

**Potentialanalyse eines modellbasierten Ansatzes bei
Multivariantenapplikation in der PKW-Diesel-
Serienkalibrierung**

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplomingenieurs

verfasst von:

Julian Kutschera

Studienrichtung: Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau

Studienzweig Verkehrstechnik

Studienkennzahl F748

betreut von:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Eichlseder, TU Graz

Dipl.-Ing. Jochen Pramhas, TU Graz

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Platner, AVL List GmbH

Eingereicht im März 2013



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.

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

Seitens der AVL danke ich in erster Linie meinem Betreuer Dipl.-Ing. (FH) Stefan Platner für die engagierte Betreuung meiner Diplomarbeit: Ich möchte mich hiermit auch für die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit bedanken, sowie bei allen Leadingenieuren und Fachexperten, deren Input unerlässlich für das Zustandekommen dieser Arbeit war.

Seitens der Technischen Universität Graz bedanke ich mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder sowie bei Dipl.-Ing. Jochen Pramhas und Dipl.-Ing. Dr.techn. Eberhard Schutting für die Betreuung der Diplomarbeit.

Großer Dank gilt meinen Eltern, Sylvia und Hans Kutschera, die es mir ermöglichten, das Studium zu machen.

Kurzfassung

Die AVL List GmbH, unter anderem als Dienstleister im Bereich der Diesel-Serienkalibrierung tätig, steht in stetigem Wettbewerb. Um sich am Markt hervorzuheben und sich einen technischen wie wirtschaftlichen Vorteil zu erarbeiten, ist es unter anderem notwendig das eigene Know-How zu sichern und ständig weiter zu entwickeln. In dieser Arbeit wird der Einsatz eines eigens in der AVL entwickelten Motormodells aus Sicht der Diesel-Serienkalibrierung wirtschaftlich durchleuchtet. Bei tendenziell steigender Qualität der Arbeit sollen teure und aufwändige Tests und Messmethoden durch den Einsatz des Modells verringert werden, beziehungsweise auf kostengünstigere Versuchseinrichtungen (HiL-Prüfstand) übertragen werden. Neben dem Primärziel die Kosten zu verringern, will man sich auch flexibler auf Kundenanforderungen einstellen können, die Versuchseinrichtungen effizienter nutzen und neue Arbeitsweisen und Methoden etablieren.

Im ersten Schritt galt es zu klären, welche Genauigkeitsanforderungen hinsichtlich diverser physikalischer Meßgrößen wie Drücke, Temperaturen, Drehzahlen, etc. an das Modell gestellt werden, um Ergebnisse in der gewünschten Qualität zu erhalten. Mit diesen Informationen wurden dann die Kosten und der notwendige Ressourceneinsatz für die Kalibrierarbeiten bei Verwendung des modellbasierten Ansatzes abgeschätzt. Die Daten des Pendant, der konventionelle Ansatz, waren schon bekannt, beziehungsweise konnten einfach erstellt werden. Somit waren alle Größen für den Vergleich der beiden Arbeitsweisen vorhanden.

Bei der Ausarbeitung des theoretischen Vergleichs (ohne Grundlage eines realen Projektes) bekommt man ein Gefühl, wo der modellbasierte Ansatz schon gut einsetzbar ist und wie sich die Kosten und der Ressourceneinsatz verändern beziehungsweise verlagern. Die praxisorientierte Auswertung an Hand dreier Projektbeispiele zeigt, dass bereits bei relativ kleinen Projekten der Einsatz des Modells rentabel wird. Dies und die Erfahrungen, die man in der Diesel- Nutzfahrzeugmotorenentwicklung der AVL List GmbH bereits mit dem Modell gemacht hat, bestätigen, dass dieser Ansatz auch in der Diesel-PKW-Serienkalibrierung ein Werkzeug mit viel Potential für die Zukunft darstellt.

Abstract

One business of the AVL List GmbH is service providing in the field of diesel series calibration and is always in competition in this market. To build up an outstanding position on the market it is necessary to maintain and improve the company's own Know-How. Therefore the usage of an AVL built engine model in the diesel series calibration was economically evaluated. Keeping a tendentious quality of the work, expensive tests and measuring methods should become cheaper or be transferred to the more cost efficient HiL-testbed. Apart from the primary goal to reduce costs, AVL wants to be more flexible in terms of customer requirements, using the facilities more efficiently and to establish new working methods.

At the beginning it was to find out which accuracy for physical outputs of the model like temperatures, pressures, engine speed, ... is needed to gather results in the desired quality. Then the costs and the amount of resources for the calibration work by using the model based approach had to be estimated. The data for the conventional approach was already been available before, respectively could easily be created. All these data represent the baseline for the comparison of these two approaches.

First is the more theoretical comparison based on the data of the costs and resources to get a feeling where the model based approach can be used and how these data change due to using it. Second is the more practical comparison calculating three different projects. One outcome of this is that also executing smaller projects with the model based approach is profitable. This and the fact that AVL already built up some knowledge using the model in the field of heavy duty vehicles ratify a big potential in the field of passenger car series calibration.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	2
Danksagung	3
Kurzfassung	4
Abstract	5
Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Einführung	11
1.1 AVL List GmbH	11
1.2 Organigramm DES/DEO und Erklärung Arbeitsbereiche	13
1.3 Definition der Ausgangsbasis und Zielformulierung	14
1.4 Generelle Anmerkungen	15
2 Grundlagen	16
2.1 Einführung in die Kalibrierung	16
2.1.1 Was ist Kalibrierung/ Applikation?.....	16
2.1.2 Was wird kalibriert?	16
2.1.3 Wo wird kalibriert?.....	17
2.1.4 Definition „Leadvariante“ und „Derivate“	18
2.2 Theorie Modelle	19
2.2.1 Modelle	19
2.2.2 Die MoBEO-Methode	22
2.3 Ressourcenmodell (RM)	25
2.3.1 Eingabeblatt (Inputsheet)	27
2.3.2 Synergien (synergies)	29
2.3.3 Qualitätsstufen (quality gates).....	30
2.3.4 Kostenstruktur	33
2.3.5 Ergebnisse	34
2.4 PKW-Dieselskalibrierung konventionell	35
3 PKW-Dieselskalibrierung modellbasiert	37

3.1	Anforderungen an MoBEO	38
3.2	Die modellbasierte Kostenstruktur	42
4	Ergebnisse	45
4.1	Ergebnisse Arbeitspaket <i>Cycle Emissions & FC</i>	45
4.2	Ergebnisse auf Basis der Arbeitspakete	49
4.3	Ergebnisse Projektbeispiele	60
5	Künftige Anwendungsmöglichkeiten und Mehrwert des modellbasierten Ansatzes	73
6	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	76
	Quellen-/ Literaturverzeichnis	79

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: AVL Fakten [1].....	11
Abbildung 2: Organigramm Entwicklung Antriebssysteme	12
Abbildung 3: Organigramm DE	13
Abbildung 4: Arten einer Variante	18
Abbildung 5: Einteilung Modellvarianten	19
Abbildung 6: Unterscheidung lokale - globale Modelle [4].....	20
Abbildung 7: Eingliederung von MoBEO	21
Abbildung 8: Eigenschaften der Modelle	22
Abbildung 9: Aufbau MoBEO [3]	23
Abbildung 10: Anpassung MoBEO – Projekt [4].....	24
Abbildung 11: schematischer Aufbau Ressourcenmodell	26
Abbildung 12: Auszug Eingabebblatt RM.....	27
Abbildung 13: Auszug Synergien RM.....	29
Abbildung 14: Qualitätsstufen und Projektlaufzeit	30
Abbildung 15: Entwicklungsstufen.....	33
Abbildung 16: Auszug Kostenstruktur RM.....	34
Abbildung 17: Auszug Liste Anforderungen an MoBEO.....	38
Abbildung 18: Auszug Liste Anforderungen an MoBEO, Beispiel	39
Abbildung 19: Übersicht Auswertung Anforderungen an MoBEO	41
Abbildung 20: relative Darstellung der Anforderungen an MoBEO	41
Abbildung 21: Auszug konv. Kostenstruktur, Beispiel	42
Abbildung 22: Auszug modellbasierte Kostenstruktur, Beispiel.....	43
Abbildung 23: Auszug Summen-Kostenstruktur, Beispiel	44
Abbildung 24: theoret. Kostenvergleich, Beispiel	45
Abbildung 25: theoretischer Kostenvgl., Qualitätsstufen, Beispiel.....	46
Abbildung 26: Einsparung pro Ressource, Beispiel	48
Abbildung 27: theoretischer Kostenvergleich	49
Abbildung 28: Kosten pro Qualitätsstufe, Euro 5.....	51
Abbildung 29: Kosten pro Qualitätsstufe, Euro 6 mit SCR	51
Abbildung 30: Kosten pro Arbeitsbereich, Euro 6 - SCR.....	52
Abbildung 31: Einsparungen pro Ressource, Basis, Euro 6 – SCR	53
Abbildung 32: Einsparungen pro Ressource, Abgasnachbehandlung, Euro 6 – SCR.....	54
Abbildung 33: Kostenaufstellung Basis und Abgasnachbehandlung.....	55
Abbildung 34: Kosten Basis, N.....	56
Abbildung 35: Kosten Basis, A.....	56
Abbildung 36: Kosten Basis, V.....	57
Abbildung 37: Kosten Abgasnachbehandlung N	58

Abbildung 38: Kosten Abgasnachbehandlung A	58
Abbildung 39: Kosten Abgasnachbehandlung V	59
Abbildung 40: Zeitschiene Projekt A, Teil 1	61
Abbildung 41: Zeitschiene Projekt A, Teil 2	61
Abbildung 42: Projekt B, Zeitschiene Teil 1	62
Abbildung 43: Projekt B, Zeitschiene Teil 2	62
Abbildung 44: Projekt C Zeitschiene	63
Abbildung 45: Projektkosten konventionell	64
Abbildung 46: Projektkosten mit Einsparung	66
Abbildung 47: Projekt C, Kosten pro Arbeitsbereich	68
Abbildung 48: Projekt C, Basis, G1 - G5	69
Abbildung 49: Projekt C, Leistung und Emissionen, G1 - G5	70
Abbildung 50: Projekt C, Fahrbarkeit und Regler, G1 - G5	70
Abbildung 51: Projekt C, Abgasnachbehandlung, G1 - G5	71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Reifegrad der Parameter	31
Tabelle 2: Aufzählung der Ressourcen aus Abb. 31 und 32	53
Tabelle 3: Aufstellung Kostenvergleich	66
Tabelle 4: Projekt C, Umverteilung der benötigten Ressourcen	72

Abkürzungsverzeichnis

CRETA	AVL Software, Programm für Datensatz- und Labelhandling
OEM	engl.: Original equipment manufacturer
SoP	engl.: Start of Production
CAN/LIN	Kommunikationssysteme
MoBEO	engl.: Model Based Engine Optimization
HiL	engl.: Hardware in the Loop
NEDC	engl.: New European Drive Cycle, Fahrzyklus zur Bestimmung der Abgasemissionen, europäische Gesetzgebung
Euro 4/5/6	verschiedenen Stufen der Abgasgesetzgebung in Europa
SCR	engl.: selective catalytic reduction, Maßnahme zur außermotorischen Stickoxidreduzierung
ECU	engl.: engine control unit, Motorsteuergerät

1 Einführung

1.1 AVL List GmbH

AVL ist das weltweit größte unabhängige Unternehmen für die Entwicklung, Simulation und Prüftechnik von Antriebssystemen (Hybrid, Verbrennungsmotoren, Getriebe, Elektromotoren, Batterien und Software) für PKW, LKW und Großmotoren [1] (Abbildung 1).

Vorsitzender der Geschäftsführung: Prof. Dr. h.c. Helmut List
Unternehmensbereiche: Entwicklung Antriebssysteme AVL entwickelt und verbessert alle Arten von Antriebssystemen als kompetenter Partner der Motoren- und Fahrzeugindustrie. Die für die Entwicklungsarbeiten notwendigen Simulationsmethoden werden ebenfalls von AVL entwickelt und vermarktet.
Motorenmesstechnik und Testsysteme Die Produkte dieses Bereiches umfassen alle Geräte und Anlagen, die für das Testen von Motoren und Fahrzeugen erforderlich sind.
Advanced Simulation Technologies Die Simulationssoftware zur Auslegung und Optimierung von Antriebssystemen deckt alle Phasen des Entwicklungsprozesses ab.
Gegründet: 1948
Mitarbeiter: 5.250 (2.500 in Graz, weitere 2.750 weltweit)
Niederlassungen: 45 AVL-Gesellschaften
Exportanteil: 96 %
Anteil an eigenfinanzierter Forschung: ca. 12,5 % des Umsatzes
Umsatz 2011: 830 Millionen Euro

Abbildung 1: AVL Fakten [1]

Die AVL gliedert sich in drei Unternehmensbereiche – Entwicklung Antriebssysteme, Motorenmesstechnik und Testsysteme und Advanced Simulation Technologies. Die Diesel-Serienkalibrierung und ihre Einbettung in die Firmenhierarchie zeigt Abbildung 2.

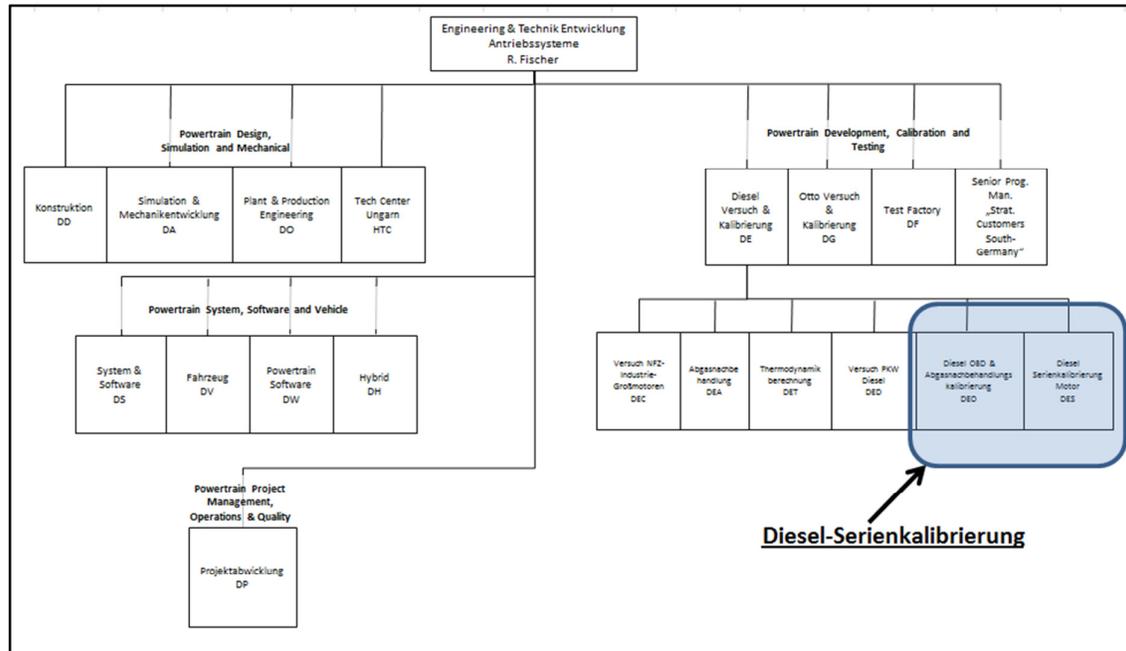


Abbildung 2: Organigramm Entwicklung Antriebssysteme

1.2 Organigramm DES/DEO und Erklärung Arbeitsbereiche



Abbildung 3: Organigramm DE

Die Diesel-Serienkalibrierung teilt sich organisatorisch auf die zwei Abteilungen DES (engl., diesel engine series calib.) und DEO (engl., diesel engine on board diagnostics) auf (Abbildung 3). Innerhalb dieser Abteilungen gibt es verschiedene Arbeitsgruppen (= Leadgruppen), die sich mit den entsprechenden Aufgaben beschäftigen und deren Leiter (= Leadingenieure) für den technischen Inhalt verantwortlich zeichnen. Für DES sind es die Bereiche „Basis“, „Leistung und Emissionen für PKW“, „Leistung und Emissionen für LKW“, „Fahrbarkeit und Regler“. Für DEO sind dies „Abgasnachbehandlung“ (EAS) und die „On Board Diagnose“ (OBD). Aufgaben der Arbeitsgruppe *Basis* sind zum Beispiel Optimierung des Kaltstartverhaltens, Hydraulikthemen am Einspritzsystem oder der Luftpfad. Im Bereich *Leistung und Emissionen* beschäftigt man sich mit der Anpassung der verbrennungsrelevanten Parameter zur Erfüllung der Emissions-, Verbrauchs- und Leistungsziele, sowie dem Bauteil- und Komponentenschutz. Abstimmung des Fahrverhaltens nach Kundenvorgaben, Ladedruckregelung, Geschwindigkeitsregler, Rauchbegrenzung, Überwachung und elektronische Bedatung sämtlicher Regler erfolgt durch die Mitarbeiter des Bereichs *Fahrbarkeit und Regler*. Die *Abgasnachbehandlung* ist verantwortlich für die Funkti-

on und Langzeithaltbarkeit der Abgasnachbehandlungskomponenten, wie zum Beispiel den Katalysator, den Dieselpartikelfilter oder den SCR-Katalysator (Selective Catalyst Reduction). Die On Board Diagnose wurde ausgehend von Kalifornien auch in Europa in den Gesetzestext übernommen und wird eingesetzt, um die abgasrelevanten Bauteile stetig zu überwachen. Auch soll damit sichergestellt werden, dass die Dauerhaltbarkeit des Fahrzeuges nicht durch einzelne schadhafte Teile reduziert wird.

1.3 Definition der Ausgangsbasis und Zielformulierung

Der Inhalt und Ablauf der Tätigkeiten und Aufgaben, wie sie nach Stand der Technik in der Dieselkalibrierung der AVL abgearbeitet werden, werden durch den sogenannten Kalibrierprozess beschrieben. Dieser dient als Ausgangsbasis, mit Hilfe des Ressourcenmodells (Erklärung in Kapitel 2.3.) sollen die Kosten theoretisch – ohne konkretes Projekt – und praktisch, an Hand von drei Beispielen der AVL-Projektlandschaft, berechnet werden.

Da es im Nutzfahrzeugbereich der AVL schon sehr positive Erfahrungen mit der Verwendung eines eigens entwickelten Motor- und Abgasnachbehandlungsmodells gibt, soll nun auch auf der PKW Seite der Dieselkalibrierung die Anwendung dieses Modells eingeführt werden.

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist, herauszuarbeiten, welche Tätigkeiten modellbasiert bearbeitbar sind, wie sich die Aufwände dadurch verschieben, beziehungsweise neu ergeben. Kernaussage soll sein, ab welcher Projektgröße und/oder Projektkinhalt sich der Einsatz des Modells wirtschaftlich lohnt.

Damit das Ressourcenmodell als Berechnungstool weiter verwendet werden kann, muss dieses für den modellbasierten Ansatz adaptiert werden.

Damit ergeben sich folgende logische Arbeitsschritte:

- Klärung, welche Arbeiten mit dem Modell machbar sind
- Erstellung einer Liste mit den Anforderungen dieser Arbeiten hinsichtlich der Ergebnisgenauigkeit (physikalische Größen wie Temperaturen, Drücke, Emissionen,...)
- Zusammenstellung der Kosten pro Arbeit bei Verwendung des modellbasierten Ansatzes und der Mengengerüste für die einzelnen Tätigkeiten
- Implementierung der neuen Kostenstruktur in das Ressourcenmodell

Danach sollen wieder die Kosten theoretisch und praktisch berechnet und den Ergebnissen der konventionellen Arbeitsweise gegenüber gestellt werden. Mit theoretischen

tisch ist der Vergleich auf Basis der Arbeitspakete gemeint und mit praktisch der Vergleich an Hand von Projektbeispielen (mehr dazu im Kapitel 4.1.).

1.4 Generelle Anmerkungen

- Die Aussagen, welche Arbeiten mit dem Modell möglich sind, die Angaben, wie sich die Aufwände neu ergeben, stützen sich vorwiegend auf die Einschätzung und Erfahrung der Leiter der Arbeitsbereiche sowie auf die Entwicklungsingenieure des Modells.
- Der Bereich der Diagnose (OBD) wird aus Zeitgründen bei dieser Arbeit nicht berücksichtigt, stellt aber einen Bereich dar, der noch viel Potential für den modellbasierten Ansatz bietet.
- Die Untersuchungen dieser Diplomarbeit basieren auf dem „Ressourcenmodell“ der AVL. Die darin hinterlegten Zahlen (Kosten, Ressourcen, etc.) sowie die daraus errechneten Gesamtkosten, können in dieser Diplomarbeit nicht offengelegt werden, und wurden daher unkenntlich gemacht (Kapitel 2 und 3). Die Ergebnisse in Kapitel 4 entsprechen in ihrem Zahlenwert aber der wirklichen Berechnung.

2 Grundlagen

2.1 Einführung in die Kalibrierung

2.1.1 Was ist Kalibrierung/ Applikation?

Unter Kalibrierung versteht man die Optimierung von Motor-/ Fahrzeugverhalten durch Optimierung von Parametern in einem Motorsteuergerät, ohne dabei Bauteile wie Motor, Getriebe, Antriebsstrang, Karosserie, Dämmungen, etc. zu verändern. Das bedeutet, Abgasemissionen, Geräuschemissionen, Fahrverhalten, Fahrbarkeit, Dauerhaltbarkeit und Bauteilschutz, werden rein auf elektronischem Weg für den Endkunden optimiert. Moderne Fahrzeuge besitzen eine Vielzahl an Steuergeräten, die elektrisch miteinander verbunden sind, kommunizieren und interagieren. Werden im Zuge der Entwicklung Bauteile wie zum Beispiel Turbolader, Injektoren,... zusätzlich variiert, fällt dies unter den Begriff Applikation – Applikation bedeutet also die bauliche Veränderung am System Motor, oder System Fahrzeug. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur Kalibriertätigkeiten behandelt.

2.1.2 Was wird kalibriert?

In den 1970er Jahren kam das erste Fahrzeug mit elektronischer Motorsteuerung auf den Markt. Damals noch eine relativ überschaubare Softwarestruktur zum Steuern eines Zentraleinspritzsystems („Mono-Jetronic“), umfassen heutige Motorsteuergeräte je nach Applikation 15000 bis 60000 Parameter und steuern sämtliche abgas-, diagnose- und fahrbarkeitsrelevanten Bauteile. Diese Parameter interagieren über eine vorgegebene Funktionsstruktur miteinander und sind entweder Mess- oder Verstellwerte. Zudem gibt es in modernen Fahrzeugen mehrere Steuergeräte (ABS-, Getriebe-, Motor,-...), die miteinander über Systembusse (CAN, LIN,..) kommunizieren. Die Themen der Diesel-PKW-Serienkalibrierung betreffen aber ausschließlich das Motorsteuergerät (ECU...Engine Control Unit).

2.1.3 Wo wird kalibriert?

Die grundlegende Auslegung der Parameter kann zum einen via Übernahme von bereits bestehenden, artverwandten Projekten, oder zum anderen durch eine völlige Neubedatung erfolgen. In der Praxis kommt es fast immer zu einer Mischung beider Methoden. Die Erstanpassung erfolgt auf einem Motorprüfstand, die weitere Anpassung dieser Bedatung erfolgt im Fahrzeug auf Fahrzeugprüfständen und in Straßenversuchen. Da Kundenfahrzeuge nicht nur unter Standardbedingungen – (20°C - 30°C & 1bar atmosphärischer Luftdruck) - bewegt werden, müssen sie daher auch unter Extrembedingungen, wie Höhe, Hitze, Kälte, funktionieren. Zunehmend wird, ermöglicht durch neue Software-Programme und immer höher werdende Rechenkapazitäten, Offline-Simulation und –Auslegung immer wichtiger. Großes Potential in diesem Zusammenhang haben die HiL - Prüfstände (Hardware in the Loop). Hier können einzelne Hardwareteile (Abgasrückführungsventil, Injektoren, Steller,...) beziehungsweise Softwarefunktionen isoliert getestet werden, ohne dass dafür ein kompletter Motor- oder Fahrzeugaufbau notwendig ist. Man benötigt dazu im Wesentlichen einen Kabelbaum, ähnlich dem späteren Kabelbaum im Fahrzeug, Steuergeräte je nach Anwendungsfall und die HiL-Vorrichtung inklusive Rechner, Auswerteeinheiten und Anschlussmöglichkeiten. Noch sehr wenig im Serienkalibrierungsbereich eingesetzt, sind die MiL - Anwendungen (Model in the Loop), die eine Vorauslegung am Schreibtisch, das heißt ohne jegliche Hardware oder Prüfstandsaufbauten, ermöglichen.

2.1.4 Definition „Leadvariante“ und „Derivate“

Als eine Variante wird in dieser Arbeit eine fixe Motor-Fahrzeug-Kombination bezeichnet und kann eine Leadvariante oder ein Derivat sein (Abbildung 4). Unter einer Leadvariante versteht man die Variante, von der sich möglichst viele weitere Varianten (= Derivate) ableiten lassen. Leadvarianten weisen meist den höchsten Adaptionsaufwand auf und binden in der Regel die meisten internen Ressourcen.

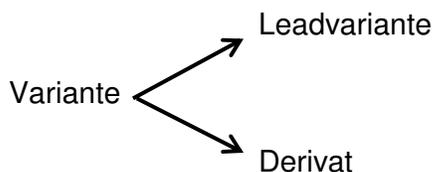


Abbildung 4: Arten einer Variante

Zum Beispiel ist dies für den Arbeitsbereich *Leistung und Emissionen* meist die Variante mit dem höchsten Fahrzeuggewicht, da es am herausforderndsten ist, die Emissionsziele zu erreichen. Für den Bereich Abgasnachbehandlung ist es wiederum in der Regel die leichteste Variante, da es aufgrund der geringeren Lastanforderung des Motors schwieriger ist, eine ausreichend hohe Temperatur zu den Abgasnachbehandlungssystemen zu transportieren.

Hat eine Variante technische Bauteile und Merkmale mit der Leadvariante gemein, dann wird diese Variante Derivat genannt. Die Einteilung in Derivate erfolgt nach Kriterien wie Grundmotoraufbau, Einbausituation im Fahrzeug, Einspritzsystem, Abgasnachbehandlungssystem, Getriebeart, Art und Hersteller der Sensoren und Aktuatoren, Zielmarkt mit dort gültiger Gesetzgebung, etc..., sämtliche Bauteile und Merkmale also, die das gewünschte Ergebnis der Kalibrierung beeinflussen.

So genannte Multivariantenkalibrierungen haben meist mehrere Leadvarianten (zum Beispiel vier und sechs Zylindermotor) mit mehreren Derivaten. Einbau in verschiedenen Fahrzeugtypen, oder verschiedene Zielmärkte, oder 2WD und 4WD, Handschalter und Automatikgetriebe etc....

2.2 Theorie Modelle

2.2.1 Modelle

Den Herausforderungen des Serienkalibriergeschäfts wie immer strenger werdende Abgas- und Diagnosegesetzgebungen, neue Abgasnachbehandlungstechnologien, Downsizing-Konzepte, Einsatz eines Motors in mehreren, unterschiedlichen Fahrzeugtypen, wird mehr und mehr mit Hilfe des Einsatzes computergestützter Motormodelle entgegen getreten. Abbildung 5 zeigt einen Überblick über die Modelltypen.

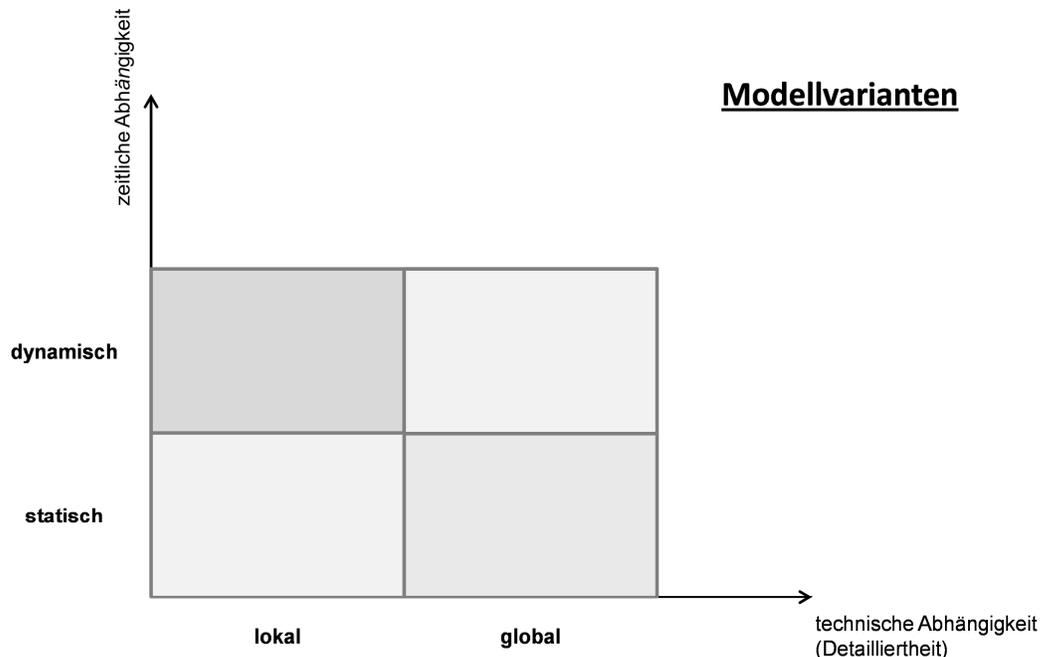


Abbildung 5: Einteilung Modellvarianten

- a) Statisch... zeitlich unverändertes Verhalten. Das Modell beschreibt eine bestimmte Situation zu einem bestimmten Zeitpunkt.
- b) Dynamisch... der Faktor Zeit wird explizit berücksichtigt. Es wird die Veränderung der Variablen im Modell über die Zeit betrachtet.
- c) Lokal... Drehzahl und Last (z.B. Drehmoment) werden fixiert und Variablen wie Einspritzdruck, Haupteinspritzzeitpunkt, Luftmenge,... werden variiert, um

zum Beispiel die Stickoxid Emissionen zu optimieren → Lastpunktabhängige Optimierung.

- d) Global... die gleichen Variablen und Zielsetzungen wie unter c), aber Drehzahl und Last werden ebenfalls variiert → Abdeckung sämtlicher Betriebspunkte im gemessenen Bereich (Abbildung 6)

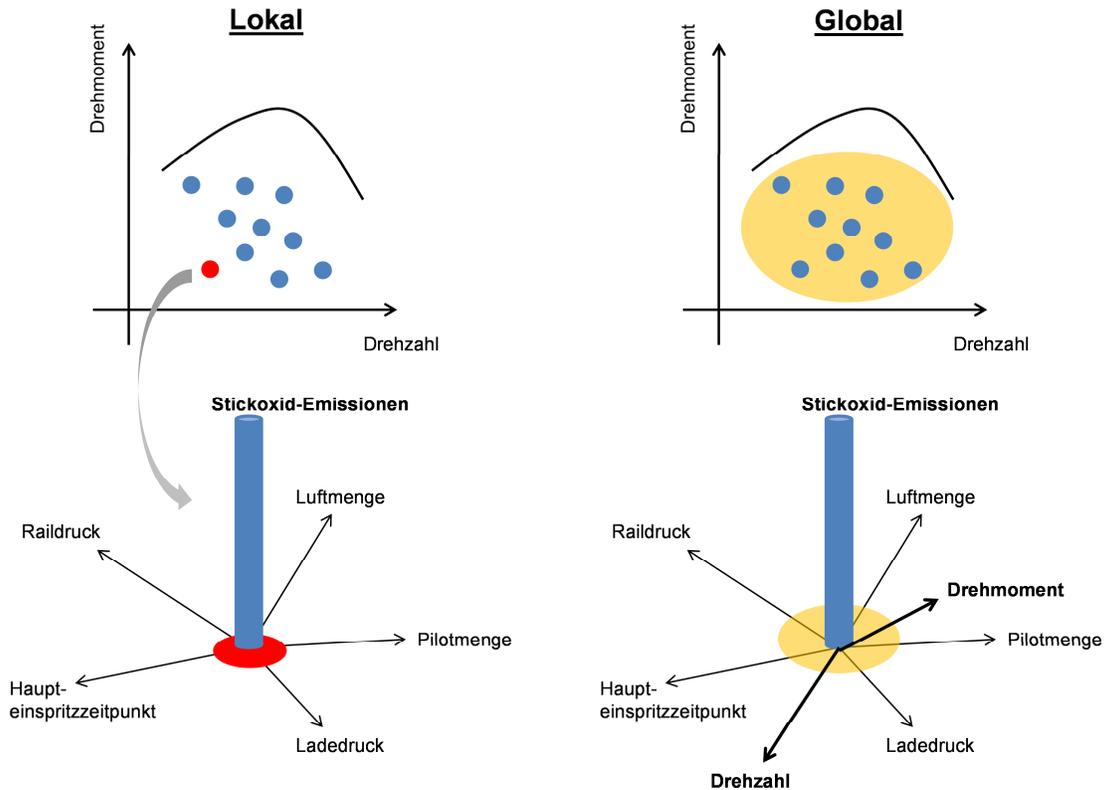


Abbildung 6: Unterscheidung lokale - globale Modelle [4]

Beispiele für die jeweiligen Modelltypen:

- statisch-lokale Modelle... 14-Mode-Abstimmung
- statisch-globale Modelle... Varianten Kalibrierung
- dynamisch-lokale Modelle... Regler Abstimmung
- dynamisch-globale Modelle...closed loop Motor-Simulation

Unterscheidung empirische und physikalische Modelle:

- empirische Modelle... das Verhalten eines Motors wird empirisch vermessen und dann datenbasiert modelliert. Es wird versucht, den Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Prozesses bestmöglich durch eine mathematische Gleichung abzubilden. Die Modellgüte hängt wesentlich von der Messqualität ab. Empirische Modelle benötigen normalerweise nur kurze Rechenzeit.
- physikalische Modelle... die Motormodelle werden hauptsächlich aus Bilanzgleichungen für Energie, Masse und Impuls und den thermodynamischen Zustandsgleichungen aufgebaut. Die Abbildungsgenauigkeit ist sehr hoch, erfordert aber genaues Wissen über die Prozesse und Zusammenhänge und erfordert normalerweise sehr viel Rechenleistung.

Das in dieser Arbeit zu Grunde liegende Modell MoBEO gliedert sich wie in Abbildung 7 dargestellt ein.

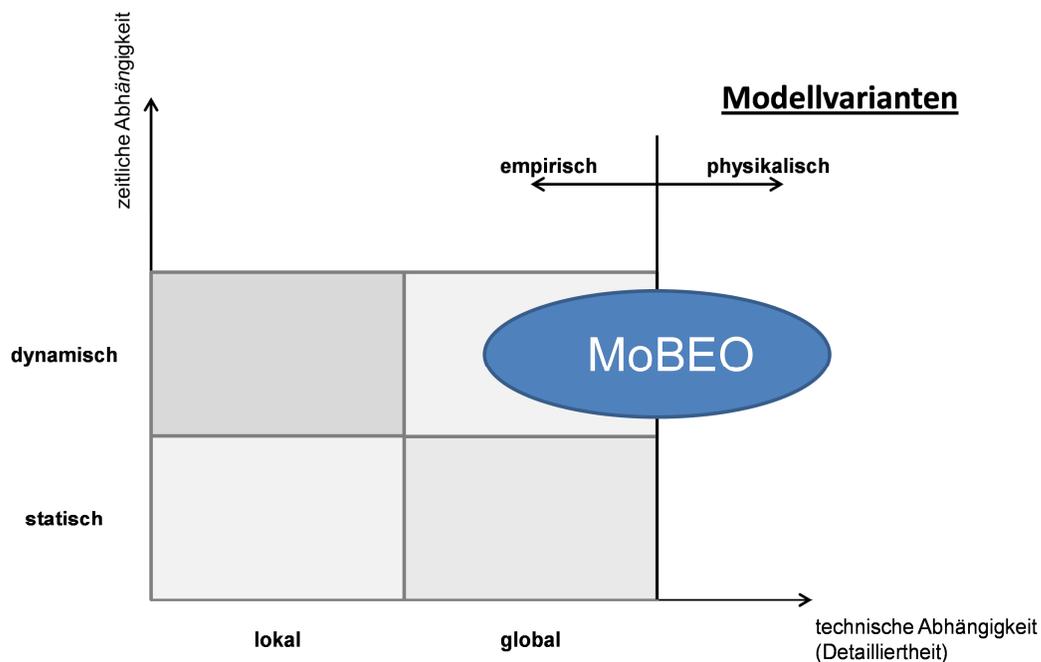


Abbildung 7: Eingliederung von MoBEO

Abbildung 8 zeigt einen Überblick über die Eigenschaften der drei Modellierungsarten.

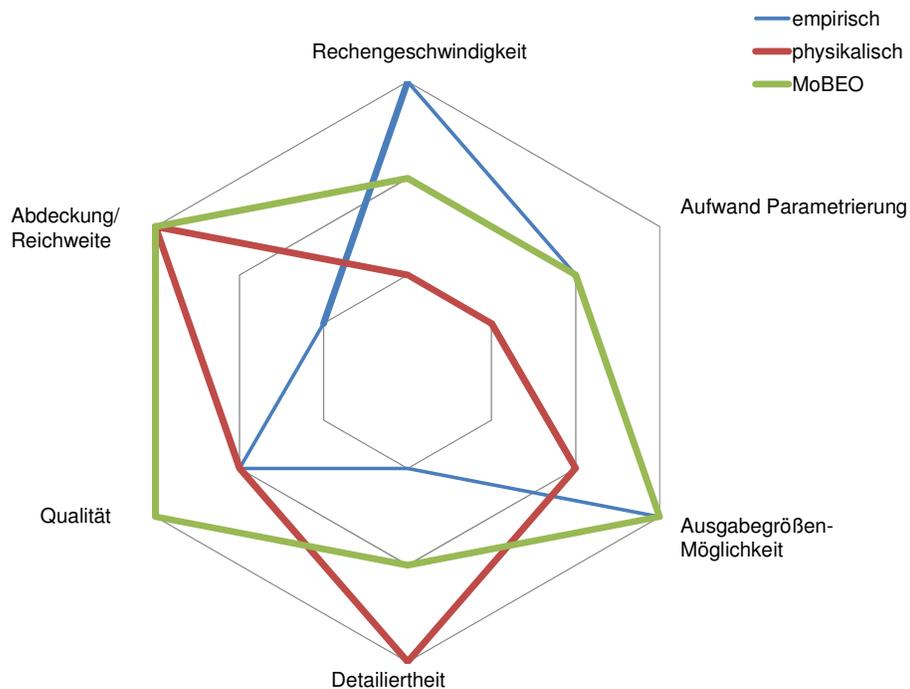


Abbildung 8: Eigenschaften der Modelle

2.2.2 Die MoBEO-Methode

MoBEO steht für modellbasierte Motor-Optimierung (Model Based Engine Optimization). Durch den Ansatz der semi-empirischen Modellbildung macht man sich die Vorteile beider Systeme zu Nutzen (kurze Rechenzeit bei hoher Abbildungsgenauigkeit und Detailliertheit, siehe auch Abbildung 8).

Die verwendeten Modelle bestehen aus drei Bereichen, dem virtuellen Motor und der virtuellen ECU, die über den Bereich der virtuellen Sensoren und Aktuatoren in Verbindung stehen (Abbildung 9). Das Motormodell umfasst die Verbrennung, Aufladung und Abgasrückführung sowie die gesamte Abgasnachbehandlung. Gasführende Strukturen sind auf Volumina und Strömungswiderstände reduziert, die Prozessgrößen hängen nicht vom Ort, sondern nur von der Zeit ab („null-dimensional“). [2]

Eingangsgrößen sind die Drehzahl und das geforderte Drehmoment, als Ausgabe-größen erhält man unter anderem Emissionen, Temperaturen, Kraftstoffverbrauch oder den Wärmeeintrag in das Kühlwasser. Randbedingungen sind die Kühlwasser-temperatur, Druck und Temperatur der Ansaugluft.

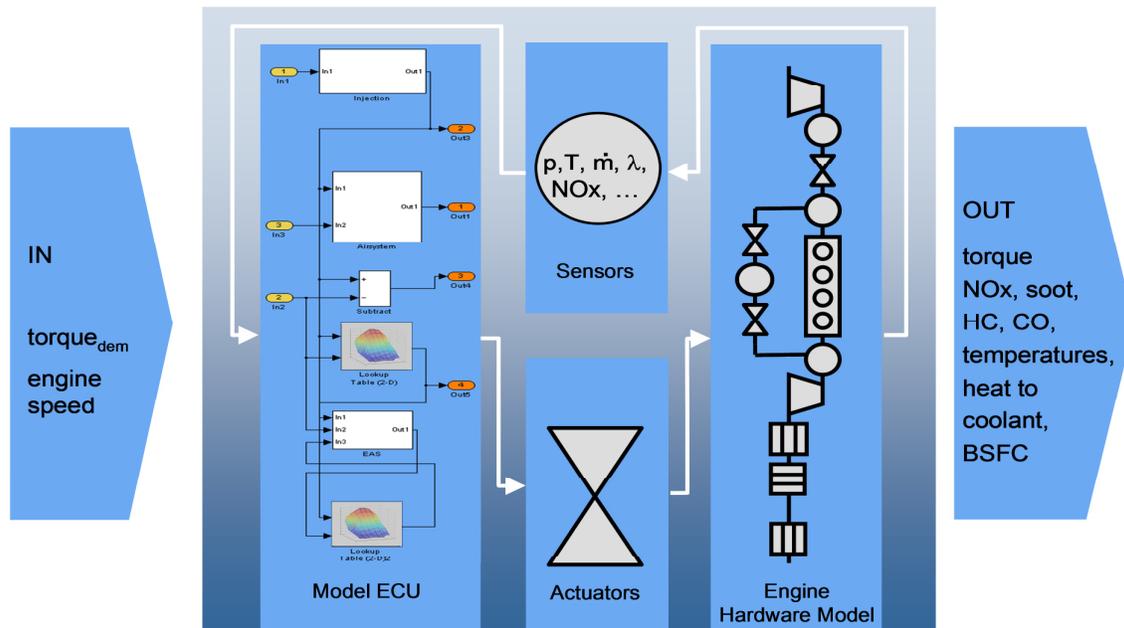


Abbildung 9: Aufbau MoBEO [3]

Kernelement der MoBEO-Methode ist die Erstellung und Ableitung der Simulationsmodelle aus Konstruktionsdaten, Bauteilbeschreibungen, Messdaten und Funktionsblöcken der Motorsteuerung mitsamt der Kalibrierung. [3]

Das bisher beschriebene Modell stellt die Grundstruktur dar, welches von AVL entwickelt wurde. Um dieses in einem Projekt anzuwenden, wird es in einem mehrstufigen Prozess mit Messdaten des Versuchsmotors auf die Projektanforderungen/-gegebenheiten abgeglichen. Abbildung 10 zeigt die Vorgehensweise bei der Anpassung von MoBEO auf das jeweilige Projekt.

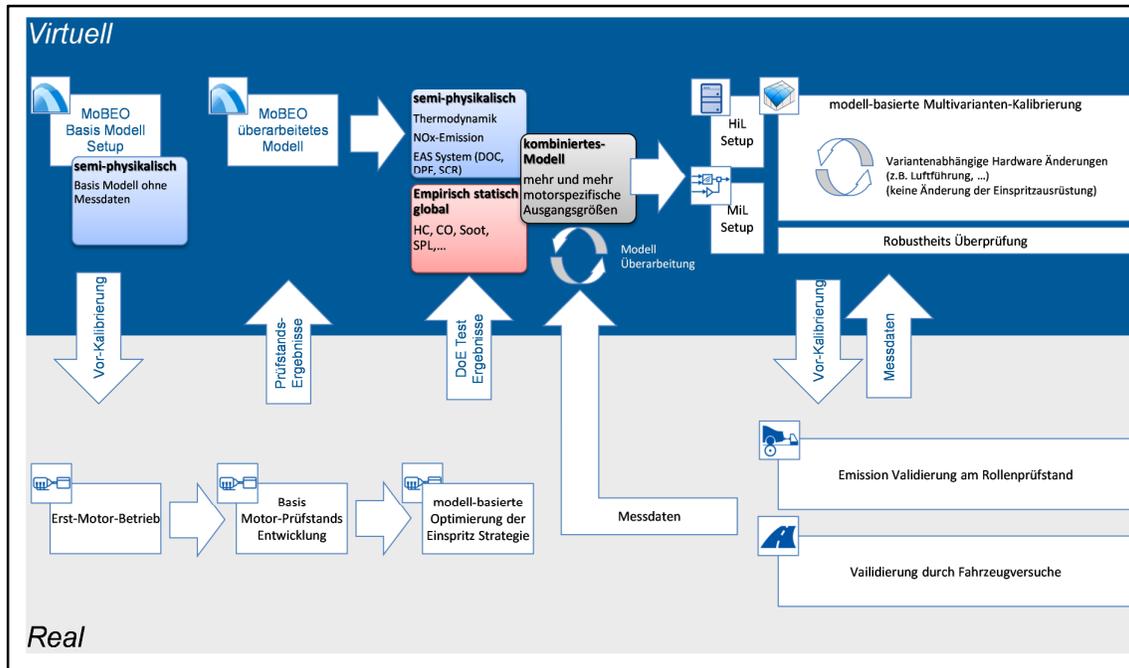


Abbildung 10: Anpassung MoBEO – Projekt [4]

Das vorhandene Basismodell kann zur Vorkalibrierung des realen Motors dienen, damit dieser am Prüfstand fehlerfrei in Betrieb genommen werden kann. Danach startet die Basis-Motor-Prüfstands Entwicklung, mit deren Daten das MoBEO-Motormodell überarbeitet wird. Zu diesem Zeitpunkt kann man modellbasiert schon thermodynamische Größen, Stickoxid-Emissionen vor und nach Abgasnachbehandlungssystemen ermitteln. Für die Modellierung von Rauch/Russ (Soot), Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoff (HC), braucht es die empirischen Daten des realen Motors.

Das entstandene kombinierte Modell ist somit aus Sicht der Entwicklung fertig, steht für die modellbasierte Serienkalibrierung im vollen Umfang zur Verfügung und kann durch weiteren Abgleich mit Messdaten aus diversen Versuchen weiter optimiert werden.

Abbildung 10 zeigt auch noch den Einsatz am HiL-Prüfstand, wo die gewonnenen Daten ebenfalls für eine Vorkalibrierung der Fahrzeugvarianten verwendet werden können, beziehungsweise die modellbasierte Kalibrierung stattfindet.

2.3 Ressourcenmodell (RM)

Das Ressourcenmodell ist ein Werkzeug, welches hauptsächlich zur Unterstützung für die Angebotslegung entwickelt wurde, aber darüber hinaus, auch ein Hilfsmittel für die Ressourcenplanung darstellt. Es baut auf Microsoft Excel auf und als Ressource sind hier Arbeitsstunden, Versuchseinrichtungen und Tests gemeint. Das Ergebnis ist eine Kostenaufstellung der durchzuführenden Tätigkeiten sowie der notwendige Aufwand an Ressourcen (= Mengengerüst). Dabei werden aber nur die Kosten für die Abarbeitung der einzelnen Arbeitsvorgänge in der Diesel-Serienkalibrierung berücksichtigt. Kosten für die Projektleitung, Werkstattarbeiten, Logistik, Deckungsbeitrag,... werden separat behandelt und sind nicht Thema dieser Diplomarbeit. Zudem sind diese für beide Ansätze (modellbasiert und konventionell) gleich anzusetzen.

Nachfolgend sind die Bestandteile des Ressourcenmodells aufgelistet und werden in den nachfolgenden Unterkapiteln genauer erläutert (siehe auch Abbildung 11). Die ersten drei Punkte stellen die Schritte der Eingabe der projektspezifischen Daten in das Ressourcenmodell dar.

1. Eingabe der Daten in das Eingabeblatt (Inputsheet)
2. Angaben zu etwaigen Synergien (Synergies)
3. Angaben zum Startzeitpunkt des Projekts im Sinne des Entwicklungsprozesses (Quality Gates)
4. Kostenstruktur
5. Kosten/Einheit der Ressourcen
6. Liste mit den Aufwänden und Kosten
7. Ergebnisse

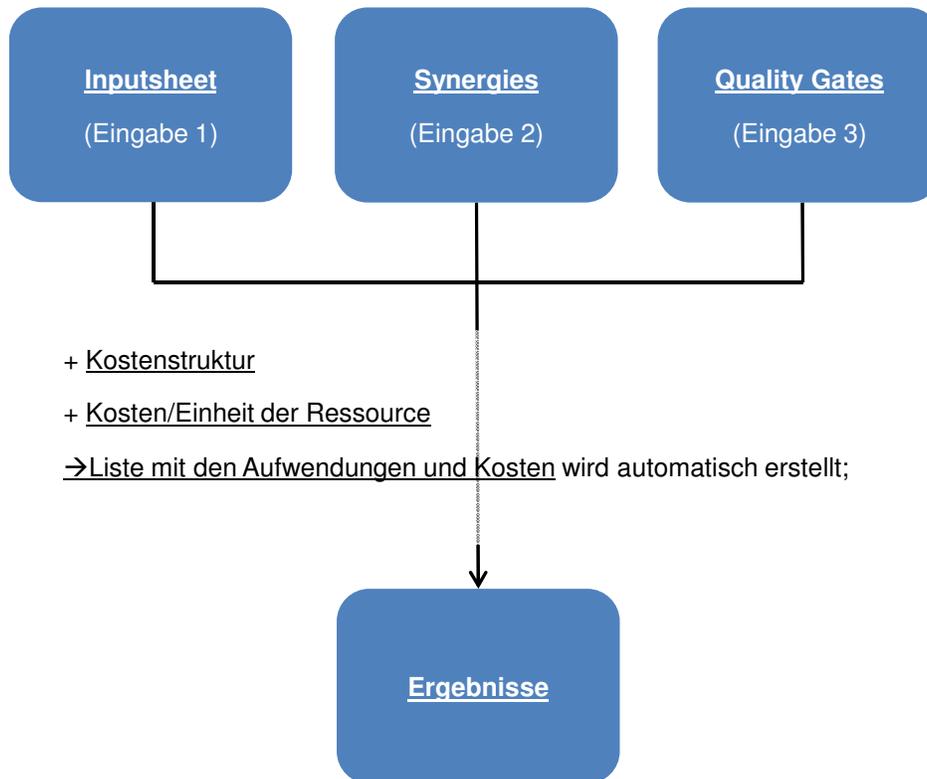


Abbildung 11: schematischer Aufbau Ressourcenmodell

2.3.1 Eingabeblatt (Inputsheet)

Group	Work Package	Sub-Category 1	Variante 1	Variante 2
Base	Torque Structure	Torque demand and limitations	V	V
Base	Torque Structure	Friction map	V	T
Base	Torque Structure	Accessories Modelling	V	T
Base	Torque Structure	Torque to fuel conversion	A	A
Base	Air System Modelling	Volumetric Efficiency Model	T	T
Base	Air System Modelling	EGR Cooler Model	T	T
Base	Air System Modelling	Pipe Model	T	T
Base	Air System Modelling	Combustion Model	T	T
Base	Air System Modelling	Compressor Model & Acoustics	N	N/A
Base	Air System Modelling	Turbine Model	N	N/A
Base	Air System Modelling	Turbo Acoustics	T	T
Base	Air System Modelling	Valve Models	N	N/A
Base	Air System Modelling	Model Based Charge Control	N	N/A
Base	Air System Modelling	Model Based Boost Control	N/A	N
Base	Injection System	Injector base map	T	T
Base	Injection System	Pilot Injection Drift Compensation	T	T
Base	Injection System	Pressure Wave Compensation	T	T
Base	Injection System	Fuel Temperature Correction	T	T
Base	Injection System	Fuel Path Lambda Adaption	T	T
Base	Sensor Calibration	HFM	T	T
Base	Sensor Calibration	Lambda sensor	T	T
Base	Sensor Calibration	NOx sensor (upstream and downstream catalyst)	T	T
Base	Sensor Calibration	PM sensor	N/A	N/A
Base	Sensor Calibration	Engine Position and Speed	T	T
Base	Sensor Calibration	Pressure and Temperature	T	T
Base	Sensor Calibration	Position Feedback	T	T
Base	Start and Warm Up	Engine warm up strategy	A	V
Base	Start and Warm Up	Injection parameters	A	V
Base	Start and Warm Up	Charge air parameters	T	T
Base	Start and Warm Up	Glow plug parameters / heating device	T	T
Base	Engine Coordinator	Stop-Start Coordinator	T	T
Base	Engine Coordinator	Operating Mode Coordinator	T	T
Base	Engine Coordinator	Hybrid Interface	T	T
Base	Energy Management	Electrical Energy Management	T	T
Base	Energy Management	Thermal Energy Management	T	T
PE	Full load and component protection	Engine testbed	V	V
PE	Full load and component protection	In-vehicle	V	V
PE	Cycle Emissions and FC	Engine testbed	A	A
PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	A	A
PE	Engine Map calibration	Engine testbed	V	V
PE	Engine Map calibration	In-vehicle	V	V
PE	Off Cycle Emissions	Engine testbed	A	A
PE	Off Cycle Emissions	In-vehicle	A	A

Abbildung 12: Auszug Eingabeblatt RM

Basis des Ressourcenmodells ist die Einteilung sämtlicher Tätigkeiten, die es im Rahmen der PKW-Diesel-Serienkalibrierung aktuell gibt - in Unterkategorien (sub category 1), die Abhängig vom Inhalt zu Arbeitspaketen (work package) zusammengefasst werden und deren Zuordnung zu den einzelnen Arbeitsbereichen (group). Der gängigen Ausdrucksweise der AVL folgend, wird im Folgenden eine Unterkategorie als Arbeitspaket bezeichnet. Die Anpassung dieser Arbeitspakete an neue Technologien und Vorgaben erfolgt in regelmäßigen Abständen. Insgesamt werden in dieser Diplomarbeit 80 Arbeitspakete betrachtet.

Die Angaben die im Eingabeblatt (Abbildung 12) zu erfolgen haben, sind die Angabe der Varianten und um welche Kalibrierungsmaßnahme es sich bei dem jeweiligen

Arbeitspaket handelt. In dieser Abbildung wurde zum Beispiel die Unterkategorie *torque demand and limitations* des Arbeitspakets *torque structure* der Gruppe *base* als zu verifizieren bewertet.

Die Art der Kalibriermaßnahme erklärt sich aufgrund der Bewertung der Ausgangsbasis. Diese Einteilung erfolgt in Neukalibrierung, Adaption, Verifikation oder Übernahme, da dies einen erheblichen finanziellen und zeitlichen Unterschied bewirkt.

N... Neu-Kalibrierung; das bedeutet, dass es keine Basis- oder Grundbedatung aus zum Beispiel einem Vorgängerprojekt gibt und somit eine komplette Neubedatung erforderlich ist (höchster Aufwand, dadurch höchste Kosten).

A... Adaption; es gibt Referenzdaten, die für das vorliegende Projekt verwendet werden können, aber noch angepasst werden müssen (zum Beispiel für andere Umgebungsbedingungen, andere Fahrzeugkategorien).

V... Validierung; es wird erwartet, die Referenzdaten komplett übernehmen zu können und diese nur verifizieren zu müssen. Es werden bestimmte Tests und Messungen durchgeführt. Sollte sich herausstellen, dass die Qualität der Referenzdaten ungenügend ist, bedeutet dies Mehraufwand und Mehrkosten, die gegebenenfalls neu verrechnet werden müssen. Im Ressourcenmodell bedeutet dies eine Umwandlung in A.

T... Takeover oder Übernahme; komplette Übernahme der Referenzdaten, ohne eine Überprüfung (geringster Aufwand, daher niedrigste Kosten).

N/A... nicht zu applizieren; im vorliegenden Projekt wird dieses Arbeitspaket nicht bearbeitet.

Angemerkt soll hier werden, dass Referenzdaten nicht nur von einem Projekt kommen müssen. Ein Beispiel: Das Fahrzeug ist bereits am Markt, die Hardware bleibt bis auf die Abgasnachbehandlungskomponenten gleich, aber als Entwicklungsziel wird die nächst höhere Emissionsstufe vorgegeben. Außerdem gibt es im Portfolio des Herstellers ein vergleichbares Fahrzeug mit ähnlichem Lastkollektiv, welches schon auf diese höhere Emissionsstufe ausgelegt wurde. Hier bietet es sich an, für Themen der Fahrbarkeit die Referenzdaten vom Vorgänger-Fahrzeug zu nehmen und für die Emissionierung die Daten des vergleichbaren Fahrzeuges mit ähnlichem Lastkollektiv. Als Eingabe für die einzelnen Arbeitspakete wäre in diesem Beispiel eine Adaption (A), eine Verifikation (V) oder, wenn der Unterschied sehr überschaubar ist, auch eine Übernahme (T) möglich.

2.3.2 Synergien (synergies)

Zwischen den an sich verschiedenen Varianten kann es auch zu Synergien kommen. Sind Daten nach einer erstmaligen Auslegung im Projekt für andere Varianten verwendbar, so bedeutet dies weniger Kalibrationsaufwand und das wird über diese Eingabematrix berücksichtigt (1 bedeutet keine Synergien und daher keine Möglichkeit zur Übernahme von Daten). Synergien können für Mannstunden und Betriebs-einrichtungen getrennt bewertet werden, es gibt also pro Variante jeweils zwei Spalten für ein Arbeitspaket.

In Abbildung 13 ist Variante 1 eine Leadvariante und Variante 2 bezieht sich darauf. Darin erkennt man, dass für die Variante 2 eine Aufwandsreduktion in der Höhe von 40 Prozent für einen Großteil der Arbeitspakete des Bereichs *Leistung und Emissionen* (PE, performance and emissions) zu erwarten ist.

Group	Work Package	Sub-Category 1	Variante 1		Variante 2	
			Facilities	Manpower	Facilities	Manpower
Base	Torque Structure	Torque demand and limitations	1	1	1	1
Base	Torque Structure	Friction map	1	1	1	1
Base	Torque Structure	Accessories Modelling	1	1	1	1
Base	Torque Structure	Torque to fuel conversion	1	1	1	1
Base	Air System Modelling	Volumetric Efficiency Model	1	1	1	1
Base	Air System Modelling	EGR Cooler Model	1	1	1	1
Base	Air System Modelling	Pipe Model	1	1	1	1
Base	Air System Modelling	Combustion Model	1	1	1	1
Base	Air System Modelling	Compressor Model & Acoustics	1	1	1	1
Base	Air System Modelling	Turbine Model	1	1	1	1
Base	Air System Modelling	Turbo Acoustics	1	1	1	1
Base	Air System Modelling	Valve Models	1	1	1	1
Base	Air System Modelling	Model Based Charge Control	1	1	1	1
Base	Air System Modelling	Model Based Boost Control	1	1	1	1
Base	Injection System	Injector base map	1	1	1	1
Base	Injection System	Pilot Injection Drift Compensation	1	1	1	1
Base	Injection System	Pressure Wave Compensation	1	1	1	1
Base	Injection System	Fuel Temperature Correction	1	1	1	1
Base	Injection System	Fuel Path Lambda Adaption	1	1	1	1
Base	Sensor Calibration	HFM	1	1	1	1
Base	Sensor Calibration	Lambda sensor	1	1	1	1
Base	Sensor Calibration	NOx sensor (upstream and downstream catalyst)	1	1	1	1
Base	Sensor Calibration	PM sensor	1	1	1	1
Base	Sensor Calibration	Engine Position and Speed	1	1	1	1
Base	Sensor Calibration	Pressure and Temperature	1	1	1	1
Base	Sensor Calibration	Position Feedback	1	1	1	1
Base	Start and Warm Up	Engine warm up strategy	1	1	1	1
Base	Start and Warm Up	Injection parameters	1	1	1	1
Base	Start and Warm Up	Charge air parameters	1	1	1	1
Base	Start and Warm Up	Glow plug parameters / heating device	1	1	1	1
Base	Engine Coordinator	Stop-Start Coordinator	1	1	1	1
Base	Engine Coordinator	Operating Mode Coordinator	1	1	1	1
Base	Engine Coordinator	Hybrid Interface	1	1	1	1
Base	Energy Management	Electrical Energy Management	1	1	1	1
Base	Energy Management	Thermal Energy Management	1	1	1	1
PE	Full load and component protection	Engine testbed	1	1	1	1
PE	Full load and component protection	In-vehicle	1	1	1	1
PE	Cycle Emissions and FC	Engine testbed	1	1	0,6	0,6
PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	1	1	0,6	0,6
PE	Engine Map calibration	Engine testbed	1	1	0,6	0,6
PE	Engine Map calibration	In-vehicle	1	1	0,6	0,6
PE	Off Cycle Emissions	Engine testbed	1	1	0,6	0,6
PE	Off Cycle Emissions	In-vehicle	1	1	0,6	0,6

Abbildung 13: Auszug Synergien RM

2.3.3 Qualitätsstufen (quality gates)

Die letzte Eingabegröße in das Ressourcenmodell ist die Angabe des Zeitpunkts des Projektstarts. Dies erfolgt über die AVL eigenen Qualitätsstufen. Diese Stufen bilden einerseits eine Zeitschiene im Projekt und sind andererseits auch Mittel zur Qualitätsüberprüfung der Kalibrierung.

Eine Zeitschiene für ein Projekt mit einer Variante ist in Abbildung 14 angegeben (Angaben in Monaten). Als Gesamtlaufzeit eines Projekts mit einer Variante ergibt sich somit, bei voller Ausführung des Kalibrierungsprozesses, ca. 2 Jahre. SoP ist der Serienproduktionsstart (Start of Production).

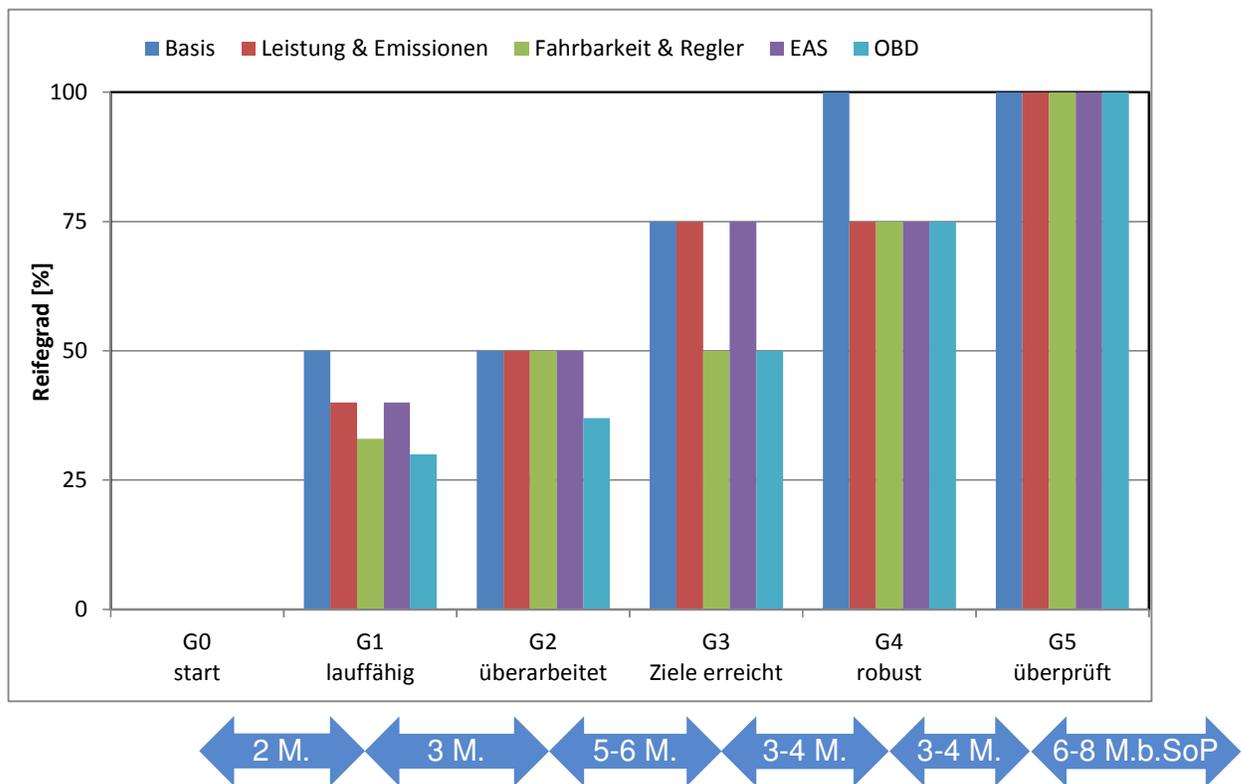


Abbildung 14: Qualitätsstufen und Projektlaufzeit

Die Qualitätsstufen G0 bis G5 sind über dem Reifegrad der Parameter aufgetragen. Abbildung 14 zeigt damit, bei welcher Qualitätsstufe welche Arbeitsgruppe mit ihren Parametern, und damit den Arbeitspaketen, wie weit fortgeschritten sein muss. Wie bereits erwähnt gibt es je nach Projekt bis zu 60000 Parameter, die nach Art und Wirkungsweise den Arbeitspaketen zugeordnet sind und abhängig von der Ausgangslage verschiedene Reifegrade haben können. Der Reifegrad eines Parameters besagt, ob dieser komplett neu zu bedaten ist oder schon bearbeitet wurde. Sei es

aufgrund einer Übernahme aus einem verwandten Projekt oder durch Vorarbeit einer anderen Abteilung oder des Kunden.

Tabelle 1: Reifegrad der Parameter

Prozent	Name	Beschreibung
0 %	unangetastet	Erste Softwareausführung, Labels noch nicht bearbeitet
25 %	vorkalibriert	Schreibtisch-Kalibrierung, noch keine Messungen aus Fahrzeug oder Prüfstand
50 %	kalibriert	Vorkalibrierung mittels Vermessungen eines Motors/ eines Fahrzeuges, am Prüfstand und im Fahrzeug unter Normal-Umgebungsbedingungen
75 %	geprüft	Auslegung bei sämtlichen Umgebungsbedingungen und mittels mehrerer Probanden
100 %	fertig	Final-Untersuchungen an Vorserienmotoren/-Fahrzeugen getätigt

Die Einstufung nach dieser Tabelle erfolgt bei Projektbeginn und kontinuierlich im Laufe des Projekts, da an Hand dessen der Fortschritt gemessen und die Zwischenziele kontrolliert werden. Für die Verwaltung der Parameter wird eine von AVL entwickelte Software - CRETA – verwendet. Diese Software wird damit auch zur Daten-satzhandhabung verwendet (Abgabe, Erstellung, Backup,...). Die Einstufung der Parameter ist jedoch für das Ressourcenmodell nicht erforderlich, erst bei tatsächlichem Beginn des Projekts wird eine Datenbank mit den Projektdaten in CRETA aufgesetzt.

Diese Einstufung des Projekts auf Basis der Qualitätsstufen zeigt somit den Ausgangspunkt und den Ausgangsreifegrad des Projekts. Die Ersteinstufung erfolgt laut Projektausschreibung und Informationen des Kunden.

Startet ein Projekt für den Bereich *Basis* zum Beispiel mit der Stufe G2, geht man davon aus, dass die zugehörigen Parameter bereits einen Reifegrad von 50% besitzen (siehe Abbildung 14). Anders formuliert, müssen die Parameter der Gruppe *Basis* einen Reifegrad von 50% haben, um die Qualitätsstufe G1 abgeschlossen zu haben.

Dieses Beispiel veranschaulicht auch den Aspekt der Qualitätsprüfung. Nach Vereinbarung mit dem Kunden, muss die Kalibrierung zu festgelegten Zeitpunkten eine gewisse Qualität haben. Hierzu werden vom Kunden Meilensteine vorgegeben. Die AVL Qualitätsstufen haben zu diesen Meilensteinen einen zeitlichen Puffer und die Beurteilung über den Reifegrad ermöglicht es früh genug, qualitativ eventuell zu wenig fortgeschrittene Parameter zu entdecken. Der zeitliche Puffer ist wichtig, um bei eventuell auftretenden Problemen noch rechtzeitig reagieren zu können.

Da die AVL GmbH ein Dienstleistungsbetrieb ist und somit mehrere Kunden hat, die jeder für sich, einen eigenen Prozess mit eigenen Definitionen von Meilensteinen haben, ist ein Prozess entwickelt worden, bei dem die Qualitätsstufen weitestgehend den Definitionen der Meilensteine der Kunden folgen. Damit soll dieses Tool universell für alle Kunden einsetzbar sein.

Erklärung der Qualitätsstufen G0 – G5

G0... Start des Projekts, CRETA wird aufgesetzt, Verantwortlichkeiten über die Parameter vergeben.

G1...“runable“: Lauffähiger Motor, Funktionalität ist gegeben, aber noch nicht für Dauerlauf vorgesehen, Basis-Motorschutz und Fahrverhaltensabstimmung in Normal- und Regenerationsbetrieb (Dieselpartikelfilter) bei Standard Umgebungsbedingungen, Kaltstart gewährleistet bis -20 °C, Hardware fixiert.

G2...“refind“: Motorstart bei allen Temperaturen, Abgasemissionsergebnisse erfüllen die gesetzlichen Erfordernisse, gute Fahrbarkeit unter Standard Umgebungsbedingungen, Vorbedatung unter Extrembedingungen (Höhe, Hitze, Kälte) in Normal- und Regenerationsbetrieb ist erfolgt.

G3...“target achievement“: Emissions- und Fahrbarkeitsbedatung ist fertig für Standardbedingungen (die Emissionsziele liegen unter den gesetzlichen Zielen, damit die Streuung in der Serienproduktion abgefangen werden kann)

G4...“robust“: Fahrbarkeitsbedatung ist fertig für alle Umgebungsbedingungen, Überprüfung der Robustheit der Bedatung von allen Arbeitsgruppen ist abgeschlossen, Überprüfung in Prototypen und Dauerlauffahrzeugen ist erfolgt.

G5...“validated“: alle Ziele sind erfüllt, alle Systeme bei sämtlichen Umgebungsbedingungen sind verifiziert, Daten sind auch schon in Vorserien-Fahrzeugen überprüft.

Diese Qualitätsstufen G0 – G5 stehen auch in inhaltlicher Verbindung mit den Kalibriermaßnahmen N-A-V-T. Wird ein Arbeitspaket als Neukalibrierung N bewertet, kann der Kalibriersprozess nicht erst mit der Stufe G4 beginnen. Adaption (A) oder Verifikation (V) kann aber sehr wohl mit der Stufe G1 beginnen. Für den Fall N – G4 entsprechen die Daten in der nachfolgend erklärten Kostenstruktur, den Daten der Pendants der Adaption – G4 oder Verifikation – G4. Damit erhält man trotz irrtümlich falscher Eingabe die richtigen Zahlen (Kosten).

2.3.4 Kostenstruktur

Herzstück des Ressourcenmodells ist die mengenmäßige Zuordnung der Ressourcen zu den Arbeitspaketen – die sogenannte Kostenstruktur. Die Ressourcen, in Spalten gelistet, bestehen aus den verschiedenen Mannstundensätzen (*DES_1*, *DES_2*,...), den Versuchseinrichtungen mit benötigter Messtechnik (Motorprüfstand *TB_2s*, Abgasmessgerät *CEB Zam_1*, Rollenprüfstände, Kältecontainer,...) und verschiedenen Testverfahren (NEDC kalt/heiß, Dauerlauf,...). Diese Zuordnung wird von den Fachexperten in der Abteilung durchgeführt (Leiter -Arbeitsbereich und erfahrene Mitarbeiter), muss für sämtliche Entwicklungsstufen gemacht werden (N-A-V-T, G1-G5, Abbildung 15) und wird einmal jährlich aktualisiert.

N - G1
N - G2
N - G3
N - G4
N - G5

A - G1
A - G2
A - G3
A - G4
A - G5

V - G1
V - G2
V - G3
V - G4
V - G5

Abbildung 15: Entwicklungsstufen

Abbildung 16 zeigt einen Auszug der Kostenstruktur, die (unkennlich gemachten) Werte beziffern den Aufwand in der jeweiligen Einheit der Ressource pro Arbeitspaket. Für das Arbeitspaket *torque demand and limitations (torque structure – base)* sind in der Entwicklungsstufe N – G1 unter anderem Aufwände der Ressource *DES_2* und *DES_3* in der Höhe xx [Stunden] angegeben.

Die Verknüpfung der mengenmäßigen Ressourcen mit den jeweiligen Kosten pro Ressource erfolgt im nächsten Schritt.

Change Level	Quality Gate	Group	Work Package	Sub-category 1	DES_1	DES_2	DES_3	DES_4	DFM_2	Engine TB 2-shift	Engine TB 3-shift	2nd CEB (NCS)
					hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	days	days	days
					DES_1	DES_2	DES_3	DES_4	DFM_2	TB_2S	TB_3S	Zam_1
N	G1	Base	Torque Structure	Torque demand and limitations	-	xx	xx	-	-	xx	-	-
N	G1	Base	Torque Structure	Friction map	-	xx	xx	-	-	xx	-	-
N	G1	Base	Torque Structure	Accessories Modelling	-	xx	xx	-	-	xx	-	-
N	G1	Base	Torque Structure	Torque to fuel conversion	-	xx	xx	-	xx	-	xx	-
N	G1	Base	Air System Modelling	Volumetric Efficiency Model	-	xx	xx	-	xx	xx	-	-
N	G1	Base	Air System Modelling	EGR Cooler Model	-	xx	xx	-	xx	xx	-	-
N	G1	Base	Air System Modelling	Pipe Model	-	xx	xx	-	xx	xx	-	-
N	G1	Base	Air System Modelling	Combustion Model	-	xx	xx	-	xx	xx	-	-
N	G1	Base	Air System Modelling	Compressor Model & Acoustics	-	xx	xx	-	xx	xx	-	-
N	G1	Base	Air System Modelling	Turbine Model	-	xx	xx	-	xx	xx	-	-
N	G1	Base	Air System Modelling	Turbo Acoustics	-	-	-	-	-	-	-	-
N	G1	Base	Air System Modelling	Valve Models	-	xx	xx	-	xx	xx	-	-
N	G1	Base	Air System Modelling	Model Based Charge Control	-	xx	xx	-	xx	xx	-	-
N	G1	Base	Air System Modelling	Model Based Boost Control	-	xx	xx	-	xx	xx	-	-
N	G1	Base	Injection System	Injector base map	-	xx	xx	-	xx	xx	-	-
N	G1	Base	Injection System	Pilot Injection Drift Compensation	-	-	-	-	-	-	-	-
N	G1	Base	Injection System	Pressure Wave Compensation	-	xx	xx	-	xx	xx	-	-
N	G1	Base	Injection System	Fuel Temperature Correction	-	xx	xx	-	-	xx	-	-
N	G1	Base	Injection System	Fuel Path Lambda Adaption	-	xx	xx	-	-	xx	-	-
N	G1	Base	Sensor Calibration	HFM	-	xx	xx	-	xx	xx	-	-
N	G1	Base	Sensor Calibration	Lambda sensor	-	xx	xx	-	-	xx	-	-
N	G1	Base	Sensor Calibration	NOx sensor (upstream and downstream catalyst)	-	xx	xx	-	-	xx	-	-
N	G1	Base	Sensor Calibration	PM sensor	-	xx	xx	-	-	xx	-	-
N	G1	Base	Sensor Calibration	Engine Position and Speed	-	xx	xx	-	-	xx	-	-
N	G1	Base	Sensor Calibration	Pressure and Temperature	-	xx	xx	-	-	xx	-	-
N	G1	Base	Sensor Calibration	Position Feedback	-	xx	xx	-	-	xx	-	-
N	G1	Base	Start and Warm Up	Engine warm up strategy	-	xx	xx	-	-	-	-	-
N	G1	Base	Start and Warm Up	Injection parameters	-	xx	xx	-	xx	-	-	-
N	G1	Base	Start and Warm Up	Charge air parameters	-	xx	xx	-	-	-	-	-
N	G1	Base	Start and Warm Up	Glow plug parameters / heating device	-	xx	xx	-	-	-	-	-
N	G1	Base	Engine Coordinator	Stop-Start Coordinator	-	xx	xx	-	xx	-	-	-
N	G1	Base	Engine Coordinator	Operating Mode Coordinator	-	xx	xx	-	xx	-	-	-
N	G1	Base	Engine Coordinator	Hybrid Interface	-	xx	xx	-	xx	-	-	-
N	G1	Base	Energy Management	Electrical Energy Management	-	xx	xx	-	-	-	-	-
N	G1	Base	Energy Management	Thermal Energy Management	-	xx	xx	-	-	-	-	-
N	G1	PE	Full load and component protection	Engine testbed	-	xx	xx	xx	-	xx	-	-
N	G1	PE	Full load and component protection	In-vehicle	-	xx	xx	xx	-	-	-	-
N	G1	PE	Cycle Emissions and FC	Engine testbed	-	xx	xx	xx	-	xx	xx	-
N	G1	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	-	xx	xx	xx	-	-	-	-
N	G1	PE	Engine Map calibration	Engine testbed	-	xx	xx	xx	-	xx	xx	-
N	G1	PE	Engine Map calibration	In-vehicle	-	xx	xx	xx	-	-	-	-
N	G1	PE	Off Cycle Emissions	Engine testbed	-	xx	xx	xx	-	xx	xx	-
N	G1	PE	Off Cycle Emissions	In-vehicle	-	xx	xx	xx	-	-	-	-

Abbildung 16: Auszug Kostenstruktur RM

2.3.5 Ergebnisse

Die Eingabedaten (Eingabeblatt, Synergien, Qualitätsstufen), die Kostenstruktur und die Kosten pro Einheit der Ressourcen werden in einer Liste zusammengeführt und dies stellt die Basis für die Darstellung der Ergebnisse des Ressourcenmodells dar.

Es ist somit eine Auflistung sämtlicher Arbeitspakete, aller Varianten in allen Entwicklungsstufen, allen Ressourcen und den entsprechenden Kosten. Mittels Pivot Tabellen und –Diagrammen können die Ergebnisse auf vielfältige Weise dargestellt und gefiltert werden. Ergebnisse im Kapitel 4.2.

2.4 PKW-Dieselskalibrierung konventionell

Am Anfang eines Projekts steht die Angebotsphase. Die Kosten werden kalkuliert und die benötigten Ressourcen auf Verfügbarkeit geprüft. Wie bereits beschrieben, kommen zu den Kosten aus dem Ressourcenmodell im Wesentlichen noch die Kosten für das Projektmanagement, die Logistik, für Werkstattarbeiten und für Reiseaufwände hinzu. Die Gesamtkalkulation erfolgt in der Projektplanungsabteilung, die Ergebnisse aus dem Ressourcenmodell werden von den Abteilungen DES und DEO an diese übermittelt.

Mit der Beauftragung der AVL zur Durchführung des Projekts startet der Kalibrierprozess. Das Team wird zusammengestellt, die Parameter den Arbeitspaketen zugeordnet und auf den Reifegrad bewertet. Sind die Motoren/Fahrzeuge verfügbar, werden diese mit Sensoren und Messinstrumenten je nach Bedarf bestückt und die Kalibriertätigkeiten können beginnen. Ausgehend von der inhaltlichen Aufgabe des Projekts, werden die entsprechenden Arbeitspakete wie im Ressourcenmodell gelistet, abgearbeitet. Die genaue zeitliche Abfolge richtet sich zum einen nach der Notwendigkeit (zum Beispiel: die Hardware muss festgelegt sein, bevor die Emissionierung erfolgen kann) und zum anderen nach Verfügbarkeit der Testprobanden und der Prüfeinrichtungen. Klassischerweise steht am Beginn die Basisvermessung und Basisabstimmung am Motorenprüfstand und die ersten Messungen im Fahrzeug.

Die Kontrolle des Fortschritts im Kalibrierprozess wird durch die laufende Beurteilung des Reifegrads der Parameter ermöglicht. Eine Qualitätsstufe wird durch entsprechenden Reifegrad erreicht und diese Stufen bilden die Grundlage für die Zeitschiene. Wie zuvor schon erwähnt, werden Abweichungen davon schnell erkannt und Abhilfemaßnahmen können umgehend eingeleitet werden.

Kurzer Exkurs zu Rollenprüfstandstests und Erprobungen.

Um als Hersteller ein Fahrzeug auf dem gewünschten Markt anbieten zu können, gibt es unter anderem die Voraussetzung, dass es die jeweiligen Abgasgesetzgebungen erfüllen muss. Die Ermittlung und Bewertung dieser erfolgt auf Fahrzeug-Rollenprüfständen mittels standardisierter Fahrzyklen. Diese Tests sind sehr kosten- und zeitintensiv (aufwändige Messtechnik, lange Konditionierzeiten) müssen aber in großer Zahl durchgeführt werden, da Bedatungsänderungen die Emissionen betreffend nur mittels dieser Tests überprüft werden können.

Auf Erprobungen, mehrwöchige Aufenthalte in entsprechenden Gebieten, werden die Fahrzeuge unter Extrembedingungen (Höhe, Hitze, Kälte) getestet und kalibriert und diese Erprobungen sind somit ebenso sehr zeit- und kostenintensiv.

Sind alle Ziele erfüllt, alle Systeme verifiziert, die Diagnosefunktionen und die Zertifizierung fertig, ist der Kalibrierprozess abgeschlossen. Nach der letzten Überprüfung der Bedatung durch den Kunden und den Motorsteuerungshersteller, beginnt die Serienproduktion der Fahrzeuge.

3 PKW-Dieselskalibrierung modellbasiert

Der modellbasierte Ansatz unterscheidet sich zum konventionellen Ansatz hauptsächlich dahin gehend, dass vermehrt modellbasierte Motoroptimierung eingesetzt wird. Grundlage ist die MoBEO-Methode und die Konsequenz davon ist, dass der Einsatz von im Vergleich teurer Versuchseinrichtungen reduziert wird und auf den kostengünstigeren HiL-Prüfstand verschoben wird. Dieser beansprucht weniger Prüfstandsraum, aufwendige Messtechnik entfällt ebenso wie ein Großteil der Versuchshardware. Damit ändert sich der zeitliche und inhaltliche Ablauf nicht, beziehungsweise nicht wesentlich. Die Veranschaulichung der Einsparungen erfolgt im Kapitel Ergebnisse.

Um für diesen Vergleich nicht zu viele Unbekannte einzubringen, wurde die Anzahl der Mannarbeitsstunden nicht verändert.

Bei den vorher erwähnten Rollenprüfstandstests ergibt sich zur Kosteneinsparung noch eine große zeitliche Einsparung. Fahrzeuge werden am HiL-Prüfstand nicht gebraucht und stehen somit anderweitig zur Verfügung, Konditionierzeiten entfallen und die Prüfstandsauslastung ändert sich. Das bedeutet, dass mit den vorhandenen Versuchseinrichtungen mehr Projekte beziehungsweise mehr Arbeitspakete in derselben Zeit abgearbeitet werden können.

Erprobungen werden beim modellbasierten Ansatz anders als bisher verlaufen. Bei optimaler Vorauslegung am HiL-Prüfstand wird sich die Zahl von notwendigen Fahrzeugen reduzieren und die Kalibriertätigkeiten von Adaption zu Feinabstimmung und Überprüfung verändern. Damit kann sich die Länge oder die Anzahl der Erprobungen reduzieren oder im Umkehrschluss, die Anzahl der zu prüfenden Varianten erhöhen, oder die Anzahl der Kalibrationsingenieure entsprechend verringern.

Um die Änderungen aufgrund der Verwendung von MoBEO in Zahlenwerte fassen zu können, wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

- Erstellung einer Liste der Anforderungen an MoBEO
- Erstellung der Kostenstruktur modellbasiert
- Vergleich an Hand der Ergebnisse auf Basis der Arbeitspakete (Kapitel 4)
- Vergleich an Hand von Projektbeispielen (Kapitel 4)

3.1 Anforderungen an MoBEO

Zu Beginn wurde untersucht, welche Kalibriertätigkeiten mit dem modellbasierten Ansatz durchgeführt werden können und welche nicht. Dazu wurde eine Liste mit den aus dem Ressourcenmodell bekannten Arbeitspaketen und den jeweils erforderlichen Kriterien erstellt. Damit ergeben sich über 80 Kriterien (physikalische Größen wie Temperaturen, Drücke, Drehzahlen, Emissionen,...) und 80 Arbeitspakete.

Der für den Arbeitsinhalt zuständige Leadingenieur sollte einschätzen, ob man mit dem modellbasierten Ansatz eine Vorkalibrierung (pre calibration), eine komplette Kalibrierung (complete calibration) oder eine Validierung (validation & testing) durchführen kann (siehe Spalten 4 – 6 in Abbildung 17). Anschließend, falls eine der drei Optionen möglich war, sollten die erforderlichen Kriterien mit dazu gehörigem Genauigkeitsbereich angegeben werden. Nach einem mehrstufigen Prozess mit wiederholten Gesprächen zwischen Leadingenieuren, MoBEO-Fachexperte und Diplomarbeitsverfasser wurde die Liste schlussendlich zusammengeführt und ausgewertet.

Group <input type="checkbox"/> Work Package <input type="checkbox"/> Sub-Category 1 <input type="checkbox"/>			Pre-Calibration	Complete Calibration	Validation & Testing	P_33	P_33 Tolerance +/- mbar	T_41	T_41 Tolerance +/- °C	P_41	P_41 Tolerance +/- mbar	LAVS_41	LAVS_41 Tolerance +/- Wert	T_51	T_51 Tolerance +/- °C
Current accuracy							200		20		20		0,05		20
Current accuracy							200		20		20		0,10		20
P&E	Full Load & Component protection	Testbed/In-Vehicle	Yes	No	Yes	yes	200	yes	20	yes	20	yes	0,1	yes	20
P&E	cycle emissions & FC	Testbed/In-Vehicle	Yes	No	Yes	yes	200	yes	20	yes	20	yes	0,1	yes	20
P&E	Engine Map development	Testbed/In-Vehicle	Yes	No	Yes	yes	200	yes	20	yes	20	yes	0,1	yes	20
P&E	Off Cycle Emission Calibration	Testbed/In-Vehicle	Yes	No	Yes	yes	200	yes	20	yes	20	yes	0,05	yes	20
EAS	DPF Temp.Mngt.	PreControl	Yes	No	Yes	Yes	200	Yes	20	Yes	20	Yes	0,05	Yes	20
EAS	DPF Temp.Mngt.	Temp.-Mngt. Controller	Yes	No	No	no		Yes	20	Yes	20	Yes	0,1	Yes	20
EAS	DPF Temp.Mngt.	OP-Mode-Transition	No	No	No										
EAS	DPF Temp.Mngt.	State Machine	Yes	No	Yes	no		Yes	20	Yes	20	Yes	0,1	Yes	20
EAS	LNT Rich Combustion	PreControl	Yes	No	Yes	no		Yes	20	Yes	20	Yes	0,01	Yes	20
EAS	LNT Rich Combustion	Lambda Controller	Yes	No	Yes	no		Yes	20	Yes	20	Yes	0,01	Yes	20
EAS	LNT Rich Combustion	OP-Mode-Transition	Yes	No	No	no		Yes	20	Yes	20	Yes	0,01	Yes	20
EAS	LNT Rich Combustion	State Machine	Yes	No	Yes	no		Yes	20	Yes	20	Yes	0,01	Yes	20
EAS	Exhaust Model	Muffler Model	Yes	No	No	no		Yes	20	Yes	20	Yes	0,1	Yes	20
EAS	Exhaust Model	DPF-T-Model	Yes	No	No	no		Yes	20	Yes	20	Yes	0,05	Yes	20
EAS	Exhaust Model	LNT-T-Model	Yes	No	No	no		Yes	20	Yes	20	Yes	0,1	Yes	20
EAS	Exhaust Model	T-Sensor-Model	No	No	No										
EAS	Exhaust Model	Raw Emission Model	Yes	No	No	no		Yes	20	Yes	20	Yes	0,1	Yes	20
EAS	DPF Soot Loading Model	DPF Soot Loading Model	Yes	No	No	no		Yes	20	Yes	20	Yes	0,1	Yes	20

Abbildung 17: Auszug Liste Anforderungen an MoBEO

Pro Kriterium gibt es zwei Spalten, eine, ob es für das jeweilige Arbeitspaket benötigt wird und eine, mit dem Wert der höchsten Genauigkeitsanforderung. In Zeile zwei und drei sind die aktuell erreichbaren Werte angegeben (current accuracy). Die farbliche Hinterlegung zeigt den aktuellen Status. Grün heißt, das Arbeitspaket ist uneingeschränkt durchführbar und rot bedeutet, dass die Qualität

des Modells nicht ausreicht. Anders formuliert, aktuell ist MoBEO hinsichtlich dieses Kriteriums zu ungenau, dieses Arbeitspaket kann mit MoBEO aktuell nicht bearbeitet werden. Die Liste zeigt also auch, wo für das Modell noch Verbesserungsbedarf hinsichtlich der Einsetzbarkeit in der Diesel-Serienkalibrierung besteht.

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 18 einen Auszug der Liste für das Arbeitspaket „cycle emissions & fuel consumption – in vehicle“ des Arbeitsbereichs *Leistung und Emissionen*.

Group	Work Package	Sub-Category 1	Pre-Calibration	Complete Calibration	Validation & Testing	NMHC / HC	NMHC / HC Tolerance +/- %	CO	CO Tolerance +/- %	NOx	NOx Tolerance +/- %	PM	PM Tolerance +/- %
P&E	Cycle Emissions & FC	In-Vehicle	Yes	No	Yes	yes	10	yes	10	yes	10	yes	20

T_Env	T_Env Tolerance +/- °C	P_Env	P_Env Tolerance +/- mbar	AFS	AFS Tolerance +/- %	T_IA	T_IA Tolerance +/- °C	P_IA	P_IA Tolerance +/- mbar	T_11	T_11 Tolerance +/- °C	P_11	P_11 Tolerance +/- mbar	N_Turb_03	N_Turb_03 Tolerance +/- rpm	T_17	T_17 Tolerance +/- °C
yes	0	yes	0	yes	5	yes	10	yes	10	yes	2	yes	10	no		yes	5

T_31	T_31 Tolerance +/- °C	P_31	P_31 Tolerance +/- mbar	T_33	T_33 Tolerance +/- °C	P_33	P_33 Tolerance +/- mbar	T_41	T_41 Tolerance +/- °C	P_41	P_41 Tolerance +/- mbar	LAVS_41	LAVS_41 Tolerance +/- Wert	T_51	T_51 Tolerance +/- °C	P_51	P_51 Tolerance +/- mbar
yes	20	yes	200	yes	20	yes	200	yes	20	yes	20	yes	0,1	yes	20	no	

Abbildung 18: Auszug Liste Anforderungen an MoBEO, Beispiel

Für das gewählte Beispiel ist somit eine Vorkalibrierung und eine Validierung möglich und die aktuell erreichbare Genauigkeit von MoBEO ist bei den für das Beispiel angeführten Kriterien ausreichend.

Die hier gezeigten Kriterien sind Emissionen, Drücke und Temperaturen an verschiedenen Stellen eines Motors (Nomenklatur entsprechend dem AVL-Standard), die Turboladerdrehzahl N_Turb_03, die angesaugte Luftmenge AFS sowie der Lambdasondenwert LAVS_41.

Abbildung 19 zeigt die Auswertung der Liste der Anforderungen an MoBEO und Abbildung 20 die dazu gehörige prozentuelle Darstellung. Es wird in absoluten Zahlen dargestellt, wie viele Arbeitspakete es in der jeweiligen Arbeitsgruppe gibt, wie viele davon vor- oder komplett kalibriert und wie viele validiert werden können. Außerdem wie viele schon mit MoBEO bearbeitet wurden und wie viele aufgrund der aktuell nicht erreichbaren, erforderlichen Genauigkeiten der Kriterien, nicht modellbasiert durchgeführt werden können.

Basis hat zwar die meisten Arbeitspakete, davon werden aber nur rund 57 Prozent als für eine Vorkalibrierung mit MoBEO tauglich beurteilt. 40 Prozent für die Validierung. Für eine über die Vorkalibrierung oder Validierung hinausgehenden Kalibrierung müsste die Genauigkeit der Ausgangsgrößen des Modells entscheidend verbessert werden. Als Vorgriff auf Kapitel 4.1.1 soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass *Basis* auch der Bereich mit dem niedrigsten Einsparungspotential ist. Dies ist durch die angesprochene Genauigkeit des Modells und auch durch den im Vergleich zu den anderen Bereichen niedrigeren Ressourceneinsatz begründet.

Die Auswertung der Liste hat außerdem ergeben, dass in der Abgasnachbehandlung sechs Arbeitspakete und bei Fahrbarkeit und Regler zwei nicht modellbasiert durchführbar sind. Die notwendige Genauigkeit eines oder mehrerer Kriterien liegt dabei auf zu niedrigem Niveau. Auch kann man erkennen, dass der modellbasierte Ansatz für Fahrbarkeitsthemen (noch) nicht flächendeckend einsetzbar ist. Für eine Fahrbarkeitsbewertung ist schlichtweg ein reales Fahrzeug notwendig, da in der MoBEO-Struktur lediglich das Motorsteuergerät, die Aktuatoren, die Sensoren und der Motor abgebildet sind. Der, prozentuell gesehen, geeignetste Bereich für die Verwendung des modellbasierten Ansatzes ist nach diesen Abbildungen *Leistung und Emissionen*.

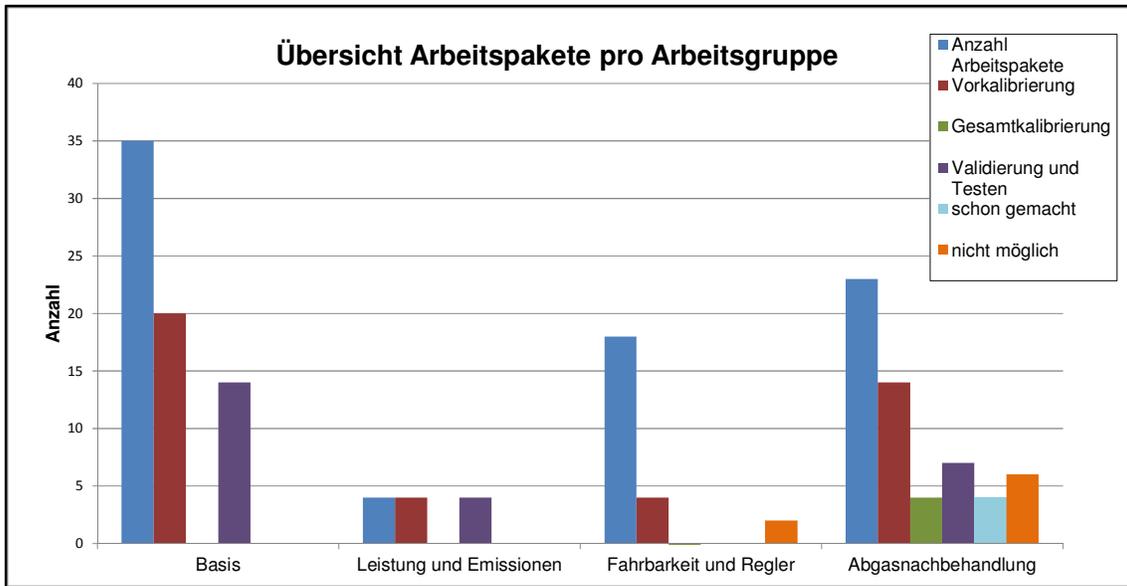


Abbildung 19: Übersicht Auswertung Anforderungen an MoBEO

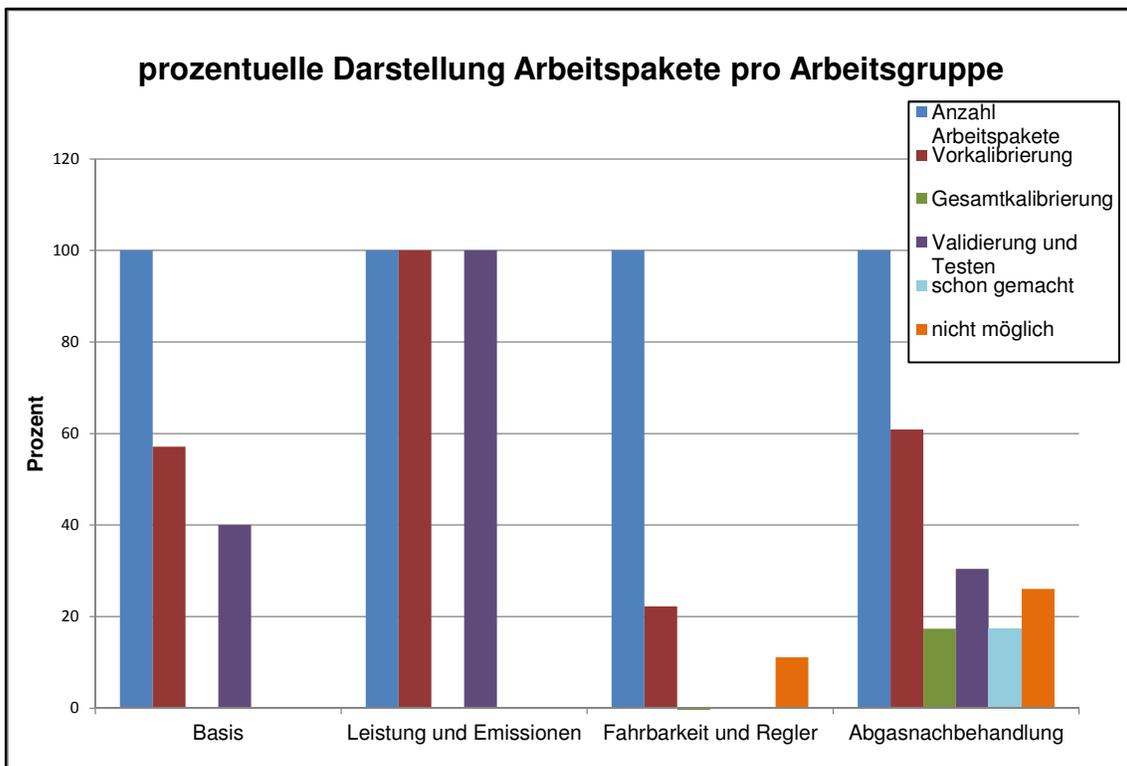


Abbildung 20: relative Darstellung der Anforderungen an MoBEO

3.2 Die modellbasierte Kostenstruktur

Aufbauend auf den Erkenntnissen, welche Arbeitspakete mit MoBEO machbar sind, wurden nun die notwendigen Ressourcen für die Arbeitspakete überarbeitet. Als Basis diente hierzu die konventionelle Kostenstruktur aus dem Ressourcenmodell. Die Beurteilung, ob ein Arbeitspaket modellbasiert durchführbar ist oder nicht, ist aus der Liste mit den Anforderungen an MoBEO ersichtlich. Das heißt, gibt es hier eine positive Einschätzung, wird die Kostenstruktur für die modellbasierte Version überarbeitet, ansonsten werden die Werte der konventionellen übernommen.

Für das Beispiel *Cycle Emissions & FC – In Vehicle* ist demnach eine Vorkalibrierung und/oder eine Validierung modellbasiert möglich und die Ressourcen wurden entsprechend angepasst (siehe Abbildung 21 und Abbildung 22). Man erkennt aber, dass bei der konventionellen Arbeitsweise kein HiL-Prüfstand eingeplant wird und dass dafür bei der modellbasierten Methode einige Ressourcen nicht mehr verwendet werden (NEDC heiß und NEDC mit einer Ausgangstemperatur ungleich 23°C).

				DES_1	DES_2	DES_3	DES_4	HiLTB with Puma Cameo	Functional Rolls with Operator and Emissions	Functional Rolls w/o emission w Operator or w operator (load adjustment)	Precon	NEDC Cold	NEDC Hot	OC_NEDC_Temp (unequal 23°C)	
				hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	tests	tests	tests	tests	tests	
				DES_1	DES_2	DES_3	DES_4	HiL_2	ZFR_P4	ZFR_P2	ZFR_5	ZFR_13	ZFR_4	ZFR_20	
N	G1	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-
N	G2	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
N	G3	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
N	G4	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
N	G5	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-
A	G1	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-
A	G2	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
A	G3	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
A	G4	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
A	G5	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-
V	G1	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-
V	G2	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
V	G3	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
V	G4	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
V	G5	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-

Abbildung 21: Auszug konv. Kostenstruktur, Beispiel

				DES_1	DES_2	DES_3	DES_4	HIL TB with Puma Cameo	Functional Rolls with Operator and Emissions	Functional Rolls w/o emission w Operator or w emission w/o operator (load adjustment)	Precon	NEDC Cold	NEDC Hot	OC_NEDC_T emp (unequal 23°C)
				hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	tests	tests	tests	tests	tests
				DES_1	DES_2	DES_3	DES_4	HIL_2	ZFR_P4	ZFR_P2	ZFR_5	ZFR_13	ZFR_4	ZFR_20
N	G1	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	-	-	xxx	xxx	xxx	-	-
N	G2	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-
N	G3	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-
N	G4	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-
N	G5	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	-	-	xxx	xxx	xxx	xxx	-
A	G1	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	-	-	xxx	xxx	xxx	xxx	-
A	G2	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-
A	G3	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-
A	G4	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-
A	G5	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	-	-	xxx	xxx	xxx	xxx	-
V	G1	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	-	-	xxx	xxx	xxx	xxx	-
V	G2	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-
V	G3	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-
V	G4	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-
V	G5	PE	Cycle Emissions and FC In-vehicle	-	xxx	xxx	xxx	-	-	xxx	xxx	xxx	xxx	-

Abbildung 22: Auszug modellbasierte Kostenstruktur, Beispiel

Die Arbeit und vor allem die Verantwortung für die Erstellung der modellbasierten Kostenstruktur lag bei den Leadingenieuren, da die Einschätzung welche Tätigkeit, zu welchem Zeitpunkt in welchem Ausmaß am HiL-Prüfstand machbar ist und dadurch an anderen Versuchseinrichtungen eingespart werden kann, sehr viel Erfahrung und Wissen über den Ablauf der Arbeiten erfordert.

Nach mehreren Iterationsschritten wurde die modellbasierte Kostenstruktur und mit der Implementierung auch ein modellbasiertes Ressourcenmodell erstellt.

Um die beiden Ansätze auf einer einheitlichen Basis miteinander vergleichen zu können – sozusagen der theoretische Vergleich, weil keine Projekte miteinander verglichen werden sondern die unterschiedlichen Aufwände für die Arbeitspakete –, wurde die Kostenstruktur um die Kosten pro Einheit jeder Ressource erweitert. Das heißt die mengenmäßige Kostenstruktur wurde in eine Summen-Kostenstruktur (Summen in Euro) umgewandelt, indem die Werte in der Tabelle mit den jeweils spezifischen Kosten pro Einheit multipliziert und an deren Stelle gesetzt wurden, dies jeweils konventionell und modellbasiert. Abbildung 23 zeigt einen Auszug einer Summen-Kostenstruktur. Blau hinterlegt die spezifischen Kosten pro Einheit der Ressource, die Summen für die Arbeitspakete pro Ressource und Entwicklungsstufe (N-A-V-T, G1-G5) und grün hinterlegt die Gesamtsumme des Arbeitspakets einer Entwicklungsstufe.

					OC_NEDC_T emp (unequal 23°C)	OC_NEDC_T emp_Subsequent Test (unequal 23°C)	Vehicle cooling max. up to -30°C per vehicle per day	Emissions Test: WLTP	NEDC Altitude	Particulate Counting	Particulate Mass (2/NEDC)	
spezifische Kosten					xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	
					ZFR_20	ZFR_21	ZP1_K1	ZFR_19	NEDC_A	Zdt_4	ZE4_4	Summe/WP [euro]
N	G1	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	-	-	-	-	-	-	xxx	gesamt xxx
N	G2	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	gesamt xxx
N	G3	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	gesamt xxx
N	G4	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	gesamt xxx
N	G5	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	-	-	-	-	-	xxx	xxx	gesamt xxx
A	G1	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	-	-	-	-	-	-	xxx	gesamt xxx
A	G2	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	gesamt xxx
A	G3	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	gesamt xxx
A	G4	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	gesamt xxx
A	G5	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	-	-	-	-	-	xxx	xxx	gesamt xxx
V	G1	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	-	-	-	-	-	-	xxx	gesamt xxx
V	G2	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	-	xxx	-	xxx	xxx	xxx	gesamt xxx
V	G3	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	gesamt xxx
V	G4	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	gesamt xxx
V	G5	PE	Cycle Emissions and FC	In-vehicle	-	-	-	-	-	xxx	xxx	gesamt xxx

Abbildung 23: Auszug Summen-Kostenstruktur, Beispiel

Um die Gesamtsumme der Kosten eines Arbeitspakets zu erhalten, werden die Einzelsummen der Ressourcen zeilenweise addiert.

Diese Kumulierung der Kosten wird auch für den konventionellen Ansatz gemacht, somit können die Kosten pro Arbeitspaket zwischen modellbasiert und konventionell verglichen werden. Die hier gewonnen Zusammenhänge müssen sich aber nicht zwingend in der Berechnung der Projektbeispiele wiederfinden, da sich aufgrund der Variantenvielfalt, den Synergien und dem Projektinhalt, Verschiebungen ergeben können. Zudem werden erst bei den Projektbeispielen die Kosten für die Modellerstellung berücksichtigt.

4 Ergebnisse

Die gewonnenen Ergebnisse dieser Diplomarbeit werden zum einen auf Basis der Arbeitspakete – im Folgenden der theoretische Vergleich genannt - und zum anderen auf Basis ausgewählter Projektbeispiele dargestellt. Um ein besseres Verständnis der beiden Darstellungsarten zu generieren, werden diese an Hand des Arbeitspakets *Cycle Emissions & FC – In Vehicle* (Arbeitsbereich *Leistung und Emissionen*) vorab ausführlicher beschrieben.

4.1 Ergebnisse Arbeitspaket *Cycle Emissions & FC*

Die dargestellten Kosten entsprechen dem Gegenwert der einmaligen Durcharbeitung des Arbeitspakets mit einer Variante – der theoretische Vergleich. In dieser Darstellungsart stellt die Höhe eines Balkens die Kosten der konventionellen Abarbeitung dar, blau die der modellbasierten und damit in Grün die erreichbare Einsparung.

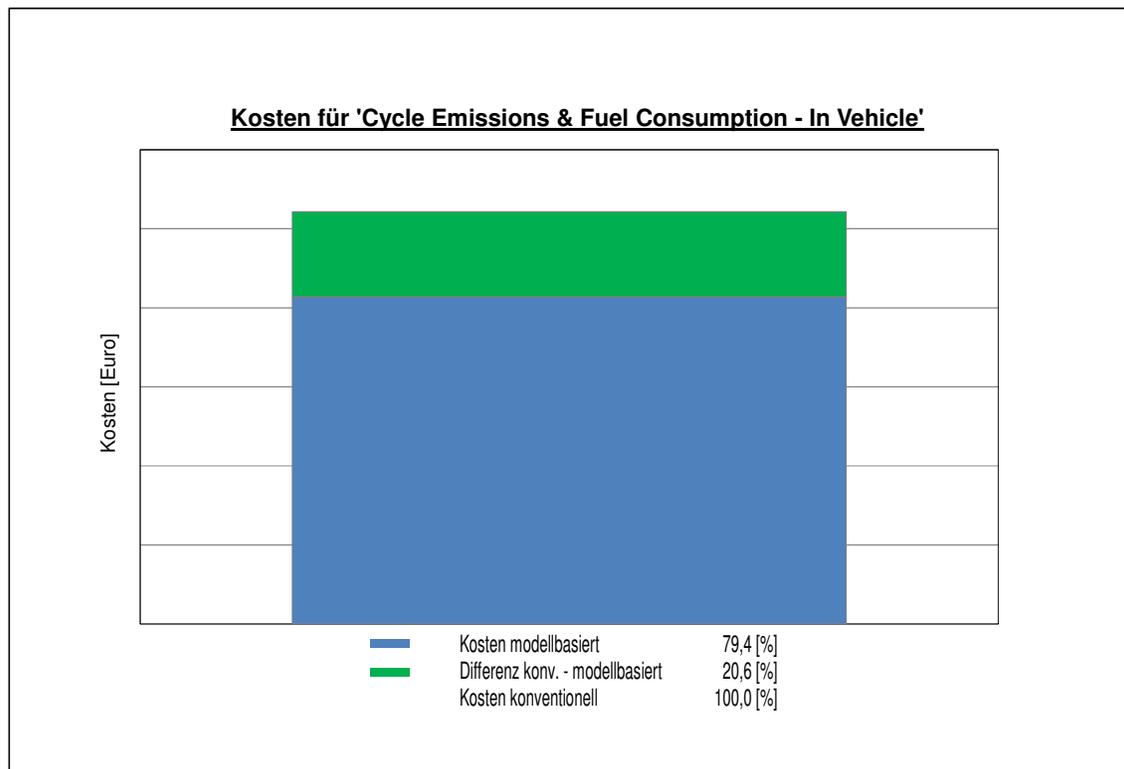


Abbildung 24: theoret. Kostenvergleich, Beispiel

In Abbildung 24 stellen damit 100 Prozent die Kosten für die konventionelle Abarbeitung des Arbeitspakets *Cycle Emissions & FC – In Vehicle*, bei einmaliger Durchführung in allen Entwicklungsstufen, dar. Würde man die gleiche Arbeit modellbasiert erledigen, kommt man auf knapp 80 Prozent der Kosten für die herkömmliche Methode und damit zu einer Einsparung von knapp 20 Prozent. Hierbei sind die Kosten für die Modellerstellung noch nicht berücksichtigt.

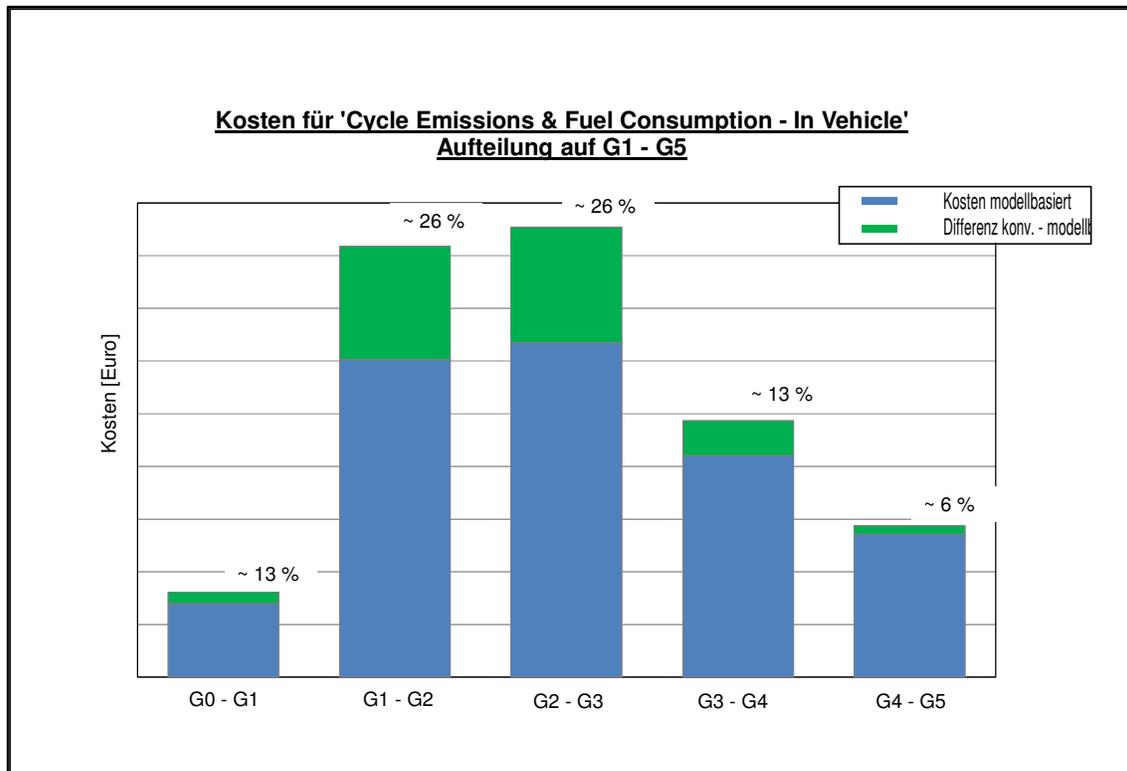


Abbildung 25: theoretischer Kostenvgl., Qualitätsstufen, Beispiel

Unter Beibehaltung der vorherigen Darstellungsart zeigt Abbildung 25 die Aufteilung der Kosten auf die Qualitätsstufen. Das höchste Einsparungspotential liegt mit jeweils rund 26 Prozent dort, wo die höchsten Kosten entstehen. Für das gewählte Arbeitspaket werden in diesen Abschnitten per definitionem des Prozesses die Emissionsziele erreicht (für Abschluss von G2 die gesetzlichen und für G3 die unter dem Niveau der gesetzlichen Entwicklungsziele liegen), was die hohen Kosten in diesem Abschnitt erklärt. Für die Beurteilung der Emissionen ist eine Vielzahl von Rollenprüfstands-Tests notwendig → Erklärung siehe nachfolgenden Exkurs zur Ermittlung der Abgasemissionen.

Vor dem Abschnitt der Emissionierung wird durch die Finalisierung der Motorhardware und Verbrennungsentwicklung die notwendige Vorarbeit geleistet und in den Abschnitten G3 bis G5 erfolgt in mehreren Stufen die Robustheits- und Stabilitätsüberprüfung der Emissionen.

Exkurs zur Ermittlung der Abgasemissionen und der Vorteile der Verwendung des modellbasierten Ansatzes für dieses Arbeitspaket:

Die Ermittlung der Abgasemissionen erfolgt an Hand standardisierter Tests des Fahrzeuges am Rollenprüfstand. Diese sind aufgrund der aufwändigen Abgasmess-technik und Prüfstands Einrichtung sehr kosten- und zeitintensiv. Im Konditionierzeitraum von 8 bis 24 Stunden darf das Fahrzeug nicht gestartet werden und wird in einer eigenen Konditionierhalle bei ca. 23°C konditioniert. Werden diese Tests auf einem HiL Prüfstand durchgeführt, bringt das sehr viele Vorteile:

- Das Fahrzeug ist dafür nicht notwendig und steht für andere Versuche zur Verfügung
- die Konditionierzeiten entfallen
- somit können mehrere Tests in der Zeit eines realen Tests „gefahren“ werden
- Optimierung kann bei konstanten Bedingungen erfolgen (z.B. Halten der Kühlwassertemperatur auf bestimmtem Wert)
- Platzproblematik in der Konditionierhalle entschärft sich
- Tests können abgebrochen und sofort neu gestartet werden
- Messtechnik muss nicht gewartet werden
- verschiedene Umgebungsbedingungen können leicht und schnell simuliert werden (Höhe, Hitze, Kälte)
- man braucht keine zusätzlichen Tests (Lastanpassung und Ausrolltests sind notwendig, um den Rollenprüfstand richtig zu kalibrieren, damit die Ausgangsbasis immer die Gleiche bleibt)
- bei steigendem Vertrauen des Kunden in die Ergebnisse des modellbasierten Ansatzes können bestimmte Fahrzeugvarianten „nur“ simuliert werden (kein reales Versuchsfahrzeug notwendig) → Gesamtkalibrierung
- absolute Reproduzierbarkeit (gleiche Bedingungen, kein Fahrereinfluss, kein Einfluss der Bauteilstreuung)

Mit den bisherigen Aufstellungen und Bildern können die Kosten für sämtliche Arbeitspakete in sämtlichen Entwicklungsstufen auf vielfältige Weise dargestellt werden. Mit den Abbildungen nach Muster von Abbildung 26 werden ergänzend die resourcentechnischen Veränderungen durch die Verwendung des modellbasierten Ansatzes visualisiert.

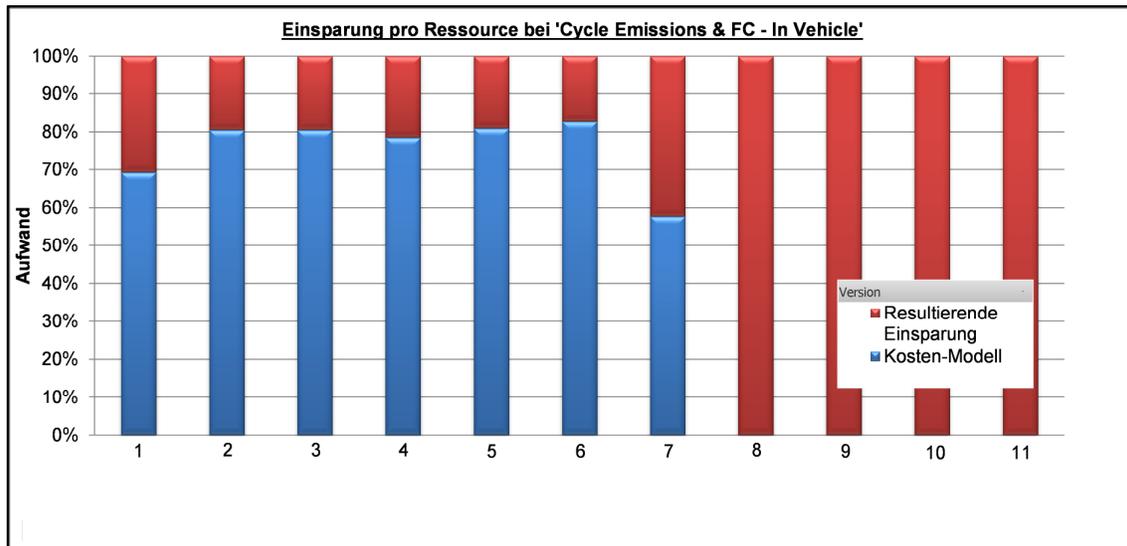


Abbildung 26: Einsparung pro Ressource, Beispiel

100 Prozent entsprechen dem Aufwand, würde man es konventionell abarbeiten, in blau ist der modellbasierte Aufwand dargestellt und damit ergibt sich in rot die erzielte Einsparung. Die Ressourcen 1 bis 11 sind hierbei diverse Tests auf Fahrzeug-Rollenprüfständen (NEDC kalt/ heiß/ Höhe, Vorkonditionierung, Tests zur Ermittlung der Offcycle-Emissionen). Offcycle – Tests decken die Bereiche ab, die mit NEDC's nicht überprüft werden. Für das gewählte Beispiel sind sämtliche Ressourcen, abgesehen von der Arbeitszeit, an einen Fahrzeug-Rollenprüfstand gebunden, da wie schon erwähnt, die Ermittlung der gesetzesrelevanten Emissionen nur mittels dieser Tests erfolgen kann.

In Abbildung 26 ist ersichtlich, dass sich einige Ressourcen sogar gänzlich durch den modellbasierten Ansatz einsparen lassen, andere sich zumindest um ca. 20% reduzieren. Die Ressourcen die zu 100 Prozent eingespart werden können, sind Tieftemperaturtests (-30°C) und Tests auf einem Rollenprüfstand, bei dem der Umgebungsdruck reduziert werden kann um Höhe zu simulieren. Dies bringt nicht nur die angesprochene zeitliche Einsparung am Rollenprüfstand, sondern auch die finanzielle für das (theoretische) Projekt.

4.2 Ergebnisse auf Basis der Arbeitspakete

Die folgenden Bilder stehen im Kontext des theoretischen Vergleichs. Damit steckt, wie bereits erwähnt, hinter diesen Kosten nicht ein bestimmter Projektinhalt, sondern es werden alle Arbeitspakete der PKW-Diesel-Serienkalibrierung in allen Entwicklungsstufen, mit einmaliger Durchführung dieser Tätigkeiten, in diese Darstellung aufgenommen. Wie in den Darstellungen zuvor stellt die Höhe eines Balkens die Kosten der konventionellen Abarbeitung dar, blau die der modellbasierten und damit in Grün die erreichbare Einsparung. Das Größenverhältnis der Balken gibt das Verhältnis der absoluten Zahlen wieder. Damit erhält man eine Reduzierung der Kosten von konventionell zu modellbasiert um ca. neun Prozent (siehe Abbildung 27). In diesem Abschnitt wird der Aufwand für die Modellerstellung ebenfalls noch nicht berücksichtigt.

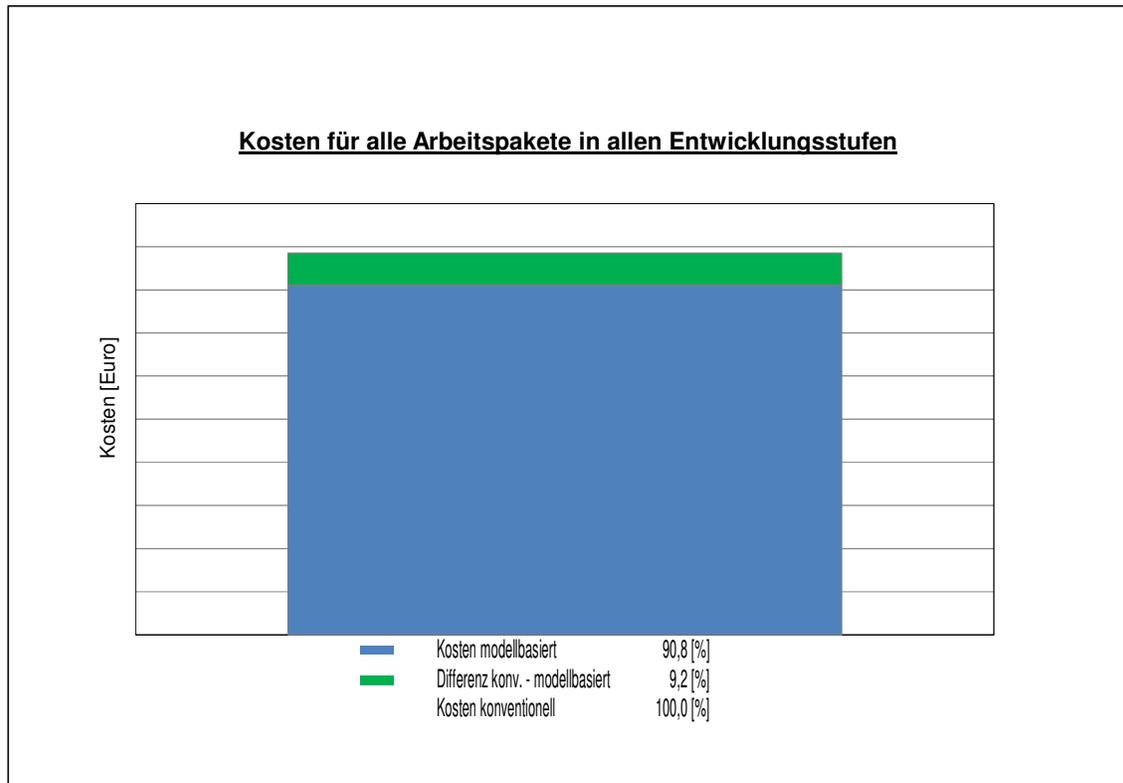


Abbildung 27: theoretischer Kostenvergleich

Abbildung 28 zeigt für eine angenommene Euro 5 Bedatung, dass die meisten Einsparungen bei Projekten zu erwarten sind, die im Anfangsstadium des Kalibrierprozesses beginnen. Hierzu wird auf Kapitel 3.1 bzw. Abbildung 19 verwiesen. Die Einschätzung der Verwendung des modellbasierten Ansatzes liegt bei Vorkalibrierung deutlich höher als bei Validieren und Testen, was das höhere Einsparungspotential in den frühen Qualitätsstufen erklärt.

Für die Einhaltung der Abgasstufe Euro 5 ist von Seiten der Abgasnachbehandlung in der Regel ein Zwei-Wege-Katalysator und ein Dieselpartikelfilter ausreichend. Damit wird in dieser Arbeit der Unterschied zwischen einer Euro 5 und einer Euro 6 Bedatung, mit der Erfordernis eines SCR – Katalysators definiert. Die anderen Arbeitspakete bleiben unverändert. Damit verändern sich mit dieser Annahme nur die Kosten in der Abgasnachbehandlung. In Abbildung 29 ist die Aufstellung für eine angenommene Euro 6 Bedatung mit SCR-System zu sehen.

Die Kosten sind aufgrund des Mehraufwands für die zusätzliche Abgasnachbehandlungsmaßnahme höher, das prozentuelle Einsparungspotential für die einzelnen Stufen bleibt für die anderen Arbeitsbereiche mit 8 beziehungsweise 10 Prozent aber in einem ähnlichen Ausmaß. Sehr interessant ist, dass für eine Euro 6 Bedatung konventionell die Gesamtkosten um ca. 20 Prozent höher liegen, dabei das Einsparungspotential aber mit 9,1% (Euro 5) und 9,8% (Euro 6) nahezu konstant bleibt. Die absolute Einsparung steigt damit aber um ein Drittel. Anders ausgedrückt, stecken diese Mehrkosten in der Abgasnachbehandlung und entsprechen in diesem Bereich einem „Mehr“ von ungefähr 50 Prozent (siehe Abbildung 30). Daraus ist auch abzulesen, welche hohe Bedeutung den Abgasnachbehandlungsmethoden bei den immer schärfer werdenden Gesetzgebungen zu Teil wird.

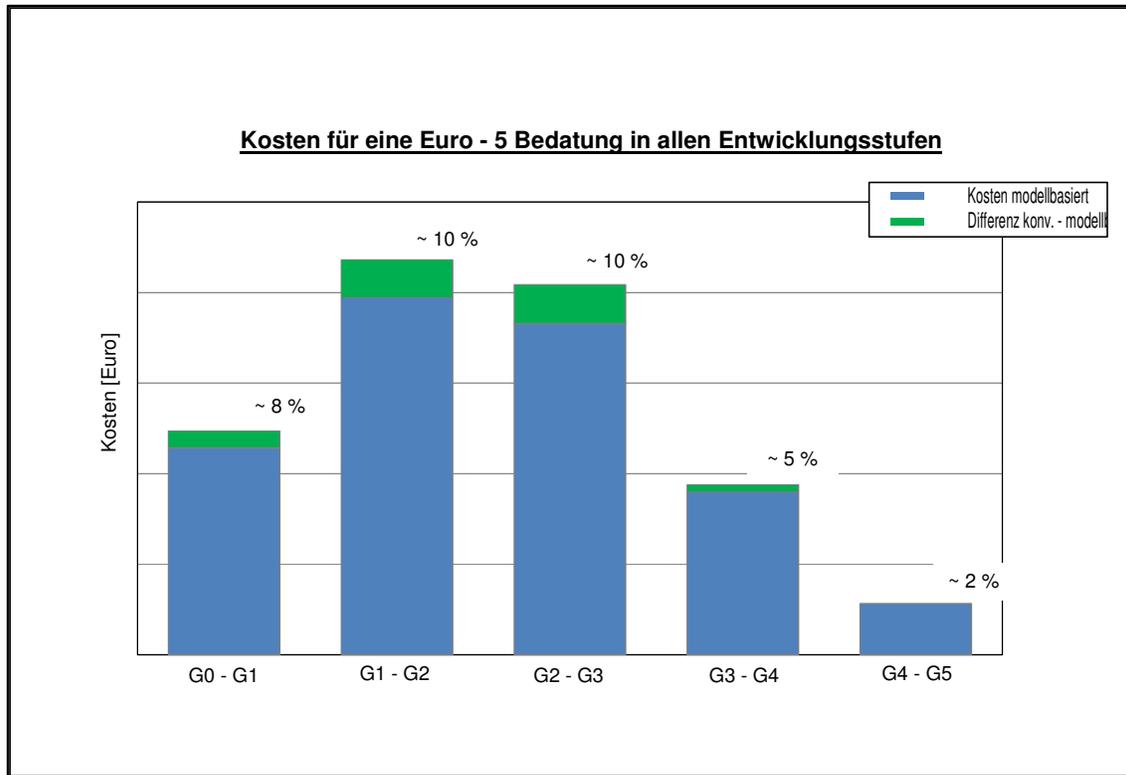


Abbildung 28: Kosten pro Qualitätsstufe, Euro 5

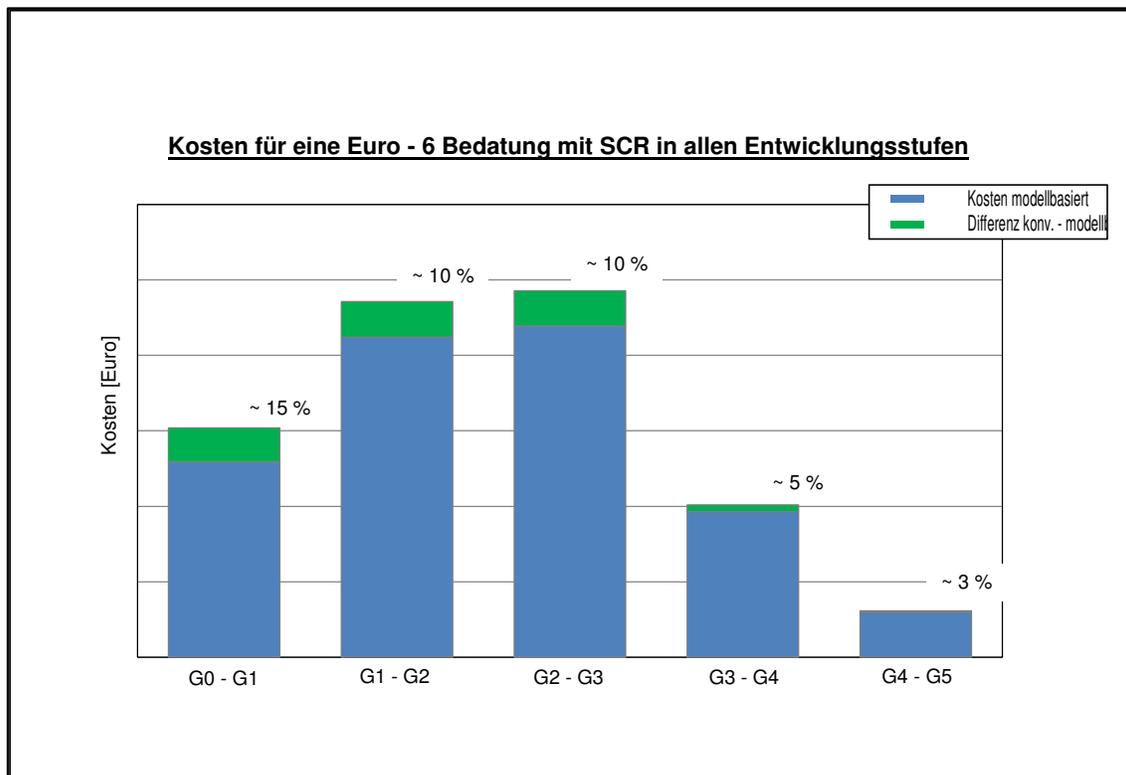


Abbildung 29: Kosten pro Qualitätsstufe, Euro 6 mit SCR

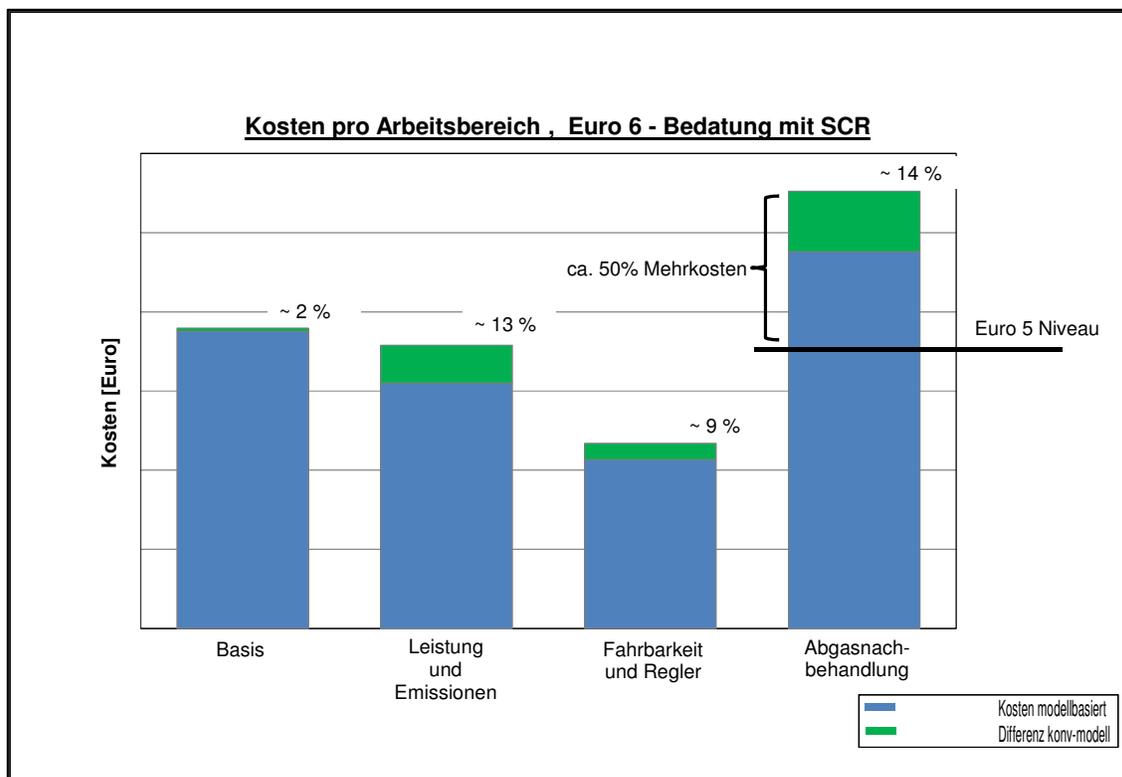


Abbildung 30: Kosten pro Arbeitsbereich, Euro 6 - SCR

In Abbildung 30 sind wieder die Kosten für eine Euro 6 –Bedatung mit SCR dargestellt, diesmal aufgeteilt auf die Arbeitsbereiche. Das heißt, angenommen wird, dass jeder Arbeitsbereich seine Tätigkeiten einmal in allen Entwicklungsstufen ausführt, dargestellt werden aber jeweils die Gesamtkosten. Es ist eine Bestätigung der vorherigen Aussage, dass der Bereich *Abgasnachbehandlung* ein hohes Einsparungspotential birgt, aber auch bei *Leistung und Emissionen* wird das Mengengerüst auf vergleichbarem Niveau vermindert. Auch bei *Fahrbarkeit und Regler* schätzt man 10 Prozent der Kosten einsparen zu können, während hingegen in der Basis-Kalibrierung der modellbasierte Ansatz wenig Anwendung findet. Hierzu wurde in Kapitel 3.1 schon die zu geringe Genauigkeit der Ausgangsgrößen des Modells und das im Vergleich zu den anderen Bereichen geringere Ausmaß des Einsatzes von Ressourcen als Erklärung genannt.

Dieses geringe Niveau der Anwendung des modellbasierten Ansatzes findet sich auch in Abbildung 31 wieder. Man erkennt im Vergleich zu Abbildung 32, dass in der *Basis* deutlich weniger Ressourcen als in der *Abgasnachbehandlung* verwendet werden, dass die realisierbaren Einsparungen geringer sind und nur zwei Ressourcen betreffen (Motorprüfstand im 2 – Schicht und 3 - Schicht-Betrieb). In Tabelle 2 die Auflistung der Ressourcen.

Tabelle 2: Aufzählung der Ressourcen aus Abb. 31 und 32

Ressourcen	Basis	Abgasnachbehandlung
1	Motorprüfstand 2-Schicht-Betrieb	Motorprüfstand 2-Schicht-Betrieb
2	Motorprüfstand 3-Schicht-Betrieb	Motorprüfstand 3-Schicht-Betrieb
3	Kälte - Motorprüfstand	zusätzliche Messtechnik 1
4	zusätzliche Messtechnik	zusätzliche Messtechnik 2
5	Fahrzeug-Rollenprüfstand mit Emi.	Klima - Motorprüfstand
6	Kältecontainer für Fhgz.	Pumpenprüfstand
7	Kältecontainer für Fhgz. (Höhe)	Fahrzeug-Rollenprüfstand ohne Emi.
8	Höhen-Rollenprüfstand	Fahrzeug-Rollenprüfstand mit Emi.
9	Kälte-Rollenprüfstand	Testvariante 1
10		Testvariante 2
11		Zusatzmessung zu Testvariante 2
12		Kältecontainer für Fhgz.
13		Höhen-Rollenprüfstand
14		Kälte-Rollenprüfstand
15		Dauerlauf

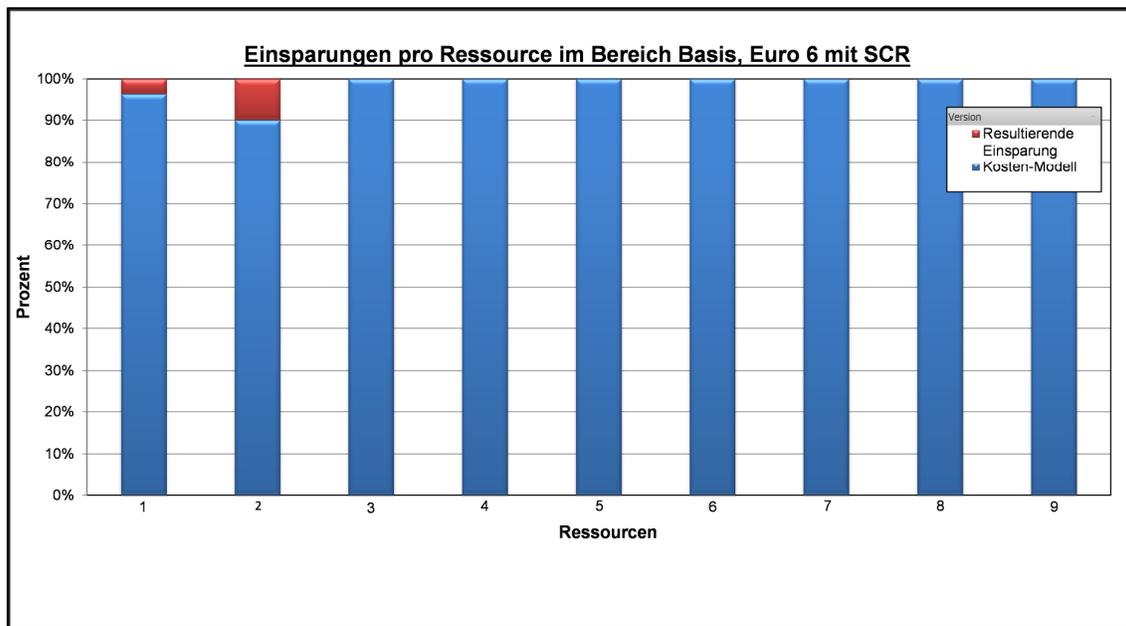


Abbildung 31: Einsparungen pro Ressource, Basis, Euro 6 – SCR

Die Darstellung nach Art von Abbildung 31 oder 32 stellt nicht einen Vergleich auf Basis der Kosten pro Ressource, sondern auf Basis der jeweiligen Verrechnungseinheit (Stunden, Anzahl Tests,...) dar. Für die Abgasnachbehandlung ergibt sich zwar bei der Ressource 4 - *zusätzliche Messtechnik 2*, die höchste prozentuelle Einsparung, aber damit nicht kostenmäßig die höchste Einsparung. Kosten für den Betrieb eines Motorprüfstandes oder eines Höhen-Rollenprüfstandes sind natürlich erheblich teurer als die hier gemeinte, zusätzliche Messtechnik.

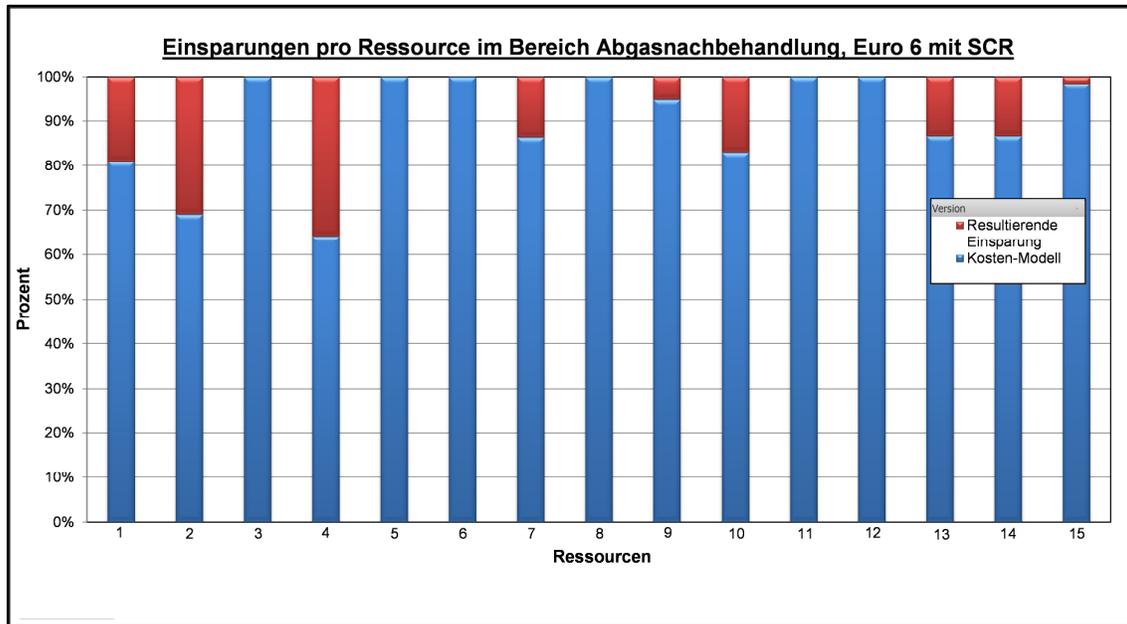


Abbildung 32: Einsparungen pro Ressource, Abgasnachbehandlung, Euro 6 – SCR

Ergänzend dazu sind in Abbildung 33 die Kosten an Mannstunden und Ressourcen für den modellbasierten Ansatz für beide Arbeitsbereiche dargestellt. Die der Mannstunden befinden sich auf einem ähnlichen Niveau, die der Ressourcen sind für die Abarbeitung einer Euro 6 Bedatung mit SCR, für die *Abgasnachbehandlung* aber ungefähr 50 Prozent höher als die der *Basis*. Dieses Bild unterstreicht das hohe Ausmaß der Verwendung von Ressourcen in der *Abgasnachbehandlung*. Eine banale, aber treffende Aussage dazu ist, dass dort, wo die höchsten Aufwendungen sind, auch am meisten eingespart werden kann. Mit dem Ansatz, bei beiden Kalibrierungsmethoden die Anzahl der Mannstunden unverändert zu lassen, finden sich in dieser Abbildung auch die 14 Prozent Einsparung aus Abbildung 30 wieder.

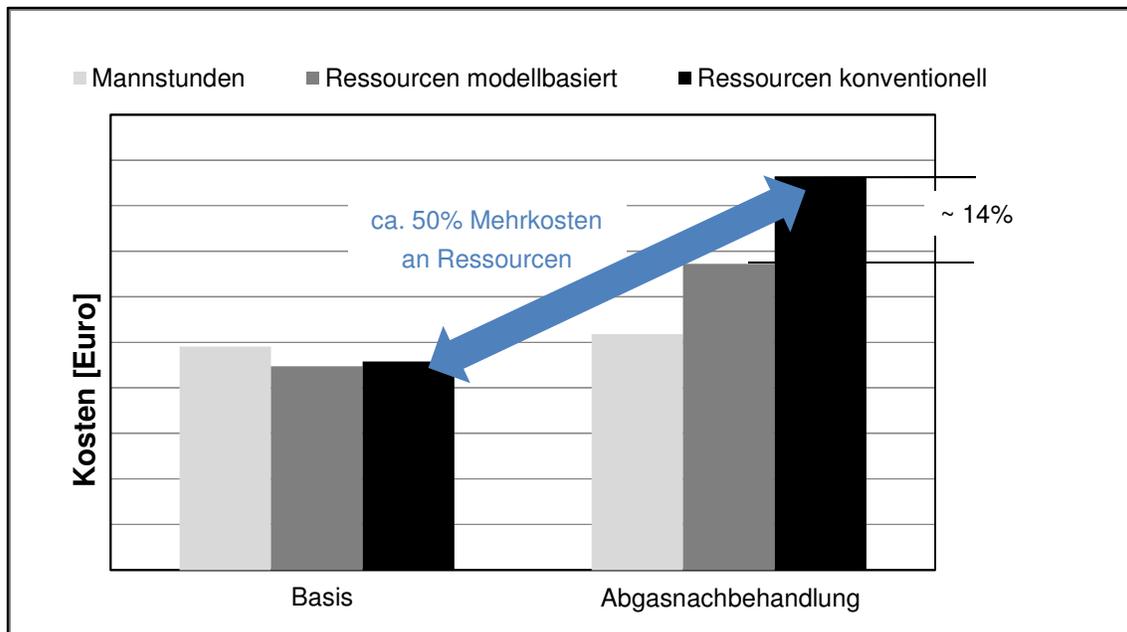


Abbildung 33: Kostenaufstellung Basis und Abgasnachbehandlung

Interessant ist auch die Aufstellung, wo die Kosten für die Arbeitsbereiche im Kalibrierprozess entstehen. Abbildungen 34 – 36 zeigen das Bild in der *Basis* und Abbildungen 37 – 39 das Bild, für eine Euro 6 Bedatung mit SCR, in der *Abgasnachbehandlung*.

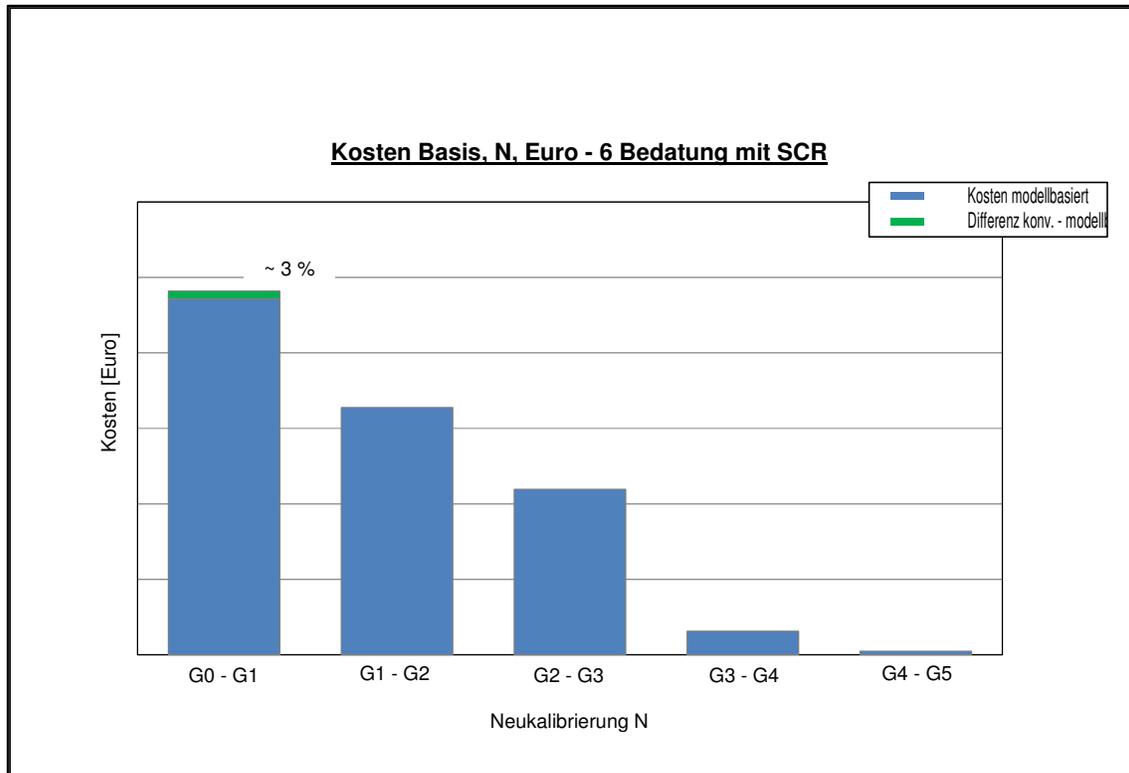


Abbildung 34: Kosten Basis, N

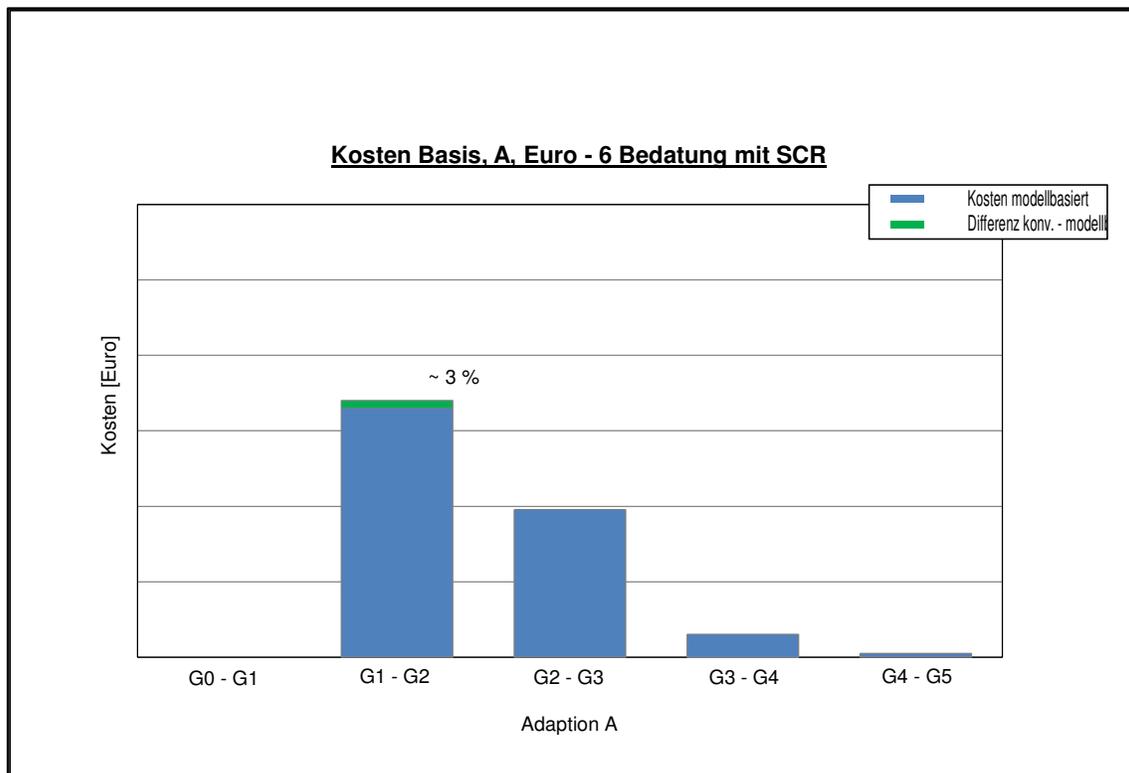


Abbildung 35: Kosten Basis, A

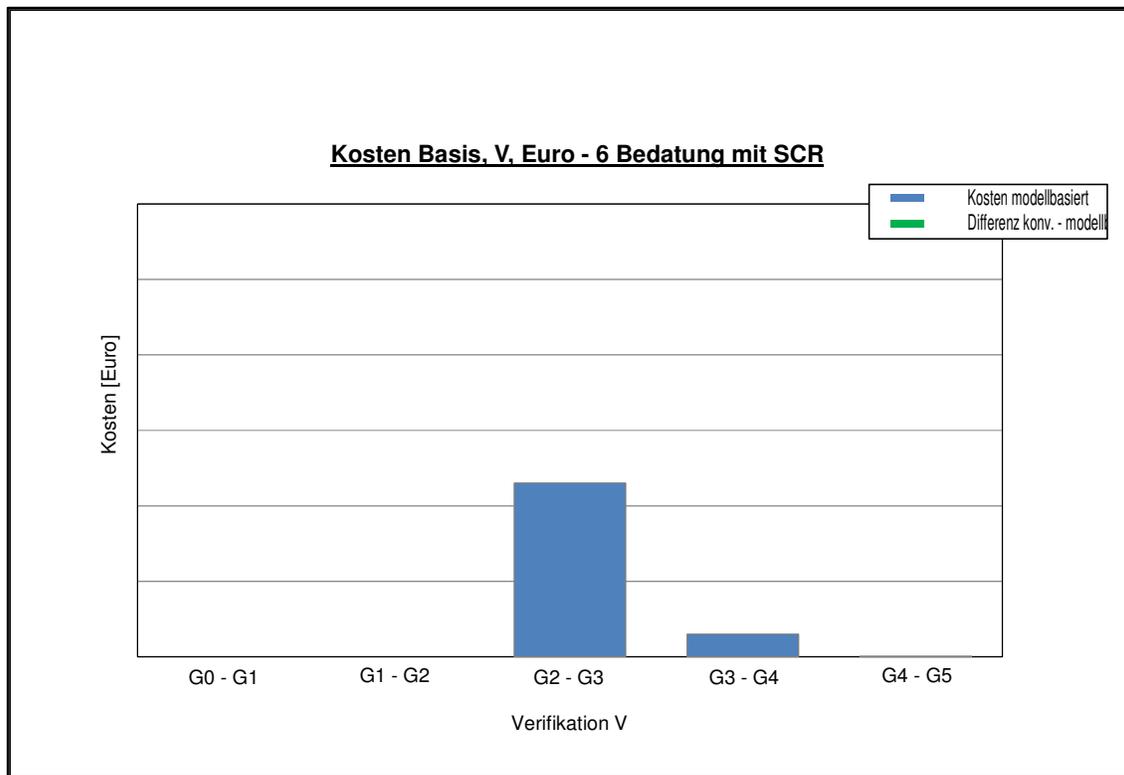


Abbildung 36: Kosten Basis, V

Man sieht, wo der modellbasierte Ansatz Auswirkungen hat (prozentuellen Einsparungen) und dass die Kosten mit dem Kalibrierungsaufwand Hand in Hand gehen. Sinkender Kalibrierungsaufwand ($N \rightarrow V$) verursacht auch geringere Kosten. Die Erkenntnis von zuvor, dass die *Abgasnachbehandlung* ein Bereich mit viel Potential für die Verwendung der MoBEO-Methode ist, spiegelt sich auch hier wider.

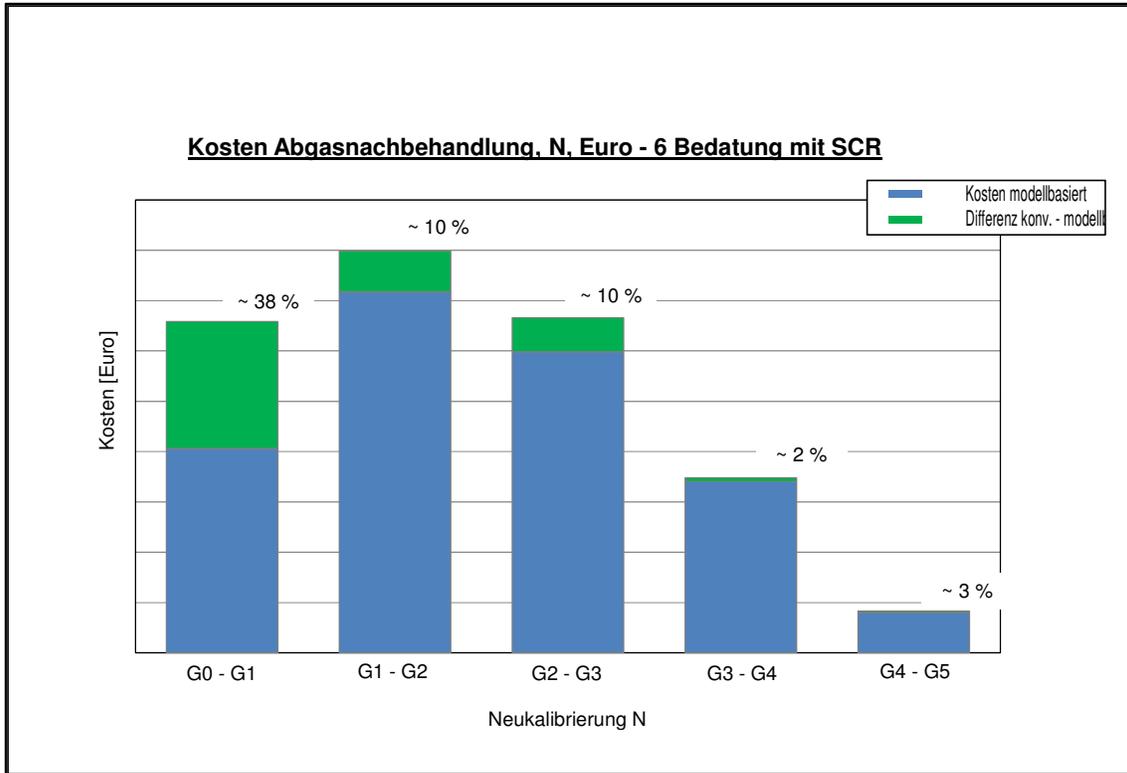


Abbildung 37: Kosten Abgasnachbehandlung N

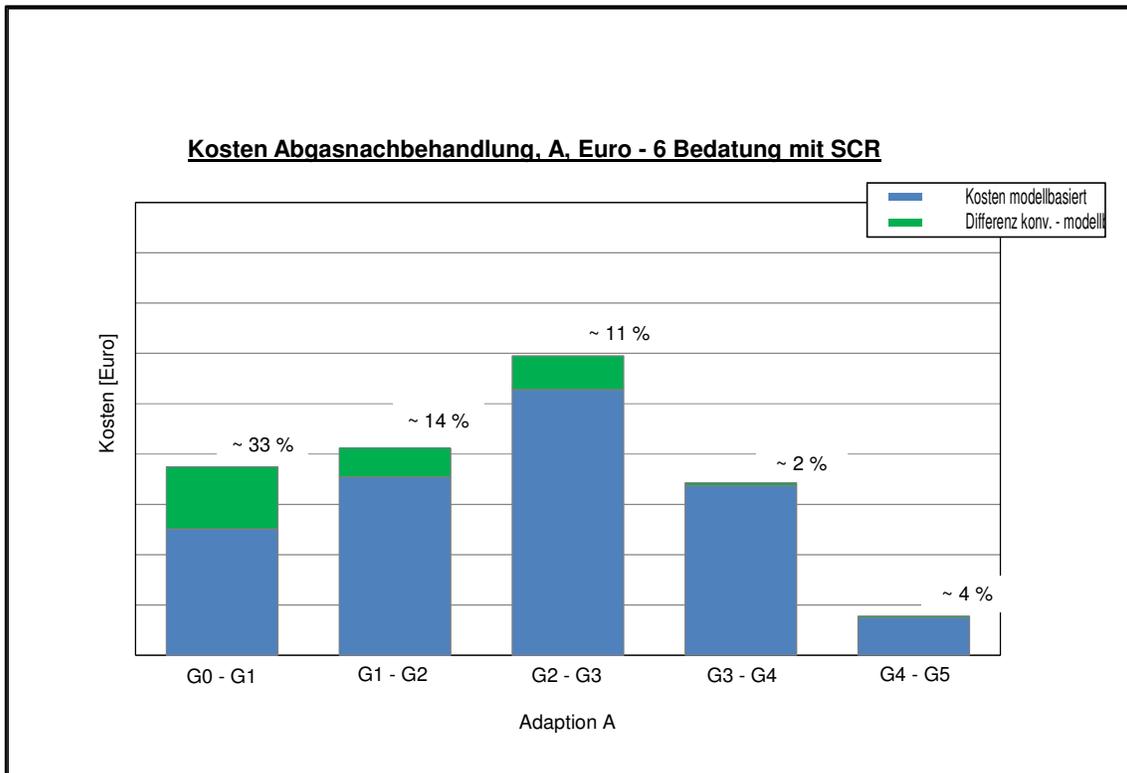


Abbildung 38: Kosten Abgasnachbehandlung A

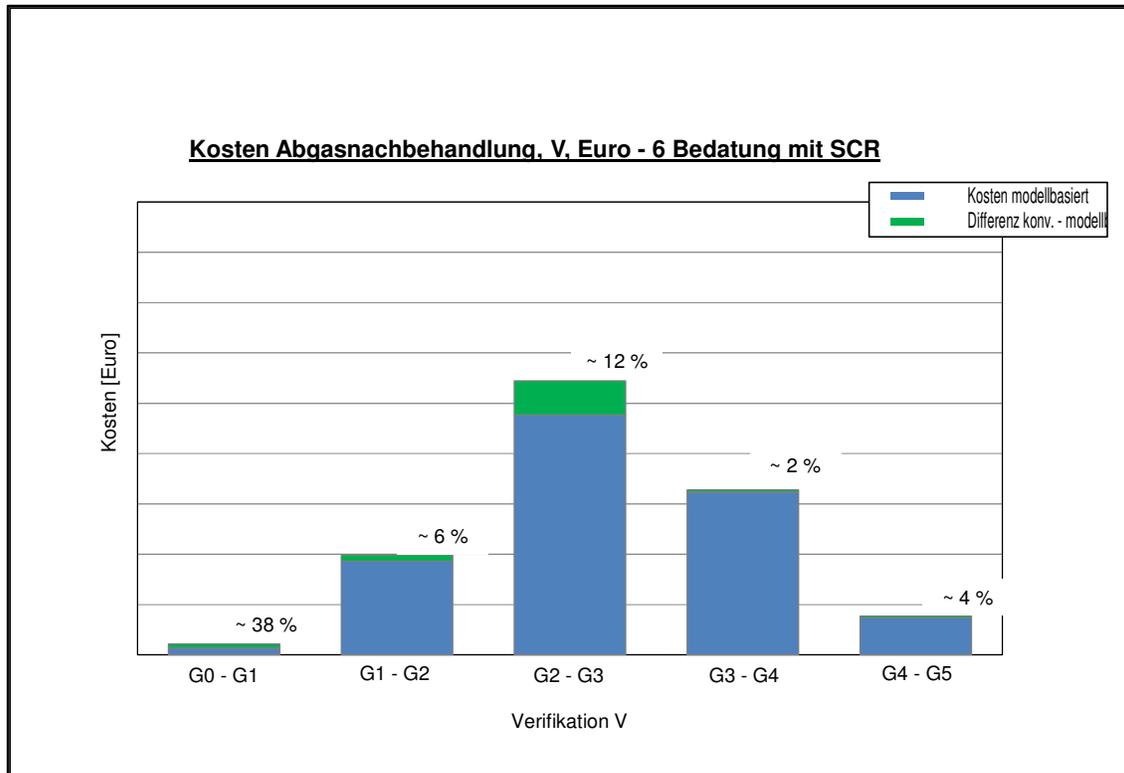


Abbildung 39: Kosten Abgasnachbehandlung V

4.3 Ergebnisse Projektbeispiele

Das vorhergehende Kapitel beschreibt die grundlegenden Zusammenhänge beziehungsweise Unterschiede vom konventionellen und modellbasierten Ansatz. Es wird veranschaulicht, wo Einsparungen eintreten werden, wo Kosten entstehen und wie sich die Auslastung und/oder die Nutzung der Ressourcen verändert. Aufbauend auf diese Kenntnisse, folgt nun die mehr praxisbezogene Durchrechnung von drei Projektbeispielen. Diese Projekte sind der aktuellen Projektlandschaft der AVL entnommen und spiegeln das aktuelle Kalibriergeschäft wider. In dieser Berechnung sind die Modellerstellungskosten ebenfalls berücksichtigt.

Folgend die für diese Arbeit wichtigen Eckdaten der Projekte.

Projekt A:

Zwei Fahrzeuge (PKW), ein Grundmotor in zwei Leistungsstufen, zwei Emissionsstufen (Euro 6 und Euro 5) → hier gesamt acht Varianten.

Das Abgasnachbehandlungssystem gliedert sich folgendermaßen: Euro 6 - System mit Oxidationskatalysator (DOC), Dieselpartikelfilter (DPF) und SCR-Katalysator, davon abgeleitet Euro 5 mit DOC und DPF.

Die Fahrzeuge sind aus dem aktuellen Portfolio des Kunden, ebenso wie das Aggregat, das für dieses Projekt vom Kunden technisch überarbeitet wurde. Ein Euro 5 – Datenstand ist als Ausgangsbasis vorhanden, sodass dieses Projekt bis auf die Arbeiten der Abgasnachbehandlung hauptsächlich eine Adaption und Verifikation darstellt.

Abbildung 40 zeigt für die Bereiche *Basis, Leistung und Emissionen* und *Fahrbarkeit* den Startpunkt des Kalibrierprozesses, der für die Varianten 1 und 2, im Gegensatz zur Abgasnachbehandlung, erst in der Qualitätsstufe G2 beginnt. Die Angabe von 75 Prozent bedeuten, dass noch 75 Prozent an Tätigkeiten dieser Stufe zu erledigen sind. Die Kalibrierung des SCR – Systems erfolgt ohne auf Basisdaten zurückgreifen zu können, daher startet der Prozess für die betreffenden Varianten 1 und 2 mit der Stufe G1 (Abbildung 41). Hintergrund für das spätere Starten des Prozesses ist, dass dieses Projekt eine technische Weiterentwicklung von in Serie befindlichen Fahrzeugen darstellt und dass somit auf die vorhandene Euro – 5 Bedatung aufgebaut werden kann.

Basis, Leistung und Emissionen, Fahrbarkeit	Varianten	G1	G2	G3	G4	G5
	1	0%	75%	100%	100%	100%
	2	0%	75%	100%	100%	100%
	3	0%	0%	75%	100%	100%
	4	0%	0%	75%	100%	100%
	5	0%	0%	0%	100%	100%
	6	0%	0%	0%	100%	100%
	7	0%	0%	0%	100%	100%
	8	0%	0%	0%	100%	100%

Abbildung 40: Zeitschiene Projekt A, Teil 1

Abgasnachbehandlung	Varianten	G1	G2	G3	G4	G5
	1	100%	100%	100%	100%	100%
	2	100%	100%	100%	100%	100%
	3	0%	0%	100%	100%	100%
	4	0%	0%	100%	100%	100%
	5	0%	0%	100%	100%	100%
	6	0%	0%	100%	100%	100%
	7	0%	0%	100%	100%	100%
	8	0%	0%	0%	100%	100%

Abbildung 41: Zeitschiene Projekt A, Teil 2

Projekt B:

Zwei Fahrzeuge (PKW), ein Grundmotor in drei Leistungsstufen, drei Emissionsstufen (Euro 6, Euro 5, Euro 4), Allrad und Einachs - Antrieb, Rechts- und Linkslenker → ergibt über 30 Varianten.

Diese Varianten weisen untereinander zum Teil Gemeinsamkeiten auf, die eine Übertragung der Bedatung ohne Verifikation zulassen. Daher kann durch Clusterung die Anzahl der Varianten für die Eingabe in das Ressourcenmodell auf sieben reduziert werden.

Die im Vergleich zu Projekt A höhere Anzahl der Varianten ist unter anderem durch eine Vielzahl unterschiedlicher Abgasnachbehandlungssysteme, die Kombination derer und deren Einbausituation bedingt. Das Abgasnachbehandlungssystem gliedert sich folgendermaßen: Euro 6 - System mit DOC, DPF und SCR-Katalysator, davon abgeleitet Euro 5 mit DOC und DPF. Die Fahrzeuge sind aus dem aktuellen Portfolio des Kunden, ebenso wie das Aggregat, das für dieses Projekt vom Kunden technisch überarbeitet wurde.

Ein Euro 5 – Datenstand ist als Ausgangsbasis vorhanden, sodass dieses Projekt bis auf die Abgasnachbehandlung hauptsächlich eine Adaption und Verifikation darstellt. Weiters wird zeitgleich beim Kunden an einer Euro 6 Bedatung für den gleichen Motor, nur in anderen Fahrzeugen gearbeitet. Auf diesen und den entsprechenden Bedatungen kann und soll aufgesetzt werden, um maximale Synergien zu realisieren.

Basis, Leistung und Emissionen, Fahrbarkeit	Varianten	G1	G2	G3	G4	G5
	1	0%	75%	100%	100%	100%
2	0%	25%	100%	100%	100%	
3	0%	75%	100%	100%	100%	
4	0%	50%	100%	100%	100%	
5	0%	50%	100%	100%	100%	
6	0%	75%	100%	100%	100%	
7	0%	25%	100%	100%	100%	

Abbildung 42: Projekt B, Zeitschiene Teil 1

Abgasnachbehandlung	Varianten	G1	G2	G3	G4	G5
	1	0%	50%	100%	100%	100%
2	0%	0%	0%	0%	0%	
3	0%	25%	100%	100%	100%	
4	0%	50%	100%	100%	100%	
5	0%	50%	100%	100%	100%	
6	0%	25%	100%	100%	100%	
7	0%	0%	0%	0%	0%	

Abbildung 43: Projekt B, Zeitschiene Teil 2

Varianten 2 und 7 sind für die beiden Fahrzeuge die Euro 4 Versionen, die für die Abgasnachbehandlung keinen Aufwand darstellen (0% in der Zeitschiene der Abgasnachbehandlung, Abbildung 43). Projekt B stellt wie Projekt A eine technische Weiterentwicklung bestehender Fahrzeuge und Kalibrierungen dar, was den späteren Startzeitpunkt des AVL – Kalibrierprozesses erklärt.

Projekt C:

Zwei Fahrzeuge (PKW und leichtes Nutzfahrzeug), ein Motor in einer Leistungsstufe, drei Emissionsstufen (Brasilien L6, Euro 6, Euro 5) → ergibt fünf Varianten.

Es gibt diesen Motor bei dem Kunden zwar schon in einer Euro 4 Version, aber für dieses Projekt kann nur ein sehr geringer Teil der Bedatung übernommen werden. Das bedeutet, dass die Arbeitspakete zu einem Großteil neukalibriert werden müssen. Zudem soll in der AVL die Verbrennungsentwicklung und damit einhergehend die Überarbeitung/Neuauswahl der Motorhardware bearbeitet werden.

Brasilien L6 und Euro 6 haben das gleiche Abgasnachbehandlungssystem (DOC und DPF und SCR – System), für Euro – 5 kommt nur DOC und DPF zur Anwendung.

Damit ergibt sich für alle Bereiche der PKW-Diesel-Serienkalibrierung folgende Zeitschiene (Abbildung 44):

Projekt C	Varianten	G1	G2	G3	G4	G5
	1	100%	100%	100%	100%	100%
	2	100%	100%	100%	100%	100%
	3	100%	100%	100%	100%	100%
	4	100%	100%	100%	100%	100%
	5	100%	100%	100%	100%	100%

Abbildung 44: Projekt C Zeitschiene

Bezogen auf die Kosten für die konventionelle Kalibrierung, ergibt sich für die drei Projekte folgendes Kostenverhältnis: Die Kosten von Projekt A werden als 100 Prozent angenommen und damit in Relation dazu die Kosten von Projekt B mit 153 Prozent und Projekt C mit 163 Prozent (Abbildung 45).

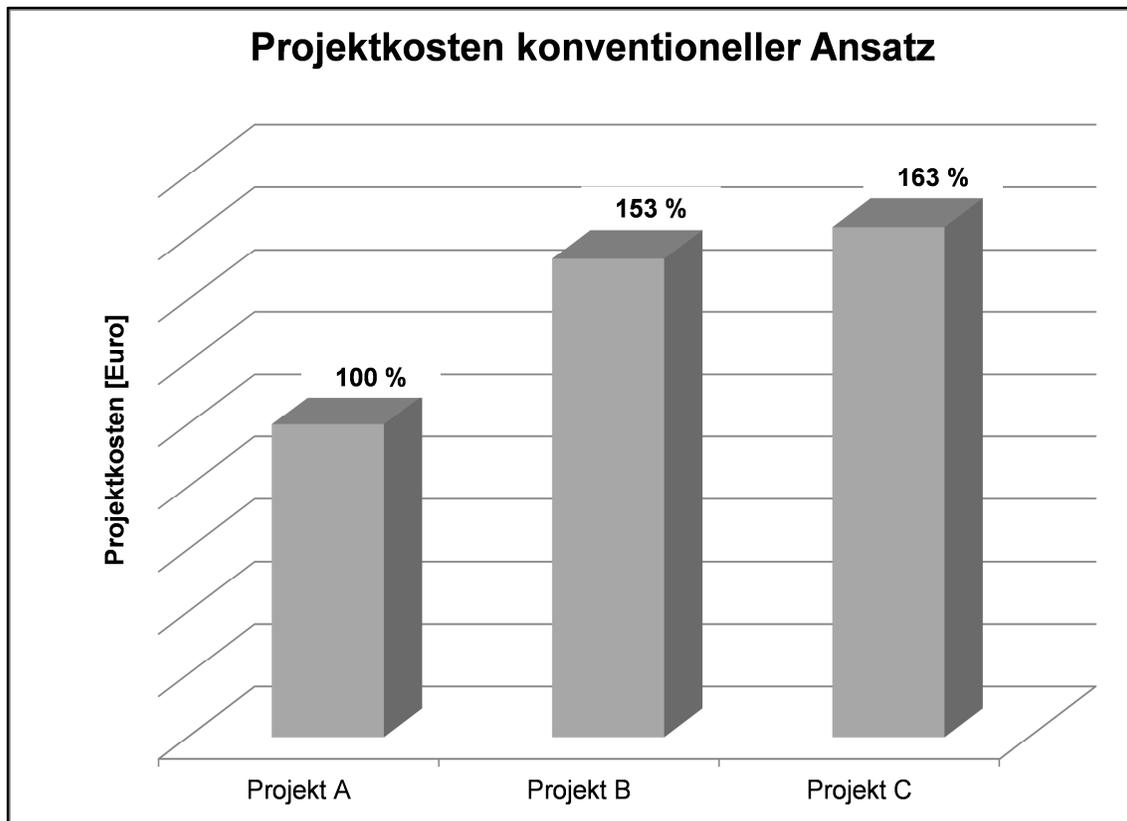


Abbildung 45: Projektkosten konventionell

Für Projekt B und C liegt demnach der finanzielle Aufwand für die Erstellung der Serien-Datenstände auf einem ähnlichen Niveau, obwohl es bei Projekt B deutlich mehr Varianten (31 Stück) gibt. Erklärung dafür ist, dass wie vorher gezeigt Projekt C schon mit der Stufe G1 beginnt und dass vor allem in den früheren Qualitätsstufen hohe Kosten anfallen. Die Projekte A und B haben zwar eine vergleichbare Ausgangslage, aber durch die Vielzahl der Varianten bei Projekt B entsteht diese Kostensituation.

Zur Erinnerung: Die hier dargestellten Kosten stellen nur die Kosten für die Abarbeitung der Arbeitspakete dar. Aufwände für Projektleitung, Logistik, etc... sind nicht Teil dieser Arbeit. Damit spielen hier Kosten, wie zum Beispiel die Verwaltung/Aufbau/Instandhaltung der Versuchsfahrzeuge, keine Rolle. Diese Kosten würden das Verhältnis nach Abbildung 45 deutlich verändern. Mehr Varianten bedeuten auch mehr Versuchsträger und damit verbunden mehr Kosten.

In diesem Kapitel sollen nun auch die Modellerstellungskosten berücksichtigt werden. Dabei gelten folgende Randbedingungen:

- Es gibt ein Motormodell und ein separates Abgasnachbehandlungsmodell.
- Aufwand für das Abgasnachbehandlungsmodell ist ca. dreimal so hoch wie für das Motormodell (drei Abgas - Systeme: Katalysator, Dieselpartikelfilter und SCR → jeweils eine bearbeitende Person; Motormodell: eine bearbeitende Person).
- Dauer für die Erstellung des Motormodells: 8 – 10 Wochen.
- Dauer für die Erstellung des Abgasnachbehandlungsmodells: rund 12 Wochen.
- Für beide Modelle sind Messungen auf verschiedenen Prüfständen notwendig. Können die Messungen neben der Modellerstellung auch für die Kalibrier-tätigkeiten genutzt werden, stellt dies Einsparungspotential dar. Dies ist bei den folgenden Aufstellungen berücksichtigt.

Mit den Kosten aus dem Ressourcenmodell für den konventionellen und modellbasierten Ansatz und den Kosten für die Modellerstellung ergibt sich die folgende Aufstellung (Abbildung 46).

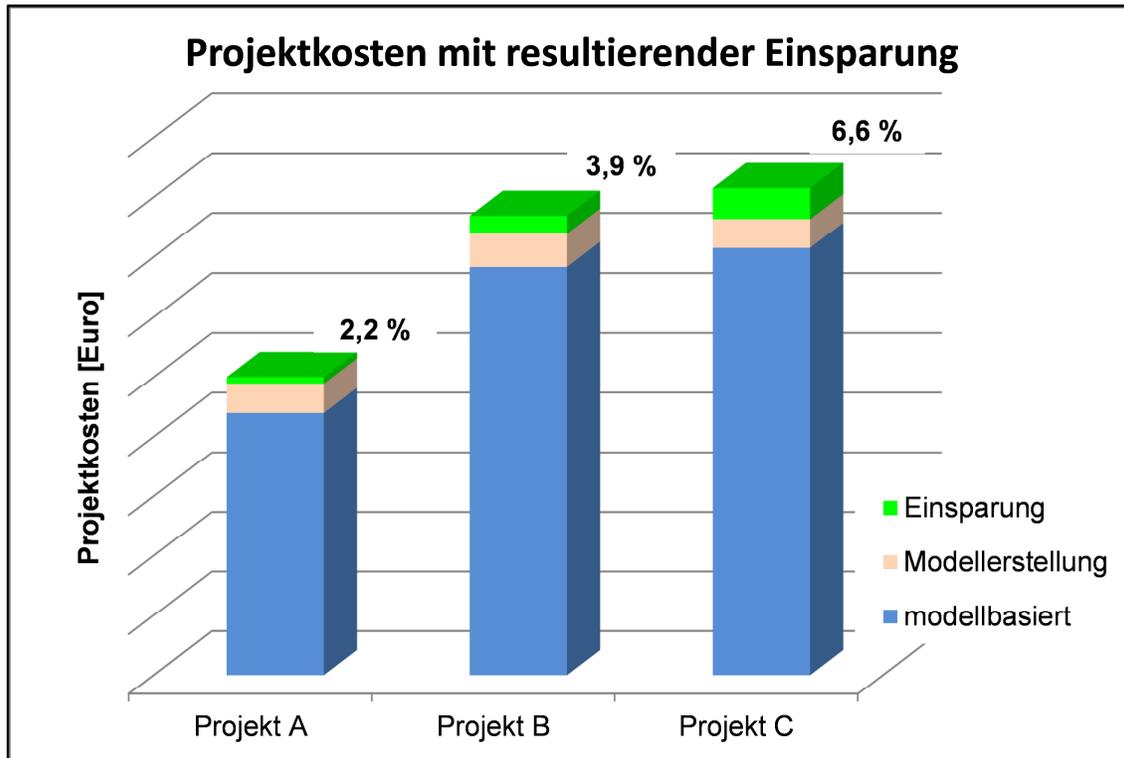


Abbildung 46: Projektkosten mit Einsparung

Die Höhe des gesamten Balkens entspricht wieder den Kosten des konventionellen Ansatzes. Um die Größenverhältnisse zwischen den einzelnen Positionen und Projekten zu veranschaulichen, wurde die Darstellung aus Abbildung 45 übernommen. In Tabelle 3 die dazugehörigen Werte, in der jeweils die Kosten der konventionellen Methode mit 100 Prozent angesetzt wurden.

Tabelle 3: Aufstellung Kostenvergleich

	Projekt A	Projekt B	Projekt C
Einsparung	2,2 [%]	3,9 [%]	6,6 [%]
Modellerstellung	9,9 [%]	7,2 [%]	5,9 [%]
modellbasiert	87,9 [%]	88,9 [%]	87,5 [%]
konventionell	100 [%]	100 [%]	100 [%]

Betrachtet man die Kosten der modellbasierten Abarbeitung, liegen diese mit rund 88 Prozent auf ähnlichem Niveau, bei den Modellerstellungskosten und der Einsparung werden die Unterschiede aber deutlicher. Alle drei Projekte haben eine Euro 6 – Variante im Portfolio und damit ein Abgasnachbehandlungssystem mit DOC, DPF und SCR-Katalysator. Dies stellt die Variante mit dem meisten Aufwand für die Modellerstellung dar, somit ist der Aufwand der Projekte für die Modellerstellung nahezu ident. Die prozentualen Unterschiede ergeben sich durch die unterschiedlich hohen Projektkosten. Das bedeutet, dass sich die relativ hohen 9,9 Prozent bei Projekt A sich durch die im Vergleich niedrigen Gesamt-Projektkosten ergeben (siehe Abbildung 45).

Die Einsparung in Abbildung 46 ist erfreulicherweise schon beim umfangsmäßig kleinsten Projekt A gegeben, zwar „nur“ mit 2,2 Prozent, aber das bedeutet auch, dass hier der modellbasierte Ansatz zumindest kostendeckend eingesetzt werden kann, selbst wenn etwaige Unsicherheitsfaktoren (Berechnungen beruhen auf Einschätzungen,...) miteinkalkuliert werden. Diese Werte bestätigen den eingeschlagenen Kurs der AVL - Serienkalibrierung, die MoBEO – Methode vermehrt in der Diesel – PKW - Kalibrierung einzusetzen.

Im Folgenden eine detailliertere Aufstellung der Kosten an Hand des Projektes C:

(Die Kosten für die Modellerstellung sind hierbei wiederum nicht berücksichtigt!)

In Abbildung 47 sind die Aufwände der Arbeitsbereiche in Euro für dieses Projekt dargestellt. Wie in den Darstellungen zuvor stellt die Höhe eines Balkens die Kosten der konventionellen Abarbeitung dar, blau die der modelbasierten und damit in Grün die erreichbare Einsparung. Das Größenverhältnis der Balken gibt das Verhältnis der absoluten Zahlen wieder. Es sind zum Beispiel die Aufwendungen des Bereichs *Abgasnachbehandlung* mehr als doppelt so hoch wie von *Basis*. Die Einsparungen sind ebenfalls in absoluten Zahlen dargestellt, mit der jeweiligen Prozentangabe. *Leistung und Emissionen* erarbeitet demnach mit 16 Prozent die höchste Einsparung, aber in absoluten Zahlen gesehen, liegt die 14 prozentige Einsparung der *Abgasnachbehandlung* fast doppelt so hoch.

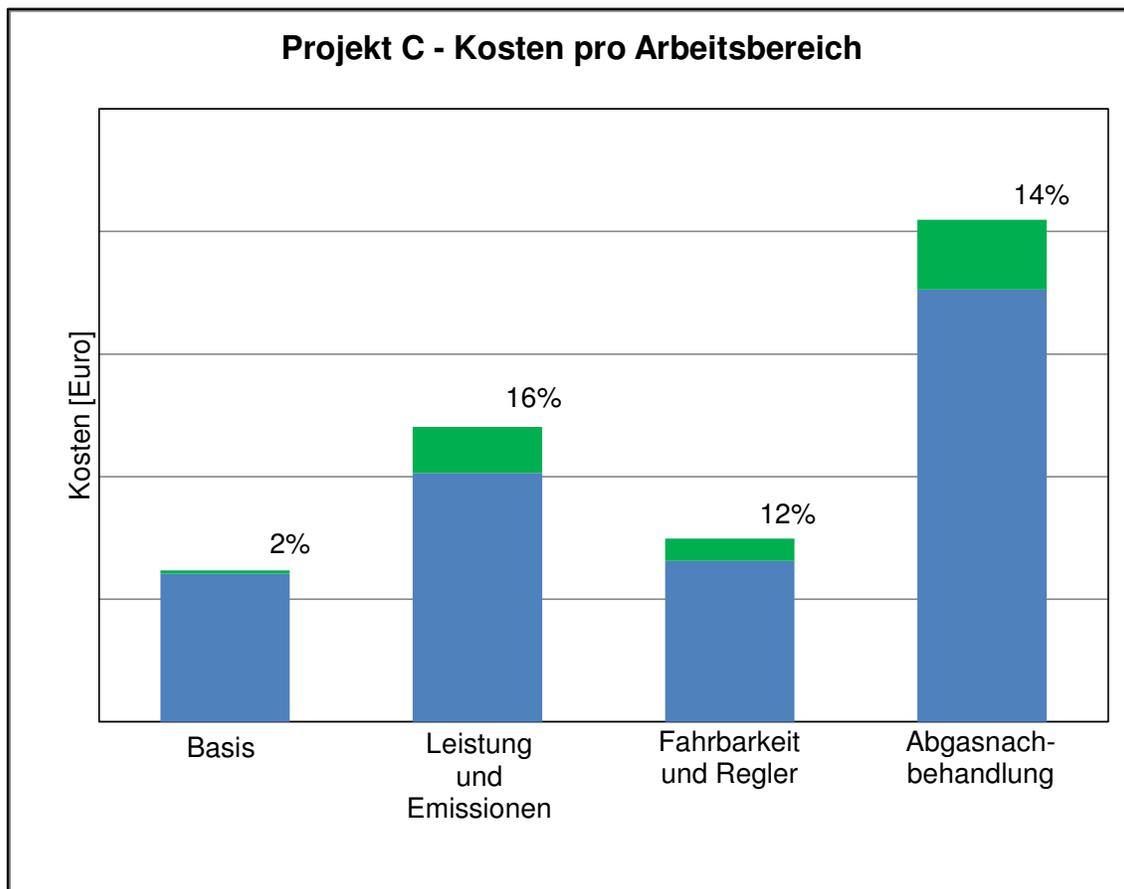


Abbildung 47: Projekt C, Kosten pro Arbeitsbereich

Betrachtet man die Aufteilung der Kosten und Einsparungen pro Qualitätsstufe für die Arbeitsbereiche, ergeben sich die Abbildungen 48 – 51. Für *Basis* erkennt man wieder die im Vergleich zur *Abgasnachbehandlung* deutlich niedrigeren Kosten. Die modellbasierten Aufwände sind in der ersten Stufe 4,6 Prozent und in der zweiten 2,4 Prozent niedriger als für konventionelle Anforderungen. Weiterführend im Kalibrierprozess wird die MoBEO-Methode nicht mehr verwendet. In der letzten Stufe sind für *Basis* gar keine Tätigkeiten mehr vorgesehen. Auf die Tätigkeiten dieses Bereichs bauen die anderen Ingenieure auf, deshalb fallen auch die meisten Aufwendungen am Beginn des Kalibrierprozesses an.

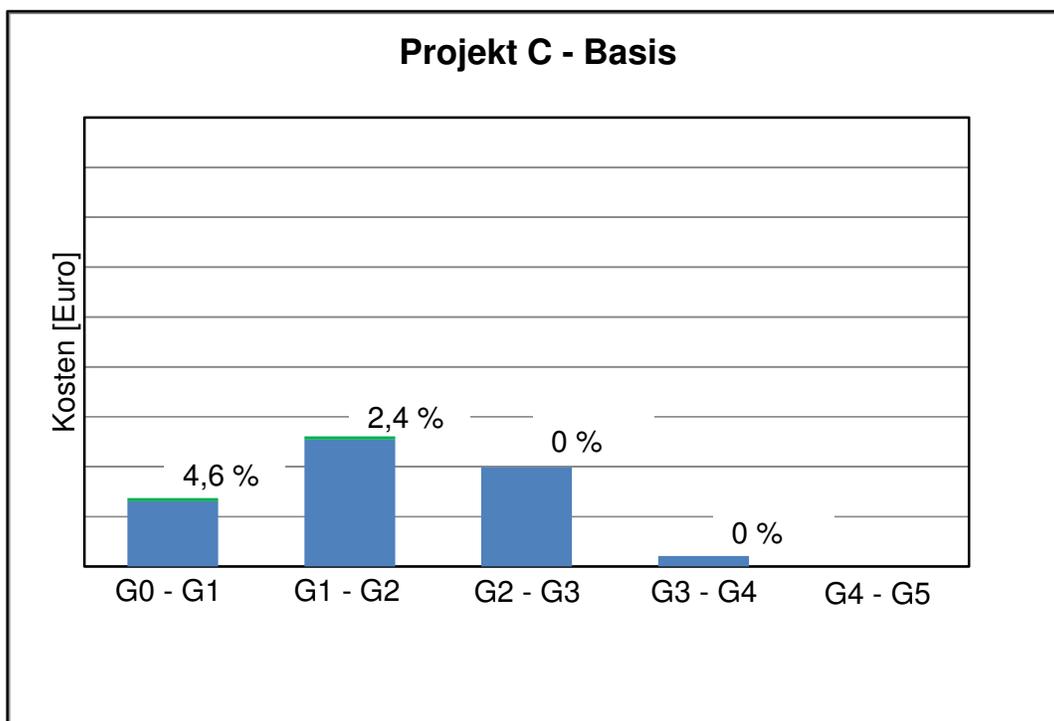


Abbildung 48: Projekt C, Basis, G1 - G5

Nach Definition des Kalibrierprozesses der AVL müssen in den Stufen G2 beziehungsweise G3 die Emissionsziele erreicht werden (in G2 die gesetzlichen und in G3 die darunter liegenden Entwicklungsziele). Da die dafür erforderlichen Tätigkeiten eine Hauptaufgabe für *Leistung und Emissionen* darstellen, fallen in dieser Phase die höchsten Kosten an. Wie schon erwähnt, müssen für die Kontrolle der Bedatung zahlreiche Rollenprüfstandtests gefahren werden, wovon ein hoher Anteil am HiL-Prüfstand durchführbar ist, woraus sich die hohen Einsparungen (Abbildung 49) ergeben.

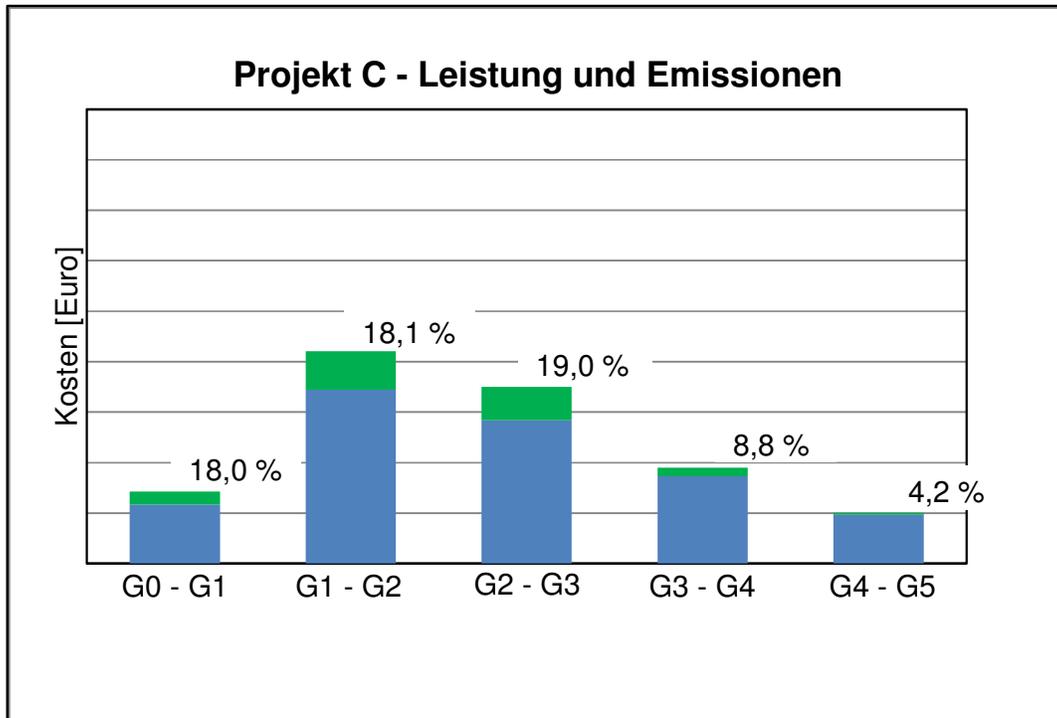


Abbildung 49: Projekt C, Leistung und Emissionen, G1 - G5

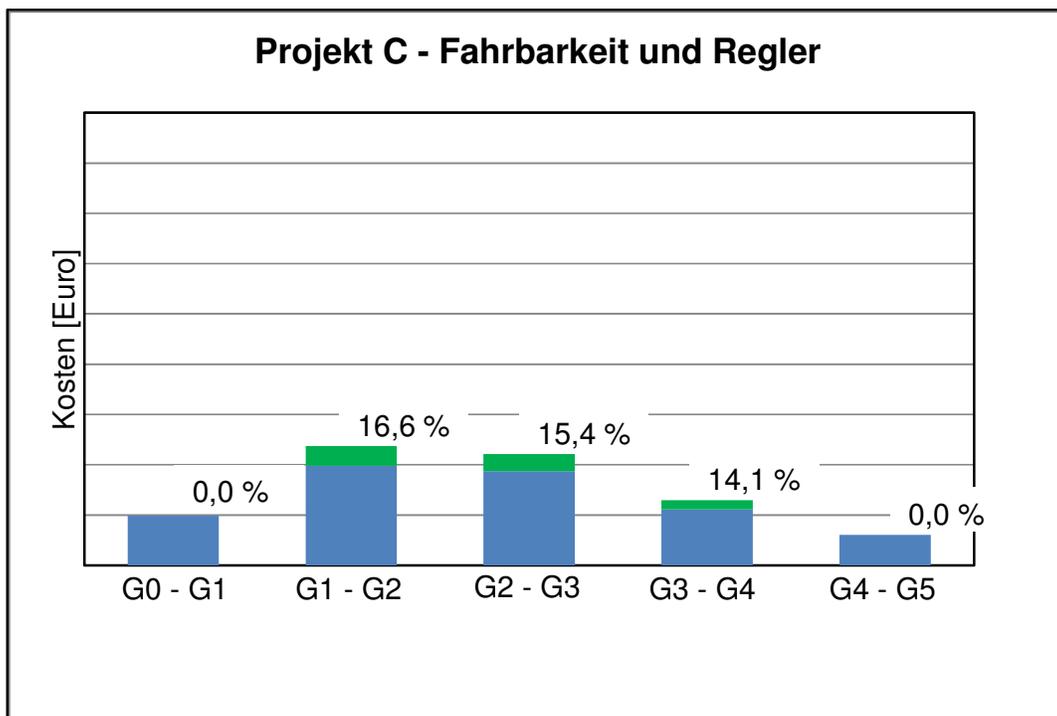


Abbildung 50: Projekt C, Fahrbarkeit und Regler, G1 - G5

In Abbildung 50 ist die Kostenentstehung im Bereich *Fahrbarkeit und Regler* über die Stufen des Kalibrierprozesses dargestellt und man sieht, dass man in diesem Bereich erst mit der modellbasierten Arbeitsweise beginnt, wenn der Motor lauffähig ist (siehe Definition der Stufen des Kalibrierprozesses auf Seite 52).

In der *Abgasnachbehandlung* (Abbildung 51) fallen die höchsten Aufwendungen an, hier vor allem wieder bis inklusive der vollständigen Qualitätsstufe G3. Mit 40 Prozent ist die Differenz zwischen konventionellen und modellbasierten Aufwänden in der ersten Stufe äußerst hoch. Hintergrund ist, dass hier der überwiegende Teil der Aufwendungen, Aufwendungen für Motor-Prüfstandstests darstellen, von denen nahezu 40 Prozent mit MoBEO durchführbar sind.

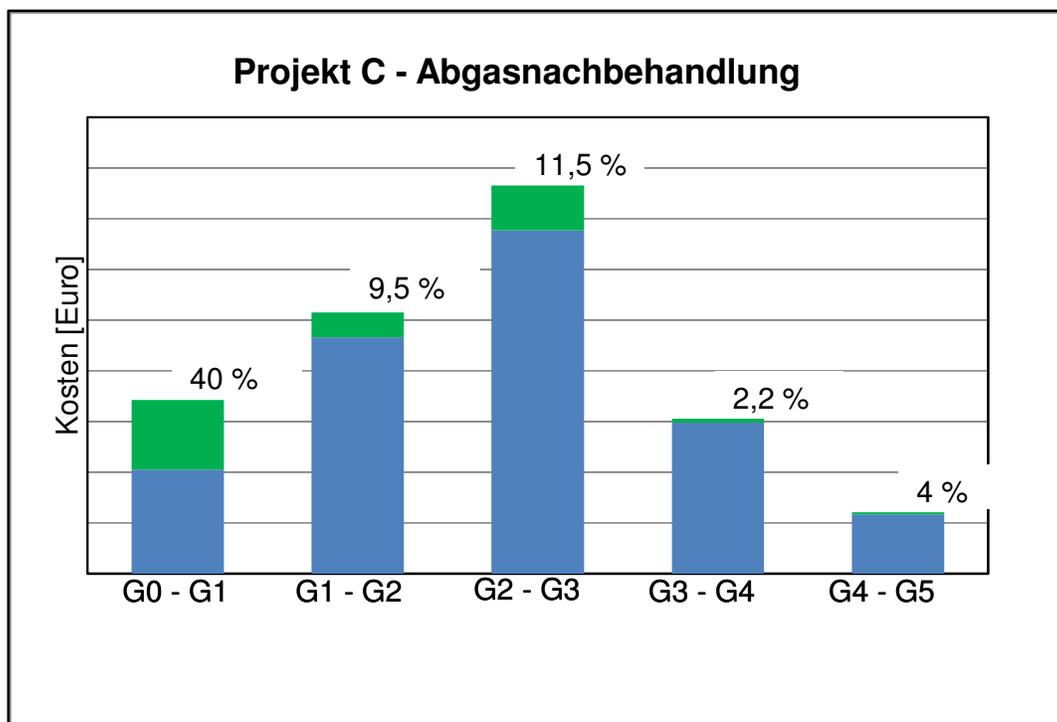


Abbildung 51: Projekt C, Abgasnachbehandlung, G1 - G5

Abschließend soll die Umverteilung der benötigten Ressourcen an Hand des Projektes C (Tabelle 4) erläutert werden. Die Modellerstellung ist hierbei wieder berücksichtigt und diverse Testmethoden wurden mit entsprechenden Zeitanteilen ebenfalls berücksichtigt. Die Einheit der Werte ist in Tagen angegeben. 2s und 3s bedeutet, dass der jeweilige Prüfstand entweder in zwei oder drei Schichten betrieben wird.

Tabelle 4: Projekt C, Umverteilung der benötigten Ressourcen

Ressource	konventionell	modellbasiert	Differenz
Motor- Prüfstand 2s	169,5	120,1	-49,5
Motor- Prüfstand 3s	111,3	95,8	-15,5
Rollenprüfstand	121,7	96,2	-25,5 (2s)
Kälterolle	42	31	-11
Höhenrolle	66,3	46,3	-20
Dauerlauf	287,5	279	-8,5
HiL-Prüfstand	26,9 (2s) 17,9 (3s)	193,1 (2s) 128,7 (3s)	+166,2 (2s) +110,8 (3s)

Bildet man die Summen der Differenzen der Ressourcen, kommt man auf 120 Tage, die entweder 166,2 Tage im Zweischicht-Betrieb oder 110,8 Tage im Dreischicht-Betrieb am HiL-Prüfstand darstellen. Mit einer Dauer von rund 280 Tagen für Dauerlaufversuche ist ersichtlich, wie wichtig eine Absicherung der Bedatung in realen Fahrversuchen ist.

Diese Aufstellung der Umverteilung der Ressourcen liefert wichtige Informationen über die künftige Auslastung der Versuchseinrichtungen, zeigt Potential zur alternativen Nutzung der Ressourcen auf und verdeutlicht wie und in welchem Ausmaß ein HiL-Prüfstand in so einem Projekt zum Einsatz kommt.

5 Künftige Anwendungsmöglichkeiten und Mehrwert des modellbasierten Ansatzes

Aktuell wird MoBEO hauptsächlich im Nutzfahrzeugbereich eingesetzt. Ein erfolgreicher Einsatz war zum Beispiel die Höhenadaptierung einer Baumaschine. Am HiL-Prüfstand wurde die Basisauslegung der Parameter für die Höhenanpassung gemacht, diese musste vor Ort nur mehr validiert werden. Gerade bei Baumaschinen, die aufgrund ihrer Größe schwerer zu transportieren sind und weil die Stückzahlen von Haus aus geringer als im PKW-Sektor sind, bietet der modellbasierte Ansatz Kosten-, Zeit- und Qualitätsvorteile. Zeit und damit Kosten können eingespart werden, weil Versuchsträger fast ausschließlich zur Validierung gebraucht werden und die Qualität erhöht sich dadurch, dass die Kalibrierung durch Simulation jeglicher Einsatzbedingungen robuster wird. Damit wird natürlich nicht nur die Bedatung robuster, sondern die Fahrzeuge können auch für jegliche Einsatzgebiete dieser Welt abgestimmt werden.

Diese Ergebnisse bieten auch großes Potential für die Verwendung im PKW-Bereich. Wie die Auswertung von Projekt B schon gezeigt hat (Kapitel 4.3), bieten sich große Einsparungen im Bereich der Multivariantenkalibrierung. Dabei wurden aber lediglich die Kosten für die Abarbeitung der Arbeitspakete betrachtet. Ein weiterer positiver Effekt wäre, dass nicht jede Fahrzeugvariante des Projektumfangs real verfügbar sein müsste. Sind die Auswirkungen der Unterschiede zu anderen Varianten überschaubar beziehungsweise durch entsprechende Tests am HiL-Prüfstand überprüfbar und kann die Bedatung dabei entsprechend angepasst werden, könnten Versuchsträger eingespart werden. Vorteile davon sind, dass Logistikaufwände reduziert werden können und dass die Fahrzeuge immer mit Bauteil-Letzstand simuliert werden würden.

Ein weiterer Punkt ist, dass sich Erprobungen verändern werden. Es wird mehr validiert statt ausgelegt werden, was bedeutet, dass das gleiche Personal mehr Fahrzeuge überprüfen kann oder für die gleiche Anzahl an Fahrzeugen weniger Personal notwendig ist.

In Kapitel 4.1.1 wurden schon ausführlich auf die Vorteile rund um die Ermittlung der Abgasemissionen eingegangen. Ein weiterer wichtiger Punkt in der Serienkalibrierung ist die Funktionsüberprüfung neuer Softwareversionen. Ein Softwarewechsel aufgrund technischer Anforderungen passiert öfters im Laufe einer Entwicklung und damit ist auch immer das Risiko der Fehleranfälligkeit verbunden. Würde man ein standardisiertes Prüfprogramm am HiL-Prüfstand aufsetzen (z.B. eine Kennfeldrasterung und die wichtigsten Prüfzyklen), könnten bei der Auswertung etwaige Fehler

rasch aufgedeckt und somit unnötig anfallende Kosten verhindert werden. Solche standardisierten Prüfprogramme würden sich auch für Datenstandsvalidierungen oder Überprüfungen vor einer Abgabe an den Kunden (Meilensteinabgaben) eignen.

Es wurde schon erwähnt, dass Fahrereinflüsse und Bauteilstreuungen mit dieser Methode ausgeschlossen werden können. Im Gegenzug bietet es sich auch an, eine gewisse Bauteilstreuung zu simulieren und damit die Robustheit der Bedatung abzusichern.

Ebenfalls gute Einsatzmöglichkeiten des modellbasierten Ansatzes bietet, die Möglichkeit, dass künftige Abgasgesetzgebungen auch so genannte ReaDriving Emissionen (RDE) umfassen könnten. Dabei sollen Emissionen auch bei kundennahen Fahrten gemessen und bewertet werden. Das bedeutet, man braucht ein zuverlässiges, mobiles Abgasmesssystem und führt diese Überprüfung im Straßenverkehr durch. Am HiL-Prüfstand (und auch am Motorprüfstand) müssten „nur“ entsprechende Fahrzyklen programmiert werden, damit die Emissionen kontrolliert und gegebenenfalls die Bedatung angepaßt werden kann. Im optimalen Fall ist dann nur mehr die Überprüfung in realen Fahrversuchen notwendig.

Es könnten ebenso standardisierte Prüfprogramme für den Bereich der *On Board Diagnose* aufgesetzt werden, wo die wichtigsten Diagnosen in einem Zyklus durchlaufen werden. Die Zeit und der Aufwand für die Durchführung der erforderlichen Tests würde sich dadurch massiv verringern, weil die Fahrzeuge nicht entsprechend präpariert (Sensoren deaktivieren, mechanische Steller blockieren, Querschnitte und damit Durchflüsse verringern,...), konditioniert und rückumgebaut werden müssten. Da dabei auch Tests mit eventuell auftretendem Materialverschleiß eingeplant sind, würde man auch diesen verringern können. Hauptvorteil im Bereich der Diagnose ist sicherlich der Zeitvorteil und damit verbunden die Kosteneinsparung, aufgrund der wesentlich einfacheren und schnelleren Prüfmöglichkeiten.

In dieser Arbeit wurde bei den Ergebnissen der Projektbeispiele die Modellerstellung berücksichtigt. Mit der Annahme, dass die AVL für ein Projekt schon ein Modell erstellt hat und ein Folgeprojekt mit dem gleichen Motor oder gleicher Abgasnachbehandlung bekommt, würden damit die Kosten für die Modellerstellung wegfallen, oder sich, wenn aufgrund einer technischen Überarbeitung der Bauteile eine Anpassung des Modells notwendig ist, zumindest signifikant reduzieren.

Ein Thema das noch weiter in der Zukunft liegt, ist die Zusammenführung von Motor- und Abgasmodell mit einem Fahrzeugmodell. Dabei könnten dann auch Fahrbarkeitsthemen modellbasiert bearbeitet werden. Aufgrund der Komplexität des Unterfangens und der dafür notwendigen Versuchseinrichtungen (Rechenkapazität) ist dies vorerst aber noch nicht vorgesehen.

6 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die MoBEO-Methode wird in der Nutzfahrzeugkalibrierung der AVL bereits sehr erfolgreich eingesetzt. Da liegt es nahe, die dabei aufgebaute Erfahrung und das generierte Wissen auch im PKW-Bereich einzusetzen. Ziel dieser Arbeit war es herauszuarbeiten, wo der Einsatz des modellbasierten Ansatzes technisch möglich ist und wo sich Vorteile, sowohl wirtschaftlich, technisch und qualitativ, ergeben. Das Hauptinteresse galt der Frage, ab welcher Projektgröße der Einsatz wirtschaftlich sinnvoll ist.

Die Angaben bezüglich eines möglichen Einsatzes und die daraus folgenden Auswirkungen auf das Mengengerüst basieren auf der Erfahrung und Beurteilung von den Fachexperten der einzelnen Bereiche der Diesel-Serienkalibrierung.

Anfangs musste dafür geklärt werden, für welche Kalibriertätigkeiten das Modell eingesetzt werden kann und in welchem Umfang dies möglich ist. Die Ergebnisse zeigen nicht nur Anwendungsmöglichkeiten, sondern auch, wo die Modelleigenschaften noch weiter entwickelt werden sollten, um das Einsatzgebiet auszuweiten. Auffällig ist, dass es zwischen den verschiedenen Bereichen der Serienkalibrierung deutliche Unterschiede gibt. So kann im Bereich Leistung und Emissionen jedes Arbeitspaket modellbasiert vorkalibriert und validiert werden, während im Bereich *Basis* und *Abgasnachbehandlung* jeweils „nur“ ca. 60 Prozent vorkalibriert und ca. 40 Prozent validiert werden können. Im Bereich *Fahrbarkeit und Regler* können überhaupt nur ca. 20% vorkalibriert werden, da für die weiteren Tätigkeiten in diesem Bereich reale Fahrversuche unumgänglich sind. Die unterschiedliche Gesamtzahl an Arbeitspaketen pro Arbeitsbereich und die unterschiedlich hohen Aufwendungen für diese Tätigkeiten, bewirken aber bei der Berücksichtigung der Kosten für deren Abarbeitung einen anderen Eindruck. Der Bereich *Basis* hat mit der Zahl von 35 die meisten Arbeitspakete, die entstehenden Kosten die bei der Abarbeitung dieser entstehen, sind in der gleichen Höhe wie für die vier Arbeitspakete von *Leistung und Emissionen*. Die höchsten Kosten entstehen im Arbeitsbereich *Abgasnachbehandlung*, die mehr als das Doppelte der Kosten der beiden vorher genannten Bereiche betragen. Außerdem hat sich gezeigt, dass es in der *Abgasnachbehandlung* und bei *Fahrbarkeit und Regler* Arbeitspakete gibt, die nach Einschätzung der zuständigen Fachexperten modellbasiert bearbeitbar wären, aber die Qualität der Ausgabegrößen des Modells ist aktuell (noch) nicht ausreichend.

Im nächsten Schritt wurden die mengenmäßigen Auswirkungen auf die Ressourcen (Mannstunden, Versuchseinrichtungen und verschiedene Testarten) beurteilt und mit den Daten des konventionellen Ansatzes verglichen. Als Berechnungswerkzeug wurde das von der AVL entwickelte „Ressourcenmodell“ verwendet, welches für den konventionellen Ansatz schon zur Verfügung stand und für den modellbasierten Ansatz entsprechend adaptiert wurde. Der Vergleich zwischen konventionell und modellbasiert erfolgte in zwei Stufen, zum einen eher theoretisch auf Basis der Kosten pro Arbeitspaket und zum anderen mehr praxisbezogen, an Hand von Projektbeispielen.

Die Bereiche *Leistung und Emissionen* und *Abgasnachbehandlung* stellten sich dabei als jene Bereiche heraus, in denen die höchsten Einsparungen zu realisieren sind. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass in beiden Fällen wiederholt standardisierte Prüfprogramme eingesetzt und diese optimal am kostengünstigeren HiL-Prüfstand „gefahren“ werden können. Dies trifft vor allem in den frühen Phasen des Kalibrierprozesses zu, in denen die Verifizierung der Ergebnisse an realen Versuchsträgern noch eher gering gehalten werden kann. Gegen Ende des Prozesses ist eine kontinuierliche Überprüfung der Bedatung in realen Fahrversuchen unumgänglich, was auch erklärt, warum die modellunterstützte Kalibrierweise hauptsächlich in den frühen Phasen der Serienkalibrierung eingesetzt wird. Für die Tätigkeiten im Bereich *Basis* gibt es zwar anteilmäßig viele Einsatzmöglichkeiten für die modellbasierte Arbeitsweise. Diese bringt aber nur sehr geringe Einsparungsmöglichkeiten im Vergleich zu den Gesamtkosten. Der Grund ist in den umfangmäßig eher kleineren Arbeitspaketen und in dem Fakt zu sehen, dass für eine umfassendere modellbasierte Unterstützung noch genauere physikalische Ausgabegrößen des Modells notwendig sind. Die Reduzierung des Einsatzes von Motorprüfständen generell und von Rollenprüfständen zur Simulation von Höhe und/oder Kälte, bringen im Bereich Fahrbarkeit und Regler hohe Einsparungsmöglichkeiten.

Beim Vergleich an Hand von drei Projektbeispielen, die der AVL-Projektlandschaft entnommen wurden, stellte sich heraus, dass trotz Berücksichtigung der Modellerstellungskosten eine Einsparung im Vergleich zur konventionellen Arbeitsweise realisierbar ist. Die Höhe dieser Einsparung hängt in erster Linie vom Projektumfang ab, wobei als wichtige Parameter für die Entscheidung über die Verwendung des modellbasierten Ansatzes eine möglichst hohe Zahl verschiedener Varianten und/oder ein früher Start im Kalibrierprozess genannt werden können. Projekte mit vielen zu bedatenden Varianten und frühem Start im Kalibrierprozess haben somit das größte Potential für einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz der MoBEO-Methode.

Darüber hinaus sind im Zusammenhang mit dem modellbasierten Ansatz weitere Vorteile zu erwarten:

- Der Bereich OBD wurde in dieser Arbeit aus zeitlichen Gründen nicht berücksichtigt, birgt aber viel Einsatzpotential für den modellbasierten Ansatz, da in diesem Bereich sehr stark standardisierte Prüfprogramme zum Einsatz kommen.
- Die Auslastung der Ressourcen wird sich verlagern, daher können mit den bestehenden Ressourcen mehr Projekte im gleichen Zeitraum abgearbeitet werden.
- Durch standardisierte Prüfprogramme am HiL-Prüfstand erhöht sich die Robustheit und damit die Qualität der Kalibrierung.
- Bei Multivariantenkalibrierungen bieten sich erhebliche Vorteile hinsichtlich Logistik und Datenhandling. Es sind zum Beispiel sind weniger Versuchsträger notwendig und der Aufwand, der damit verbunden ist, reduziert sich.
- Die Bedatung kann am HiL-Prüfstand sehr einfach auf jegliche Umweltbedingungen dieser Welt abgestimmt werden und muss am tatsächlichen Einsatzort nur validiert werden.
- Bislang wird die Durchführung einer Gesamtkalibrierung als langfristig angestrebtes Zukunftsszenarium betrachtet. Die heutige Ermittlung der Ergebnisse ist untrennbar mit realen Fahrversuchen gekoppelt. Mit steigender Erfahrung im Umgang mit MoBEO, durch Weiterentwicklung des Modells und dessen Genauigkeit und dem Vertrauen in die Ergebnisse des modellbasierten Ansatzes, ist zu erwarten, dass man sich diesem Ziel annähert.
- Mittels Simulation unterschiedlicher Fahrzyklen und Lastkollektive können Potentialanalysen für von bestehenden Varianten abgeleitete, neuartige Motor-/Fahrzeugversionen durchgeführt werden (Machbarkeitsstudien).

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden als Bestätigung der konsequenten Vorantreibung der Entwicklung der MoBEO-Methode gesehen und legen die Vermutung nahe, dass die modellbasierte Kalibrieremethode in der PKW-Serienkalibrierung immer mehr zum Einsatz kommen wird.

Quellen-/ Literaturverzeichnis

- [1] **AVL List GmbH** (2012). AVL Fact Sheet. <https://www.avl.com/avl-facts>. (Datum des Zugriffs: 22. November 2012).
- [2] **Schüssler M., Allmer I., Hollauf B., Kordon M., Kozlik C., Seewald G., Hülser H.** (2008). Modellbasierte Emissionsoptimierung auf Triebstrang-Ebene, S4, 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2008
- [3] **Schüssler M., Decker M., Hohl Y., Kordon M.** (2010). Modellbasierter Entwicklungsansatz für Partikelfilter, S43, Sonderausgabe ATZ offhighway September 2010
- [4] **AVL-DES interne Präsentation** (2012)