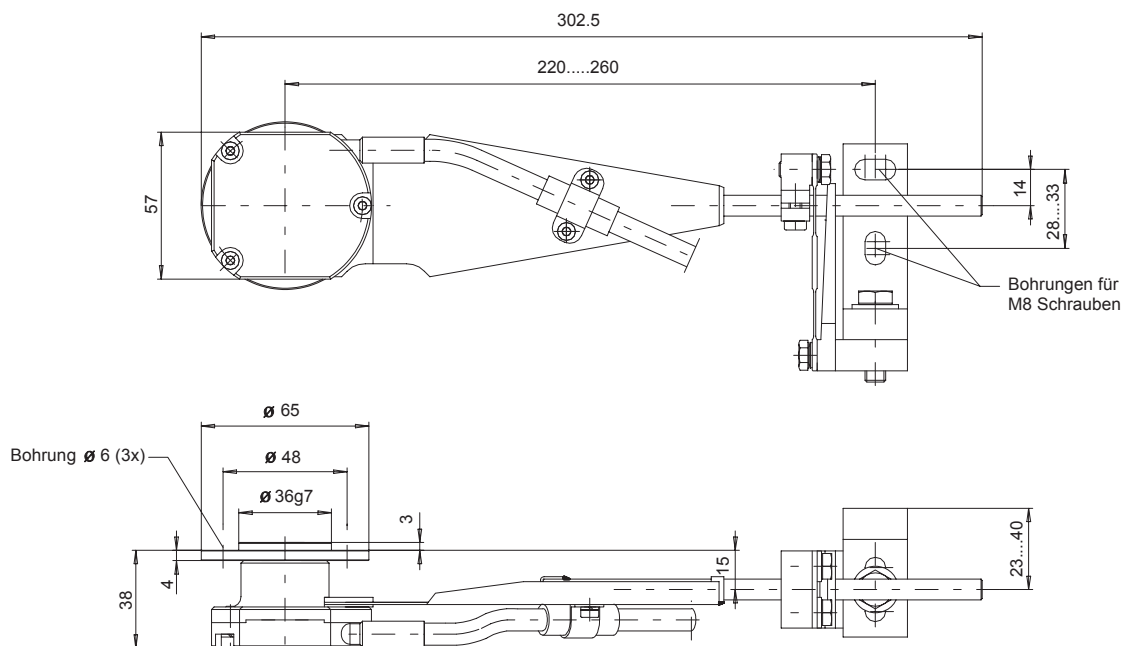
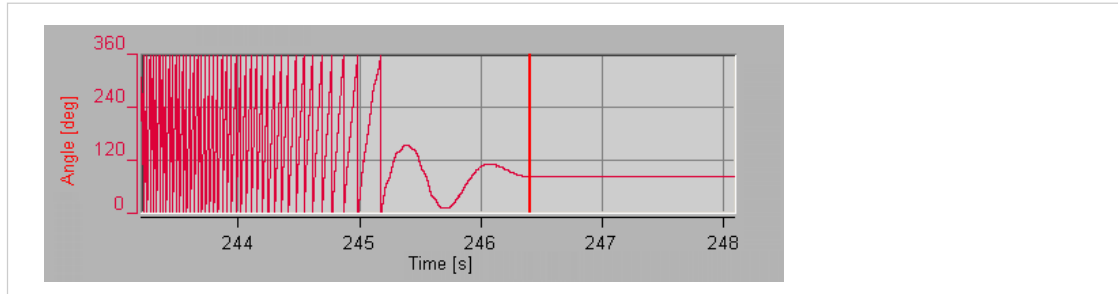


Abb. 33 Abmessungen der Gebereinrichtung



ACHTUNG!

Die Schutzschlauchummantelung besteht aus Silikon.
Die Gebereinrichtung ist mit geringen Mengen Silikon verklebt bzw. ausgegossen!



COMBUSTION MEASUREMENT TECHNOLOGIES

INDICATING WITH ABSOLUTE ANGLE MEASUREMENT

HYBRID ENGINE STOP-START ANALYSIS

Task / challenge:

Hybrid engine testing requires detailed analysis of engine stop and restart functions. Nearing standstill, the engine may reverse rotational direction, so that the angle position at standstill cannot be determined from incremental angle marks.

Solution:

Supplement the conventional incremental angle marks with a magnetic encoder which gives the absolute crank angle at all times.

Conventional indicating measurements are recorded on crank angle base.

Additionally the absolute crank angle is recorded on time base so that the measured crank angle value is available during standstill.

Components:

Angle Encoder AVL 365C with integrated magnetic encoder



**Indicating System:**

AVL Advanced Indicating system, running with IndiCom 1.5 or higher; Recorder function is required

- Indimodul 621
- Indiset Advanced family: 641, 642
- Indimaster Advanced family: 671, 672

Specifications of the magnetic encoder:

Type: magnetic principle

Function: Quad hall sensor

Resolution: 1 deg

Update latency: 50 μ s = 0.3 deg at 1000 rpm = 0.06 deg at 200 rpm

Setup and operation:

1. Optional: connect bit nr 9 of the Absolute Angle signal to a voltage input of the primary data acquisition board (I/O nr 1). This TTL signal carries the bit necessary for 1 deg resolution. Define this channel as a Recorder signal.
2. Connect the 8 bit Absolute Angle signal to the Digital-In port. The 8 bits carry the angle value with 2 deg resolution. Define this channel as Digital-In in Recorder mode.
3. Convert the crank angle based parameter set to time based.
4. Connect the 365C as usual (refer to the documentation AT2041).
5. Use the CalcGraf macro "AbsAngle.mac" to calculate the absolute crank angle. The angle shift between 0 deg absolute and the 365C TDC is determined by AVL and given in the data sheet.

Typical result:

During engine stop the crank shaft oscillates between the compressions in two cylinders.

