

Gernot Prüller, BSc

Packaging und experimentelle Untersuchungen eines 2-Takt Range Extenders in einem L1e City Scooter

Masterarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Maschinenbau

Eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Eichlseder

Betreuender Professor:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Eichlseder
Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Roland Kirchberger

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr. techn. Stephan Schmidt
Dipl.-Ing. Hans Jürgen Schacht

Widmung

Ich möchte diese Arbeit meinem leider bereits 1997 verstorbenen Vater, Josef Prüller, widmen. Er war ein begnadeter Techniker auf dem Gebiet der Heizkesseltechnik und oftmals seiner Zeit voraus. Als Pionier in der Biomassevergasung brachte er mit äußerst bescheidenen Mitteln bereits in den 80er Jahren Entwicklungen hervor, die bis heute den Stand der Technik markieren und auch noch weiterhin ihren Einsatz finden werden. Dies war nur durch seinen riesigen Ehrgeiz und eine gewisse Starrköpfigkeit möglich, mit dem Ziel immer neue Wege zu gehen, ungeachtet der kopfschüttelnden Zweifler und Kritiker.

Ich denke aus dieser Haltung konnte ich eine Menge für mein Leben mitnehmen, ohne eine gewisse Sturheit wird man nie zu neuen Ufern vorstoßen. Jedoch hoffe ich diese Herangehensweise richtig zu verstehen und einzusetzen, und das richtige Maß an Kritik in mein Handeln einfließen zu lassen.

Gernot Prüller

Inhaltsverzeichnis

WIDMUNG	I
INHALTSVERZEICHNIS	II
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	IV
VORWORT	V
ZUSAMMENFASSUNG	VI
ABSTRACT	VII
AUFGABENSTELLUNG UND ZIELE	1
1 EINLEITUNG	2
1.1 HYBRIDANTRIEBSKONZEPTE	3
1.1.1 Paralleler Hybrid	3
1.1.2 Serieller Hybrid	4
1.1.3 Mischhybride	5
1.1.4 Range Extender	6
1.2 ABGASPRÜFUNG	8
1.2.1 Arten von Hybrid-Elektrofahrzeugen	8
1.2.2 Fahrzeugklassen	9
1.2.3 Grenzwerte	11
1.2.4 Prüfverfahren	12
1.2.5 Berechnung der Abgaswerte	15
1.2.6 Elektrische Reichweite	16
2 VERSUCHSFAHRZEUG	17
2.1 FAHRZEUG	17
2.1.1 Spannungsanzeige am Bordinstrument	18
2.2 AKKUMULATOREN	19
2.2.1 Kapazität	21
2.2.2 Entladung	22
2.2.3 Ladespannung	23
2.2.4 Ladestrom	23
2.2.5 Definition Ladezustand	24
2.3 ROLLENMESSUNG E-FAHRZEUG	26
2.3.1 Hohe Kapazität (40 Ah)	26
2.3.2 Reduzierte Kapazität (22 Ah)	28
3 KONZEPT RANGE EXTENDER	30
3.1 GENERATOR	31
3.1.1 Zusammenhang Erregerstrom – Drehmoment	32
3.1.2 Wirkungsgrad Generator [17]	34
3.2 VERBRENNUNGSMOTOR	35
3.2.1 Kennwerte	36

3.2.2	<i>Verwendung eines 2-Takt Motors</i>	37
3.2.3	<i>Abgasverhalten</i>	38
3.2.4	<i>Kühlung</i>	38
4	PACKAGING	40
4.1.1	<i>Einbaulage</i>	40
4.1.2	<i>Lagerung</i>	41
4.1.3	<i>Abgasanlage</i>	43
4.2	RIEMENTRIEB.....	44
4.2.1	<i>Zahnriemen</i>	44
4.2.2	<i>Keilriemen</i>	46
4.2.3	<i>Rippenriemen (Multirib)</i>	46
4.2.4	<i>Übersetzungsverhältnis</i>	48
5	FUNKTIONSENTWICKLUNG AM MOTORPRÜFSTAND	49
5.1	MOTORSTEUERUNG.....	49
5.1.1	<i>Steuergerät – Microsquirt</i>	50
5.1.2	<i>Kraftstoffeinspritzung</i>	52
5.2	BATTERIESIMULATION.....	55
5.3	STARTER.....	56
5.4	LASTAPPLIKATION.....	57
5.4.1	<i>Volllast</i>	57
5.4.2	<i>Lastregelung</i>	58
5.5	AUSWIRKUNGEN INFOLGE LAST- UND SPANNUNGSÄNDERUNG.....	61
6	APPLIKATION INS FAHRZEUG	65
6.1	KRAFTSTOFFSYSTEM.....	66
6.2	ANSAUGGERÄUSCHDÄMPFER (AGD).....	67
6.3	PRÜFZYKLEN.....	68
6.3.1	<i>Konstante Erregung (V1)</i>	68
6.3.2	<i>Spannungsabhängige Erregung – V2</i>	71
6.3.3	<i>Schaltung zur Erregungssteuerung</i>	72
6.3.4	<i>Spannungsabhängige Erregung – V3</i>	77
6.4	ABGASAUSWERTUNG.....	79
6.5	ENERGIEBILANZ.....	80
6.6	WIRKUNGSGRAD.....	81
7	SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK	82
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	83
9	TABELLENVERZEICHNIS	86
10	LITERATURVERZEICHNIS	87

Eidesstattliche Erklärung

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

Gernot Prüller

Graz, Juni 2014

Vorwort

Ressourcenknappheit, strengere Abgasgesetze und steigende Energiekosten verlangen stetig nach neuen technischen Lösungen, um diesen Herausforderungen gewachsen zu sein. Dies betrifft auch den Bereich der Mobilität. Besonders der innerstädtische Individualverkehr bietet hier noch großes Potential zur Optimierung.

Schon seit vielen Jahren spielt dabei der elektrische Antrieb eine entscheidende Rolle und hat sich bereits vielfach bewährt. Vor allem im Kurzstreckenbetrieb können die Vorteile der E-Mobilität ausgespielt werden. Und dies nicht nur am PKW, sondern auch am Zweirad Sektor.

Aber wie sieht es im Betrieb über lange Distanzen aus? Hier können erhebliche Nachteile im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor auftreten, da hohe Reichweiten im Elektrofahrzeug nur mit teils schweren und teuren Batterien verwirklicht werden können. Abhilfe schafft die Verwendung einer zusätzlichen Energiequelle zur Erweiterung der Reichweite, üblicherweise ein Verbrennungsmotor, dem „Range Extender“.

Am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz ergab sich für mich die Möglichkeit, in diesem Bereich tätig zu werden. Mein besonderer Dank gilt daher Institutsvorstand Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Eichlseder, dem Leiter des Forschungsbereichs Konstruktion und Auslegung Dipl.-Ing. Dr. techn. Roland Kirchberger, sowie meinen Betreuer und Leiter des ECO-Power Drive, Dipl.-Ing. Dr. techn. Stephan Schmidt

Besonderen Dank möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Schacht als äußerst kompetenten und ausdauernden Betreuer aussprechen, dessen Geduld und Unterstützung das Zustandekommen meiner Diplomarbeit ermöglichte. Weiter möchte ich mich bei sämtlichen Mitarbeitern des Forschungsbereichs Konstruktion und Auslegung für die angenehme und kollegiale Zusammenarbeit bedanken.

Gernot Prüller

Zusammenfassung

In der vorliegenden Diplomarbeit wird die Integration eines Range Extenders (REX) in einen Scooter behandelt sowie dessen Funktionsfähigkeit im Fahrzeug untersucht und weiterentwickelt. Es konnte auf eine Vielzahl bereits durchgeführter Arbeiten zu diesem Thema zurückgegriffen werden, welche im Rahmen des Förderprojektes „ECO Powerdrive“ entstanden sind. Aus diesen Arbeiten ergeben sich zahlreiche Randbedingungen sowie bereits festgelegte Komponenten. Diese betreffen den luftgekühlten 50 cm³ 2-Takt Motor und den damit angetriebenen fremderregten Generator, wobei der Motor stets bei konstanter Drehzahl laufen soll. Weiter sind die Gemischaufbereitung durch Einspritzung und ein drosselfreier Betrieb vorgesehen, also eine reine Qualitätsregelung durch Variation der Einspritzmenge. Die Bedatung der Kennfelder spielt dabei eine entscheidende Rolle, um Drehzahlstabilität trotz hoch transienter Last durch den Generator zu gewährleisten.

Zu Beginn der Arbeit stand die Integration der Komponenten in das Fahrzeug im Vordergrund, was mithilfe 3D gestützter Packagingstudien gelang. In Voruntersuchungen am Range Extender außerhalb des Fahrzeuges wurden entscheidende Systemsteuergrößen ermittelt, wobei der generierte elektrische Strom aus Gründen der Sicherheit und der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse von einer einstellbaren Last anstatt der Bordakku aufgenommen wurde. Es wurden verschiedene Methoden entwickelt, den Generator durch Variation des Erregerstromes zu steuern.

Auf Basis der generierten Steuerstrategien wurden anschließend Prüfungen am Rollenprüfstand durchgeführt, wobei nun die elektrische Last von den Akkus dargestellt wird. Es wurde der für diese Fahrzeugklasse vorgesehene Abgaszyklus ECE-R47 durchfahren und dabei Drehzahlstabilität und Leistungsabgabe des Range Extenders sowie Abgasverhalten des Fahrzeuges untersucht. Die aus dem Fahrzyklus resultierenden hohen Lastunterschiede resultierten in hohen Anforderungen an die Steuerung des Systems. Durch weitere Optimierungen konnten zufriedenstellende Erfolge in puncto Drehzahlkonstanz erzielt werden, jedoch je nach angewandter Strategie mit Defiziten in Sachen Leistung und Emissionen.

Die erarbeiteten Erkenntnisse machen weiterführende, zum Teil bereits laufende Untersuchungen auf Basis dieser Arbeit notwendig, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen und damit eine einwandfreie Funktion zu gewährleisten.

Abstract

In the present thesis the integration of a Range Extender (REX) into a scooter and its function in the vehicle is treated and further developed. I was able to use a variety of theses already done on this topic, which are created as part of the project "ECO Power Drive". Based on these theses various constraints were already specified as well as main components. These relate to the air-cooled 50 cc 2-stroke engine and the therefrom driven separately excited generator. The engine must run at constant speed. Further on, the mixture preparation is provided through injection and a throttle-free operation, i.e. a pure quality control by varying the injection quantity. The data input for the maps plays a crucial role in order to ensure speed stability despite high transient load by the generator.

At the beginning of the thesis the integration of the components into the vehicle was in the foreground, which succeeded using 3D-based Packaging studies.

In preliminary studies about the range extender outside the vehicle key system control variables are determined. For reasons of safety and reproducibility of the results, the generated electric current is taken by an adjustable load, instead of the on-board battery. Various strategies have been developed to control the generator, by varying the energizing current.

Based on the generated control strategies tests were performed on the chassis dynamometer, wherein now the electrical load was represented by the batteries. The designated exhaust cycle for this class of vehicle (ECE-R47) was used, further on speed stability and power output of the Range Extender and emission characteristics of the vehicle were analysed. The cycle's high load differences resulted in high requirements for the control of the system. Within further optimization achievements in terms of speed stability could be achieved, however, depending on the applied strategy with deficits in performance and emissions.

The compiled findings make further investigations based on this thesis necessary to meet the requirements and thus to ensure proper function.

Aufgabenstellung und Ziele

In dieser Arbeit ist es das Ziel, einen Range Extender in Form eines Verbrennungsmotors in einen Plug-In Elektro-Scooter zu integrieren. Dabei kann auf eine Vielzahl von bereits entstandenen Arbeiten des Projektes „ECO Powerdrive“ zurückgegriffen werden, wodurch bereits wichtige Parameter definiert und im Vorfeld festgelegt sind. Das gesamte Konzept soll möglichst einfach und kostengünstig aufgebaut werden. Daher wird soweit wie möglich, auf bestehende Komponenten aus anderen Fahrzeugen und auf Standardteile zurückgegriffen. Dies betrifft zum Beispiel die beiden Hauptbauteile Verbrennungsmotor und Drehstromlichtmaschine.

Beim eingesetzten 2-Takt Ottomotor kann sich das Luftverhältnis in einem weiten Bereich bewegen, der einen Betrieb auch mit stark magerem Gemisch gewährleistet. Dadurch kann auf eine Drosselklappe verzichtet werden. Die Leistung des Verbrennungsmotors wird durch eine Qualitätsregelung über die in das Saugrohr eingespritzte Kraftstoffmenge bestimmt.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen das Packaging und die Funktionsentwicklung am Prüfstand. Randbedingung für das Packaging ist der vorhandene Raum, welcher durch eine Halbierung der Akkukapazität geschaffen wird.

Die Aufgaben werden in folgende Pakete gegliedert:

- Packaging Studie eines Range Extenders auf Basis bestehender Komponenten bei festgelegtem Bauraum
- Funktionsentwicklung und Kennfeldbedatung am Motorprüfstand
- Implementierung in ein 11e Elektro Versuchsfahrzeug zur Durchführung von Messungen am Zweiradrollenprüfstand
- Experimentelle Optimierung der Betriebsstrategie am Rollenprüfstand und auf der Straße mit Fokus auf Emissionen und Komfort (NVH)
- Emissionsuntersuchungen und Betrachtung aktueller Gesetzesbestimmungen

Der Zusatzantrieb soll dabei nicht als Ersatz für eine Steckdose fungieren, sondern rein als Überbrückung um ohne Probleme die nächste Lademöglichkeit erreichen zu können.

1 Einleitung

Aus zahlreichen Studien geht hervor, dass der überwiegende Teil aller zurückgelegten Strecken im Alltag nicht über 30 km hinausgeht. Diese geringen Distanzen sind problemlos rein elektrisch bewältigbar, auch mit einem Scooter. Grafisch ist diese Tatsache in Abbildung 1 dargestellt. Ein Großteil der Fahrten bewegt sich im Bereich von 5 bis 15 km. Weiter ist hier auch zu sehen, dass 95 % der Strecken nicht über 50 km hinausgehen. Und genau diese 5 % der längeren Distanzen machen den Range Extender interessant.

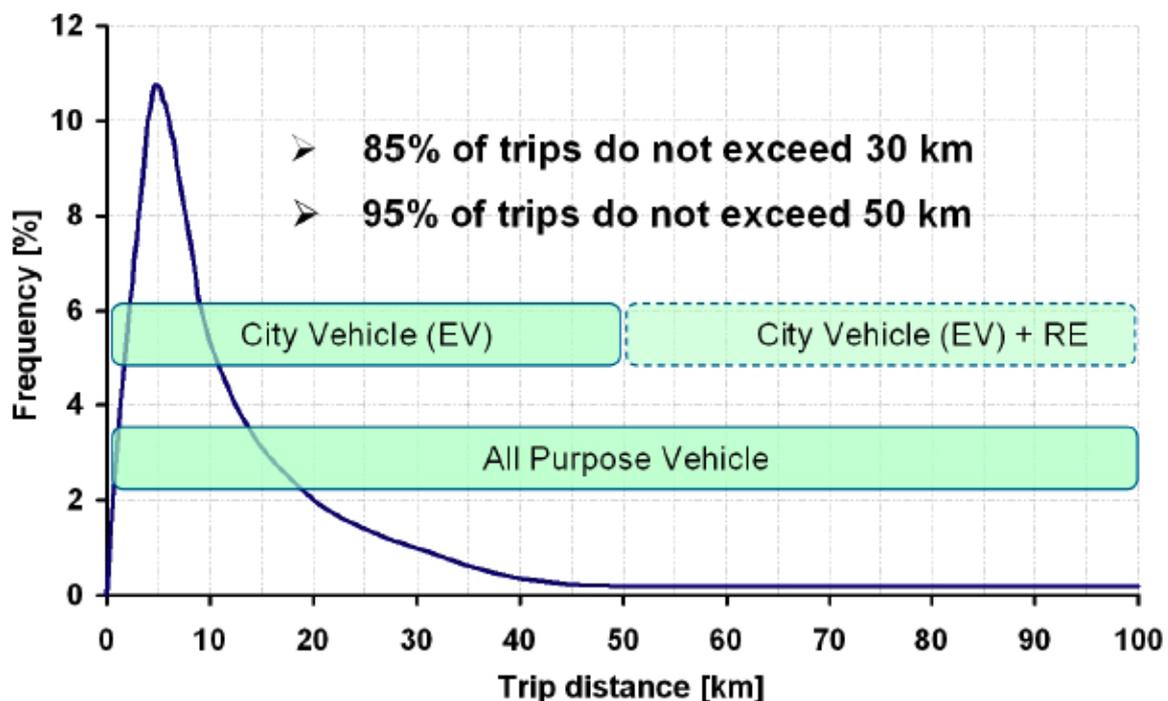


Abbildung 1: Durchschnittliche Distanzen der Einzelfahrten (PKW) [1]

Nun gibt es seit einigen Jahren zahlreiche Hersteller, die PKW mit Hybridantrieben ausstatten, und dies mit Erfolg. Vereinzelt gibt es auch Anbieter von Hybrid Zweirädern, wie etwa Piaggio mit dem MP3. Jedoch arbeitet keines der bekannten Konzepte nach dem Prinzip eines Range Extenders. Im MP3 wurde ein paralleler Hybrid verbaut, ein Elektromotor unterstützt die VKM in hohen Lastzuständen.

1.1 Hybridantriebskonzepte

Das Konzept Verbrennungskraftmaschine kombiniert mit einem Elektroantrieb wird als Hybridantrieb bezeichnet. Dieses Zusammenspiel soll erhebliche Verbrauchs- und Emissionsvorteile mit sich bringen, da die Vorzüge der jeweiligen Energiequelle optimal genutzt werden können.

Speziell im innerstädtischen Bereich, wo durch Stop-and-Go Verkehr das Fahrzeug viel im Teillastbereich betrieben wird, können die Stärken des Hybridantriebes ausgespielt werden.

Die großen Vorteile von Hybridfahrzeugen gegenüber reinen Elektrofahrzeugen liegen in der hohen Reichweite sowie der schnellen Wiederbefüllbarkeit der Energiespeicher (Kraftstofftank).

Die verschiedenen Hybridsysteme können wie folgt unterteilt werden:

1. Paralleler Hybrid
2. Serieller Hybrid
3. Mischhybride
4. Range Extender

Die folgenden Betrachtungen stammen aus dem Bereich der Automobile, da es kaum Erfahrungen mit Hybriden am Zweiradsektor gibt. Diese sind jedoch prinzipiell auch hier gültig.

1.1.1 Paralleler Hybrid

Beim Parallelhybrid wirken beiderseits Elektromotor und VKM auf den Antriebsstrang. Es können in gewissen Betriebszuständen wie zum Beispiel beim Beschleunigen beide Antriebsquellen gemeinsam Vortrieb generieren. Die Summe aus elektrischer und verbrennungsmotorischer Leistung wird dann als „Systemleistung“ bezeichnet. Beim Parallelen Hybrid können dadurch die beiden Antriebseinheiten jeweils kleiner und dadurch leichter und kostengünstiger gestaltet werden.

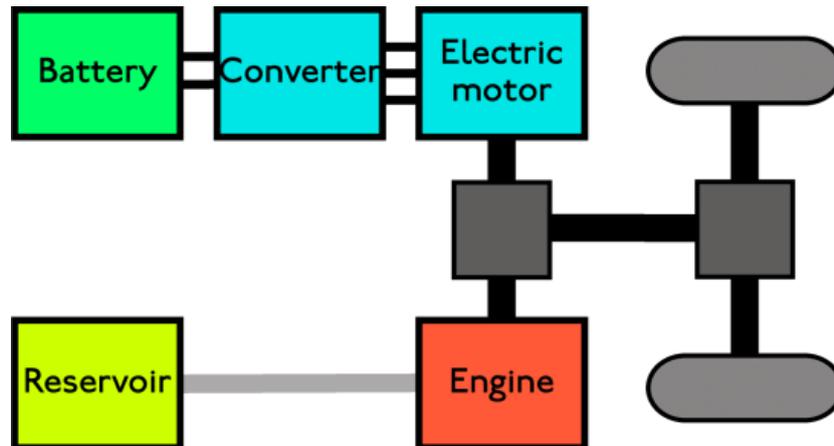


Abbildung 2: Paralleler Hybrid [2]

1.1.2 Serieller Hybrid

Der serielle Hybridantrieb unterscheidet sich stark vom Parallelen. Dabei hat die Verbrennungskraftmaschine keinerlei mechanische Verbindung zum Antriebsstrang. Diese liefert nur die Antriebsleistung für einen angeordneten Generator, welcher wiederum einen Akkumulator zur Speicherung der Energie oder direkt einen oder mehrere Elektromotoren zum Antrieb des Fahrzeuges versorgt.

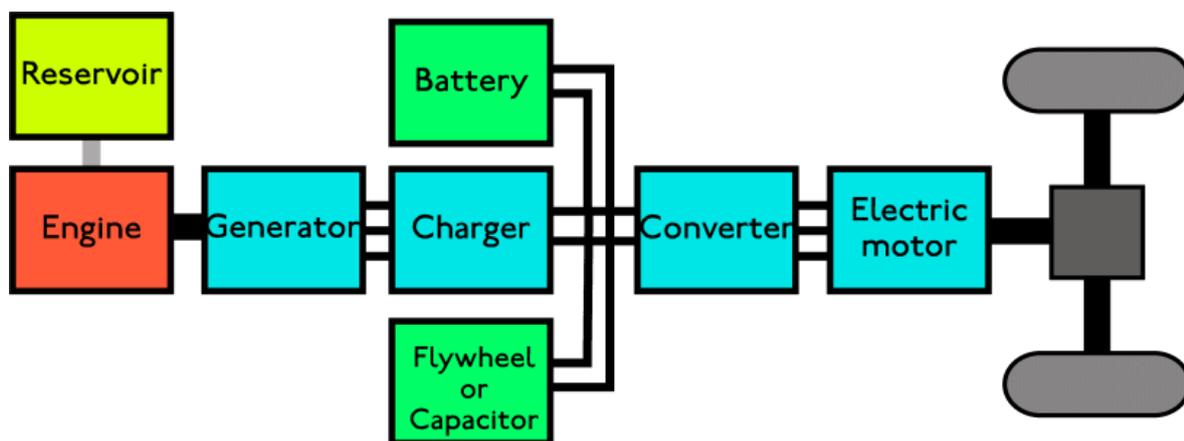


Abbildung 3: Serieller Hybrid [2]

Der elektrische Antrieb muss also immer die erforderliche Gesamtleistung erbringen und dementsprechend leistungsstark ausgelegt werden. Nachteilig ergibt sich daraus ein erhöhtes Gesamtgewicht, da beide Systeme, VKM und Elektroantrieb relativ groß dimensioniert werden müssen. Bei kurzzeitig hohem Leistungsbedarf können aber auch die Akkus zusätzlich Strom liefern und damit die Antriebsleistung erhöhen.

Für die VKM ergeben sich Vorteile, da diese immer in Bereichen eines guten Wirkungsgrades betrieben werden kann. Sich negativ auswirkende Teillastzustände können vermieden werden. Große Nachteile können sich durch die Kette der Einzelwirkungsgrade ergeben, speziell in hochlastigen Fahrzuständen. Mechanische Energie wird in elektrische umgewandelt, diese eventuell auch noch zwischengespeichert und dann erst im Elektromotor in Vortrieb umgesetzt. Da all diese Schritte Verluste bedeuten, kann die Effizienz eines mechanischen Antriebes nur schwer erreicht werden.

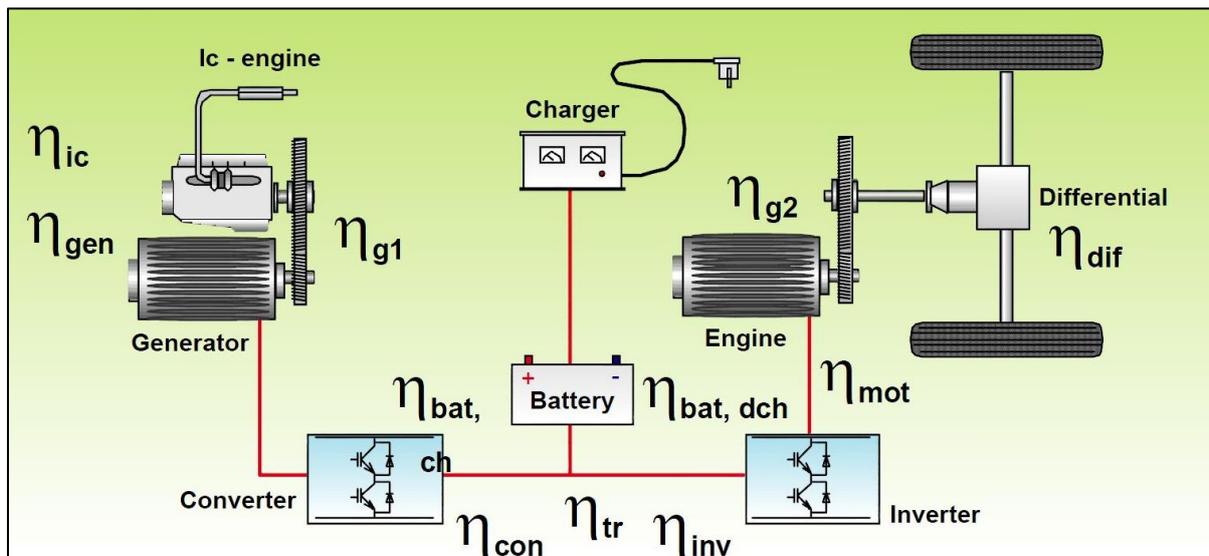


Abbildung 4: Wirkungsgradkette Serieller Hybrid [3]

1.1.3 Mischhybride

Mischhybride oder leistungsverzweigte Hybride stellen eine Kombination beider oben genannter Konzepte dar. Hier können sowohl Elektromotor sowie auch Verbrennungsmotor das Fahrzeug mechanisch antreiben. Es kann auch ein Teil der vom Verbrennungsmotor generierten Leistung zur Speisung in Akkumulatoren, ein anderer Teil zum Antrieb des Fahrzeuges genutzt werden. Dieses System setzt eine hochentwickelte Steuerung des Zusammenspiels der Systeme, sowie aufwendige Getriebetechnik voraus. Bekanntester Vertreter aus dieser Gruppe ist wohl der „Toyota Prius“.

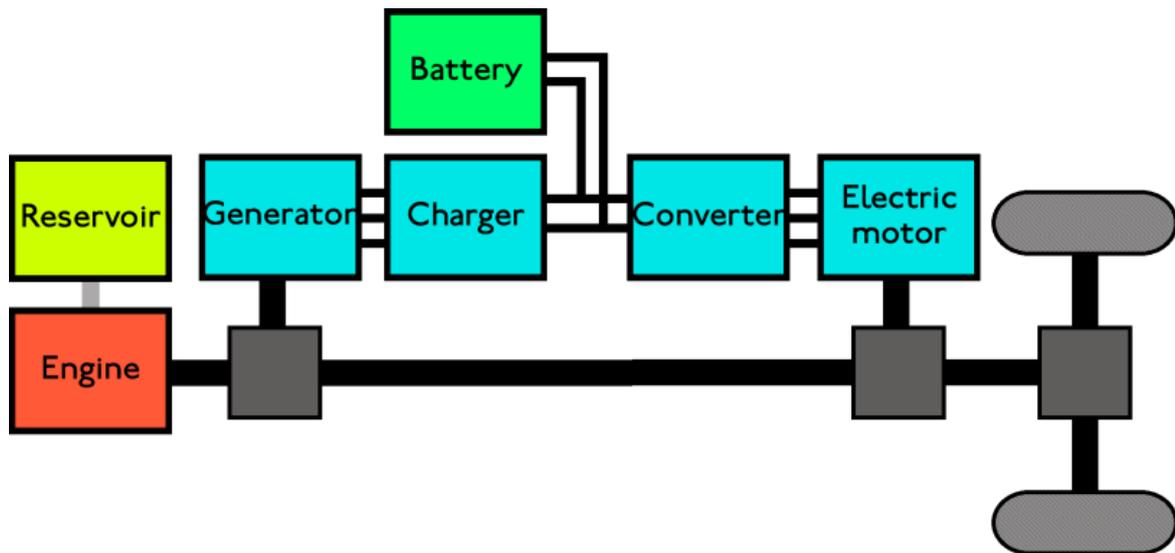


Abbildung 5: Leistungsverzweigter Hybrid [2]

Durch die hohe Flexibilität dieses Systems können hohe Gesamtwirkungsgrade erreicht werden. Speziell im innerstädtischen Betrieb spielt der leistungsverzweigte Hybrid seine Stärken aus, da im Stop-and-Go Verkehr die Akkus durch Regeneration immer wieder geladen werden können, und kurze Strecken dadurch rein elektrisch bewältigt werden können.

Andererseits kann im konstanten Hochlastbetrieb (Autobahn) ein rein mechanischer Durchtrieb realisiert und somit eine hohe Effizienz erreicht werden.

1.1.4 Range Extender

Das Konzept des Range Extenders ähnelt sehr stark dem des seriellen Hybrids. Auch hier ist der Verbrennungsmotor mechanisch nicht mit dem Antriebsstrang verbunden, sondern treibt lediglich einen Generator an. Wesentlicher Unterschied zum Seriellen Hybrid liegt hier in der Leistung der Einzelsysteme.

Bei Fahrzeugen mit Range Extender liegt der Schwerpunkt auf Seiten des Elektroantriebes. Die Akkus besitzen eine verhältnismäßig hohe Kapazität und sind meist von außen aufladbar (Plug-In). Die zusätzlich eingesetzte Verbrennungskraftmaschine wird lediglich verwendet, um die Reichweite des Fahrzeuges zu erhöhen. Man hat sozusagen seine eigene Steckdose immer dabei.

Erhebliche Vorteile gegenüber reinen Elektrofahrzeugen ergeben sich aus der Tatsache, dass die Batteriekapazität bei Fahrzeugen mit Range Extender reduziert werden kann. Somit können das Fahrzeuggewicht sowie auch Investitionskosten reduziert werden, welche bei E-Fahrzeugen einen erheblichen Teil an den Gesamtkosten darstellen. Trotz geringerer Kapazität werden höhere Reichweiten im Vergleich zu reinen Elektrofahrzeugen erzielt.

Batteriekosten [€]

basierend auf einem Energiebedarf von 20 kWh / 100km -

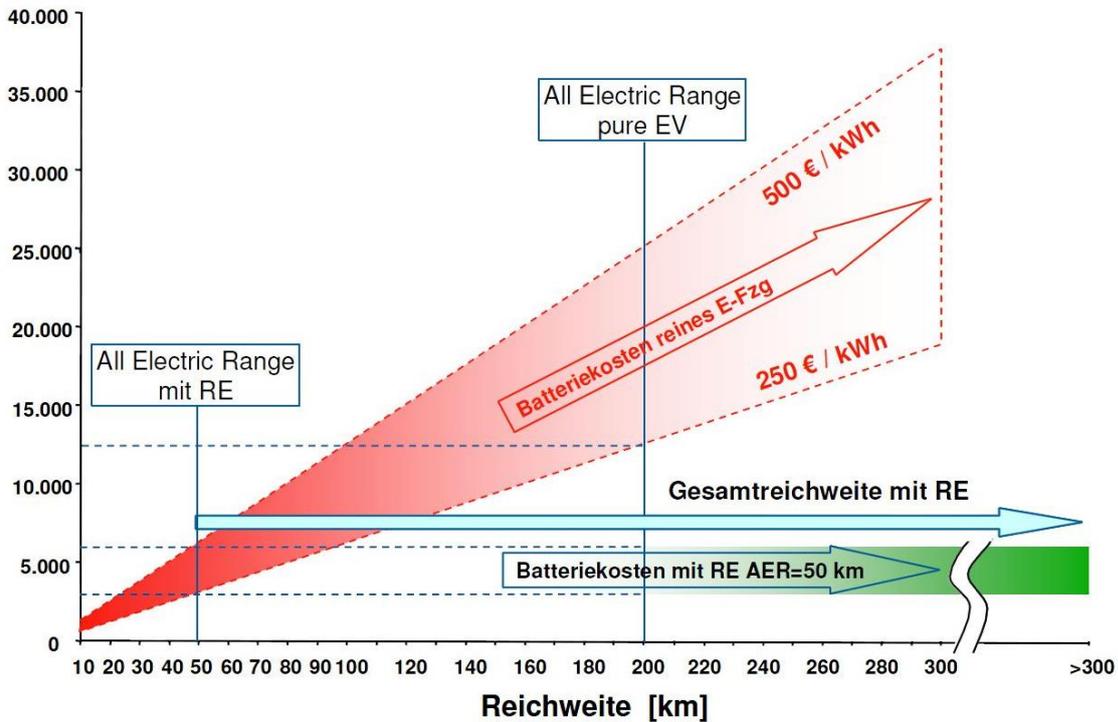


Abbildung 6: Batteriekosten bei einem Energiebedarf von 20 kWh/100km [4]

Abbildung 6 zeigt einen linearen Anstieg der Batteriekosten mit steigender Reichweite. Es wird jedoch nicht berücksichtigt, dass mit steigender Kapazität das Fahrzeuggewicht und somit der Energieverbrauch durch erhöhte Fahrwiderstände steigen. Es ist zu sehen dass der Einsatz des REX die Investitionskosten senkt, ohne die Reichweite zu minimieren.

Eines der ersten Serienfahrzeuge mit Range Extender ist der BMW i3 mit einer elektrischen Leistung von 125 kW und einer Nennleistung des verwendeten Ottomotors von 25 kW. Dieser verfügt über einen Kraftstofftank von 9 Litern und kann somit die Reichweite um 120 bis 150 km erweitern.



Abbildung 7: BMW i3 [5]

Schon an dieser Reichweite und dem damit resultierenden Verbrauch von 6 bis 7,5 L/100km kann man die bescheidene Effizienz im Betrieb mit Range Extender erkennen. Daher sollte der Verbrennungsmotor rein der Erweiterung der Reichweite dienen, und nicht als Ersatz der Akkuladung über die Steckdose.

1.2 Abgasprüfung

Die gesetzlich zu erfüllenden Abgasvorschriften sind ein wichtiger Teil dieses Projektes.

Dabei sei zu beachten, dass Hybridfahrzeuge nach speziellen Verfahren getestet und daraus die resultierenden Abgasemissionen ermittelt werden. Im Folgenden wird auf die Gesetzgebung in Bezug auf Testverfahren, Auswertung und Grenzwerte eingegangen.

1.2.1 Arten von Hybrid-Elektrofahrzeugen

Laut Gesetzgebung [6] werden Hybridfahrzeuge wie folgt definiert:

Ein „Hybrid-Elektrofahrzeug (HEV)“ ist ein Kraftrad, Dreirad- oder Vierradfahrzeug, das aus beiden nachstehenden fahrzeugeigenen Energiequellen mit Energie für den mechanischen Antrieb versorgt wird:

- a) einem Betriebskraftstoff,
- b) einem elektrischen Energiespeicher.

Die Grenzwerte für Fahrzeuge mit Hybrid-Elektro Antrieb sind ident mit jenen für Fahrzeuge, die mit konventionellem Antrieb ausgestattet sind. Jedoch werden die Abgasemissionen von Hybridfahrzeuge nach speziellen Abläufen ermittelt und ausgewertet. Die folgenden Betrachtungen betreffen speziell die Fahrzeugklasse L1e, in welche der Scooter fällt.

Tabelle 1: Arten von Hybridelektrofahrzeugen

Aufladung des Fahrzeugs	Von außen aufladbares Fahrzeug ⁽¹⁾ (OVC)		Nicht von außen aufladbares Fahrzeug ⁽²⁾ (NOVC)	
Betriebsartschalter	ohne	mit	ohne	mit

⁽¹⁾ Auch bekannt als „extern aufladbar“.

⁽²⁾ Auch bekannt als „nicht extern aufladbar“.

Wie in Tabelle 1 ersichtlich, werden die Fahrzeuge in verschiedene Gruppen bezüglich Steuerung des Energiesystems und Lademöglichkeit der Akkus unterteilt. Für weitere Untersuchungen wird ein Fahrzeug, welches von außen aufladbar („Plug-In Hybrid“) ist und über keinen Betriebsartschalter verfügt, betrachtet, da dies auch auf das hier behandelte Hybridantriebskonzept zutrifft.

Die weitere Vorgehensweise der Abgasprüfung variiert stark in Abhängigkeit der betreffenden Art des Hybridantriebes. Durch die zutreffende Art des Hybridfahrzeuges ergeben sich erhebliche Vorteile bezüglich der Auswertung der Schadstoffemissionen, siehe Kapitel 1.2.5.

1.2.2 Fahrzeugklassen

Bereits im Jahr 1970 wurde in der Europäischen Gemeinschaft eine Definition von Fahrzeugklassen erstellt, nach welcher alle in EG Ländern zugelassenen Fahrzeuge in Gruppen eingeordnet werden können. Hier gilt das Interesse der Fahrzeugklasse „L - Zweirädrige oder dreirädrige Kraftfahrzeuge sowie leichte vierrädrige Kraftfahrzeuge“. Diese ist wiederum unterteilt, ausschlaggebend dafür sind Größen wie Hubraum, Höchstgeschwindigkeit, maximale Leistung und Fahrzeuggewicht.

Diese Unterteilung der Fahrzeugklassen kann in Tabelle 2 eingesehen werden, wobei das Versuchsfahrzeug in die Klasse „L1e-B – zweirädriges Kleinkraftrad“ fällt.

Tabelle 2: Fahrzeugeinstufung [6]

Klasse	Bezeichnung der Klasse	Gemeinsame Einstufungskriterien
L1e-L7e	Alle Fahrzeuge der Klasse L	(1) Länge $\leq 4\,000$ mm oder $\leq 3\,000$ mm für ein L6e-B-Fahrzeug oder $\leq 3\,700$ mm für ein L7e-C-Fahrzeug, und (2) Breite: $\leq 2\,000$ mm, oder $\leq 1\,000$ mm für ein L1e-Fahrzeug, oder $\leq 1\,500$ mm für ein L6e-B- oder ein L7e-C-Fahrzeug und (3) Höhe $\leq 2\,500$ mm und
Klasse	Bezeichnung der Klasse	Gemeinsame Einstufungskriterien
L1e	Leichtes zweirädriges Kraftfahrzeug	(4) zwei Räder und eine der unter Artikel 4 Absatz 3 genannten Antriebsformen und (5) ein Hubvolumen von $\leq 50\text{ cm}^3$, falls ein PI-Verbrennungsmotor Teil der Antriebskonfiguration des Fahrzeugs ist, und (6) bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs ≤ 45 km/h und (7) maximale Nenndauerleistung oder Nutzleistung ⁽¹⁾ $\leq 4\,000$ W und (8) Gesamtmasse = technisch zulässige Masse nach Angabe des Herstellers und
Unterklassen	Bezeichnung der Unterklasse	Zusätzliche Kriterien für die Einstufung hinsichtlich der Unterklasse
L1e-A	Fahrrad mit Antriebssystem	(9) Räder, die für den Pedalantrieb ausgelegt und mit einem Hilfsantrieb ausgerüstet sind, dessen Hauptzweck die Unterstützung der Pedalfunktion ist, und (10) die Leistung des Hilfsantriebs wird beim Erreichen einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 25 km/h unterbrochen und (11) maximale Nenndauerleistung oder Nutzleistung ⁽¹⁾ $\leq 1\,000$ W und (12) ein drei- oder vierrädriges Fahrrad, das mit den zusätzlichen spezifischen Kriterien 9 bis 11 für die Einstufung als Unterklasse übereinstimmt, gilt als technisch gleichwertig in Bezug auf ein zweirädriges L1e-A-Fahrzeug.
L1e-B	Zweirädriges Kleinkraftrad	(9) Ein sonstiges Fahrzeug der Klasse L1e, das anhand der Kriterien 9 bis 12 nicht als L1e-A-Fahrzeug eingestuft werden kann.

1.2.3 Grenzwerte

Zurzeit gelten die Grenzwerte wie in Tabelle 3 zu sehen, diese entsprechen der Norm „EURO III“ welche bis zum 31.12.2016 Gültigkeit besitzt. Darin werden die Grenzwerte für HC und NO_x in einem gemeinsamen Wert zusammengefasst.

Tabelle 3: Abgasgrenzwerte Euro III für Fahrzeuge der Klasse L1e [6]

Betriebserlaubnis und Übereinstimmung der Produktion	
CO (g/km)	HC + NO _x (g/km)
L ₁	L ₂
1 ⁽¹⁾	1,2

⁽¹⁾ Für dreirädrige Kleinkraftmädrer (L2e) und leichte Vierradfahrzeuge (L6e) liegt der Grenzwert für den CO-Gehalt bei 3,5 g/km.

Tabelle 4: Zeitplan für die Einführung der Verordnung [7]

Nummer	Bezeichnung	(Unter-)Klasse	Neue Fahrzeugtypen verbindlich	Bestehende Fahrzeugtypen verbindlich	Letztes Zulassungsdatum für übereinstimmende Fahrzeuge
1.	Anwendung des delegierten Rechtsakts auf die Leistungsanforderungen an Umweltverträglichkeit und Antriebsleistung; Punkte entsprechend Anhang II Teil A				
1.1.	Prüfung Typ I, Prüfung der Auspuffemissionen nach Kaltstart	—	—	—	—
1.1.1.	Prüfzyklus	—	—	—	—
1.1.1.1.	Prüfung Typ I: Prüfzyklus nach ECE R 47	L1e, L2e, L6e	1.1.2017	1.1.2018	31.12.2020
1.1.1.4.	Prüfung Typ I, überarbeiteter Prüfzyklus auf WMTC-Grundlage	L1e - L7e	1.1.2020	1.1.2021	
1.1.2.	Prüfung Typ I, Grenzwerte für die Auspuffemissionen		—	—	—
1.1.2.1.	Euro 4: Anhang VI Teil A1	L1e, L2e, L6e	1.1.2017	1.1.2018	31.12.2020

Ab 2017 sind die Grenzwerte nach „EURO IV“ einzuhalten. Die genauen Daten über die Einführung der Abgasnormen sind in

Tabelle 4 ersichtlich.

Die folgenden Grenzwerte entsprechen der zukünftigen Norm „Euro 4“ und wurden in „VERORDNUNG (EU) Nr. 168/2013“ vom 15. Januar 2013 festgehalten. In Tabelle 5 sind die darin aufgeführten Werte für die Schadstoffe CO, THC und NO_x einzusehen, wobei nun HC und NO_x getrennt betrachtet werden und die Summe der Grenzwerte deutlich reduziert wird (800 anstatt 1200 mg/km). Der Grenzwert für die Emission von CO bleibt dagegen gleich.

Die emittierte Partikelmasse wird in dieser Fahrzeugkategorie noch nicht begrenzt. In zukünftigen Regulierungen nach „Euro V“ soll auch die Partikelmasse begrenzt werden, jedoch ausschließlich in Fahrzeugen mit direkt einspritzenden Verbrennungsmotoren. Diese Problematik kann auch in Zukunft durch die Verwendung der Saugrohreinspritzung umgangen werden.

Tabelle 5: Abgasgrenzwerte EURO IV [7]

Fahrzeug- klasse	Bezeichnung	Antriebs – klasse	Euro - Norm	Masse CO	Masse THC	Masse NO _x	Prüfzyklus
				L ₁ (mg/km)	L ₂ (mg/km)	L ₃ (mg/km)	
L1e-A	Fahrräder mit Antriebssystem	PI/CI/Hybrid	Euro 4	560	100	70	ECE R47
L1e-B	Zweirädrige Kleinkrafträder	PI/CI/Hybrid	Euro 4	1000	630	170	ECE R47

1.2.4 Prüfverfahren

Die gesetzlich vorgeschriebene Abgasprüfung wird in 2 Typen unterteilt:

- **Typ I:** Prüfung der durchschnittlichen Emission luftverunreinigender Gase in Ortschaften
- **Typ II:** Prüfung der Emission von Kohlenmonoxid und unverbrannten Kohlenwasserstoffen im Leerlauf

Im Weiteren wird nur die Abgasprüfung „Typ I“ behandelt.

Für die Abgasprüfung basiert auf dem Stadtfahrzyklus ECE R-47, siehe Abbildung 8. Der Zyklus besteht aus einer „Vollgas“-Beschleunigung auf 50 km/h, welche bis Sekunde 60 gehalten werden muss. Kann diese nicht erreicht werden, muss auf die maximale Fahrzeuggeschwindigkeit beschleunigt werden. Darauf folgen eine Geschwindigkeitsreduktion auf 20 km/h, und eine Verzögerung bis zum Stillstand bei Sekunde 112. Die genauen Werte sind Tabelle 6 zu entnehmen.

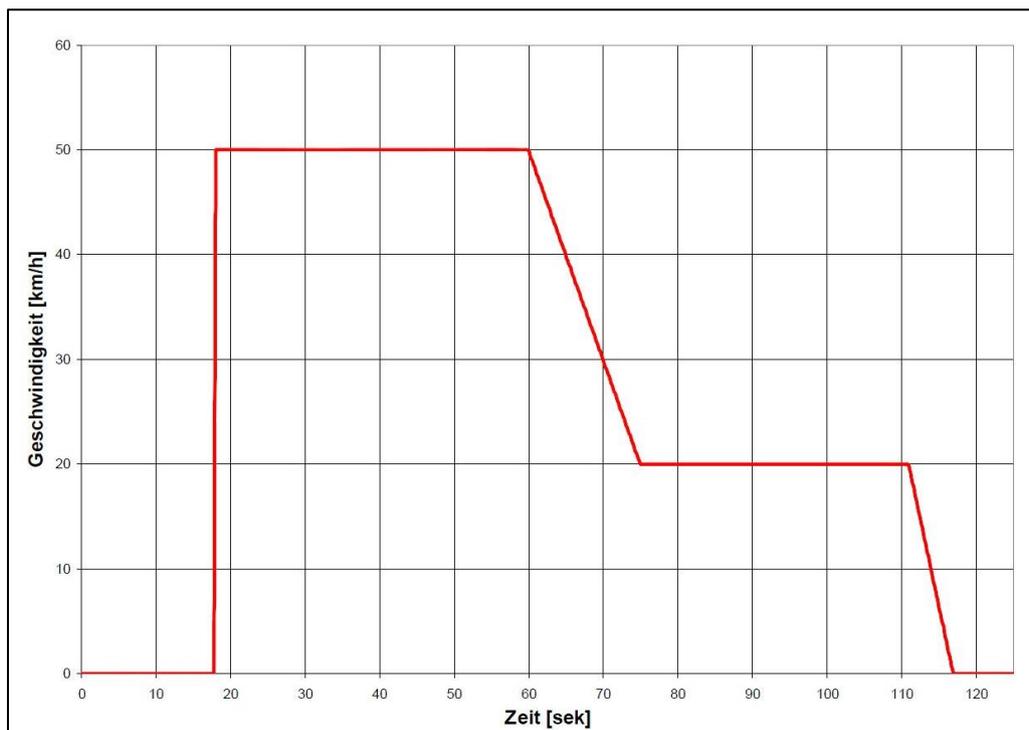


Abbildung 8: Fahrzyklus am Rollenprüfstand - Grafik

Tabelle 6: Fahrzyklus am Rollenprüfstand [8]

Prüfungsabschnitt	Betriebszustand	Beschleunigung	Geschwindigkeit	Dauer	Dauer Zeitsumme
		(m/s ²)	(km/h)	(s)	(s)
1	Leerlauf	—	—	8	8
2	Beschleunigung	Vollgas	0—max	} 57	—
3	konstante Geschwindigkeit	Vollgas	max		—
4	Verzögerung	- 0,56	max—20		65
5	konstante Geschwindigkeit	—	20	36	101
6	Verzögerung	- 0,93	20—0	6	107
7	Leerlauf	—	—	5	112

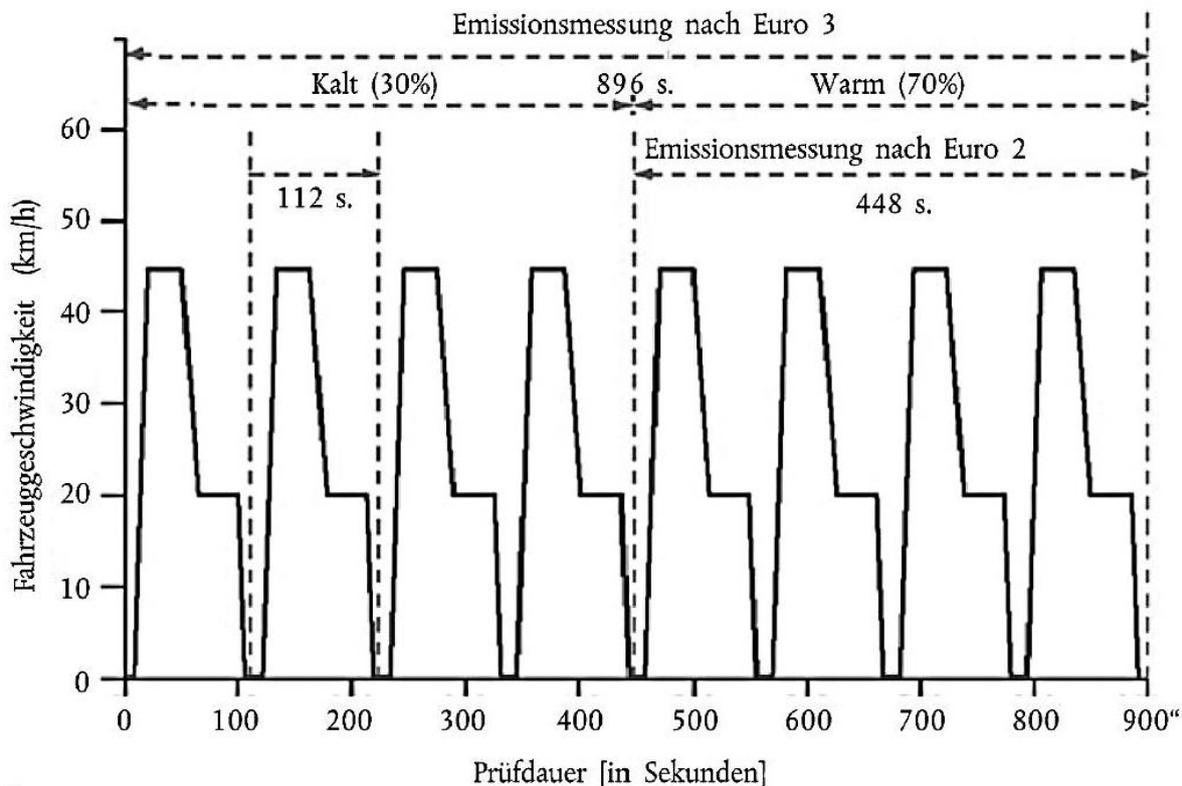


Abbildung 9: Gesamter Prüfzyklus mit Gewichtung der Abschnitte [9]

Das Fahrzeug wird am Rollenprüfstand einer ununterbrochenen Prüfung gemäß Abbildung 9 unterzogen, die acht Zyklen umfasst. Während der Prüfung sind die Abgase des Fahrzeugs so mit Luft zu verdünnen, dass ein konstanter Volumenstrom erzielt wird.

Aus dem resultierenden Gemisch wird eine konstante Probenmenge zur sukzessiven Bestimmung der Konzentrationen an Kohlenmonoxid, unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden in einen Beutel geleitet und das Gesamtvolumen des Gemisches gemessen. Am Ende der Prüfung wird ebenfalls die tatsächlich zurückgelegte Strecke anhand der Angaben des Rollenprüfstandes aufgezeichnet.

Die beiden Abschnitte „Kalt“ und „Warm“ werden getrennt betrachtet, weshalb die entstandenen Abgase auch in verschiedene Beutel geleitet werden müssen. Dabei wird der 1. Abschnitt mit 30 %, der 2. mit 70 % gewertet.

Anschließend werden die gefüllten Beutel entsprechend *Richtlinie 2009/108/EG der Kommission zur Änderung der Richtlinie 97/24/EG* und *Richtlinie 2013/60/EU vom 27. November 2013 zur Änderung der Richtlinie 97/24/EG* berechnet und ausgewertet.

1.2.5 Berechnung der Abgaswerte

Die Berechnung der Abgaswerte für Hybridfahrzeuge unterscheidet sich signifikant von konventionellen Fahrzeugen der Klasse L1e-B.

Bei Prüfung nach den Vorschriften wie beschrieben sind die gewichteten Werte wie folgt zu berechnen:

$$M = (De * M1 + Dav * M2)/(De + Dav) \quad (1)$$

Dabei gilt:

M - emittierte Masse des Schadstoffs in g/km

M1 - durchschnittliche, emittierte Masse des Schadstoffs in g/km bei voll aufgeladenem elektrischen Energiespeicher

M2 - durchschnittliche, emittierte Masse des Schadstoffs in g/km bei einem elektrischen Energiespeicher, der die Mindestladung aufweist (maximale Entladung)

De - Reichweite des Fahrzeugs bei Elektrobetrieb gemäß Kapitel 1.2.6.

Dav - angenommene durchschnittliche Strecke des Fahrzeugs bei Mindestladung der Akkus in der Zeitspanne zwischen zwei Aufladungen des Energiespeichers:

— **4 km für Krafträder der Klasse 1 (Hubraum < 150 cm³)**

— 6 km für Krafträder der Klasse 2 (Hubraum $\geq 150 \text{ cm}^3$, $V_{\max} < 130 \text{ km/h}$)

— 10 km für Krafträder der Klasse 3 (Hubraum $\geq 150 \text{ cm}^3$, $V_{\max} > 130 \text{ km/h}$)

Beschreibt man dieses Berechnungsverfahren anhand eines Beispiels, wird schnell klar, dass hier großer Spielraum im Bereich Abgasemissionen vorhanden ist.

M1 soll im Prüfverfahren Null ergeben, also auch das Produkt mit De. Dav ist mit 4 km festgelegt. Die elektrische Reichweite De, welche zufolge Untersuchungen entsprechend Kapitel 1.2.6 21,4 km beträgt, wird zur rechnerischen Vereinfachung mit 20 km beziffert. Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$M = \frac{4 * M2}{20 + 4} = M2 * \frac{4}{24} = M2 * \frac{1}{6} \quad (2)$$

Dies bedeutet, dass in Bereichen verbrennungsmotorischen Betriebs die 6-fache Masse an Schadstoffen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor emittiert werden dürften.

Damit können die allgemein gültigen emissionsbedingten Nachteile des 2-Taktors etwas entschärft werden, da auf Grund dieser Berechnung ein gewisser Spielraum geschaffen wird. Jedoch ist es nicht Ziel dieser Arbeit, diesen vollständig auszunutzen.

1.2.6 Elektrische Reichweite

Die Ermittlung der elektrischen Reichweite erfolgt nach durchgeführter, vollständiger Ladung „über Nacht“. Anschließend werden mehrere Prüfzyklen nach ECE-R47 auf einem Fahrleistungsprüfstand durchgeführt, siehe Abbildung 18.

Das Prüfungsende ist erreicht, wenn mit dem Fahrzeug bei Höchstgeschwindigkeit im reinen Elektrobetrieb die Werte der Sollkurve nicht eingehalten werden können oder dem Fahrzeugführer durch die serienmäßig eingebauten Instrumente angezeigt wird, dass er das Fahrzeug anhalten soll, oder wenn der elektrische Energiespeicher den Mindestladezustand erreicht hat. In diesem Fall ist das Prüfungsende erreicht, sobald eine Spannungsschwelle von 40 V unterschritten wird.

Dann wird die Fahrzeuggeschwindigkeit auf 5 km/h verringert, indem der Gasgriff losgelassen wird, ohne die Bremse zu betätigen. Anschließend wird das Fahrzeug durch Bremsen angehalten.

Am Ende der Prüfung ist der Wert von D_e die elektrische Reichweite des Hybrid-Elektrofahrzeugs. Er ist auf die nächste ganze Zahl zu runden.

2 Versuchsfahrzeug

Die Basis des durchzuführenden Umbaus bildet ein serienmäßiger Elektroscooter, welcher mit dem System des Range Extenders versehen werden soll.

2.1 Fahrzeug

Als Versuchsfahrzeug dient ein Elektroroller des Herstellers „e-one“. Es handelt sich dabei um ein Fahrzeug der Klasse Le1. Dies bedeutet eine gesetzlich begrenzte elektrische Leistung von maximal 4 kW und eine höchste zulässige Geschwindigkeit von 45 km/h.



Abbildung 10: E-one Capri im Originalzustand [10]

In Tabelle 7 werden die wichtigsten Daten des Versuchsfahrzeuges angeführt.

Tabelle 7: Daten des Fahrzeuges in Originalzustand (Herstellerangaben, Stand 1.Juni 2014)

Technische Daten /Preis	
Preis	EUR 2.300,00
Motor	3.000 Watt Radnabenmotor
Batterie	48 V / 40 Ah Blei-Akku
Ladezeit	~ 6 Stunden
Geschwindigkeit	~ 45 km/h
Reichweite	~ 60 km (abhängig vom Gesamtgewicht des Fahrzeuges, Straßenbeschaffenheit und Topographie)
Bremsen	Scheibenbremsen vorne und hinten
Räder	130/60-13"
Nettogewicht	140 kg

2.1.1 Spannungsanzeige am Bordinstrument

Das original am Scooter vorhandene Instrument soll Auskunft über den Ladezustand der Akkus geben. Dazu wird die Bordspannung als Eingangssignal herangezogen und über den Zeiger angezeigt. Jedoch kann damit der Ladezustand nur näherungsweise bestimmt werden. Denn wie in Abbildung 14 ersichtlich, steht die Spannung in starker Abhängigkeit des Entladestromes.

Das untere Ende der Skala (L) bedeutet einen Wert von 40,9 V, das obere Ende (H) 50,0 V. In Abbildung 11 können die Spannungen welche der jeweiligen Anzeige am Instrument entsprechen abgelesen werden.

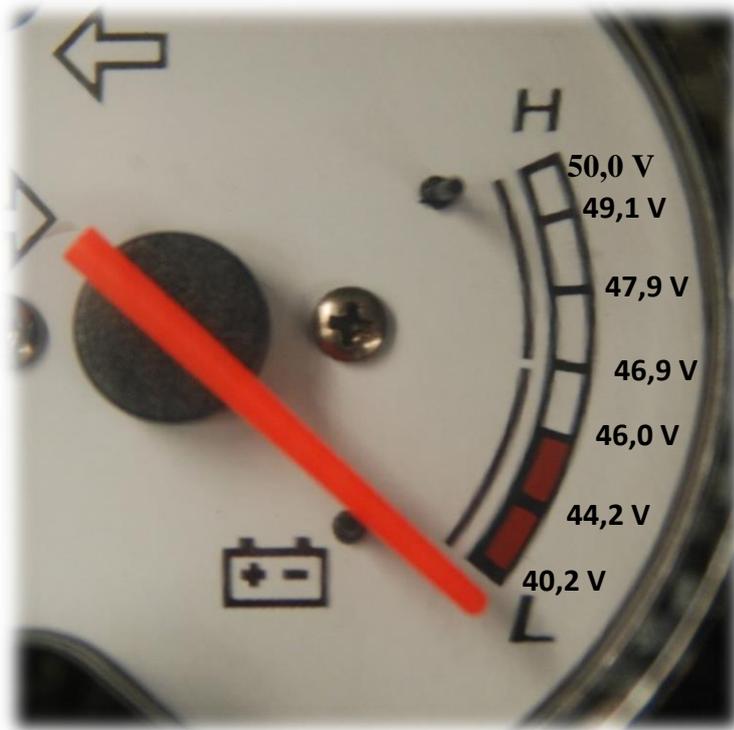


Abbildung 11: Spannungsanzeige am Fahrzeug

2.2 Akkumulatoren

Zum Start meiner Arbeit waren die Akkumulatoren durch das gewählte Fahrzeug bereits festgelegt. Die verwendeten Bleiakkus werden häufig in kostengünstigen Fahrzeugen der Klasse L1e eingesetzt, wobei die Gründe in den geringen Anschaffungskosten und dem hohen, möglichen Ladestrom liegen.

In Tabelle 8 werden die Daten der neuen Akkus aufgelistet.

Tabelle 8: Daten der neuen Akkumulatoren

Hersteller	Yuasa	
Bezeichnung	REC22-12	
Nennspannung	12	V
Kapazität	22	Ah
Außenmaße (LxBxH)	181x76x167	mm
Gewicht	6,2	kg

Besonders bedeutsam ist hier das Gewicht von 6,2 kg pro Akku. Bei 4 Stück ergibt sich somit ein Gesamtgewicht des Energiespeichers von knapp 25 kg. Immerhin werden damit rund 20 kg im Vergleich zu den originalen Akkus (40 Ah) eingespart.

Inzwischen gibt es eine große Vielfalt an verschiedenen Akku Typen, die zum Teil Vorteile gegenüber den Bleiakkus bieten. Vor allem Lithium Ionen werden häufig für diese Zwecke verwendet.

In Abbildung 12 ist die gebotene Leistungsdichte der verschiedenen Typen zu sehen. Hier erreicht der Bleiakku annähernd Werte auf dem Niveau moderner Akkusysteme von bis zu 400 W/kg.

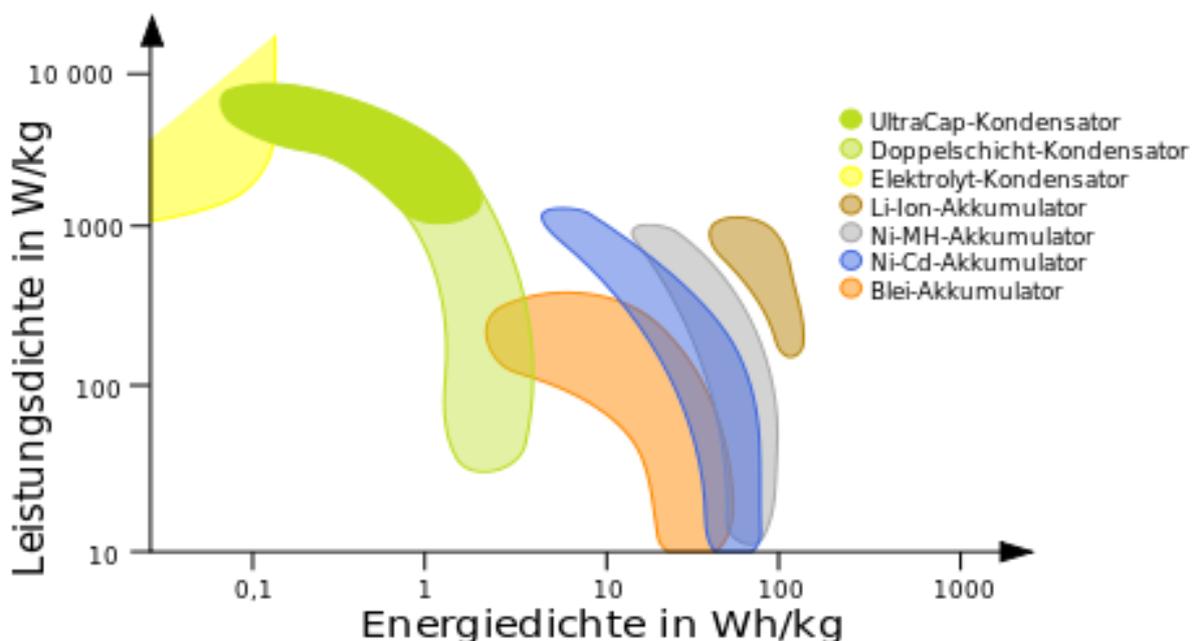


Abbildung 12: Akkus im Vergleich - Leistungs-/Energiedichte [11]

2.2.1 Kapazität

Wie bereits erwähnt, musste der Bauraum für den Verbrennungsmotor erst geschaffen werden. Dies geschah durch eine Verkleinerung der Batteriekapazität von 40 auf 22 Ah und damit verringertem Platzbedarf.

Die Nennkapazität gibt an, wie viel Strom der Batterie bei einer definierten Entladedauer entnommen werden kann. Gemessen wird in Amperestunden [Ah] mit einem Bezug auf eine Entladedauer, angegeben in Stunden C_x , also für x Stunden. C_{10} ist ein üblicher Wert für Starterakkus wie auch hier verwendet und beschreibt dabei die Entladung innerhalb von 10 Stunden.

Wichtig ist auch zu beachten, dass, wie in Abbildung 13 ersichtlich, die maximal zu entnehmende Energie mit sinkender Entladedauer, sprich steigender Stromstärke, abnimmt.

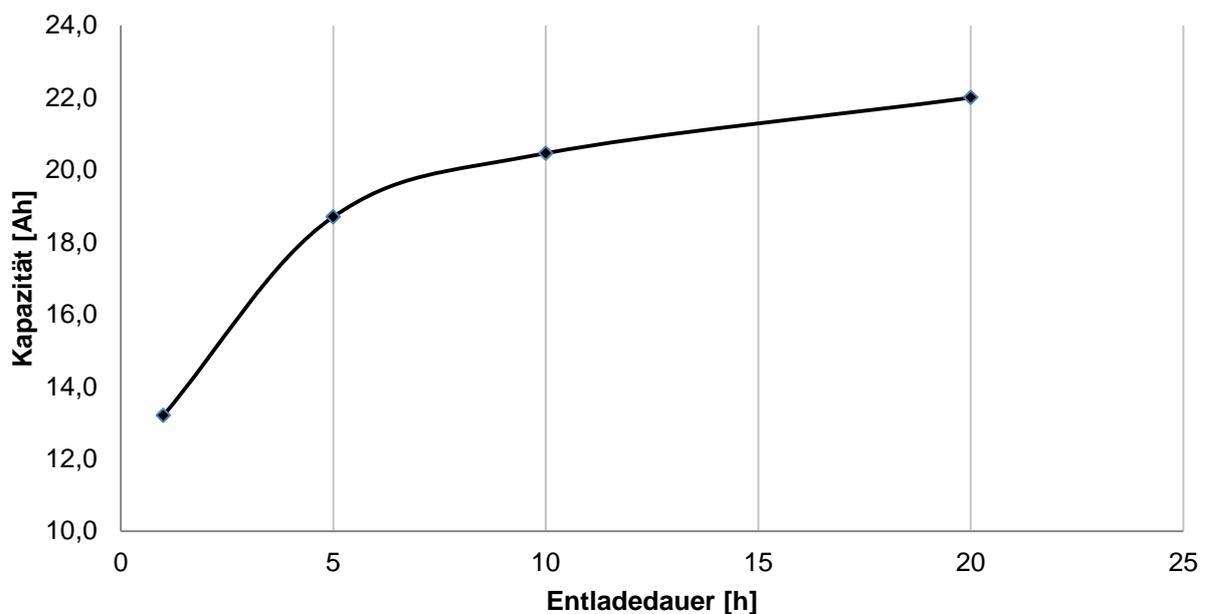


Abbildung 13: Kapazität über Entladedauer

Der Grund für dieses Verhalten resultiert u.a. aus dem mit steigendem Strom auch steigenden Spannungsabfall am Innenwiderstand des Akkus. Dadurch wird die Ladeschlussspannung frühzeitig erreicht. Ebenfalls ausschlaggebend ist die Trägheit der Chemie des Bleiakkus. Beide Phänomene können mittels Peukert Effekt [12] beschrieben werden.

2.2.2 Entladung

Entscheidend für die Steuerung des gesamten Systems sind Kenntnisse über die Entladecharakteristik der Bleiakkus. In Abbildung 14 ist die Entladespannung abhängig von Kapazität des Akkus und der entnommenen Stromstärke über die Zeit bei einer Temperatur von 25°C aufgetragen. Die verschiedenen Kurven beziehen sich jeweils auf die entnommene Stromstärke, wobei die Zahl den Strom als Vielfaches der Kapazität in Ampere beschreibt.

Zum Beispiel ergibt sich aus einer Kapazität von 44 Ah und einem Strom von 18 A ein Wert von 0.4 CA und daraus wiederum eine Laufzeit von knapp unter 2 Stunden.

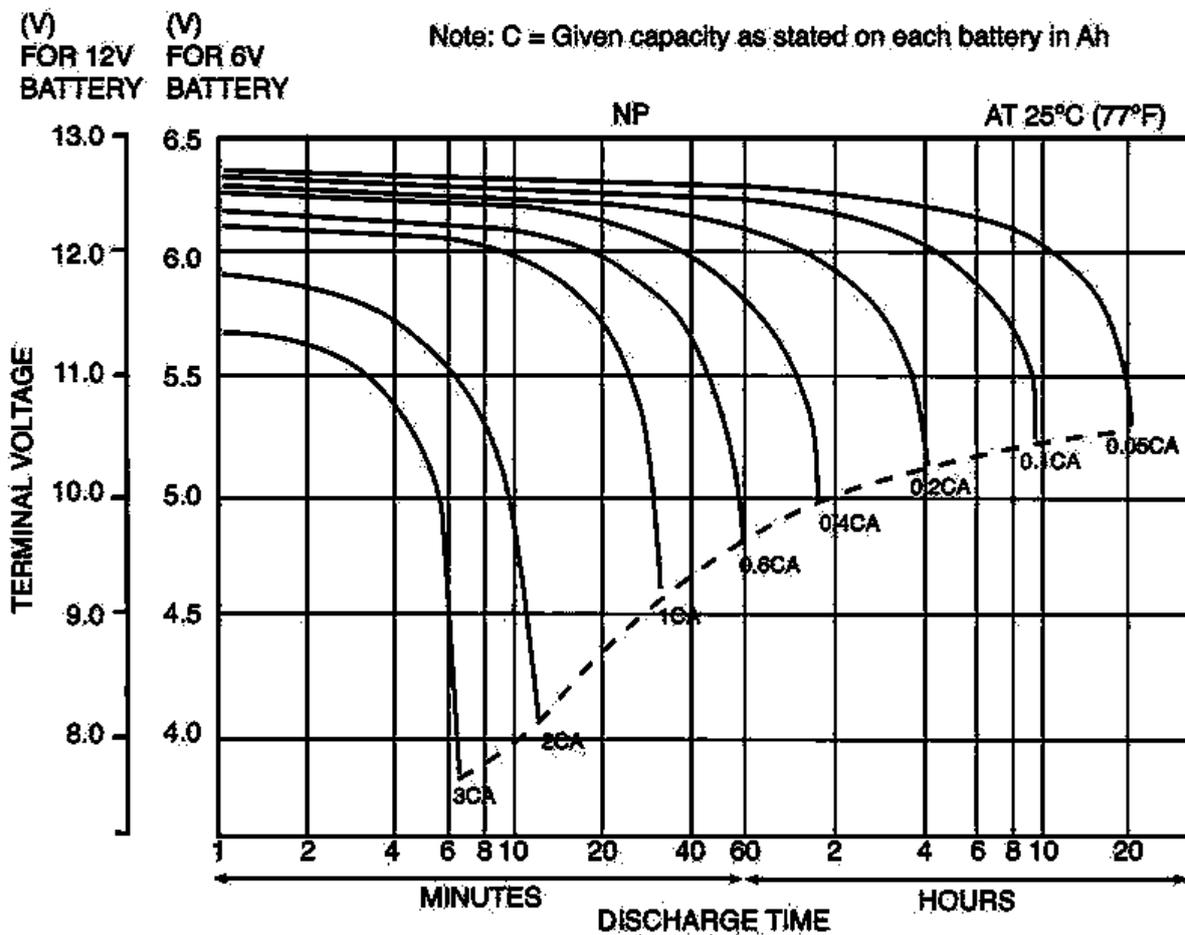


Abbildung 14: Entladekurven Bleiakku [13]

Die gestrichelte Kurve gibt die Entladeschlussspannung an, bis zu welcher die Akkus entladen werden dürfen. Durch eine Belastung unterhalb dieser Werte würde der Akku dauerhafte Schädigungen davontragen.

2.2.3 Ladespannung

Die Höhe der zulässigen Ladespannung ist vom verwendeten Akku-Typ abhängig. Beim 12 V Bleiakku setzt über 13,8 V (entspricht 2,3 V/Zelle) eine starke Gasung ein, im intermittierenden Betrieb sind bis zu 14,4 V für Schnellladung zulässig. Die Ladespannung wird daher auf 14,4 V begrenzt. Dies bedeutet in unserem Fall bei vier in Serie geschalteten 12 V Bleiakkus und damit einer Bordspannung von 48V eine Maximale Ladespannung von 57,5 V.

2.2.4 Ladestrom

Abbildung 15 zeigt den idealen Stromverlauf während eines Ladevorganges.

Da nicht eine maximale, sondern eine möglichst rasche Ladung in kurzer Zeit einer stark entladene Batterie Ziel dieser Untersuchungen ist, ist der linke Bereich des Diagrammes mit sehr hohem Ladestrom interessant. Im niedrigen Ladezustand der Batterien kann so eine sehr effiziente und schnelle Ladung erreicht werden.

Generell sollte der Ladestrom nicht mehr als 10% [14] des Kapazitätswertes betragen. Bei einer Gesamtkapazität von 22 Ah entspricht der Ladestrom demzufolge 2,2A. Dadurch würde eine Ladung der Akkus allerdings sehr viel Zeit in Anspruch nehmen.

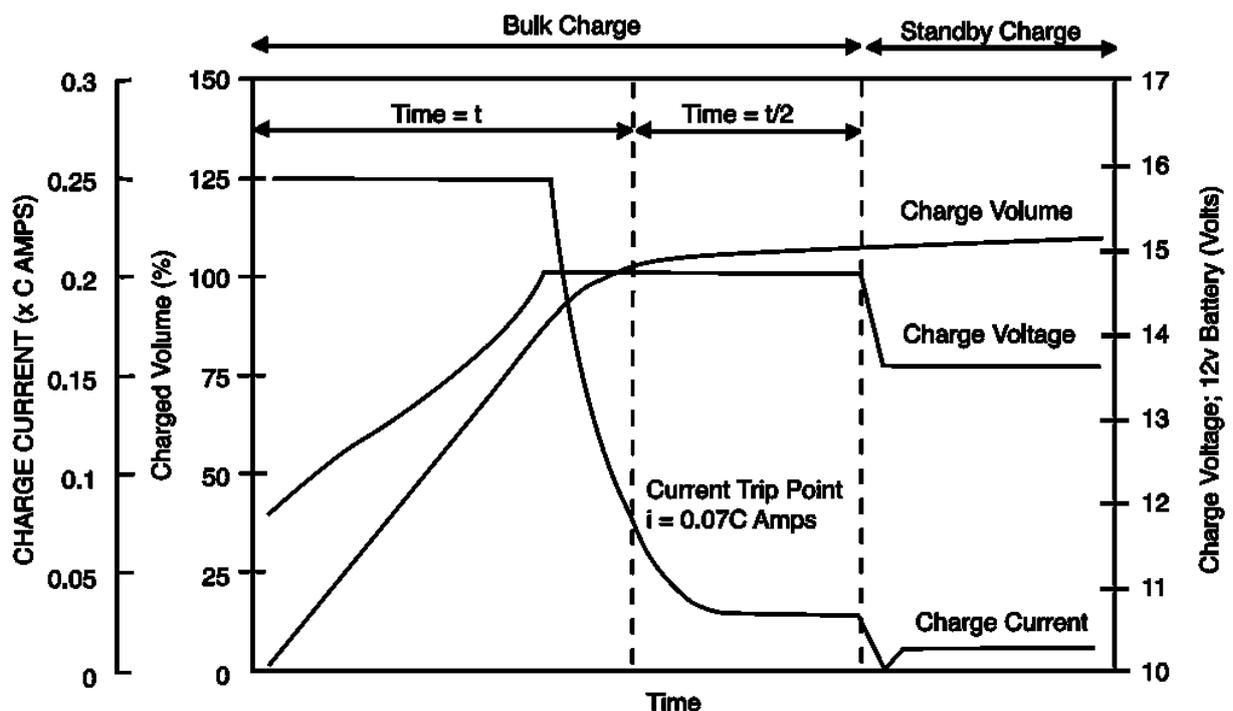


Abbildung 15: Ideale Ladekennlinie [13]

Bei der Schnellladung kann der Ladestrom auf ein vielfaches gesteigert werden, Werte von bis zu 100 % des Kapazitätswertes (22 A) sind zulässig, jedoch nur für kurze Dauer. Das Laden mit solch hohen Strömen über längere Zeitintervalle würde sich in einem überproportionalen Spannungsanstieg äußern und zu Beschädigung der Akkus führen. Der Ladestrom ergibt sich einerseits aus der Spannungsdifferenz zwischen Bordspannung (40-56V) und der aktuellen Spannung des Akkus, sowie seinem Innenwiderstand. Mit steigendem Ladezustand erhöht sich auch die Batteriespannung, sodass der Ladestrom immer kleiner wird. Ist schließlich die Ladeschlussspannung erreicht, gibt es keine Spannungsdifferenz mehr zwischen Bord- und Batteriespannung, und es wird nicht mehr geladen. Dieser Bereich sollte hier allerdings nicht erreicht werden, da der REX nur lädt, wenn die Akkus ihren unteren Kapazitätswert erreicht haben. In unserem Anwendungsfall ergibt sich der Ladestrom aus der Bordspannung und der elektrischen Leistung, welche wiederum von der Leistung des Verbrennungsmotors und des Generatorwirkungsgrades abhängt.

$$I = \frac{P}{U} \quad (3)$$

Bei einer prognostizierten elektrischen Leistung von 1,2 kW bei einer unteren Bordspannung von 48 V stellt sich somit ein Ladestrom von 25 A ein.

Dies ist zwar ein sehr hoher Wert, sollte aber von den Bleiakkus verkraftet werden, auch wenn diese Art der Ladung zu einer Verringerung der Lebensdauer der Akkus beitragen wird.

2.2.5 Definition Ladezustand

Um Versuche reproduzierbar durchführen zu können, ist es unumgänglich einen exakt definierten Ladezustand (SoC¹) der Akkus zu definieren. Weiter ist dies auch ein bedeutender Wert, um in weiterer Folge Konzepte entwerfen zu können, wann der REX gestartet und wieder abgestellt werden soll. Da es nicht möglich ist, den Ladezustand eines Bleiakkus rein über die Leerlaufspannung ausreichend genau zu bestimmen, muss dies auf anderem Wege geschehen. Abbildung 16 zeigt ein Diagramm zur Bestimmung des SoC anhand eines Akkus mit 30 Ah. Es wird mit konstanter Spannung von rund 11,1 V entladen. In Punkt 1 solange, bis sich ein Entladestrom von 50 A einstellt, was auf einen SoC von 70 % entspricht. In Punkt 2 bis 25 A, ein SoC von 30 % ist das Resultat. Ein SoC von 30 % gilt hier als Tiefentladeschutz, jedoch stellt ein Wert bis 20 % keine Probleme dar. Ein Entladen unterhalb dieses Wertes würde die Akkus dauerhaft schädigen.

¹ State of Charge

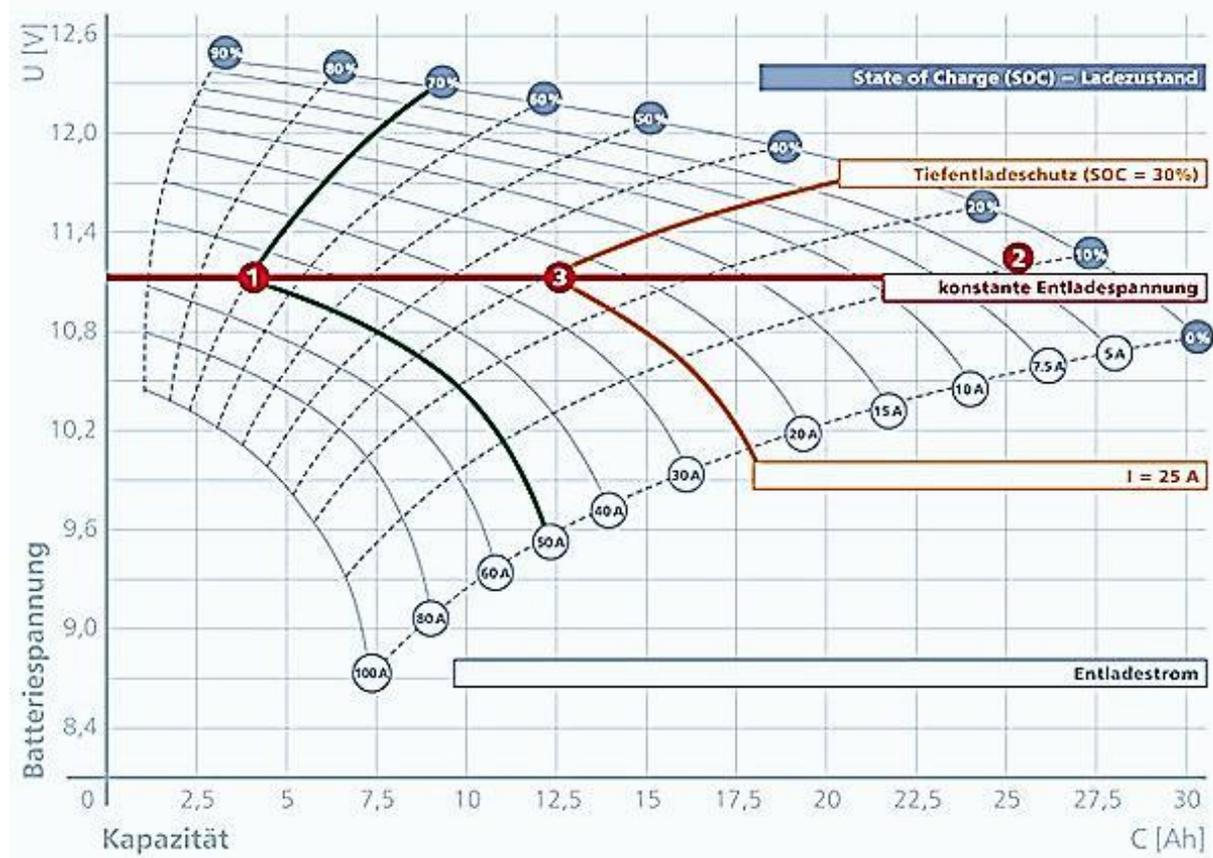


Abbildung 16 : SoC Bestimmung eines Akkus mit einer Kapazität von 30 Ah [15]

Um einen Zustand zu erreichen in welchem die Akkus als entladen anzusehen sind (20 % SoC), wird wie folgt vorgegangen. Die Akkus werden soweit geladen, bis sie eine Leerlaufspannung von mindestens 48 V erreichen. Anschließend werden sie über eine definierte Last von 10 A entladen, bis die Spannung einen Wert von 45 V (11,25 V/Akku) unter Belastung erreicht. Diese definierte Spannungsschwelle entspricht einem SoC von 20 %. Der hergestellte Zustand gilt damit laut eigener Definition als entladen und stellt die Startbedingung für alle weiteren Untersuchungen dar.

Das genannte Diagramm baut auf einer 50 % höheren Akkukapazität auf. Dadurch muss auch ein um 50 % höherer Entladestrom angenommen werden, um dieses Diagramm anwenden zu können und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Demzufolge muss im Diagramm ein Strom von 15 anstatt 10 A angenommen werden.

2.3 Rollenmessung E-Fahrzeug

2.3.1 Hohe Kapazität (40 Ah)

Um eine brauchbare Referenz zu erhalten, wurde das Fahrzeug im Originalzustand, also rein elektrisch (40 Ah Akkukapazität) auf dem Rollenprüfstand untersucht. Der Scooter wurde hier nach dem Zyklus „ECE R-47“ gefahren, siehe 1.2.4. Von besonderem Interesse für weitere Untersuchungen ergaben sich dabei die Batteriespannung und der von den Akkus entnommene Strom. Daraus kann die elektrische Leistung berechnet werden, welche demnach einen Spitzenwert von bis zu 3 kW erreicht. Der zeitliche Mittelwert der elektrischen Leistung beläuft sich dabei auf 660 W.

Über diesen können erste Erkenntnisse über den durchschnittlichen Energieverbrauch sowie die Reichweite des Elektrofahrzeuges gewonnen werden.

Reichweite

Wird von der originalen Speicherkapazität von 40 Ah bei 48 V ausgegangen, ergibt sich daraus eine Energiemenge von 1,9 kWh. Jedoch kann nicht die gesamte Kapazität genutzt werden, unter anderem um Schäden an den Akkus durch Tiefentladung zu vermeiden. Bei einer Entladung auf 20 % SoC bleibt eine nutzbare Energie von 1,4 kWh. Dividiert man nun diesen Wert durch die durchschnittliche Leistung von 660 W, ergibt sich daraus eine theoretische Betriebsdauer von knapp über 2 h.

Bezogen auf eine mittlere Geschwindigkeit von 26,7 km/h aus dem Zyklus ECE R-47 ergibt dies eine theoretische Reichweite von 55 km. Dieser Wert liegt etwas unter der vom Hersteller angegebenen Reichweite von 60 km.

Die Akkuspannung bewegt sich in einem Bereich von rund 46 V bis 52 V. Wird die Akkukapazität im Folgenden reduziert wird gleichzeitig der Ladezustand aufgrund der Belastung noch schneller sinken und es ist mit deutlich geringeren unteren Spannungswerten zu rechnen. Dieses Verhalten der Spannung stimmt gut mit den vorangegangenen Untersuchungen in Kapitel 2.2.2 überein, wo die Entladekurven eines Akkus bei verschiedenen Belastungen gezeigt werden. Auch hier sinkt die Spannung bei einer Erhöhung des entnommenen Stromes.

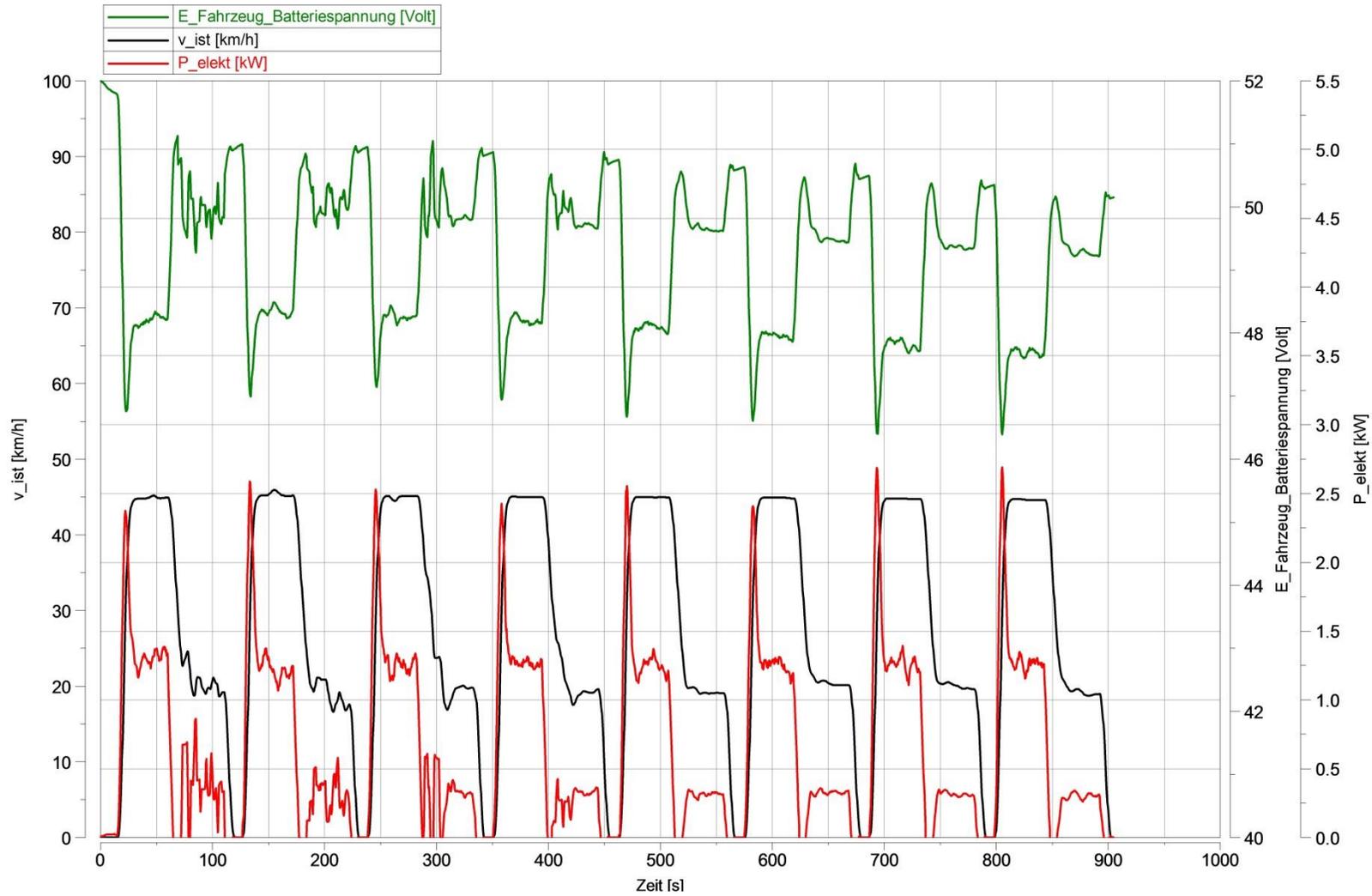


Abbildung 17: Messung Originalfahrzeug mit vollen Akkus

2.3.2 Reduzierte Kapazität (22 Ah)

Abbildung 18 zeigt die Ermittlung der elektrischen Reichweite, und damit auch das Verhalten der Bordspannung über den gesamten Bereich der Akkukapazität.

Die Spannungsspitzen bewegen sich von 40 bis 52 V, wobei Amplituden von bis zu 5 V auftreten. Die Linie zur Spannung in Dunkelgrün stellt eine Glättung dar, dadurch kann die Tendenz zum Sinken des mittleren Spannungsniveaus von 50 V bis runter auf unter 44 V besser erkannt werden.

Die reduzierte Kapazität und der daraus resultierend erhöhten Schwankungsbreite der Spannung lässt hohe Anforderungen an die Regelung des gesamten Systems erwarten. Es ist zu bedenken, dass die VKM drosselfrei, also unter Volllast betrieben wird und deren qualitative Regelung relativ träge funktioniert. Am anderen Ende der Energiekette sitzt jedoch ein hochdynamischer Abnehmer, woraus auf hohe Anforderungen an die Steuerung des Range Extenders geschlossen werden kann.

Reichweite

Es wurde eine elektrische Reichweite von 21,4 km erzielt. Als Abbruchkriterium der Prüfung wurde ein Erreichen der unteren Spannungsschwelle entsprechend dem Anzeigegerät von 40 V herangezogen.

Die Zeitspanne ohne Geschwindigkeit im Bereich von 2750 s ergab sich durch eine von 3 erlaubten Pausen von bis zu 15 Minuten während der Prüfung. Die Ermittlung der elektrischen Reichweite entspricht den Richtlinien, welche in Kapitel 1.2.6 näher beschrieben wurden.

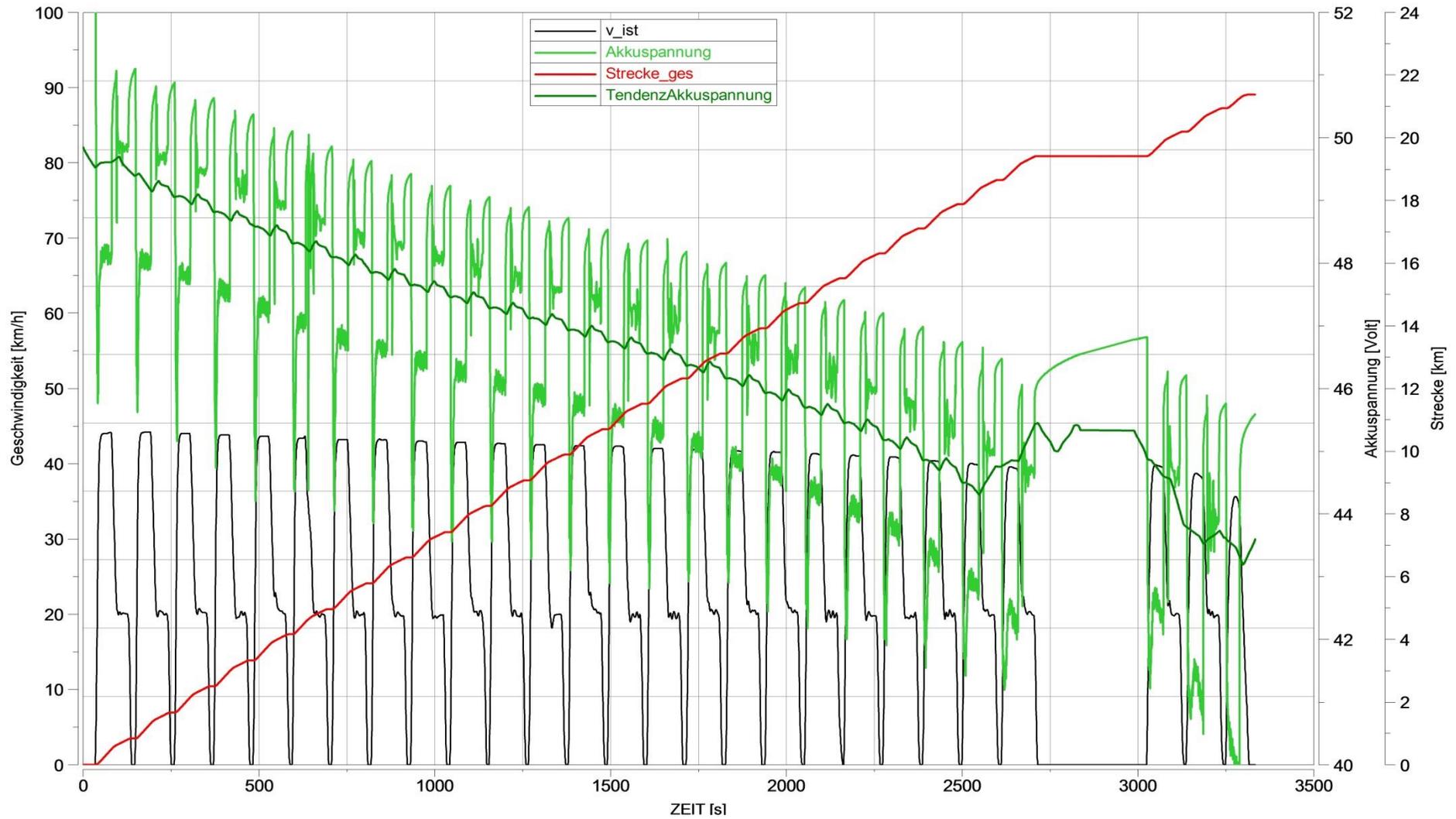


Abbildung 18: Messung mit reduzierter Akkukapazität = 22 Ah und Ermittlung der Reichweite

3 Konzept Range Extender

Als Range Extender wird das System Verbrennungsmotor – Generator bezeichnet. Dieser soll als eigene Einheit fungieren und das vorhandene Infrastruktur des E-Fahrzeuges so wenig wie möglich beeinflussen.

Der konzeptionelle Aufbau des Range Extenders wie in Abbildung 19 gezeigt war bereits durch vorangegangene Arbeiten festgelegt. Der Verbrennungsmotor treibt über eine mechanische Anbindung den Generator an. Dieser wandelt die mechanische Energie in elektrische in Form von 3-Phasen Wechselstrom um. Da das Bordnetz jedoch auf Gleichstrom basiert muss dieser Wechselstrom über einen Gleichrichter in Gleichstrom umgewandelt werden, um anschließend in die Akkus gespeist werden zu können. Die Steuerung der VKM soll über eine ECU¹ erfolgen, Zündung und Einspritzung sollen damit realisiert werden.

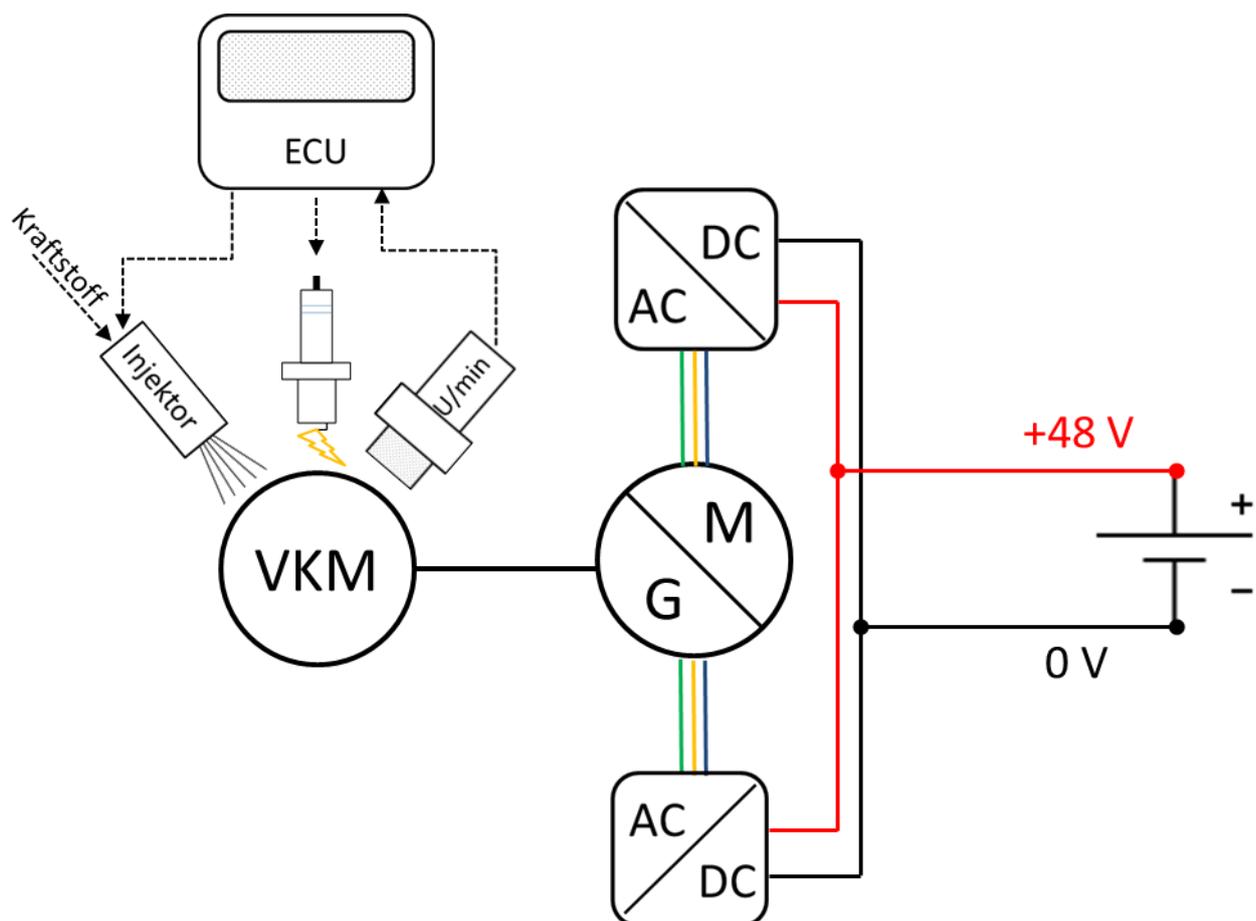


Abbildung 19: Konzept des Range Extenders

¹ Engine Control Unit (dt.: Motorsteuergerät)

3.1 Generator

Die elektrische Energie zur Speisung der Batterien liefert eine Motorrad Lichtmaschine, entliehen aus einer BMW K1200. Es handelt sich dabei um einen fremderregten Drehstromgenerator. Dieser stammt ursprünglich aus einem 12 V System und liefert dabei einen Strom von bis zu 50 A. Tabelle 9 zeigt die Daten der Lichtmaschine.

In Abbildung 20 ist der prinzipielle Aufbau eines Drehstromgenerators mit Klauenläufer zu sehen, die Ringwicklung im Läufer wird mittels Kohlebürsten mit dem notwendigen Erregerstrom versorgt, um ein Magnetfeld zu erzeugen.

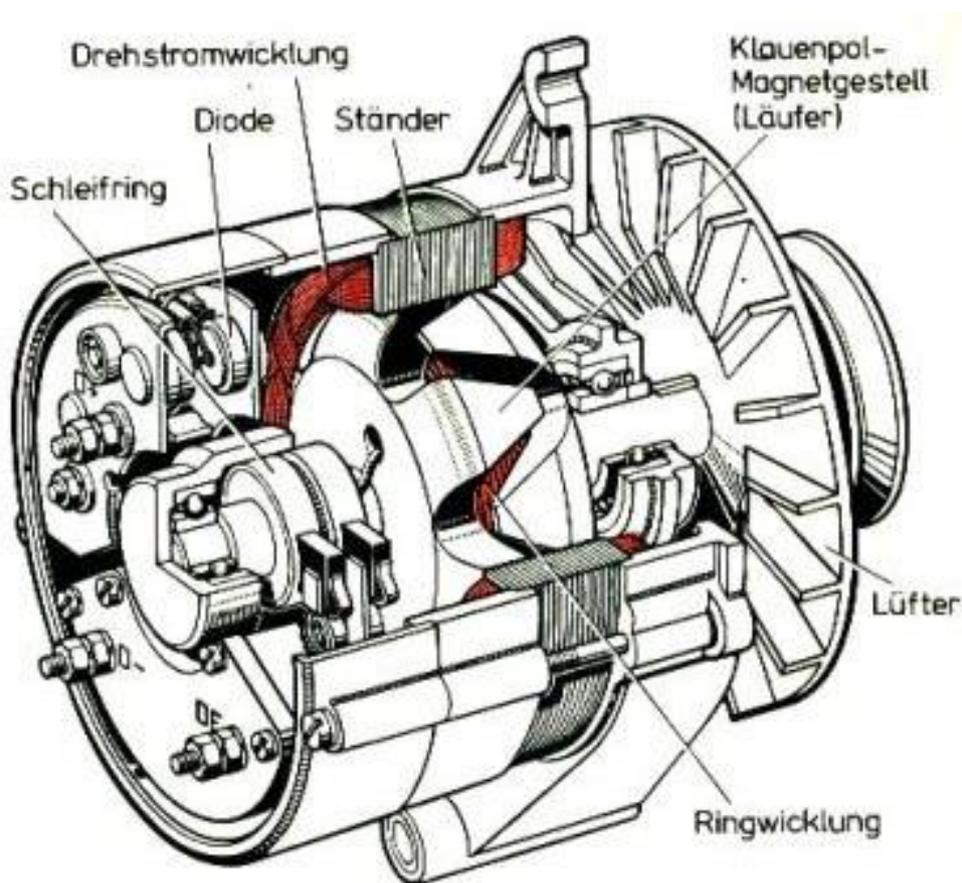


Abbildung 20: Prinzipieller Aufbau einer Drehstromlichtmaschine [16]

Dieser Generator wurde bereits an der TU Graz im Zuge einer Bachelorarbeit [17] genau untersucht, daraus sind exakte Daten wie Wirkungsgradkennfeld und erforderlicher Erregerstrom bekannt. Aus dieser Arbeit geht auch hervor, dass die Rotorwicklung einen ohmschen Widerstand von 4Ω besitzt. Dadurch stellt sich bei einer Systemspannung von 12 V nach dem ohmschen Gesetz ein Erregerstrom von 3 A ein.

Tabelle 9: Daten Drehstromlichtmaschine

Bezeichnung	Wert	Bedingung
Hersteller	Nippon Denso	-
Bauart	Dreiphasen-wechselstrom-generator	-
Höchstleistung	530 W	U = 13,3 V
Höchststrom	42 A	n = 4000 min ⁻¹
Nennstrom	13,5 A	n = 1000 min ⁻¹
Maximaldrehzahl	18000 min ⁻¹	-

3.1.1 Zusammenhang Erregerstrom – Drehmoment

Es soll der Zusammenhang zwischen Erregerstrom und erzeugtem Drehmoment kurz zusammengefasst werden.

Die magnetische Feldstärke der Läuferwicklung wird wie folgt berechnet:

$$H = I_e * \frac{n}{l_L} \quad (4)$$

H – magnetische Feldstärke

I_e - Stromstärke

n – Windungszahl

l_L – Länge des elektrischen Leiters der Läuferwicklung

Weiter die magnetische Flussdichte:

$$\vec{B} = \mu_r * \mu_0 * \vec{H} \quad (5)$$

\vec{B} – magnetische Flussdichte

μ - magnetische Permeabilität

Über die Flussdichte und damit den Erregerstrom kann mit der Einbeziehung weiterer Kennzahlen das generierte Drehmoment berechnet werden:

$$\vec{M}_L = (I_L * \vec{l}_S \times \vec{B}) \times \vec{r} \quad (6)$$

\vec{M}_L - Lastmoment

I_L - Laststrom

\vec{l}_S – Länge der Spule

\vec{r} – Radius der Läuferwicklung

Damit ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen Erregerstrom und erzeugtem Moment. Steigt demzufolge der Ladestrom, muss die Erregung reduziert werden, um das Lastmoment und damit die Leistung konstant zu halten.

In Abbildung 21 ist die Leerlaufspannung des Generators zu erkennen. Um die maximal erforderliche Spannung von 56 V bei einem Erregerstrom von 3 A zu erreichen, ist demnach eine Drehzahl von mindestens 4800 U/min nötig.

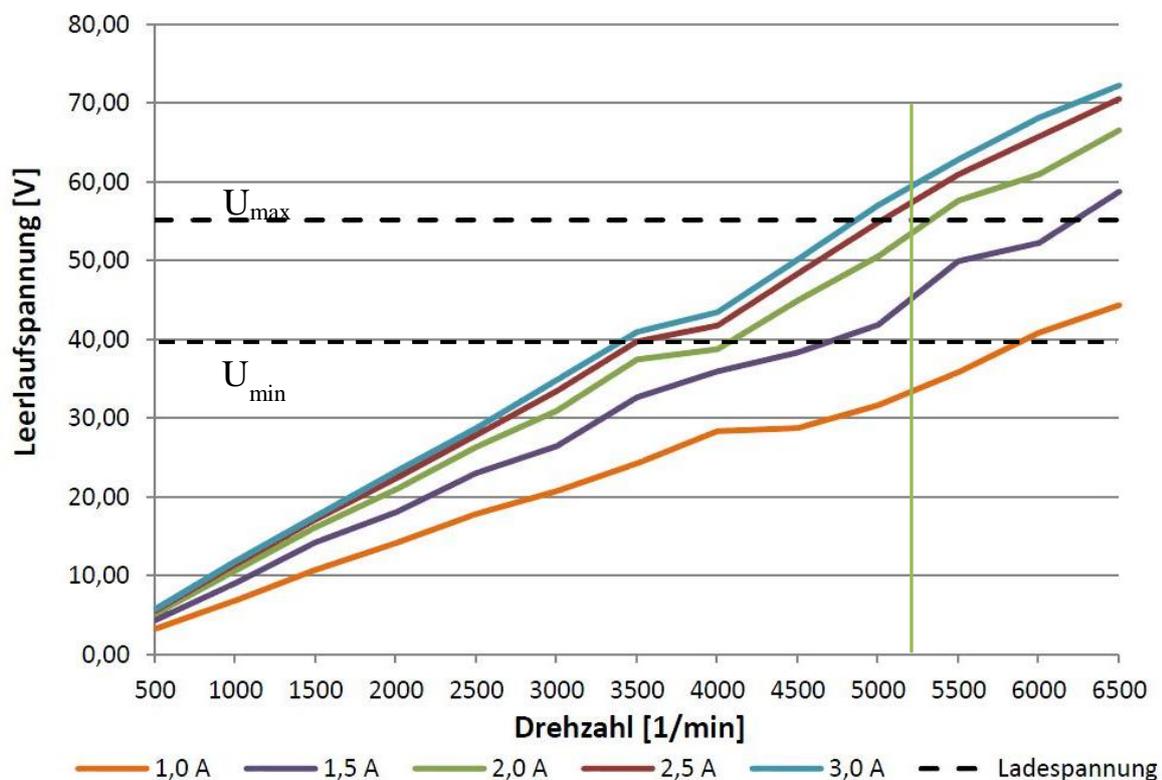


Abbildung 21: Leerlaufspannung des Generators [17]

Diese Tatsache hat vor Allem Einfluss auf das Übersetzungsverhältnis von Verbrennungsmotor zu Generator. Da die VKM eine konstante Leistung von rund 1,9 kW bei 4000 U/min liefert, können mit dem Übersetzungsverhältnis die Drehzahl und gleichzeitig das Drehmoment am Generator bestimmt werden. Eine höhere Drehzahl am Generator bedeutet somit ein geringeres Drehmoment an selbigem.

Um bei der vorgegebenen Motordrehzahl 4800 U/min am Generator darzustellen ist ein Übersetzungsverhältnis von mindestens 1,2 erforderlich. In Kapitel 4.2.4 wird dieses Verhältnis auf 1,295 festgelegt, womit der Generator bei einer Drehzahl von 5180 U/min rotiert.

3.1.2 Wirkungsgrad Generator [17]

Abbildung 22 zeigt das Wirkungsgradkennfeld des Generators, welches aus Simulationen hervorging. Es ist zu erkennen, dass ein optimaler Wirkungsgrad von rund 70 % erreicht werden kann.

Bei steigenden Drehzahlen steigen auch die Kupferverluste linear an, da die fließenden Ströme immer größer werden. Die Eisen- und Ventilationsverluste steigen jedoch exponentiell und stellen somit einen erheblichen Anteil am Gesamtwirkungsgrad dar. Die Verluste durch mechanische Reibung bleiben über den ganzen Drehzahlbereich nahezu konstant.

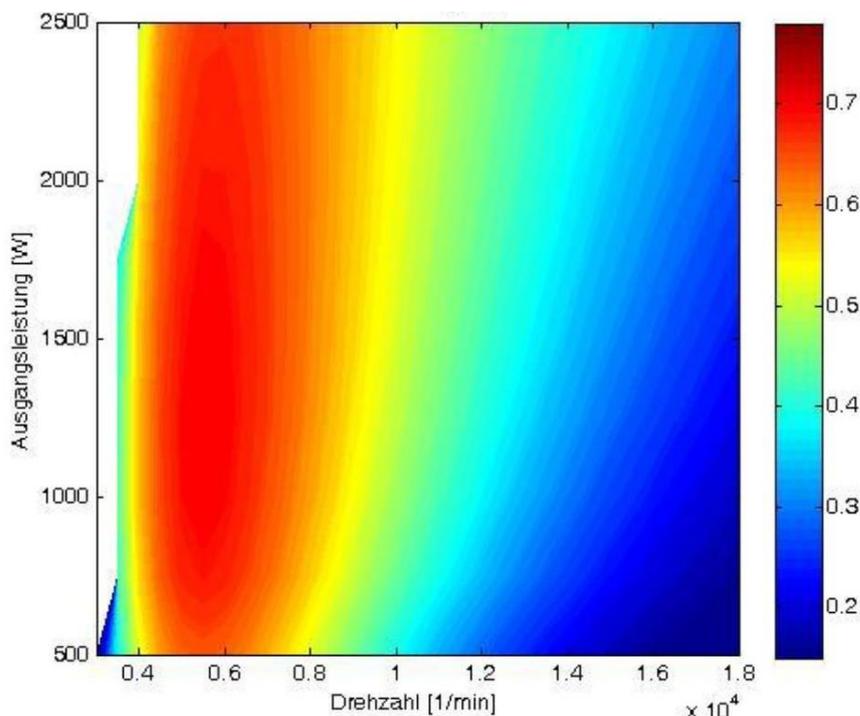


Abbildung 22: Wirkungsgradkennfeld [17]

3.2 Verbrennungsmotor

Als Verbrennungsmotor wird ein luftgekühlter 50 ccm 2-Takt Motor eingesetzt. Dieser ist kolbengesteuert und verfügt über eine Frischölschmierung. Der Motor wurde bereits im Vorhinein an der TU Graz optimiert [18], jedoch nicht für die Anwendung als Range Extender, sondern als Antriebsmotor in einem Moped.



Abbildung 23: Verbrennungsmotor mit beschnittenem Kurbelgehäuse und Zylinder

Um im Fahrzeug Platz zu finden, wurde das Motorgehäuse auf das notwendigste beschnitten, das gesamte Getriebe entfernt. Es blieb nur das Kurbelgehäuse mit gekürzter Kurbelwelle und dem luftgekühlten Zylinder, welcher ebenfalls in seinen Maßen etwas verkleinert wurde.

3.2.1 Kennwerte

Der Motor erbringt wie in Abbildung 24 ersichtlich eine Nennleistung von 2,36 kW bei 5720 U/min, wobei sie bei höherer Drehzahl stark abfällt. Bei der angestrebten Drehzahl von 4000 U/min werden noch 1,9 kW erreicht.

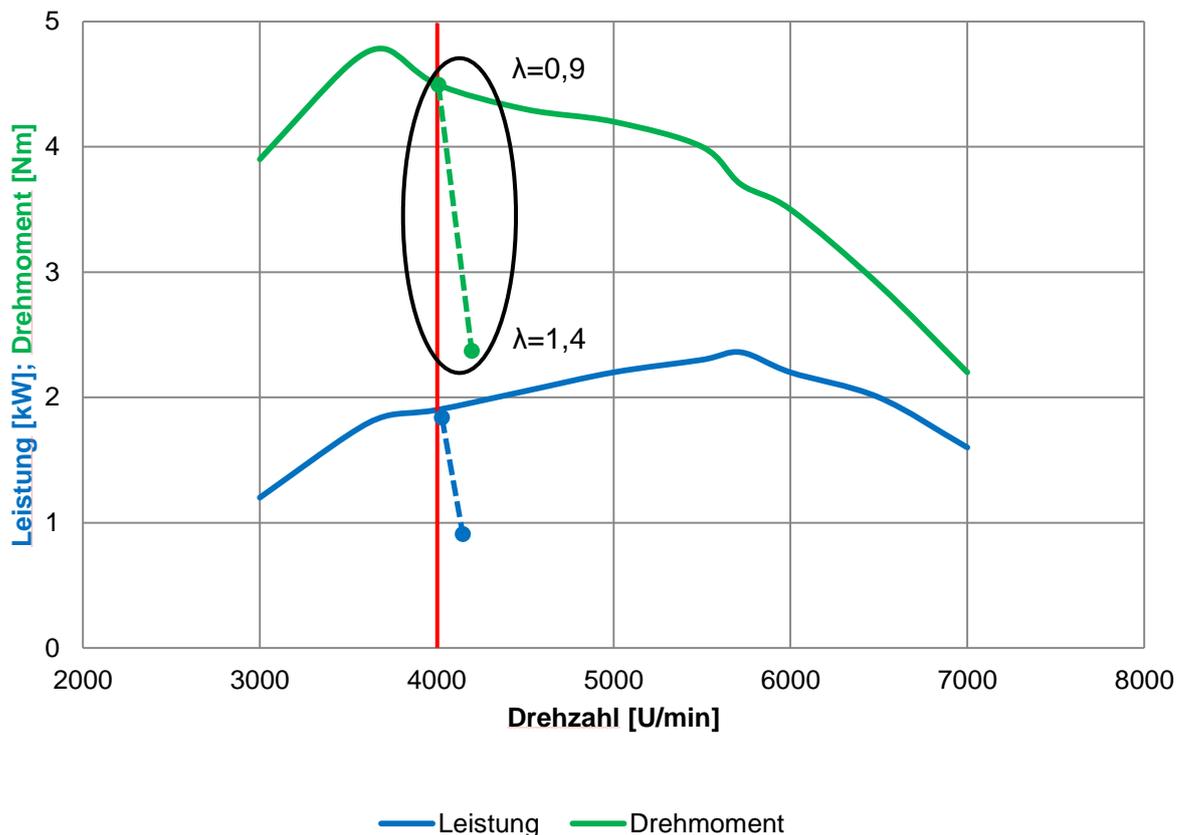


Abbildung 24: Leistungs- und Drehmomentverlauf des Versuchsmotors [18]

Für die vorliegende Aufgabe besonders interessant ist der Verlauf des maximalen Drehmomentes ($\lambda=0,9$) des Motors, ebenfalls zu sehen in Abbildung 24. Das maximale Moment steht bei einer Drehzahl von 3710 U/min an und beträgt 4,78 Nm. Bei einer Erhöhung der Drehzahl fällt dieses wieder ab. Wählt man nun die konstante Auslegedrehzahl von 4000 U/min, wirkt einem möglichen Abfall der Drehzahl eine Erhöhung des Motordrehmomentes entgegen, dadurch lässt sich ein stabiler Motorlauf realisieren.

Um ein Ansteigen der Drehzahl zu verhindern, soll das Drehmoment über 4000 U/min stark vermindert werden. Dies geschieht durch eine Reduktion der Einspritzmenge und einem damit erhöhtem Luftverhältnis.

Dieses Verhalten wurde bereits in vorangegangenen Untersuchungen bestätigt und ist grafisch in Abbildung 25 dargestellt.

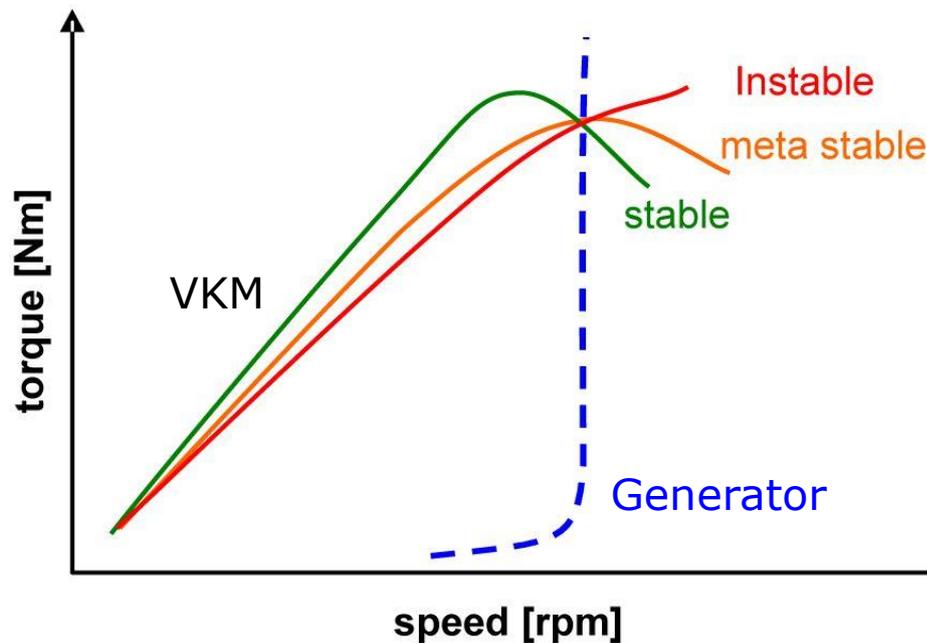


Abbildung 25: Stabilität in Abhängigkeit der Drehzahl [19]

In blau ist der Drehmomentenverlauf des Generators eingezeichnet. Dieser steigt schlagartig an, sobald eine gewisse Drehzahl und damit eine Spannung erreicht werden. Die grüne Drehmomentenkurve des Verbrennungsmotors die einzig stabile, bei allen anderen würde die Drehzahl bei einer Lasterhöhung abfallen. Nur durch ein Drehmomentenmaximum welches sich unter der gewählten Drehzahl befindet lässt sich also ein stabiler Lauf realisieren. In diesem Drehzahlbereich muss die im Vergleich zur Maximalleistung geringere Leistung des Motors in Kauf genommen werden, jedoch sollen sich Vorteile in Sachen NVH¹ und damit im gebotenen Komfort ergeben.

3.2.2 Verwendung eines 2-Takt Motors

Der 2 Takt Motor hat in unserem Anwendungsfall einige Vorteile gegenüber einem Motor, der nach dem 4-Takt Prinzip arbeitet. Zum Ersten bringt der Einsatz dieses Konzeptes eine erhebliche Gewichtsersparnis mit sich. Dies wirkt sich auf das Gesamtgewicht des Fahrzeuges aus und verringert damit auch den Fahrwiderstand und in weiterer Folge den Energieverbrauch. Weiters ist dieser Motor nicht an eine Einbaulage gebunden, das heißt der Motor muss nicht horizontal liegen, er kann auch vertikal im Fahrzeug verbaut werden. Auch kann sich die Kurbelwelle über dem Zylinder befinden, ohne die Funktion des Motors zu beeinträchtigen. Diese Unabhängigkeit der Einbaulage des Motors bringt eine große Freiheit

¹ Noise, Vibration, Harshness

im Bereich Packaging, die Platzverhältnisse im Fahrzeug können dadurch optimal genutzt werden.

3.2.3 Abgasverhalten

Allgemein betrachtet weist das 2-Takt Prinzip erhebliche Schwächen bezüglich Abgasemissionen gegenüber dem des 4-Takters auf. Dies beruht hauptsächlich auf der recht komplexen Gasdynamik eines 2-Takt Motors, welche kaum über den gesamten Drehzahlbereich zufriedenstellend realisiert werden kann. Dadurch entstehen zum Teil sehr große Spülverluste, speziell in niedrigen Drehzahlbereichen kann dies sehr problematisch sein. Dieses Verhalten betrifft unseren Motor jedoch nur in sehr geringem Ausmaß, da dieser immer mit konstanter Drehzahl betrieben wird. Dadurch können Drehzahlbereiche vermieden werden, in denen die Gasdynamik nur schlecht funktioniert und hohe Rohemissionen produziert werden.

3.2.4 Kühlung

Da der Motor aus einem Moped stammt und dort mittels Fahrtwind gekühlt wird, fallen die Kühlrippen verhältnismäßig groß aus, um auch bei geringen Geschwindigkeiten und hohen Belastungen, wie sie etwa an starken Steigungen auftreten, eine ausreichende Wärmeabfuhr gewährleisten zu können. In der vorliegenden Anwendung wird der Motor gekapselt betrieben und mittels Zwangslüftung gekühlt. Die kühle Außenluft wird seitlich angesaugt, umströmt anschließend Generator und VKM und verlässt im Bereich des Zylinderkopfes wieder die geschlossene Box.

Dadurch ist ein stetiger Luftstrom gegeben, wodurch auch bei geringerer Oberfläche mittels Konvektion immer genügend Wärme abtransportiert werden kann. Daraufhin wurden die Kühlrippen an Zylinder und Zylinderkopf gekürzt, was der Minimierung des benötigten Bauraumes zu Gute kommt.

Das zur Realisierung der Zwangslüftung benötigte Gebläse kann entweder mechanisch über die Kurbelwelle oder elektrisch angetrieben werden. In unserem Fall bietet der elektrische Antrieb erhebliche Vorteile gegenüber dem mechanischen. Diese sind:

- Große Flexibilität der Einbauposition
- Temperaturgeregelte Ansteuerung → verkürzte Kaltlaufphase der VKM
- Lüfternachlauf zur Kühlung der Komponenten

Zur Erzeugung des Luftstromes wird ein Axiallüfter wie in Abbildung 26 verwendet, welcher direkt mit dem 48 V Bordnetz gespeist werden kann.

Dieser nimmt einen maximalen Strom von 1 A auf und fördert dabei einen Volumenstrom von 384 m³/h. Bei Anlegen von 48 V läuft der Lüfter mit voller Geschwindigkeit, verbindet man den vorhandenen PWM¹ Eingang mit Masse schaltet dieser aus.



Abbildung 26: 48 V DC Axiallüfter [20]

3.2.4.1 Temperaturregelung

Um eine möglichst kurze Kaltlaufphase der VKM zu erreichen, soll der Lüfter erst anlaufen, wenn eine gewisse Motortemperatur erreicht ist. Auch soll der Lüfter nach Abstellen der VKM weiterlaufen, bis der Motor ausreichend gekühlt worden ist, um einen Wärmestau in der Box zu vermeiden und somit Beschädigungen von Bauteilen zu verhindern.

Das eingesetzte Motorsteuergerät (siehe Kapitel 5.1) verfügt über Ausgänge, welche frei belegt werden können, in diesem Fall mit einer Temperaturschwelle. Diese Ausgänge liefern entweder 0 V oder +5 V. Damit kann ein Relais angesteuert und somit der Lüfter geschaltet werden. Zur Messung der Motortemperatur wird ein NTC² eingesetzt, dessen Widerstand 10 k Ω bei 25 °C beträgt und mit steigender Temperatur abnimmt. Der Messwiderstand wird auf einer Kühlrippe des Zylinders befestigt.

Erreicht der Motor an dieser Stelle eine gewisse Temperatur (60°C) werden das Relais und damit der Lüfter eingeschaltet. Um ein dauerndes An- und Auslaufen des Lüfters zu vermeiden wird dieser erst wieder abgestellt sobald eine untere Motortemperatur von 50°C erreicht wird (Hysterese).

¹ Pulsweitenmodulation

² Negative Temperature Coefficient Thermistor; dt. :Heißeleiter

4 Packaging

Aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse ist es notwendig, den zur Verfügung stehenden Bauraum möglichst effizient zu nutzen. Wie bereits erwähnt wird dadurch Platz geschaffen, indem die Batteriekapazität reduziert wird, welcher anschließend für die Range Extender Einheit genutzt werden kann.

Es ergibt sich so ein nahezu quaderförmiger Raum mit folgenden Abmaßen:

Tabelle 10: Abmaße des verfügbaren Bauraumes

Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]
340	205	230

Dieser Raum soll die Hauptkomponenten VKM und Generator, sowie auch das Gebläse zur Motorkühlung und AGD¹ beinhalten.

4.1.1 Einbaulage

Hier kann ein großer Vorteil des verwendeten 2-Takt Motors ausgespielt werden – die Gewährleistung der Funktion unabhängig von der Einbaulage. Dadurch ergibt sich eine hohe Flexibilität im Bereich Packaging. Es wurden verschiedene Konzepte untersucht. Einerseits ist die Lage des Motors frei wählbar, andererseits ist auch der Anschluss des Generators von großer Bedeutung.

Durch die Vorgabe des Bauraumes stellte sich folgende Anordnung als ideal dar:

- Kurbelwelle waagrecht, quer zur Fahrtrichtung
- Zylinderkopf nach hinten gerichtet
- Ansaugseite oben, Abgasseite unten
- Generator dicht über dem Kurbelgehäuse positioniert

¹ Ansaugeräuschkämpfer

4.1.2 Lagerung

Die beiden Komponenten werden auf einer gemeinsamen Konsole verbaut, welche wiederum auf Gummi gelagert wird um somit eine Übertragung der auftretenden Vibrationen auf das Fahrzeug weitgehend zu unterbinden. Die weiche Befestigung dieser Komponenten ist jedoch nur möglich, da keine mechanische, sondern rein elektrische Energie von dem Range Extender Paket abgegeben wird und somit keine Drehmomentabstützung notwendig ist. Zur Vorspannung des Riemens wird der Generator schwenkbar gelagert und kann über Langlöcher fixiert werden.

Abbildung 27 zeigt die Einheit mit Konsole, VKM, Generator und Ansaugkrümmer inklusive Einspritzdüse.

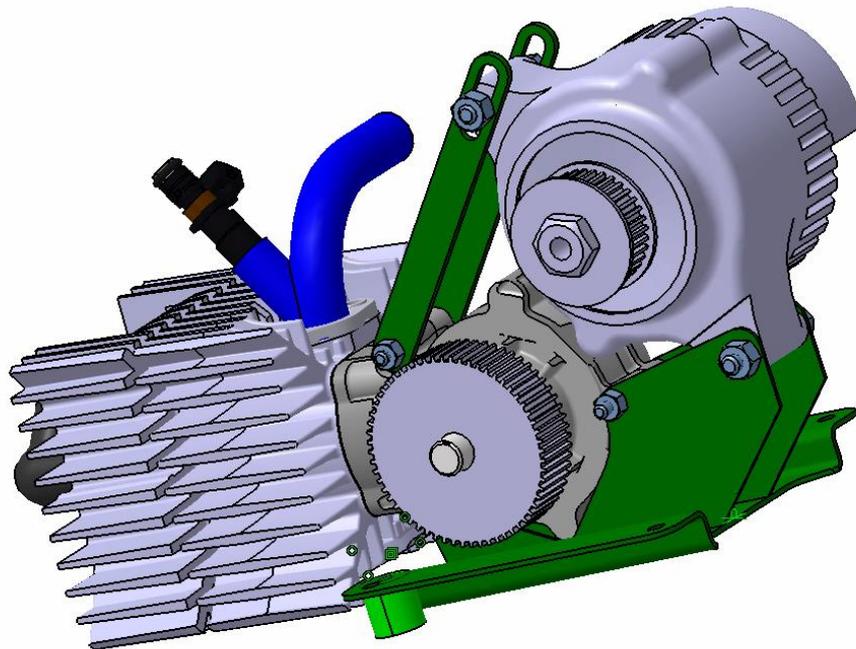


Abbildung 27: Zusammenstellung der Antriebseinheit

Die Antriebseinheit wird gekapselt verbaut, woraus sich Vorteile im Bereich der Akustik ergeben und auch eine Zwangskühlung kann somit realisiert werden. Der vom Gebläse erzeugte Luftstrom aus Umgebungsluft wird gezielt an jene Bauteile welche eine Kühlung benötigen geleitet und verlässt anschließend die Kapsel mit der aufgenommenen Wärme wieder. Vor allem der Zylinder samt Kopf der VKM muss gekühlt werden, aber auch der Generator produziert eine nicht vernachlässigbare Wärme, welche abgeführt werden muss.

Um eine gezielte Führung des Luftstromes um den Zylinder zu erreichen, wird auch ein Luftleitblech verbaut, welches gewährleistet, dass die Kühlluft entlang den Kühlrippen geführt wird und erst dann die gekapselte Box verlässt. Abbildung 28 zeigt diese Anordnung, wobei in Gelb der AGD und hinter dem Generator der elektrische Lüfter zu sehen sind.

Der Ansauggeräuschkämpfer, im Weiteren als AGD bezeichnet, wird ebenfalls im Inneren der Box vorgesehen, was jedoch sehr enge Platzverhältnisse schafft. Der AGD ist in Abbildung 28 in gelber Farbe zu sehen und ist über den Ansaugkrümmer mit dem Einlass verbunden.

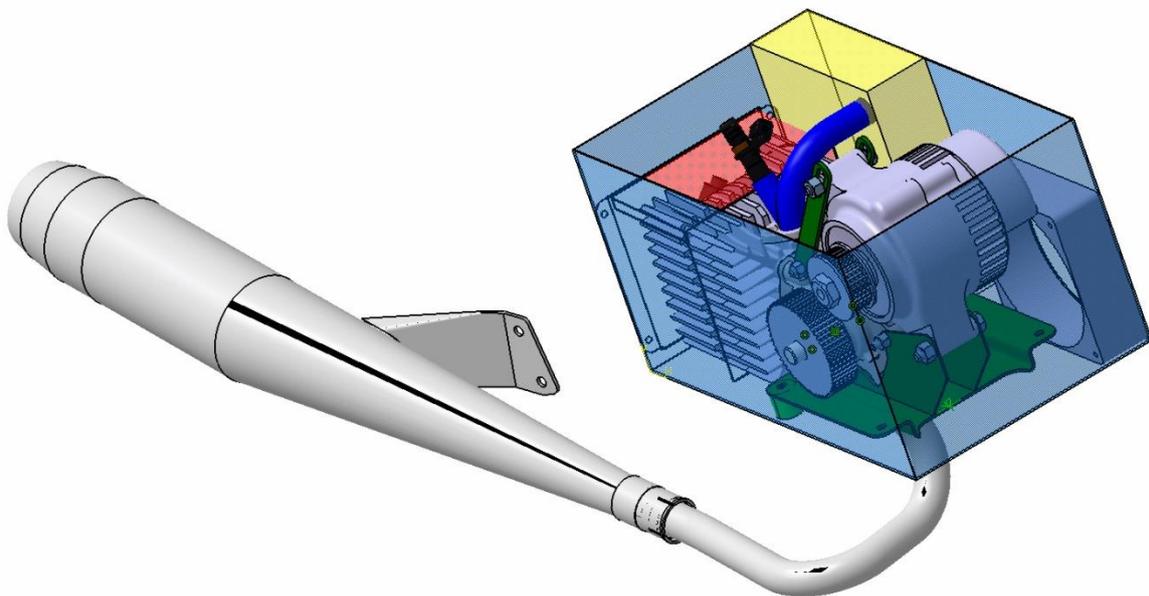


Abbildung 28: Antriebseinheit in der gekapselten Box ohne Deckel

Als weiterer Schritt ist das System in Abbildung 29 zu sehen, hier bereits in den bestehenden Fahrzeugrahmen integriert, welcher jedoch auf den hier interessanten Bereich reduziert dargestellt wird. In der vorderen Box befinden sich später vier Stück Akkus.

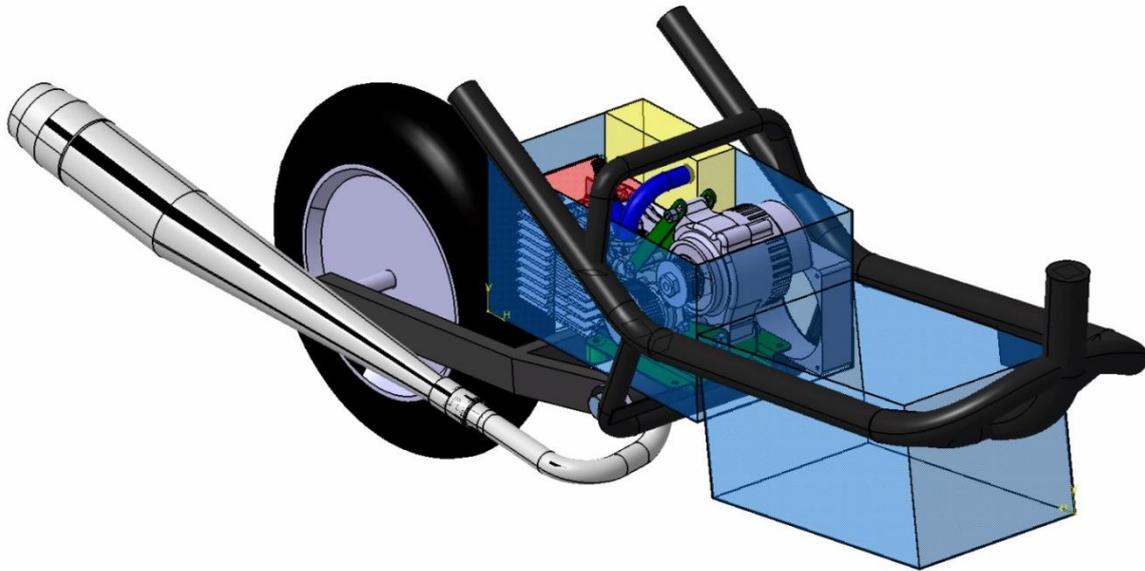


Abbildung 29: Komplettsystem im Fahrzeug eingebettet

4.1.3 Abgasanlage

Die aus selbigem Fahrzeug wie der Motor stammende und damit darauf abgestimmte Abgasanlage soll möglichst unverändert bleiben.

Es sind nur leichte Modifikationen am Auspuff notwendig, um dessen Führung am Fahrzeug zu ermöglichen. In Abbildung 30 ist die Führung der Abgasanlage zu sehen. Diese verlässt durch einen Ausschnitt die Box und führt anschließend durch die Schwinge nach hinten. Das rot markierte Stück Abgasrohr mit einer Länge von 30 mm wurde eingesetzt, um eine Kollision mit der Hinterradschwinge zu vermeiden. Da speziell beim 2-Takter die Geometrie der Abgasanlage die Motorcharakteristik stark beeinflussen kann, wurde das Rohr an anderer Stelle um diese 30 mm gekürzt. Dadurch kann eine Verstimmung des Abgassystems ausgeschlossen werden.

Der Endtopf der Abgasanlage wurde geöffnet und der Katalysator für die weiteren Versuche entfernt. Damit ist sichergestellt, dass nur die Rohabgase gemessen werden und die Messungen nicht durch eventuelle Schädigungen des Katalysators beeinflusst werden.

Der Krümmer wurde über einen schraubbaren Flansch mit dem weiteren Abgassystem verbunden, damit auch Anlagen mit Kat verwendet werden können.

Um störende Vibrationen der Abgasanlage nicht an den Rahmen und somit an den Fahrer weiterzugeben, wurde diese ebenfalls in Gummi gelagert. Dies führt zu einer enormen

Reduktion der Geräuschemissionen sowie auch zu einer Minimierung der an die Aufhängungspunkte übertragenen Schwingungen.

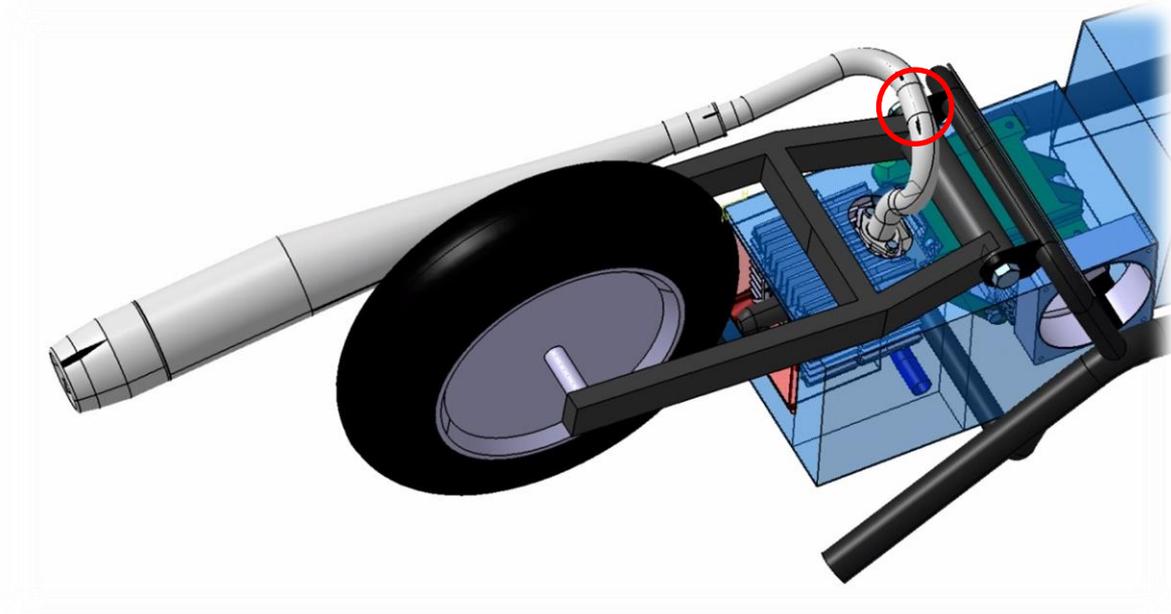


Abbildung 30: Führung der Abgasanlage

4.2 Riementrieb

Bereits in einer Bachelorarbeit [17] wurde die mechanische Einbindung des Starter-Generators behandelt. Daraus ging der Antrieb mittels Zahnriemen als bestes Konzept hervor und wurde daher in den ersten Prüfstandsversuchen verwendet.

4.2.1 Zahnriemen

Der Antrieb mittels Zahnriemen (Profil AT5, 16 mm Breite) funktionierte grundsätzlich, jedoch wurde dabei nur eine Lebensdauer von rund 2 Stunden erreicht, je nachdem wie viel dabei auf Teil- und Vollast entfiel. Es zeigten sich Verschleißerscheinungen in Form von Rissen im Zahnfuß und in weiterer Folge ein Lösen einzelner Zähne, zu sehen in Abbildung 31.



Abbildung 31: Verschlossener Zahnriemen

Grund für diesen erhöhten Verschleiß ist die Drehunförmigkeit des 1-Zylindermotors, wodurch erhöhte Lastspitzen auftreten.

Eine Erhöhung der Riemenbreite ist aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse nicht realisierbar. Daneben ist eine exakte Ausrichtung der Riemenräder zueinander bei steigender Riemenbreite von noch höherer Bedeutung. Daher erwies sich eine Verwendung des Profils AT5 für diese Anwendung als nicht sinnvoll.

Ebenfalls war die Laufruhe noch nicht als ideal anzusehen. Dies lag einerseits am Zahnriemen, der deutliche Laufgeräusche verursachte. Ein weiterer, entscheidender Grund lag in der Materialwahl der Riemenräder. Bei den Rädern wurde auf Standardteile gesetzt, welche aus Aluminium bestehen und dadurch eine recht geringe Masse aufweisen. Das größere Rad, welches auf der Kurbelwelle sitzt wiegt dabei 260 g. Dadurch ergibt sich ein Massenträgheitsmoment der Bauteile Kurbelwelle und Riemenscheibe von $533 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$. Der verwendete Motor wird jedoch in seiner Originalkonfiguration mit weit höheren rotierenden Massen betrieben. Hier sind vor Allem Kupplung und Polrad der Zündung die beiden größten Massen. Dadurch wird die Drehunförmigkeit des Einzylindermotors besser ausgeglichen.

In unseren Versuchen, mit der geringen Masse der Riemenräder, traten erhebliche Schwingungen in der Drehzahl des Motors auf, welche den Riemen noch höher belasteten und somit seine Lebensdauer reduzierten. Diesen unruhigen Lauf konnte man auch akustisch deutlich wahrnehmen, was große Komforteinbußen bedeuten würde.

4.2.2 Keilriemen

Der Keilriemenantrieb stellt einen weitverbreiteten, Kraftschlüssigen Riementrieb dar. Hier ist immer Schlupf vorhanden und auch notwendig, um Leistung übertragen zu können. Gerade diese Tatsache sollte Verbesserung bringen, da dieser Riementyp dadurch weniger empfindlich auf Stoßbelastungen reagiert. Als größte Einschränkung ergeben sich in unserem Anwendungsfall die Baugröße des gesamten Riementriebes und die verfügbaren Längen der erhältlichen Riemen.

Einzig Keilriemen, welche diese Anforderungen erfüllen sind jene nach Norm DIN 2215/ISO 4184, FO-Z Hochleistungskeilriemen. Diese sind ab Längen von 171 mm verfügbar und würden somit die Bedingung der benötigten Riemenlänge von rund 400 mm erfüllen.

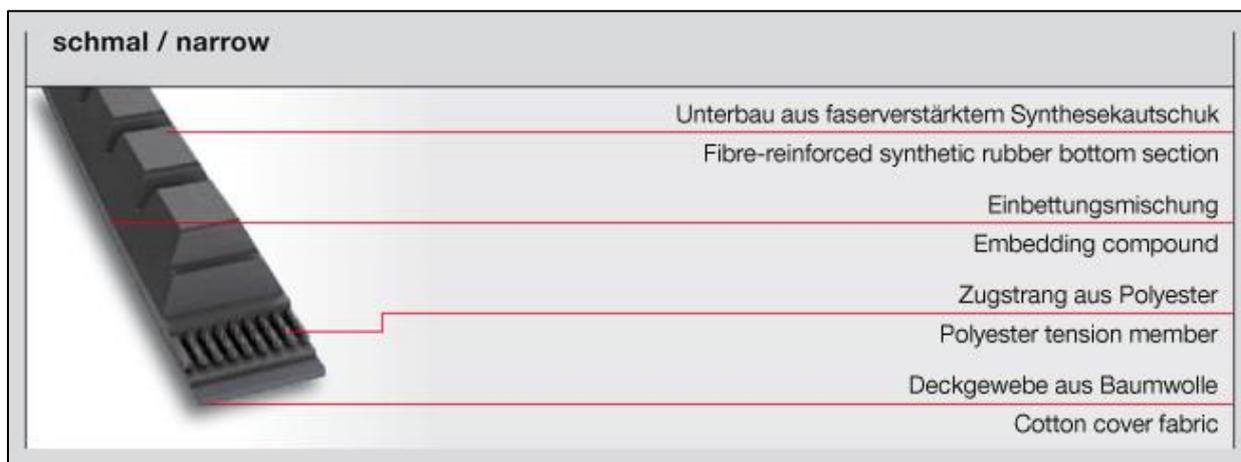


Abbildung 32: Aufbau FO-Z Hochleistungskeilriemen [21]

Die angestellten Berechnungen ergaben, dass zur Übertragung der vom Verbrennungsmotor abgegebenen Leistung 3 Riemen parallel notwendig sind. Aus dieser Tatsache resultiert wiederum ein erhöhter Platzbedarf des Riementriebes und stellt damit nicht die optimale Lösung für unser Problem dar.

4.2.3 Rippenriemen (Multirib)

Rippen- oder Poly-V Riementriebe (engl. Multirib), zählen ebenfalls zu den Riementrieben, welche die angelegte Leistung kraftschlüssig übertragen. Vergleichbar ist dieser Antrieb mit mehreren Keilriemen parallel, wobei der Rippenriemen dabei wesentlich kompakter baut und somit weniger Bauraum benötigt.

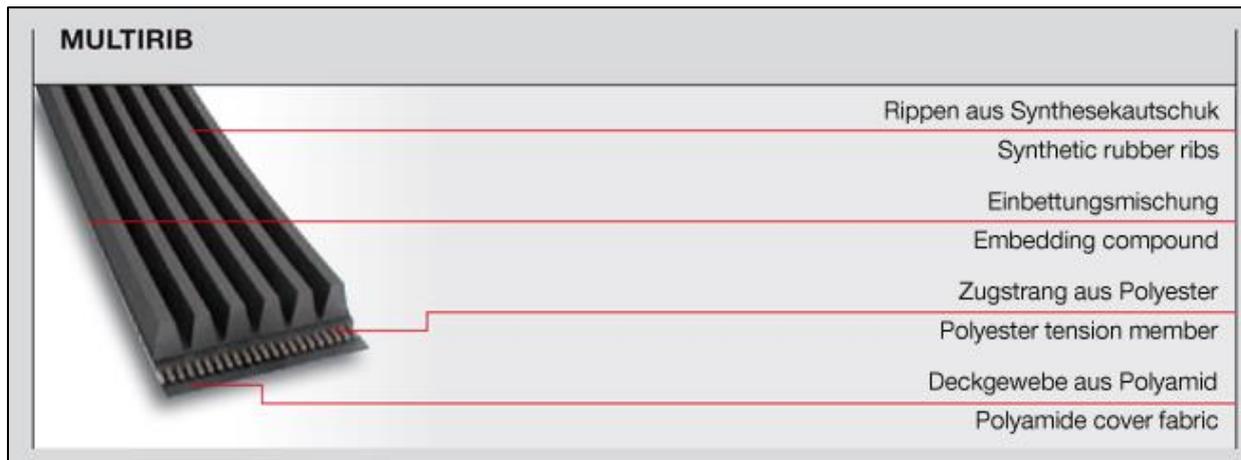


Abbildung 33: Aufbau eines Poly-V Riemen [21]

Aufgrund der benötigten Riemenlänge von knapp unter 400 mm kommt nur das Profil PJ in Frage, da dafür Riemen bereits ab einer Länge von 356 mm verfügbar sind. Die übertragbare Leistung wird dabei von der Anzahl der Rippen bestimmt.

4.2.3.1 Erforderliche Rippenanzahl

Die erforderliche Rippenzahl wird wie folgt berechnet:

$$z_{erf} = \frac{P * c_2}{P_R * c_1 * c_3} \quad (7)$$

- P - übertragene Leistung (1,9 kW)
- c_2 - Betriebsfaktor (1,8)
- c_1 - Winkelfaktor (1)
- c_3 - Längenfaktor (0,81)

Die durchgeführten Berechnungen ergaben dabei, dass die vom Verbrennungsmotor abgegebene Maximalleistung von 1,9 kW bei 4000 U/min über 8 Rippen übertragen werden kann. Dies ergibt eine Riemenbreite von rund 20 mm und baut somit sehr kompakt, ohne dass Probleme bei der Leistungsübertragung zu erwarten sind.

Da die Form von Kurbelwelle des Motors und Rotor des Generators bereits vorgegeben waren, mussten die Riemenräder an die Verhältnisse angepasst werden. Deshalb wurden diese passgenau in der hauseigenen Werkstatt nach Maß gefertigt.

Als Werkstoff wurde diesmal Stahl gewählt, vor allem um die rotierenden Massen zu erhöhen und somit einen ruhigeren Motorlauf zu erreichen. Die Masse der kurbelwellenseitigen Riemenscheibe stieg dabei von 260 g auf 620 g, wodurch auch das Massenträgheitsmoment

um über 30 % auf $773 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$ gesteigert wurde. Dies brachte die gewünschten Erfolge, vor Allem akustisch machte sich diese einfache Veränderung bemerkbar und der Verbrennungsmotor lief deutlich ruhiger.

4.2.4 Übersetzungsverhältnis

Auch die Übersetzung wurde angepasst. Betrug diese in den ersten Versuchen 1.6, wurde sie mit dem Umbau auf Poly-V Riemen auf 1.295 reduziert. Der Grund liegt im zu geringen Erregerstrom des Generators. Dieser sollte für einen möglichst hohen elektrischen Wirkungsgrad rund 3 A betragen, zu sehen in Abbildung 22. Da der Strom aber nur bei 2 Ampere bei voller Motorleistung lag, wurde die Übersetzung reduziert. Damit wurde das Moment am Generator erhöht, wodurch wiederum ein höherer Erregerstrom angelegt werden konnte. Dieser wurde bei Vollast der VKM bei 4000 U/min von 2,0 A auf 2,75 A gesteigert. Dadurch konnte eine Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades von rund 10 % erreicht werden.

5 Funktionsentwicklung am Motorprüfstand

Verbrennungsmotor und Generator wurden gemeinsam auf jener Konsole inklusive Lagerung auf Silentblöcken montiert, welche auch später im Fahrzeug zum Einsatz kommen wird. Es wurde ein Rahmen gefertigt, der diese Konsole aufnimmt und eine Führung der Abgasanlage erlaubt. Abbildung 34 zeigt den Aufbau am Prüfstand.

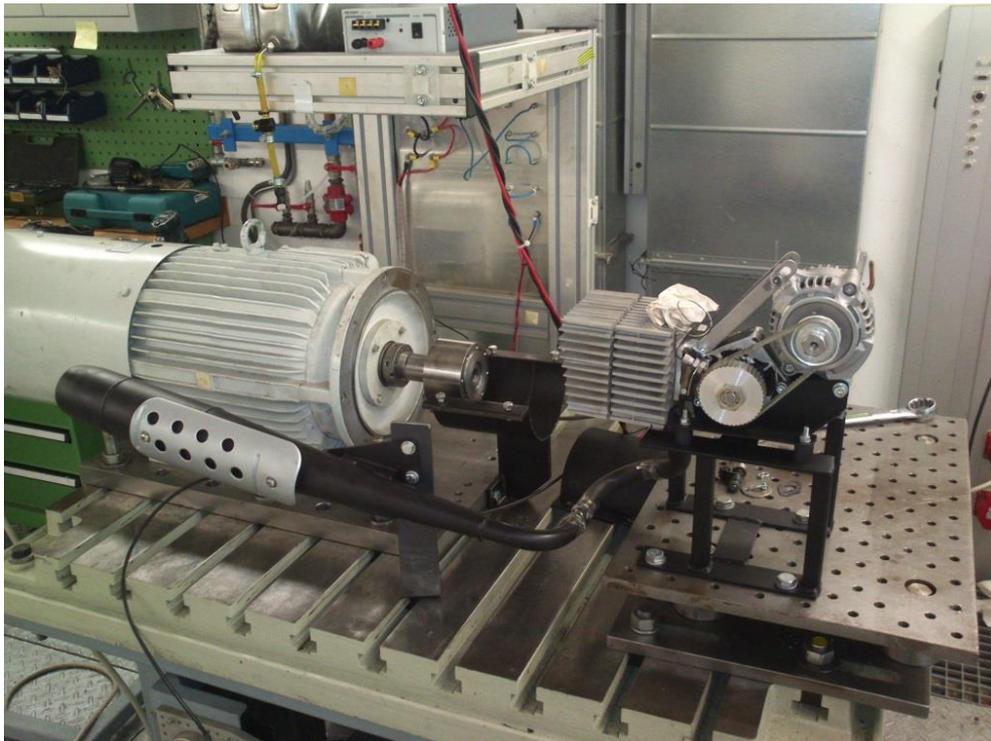


Abbildung 34: Mechanischer Prüfstands-aufbau, anfangs mit Zahnriemen

Der Range Extender stellt am Prüfstand eine mechanisch autarke Einheit dar. Der Generator wandelt die Wellenleistung des Verbrennungsmotors um in elektrische, auf eine weitere Bremsrichtung kann also verzichtet werden.

5.1 Motorsteuerung

In der ursprünglichen Anwendung als Antriebsmotor eines Mopeds wird der Motor mittels Vergaser mit Kraftstoff versorgt. Ein mechanisch über Seilzug gesteuerter Drosselschieber bestimmt dabei den Luftstrom durch den Vergaser und gibt so das gewünschte Drehmoment vor. Durch diese Regelung wird der Motor immer in der Nähe des stöchiometrischen Luft/Kraftstoffverhältnisses betrieben und es kann auch die gewünschte Leerlaufdrehzahl erreicht werden. Dieses System bringt aber auch einige Nachteile mit sich. Die Regelbarkeit

des Kraftstoff-Luft Gemisches ist mit einem herkömmlichen Vergaser nicht möglich. Es kann auch nicht auf Umwelteinflüsse wie Lufttemperatur und –druck reagieren. Weiters bringt die Drosselung des Gasstromes hohe Verluste im Teillastbereich. Auch benötigt der Vergaser einen gewissen Bauraum sowie auch eine bestimmte Einbaulage. Dies führt zu nicht unerheblichen Kosten und schränkt auch die Flexibilität des Systems ein. Ein weiterer Nachteil der Kraftstoffaufbereitung mittels Vergaser kann durch längere Standzeiten entstehen, da sich hier Bestandteile des Kraftstoffes ablagern und somit das Startverhalten beeinträchtigen können.

Resultierend aus all diesen Gründen sowie der Erreichung höchstmöglicher Flexibilität werden eine elektronische Motorsteuerung und eine Kraftstoffeinspritzung gewählt.

5.1.1 Steuergerät – Microsquirt

Kraftstoffeinspritzung sowie auch Zündung werden mittels „Microsquirt“ angesteuert. Dies ist eine freiprogrammierbares, elektronisches Motorsteuerung. Es handelt sich um ein quellenoffenes System und bietet eine hohe Flexibilität in der Anwendung.



Abbildung 35: Microsquirt V3.0

Die benötigte Software zum Microsquirt Motorsteuergerät nennt sich Tunerstudio und ist kostenlos verfügbar, also Freeware. In Abbildung 36 ist die Verkabelung der Microsquirt abgebildet. Der Funktionsumfang soll dabei auf ein Minimum reduziert werden. Die rot ausgekreuzten Komponenten sind für diese Anwendung nicht notwendig und werden daher auch nicht verwendet. Dies sind z.B. Lambdasonde und TPS¹.

¹ Throttle Position Sensor

MicroSquirt3 External Wiring Diagram

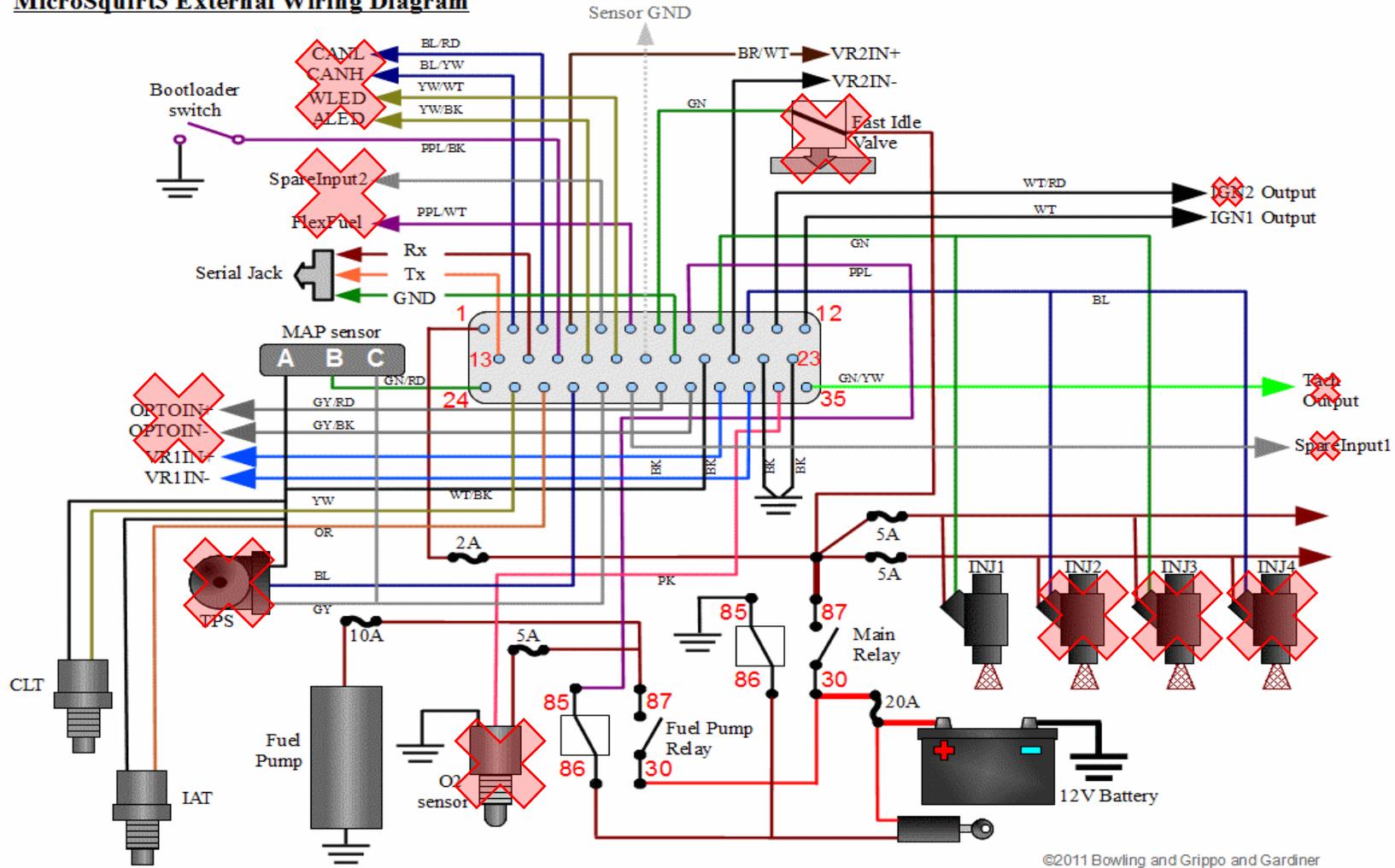


Abbildung 36: Verkabelung Microsquirt V3.0 [22]

5.1.2 Kraftstoffeinspritzung

Um die Nachteile des Vergasers zu umgehen und gleichzeitig die Freiheitsgrade in der Motorsteuerung zu erhöhen, wird der Verbrennungsmotor mit einer Kraftstoffeinspritzung versehen. Die benötigte Einspritzdüse bringt dabei den Treibstoff in das Saugrohr ein und ersetzt somit den Vergaser.

Auf eine Drosselklappe wird gänzlich verzichtet. Ein Leerlauf mit geringem Bedarf an Gemisch wie in einem Moped muss hier nicht erreicht werden. Die Drosselung der Motorleistung soll rein durch Abmagerung des eingebrachten Gemisches erzielt werden. Dadurch werden Drosselverluste sowie auch Investitionskosten für mechanische Bauteile vermieden.

Bei Vollast soll der Motor im Bereich des stöchiometrischen Verhältnisses und leicht darunter ($\lambda = 0,95$) betrieben werden. Dies soll zum einen eine hohe Motorleistung und zum anderen die korrekte Funktion des Katalysators zur Abgasnachbehandlung gewährleisten.

Im Teillastbereich wird das Gemisch durch Reduzierung der Einspritzdauer bis in die Nähe der Zündgrenze abgemagert ($\lambda = 1,4$).

5.1.2.1 VE-Table

Die Abkürzung „VE“ steht für „Volumetric Efficiency“, der Liefergrad des Motors. Der Liefergrad beschreibt bei einem Verbrennungsmotor mit innermotorischer Verbrennung das Verhältnis der nach Abschluss eines Ladungswechsels tatsächlich im Zylinder befindlichen Frischladung zur theoretisch maximal möglichen Füllung. Das Motorsteuergerät berechnet basierend auf diesem Kennfeld die nötige Kraftstoffmenge, welche eingespritzt werden soll, woraus sich die Öffnungszeit der Einspritzdüse nach folgender Formel ergibt:

$$PW = Req_fuel * VE * MAP \quad (8)$$

Die „nominal pulse width“ in Millisekunden, in Tunerstudio auch als „required Fuel“ bezeichnet, beschreibt den Wert der exakt benötigten Kraftstoffmenge bei stöchiometrischer Verbrennung, einer Lufttemperatur von 70° F (≈ 20 °C), Luftdruck von 1 bar und 100 % Liefergrad des Motors.

Dieser Wert kann mittels Tunerstudio ermittelt werden und bietet einen Anhalt zur weiteren Programmierung. Er basiert dabei lediglich auf den Daten über Hubraum des Motors und Durchflussrate des Injektors.

Die Luftdichte berechnet sich aus Luftdruck und –Temperatur.

„MAP“ bedeutet Manifold Air Pressure, also der Druck im Ansaugtrakt. Daraus kann über die Temperatur die exakte Dichte der Luft und damit die Luftmasse im Zylinder berechnet werden.

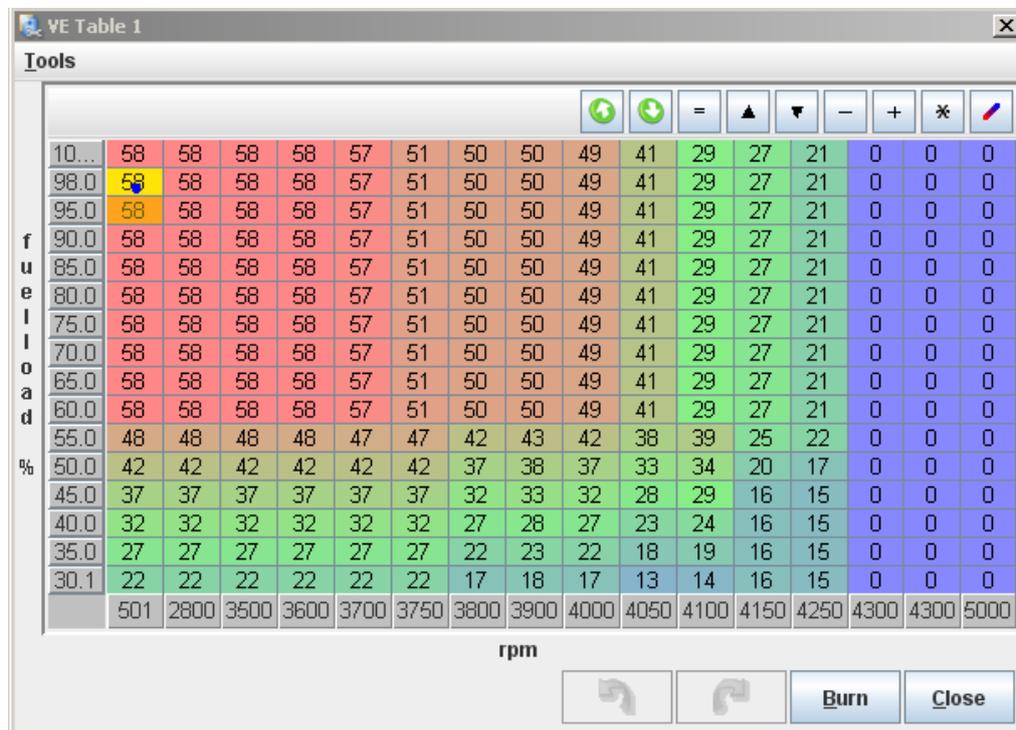


Abbildung 37: VE-Table

Der VE-Wert wird im Kennfeld in Abhängigkeit von Drehzahl und Saugrohrdruck in Prozent aufgetragen, wobei 100 % Umgebungsdruck entsprechen, also ungedrosseltem Betrieb.

Da der Verbrennungsmotor ohne Drosselklappe betrieben wird, sind in allen Kennfeldern nur die oberen Zeilen von Bedeutung, da nicht mit einem bedeutenden Sinken des Saugrohrdruckes zu rechnen ist.

Über der Nenndrehzahl von 4000 min^{-1} kann man eine starke Verringerung des VE-Wertes erkennen. Diese Abmagerung wird in Kapitel 5.4.2 näher begründet.

5.1.2.2 Warmup

Bei Verbrennungsmotoren, speziell bei Gemisch ansaugenden Motoren, kondensiert in kaltem Zustand ein Teil des Kraftstoffes im Ansaugtrakt oder im Zylinder und steht damit nicht der Verbrennung zur Verfügung. Aus diesem Grund muss eine erhöhte Menge an Kraftstoff zugeführt werden um hier einen möglichst ruhigen Motorlauf auch bei kaltem Motor sicherzustellen.

Dieser Wert, hier bezeichnet als „E“ für Enrichment¹, fließt ebenfalls in die benötigte Pulsweite des Injektors ein.

Auch der Verzug bei der Öffnung des Injektors (Injector_open_time) muss berücksichtigt werden, also jene Zeit die das tatsächliche Öffnen dem elektrischen Signal hinterher eilt.

$$PW = Req_fuel * VE * MAP * E + Injector_open_time \quad (9)$$

Über diesen einfachen Zusammenhang kann nun die ECU mithilfe der Daten aus dem VE Table die exakte Pulsweite zur Ansteuerung des Injektors berechnen.

5.1.2.3 Zündung

Die Zündung wird ebenfalls durch das Motorsteuergerät (Microsquirt) gesteuert. Aus vorangegangenen Untersuchungen sowie aus dem Datenblatt des Motors geht hervor, dass eine Vorzündung von 14° über das gesamte Kennfeld möglich ist. Es stellte sich im Laufe der Versuchsdurchführungen heraus, dass dieser Motor in einem breiten Bereich des Zündungskennfeldes betrieben werden kann, ohne die erreichbare Motorleistung oder die Abgaszusammensetzung bedeutend zu beeinflussen.



Abbildung 38: Kennfeld Zündung

Abbildung 38 zeigt das Zündungskennfeld, die Werte darin beschreiben die graduelle Vorzündung in Abhängigkeit von Drehzahl und Saugrohrdruck in Prozent.

¹ Anreicherung

Darin ist die tendenzielle Erhöhung der Vorzündung mit steigender Drehzahl und das Reduzieren selbiger oberhalb der angestrebten Solldrehzahl zu sehen, um hier absichtlich die Leistungsfähigkeit zu reduzieren. Dies soll als Sicherheit dienen, damit die VKM nicht in unerlaubt hohe Drehzahlen läuft. Zusätzlich wird die Zündung oberhalb von 5000 U/min komplett deaktiviert (Ignition Cut Off).

5.2 Batteriesimulation

Es gibt entscheidende Aspekte, die elektrisch erzeugte Energie im Prüfstandbetrieb nicht über reale Akkumulatoren, sondern vor allem im Anfangsstadium der Versuche über eine elektrische Last abzuführen. Damit kann die Gefahr des Überladens der Akkus vermieden werden, was zu einem erheblichen Sicherheitsrisiko durch Ausgasen bis hin zu möglichen Explosionen führen könnte. Weiters können nur so Versuche über längere Zeiträume bei konstanten Verhältnissen durchgeführt werden, da gleichbleibende Ladezustände simuliert werden können.

Zur Aufnahme der elektrischen Leistung diente dabei eine sogenannte „DC-Load“, das untere Gerät in Abbildung 39. Diese bietet verschiedene Möglichkeiten, die Leistung zu begrenzen. Für diese Anwendung bot sich die Begrenzung der vom Generator abgegebenen Spannung an, da dies dem realen Verhalten einer Batterie mit hoher Kapazität nahe kommt.



Abbildung 39: Oben Netzgerät zur Versorgung beim Starten, unten "DC-Load"

Aus der Multiplikation der gedeckelten Spannung und dem aufgenommenen Strom kann damit die elektrische Leistung des Generators berechnet werden.

5.3 Starter

Zum Starten des Verbrennungsmotors wird ebenfalls der Generator genutzt, jedoch wird er nun als Motor betrieben.

Die Energie zum Starten des Verbrennungsmotors durch den Generator wird am Motorprüfstand ebenfalls aus dem Netz geliefert und über ein variables Netzteil geregelt, ebenfalls zu sehen in Abbildung 39. Dabei wird die Spannung so gewählt, dass diese stets unter jener der DC-Load liegt. Andernfalls wird die gesamte elektrische Leistung von der DC-Load aufgenommen und erreicht damit nicht den Starter-Generator. Der Strom wird auf 8 A begrenzt, womit sich eine Leistung zum Starten des Motors von rund 400 W ergibt.

Die damit zur Verfügung gestellte Leistung in Form von Gleichstrom wird an einen Regler (Wechselrichter) weitergegeben, in 3-Phasen Wechselstrom geformt und anschließend im Starter/Generator in mechanische Energie umgewandelt. Der Generator musste hierfür mit drei Hallgebern versehen werden, um die exakte Position des Läufers zu ermitteln. Nur so ist es dem Regler möglich, das elektrische Drehfeld korrekt zu applizieren. Die Sensoren wurden verdrehbar am Umfang des Generatorgehäuses positioniert und nach erfolgter Einstellung fixiert.

Die so erreichte Drehzahl des Verbrennungsmotors von 800 U/min reichte stets zum Starten. Im Fahrzeug wird die elektrische Energie den Bordakku entzogen, am Aufbau des Starter-Systems ändert sich dadurch nichts.

5.4 Lastapplikation

Zuerst wurde der Range Extender bei Volllast untersucht, um die maximale Leistungsfähigkeit festzustellen. Anschließend wurde das System mit veränderbarer Last betrieben. Dies führte zu hohen Anforderungen an die Lastregelung des Range Extenders.

5.4.1 Volllast

Dieser Lastzustand nimmt eine wichtige Position im angestrebten Konzept ein. Dabei wird die Kraftstoffmenge so gewählt, damit sich ein unterstöchiometrisches Luftverhältnis ($\lambda = 0,85$ bis $\lambda = 0,90$) einstellt. In diesem Bereich sollte die maximale Leistung des Systems erreicht werden. Die höchste elektrische Leistung wurde kurz nach Start bei kalter VKM erzielt und betrug bis zu 1300 W. Mit steigender Motortemperatur fiel die Leistung minimal ab.

Dabei stellt sich die Messung des Lambda Wertes beim 2-Takt Motor als äußerst schwierig dar, da der Restsauerstoffgehalt im Abgas durch nicht an der Verbrennung teilgenommene Frischluft verfälscht werden kann. Daraus können keine vernünftigen Aussagen über die tatsächliche Verbrennung gemacht werden, hierzu wäre das Luftverhältnis des angesaugten Gemisches notwendig, welches jedoch nur schwer zu ermitteln ist. Daher wird hier auf Erfahrungswerte zurückgegriffen. Wie in Abbildung 40 zu sehen, gibt es einen Zusammenhang zwischen dem CO-Wert im Abgas und dem Luftverhältnis im Brennraum, welches für meine Untersuchungen als ausreichend genau betrachtet werden kann. Es ist zu erkennen, dass ein CO-Wert von 1 % Vol. ungefähr einem Wert von $\lambda = 1$ entspricht. Steigt der CO-Wert weiter an, spricht dies für ein unterstöchiometrisches Luftverhältnis.

Geringere CO-Werte unter 1 % Vol. weisen auf ein mageres Gemisch hin, wobei die exakte Bestimmung aufgrund der verschwindend geringen Konzentration in diesem Bereich nicht mehr möglich ist. Fallende NO_x Konzentrationen deuten aber ebenfalls auf ein weiteres Abmagern des Gemisches bis zum Erreichen der Zündgrenze hin.

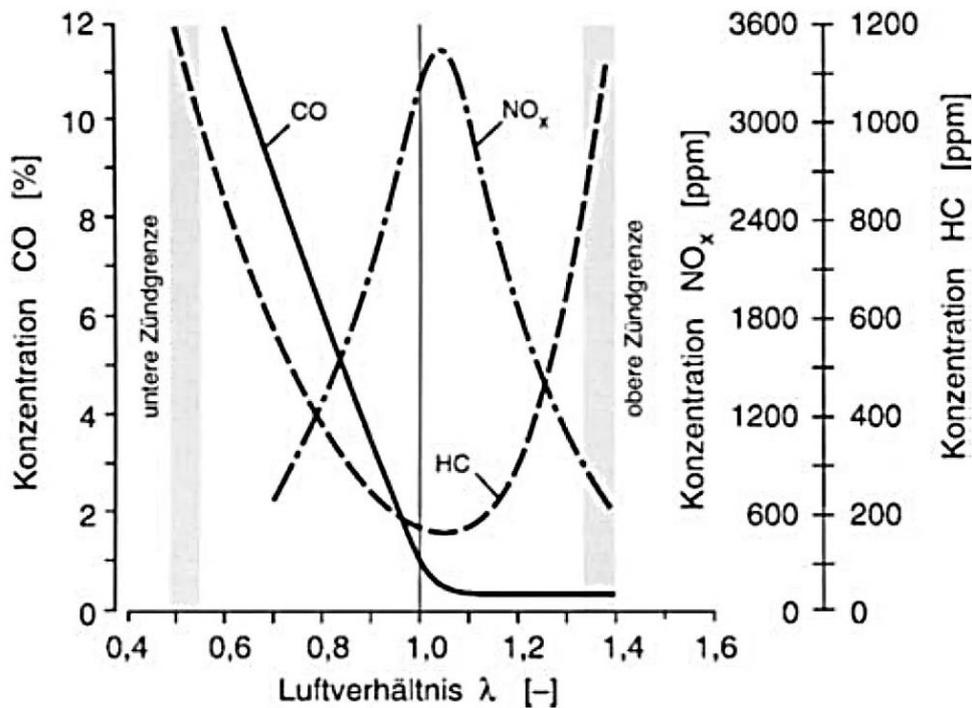
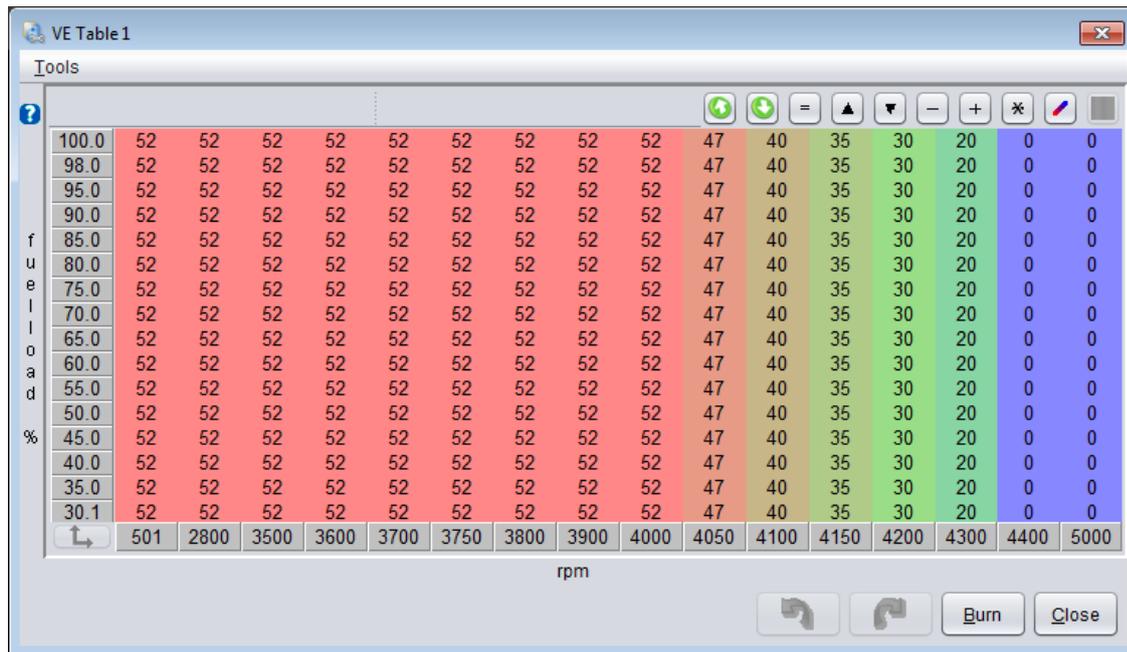


Abbildung 40: Schadstoffbildung im Ottomotor über Luftverhältnis [23]

5.4.2 Lastregelung

Zu Beginn der Prüfstandsuntersuchungen wurde versucht, den Verbrennungsmotor bei einer konstanten Drehzahl von 4000 U/min zu betreiben, auch in mageren Bereichen, unabhängig der vom Generator aufgenommenen Leistung. Die Überlegung war, das Kennfeld – siehe Abbildung 41 - so zu gestalten, dass knapp über der Soll-Drehzahl das Gemisch stark abgemagert wird. Laut dem Diagramm aus Abbildung 42, worin die Leistung über dem Luftverhältnis aufgetragen ist, ist die maximale Motorleistung bei einem Luftverhältnis von 12,6 abrufbar, dies entspricht $\lambda = 0,85$. Steigt ausgehend von diesem Wert das Luftverhältnis, sinkt die Leistung der VKM, womit einem weiteren Anstieg der Drehzahl entgegen gewirkt werden kann.

Nach diesem Prinzip soll also die Drehzahl niemals signifikant über 4000 U/min ansteigen. Die Werte des VE-Tables in vertikaler Achsrichtung variieren nicht, da aufgrund fehlender Drosselklappe kein signifikant veränderlicher Saugrohrunterdruck zu erwarten ist und konstant Volllast gefahren wird. Daher wäre auch eine einzige Zeile des Kennfeldes ausreichend.



fuel load %	501	2800	3500	3600	3700	3750	3800	3900	4000	4050	4100	4150	4200	4300	4400	5000
100.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
98.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
95.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
90.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
85.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
80.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
75.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
70.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
65.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
60.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
55.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
50.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
45.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
40.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
35.0	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0
30.1	52	52	52	52	52	52	52	52	52	47	40	35	30	20	0	0

Abbildung 41: VE – Table mit Abmagerung oberhalb von 4000 U/min

Die Werte des VE-Table werden in weiterer Folge nicht verändert.

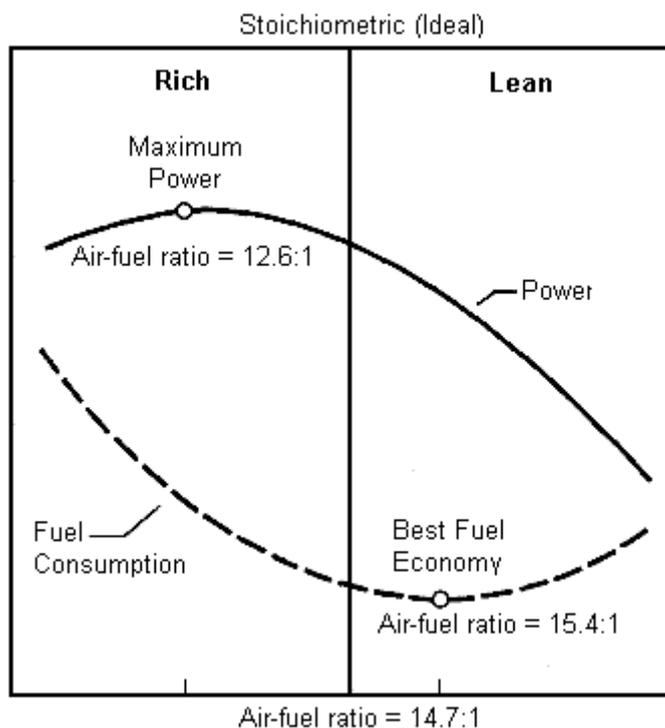


Abbildung 42: Leistung und Kraftstoffverbrauch über den Luftverhältnis [24]

Als weiterer Vorteil ist der reduzierte spezifische Kraftstoffverbrauch im leicht mageren Bereich zu erkennen, welcher bei $\lambda = 1,05$ erreicht wird. Im fetteren, aber auch im magereren Betrieb steigt der Kraftstoffbedarf.

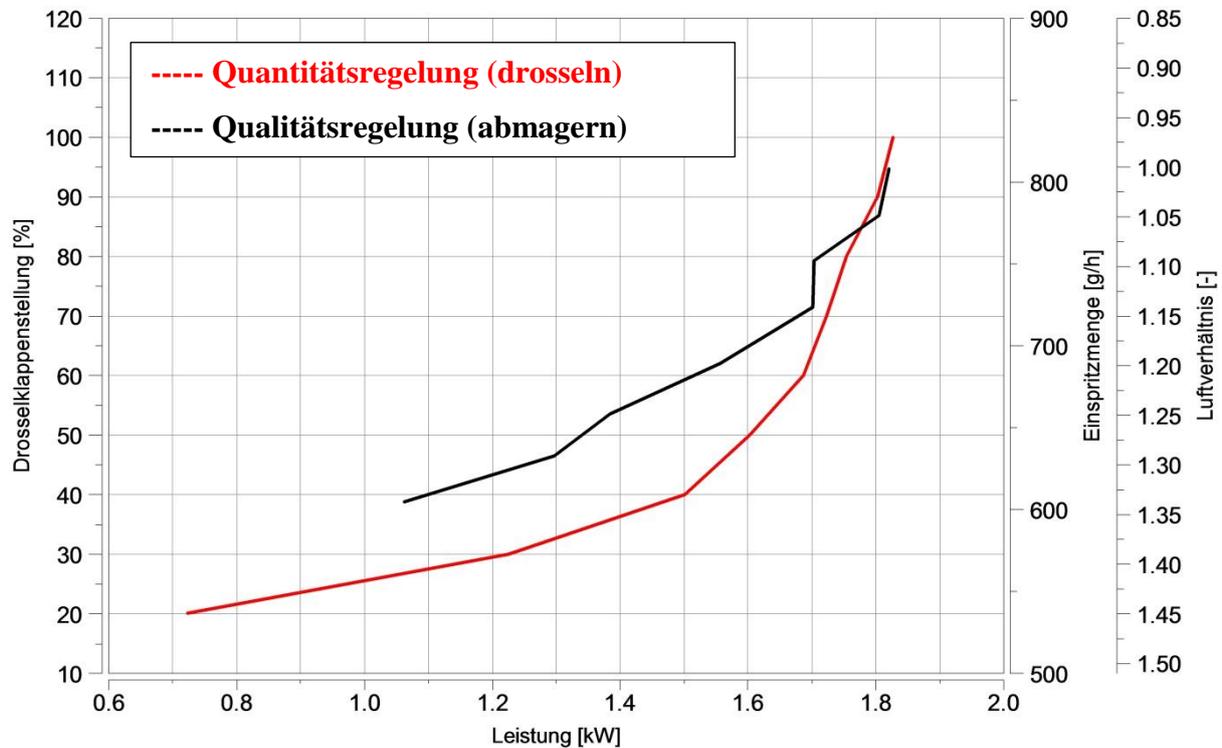


Abbildung 43: Vergleich Qualitäts- und Quantitätsregelung

Jedoch führte diese Regelung anfangs nicht zum gewünschten Erfolg. Sobald die Schwelle von 4000U/min überschritten wurde, wurde die Einspritzmenge sehr stark zurückgenommen. Durch die plötzliche Reduktion des Luftverhältnisses und somit des Gemischheizwertes sank auch die Leistung stark ab. Der Generator forderte jedoch weiterhin ein gewisses Drehmoment, wodurch die Drehzahl schlagartig abfiel. Erst als diese wieder einen Wert von 4000 U/min erreichte, wurde wieder mehr Kraftstoff eingespritzt und die Drehzahl stieg wieder an.

Verstärkt wurde dieses Verhalten durch zwei wesentliche Faktoren:

- Geringe rotierende Massen der VKM
- Verzögertes Ansprechen auf veränderte Einspritzdauer durch das 2-Takt Prinzip

Das Problem der geringen Massen beruht wie bereits erwähnt auf der Tatsache, dass dem Motor in unserer Applikation erhebliche Schwungmasse in Form von Polrad, Kupplung und Getriebe genommen wurden.

Das verzögerte Ansprechverhalten ist dem 2-Takt Verfahren zuzuschreiben. Da der Kraftstoff in das Saugrohr eingespritzt wird und erst über das Kurbelgehäuse und die Überströmkanäle den Brennraum erreicht, vergehen erfahrungsgemäß drei bis fünf Umdrehungen, bis der Motor auf eine geänderte Kraftstoffmenge vollständig reagiert.

Gemeinsam führten diese beiden Tatsachen zu erheblichen Drehzahlschwankungen, ein starkes „Sägen“ war mess- als auch akustisch wahrnehmbar.

Abhilfe schafft hier eine etwas „sanftere“ Abmagerung oberhalb der Auslegedrehzahl. Die Kraftstoffzufuhr wird nicht schlagartig unterbrochen, sondern über einen Drehzahlbereich von 4000 bis etwa 4150 U/min stetig reduziert. Dadurch kann der stark fluktuierenden Drehzahl entgegengewirkt werden, der Motorlauf wird dadurch deutlich verbessert. Jedoch werden durch diese Steuerung auch Bereiche oberhalb der Auslegedrehzahl durchfahren.

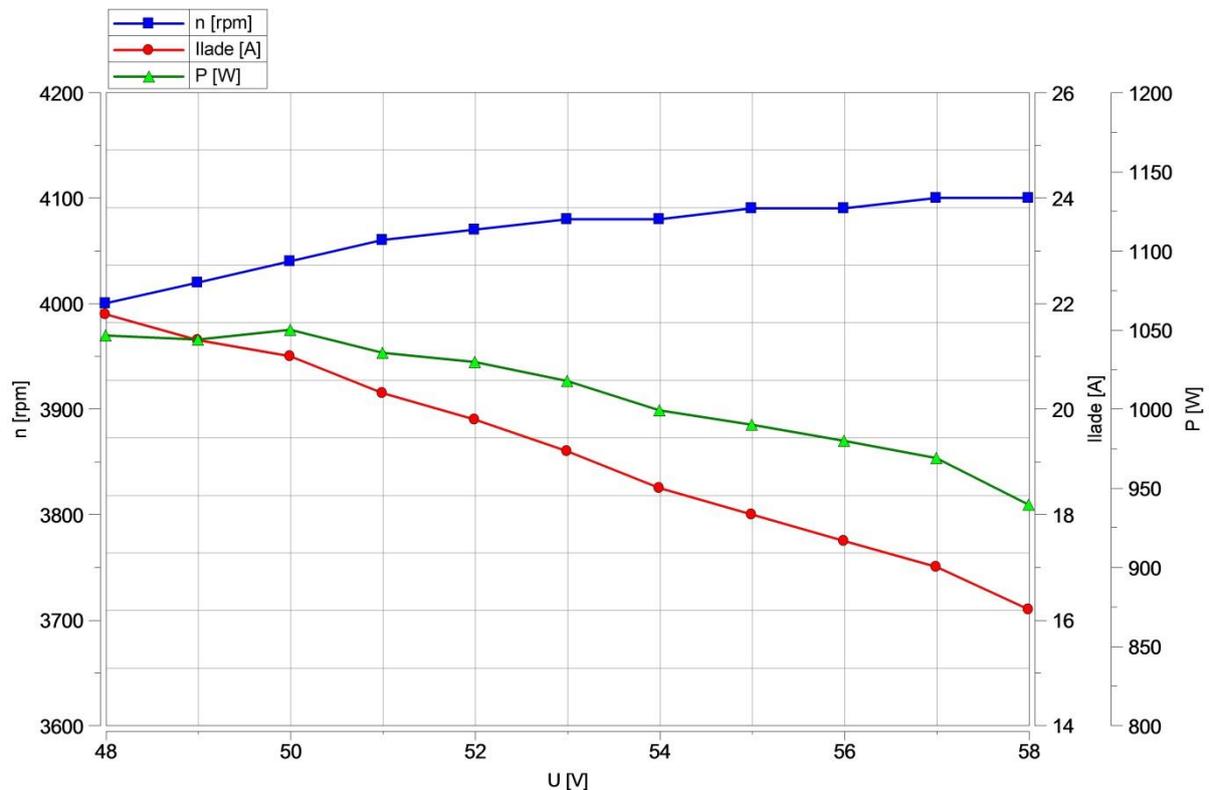
5.5 Auswirkungen infolge Last- und Spannungsänderung

Grundsätzlich handelt es sich wie bereits erwähnt um ein 48 V System. Dies bedeutet jedoch nicht eine konstante Spannung, denn diese kann stark variieren, abhängig von Belastung und Ladezustand der Akkus, grafisch in Abbildung 14 dargestellt. Es können Spannungen von nur knapp über 40 V bei stark entladenen Akkus und hoher Last bis hin zu 56 V ohne Last und bei Ladung durch den REX auftreten. Dieses Verhalten beeinflusst auch die Steuerung des Generators stark.

Im Folgenden wurde das System mit verschiedenen Spannungen von 48 V bis hin zu 60 V betrieben, um die Auswirkungen dieser Änderung zu verifizieren.

5.5.1.1 Konstanter Erregerstrom

Zuerst wurde versucht, den Generator mit konstanter Erregung bei veränderter Spannung zu betreiben. Der Erregerstrom wird dabei von einem externen Netzteil zur Verfügung gestellt und ist somit unabhängig von der Bordspannung. Zuerst wurde der Strom auf 2,4 A gesetzt, die Ergebnisse dazu werden in Abbildung 44 dargestellt.


 Abbildung 44: Spannungsänderung mit Erregerstrom $I = 2,4 \text{ A}$

Es ist zu erkennen, dass die Motordrehzahl mit steigender Spannung ansteigt und die VKM über den gewünschten 4000 U/min betrieben wird. Bei 48 V ergibt sich so eine Drehzahl von 100 U/min über Nenndrehzahl und läuft damit schon im Magerbetrieb, da nach Kennfeld in diesem Bereich bereits die eingespritzte Kraftstoffmenge reduziert wird.

Dies schlägt sich auch in der abgegebenen elektrischen Leistung nieder, da diese mit erhöhter Spannung bzw. Motordrehzahl sinkt.

Mit einem konstanten Erregerstrom von 2,6 A ergibt sich ein tendenziell ähnliches Verhalten, zu sehen in Abbildung 45. Die Kurven sind jedoch im Vergleich zu einer Erregung von 2,4 A verschoben, das Drehzahlniveau befindet sich unter dem Sollwert, wodurch auch die gewonnene Leistung bei geringen Spannungen etwas geringer ausfällt.

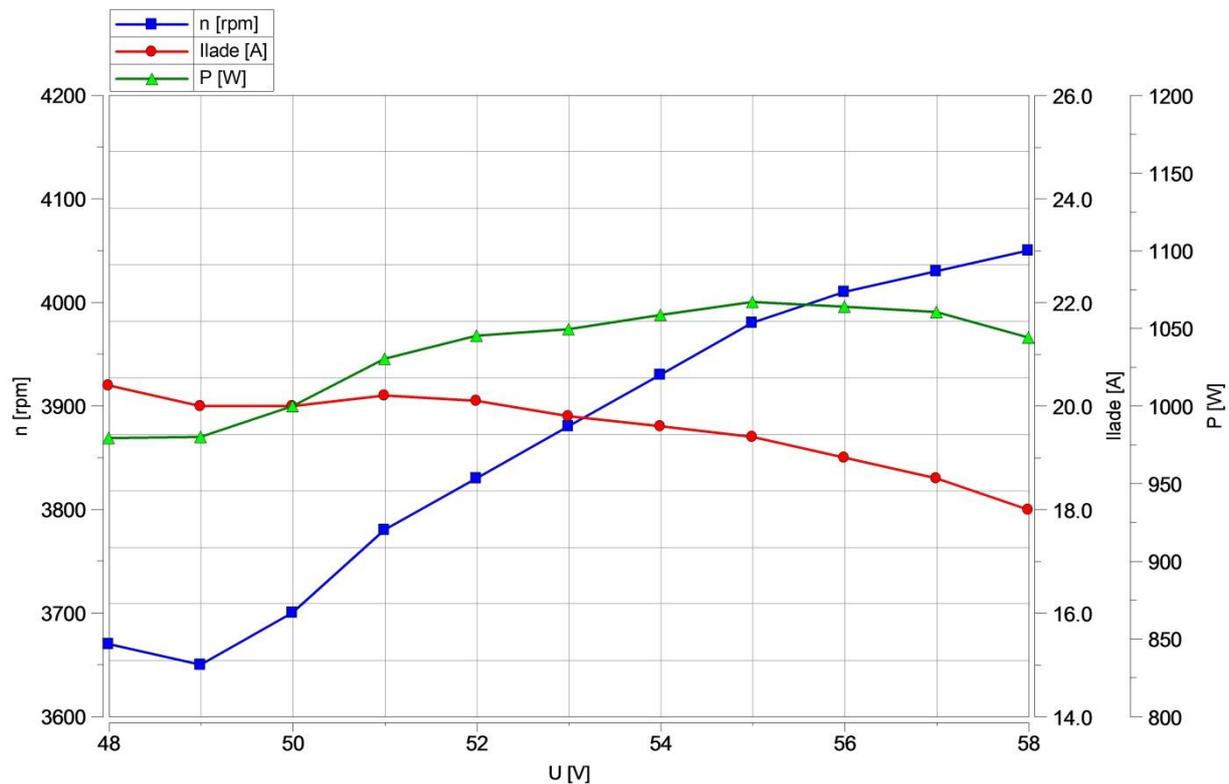


Abbildung 45: Spannungsänderung mit Erregerstrom $I = 2,6 \text{ A}$

Beide Untersuchungen zeigen bereits, dass eine Erregung der Rotorwicklung mit konstantem Strom nicht zu optimalen Ergebnissen führen wird, da die Drehzahl so nicht gehalten werden kann und damit auch die Leistungsfähigkeit beeinflusst wird.

5.5.1.2 Konstante Motordrehzahl

Anschließend wurde versucht, die Motordrehzahl konstant auf exakt 4000 U/min zu halten, unabhängig der Bordspannung. Dies bedeutet auch eine konstante, maximale Motorleistung. Um dies zu realisieren ist es allerdings notwendig, den Generator entsprechend zu regeln, was über den Erregerstrom möglich ist. Abbildung 46 zeigt den Zusammenhang von Erregerstrom, Ladestrom und elektrischer Leistung bei konstanter Drehzahl. Dabei ist zu erkennen, dass höhere Spannungen ebenfalls einer Erhöhung des Erregerstromes bedürfen, um einem Ansteigen der Drehzahl entgegen zu wirken.

Die elektrische Leistung bleibt dabei nahezu konstant und schwankt um weniger als 30 W, wodurch auch der Wirkungsgrad kaum beeinflusst wird.

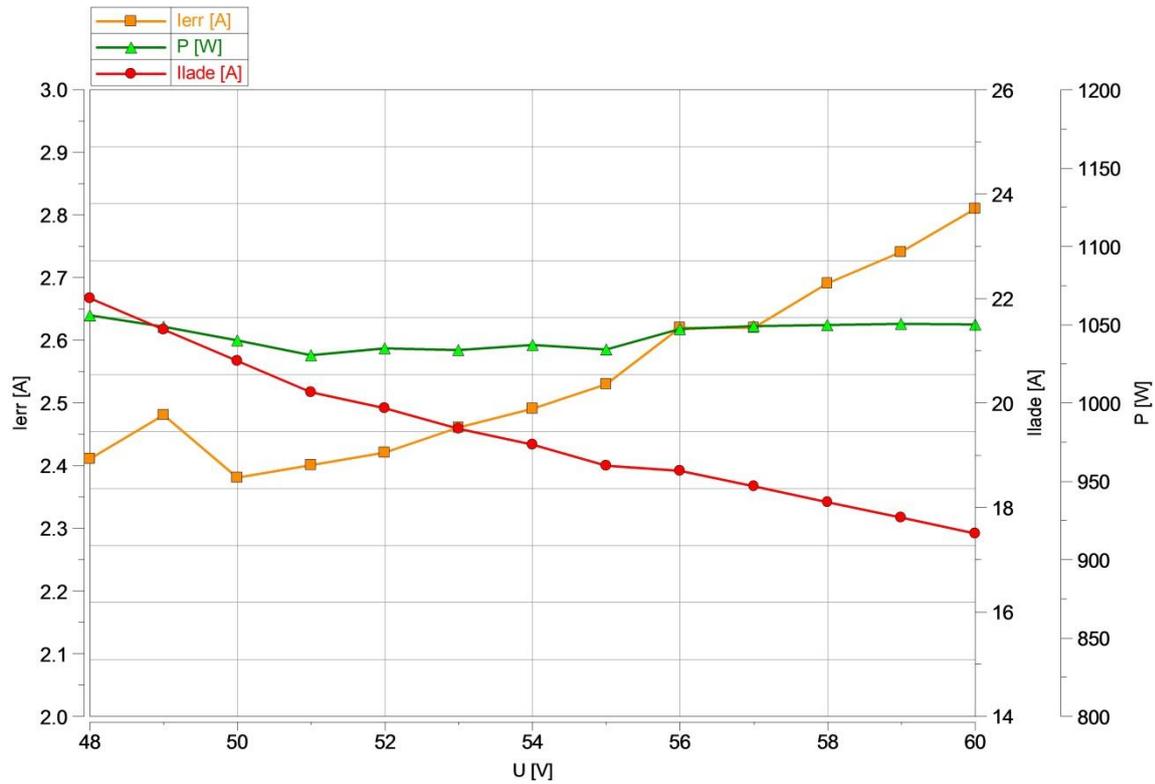


Abbildung 46: Spannungsänderung bei konstanter Drehzahl $n = 4000 \text{ U/min}$

Diese Auslegung ist erstrebenswert, da die Drehzahl absolut konstant gehalten wird und auch die Leistung keine große Veränderung über den gesamten Spannungsbereich aufweist. Jedoch kann dazu der Erregerstrom nicht konstant bleiben, sondern muss entsprechend verändert werden. Dies bedarf einer Steuerung, wie sie später in Kapitel 6.3.3 behandelt wird.

6 Applikation ins Fahrzeug

Die Einpassung des Systems ins Fahrzeug stellt einen wichtigen Punkt in der Entwicklung dar. Abbildung 47 zeigt den Scooter von hinten mit Blick auf Zylinderkopf und Abgasanlage. Am Auspuff ist auch eine Flanschverbindung zu sehen, welche den Betrieb mit unterschiedlichen Endschalldämpfern ermöglicht.



Abbildung 47: Heckansicht des Scooters mit Blick auf Zylinderkopf und Abgasanlage

Auch die korrekte Verlegung und Unterbringung der vielen elektrischen Leitungen und Bauteile erweist sich aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse als Herausforderung. Die elektrischen Leitungen werden weitgehend steckbar ausgeführt, um den problemlosen Ein- und Ausbau der Technik zu ermöglichen. Die Gleichrichterdiode wird direkt auf der Konsole des Motors befestigt. Durch die unmittelbare Nähe zum elektrischen Lüfter erfahren diese hoch belasteten Bauteile auch eine gewisse Kühlung.

In Abbildung 48 ist der REX im Fahrzeug zu sehen. Von links kommend wird der Treibstoff von der Kraftstoffpumpe direkt zur Einspritzdüse geführt, dahinter kann man den AGD mit integriertem Luftfiltereinsatz erkennen.

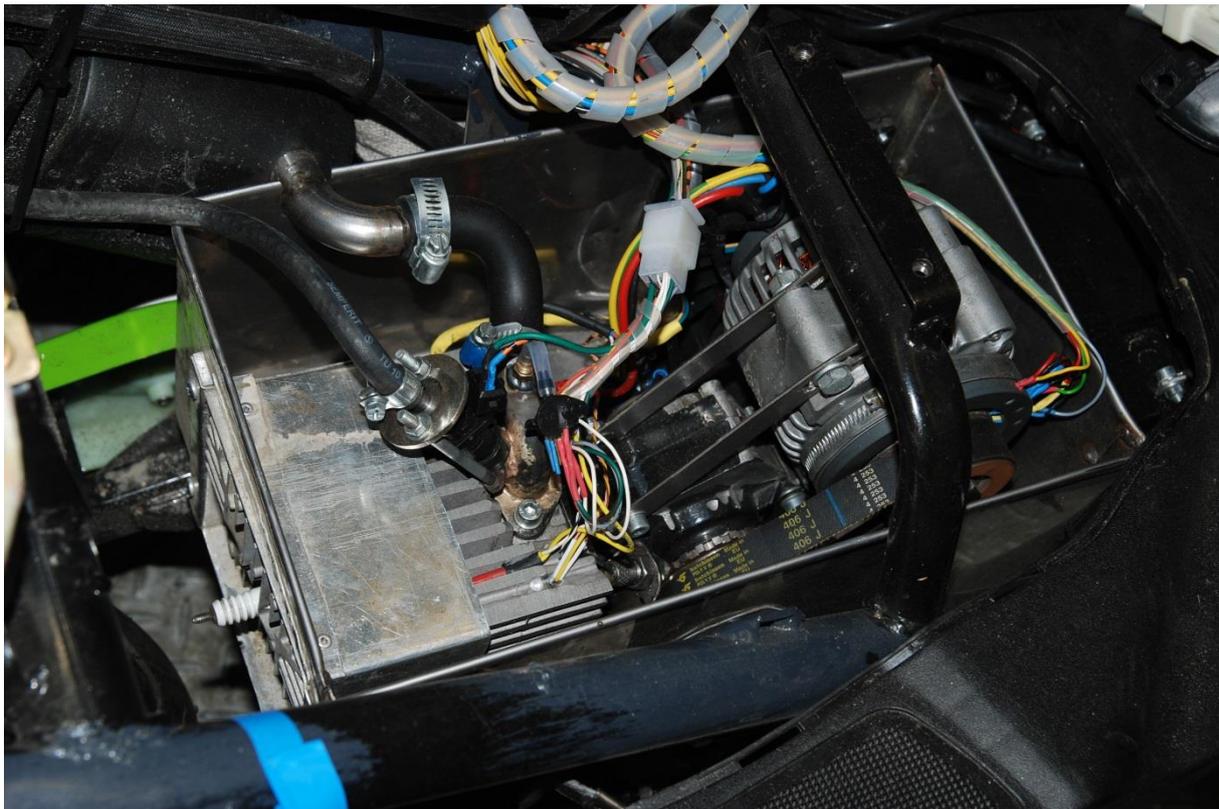


Abbildung 48: Range Extender in das Fahrzeug integriert

Alle weiteren Bauteile die nicht in unmittelbarer Nähe zu VKM oder Generator montiert werden müssen finden ihren Platz im Helmfach. Den größten Platzbedarf benötigt dabei der Regler für den Starter/Generator zum Starten der VKM. Dieser wird liegend im Helmfach platziert. Weiter werden hier auch Motorsteuergerät, Zündspule sowie auch der Stromverteiler untergebracht. Die Kraftstoffpumpe wird außerhalb des Faches in Nähe des Kraftstofftanks montiert.

6.1 Kraftstoffsystem

Aufgrund der beengten Platzverhältnisse im Fahrzeug soll das Tankvolumen auf das Nötigste begrenzt werden. Dieses wird auf eine Größe von rund 0,5 Liter festgelegt.

Dazu wird der Kunststofftank eines Freischneiders herangezogen und geringfügig modifiziert. Die Vorteile dieses Tanks sind die hohe Robustheit und das Vorhandensein von Einfüllöffnung und Entlüftung. Weiter befindet sich der Kraftstofffilter im Tank, was ebenfalls zur Platzeinsparung beiträgt. Der Behälter wird außerhalb des Helmfaehes angebracht, der Inhalt beträgt 0,45 Liter. Abbildung 49 zeigt den Kraftstoffbehälter am Heck des Fahrzeuges mit den Anschlüssen für Entnahme, Belüftung und Rücklauf.

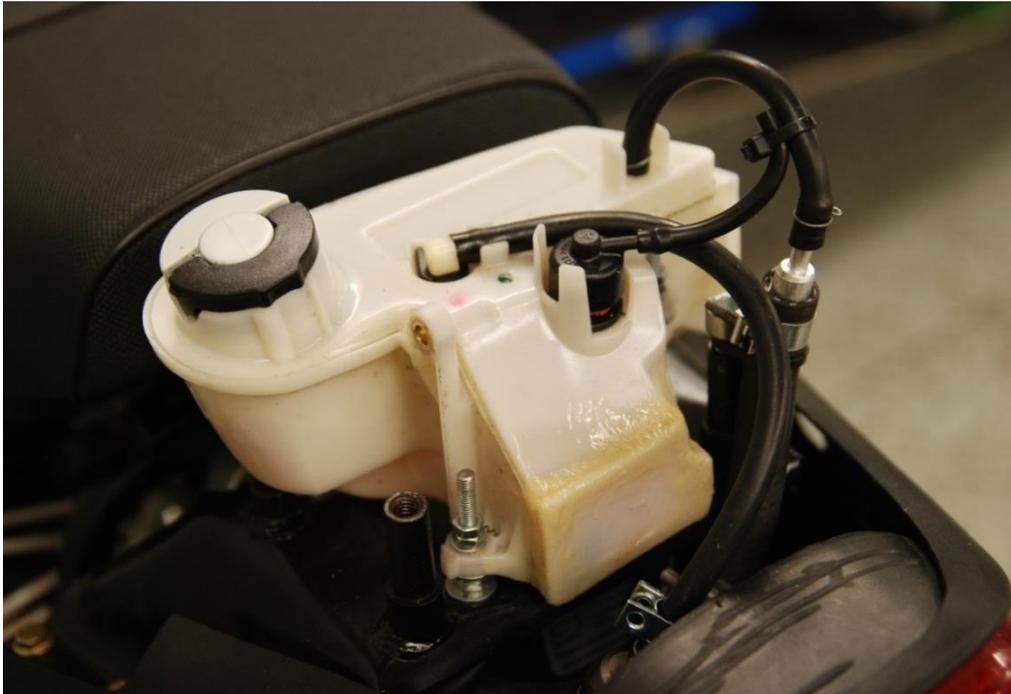


Abbildung 49: Kraftstofftank am Fahrzeug

Der Kraftstoff wird aus dem Tank über eine elektrisch betriebene Kraftstoffpumpe mit einem Druck von 3 bar in Richtung Einspritzdüse befördert.

6.2 Ansaugeräuschkämpfer (AGD)

Wie bereits im Kapitel Packaging erwähnt, wurde ein speziell gefertigter AGD vorgesehen und im Inneren der Box verbaut. Da jedoch im Laufe des Motoreinbaus ins Fahrzeug einige zusätzliche Bauteile wie Gleichrichterioden und auch viele Kabelverbindungen in der Box Platz finden mussten, entfiel ein Teil des für den AGD vorgesehenen Bauraums.

Es wurde versucht, den AGD wegzulassen und stattdessen nur einen Papier – Luftfilter zu verwenden. Dies führte jedoch zu starker Geräusentwicklung im Bereich der Ansaugung. Diese Lösung wurde nicht weiter auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht.

Daraufhin wurde der AGD aus der Box entfernt und außerhalb angebracht. Aufgrund der neuen Platzverhältnisse konnte der originale AGD aus Kunststoff verwendet werden, welcher bereits einen Luftfilter enthält. Als ebenfalls ein positiver Effekt dieser Variante sei zu nennen, dass der Motor durch kühle Außenluft anstatt der in der Box erwärmten Luft beatmet wird und damit eine geringfügig höhere Leistungsfähigkeit erzielt wird.

6.3 Prüfzyklen

Zu Beginn der folgenden Untersuchungen wird das Prüfverfahren festgelegt, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Es wird immer der Zyklus „ECE-R47“ durchfahren, welcher auch bei der Abgasprüfung anzuwenden und in Kapitel 1.2.4, Abbildung 8 zu sehen ist.

Bei Start der Prüfungen sollen sich die Batterien in leerem Zustand - wie bereits in Kapitel 2.2.5 beschrieben - befinden und der REX noch vor der ersten Beschleunigungsphase gestartet werden.

Es werden drei verschiedene Arten der Erregung der Ankerwicklung erprobt:

- Konstante Erregung - V1
- Spannungsabhängige Erregung - V2
- Spannungsabhängige Erregung - V3

In den Untersuchungen sollen die Leistungsfähigkeit und besonders die Drehzahlstabilität des Systems bewertet und verglichen werden. Zusätzlich zu den bisherigen Untersuchungen werden nun auch die auf 4000 l/min verdünnten Rohabgaswerte betrachtet, wobei die Abgasanlage weiterhin ohne Katalysator ausgeführt ist.

6.3.1 Konstante Erregung (V1)

Als einfach realisierbare Referenz zu weiteren Versuchen mit spannungsabhängiger Steuerung des Erregerstromes wurde er hier als konstant festgelegt. Der Strom mit einer Stärke von 2,5 A wurde durch ein externes Netzteil zur Verfügung gestellt und war damit völlig unabhängig von etwaigen Fahreinflüssen. Abbildung 51 zeigt das Verhalten der verschiedenen Messwerte. Die Drehzahl schwankt bei dieser Variante unabhängig von der Bordspannung in einem Bereich von rund 100 U/min, was akustisch kaum wahrnehmbar ist.

Dagegen verläuft die Leistung des REX nahezu konstant bei 1100 W. Das entspricht dabei nicht der maximal erreichbaren elektrischen Leistung des Systems von bis zu 1400 W, was sich durch das magere Gemisch erklären lässt. Als Nachteil dieser konstanten Leistung gilt der hohe Ladestrom für die Akkus in Fahrzuständen ohne Leistungsaufnahme (Ausrollen, Stillstand). Zum anderen fehlt damit Leistung in Beschleunigungsphasen, wo der Radnabenmotor bis zu 3000 W aufnimmt.

6.3.1.1 Emissionen

Der HC Wert bleibt auf einem konstanten Niveau von 2000 ppm, ein sehr hoher Wert, welcher auf eine nicht optimale Auslegung des 2-Takt Motors für genau diese Drehzahl zurückzuführen ist. Durch optimierte Steuerzeiten und reduzierte Spülverluste würden sich die Kohlen-Wasserstoff Emissionen stark reduzieren lassen. Der HC - Wert lässt sich kaum durch eine geänderte Steuerstrategie des Generators beeinflussen.

Ebenfalls annähernd konstant bleiben die CO – Emissionen. Diese steigen nur geringfügig in den Beschleunigungsphasen an. Dies deutet auf ein leicht fetteres Gemisch und damit unmerklich geringerer Drehzahl in diesen Bereichen hin.

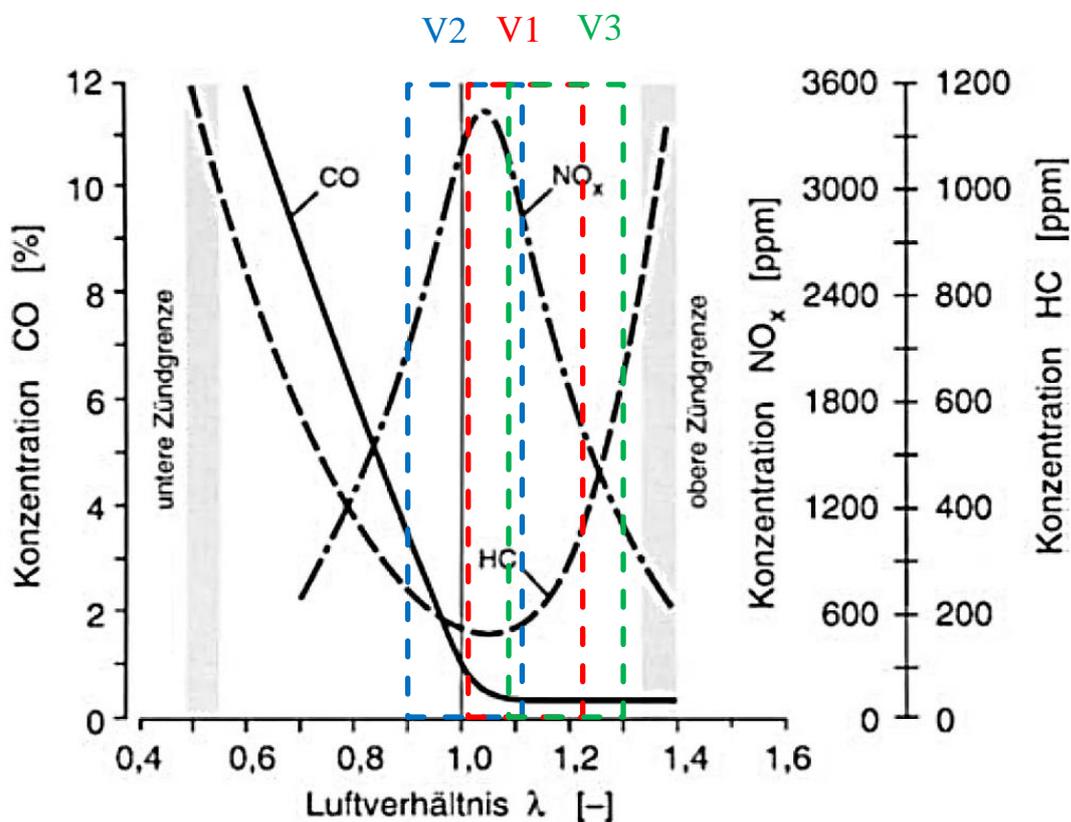


Abbildung 50: Konzentrationen über Luftverhältnis der diversen Versionen

Kontinuierlich leicht steigend über den Prüfungsablauf stellen sich die NO_x – Emissionen dar. Dieses Verhalten lässt sich auf die Erwärmung des Motors und damit steigender Verbrennungstemperatur im Betrieb und damit der geförderten Entstehung von Stickoxiden zurückführen. Als Besonderheit sei zu nennen, dass CO und NO_x Wert gleichzeitig steigen und sinken. In Abbildung 50 ist zu sehen, dass dieses Verhalten nur bei Werten rechts des NO_x Maximums auftritt. Daraus kann man schließen, dass die VKM in diesem Fall mit einem Luftverhältnis zwischen 1,05 und 1,2 betrieben wird.

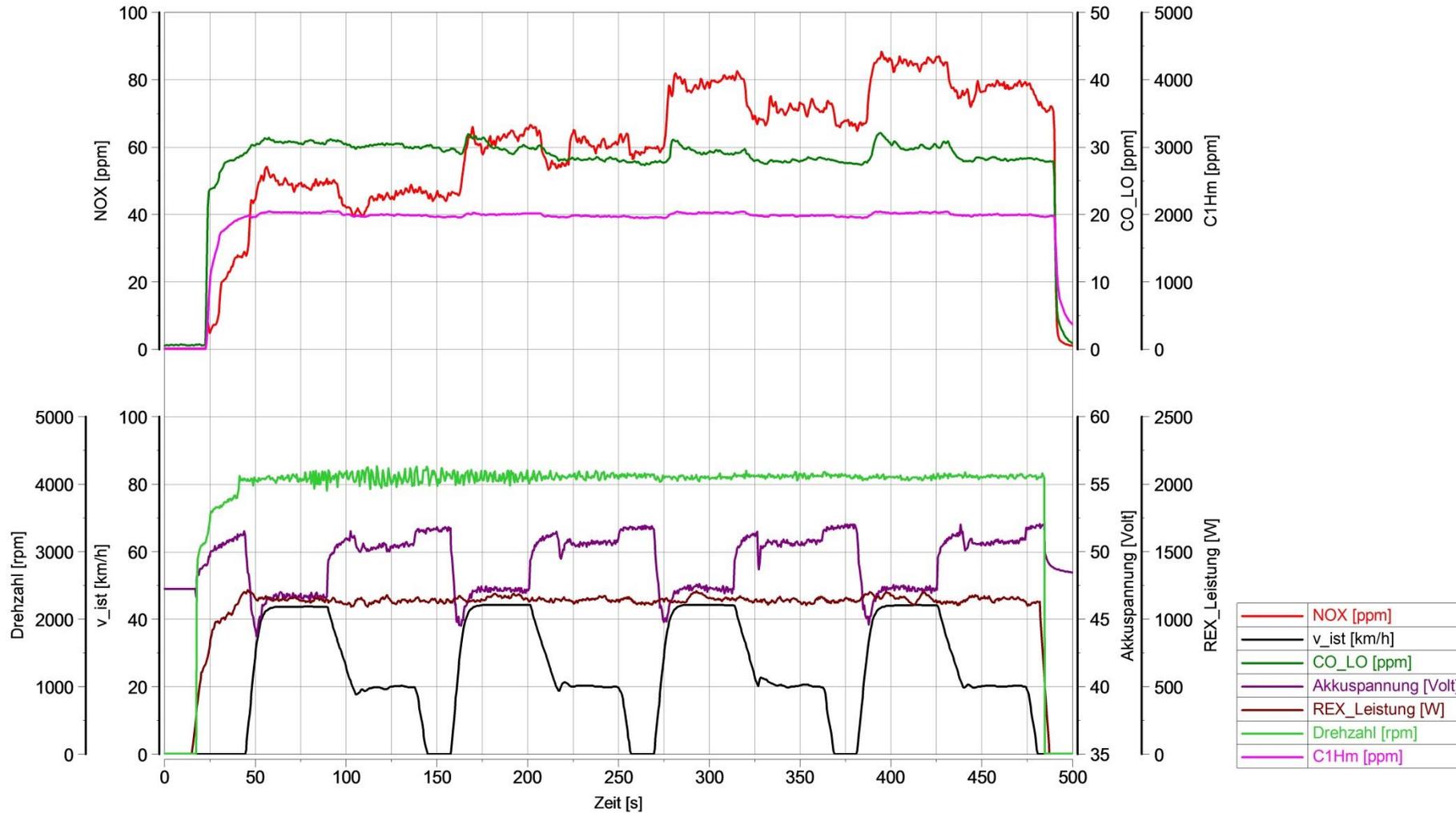


Abbildung 51: ECE R47 mit konstanter Erregung von 2,5 A

6.3.2 Spannungsabhängige Erregung – V2

Um eine optimale Funktion zu gewährleisten ist es also notwendig, den Erregerstrom nicht konstant sondern variabel zu gestalten. Aus den vorangegangenen Untersuchungen geht hervor, dass sich die optimale Erregung nahezu linear der Bordspannung verhält.

Der Grund hierfür liegt in der annähernd konstanten Leistung des Systems. Der Verbrennungsmotor gibt eine gleichbleibende, mechanische Leistung ab, die wiederum vom Generator in eine elektrische umgewandelt wird, natürlich abzüglich der anfallenden Wirkungsgradverluste.

Nach der Formel für die elektrische Leistung

$$P = U * I \quad (10)$$

muss sich bei Stagnierung selbiger die Stromstärke indirekt proportional zur Bordspannung verhalten. Dieses Verhalten ist ebenfalls in Abbildung 46 zu erkennen.

Steigt die Systemspannung an, so nähert sich diese immer weiter der Leerlaufspannung des Generators bei gegebenem Erregerstrom. Dadurch verringert sich die treibende Spannung. Dem kann entgegengewirkt werden, indem der Erregerstrom und damit die Leerlaufspannung erhöht wird.

Könnte man den Rotor direkt über das Bordnetz betreiben, wäre dieses Problem etwas weniger komplex lösbar. Jedoch handelt es sich um eine 12 V Lichtmaschine und muss deshalb auch mit dieser Spannung versorgt werden. Nun gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Die Bordspannung über eine elektronische Schaltung durch einen konstanten Wert teilen (Taktung) und damit den Rotor versorgen
2. Den Rotor neu wickeln, um ihn bei einer Versorgungsspannung von 48 V betreiben zu können und die gleiche magnetische Feldstärke zu erreichen

Beide Lösungen würden einen spannungsabhängigen Erregerstrom gewährleisten. Um eine möglichst große Flexibilität zu erreichen, soll für weitere Untersuchungen die getaktete Spannung den notwendigen Erregerstrom treiben.

Mit dieser Taktung kann jedoch der optimale Wert des Erregerstromes nur für einen bestimmten Spannungspunkt eingestellt werden, da die spannungsabhängige Gerade, welche ja den Nullpunkt durchlaufen muss, eine andere Steigung als jene des Sollstromes aufweist. In Abbildung 52 werden verschiedenen Methoden der Erregung (V1 - konstant; V2/V3 - spannungsabhängig) sowie die Ideale dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die

spannungsabhängige Steuerung eine gute Näherung an den Sollwert ergibt, jedoch noch eine Abweichung auftritt. Dies führt zu einer „Übererregung“ im oberen und einer „Untererregung“ im unteren Spannungsbereich. Diese Abweichung ist im Diagramm als grün schraffierte Fläche dargestellt.

Die höhere Erregung (in Rot dargestellt) würde wiederum zu einer stark schwankenden Drehzahl führen, wie bereits in vorangegangenen Untersuchungen erarbeitet wurde.

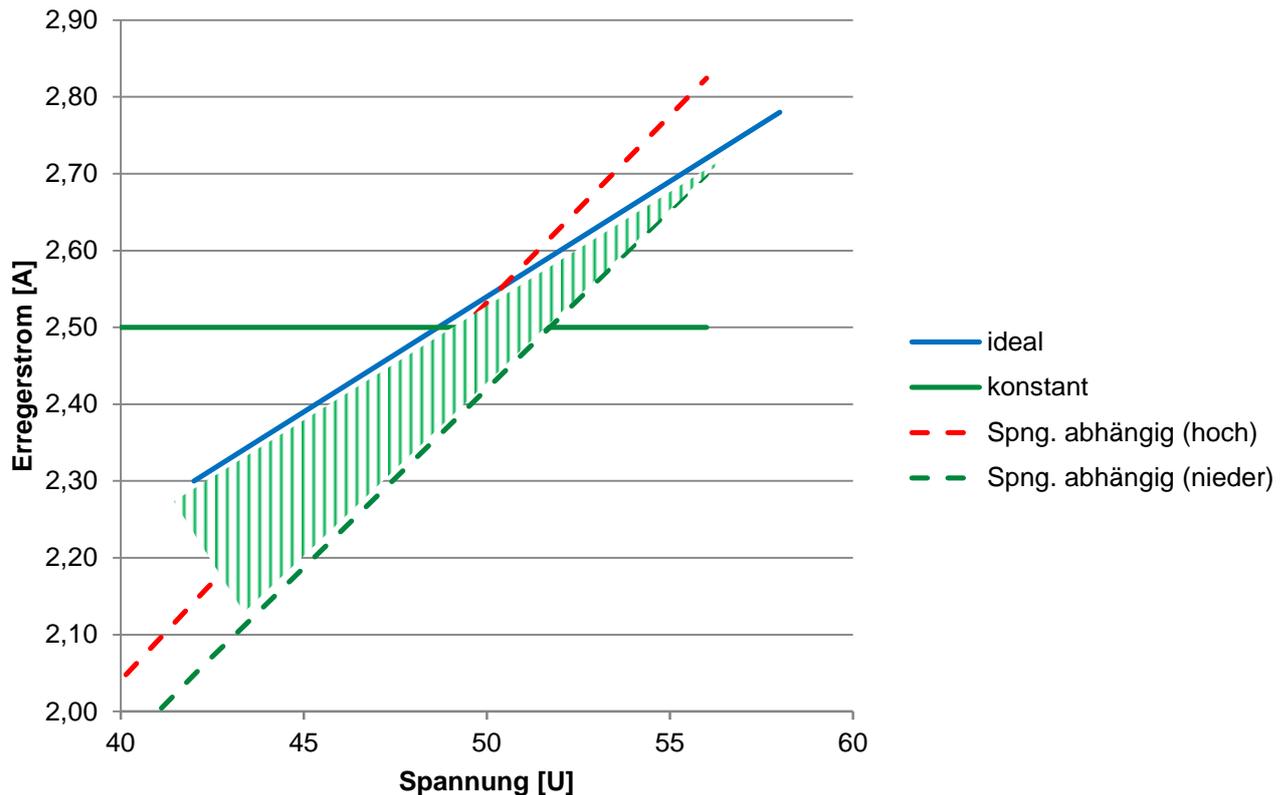


Abbildung 52: Vergleich verschiedener Methoden der Erregung

6.3.3 Schaltung zur Erregungssteuerung

Die elektronische Schaltung zur Steuerung des Erregerstromes wurde dabei so ausgeführt, dass dieser über einen variablen Widerstand (R3) über einen Bereich von ca. 10 % bis 30 % Pulsweite stufenlos eingestellt werden kann. Der Schaltungsaufbau wird in Abbildung 53 gezeigt. Um die Pulsweite konstant halten zu können ist es von großer Bedeutung die Versorgungsspannung der Platine zu stabilisieren. Dies erfolgte anfangs mit Hilfe einer Zener-Diode (D2) und eines Vorwiderstandes (R4). Dadurch sollte die Spannung konstant einen Wert von 9 V behalten.

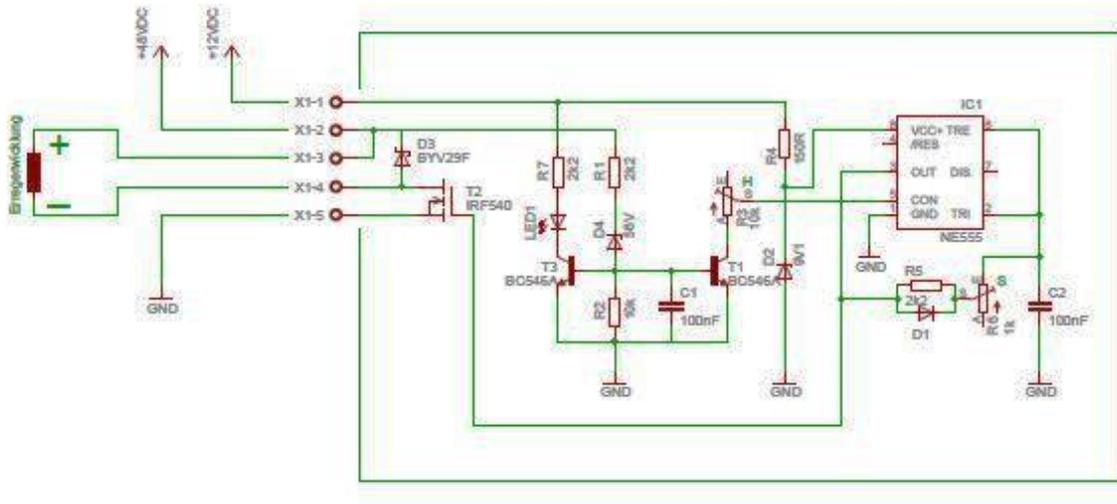


Abbildung 53: Schaltung zur spannungsabhängigen Steuerung der Erregung

Im Laufe weiterer Untersuchungen stellte sich jedoch heraus, dass dieses System nur unzufrieden stellend arbeitete, denn die Pulsweite änderte sich merklich nach dem Einschalten über die Zeit.

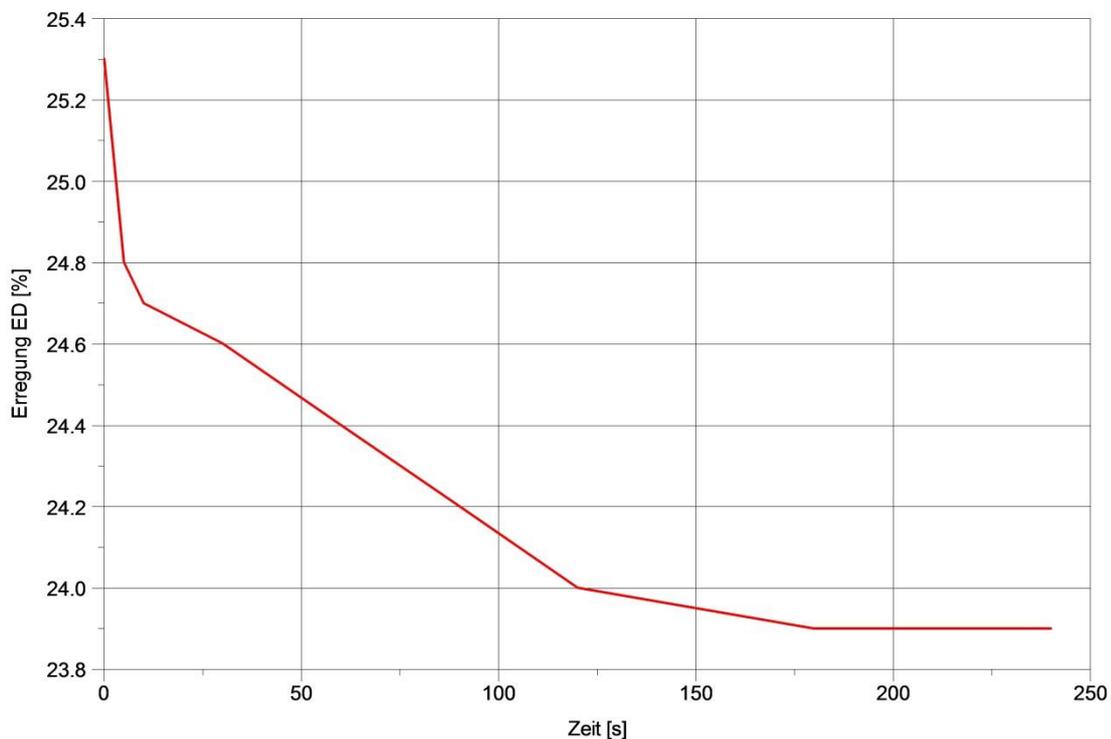


Abbildung 54: Erwärmungsbedingte Abnahme der Einschaltdauer

Dieses Verhalten ist auf eine Erwärmung der Platine und einer damit verbundenen Beeinflussung der Versorgungsspannung zurückzuführen und wird in Abbildung 54 dargestellt. Den Einfluss könnte man im Prüfstandsbetrieb kompensieren, indem die Erregung bereits wenige Minuten vor dem Motorstart aufgelegt und somit die Platine „temperiert“ wird.

Jedoch ist dabei darauf zu achten, dass die Akkus durch diese Vorlaufzeit weiter entleert werden und die Spannung bei den gewählten 10 A zur kontrollierten Entladung von 45 V weiter abfällt. Um diese komplizierten und möglicherweise fehlerbehafteten Methoden zu umgehen wurde die Platine geringfügig verändert.

Die maximale Spannung wurde auf 55 Volt mittels Zener Diode begrenzt, um die Akkus vor Beschädigung zu schützen. Dabei wird bei Erreichen dieser Spannung die Erregung weggenommen, womit die elektrische Leistung und damit auch die Spannung abfallen. Diese Art der Steuerung führte jedoch auch zu Problemen. Denn sobald die Erregung weggenommen wird und damit die Last abfällt, steigt die Motordrehzahl rapide an, und fällt erst wieder durch die vom VE-Table vorgegebene Abmagerungen in höheren Drehzahlbereichen. Dies führt zu einem sehr ungleichmäßigen Motorlauf. Zu einem raschen Erreichen dieser Spannung führt vor Allem der Fall wenn der REX läuft, und beim Verzögern zusätzlich rekuperiert wird. Hier erreicht der Ladestrom besonders hohe Werte.

Um diesem Verhalten entgegen zu wirken wurde ein System entwickelt, welches bei Erreichen dieser Schwelle den Erregerstrom nicht völlig wegnimmt, sondern diesen auf einen niedrigeren Wert reduziert, d.h. die Pulsweite verringert.

Diese Lösung ist in der Schaltung aus Abbildung 53 bereits integriert. Der Wert, auf welchen die Einschaltdauer abfällt ist ebenfalls über ein Potentiometer (R6) einstellbar. Aus Versuchen geht hervor, dass der Wert im Bereich um 15 % gewählt werden soll um die besten Ergebnisse zu erzielen. Mit der getakteten Erregung wurde der Testzyklus „ECE R47“ durchfahren, die Taktung der Erregung wurde dabei auf einen fixen Wert eingestellt (25 % Pulsweite).

Jedoch lassen sich auch so Veränderungen in der Drehzahl nicht völlig vermeiden. Das Verhalten der Drehzahl bei erreichter Spannung ist in Abbildung 55 ersichtlich und resultiert in einem unangenehm auffallenden Betriebsgeräusch.

Aus den genannten Gründen soll diese Spannungsschwelle im normalen Betrieb nicht überschritten werden. Das Erreichen der Schwelle könnte auch als Abschaltkriterium für den REX herangezogen werden, da diese hohe Spannung ebenfalls auf einen hohen Ladezustand der Akkus schließen lässt.

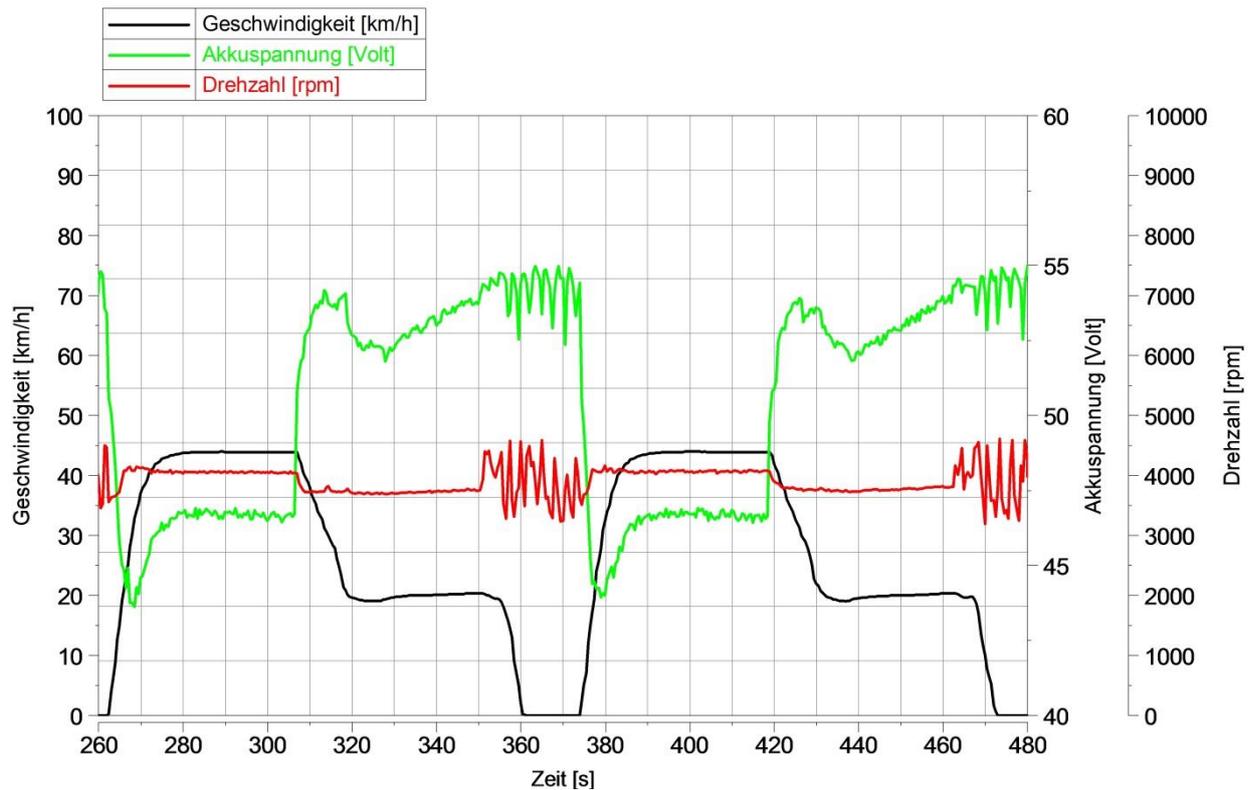


Abbildung 55: ECE R47, Erregerstrom bei 25% Pulsweite und Reduzierung der Erregung bei Überspannung

Die gewählte Einschaltdauer des Erregerstromes von 25 % soll für eine hohe Maximalleistung des Systems im Vergleich zu V1 sorgen. Wie jedoch in Abbildung 56 ersichtlich, entstehen damit starke Differenzen der Drehzahl, welche zwischen 3500 U/min bei hoher und knapp über 4000 U/min bei niedriger Spannung schwankt. Durch dieses System lässt sich also keine zufriedenstellende Drehzahlstabilität erzielen.

Sehr positiv fällt hier die prognostizierte elektrische Leistungsabgabe des REX auf. Die hier maximale Leistung von 1300 W tritt in Bereichen geringer Spannung und damit hoher Last am Hinterrad auf. Umgekehrt sinkt die Leistung auf unter 1000 W in Zuständen geringen Leistungsbedarfs. Damit werden die Akkus speziell im Stillstand des Fahrzeuges nicht unnötig durch hohen Ladestrom belastet. Leistung wird also generiert, wann sie auch benötigt wird!

6.3.3.1 Emissionen

Die Abgasemissionen unterliegen bei der übererregten Variante starken Schwankungen, da ein breiter Bereich von unter- bis überstöchiometrisch durchfahren wird. In fetten Bereichen steigt CO bis auf 800 ppm, die NO_x verhalten sich gegenläufig, wodurch auf ein $\lambda \leq 1,05$ geschlossen werden kann.

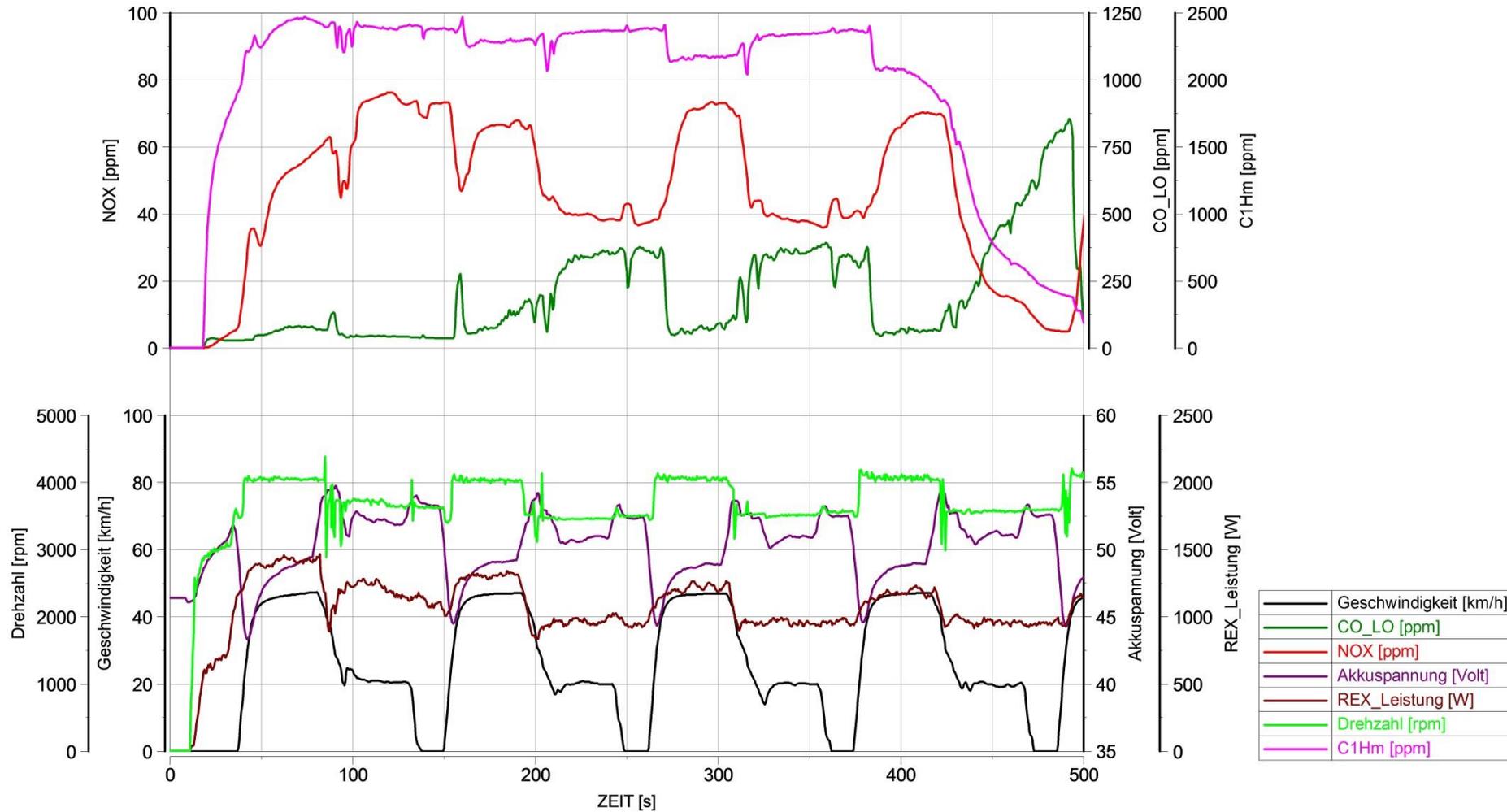


Abbildung 56: ECE-R47 mit spannungsabhängiger Erregung - übererregt

6.3.4 Spannungsabhängige Erregung – V3

Als erfolgversprechendste Variante kristallisierte sich jene mit geringer, spannungsabhängiger Erregung heraus, die Pulsweite wurde auf 18 % reduziert. Abbildung 57 zeigt die zugehörigen Messergebnisse. Die Drehzahl bewegt sich dabei in einem Bereich von 4000 bis 4150 U/min, wobei die hohe Drehzahl bei niedrigerer Bordspannung erreicht wird. Das liegt an der Tatsache, dass in diesem Bereich die Erregung ebenfalls einen geringeren Wert annimmt und damit der Generator weniger gebremst wird. Dadurch steigt die Drehzahl so lange, bis sich durch Abmagerung des Gemisches ein Gleichgewicht zwischen Motor- und Generatorleistung einstellt.

Dies ist gleichzeitig die größte Schwäche dieser Variante. Sinkt die Bordspannung während des Betriebs, also bei hohem Fahrwiderstand, sinkt ebenfalls die Leistungsabgabe des REX. Umgekehrt wird mehr Leistung zur Verfügung gestellt, wenn keine oder nur wenig Leistung zum Antrieb benötigt wird und damit die Akkus stark belastet werden.

In Summe kann damit jedoch die erreichbare Maximalleistung im Vergleich zur konstanten Erregung auf 1250 W gesteigert werden.

6.3.4.1 Emissionen

Die Abgas Emissionswerte ähneln sehr stark jenen der Variante konstanter Erregung. NO_x und CO verhalten sich synchron, dies deutet ebenfalls auf ein mageres Gemisch hin, wobei der CO – Wert etwas höher ausfällt. Daraus kann man auf eine geringfügig fettere Abstimmung schließen, woraus sich die Mehrleistung von 150 W ergibt.

Die Werte der HC Emissionen schwanken zwar leicht, bewegen sich aber auch in einem ähnlich Bereich.

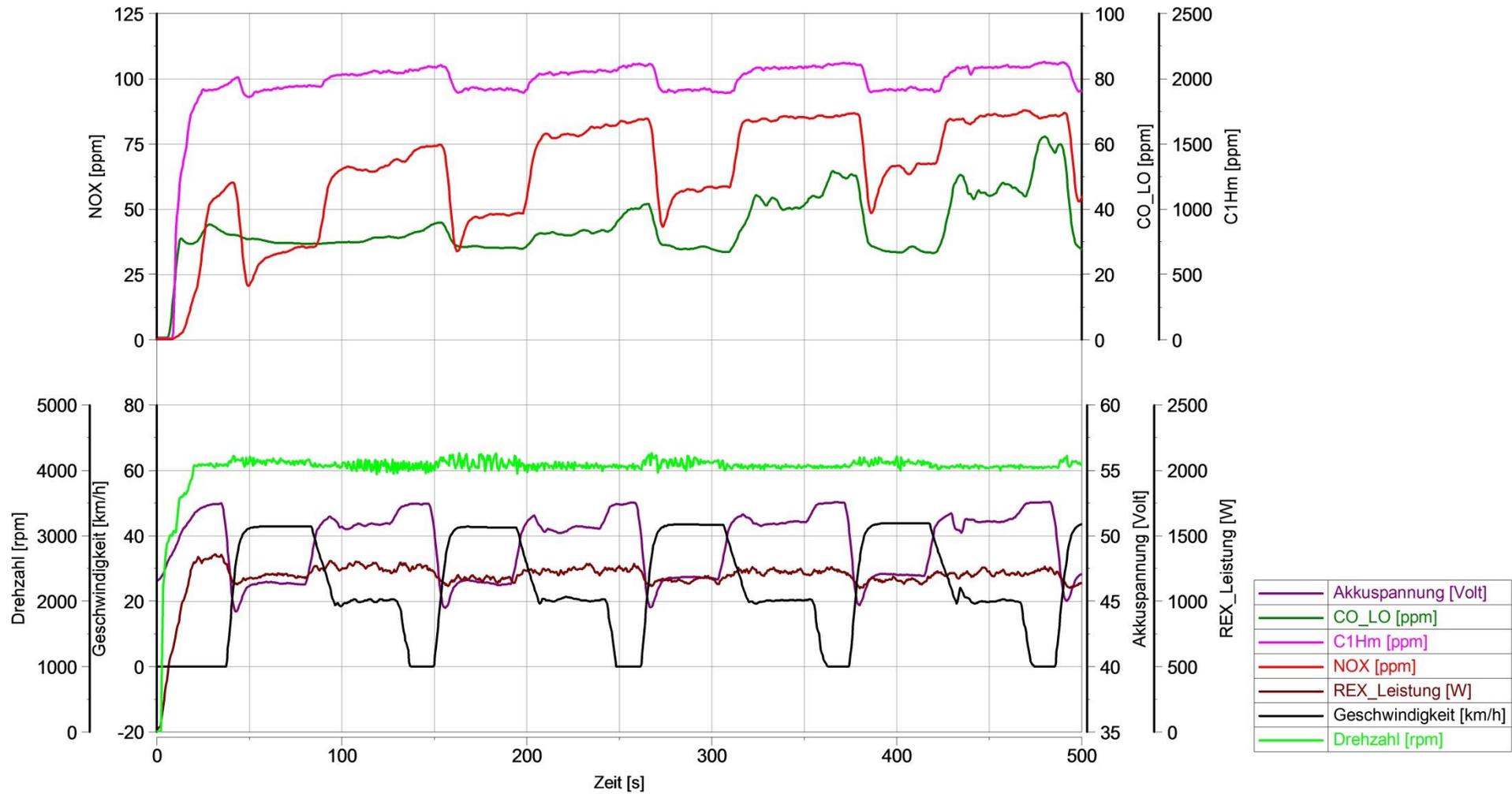


Abbildung 57: ECE-R47 mit spannungsabhängiger Erregung - untererregt

6.4 Abgasauswertung

Für Variante 3, die spannungsabhängige Erregungssteuerung, wird abschließend eine Auswertung der während der Abgasprüfung gefüllten Beutel durchgeführt. Tabelle 11 zeigt die Emissionswerte in ppm.

Tabelle 11: Beutelauswertung V3

	HC [ppm]	CO [ppm]	CO ₂ [ppm]	NO _x [ppm]	Strecke [km]	Gewichtung [%]
L1	16,0	0,9	419,0	0,1	3,3	30
A1	2175,0	337,0	3572,0	50,0		
L2	14,7	0,6	416,0	0,1	3,16	70
A2	625,0	113,0	1279,0	12,3		

Es werden 2 Beutel mit Umgebungsluft (L1 und L2) und 2 Beutel mit Abgas (A1 und A2) gefüllt. Über die zurückgelegten Strecken in Abschnitt 1 und 2 können die Emissionen in g/km angegeben und anschließend entsprechend derer Gewichtung zusammengefasst werden. Diese Werte sind in Tabelle 12 einzusehen. Es ist zu beachten, dass bei der betrachteten Prüfung nur 6 der insgesamt 8 Zyklen mit aktivem REX zurückgelegt wurden. Die Gründe hierfür werden im folgenden Kapitel „Energiebilanz“ erläutert. Die Berechnung dazu erfolgte mithilfe eines institutsinternen Programmes und basiert auf *RICHTLINIE 2013/60/EU DER KOMMISSION* [9]. Da für NO_x und HC ein gemeinsamer Grenzwert gilt, werden diese im Folgenden auch so aufgeführt.

Des Weiteren wird in Tabelle 12 bereits die Berechnung der Grenzwerte für Hybridfahrzeuge wie in Kapitel 1.2.5 berücksichtigt und die daraus resultierenden Werte sowie auch die gesetzlichen Grenzwerte aufgeführt. Aus der Berechnung der Grenzwerte geht hervor, dass die Massen der Einzelemissionen durch den Faktor 6 zu teilen sind.

Tabelle 12: Summe der Emissionswerte in g/km

	Messwerte	Nach Berechnung	Grenzwerte	% vom Grenzwert
CO [g/km]	2,09	0,35	1,00	34,83
HC+NO _x [g/km]	6,58	1,10	1,20	91,39
CO ₂ [g/km]	27,52	4,59	-	-

In der rechten Spalte ist der Prozentsatz vom gesetzlichen Grenzwert aufgeführt. Darin ist ersichtlich, dass mit dem erarbeiteten System bereits die aktuellen Grenzwerte knapp unterschritten werden. Es sei dazu nochmals darauf hingewiesen, dass diese Werte ohne Katalysator erzielt wurden.

6.5 Energiebilanz

Im Weiteren wurde die Energiebilanz betrachtet. Der REX wird wie erwähnt gleich zu Beginn gestartet und soll bereits vor dem achten und damit letzten Prüfzyklus abgestellt. Mithilfe der Energiebilanz soll ermittelt werden, wann der Verbrennungsmotor abgestellt werden kann, um den Rest der Strecke rein elektrisch bewältigen zu können. Damit soll Kraftstoff eingespart und Emissionen reduziert werden. Abbildung 58 zeigt acht ECE-R47 Zyklen, wobei der REX bis vor Beginn des letzten läuft. Die grüne Linie bezeichnet dabei jene Energie, welche vom REX bereitgestellt wird, die rote Linie den Energieverbrauch des Fahrzeuges während der Prüfung. Es ist klar zu erkennen, dass mehr elektrische Energie generiert als verbraucht wird, die Akkus werden also in Summe geladen. Dies führt dazu, dass der Verbrennungsmotor vor Ende der Prüfung abgestellt werden kann.

Aus Berechnungen geht hervor, dass der Verbrauch an Energie zur Bewältigung eines Prüfzyklus bei 23,5 Wh liegt und gleichzeitig 39,5 Wh in die Batterien gespeist werden. Bei acht Zyklen ergibt sich daraus, dass der REX noch vor dem 6. abgestellt werden kann, damit die Akkus nach Ende der Prüfung nicht weniger Kapazität als zu Beginn aufweisen. Berücksichtigt man die Ladeverluste der Bleibatterien, welche rund 70 % [14] betragen, ergibt sich jene Betriebsstrategie, dass der REX nach Beendigung des 6. Prüfzyklus abzustellen ist.

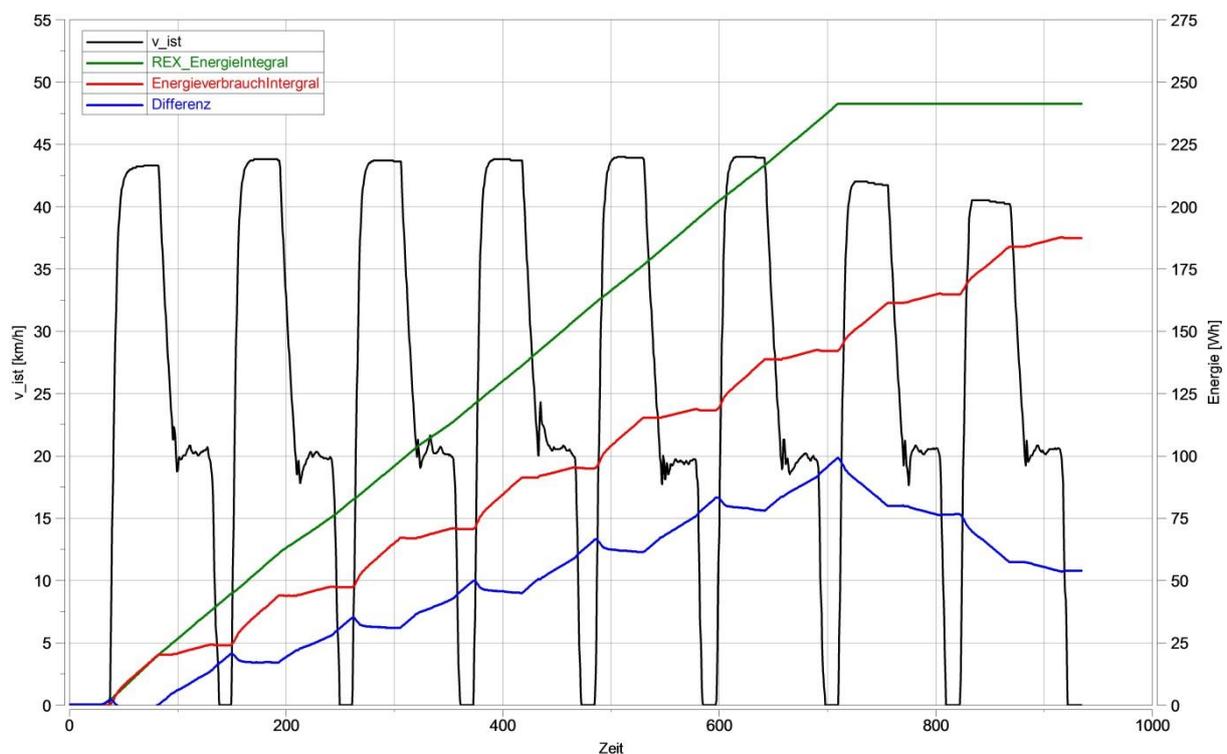


Abbildung 58: Energiebilanz – REX 7 Zyklen in Betrieb

6.6 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad zur Erzeugung elektrischer Energie durch den Range Extender wurde ebenfalls ermittelt. Dieser setzt sich aus den Einzelwirkungsgraden folgender Komponenten zusammen, wobei in Klammer der zu erwartende Wirkungsgrad angeführt ist:

- Verbrennungsmotor ($\eta = 25 \%$)
- Generator ($\eta = 75 \%$)

Aus der Multiplikation der Einzelwerte ergibt sich ein theoretischer Gesamtwirkungsgrad von knapp unter 18,75 %. Der Antrieb über den Radnabenmotor wird dabei nicht berücksichtigt.

Der Kraftstoffverbrauch während einer Prüfung lässt sich durch Messung oder der anschließenden Kohlenstoffbilanz ermitteln. Die Kohlenstoffbilanz der Prüfung entsprechend Abbildung 57 ergab einen gemittelten Verbrauch von 2,78 l/100km, also eine gesamtmenge von 177 ml. Aus Kraftstoffverbrauch und der vom REX generierten elektrischen Leistung kann der reale Wirkungsgrad errechnet werden.

Aus der Dichte des Kraftstoffs Benzin von rund 0,75 kg/l und einem Heizwert von 11,5 kWh/kg ergibt sich eine Energiedichte von 8,6 kWh/l.

Die konsumierten 177 ml entsprechen demnach einer Energiemenge von 1520 Wh. Die daraus gewonnene elektrische Energie beläuft sich auf 275 Wh.

Der Wirkungsgrad wird wie folgt berechnet:

$$\eta = \frac{E_{\text{Nutzen}}}{E_{\text{Aufwand}}} * 100\% \quad (11)$$

Daraus ergibt sich ein realer Wert von 18 %, welcher mit dem theoretischen sehr gut übereinstimmt.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Das hier erarbeitete System funktioniert über weite Bereiche zufriedenstellend. Die Drehzahl kann durch die verwendete, recht einfache Steuerung annähernd konstant gehalten werden, jedoch ergeben sich Defizite in Sachen Leistungsfähigkeit und Abgasemissionen.

Um die gewünschte Auslegedrehzahl konstant halten zu können, ist eine weiterentwickelte Regelung auf Basis der gesammelten Erfahrungen notwendig, welche sich bereits in Arbeit befindet. Der Generator würde damit stets mit der optimalen Erregung versorgt und würde so den Verbrennungsmotor immer auf konstanter Drehzahl halten, unabhängig von der aktuellen Bordspannung und anderen Einflüssen. Durch eine intelligente Steuerung würde sich auch die Möglichkeit anbieten, zwei Betriebsmodi darzustellen. Durch die Applikation eines „Low-Mode“, in welchem die Leistung durch Abmagerung des Gemisches stark gedrosselt wird, könnte in Fahrzuständen geringen Leistungsbedarf der Ladestrom stark reduziert werden.

Ein speziell auf die Anforderungen eines Range Extenders entwickelter Verbrennungsmotor könnte die Leistungsfähigkeit weiter erhöhen und gleichzeitig Abgasemissionen, Verbrauch sowie NVH erheblich reduzieren. Die Verwendung eines 2-Takt Motors ist dabei grundsätzlich gerechtfertigt, da dieser Vorteile speziell in Sachen Packaging bietet. Jedoch müsste dieser auf die Auslegedrehzahl optimiert werden, um die hohen Anforderungen zu erfüllen.

Eine weitere Herausforderung stellt die Erarbeitung einer Strategie dar, welche das Ein- und Ausschalten des REX bestimmt. Dazu bieten sich viele Möglichkeiten an, als Eingangsgröße können hier zum Beispiel Batteriespannung, Antriebsleistung, Gasgriffstellung oder eine Kombination dieser Werte herangezogen werden.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Durchschnittliche Distanzen der Einzelfahrten (PKW) [1]	2
Abbildung 2: Paralleler Hybrid [2]	4
Abbildung 3: Serieller Hybrid [2]	4
Abbildung 4: Wirkungsgradkette Serieller Hybrid [3]	5
Abbildung 5: Leistungsverzweigter Hybrid [2]	6
Abbildung 6: Batteriekosten bei einem Energiebedarf von 20 kWh/100km [4].....	7
Abbildung 7: BMW i3 [5].....	8
Abbildung 8: Fahrzyklus am Rollenprüfstand - Grafik.....	13
Abbildung 9: Gesamter Prüfzyklus mit Gewichtung der Abschnitte [9]	14
Abbildung 10: E-one Capri im Originalzustand [10].....	17
Abbildung 11: Spannungsanzeige am Fahrzeug	19
Abbildung 12: Akkus im Vergleich - Leistungs-/Energiedichte [11]	20
Abbildung 13: Kapazität über Entladedauer	21
Abbildung 14: Entladekurven Bleiakku [13]	22
Abbildung 15: Ideale Ladekennlinie [13]	23
Abbildung 16 : SoC Bestimmung eines Akkus mit einer Kapazität von 30 Ah [15]	25
Abbildung 17: Messung Originalfahrzeug mit vollen Akkus	27
Abbildung 18: Ermittlung der Reichweite, Akkukapazität = 22 Ah.....	29
Abbildung 19: Konzept des Range Extenders.....	30
Abbildung 20: Prinzipieller Aufbau einer Drehstromlichtmaschine [16].....	31
Abbildung 21: Leerlaufspannung des Generators [17]	33
Abbildung 22: Wirkungsgradkennfeld [17]	34

Abbildung 23: Verbrennungsmotor mit beschnittenem Kurbelgehäuse und Zylinder	35
Abbildung 24: Leistungs- und Drehmomentverlauf des Versuchsmotors [18]	36
Abbildung 25: Stabilität in Abhängigkeit der Drehzahl [19]	37
Abbildung 26: 48 V DC Axiallüfter [20]	39
Abbildung 27: Zusammenstellung der Antriebseinheit	41
Abbildung 28: Antriebseinheit in der gekapselten Box ohne Deckel	42
Abbildung 29: Komplettsystem im Fahrzeug eingebettet	43
Abbildung 30: Führung der Abgasanlage	44
Abbildung 31: Verschlossener Zahnriemen	45
Abbildung 32: Aufbau FO-Z Hochleistungskeilriemen [21]	46
Abbildung 33: Aufbau eines Poly-V Riemen [21]	47
Abbildung 34: Mechanischer Prüfstands Aufbau, anfangs mit Zahnriemen	49
Abbildung 35: Microsquirt V3.0	50
Abbildung 36: Verkabelung Microsquirt V3.0 [22]	51
Abbildung 37: VE-Table	53
Abbildung 38: Kennfeld Zündung	54
Abbildung 39: Oben Netzgerät zur Versorgung beim Starten, unten "DC-Load"	55
Abbildung 40: Schadstoffbildung im Ottomotor über Luftverhältnis [23]	58
Abbildung 41: VE – Table mit Abmagerung oberhalb von 4000 U/min	59
Abbildung 42: Leistung und Kraftstoffverbrauch über den Luftverhältnis [24]	59
Abbildung 43: Spannungsänderung mit Erregerstrom $I = 2,4 \text{ A}$	62
Abbildung 44: Spannungsänderung mit Erregerstrom $I = 2,6 \text{ A}$	63
Abbildung 45: Spannungsänderung bei konstanter Drehzahl $n = 4000 \text{ U/min}$	64

Abbildung 46: Heckansicht des Scooters mit Blick auf Zylinderkopf und Abgasanlage	65
Abbildung 47: Range Extender in das Fahrzeug integriert	66
Abbildung 48: Kraftstofftank am Fahrzeug	67
Abbildung 49: Konzentrationen über Luftverhältnis der diversen Versionen	69
Abbildung 50: ECE R47 mit konstanter Erregung von 2,5 A.....	70
Abbildung 51: Vergleich verschiedener Methoden der Erregung	72
Abbildung 52: Schaltung zur spannungsabhängigen Steuerung der Erregung	73
Abbildung 53: Erwärmungsbedingte Abnahme der Einschaltdauer	73
Abbildung 54: ECE R47, Erregerstrom bei 22% Pulsweite und Reduzierung der Erregung bei Überspannung.....	75
Abbildung 55: ECE-R47 mit spannungsabhängiger Erregung - übererregt	76
Abbildung 56: ECE-R47 mit spannungsabhängiger Erregung - untererregt	78
Abbildung 57: Energiebilanz – REX 7 Zyklen in Betrieb	80

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arten von Hybridelektrofahrzeugen	9
Tabelle 2: Fahrzeugeinstufung [6]	10
Tabelle 3: Abgasgrenzwerte Euro III für Fahrzeuge der Klasse L1e [6]	11
Tabelle 4: Zeitplan für die Einführung der Verordnung [7].....	11
Tabelle 5: Abgasgrenzwerte EURO IV [7]	12
Tabelle 6: Fahrzyklus am Rollenprüfstand [8].....	13
Tabelle 7: Daten des Fahrzeuges in Originalzustand (Herstellerangaben, Stand 1.Juni 2014)	18
Tabelle 8: Daten der neuen Akkumulatoren	20
Tabelle 9: Daten Drehstromlichtmaschine	32
Tabelle 10: Abmaße des verfügbaren Bauraumes.....	40
Tabelle 11: Beutelauswertung V3	79
Tabelle 12: Summe der Emissionswerte in g/km.....	79

10 Literaturverzeichnis

- [1] R. Fischer, „Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs – vom Turbohybrid zum Range Extender,“ 30. Internationales Wiener Motorensymposium, 2009.
- [2] „Wikipedia,“ [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_vehicle_drivetrains. [Zugriff am 5 11 2013].
- [3] B. Göschel, „Die Zukunft des Range Extender,“ in *Wiener Motoren Symposium*, 2008.
- [4] G. K. Fraidl, C. Hubmann, R. Kunzemann, B. Sifferlinger und V. Benda, „Range Extender, was kommt nach Hybrid?“.
- [5] „Blog CDN,“ [Online]. Available: <http://www.blogcdn.com/de.autoblog.com/media/2013/07/bmw-i3-serie-048.jpg>. [Zugriff am 20 12 2013].
- [6] „RICHTLINIE 97/24/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES,“ 1997.
- [7] „VERORDNUNG (EU) Nr. 168/2013 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen,“ 2013.
- [8] „RICHTLINIE 2009/108/EG DER KOMMISSION des Europäischen Parlaments zur Änderung der Richtlinie 97/24/EG über bestimmte Bauteile und Merkmale von zweirädrigen oder dreirädrigen Kraftfahrzeugen zwecks Anpassung an den technischen Fortschritt,“ 2009.
- [9] „RICHTLINIE 2013/60/EU DER KOMMISSION zur Änderung der Richtlinie 97/24/EG“.
- [10] „E-One,“ [Online]. Available: <http://www.eone-online.at/e-roller-1/capri/#cc-m-product-7746702395>. [Zugriff am 12 04 2014].
- [11] D. Werner, „<http://www.elweb.info>,“ [Online]. Available: <http://www.elweb.info/projekte/dieterwerner/AKKU1A1.pdf>. [Zugriff am 14 4 2014].
- [12] „Wikipedia,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Peukert-Gleichung>.
- [13] „Batterymaster,“ [Online]. Available: <http://www.batterymasters.co.uk/ProductDocs/SLAYUAREC10-12-TECH.pdf>.
- [14] „FunkCom,“ [Online]. Available: <http://www.funkcom.ch/akkuinfos.htm>. [Zugriff am 28 4 2014].
- [15] „Steca Elektronik,“ [Online]. Available: http://www.steca.com/index.php?Charging_technology. [Zugriff am 10 05 2014].
- [16] „Beepblog,“ [Online]. Available: <http://www.beeplog.de>.

- [17] F. Sprenger und D. Stix, „Auswahl und Auslegung eines Generators sowie eine Modelentwicklung in MATLAB-Simulink für eine Rangeextenderapplikation an einem Hybridscooter,“ 2011.
- [18] M. Korman, G. Koller und L. Michal, „Conversion of the Tomos Revival 50cc Two Stroke Engine for EURO 2 Homologation with different Speed Versions,“ TU Graz, 2004.
- [19] H. J. Schacht, N. Bretterklieber, O. Schögl, R. Kirchberger und S. Schmidt, „Low Cost Range Extender Technology for Hybrid Electric City Scooters,“ TU Graz, 2012.
- [20] „RS Components,“ [Online]. Available: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0f40/0900766b80f40534.pdf>. [Zugriff am 12 4 2014].
- [21] „Contitech,“ [Online]. Available: <http://www.contitech.de/pages/produkte/antriebsriemen/antrieb-industrie>. [Zugriff am 9 9 2013].
- [22] „www.msextra.com,“ [Online]. Available: <http://www.msextra.com/doc/general/pix/us3-wiring.png>. [Zugriff am 22 4 2014].
- [23] Pischinger, Klell und Sams, „Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine“.
- [24] „Mummbrothers,“ 16 06 2014. [Online]. Available: http://www.mummbrothers.com/SRF_Stuff/Secrets/Driveline/Air_Fuel.htm.
- [25] C. S. Günter P. Merker, Grundlagen Verbrennungsmotoren, 4. überarbeitete und aktualisierte Auflage.
- [26] H. Wippel, „Bachelorarbeit Energiebedarfsermittlung eines elektrisch betriebenen Kleinkraftrades,“ TU Graz, 2009.
- [27] G. Pistoia, „Electric and Hybrid Vehicles“.
- [28] G. P. Blair, „The Basic Design of Two-Stroke Engines“.
- [29] [Online]. Available: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e9/Hybridcombined.png>.
- [30] H. P. Schnöll, „4. Projekt Verkehrstechnik Untersuchung des Wirkungsgrades eines Elektroantriebs von Batterie zu Straße am Beispiel eines Elektrorollers,“ TU Graz, 2009.
- [31] R. Proebster und M. Kirsten, „Bachelorarbeit Potenzialabschätzung eines Range Extenders in einem Rollerfahrzeug,“ TU Graz.
- [32] C. Rieck, „Zweitakt-Motoren Tuning“.
- [33] M. Becker, D. Jannasch, D. Muhs, J. Voßiek und H. Wittel, Roloff/Matek Maschinenelemente 16.Auflage, Vieweg, 2008.
- [34] R. Bady und J. W. Biermann, „Hybrid-Elektrofahrzeuge-Strukturen und zukünftige Entwicklungen,“ Aachen, 2000.

- [35] „Volkswagen AG,“ [Online]. Available:
http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/de/innovation/research_vehicles.
[Zugriff am 6 12 2013].
- [36] „Wikipedia,“ [Online]. Available:
http://de.wikipedia.org/wiki/Mathematische_Beschreibung_des_Bipolartransistors.
[Zugriff am 21 02 2014].
- [37] „Hostra,“ [Online]. Available:
<http://www.hostrat.at/index.php?sid=1315&kat=6&kap=208&titel=Antriebsriemen#208>.
[Zugriff am 2013].
- [38] „Wikipedia,“ [Online]. Available:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Hybridelektrofahrzeug>.
- [39] „Wikipedia,“ [Online]. Available:
http://de.wikipedia.org/wiki/Bipolartransistor_mit_isolierter_Gate-Elektrode.
- [40] „Elweb,“ [Online]. Available: <http://elweb.info/dokuwiki/doku.php?id=kapazitaet>.
[Zugriff am 22 05 2014].
- [41] A. Emadi, „Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives“.