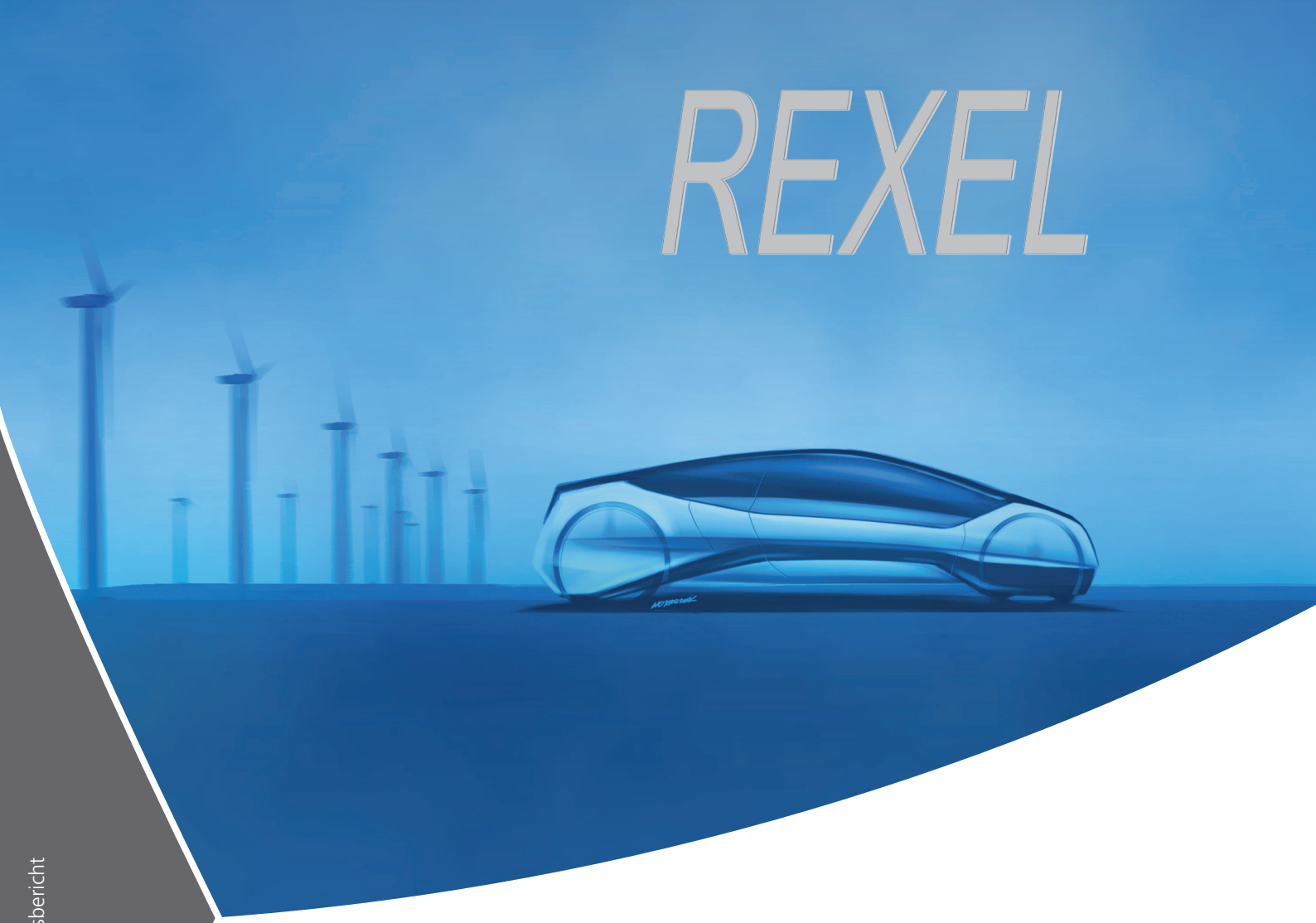


Abschlussbericht

Studie zu Range Extender Konzepten für den Einsatz in einem batterieelektrischen Fahrzeug – REXEL

Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR FINANZEN
UND WIRTSCHAFT

DLR **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt** e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft
Institut für Fahrzeugkonzepte

Studie zu Range Extender Konzepten für den Einsatz in einem batterieelektrischen Fahrzeug – REXEL

Diese Studie wurde im Auftrag des Ministeriums für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg mit Mitteln der Baden-Württemberg Stiftung durchgeführt und vom Institut für Fahrzeugkonzepte des DLR e.V. koordiniert

Projektpartner

Universität Stuttgart

IVK

Fraunhofer ISE

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft

Grußwort



Baden-Württemberg ist die Innovationsregion Nr. 1 in Europa mit einzigartig gewachsenen Strukturen und einer besonderen Unternehmenslandschaft sowie einer exzellenten Forschungs- und Hochschulinfrastruktur. Neben großen Automobilherstellern sind es im Land vor allem mittelständische Unternehmen, die einen maßgeblichen Beitrag zur Wertschöpfung der Automobilindustrie leisten. Innovative Produkte, Lösungen und Dienstleistungen aus dem Land finden weltweiten Absatz und Anerkennung.

Die Konzepte für eine nachhaltige Mobilität, in denen die Elektromobilität eine wichtige Komponente darstellt, bedeuten für die Automobilindustrie einen enormen Wandel: Durch entfallende und neue Komponenten und Technologien werden sich Wertschöpfungsanteile zwischen unterschiedlichen Akteuren und möglicherweise auch zwischen Wirtschaftsregionen neu verteilen.

Da in absehbarer Zeit keine gravierende Steigerung der Reichweiten von rein batterieelektrischen Fahrzeugen erwartet wird, wird neben neuen Mobilitätslösungen dem Range Extender großes Potenzial zugemessen. Dieser bietet wiederum den vielen Zulieferunternehmen im Land enormes Potential, an der elektromobilen Automobilwelt teilzuhaben. Die vorliegende Studie soll einen neutralen und wissenschaftlich fundierten Überblick über Range-Extender Technologien, deren Potenziale und die erforderlichen Kompetenzen geben und kann damit eine gute Hilfe bei der strategischen Ausrichtung auf dem Weg zur Elektromobilität sein.

Dr. Nils Schmid MdL
Stellvertretender Ministerpräsident und
Minister für Finanzen und Wirtschaft
Baden-Württemberg

Inhalt

Grußwort

1. Hintergrund, Zielsetzung, Technikvarianten 9

2. Freikolbenmotor 11

2.1 Technologische Übersicht über Freikolbenkonzepte

2.1.1 Gegenkolbenbauweise. 12
2.1.2 Doppelkolbenbauweise 14
2.1.3 Einzelkolbenbauweise 19

2.2 Kenngrößen des Freikolbenlineargenerators

2.2.1 Definitionen und Randbedingungen 23
2.2.2 Abschätzung der Systemmasse und der Leistungsdichte 25
2.2.3 Packaging 26
2.2.4 Herstellkosten 30
2.2.5 Betriebspunkte und Wirkungsgrad 32
2.2.6 Kühlung 36
2.2.7 Skalierbarkeit 37
2.2.8 Kraftstoffflexibilität und Vielstofffähigkeit 38
2.2.9 Dynamik 40
2.2.10 NVH 40
2.2.11 Emissionen 41
2.2.12 Kompetenzen am Standort Baden-Württemberg 42

3. Brennstoffzelle

3.1 Darstellung der Brennstoffzellensysteme, welche für den Einsatz in einem Range Extender-Fahrzeug geeignet sind

3.1.1 Allgemeines 43
3.1.2 Anwendungsbereiche 44
3.1.3 Brennstoffzellentechnologien 46
3.1.4 Funktionsprinzip 47
3.1.5 Der Brennstoffzellenstapel 48
3.1.6 Verfahrenstechnisches Konzept eines Brennstoffzellesystems 49
3.1.7 Wasserstoffspeichertechnologie 50

3.2 Darstellung der Vor- und Nachteile von Brennstoffzellensystemen für den Einsatz als Range Extender 52

3.3 Überblick über bereits im Einsatz befindliche Brennstoffzellensysteme und deren Leistungsklassen

3.3.1 Allgemeines 56
3.3.2 Brennstoffzellensystem-Hersteller 57

3.4 Abschätzung weiterer Entwicklungspotenziale eines PEFC Brennstoffzellensystems 57

3.5 Abschätzung des weiteren Entwicklungsaufwands zur Optimierung des Systems hinsichtlich seines Einsatzes als Range Extender 59

3.6 Untersuchung und Beschreibung hinsichtlich der Bewertungskriterien 60
3.6.1 Wirkungsgrad 60
3.6.2 NVH 61
3.6.3 Packaging 62
3.6.4 Leistungsdichte 65
3.6.5 Kosten 65
3.6.6 Emissionen 66
3.6.7 Skalierbarkeit 66
3.6.8 Dynamik 67
3.6.9 Zusammenfassung 67
3.7 Kompetenzen am Standort Baden-Württemberg 68

4. Mikrogasturbine
4.1 Funktionsprinzip 70
4.2 Stand der Technik
4.2.1 Gasturbinen-basierter Direktantrieb 70
4.2.2 Gasturbinen-basierter serieller Hybridantrieb 72
4.3 Entwicklungspotentiale 78
4.3.1 Komponenten- und Systemanalysen im Volllastpunkt 79
4.3.2 Optimierungspotential durch den Einsatz von Keramik 82
4.3.3 Optimierungspotentiale im Teillastbereich 84
4.4 Kompetenzen am Standort Baden-Württemberg 84
4.5 Zusammenfassung Mikrogasturbine 85

5. Hubkolben- und Wankelmotor
5.1 Einteilung der Verbrennungsmotoren nach Arbeitsverfahen
5.1.1 Der 4-Takt-Otto-/Dieselmotor 86
5.1.2 Der 2-Takt-Ottomotor 87
5.1.3 Der 4-Takt-Wankelmotor 87
5.2 Vergleich und Bewertung 88
5.3 Wirkungsgrad 91
5.4 Kosten 96
5.5 Gewicht 99
5.6 Leistungsdichte 101
5.7 Packaging 103
5.8 Emissionen 106
5.9 Noise, Vibration, Harshness (NVH) 110
5.10 Kraftstoffflexibilität 116
5.11 Skalierbarkeit 118
5.12 Auswertung
5.12.1 Gewichtung 118
5.12.2 Ergebnis 119
5.12.3 Fazit 121
5.12.4 Optimierungsmöglichkeiten 121
5.13 Kompetenzen am Standort Baden-Württemberg 123

6. Elektrische Maschinen

6.1 Maschinentypen
6.1.1 Gleichstrommaschinen GM ... 124
6.1.2 Geschaltete Reluktanzmaschinen GRM ... 125
6.1.3 Asynchronmaschinen ASM ... 127
6.1.4 Synchronmaschinen (SM, PSM) ... 128
6.1.5 Transversalflussmaschinen (TFM) ... 131
6.1.6 Permanentmagneterregte Linearmotoren (PLM) ... 133
6.2 Zusammenfassung der allgemeinen Eigenschaften verschiedener Maschinentypen ... 134
6.3 Zusammenfassung der Eignung verschiedener Maschinentypen in Bezug auf Range Extender Generatorapplikationen ... 136
6.4 Kompetenzen am Standort Baden-Württemberg ... 136

7. Leistungselektronik

7.1 Leistungselektronische Wandler für Range Extender Konzepte ... 137
7.2 Brennstoffzelle A1
7.2.1 Auswahl und Beschreibung des Wandlers ... 139
7.2.2 Abschätzung von Wirkungsgrad, Gewicht und Leistungsdichte ... 141
7.2.3 Abschätzung der Kosten ... 143
7.2.4 Skalierbarkeit ... 143
7.2.5 Packaging ... 143
7.3 Freikolbenmotor B1, Hubkolbenmotor und Wankelmotor B2
7.3.1 Auswahl und Beschreibung des Wandlers ... 144
7.3.2 Abschätzung von Wirkungsgrad, Gewicht und Leistungsdichte ... 146
7.3.3 Abschätzung der Kosten ... 147
7.3.4 Skalierbarkeit ... 147
7.3.5 Packaging ... 148
7.4 Gasturbine B3
7.4.1 Auswahl und Beschreibung des Wandlers ... 149
7.4.2 Abschätzung von Wirkungsgrad, Gewicht und Leistungsdichte ... 150
7.4.3 Skalierbarkeit ... 150
7.5 Kompetenzen am Standort Baden-Württemberg ... 150
7.6 Zusammenfassung „Leistungselektronische Wandler" ... 151

8. Bewertung System ... 153

8.1 Vergleich der chemisch-mechanischen Energiewandler und der Brennstoffzelle ... 154
8.2 Vergleich der elektrischen Maschinen ... 159
8.3 Vergleich der Leistungselektroniken ... 160
8.4 Kompetenzen am Standort Baden-Württemberg ... 160

9. Zusammenfassung ... 161

Anhang ... 165
Abkürzungsverzeichnis ... 169
Literaturverzeichnis ... 170

1.

Hintergrund, Zielsetzung, Technikvarianten

Die Verknappung der weltweiten Ressourcen an fossilen Energieträgern sowie die Diskussion über den anthropogenen Ausstoß von Treibhausgasen haben in den letzten Jahren zu einem hohen Bedarf an effizienten und schadstoffarmen Fahrzeugantrieben geführt. Insbesondere die Elektromobilität erhält aus diesen Gründen besondere Aufmerksamkeit. Unter hohem technischem und finanziellem Einsatz werden bei allen großen Fahrzeugherstellern und Zulieferern die entsprechenden Technologien weiterentwickelt.

Trotz der erwarteten Steigerung von Leistungs- und insbesondere Energiedichte wird die Batterie dabei der reichweitenbegrenzende Faktor beim batterieelektrischen Fahrzeug bleiben. Sinnvoll und vielversprechend ist daher der Einsatz von Range Extender Technologien, welche die Reichweite von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen vergrößern, indem sie an Bord des Fahrzeugs elektrische Energie erzeugen. Ein Range Extender kann als Energiewandlungseinheit eines seriellen Hybrids beschrieben werden, mit Hilfe derer sich aus verschiedenen Kraftstoffen elektrische Energie erzeugen lässt. Mit der an Bord des Fahrzeugs erzeugten Energie kann entweder die Batterie geladen oder der elektrische Antriebsmotor direkt versorgt werden.

Ein Range Extender stellt somit eine Einheit dar, mit der Elektrofahrzeuge mit niedriger bis mittlerer batterieelektrischer Reichweite dennoch eine hohe Gesamtreichweite und vor allem eine schnelle „Wiederaufladbarkeit" bei sehr langen Reisestrecken erreichen können. Die Bedeutung von Range Extendern für die zukünftige Mobilität wird durch verschiedene Untersuchungen bestätigt ([1]). Zur Realisierung eines Range Extenders existieren sehr unterschiedliche technische Ansätze, die jeweils individuelle Vor- und Nachteile mit sich bringen.

Trotz bereits verfügbarer Range Extender Systeme, die unter anderem auch historisch bedingt zumeist auf herkömmlichen Hubkolbenmotoren basieren, ist es notwendig, verschiedene Konzepte und Technologien zu ermitteln und zu vergleichen, welche für den Einsatz als Range Extender geeignet sind. Die Grundsatzentscheidung, welche der möglichen Range Extender Technologien weiter verfolgt wird, geht über die rein technologieorientierte hinaus. Vielmehr ist sie in hohem Maße verknüpft mit der Ausprägung des Individualverkehrs einer Gesellschaft im 21. Jahrhundert. Über politische Förderprogramme finanzieller und ideeller Art oder über den Ausbau ggf. erforderlicher Infrastrukturelemente wird die Auswahl von Range Extender Technologien von vielen Stakeholdern beeinflusst, die sich bisher nicht mit den technischen Einzelheiten von Range Extendern beschäftigt haben. Gerade dieser Kreis soll durch die vorliegende Studie bei der Bewertung der Technologien unterstützt werden.

Ziel dieser Studie ist vor diesem Hintergrund die fundierte Analyse, die Bewertung und der Vergleich unterschiedlicher Technologien hinsichtlich ihres Einsatzpotenzials als Range Extender. Das Ergebnis stellt eine wissenschaftliche prospektive Aussage über Range Extender Konzepte dar, in der die Vor- und Nachteile und das Potenzial der einzelnen Technologien hinsichtlich ihres Einsatzes als Range Extender gegenübergestellt und bewertet werden.

Bewertungskriterien
- Wirkungsgrad
- NVH
- Packaging
- Leistungsdichte
- Kosten
- Emissionen
- Kraftstoffflexibilität
- Skalierbarkeit

Die Kriterien für die Gegenüberstellung werden von den Anforderungen an ein Range Extender Modul abgeleitet (Tab. Bewertungskriterien). Diese sind vielfältig und hängen auch davon ab, in welchem Fahrzeug und in welchem Gesamtkonzept der Range Extender zum Einsatz kommt. So ist die Anforderung eines hohen Wirkungsgrades bei

Fahrzeugen mit geringer batterieelektrischer Reichweite höher zu gewichten als bei einem Fahrzeug mit sehr hoher batterieelektrischer Reichweite.

Neben dem Wirkungsgrad stellt das NVH (Noise-Vibration-Harshness) Verhalten, also das Geräusch- und Vibrationsverhalten des Range Extenders, einen wichtigen Aspekt bei der Auswahl eines geeigneten Konzepts dar, da der Unterschied zwischen rein elektrischem Betrieb und Betrieb mit laufendem Range Extender hinsichtlich des akustischen Verhaltens vom Fahrer als nicht zu groß und störend wahrgenommen werden darf.

Hinsichtlich einer guten Integrierbarkeit des Range Extenders in unterschiedliche Fahrzeuge spielt das Packaging und das Gewicht eine bedeutende Rolle. Aufgrund der hohen Kosten eines elektrisch angetriebenen Fahrzeuges mit Akkumulator sind die Herstellkosten des Range Extender Konzepts ein wichtiger Faktor bei der Bewertung der Konzepte. Daneben sind bei der Auswahl des geeigneten Konzeptes das Emissionsverhalten, die Kraftstoffflexibilität und die Skalierbarkeit bzw. die Modularität zu beachten.

Technologien
Freikolbenmotor
Brennstoffzelle
Mikrogasturbine
Hubkolbenmotor (2-Takt/ 4-Takt/Otto/Diesel)
Wankelmotor

Es existieren zahlreiche unterschiedliche Range Extender Technologien (Tab. Technologie). Die wichtigsten Konzepte stellen der herkömmliche Hubkolbenmotor (Diesel- oder Benzinausführung, 2- oder 4-Takt), der Wankelmotor, der Freikolbenmotor, die Brennstoffzelle und die Gasturbine dar. Diese Technologien unterscheiden sich zum Teil erheblich in ihren für eine Range Extender Anwendung relevanten Eigenschaften. Bei der Betrachtung des Gesamtsystems Range-Extender muss auch die elektrische Maschine sowie die Leistungselektronik berücksichtigt werden. Mit Ausnahme der Brennstoffzelle, bei der die chemisch gespeicherte Energie direkt in elektrische Energie gewandelt wird, besteht das Range Extender Gesamtsystem immer aus einer Energiewandlungseinheit, die die chemische in mechanische Energie wandelt, einer Energiewandlungseinheit, die die mechanische Energie in elektrische Energie wandelt sowie einer Leistungselektronik, die die elektrische Energie in geeigneter Form zur Verfügung stellt.

Die chemisch-mechanischen Energiewandler sowie die Brennstoffzelle werden in den Kapiteln 2 bis 5 dargestellt. Kapitel 6 behandelt die elektrischen Maschinen, die zur Wandlung der mechanischen in elektrische Energie notwendig sind. In Kapitel 7 werden die Anforderungen an die Leistungselektronik dargestellt, die sich aus der Verwendung der spezifischen Technologien ergeben. Kapitel 8 beinhaltet die Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse sowie eine komparative Bewertung der Technologien im Hinblick auf die relevanten Anforderungen.

2.

Freikolbenmotor

In diesem Kapitel werden Freikolbenmotoren hinsichtlich ihres Einsatzpotenzials als Range Extender für zukünftige Antriebskonzepte in einem Kraftfahrzeug untersucht. Hierfür soll zunächst ein Überblick über den Stand der Entwicklungen von Freikolbenmotoren gegeben werden. Basierend auf den gewonnen Erkenntnissen soll im Anschluss anhand eines konkreten Freikolbenkonzepts eine Bewertung von Kenngrößen erfolgen, die einen Vergleich mit anderen Motorkonzepten ermöglicht.

Systematische Einteilung von Freikolbenmotoren
Im Unterschied zu konventionellen Verbrennungsmotoren verzichten Freikolbenmotoren auf die Kurbelwelle und die damit verbundene Zwangssteuerung der Kolbenbewegung. Auf die Verbrennung eines Kraftstoffs folgt eine lineare Bewegung des Kolbens. Im Gegensatz zum konventionellen Hubkolbenmotor wird die Bewegungsenergie nicht mechanisch ausgekoppelt. Durch die Auflösung der mechanischen Zwangsführung sind sehr flexible Betriebsweisen möglich. Die bekannten Freikolbenkonzepte führen eine Energiewandlung in pneumatische, hydraulische oder elektrische Energie durch (vgl. Abbildung 1). Für die Betrachtung der Eignung von Freikolbenmotoren für Range Extender Konzepte in dieser Studie sind die Konzepte mit elektrischer Energieauskopplung von Interesse.

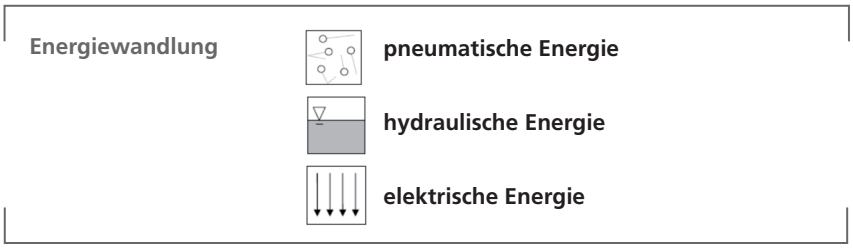


Abbildung 1: Energiewandlung bei Freikolbenmotoren

Eine weitere Differenzierung der Freikolbenkonzepte erfolgt über ihre Bauweise. Die Unterscheidung erfolgt über die Anzahl und die Lage der Brennräume (vgl. Abbildung 2). Beim Einzelkolbenprinzip wird der Kolben durch die Energiefreisetzung im Verbrennungszylinder in den unteren Totpunkt getrieben. Beim Gegenkolbenprinzip befindet sich der Brennraum in der Mitte zwischen zwei Kolben, die nach der Zündung synchron auseinanderlaufen. Beiden Prinzipien gemein ist die Notwendigkeit einer Rückstellung der Kolben nach dem Verbrennungstakt durch ein zusätzliches Bauelement. Diese Rückstelleinheit kann z.B. durch eine mechanische Feder, einen Gasspeicher, oder einen Linearmotor realisiert werden. Beim Doppelkolbenprinzip schwingt der Kolben zwischen zwei entgegengesetzt angeordneten Brennräumen. Die beiden Kolben sind über eine gemeinsame Kolbenstange mechanisch miteinander gekoppelt. Wird der eine Brennraum komprimiert, wird parallel dazu der andere Brennraum entspannt und umgekehrt **[3]**.

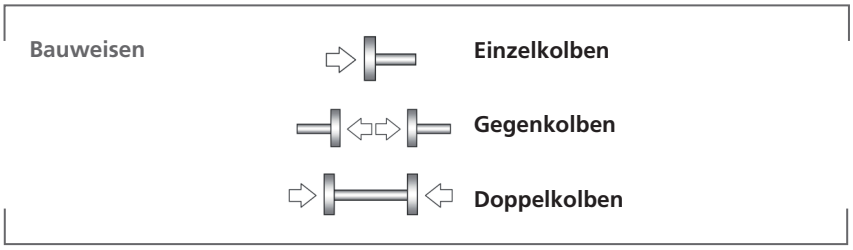


Abbildung 2: Bauweisen von Freikolbenmotoren

2.1 Technologische Übersicht über Freikolbenkonzepte

Der Historie der Freikolbenmotoren beschreibt eine mehr als 100-jährige Entwicklungsgeschichte von den Anfängen mit Freikolben-Luftverdichtern und späteren Freikolben-Hydraulikaggregaten bis zu den jüngeren Projekten im Bereich der stromerzeugenden Freikolbenmotoren.

Mit den fortschreitenden Entwicklungen im Bereich der Steuerungs- und Regelungssysteme werden seit Mitte der 90er Jahre in verschiedenen Forschungskonsortien intensiv elektrische Freikolbenkonzepte erforscht. Eine Übersicht über Freikolbenkonzepte mit elektrischer Energieauskopplung ist in Abbildung 3 dargestellt. Im Folgenden werden die aufgeführten Projekte bezüglich ihrer technologischen Ansätze und dem derzeitigen Reifegrad beschrieben.

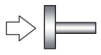
Bauweisen	Übersicht elektrischer Freikolbenkonzepte
Gegenkolben 	Jarret, Frankreich (Patentanmeldung 1971) Free Piston Engine, Sandia National Laboratory, Livermore, USA (1995) Freikolbenlineargenerator (Zentralbrennraum), DLR, Deutschland (2002)
Doppelkolben 	Free Piston Engine, Sandia National Laboratory, Livermore, USA (1995) Diesel Two-Stroke Linear Engine, West Virginia University, USA (1996) Free-Piston Engine Project, Sir Joseph Swan Institute for Energy Research, Newcastle, Großbritannien (1999) Linear Combustion Engine Project, Czech Technical University, Prag, Tschechien (2000) Free-Piston Power Pack, Pempek Systems, Australien (2001) Free Piston Energy Converter, EU (2002)
Einzelkolben 	Free-Piston Engine Project, Sir Joseph Swan Institute for Energy Research, Newcastle, Großbritannien (1999) Internal Combustion Linear Generator Integrated Power System, Nanjing University, China (2007) Active CrankTrain Free Piston Engine, University of Lincoln, Großbritannien (2005) Freikolbenlineargenerator (Einzelbrennraum), DLR, Deutschland (2002)

Abbildung 3: Übersicht über Freikolbenkonzepte mit elektrischer Energieauskopplung

2.1.1 Gegenkolbenbauweise

Freikolbengenerator nach Jarret
Der Beginn der Entwicklung von Freikolbengeneratoren geht zurück auf eine Patentanmeldung der Brüder Jarret aus dem Jahr 1971. In diesem Patent wird ein Gegenkolbenmotor mit innerer Verbrennung beschrieben und die elektrische Energieauskopplungsmöglichkeit erwähnt **[4]**.

Free Piston Engine, Sandia National Laboratory, Livermore, USA
Die Sandia National Laboratories in Livermore, USA betreiben seit 1995 Forschungsarbeiten zum Thema Freikolbenmotoren. Das erste Konzept verfolgte die Entwicklung eines mit Wasserstoff betriebenen Doppelkolben-Freikolbenmotors. In den ersten Jahren wurden Verbrennungsuntersuchungen durchgeführt und ein Lineargenerator entwickelt **[5]**. Zudem wurden die Vorteile der variablen Verdichtung in Verbindung mit dem HCCI-Brennverfahren erläutert. Eine Demonstration des Prototyps der „Thermodynamischen Brennstoffzelle“ war geplant, außer Simulationsergebnissen wurden jedoch keine detaillierten Messdaten veröffentlicht.

In einem jüngeren Konzept wird der Aufbau eines Gegenkolbenmotors verfolgt. Ziel der Untersuchung ist ein kontinuierlicher Betrieb, um den Ladungswechsel zu untersuchen und die Wirkungsgrade sowie Emissionen beim Betrieb mit unterschiedlichen Kraftstoffen zu bestimmen. Das Verdichtungsverhältnis kann von 1:20 bis 1:40 variiert werden. Die Trajektorie der Kolbenbewegung ist durch eine „Bounce chamber" einstellbar. Die „Bounce chamber" ist eine Gasfeder mit mechanisch durch Kolbenkontakt betätigtem Einlass und schlitzgesteuertem Auslass (vgl. Abbildung 4). Die beiden Gasfedern dienen der Rückstellung der frei schwingenden Kolben im Betrieb, sowie dem Anfahren des Systems aus dem Stillstand. Der Lineargenerator wird nur als passives Element eingesetzt und erzeugt eine konstante Last.

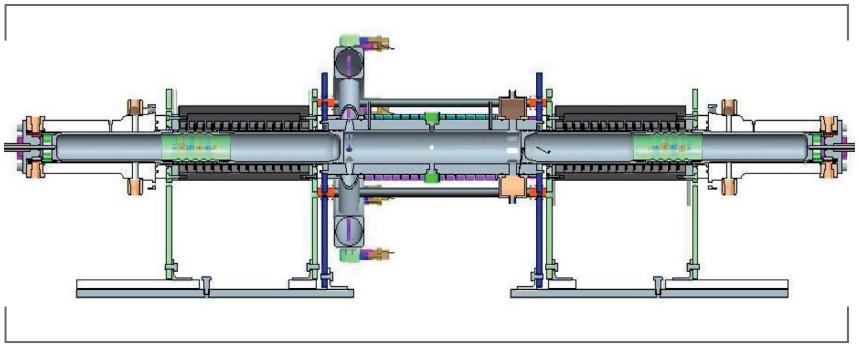


Abbildung 4: Schnittzeichnung des Free Piston Engine [7]

Die Verbrennung selbst wird erst gestartet, wenn das System schwingt. Gelingt es die beiden Verbrennungskolben synchron zu betreiben, erreicht man automatisch einen Massenausgleich. Der Hub je Kolben beträgt 215 - 220 mm bei einem Zylinderdurchmesser von 81,15 mm. Für die Verbrennung ist das HCCI-Verfahren geplant, da Vorversuche Wirkungsgrade größer 50 % ergeben haben. Die Einspritzung erfolgt über eine Saugrohreinspritzung. Der Ladungswechsel wird durch eine Gleichstromspülung mit Schlitzen realisiert. Als Betriebsfrequenz ergeben sich je nach Verdichtungsverhältnis 23 - 28 Hz, was mittleren Kolbengeschwindigkeiten von 10 - 12 m/s entspricht. Die erreichbare elektrische Leistung wird mit 15 kW angegeben **[6]**. Die Entwicklung des Free Piston Motors erfolgt in Zusammenarbeit mit General Motors, der University of Michigan, der Stanford University und dem Los Alamos National Laboratory. In Two-Stroke Linear Engine, West Virginia University, USA5 ist der Prototyp des Free Piston Engine aus dem Jahr 2009 dargestellt. Die experimentellen Versuche sind seitdem im Gange, Ergebnisse liegen zum heutigen Zeitpunkt noch nicht vor.

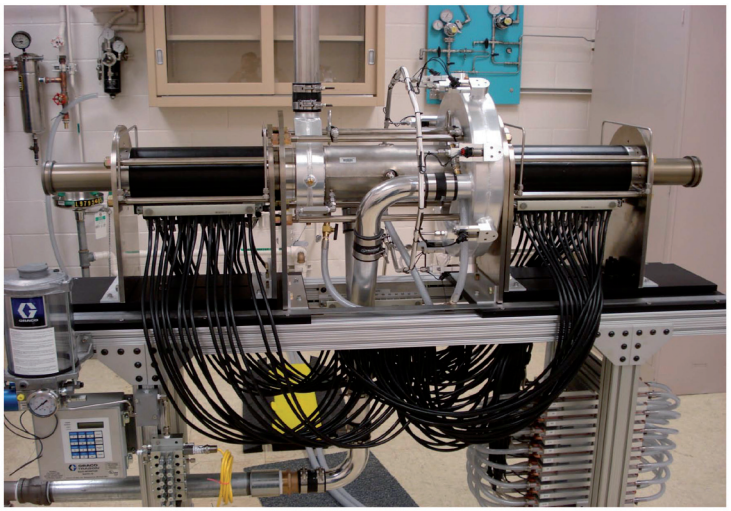


Abbildung 5: Prototyp des Sandia Free Piston Engine [7]

2.1.2 Doppelkolbenbauweise

Two-Stroke Linear Engine, West Virginia University, USA
An der West Virginia University werden seit 1996 sowohl Benzin als auch Diesel betriebene Freikolbenmotoren in Doppelkolbenbauweise untersucht. In den ersten Jahren wurden zwei Prototypen entwickelt, aufgebaut und getestet. Für den Aufbau wurden aus Kosten- und Zeitgründen vorwiegend kommerziell erhältliche Komponenten verwendet. Die erste Generation hatte als Last eine Reibungsbremse, um die Verbrennungszylinder und ihre Funktion zu testen. Bei der zweiten Generation wurde die Energie durch einen Lineargenerator ausgekoppelt **[8]**. Im Gegensatz zu dem aus der Simulation erwarteten Wirkungsgrad von 50,43 % wurde mit dem Prototypen nur ein Wirkungsgrad von 11 % erreicht **[9]**. Die große Abweichung resultiert aus starken Zyklusschwankungen, da der verwendete Lineargenerator nicht aktiv für die Regelung der Kolbenbewegung eingesetzt wurde.

Bohrung	36,5 mm
Hub	50 mm
Betriebsfrequenz	23 Hz
elektrische Leistung	316 W
Wirkungsgrad	11 %

Tabelle 1: Spezifikation des Two-Stroke Linear Engine [8]

Free Piston Engine Project, Sir Joseph Swan Institute for Energy Research, Newcastle, Großbritannien
Eine Forschergruppe um Tony Roskilly und Rikard Mikalsen beschäftigt sich an der Universität von Newcastle mit der Untersuchung von Freikolbenkonzepten in Doppelkolben- und Einzelkolbenbauweise. Die Entwicklungspfade des Free Piston Engine (FPE) zielen auf drei verschiedene Einsatzgebiete ab: Fahrzeug-, Boots- und Kraft-Wärme-Kopplungs-Anwendungen **[10]**. Der Fokus der Arbeiten liegt momentan auf der

Regelungsentwicklung und Simulation der Konzepte. Hierzu finden sich ab dem Jahr 2007 eine Reihe von Veröffentlichungen **[10]**. Konkrete Informationen über realisierte Prototypen und experimentelle Forschungsergebnisse liegen nicht vor, bzw. werden mit dem Verweis auf laufende Patentanträge zurückgehalten.

Anhand eines Freikolbenmotors in Einzelkolbenbauweise wurde eine Simulationsumgebung aufgebaut und als Grundlage für eine Parameterstudie verwendet. Der schematische Aufbau des Einzelkolbensystems ist in Abbildung 6 dargestellt. Der Motor wird als direkteinspritzender 2-Takt-Diesel mit Turbolader ausgelegt. Die Spülung erfolgt als Gleichstromspülung durch Einlassschlitze im unteren Umkehrpunkt und Auslassventile im Zylinderkopf. Zwischen Verbrennungskomponente und Gasfeder befindet sich der Lineargenerator zur elektrischen Energieauskopplung. Als Simulationsergebnis wurde ein mechanischer Wirkungsgrad von 42 % erreicht **[11]**. Die Energiewandlung der elektrischen Maschine und die daraus resultierenden Verluste sind darin nicht enthalten.

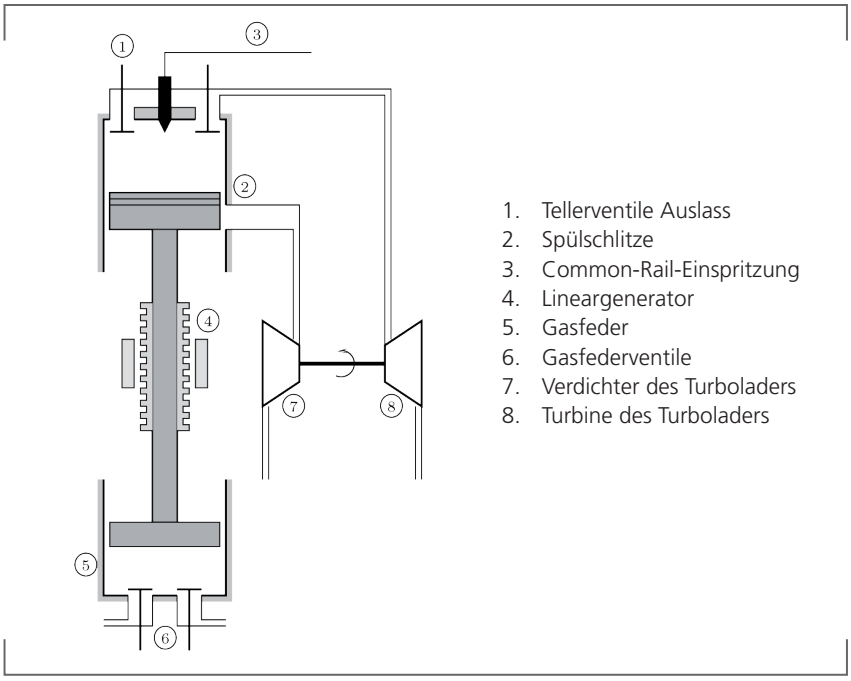


Abbildung 6: Funktionsskizze des Free Piston Engine [11]

Für den Einsatz des Freikolbenmotors in einem Kraftfahrzeug (Automotive FPE) wird eine Konzeptstudie mit einem Freikolbenmotor in Doppelkolbenbauweise verfolgt. Zur Minimierung der Abgasemissionen soll ein 4-Takt-Verfahren mit Saugrohreinspritzung und Fremdzündung realisiert werden **[10]**.

Linear Combustion Engine – LCE Project, Czech Technical University, Prag
Das Institut für Regelungstechnik der Czech Technical University in Prag, Tschechien beschäftigt sich seit dem Jahr 2000 mit der Entwicklung eines schlitzgesteuerten 2-Takt Freikolbenmotors. Der Schwerpunkt der Arbeiten bezog sich zunächst auf den Aufbau eines ersten Prototypen mit dem die Regelungsentwicklung des freischwingenden Doppelkolbensystems vorangetrieben werden sollte. Der Aufbau wurde bis zum Jahr

2005 mit zwei gegenläufig angeordneten 50 cm³ Motoren und einem dazwischen integrierten Lineargenerator realisiert. Als Besonderheit des Systems kann die Benzin Druckluft-Direkteinspritzung (Aprilia DITECH) hervorgehoben werden. Die Spülung der Verbrennungszylinder wird durch eine Umkehrspülung realisiert.

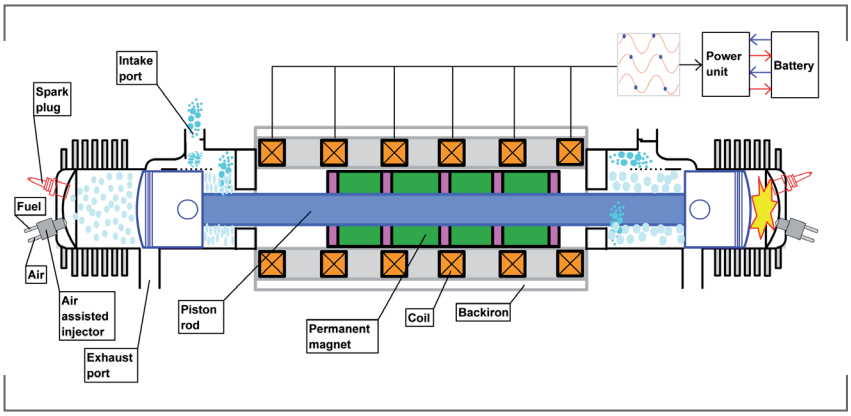


Abbildung 7: Funktionsskizze des Linear Combustion Engine [12]

Die Versuche mit der ersten Generation des LCE ergaben eine elektrische Leistung von P_{el} = 350 W bei einer Betriebsfrequenz von f = 27 Hz und einer resultierenden Verdichtung von 1:9. Über den Gesamtwirkungsgrad wurden keine Aussagen getroffen. Aufgrund des zu klein dimensionierten Lineargenerators konnte die Verbrennung nicht im Bestpunkt betrieben werden, was sich negativ auf den Gesamtwirkungsgrad auswirkt. Mit den Erkenntnissen des ersten Funktionsmusters wurde eine zweite Ausbaustufe mit dem Ziel der Entwicklung eines kompakten elektrischen Generators und der Optimierung des Wirkungsgrads gestartet **[13]**.

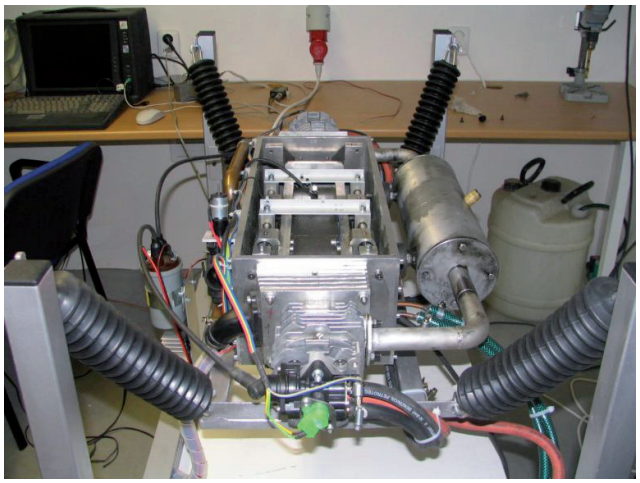


Abbildung 8: Versuchsaufbau des LCE-Prototypen [12]

Free Piston Power Pack – FP3, Pempek Systems, Australien
Die Firma Pempek Systems aus Australien arbeitet seit dem Jahr 2001 an einem Freikolbengenerator nach dem Doppelkolbenprinzip. Der Free Piston Power Pack (FP3) vereint 4 Doppelkolbenaggregate (8 Brennräume) in einem Modul und wird so gesteuert, dass ein Massenausgleich erzielt wird. Das 2-Takt System ist funktional hoch integriert und verwendet einen neuartigen Ansatz für den Ladungswechsel. Der Ladungswechsel erfolgt über eine Gleichstromspülung mit passiven Ventilen im bewegten Kolben und elektro-pneumatisch betätigten Ventilen im Zylinderkopf (vgl. Abbildung 9). Durch die Kolbenbewegung wird die im Kompressionshub angesaugte Frischluft im Expansionshub verdichtet und in die Brennkammer ausgestoßen. Der Hersteller bezeichnet diese Funktion als integrierten Kompressor.

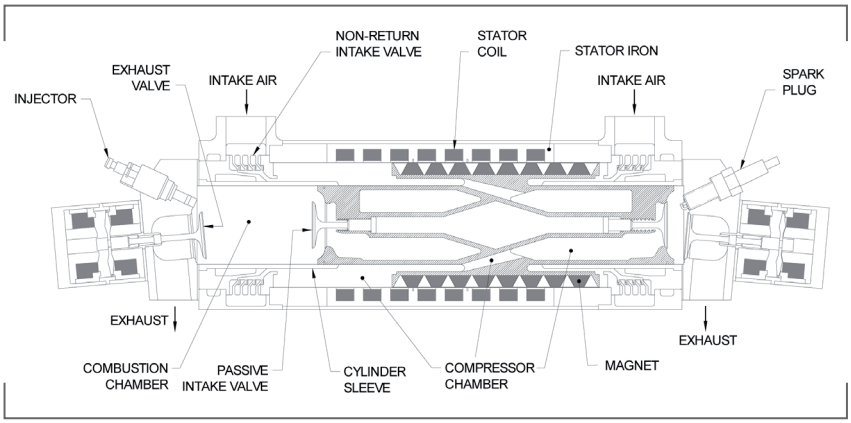


Abbildung 9: Vereinfachtes Schnittbild eines einzelnen FP3 Freikolbenmoduls [14]

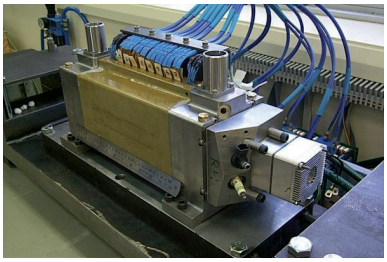
Das Konzept wird als skalierbar für elektrische Leistungen von 25 bis 500 kW beschrieben. Die Verwendung von unterschiedlichen Kraftstoffen soll durch das anpassbare Verdichtungsverhältnis des Motors gewährleistet werden. Für den Einsatz des Free Piston Power Packs in Fahrzeuganwendungen wurden bislang zwei Module ausgelegt. Die technischen Daten sind in Tabelle 2 dargestellt.

	FP3 40 kW Modul	FP3 100 kW Modul
Betriebsfrequenz	36 Hz	30 Hz
Hubraum	1,36 l	2,82 l
Zylinderdurchmesser	52 mm	66 mm
Hub	80 mm	103 mm
Abmessungen	225 x 225 x 520 mm	280 x 280 x 660 mm
Gewicht	40 kg	100 kg

Tabelle 2: Technische Daten der FP3-Module (40 kW und 100 kW) [15]

Über die erreichbaren Wirkungsgrade wurden bislang noch keine belastbaren Werte veröffentlicht. Für den Wirkungsgrad der elektrischen Komponente wird eine Steigerung auf 95 % erwartet und für das Gesamtsystem ein Wirkungsgrad von 50 % in Aussicht gestellt **[15]**. In Hardware wurde bis zum Jahr 2004 ein Zweizylinderaggregat mit Benzin-Direkteinspritzung realisiert und getestet (vgl. Abbildung 10 links).

Gelingt es vier Doppelkolbenaggregate so kompakt zusammenzufügen wie in Abbildung 10 rechts dargestellt, so hat das Gesamtsystem insgesamt relativ geringe Abmaße. Für Ende des Jahres 2007 sollte ein zweiter Prototyp mit Diesel-Direkteinspritzung in Betrieb gehen. Ergebnisse hierzu wurden bislang nicht veröffentlicht.



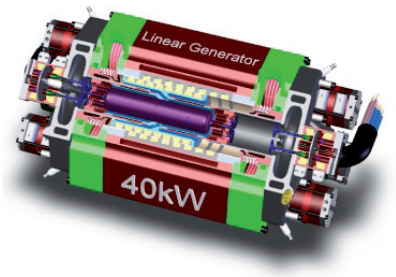


Abbildung 10: Prototyp eines Pempek 25 kW FP3-Aggregats und 40 kW FP3-Modul [15]

Free Piston Energy Converter – FPEC, EU-Projekt
Im Rahmen eines EU-Projektkonsortiums wurde bei Volvo in den Jahren 2002 bis 2005 der Prototyp eines 2-Takt Freikolbenmotors auf Doppelkolbenbasis entwickelt. Der Free Piston Energy Converter (FPEC) verwendet elektro-pneumatisch angesteuerte Ventile und eine Diesel-Direkteinspritzung zur Realisierung der HCCI-Verbrennung.

Maximalleistung Generator	45 kW
Maximalkraft Generator	4 kN
Bohrung	102 mm
Kolbenmasse	9 kg

Tabelle 3: Spezifikation des FPEC [16]

Auf dem Electric Vehicle Symposium in Monaco prognostizierte Volvo einen effektiven Systemwirkungsgrad von 46 % bei einer Leistungsabgabe von 23 kW für das Diesel-HCCI-System. Die Simulation des Wirkungsgrads der elektrischen Maschine ergab einen Wert von 93 %. Die Hardware wurde 2006 fertig gestellt. Die Vermessung des FPEC war bis Ende 2006 vorgesehen, wobei noch keine Ergebnisse vorliegen. Projektpartner ist unter anderem die Firma Chiron aus Holland, die an einem Freikolbenhydraulikaggregat arbeitet. Die verbrennungstechnischen Untersuchungen laufen am Institut Francais du Petrole (IFP), das sich intensiv mit dem HCCI-Brennverfahren beschäftigt **[17]**.

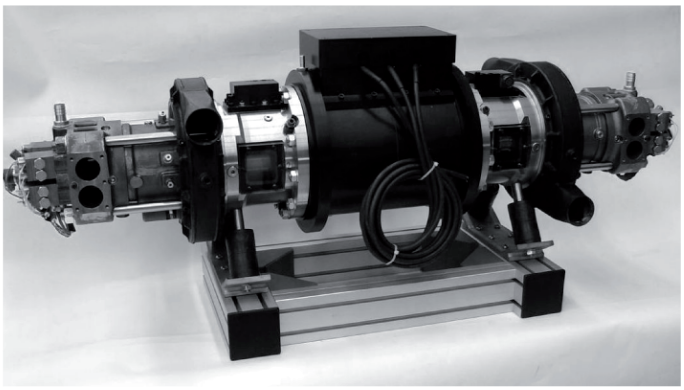
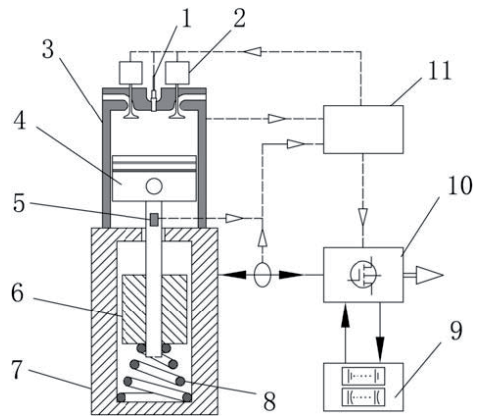


Abbildung 11: Darstellung des FPEC-Prototypen [16]

2.1.3 Einzelkolbenbauweise

Free Piston Engine Project, Sir Joseph Swan Institute for Energy Research, Newcastle, Großbritannien
Die Konzepte des Free Piston Engine Project wurden bereits in Kapitel 2.1.2 beschrieben. Eine Variante in Einzelkolbenbauweise wurde zur Validierung der Entwicklungspotenziale des Freikolbenansatzes als Simulationsmodell aufgebaut **[11]**.

Internal Combustion Linear Generator Integrated Power System – ICLG, Nanjing University of Science and Technology, China
Das Internal Combustion Linear Generator Integrated Power System, kurz ICLG-Konzept, ist ein Freikolbenkonzept mit elektrischer Energieauskopplung in Einzelkolbenbauweise. Die Verbrennungskomponente des ICLG arbeitet nach dem 4-Takt-Verfahren mit einem fremdgezündeten Benzingemisch. Der Ladungswechsel wird über eine Kopfumkehrspülung mit elektromagnetisch angesteuerten Ventilen realisiert (vgl. Abbildung 12). Die Rückführung des Freikolbens nach der Expansionsphase wird durch eine Spiralfeder unterstützt. Die elektrische Energieauskopplung erfolgt durch einen zylindrisch aufgebauten Lineargenerator mit bewegter Spule. Als Vorteile gegenüber den in anderen Systemen überwiegend eingesetzten Lineargeneratoren mit bewegten Läufermagneten werden beim Lineargenerator mit bewegter Wicklung die geringere Masse des Läufers, eine geringe Temperaturbelastung der Permanentmagnete und damit insgesamt ein geringer Aufwand für die Kühlung aufgeführt **[19]**. Für die Realisierung des 4-Taktprozesses wird der Lineargenerator nicht nur zur elektrischen Energieauskopplung, sondern auch zur aktiven Steuerung des Systems verwendet. Im Einlasshub wird der Kolben durch die Lineargeneratorkraft zurückgeholt. In den folgenden Zyklen wird der Lineargenerator weiterhin zur aktiven Regelung der Systemstabilität verwendet **[18]**.



1. Zündkerze
2. elektromagnetische Ventile
3. Verbrennungszylinder
4. Kolben
5. Wegsensor
6. Läufer des Lineargenerators
7. Stator des Lineargenerators
8. Rückfedereinheit
9. Energiespeichereinheit
10. Umrichter
11. elektronische Steuereinheit

Abbildung 12: Funktionsprinzip des ICLG [18]

Die Variabilität des ICLG-Freikolbenkonzepts erlaubt eine Anpassung des Kolbenhubs in den einzelnen Takten zur Wirkungsgradoptimierung. Der Expansionshub nach der Verbrennung wird im Vergleich zum Kompressionshub in Anlehnung an den Atkinson-Zyklus verlängert. Dies wird durch ein spätes Öffnen der Auslassventile erreicht und ermöglicht eine vollständige Umsetzung der Verbrennungsenergie. Zur Verifikation der in der Simulation gewonnenen Erkenntnisse wurde ein erster Prototyp aufgebaut (vgl. Abbildung 13) und getestet. Das Verdichtungsverhältnis in den Versuchen am Prüfstand variiert von $\varepsilon = 6{,}4$ in der Kompression bis $\varepsilon = 10{,}6$ in der Expansion. Mit dem ICLG-Prototypen wurde bei einer Betriebsfrequenz von $f = 25$ Hz eine Systemleistung von $P = 2{,}2$ kW erreicht. Angeblich entspricht dies einem Wirkungsgrad von $\eta = 32$ %. Die Simulation stellt mit einem optimierten System eine maximal erreichbaren Wirkungsgrad von $\eta = 42$ % in Aussicht **[18]**.

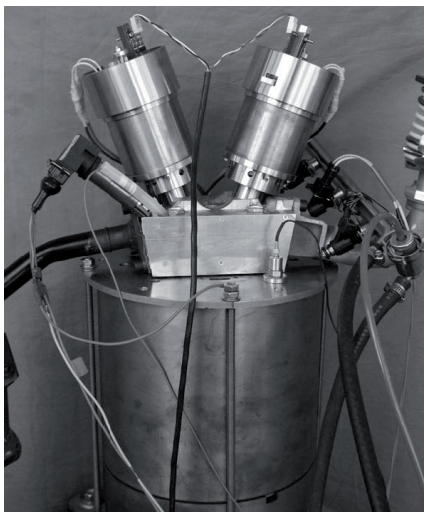


Abbildung 13: Prototyp des ICLG [18]

Bohrung	62 mm
Hub (variabel)	max. 70 mm
Bewegte Masse	3 kg
Maximalkraft Lineargenerator	4,1 kN

Tabelle 4: Spezifikation des ICLG-Prototypen [18]

Active Crank Train Free Piston Engine, University of Lincoln, Großbritannien
An der University of Lincoln wird in Zusammenarbeit mit Lotus Engineering Ltd ein 4-Takt Freikolbenmotor entwickelt. Im Vordergrund der Untersuchung steht zunächst die Brennverfahrensentwicklung in Richtung des idealen Gleichraum-Otto-Prozesses. Für die experimentellen Untersuchungen wurde aus einem konventionellen Vierzylindermotor ein modifizierter Einzylinder-Versuchsmotor aufgebaut **[20]**. Der Verbrennungszylinder inkl. Zylinderkopf wurde deutlich angehoben, um später einen Lineargenerator integrieren zu können (vgl. Abbildung 14). Mit der ersten Ausbaustufe wurden bislang verschiedene Kolbentrajektorien untersucht. Hierfür wurde die Kurbelwelle mit einem 25 kW Servomotor gekoppelt. Der Servomotor arbeitet im Arbeitstakt generatorisch und in den folgenden drei Takten (Ausstoßen, Ansaugen und Verdichten) motorisch. Über die Ansteuerung des Servomotors kann die Kolbengeschwindigkeit in den Umkehrpunkten beeinflusst werden, daher die Bezeichnung Active Crank Train (engl.: aktiver Kurbeltrieb). Mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen ist in der weiteren Entwicklung geplant, den Servomotor durch einen Lineargenerator zu ersetzen. Durch die damit einhergehende Entkopplung von der Kurbelwelle wird das Konzept erst zum wirklichen Freikolbenmotor.

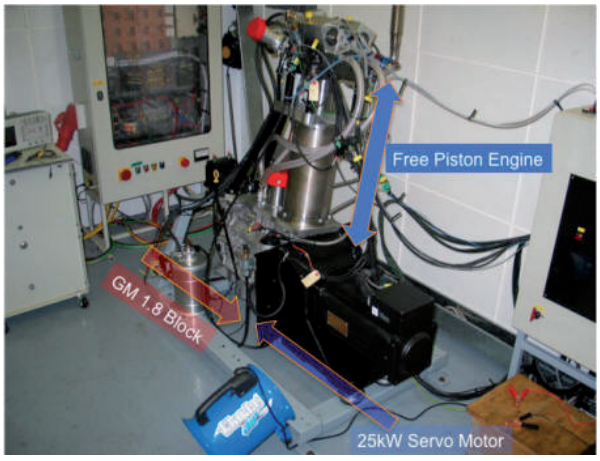


Abbildung 14: Versuchsmotor des Lotus ACT Free Piston Engine [20]

Freikolbenlineargenerator – FKLG, DLR, Deutschland
Der Freikolbenlineargenerator (FKLG) ist das Konzept eines Freikolbenmotors mit elektrischer Energieauskopplung, welches seit dem Jahr 2002 am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt Stuttgart entwickelt wird. Die Kurbelwelle wird in einem FKLG durch einen Lineargenerator und eine Gasfeder ersetzt. Dadurch kann der Kolben eine in gewissen Grenzen frei definierbare Bewegung beschreiben.

Das Funktionsprinzip einer Einzelkolbeneinheit des FKLG ist in Abbildung 15 dargestellt. Der Kolben oszilliert zwischen dem Brennraum des Verbrennungsteils und dem gegenüberliegenden Rückfederraum der Gasfeder. Auf der linken Seite ist der Verbrennungszylinder mit den für den Ladungswechsel im Zylinderkopf integrierten Ventilen dargestellt. Die Entwicklungen am DLR konzentrieren sich auf das Zweitakt Verfahren mit kopfgespültem Prozess. Zwar sind bestehende Zweitaktkonzepte Viertakt-Prozessen unterlegen, doch bietet der FKLG neue Freiheitsgrade, mit denen die Verbrennung optimiert werden kann. Zudem ermöglicht das System eine annähernd konstante Betriebsfrequenz, wodurch die Auslegung der Zweitakt Spülung deutlich erleichtert wird. Mittig in die Kolbenstange integriert ist der magnetische Läufer, der mit dem Stator zusammen den Lineargenerator bildet. Der Lineargenerator wandelt die kinetische Energie aus der Bewegung des Kolbens mit hohem Wirkungsgrad in elektrische Energie. Die Rückfedereinheit (rechts) dient der Zwischenspeicherung der Energie aus dem Verbrennungsprozess und bewirkt die Rückstellung des Kolbens in den oberen Totpunkt der Verbrennung. Die Rückfedereinheit wird als Gasfeder ausgeführt und kann über das Steuerventil durch Anpassung der Gasmasse zur Kontrolle des Hubraumes verwendet werden **[3]**.

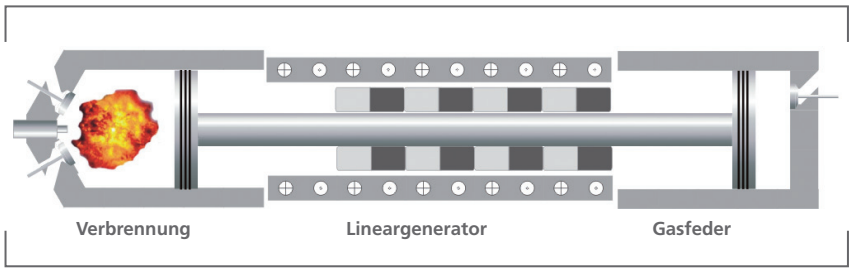


Abbildung 15: Funktionsprinzip des FKLG

In Kombination mit einem vollvariablen Ventiltrieb entsteht ein Verbrennungsmotor, der mehr Freiheitsgrade zur Optimierung des Verbrennungsprozesses besitzt als alle Verbrennungsmotoren bisher aufweisen konnten (vgl. Abbildung 16). Allerdings stellt gerade dieser Aspekt die größte Herausforderung dar, da der Verbrennungsprozess ein kompliziert zu steuernder, instationärer Prozess ist. Mit dem gewählten Ansatz über die Gasfeder kann der Gesamtprozess in zwei Phasen unterteilt werden: Dem nur bedingt steuerbaren Verbrennungs-Expansionsprozess und einem steuerbaren Gasfeder-Kompressionsprozess, der es ermöglicht, alle Parameter reproduzierbar einzustellen. Das langfristig anvisierte HCCI-Brennverfahren (Homogeneous Charge Compression Ignition = Kompressionszündung eines homogenen Kraftstoff-Luftgemisches) ermöglicht die Senkung der Stickoxidemissionen durch die Absenkung der Verbrennungstemperaturen. Die motorische Umsetzung dieses Brennverfahrens wird durch eine variable Verdichtung, die der Freikolbenlineargenerator systemimmanent besitzt, erleichtert. Zugleich vereinfacht die Variabilität der Verdichtung den Umgang mit verschiedenen Kraftstoffen (Flexfuel), da diese sehr unterschiedliche Eigenschaften besitzen.

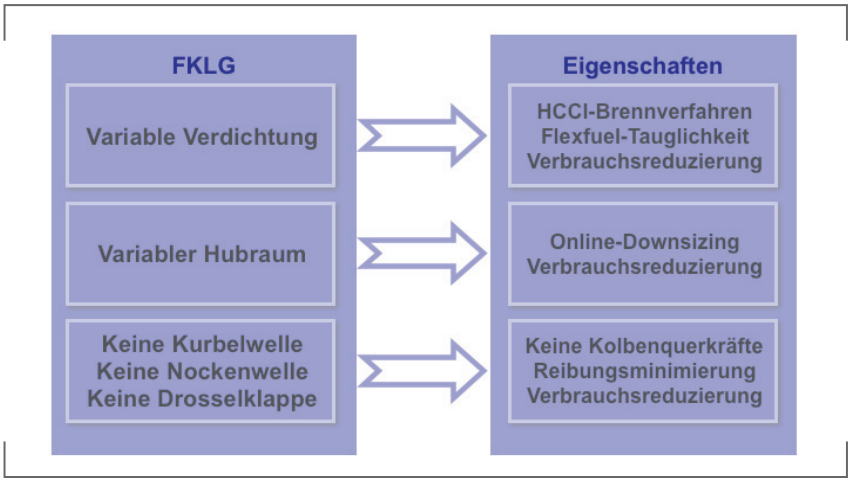


Abbildung 16: Kerneigenschaften des FKLG

Das FKLG-Einzelbrennraumsystem befindet sich technologisch in der Phase der Darstellung des Proof of Concept (PoC). Kernaufgabe ist dabei, die Regelungsstrukturen zu entwickeln und die Regelgüte zu verifizieren. Die Subsysteme wurden am Prüfstand erfolgreich getestet und haben einen Entwicklungsstand erreicht, der für den Proof of Concept (PoC) ausreichend ist. Wirkungsgradoptimierungen und Zuverlässigkeitsverbesserungen der Subsysteme stehen nach dem Erreichen des PoC im Vordergrund. Die bauliche Integration der Subsysteme muss nach dem Erreichen des PoC ebenfalls vorangetrieben werden.

2.2 Kenngrößen des Freikolbenlineargenerators

Die Betrachtung der Eignung eines Freikolbenmotors als Range Extender wird in diesem Kapitel anhand des Freikolbenlineargenerators durchgeführt. Der Freikolbenlineargenerator bietet aufgrund seiner Variabilitäten und der Integration der Gasfeder das höchste Potenzial, zuverlässig und effizient betrieben werden zu können.

2.2.1 Definitionen und Randbedingungen

Für die folgenden Betrachtungen eines Range Extenders auf Basis eines Freikolbenlineargenerators wird ein Basismodul mit 20 kW elektrischer Leistung definiert.

Grundsätzlich wird bei der Betrachtung des Freikolbenlineargenerators zwischen zwei Konzepten, der *Einzelbrennraum*- und der *Zentralbrennraumbauweise*, unterschieden (Abbildung 17 und Abbildung 18).

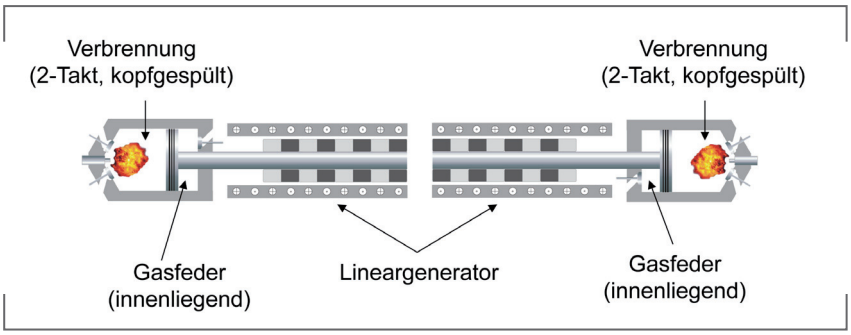


Abbildung 17: FKLG-Modul bestehend aus zwei Einzelbrennraumaggregaten

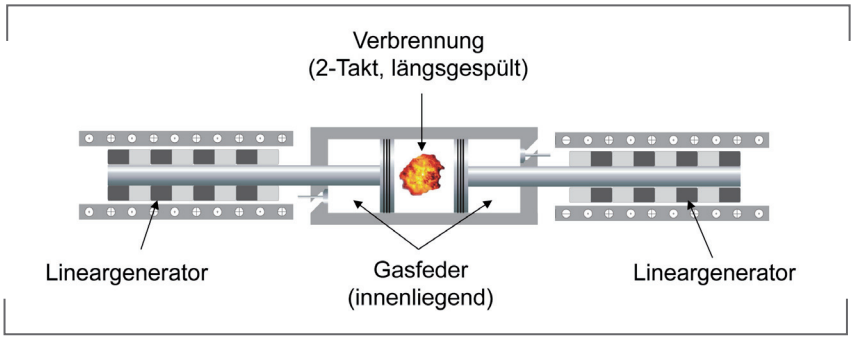


Abbildung 18: FKLG-Modul bestehend aus einem Zentralbrennraumsystem mit zwei Gasfedern und zwei Lineargeneratoren

Der Einzelbrennraum zeichnet sich durch einen Einzylindermotor mit elektromagnetischem Ventiltrieb aus, auf dessen Kolbenrückseite eine Gasfeder integriert ist. Eine starre Kolbenstange verbindet den Kolben mit einem Lineargenerator. Dieses System wird als ein FKLG-Aggregat bezeichnet. Zwei gegenläufige Aggregate können zu einem FKLG-Modul zusammengefügt werden. Für die Einzelbrennraumbauweise ist ein Modul in Abbildung 17 dargestellt. Das Einzelbrennraum-Konzept wird mit einem kopfgespülten 2-Takt-Verfahren betrieben, der Kraftstoff wird nach dem Schließen der Ventile eingespritzt, um Spülverluste zu vermeiden. Um ein Spülgefälle zu erzielen und die Abgasenergie zu nutzen, wird der Motor mit einem elektrisch unterstütztem Abgasturbolader ausgestattet.

Das zweite Konzept, die Zentralbrennraumbauweise, beschreibt ein Gegenkolben-Freikolbensystem: Zwei gegenüberliegende Kolben arbeiten in einem zentral angeordneten Brennraum, so dass ein vollständiger Ausgleich der bewegten Massen möglich ist. Auch hier befindet sich wie beim Einzelbrennraum hinter den Kolben eine integrierte Gasfeder und der Kolben ist über eine Stange mit dem Lineargenerator verbunden. Der Zentralbrennraum ist nur als Modul bestehend aus einem zentralen Brennraum, zwei Gasfedern und zwei Lineargeneratoren konstruierbar und ist in Abbildung 18 dargestellt. Aus Gründen der Analogie kann auch hier ein Aggregat definiert werden, dass an der Symmetrielinie des Moduls im Verbrennungsraum getrennt wird. Der Ladungswechsel erfolgt durch Längsspülung über Schlitze in der Zylinderwand.

Die hier dargestellten FKLG-Varianten zeichnen sich durch innenliegende Gasfedern aus. Dabei wird die Gasfeder unterhalb des Verbrennungskolbens integriert. Generell ist es auch möglich, die Gasfedern separat anzuordnen, wie dies schematisch in Abbildung 15 dargestellt ist. Für die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Untersuchungen wird eine integrierte Gasfeder zugrunde gelegt.

Es werden im Folgenden die Konzepte des Einzel- wie auch des Zentralbrennraums untersucht. Um einen Vergleich mit konventionellen Motorenkonzepten zu ermöglichen, werden neben den systembezogenen Kenngrößen auch solche Leistungsdaten bestimmt, die den Lineargenerator aus der Betrachtung eliminieren. Das bedeutet, dass ein mechanischer effektiver Wirkungsgrad bestimmt wird, der mit dem effektiven Wirkungsgrad eines konventionellen Verbrennungsmotors verglichen werden kann.

2.2.2 Abschätzung der Systemmasse und der Leistungsdichte

Für die Abschätzung der Systemmasse eines FKLG-Moduls in Einzel- und Zentralbrennraumbauweise wird für das verbrennungsmotorische Teilsystem, die Gasfeder und den Lineargenerator mit Leistungselektronik eine detaillierte Massenbilanz erstellt.

Dabei fallen unter die Verbrennungskomponente die Massen für den Kolben, die Kolbenstange, die Buchse, das Gehäuse und beim Einzelbrennraum der Zylinderkopf und der Ventiltrieb. Peripherie-Komponenten wir Turbolader, Wasserpumpe, Elektrik, Steuergerät und Gesamtgehäuse werden unter der Rubrik „Allgemeine Komponenten“ subsumiert.

Für die innenliegende Gasfeder werden die Massen eines Zylinderkopfes, eines elektromagnetischem Schaltventils, eines Ausgleichsbehälter und weiteres Zubehör wie Schläuchen und Sensoren bilanziert. Für den Lineargenerator werden Läufer, Stator und die Leistungselektronik betrachtet.

Übersicht Massenberechnung			**Einzel-brennraum**	**Zentral-brennraum**
Aggregat				
Verbrennung	(inkl. Kolben, Kolbenstange, Buchse, Gehäuse, bei Einzelbrennraum: Zylinderkopf, Ventiltrieb)	kg	11,0	5.2
Gasfeder (innenliegend)	(inkl. Zylinderkopf, Elektromagnetischem Schaltventil, Ausgleichsbehälter, Zubehör)	kg	2.9	2.9
Lineargenerator	(inkl. Läufer, Stator, Leistungselektronik)	kg	14.7	14.7
Modul				
Allgemeine Komponenten	(inkl. Turbolader, Wasserpumpe, Elektrik, Steuergerät, Gehäuse)	kg	10.9	10.2
Summe		**kg**	**68.3**	**55.9**
Modul ohne Lineargenerator			38.8	26.4

Tabelle 5: Massenberechnung für die Systeme Einzelbrennraum und Zentralbrennraum

Die Berechnung wird über die elektrische Leistung des Systems skaliert und der Hub und der Zylinderdurchmesser entsprechend einer spezifischen Zylinderleistung in kW/l bestimmt. Zunächst werden die Massen der Einzelkomponenten für jeweils ein Aggregat bilanziert und anschließend für ein Modul zusammengefasst.

Die Ergebnisse zeigt Tabelle 5. Für ein Modul mit 20 kW ergibt sich für die Einzelbrennraumbauweise ein Gewicht von 68.3 kg. Für die Zentralbrennraumbauweise reduziert sich die Masse aufgrund nichtvorhandener Zylinderköpfe und Ventiltriebe auf nur 55.9 kg.

Die Leistungsdichten liegen folglich beim Einzelbrennraum bei 290 W/kg und beim Zentralbrennraum bei 350 W/kg.

Der FKLG wandelt die chemische Energie des Kraftstoffs in elektrische Energie. Um einen Vergleich mit anderen Systemen wie dem konventionellen Hubkolbenmotoren zu ermöglichen, wird im Folgenden eine Unterscheidung zwischen mechanischer und elektrischer Energie vorgenommen. Bei der Betrachtung der Massen oder auch des Wirkungsgrads in Bezug auf die chemisch-mechanische Energiewandlung wird der Lineargenerator nicht berücksichtigt. Zwar benötigt ein FKLG im Betrieb einen Lineargenerator zur Leistungsauskopplung, doch kann fiktiv eine Unterteilung zwischen chemisch-mechanischer und chemisch-elektrischer Energiewandlung erfolgen.

Die Massenanteile für ein Modul ohne Lineargenerator betragen 38.8 kg für den Einzelbrennraum und 26.4 kg für den Zentralbrennraum. Damit liegen die Leistungsdichten bei 510 W/kg für den Einzelbrennraum und bei 750 W/kg beim Zentralbrennraum. Die bewegte Masse des Kolbensystems besteht aus dem Läufer des Lineargenerators, einer Kolbenstange und dem Kolben und beträgt pro Modul 6.6 kg.

2.2.3 Packaging

Der Freikolbenlineargenerator bietet im Hinblick auf einen Einsatz als Range Extender im Vergleich zu konventionellen Motorkonzepten neue Möglichkeiten in Bezug auf das Packaging. Der Lineargenerator ist im Konzept des FKLG systemimmanent enthalten und muss nicht nachträglich an das Motorkonzept adaptiert werden. Zum einen bilden Verbrennungskomponente und Lineargenerator eine kompakte Einheit. Zum anderen ergeben sich für den Lineargenerator unterschiedliche Anordnungsmöglichkeiten, welche die Außenabmessungen des Systems beeinflussen. So ist es beispielsweise möglich, ein langes schmales System durch Hintereinanderschaltung von zwei axial angeordneten Aggregaten zu realisieren (vgl. Abbildung 19 links). Alternativ kann der Lineargenerator auch parallel zum Freikolbenmotor angeordnet werden (vgl. Abbildung 19 rechts). Dadurch erhält man ein breiteres und gleichzeitig kürzeres System. Ein weiterer Freiheitsgrad ergibt sich durch die Skalierbarkeit des Lineargenerators. In bestimmten Grenzen können Länge und Breite der elektrischen Maschine bauraumtechnisch angepasst werden, solange die aktive Fläche in der Maschine konstant bleibt. Im Folgenden werden Betrachtungen zum Packaging des Einzelbrennraums, wie auch zum Packaging des Zentralbrennraums durchgeführt.

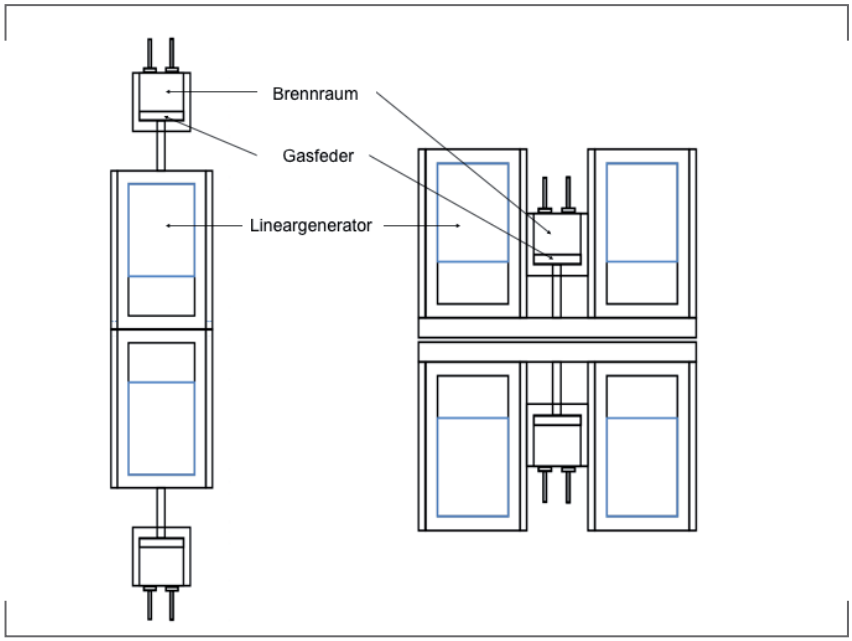


Abbildung 19: Packagingvarianten für ein FKLG-Einzelbrennraum Modul

Einzelbrennraum

Der Bauraum, den ein FKLG-Einzelbrennraummodul als Range Extender beansprucht, lässt sich anhand der geometrischen Randbedingungen ermitteln. Aus der Systemsimulation für die geforderte Leistungsklasse von 20 kW erhält man die Eingangsparameter für die Auslegung der Teilkomponenten Verbrennung, Gasfeder und Lineargenerator. Für die Definition des Verbrennungszylinders sind Hub und Bohrung die bestimmenden Größen. Die Gasfeder wird als innenliegende Gasfeder auf der Rückseite des Verbrennungskolbens integriert. Dies wirkt sich positiv auf das Packaging aus, da kein zusätzlicher Gasfederzylinder nötig ist. Ausgehend von der Geometrie des Verbrennungs- und des Gasfederraums sowie des dazwischen laufenden Kolbens ergeben sich die funktionalen Grundabmessungen der motorischen FKLG-Komponente (vgl. Abbildung 20). Weiterhin werden die Zylinderköpfe für Verbrennung und Gasfeder sowie die erforderliche Wandstärke für den Zylinderblock aufsummiert (vgl. Tabelle 6). Die Abmessungen des Lineargenerators ergeben sich aus der aktiven Fläche, die für die gewünschte Leistungsklasse erforderlich ist. Hinzu kommt ein Aufschlag für die Struktur der Läufermatrix, welche die Magneten aufnimmt und die Verbindung zur Lagerung und der Verbindungsstütze zur Kolbenstange herstellt. Eine schematische Darstellung eines FKLG-Einzelbrennraumaggregats mit zwei symmetrisch zur Kolbenstange angeordneten Linearmaschinen zeigt Abbildung 20. Zur Realisierung eines Einzelbrennraummoduls werden zwei solcher Einzelbrennraumaggregate entgegengesetzt angeordnet (vgl. Kapitel 2.2.1).

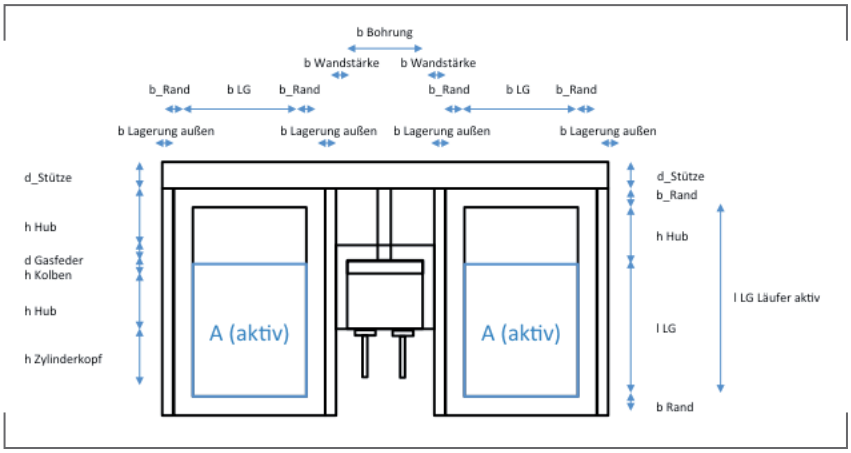


Abbildung 20: Packaging für ein FKLG-Einzelbrennraum Aggregat

Die exemplarisch berechnete Konfiguration des FKLG-Einzelbrennraummoduls beansprucht im Fahrzeug einen Bauraum von 66.3 cm in der Länge, 39.3 cm in der Breite und 15 cm in der Höhe (vgl. Tabelle 6).

Packaging Einzelbrennraum			
Länge			
d_Gasfeder		1,0	cm
h_Zylinderkopf		15,0	cm
h_Kolben		3,0	cm
d_Stütze		5,0	cm
h_hub		4,6	cm
b_Rand		0,5	cm
l_ges_Läufer	l_LG_Läufer_aktiv+2*b_Rand+h+d_Stütze	30,0	cm
l_ges_Zylinder_ZB	EB: d_Stütze+h+d_GF+h_Kolben+h+h_ZK	33,2	cm
Gesamtlänge Modul	2*l_ges_Zylinder	**66,3**	**cm**
Breite			
b_Lagerung_Aussen		2,0	cm
b_Wandstärke Zylinder	2-Takt: 2.5*Bohrung; 4-Takt: 1.5*Bohrung	3,4	cm
b_LG		5,9	cm
b_Rand		2,0	cm
b_Bohrung		4,6	cm
Gesamtbreite Modul	2*(b_LG+2*b_Rand)+4*b_Lagerung_Aussen+2*b_Wandstärke+b	**39,3**	**cm**
Höhe			
Gesamthöhe Modul		**15,0**	**cm**

Tabelle 6: Packaging-Berechnung für FKLG-Einzelbrennraum Modul

Zentralbrennraum
Führt man die Betrachtungen zum Packaging analog für die Zentralbrennraumbauweise durch, so verändern sich im Vergleich zur Einzelbrennraumbauweise nur wenige Systemmaße. Durch das Zusammenlegen des Verbrennungsraumes von zwei Aggregaten nimmt der Verbrennungszylinder eine andere Gestalt an (vgl. Abbildung 21). Anstatt eines kopfgespülten Ladungswechsels, wie beim Einzelbrennraum realisiert, erfolgt der Ladungswechsel über eine schlitzgesteuerte Längsspülung durch den Zylinder. Durch den Wegfall der Ventilsteuerung fällt das Konzept der Zentralbrennraumbauweise kompakter aus.

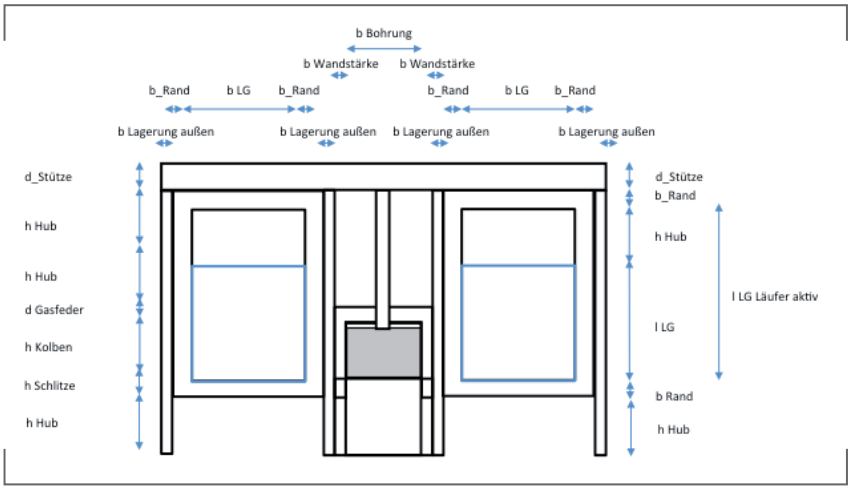


Abbildung 21: Packaging für ein FKLG-Zentralbrennraum Aggregat

Die exemplarisch berechnete Konfiguration des FKLG-Zentralbrennraummoduls beansprucht im Fahrzeug einen Bauraum von 60.0 cm in der Länge, 39.3 cm in der Breite und 15 cm in der Höhe (vgl. Tabelle 7). Das Zentralbrennraummodul verspricht gegenüber dem Einzelbrennraummodul also eine Längeneinsparung von ca. 10 %.

Packaging Zentralbrennraum			
Länge			
d_Gasfeder		1,0	cm
h_Schlitze		2,0	cm
d_Stütze		5,0	cm
h_hub		4,6	cm
h_Kolben	ZB: h_Kolben = Hub h	4,6	cm
b_Rand		0,5	cm
l_ges_Läufer	l_LG_Läufer_aktiv+2*b_Rand+h+d_Stütze	30,0	cm
l_ges_Zylinder_ZB	ZB: d_Stütze+h+d_GF+h_Kolben+h_Schlitze+h	21,7	cm
Gesamtlänge Modul	2*l_ges_Zylinder	**60,0**	**cm**
Breite			
b_Lagerung_Aussen		2,0	cm
b_Wandstärke Zylinder	2-Takt: 2.5*Bohrung; 4-Takt: 1.5*Bohrung	3,4	cm
b_LG		5,9	cm
b_Rand		2,0	cm
b_Bohrung		4,6	cm
Gesamtbreite Modul	2*(b_LG+2*b_Rand)+4*b_Lagerung_Aussen+2*b_Wandstärke+b	**39,3**	**cm**
Höhe			
Gesamthöhe Modul		**15,0**	**cm**

Tabelle 7: Packaging-Berechnung für FKLG-Zentralbrennraum Modul

Die geometrische Auslegung beider Bauweisen basiert auf einem Prototypen, der am DLR für den Versuchsbetrieb konzipiert wurde. Besonders hervorzuheben ist die flache Bauweise mit einer Bauhöhe von nur 15 cm. Diese Eigenschaft prädestiniert den FKLG für den Einbau in Fahrzeugkonzepte, bei denen der FKLG in der Unterbodenstruktur integriert wird. Nicht in der Betrachtung enthalten sind die Nebenaggregate und der Platzbedarf der Frischluft- und Abgaskonditionierung. Diese Komponenten können für den konkreten Anwendungsfall je nach Anforderungsprofil möglichst kompakt um den FKLG angeordnet werden, oder im Rahmen des Gesamtfahrzeugpackagings optimiert werden.

2.2.4 Herstellkosten

Die Differenzierung von Range Extender Konzepten wird immer auch die Herstellkosten einer Technologie berücksichtigen. Die Kalkulation der Herstellkosten berücksichtigt die Komponentenkosten, die zur Herstellung eines FKLG erforderlich sind. Die neben den Komponentenkosten anfallenden übrigen Herstellkosten können an dieser Stelle nicht berücksichtigt werden. Grundlage für die Berechnung der Komponentenkosten ist eine Stückzahl von 100.000 Einheiten pro Jahr. Anhand einer Mengendegression werden die Herstellkosten auch für kleinere Stückzahlen dargestellt.

Einzelbrennraum
Die Komponentenkosten des FKLG-Einzelbrennraummoduls summieren sich auf 1934 € (vgl. Tabelle 8). Subtrahiert man den Lineargenerator und die Leistungselektronik, so erhält man einen Stückpreis von 1500 € für den Freikolbenmotor ohne elektrischen Energiewandler.

Mechanik	Druckgußgehäuse, Zylinderkopf, Zylinderkopfdichtung, Zylinderlaufbuchse, Aluminiumkolben, Kolbenstange, Montageteile, Spezialschrauben	315,00	€
Kühlsystem	Wasserpumpe, Schläuche, PTC und NTC Sensor	48,00	€
Kraftstoffsystem	HD-Einkolben-Benzinpumpe, DI-Einspritzdüse, HD-Benzinleitungen	142,00	€
Ansaugsystem	Luftfilter, Kompressor, Kunststoffsaugrohre	355,00	€
Ventiltrieb	Vollvariabler Ventiltrieb	240,00	€
Abgasanlage	Abgassensorik, Oxi-Kat	42,00	€
Elektrik	Zündkerze. Zündkabel, Zündspule, Motorkabelsatz, Motorsteuergerät, 2x Drucksensor Brennraum, 2x Drucksensor Gasfeder	317,00	€
Gasfeder	Ventiltechnik, Ausgleichsbehälter, Schläuche	40,00	€
Lineargenerator	Kupferwicklung, Blechpacket, NdFeB-Magnete, Läuferschale, Läuferführungen, Temperatursensor, Wegsensor	270,00	€
Leistungselektronik		165,00	€
Summe exklusive Lineargenerator		**1499,00**	**€**
Summe inklusive Lineargenerator		**1934,00**	**€**

Tabelle 8: Komponentenkosten eines Einzelbrennraumsystems bei 100.000 Einheiten pro Jahr

Kosten bei Stückzahlen	5000	1.870	€/Modul
	10000	1.770	€/Modul
	20000	1.676	€/Modul
	50000	1.559	€/Modul
	100000	1.499	€/Modul

Tabelle 9: Stückzahlabhängige Komponentenkosten eines Einzelbrennraumsystems

Die Komponentenkosten erhöhen sich aufgrund der angenommenen Kostendegression mit sinkender Stückzahl. Bei 5000 Einheiten pro Jahr steigen die Kosten um ungefähr 25 % im Vergleich zu einer Stückzahl von 100.000 Einheiten pro Jahr (vgl. Tabelle 9).

Zentralbrennraum
In Analogie zur Kostenkalkulation beim Einzelbrennraummodul wird der Komponenteneinkauf für das Zentralbrennraummodul berechnet. Das Modul inklusive Lineargenerator und Leistungselektronik beläuft sich auf ca. 1500 € (vgl. Tabelle 10). Das Zentralbrennraummodul ist damit inklusive elektrischem Energiewandler kostenseitig bereits auf dem Niveau des Einzelbrennraummoduls ohne den elektrischen Energiewandler. Der Kostenvorteil ergibt sich in erster Linie durch das Zusammenlegen der Einzelbrennräume zu einem Zentralbrennraum. Durch den Einsatz von Spülschlitzen kann auf die Verwendung des kostenintensiven Zylinderkopfs mit vollvariablem Ventiltrieb verzichtet werden. Wird der Lineargenerator und die Leistungselektronik nicht berücksichtigt, so ergeben sich Stückkosten von 1066 Euro bei einer Stückzahl von 100.000 Einheiten pro Jahr. Bei den Komponentenkosten wurde die gleiche Kostendegression wie beim Einzelbrennraum angenommen. Die detaillierte Aufstellung ist Tabelle 11 zu entnehmen.

Mechanik	Druckgußgehäuse, Zylinderlaufbuchse, Kohlenstoffkolben, Kolbenstange, Montageteile, Spezialschrauben	202,00	€
Kühlsystem	Wasserpumpe, Schläuche, PTC und NTC Sensor	48,00	€
Kraftstoffsystem	HD-Einkolben-Benzinpumpe, DI-Einspritzdüse, HD-Benzinleitungen	142,00	€
Ansaugsystem	Luftfilter, Kompressor, Kunststoffsaugrohre	315,00	€
Ventiltrieb	kein Ventiltrieb, da Schlitze	0,00	€
Abgasanlage	Abgassensorik, Oxi-Kat	42,00	€
Elektrik	Zündkerze. Zündkabel, Hochspannungsgenerator, Motorkabelsatz, Motorsteuergerät, 1x Drucksensor Brennraum, 2x Drucksensor Gasfeder	277,00	€
Gasfeder	Ventiltechnik, Ausgleichsbehälter, Schläuche	40,00	€
Lineargenerator	Kupferwicklung, Blechpacket, NdFeB-Magnete, Läuferschale, Läuferführungen, Temperatursensor, Wegsensor	270,00	€
Leistungselektronik		165,00	€
Summe exklusive Lineargenerator		**1066,00**	**€**
Summe inklusive Lineargenerator		**1501,00**	**€**

Tabelle 10: Komponentenpreise eines Zentralbrennraumsystems bei 100.000 Einheiten pro Jahr

Kosten bei Stückzahlen	5000	1.330	€/Modul
	10000	1.259	€/Modul
	20000	1.192	€/Modul
	50000	1.109	€/Modul
	100000	1.066	€/Modul

Tabelle 11: Stückzahlabhängige Komponentenkosten eines Zentralbrennraumsystems

2.2.5 Betriebspunkte und Wirkungsgrad
Die Betriebsstrategie des Freikolbenlineargenerators sieht eine konstante Systemfrequenz nahe der Eigenfrequenz des Freikolbensystems für einen weiten Lastbereich vor. Die Eigenfrequenz des Systems wird in erster Linie von der Masse des frei schwingenden Kolbensystems bestehend aus Verbrennungskolben, Läufer des Lineargenerators

und der Kolbenstange bestimmt. Die Betriebsfrequenz des FKLG bleibt über dem gesamten Betriebsbereich nahezu konstant. Dieses Verhalten erleichtert die Abstimmung des Verbrennungsprozesses. Außerdem kann dadurch der Gaswechsel des 2-Takt Prozesses besser abgestimmt werden. Durch die mechanische Entkopplung zwischen Radantrieb und Motor ist es außerdem nicht notwendig, das gesamte Drehzahl-Drehmoment-Kennfeld eines herkömmlichen Motors abzudecken. Durch die Entkopplung ist es nur noch nötig, einen Last-Kennlinie abzustimmen. Für jeden einzelnen Lastpunkt existiert dann ein einziger Betriebspunkt, wodurch die Auslegung, Abstimmung und Applikation erheblich vereinfacht wird.

Zur Ermittlung der Kenngrößen des Freikolbenlineargenerators für den Einsatz als Range Extender wird eine vereinfachte Gesamtsystemsimulation verwendet. Dabei werden die Verbrennungswirkungsgrade und Gasfederwirkungsgrade vorgegeben. Die Werte wurden anhand von Messungen und Komponentensimulationen ermittelt. Der Verlauf der Kraft im Lineargenerator wird bei allen Simulationen so vorgegeben, dass die Kraft konstant ist und jeweils der Bewegungsrichtung des Kolbens entgegengesetzt ist. Es wird also während der Kompression und Expansion im Lineargenerator die gleiche Arbeit verrichtet.

Die Kräfte, die sich aus den resultierenden Druckverläufen im Verbrennungs- und Gasfedersystem ergeben, sind für den Volllastpunkt des Einzelbrennraumsystems in Abbildung 22 exemplarisch dargestellt. Zu Beginn befindet sich der Verbrennungskolben im unteren Totpunkt. Nach dem Ladungswechsel wird das Frischgas verdichtet und mit der Zündung steigt die Verbrennungskraft steil an. In der Expansionsphase wird das Gas im Verbrennungszylinder entspannt und die Gegenkraft der Gasfeder nimmt in Folge des Druckanstiegs zu. Während beider Phasen wirkt die Lineargeneratorkraft entgegen der Bewegungsrichtung der Kolbenstange und wandelt die technisch nutzbare Arbeit in elektrische Energie um.

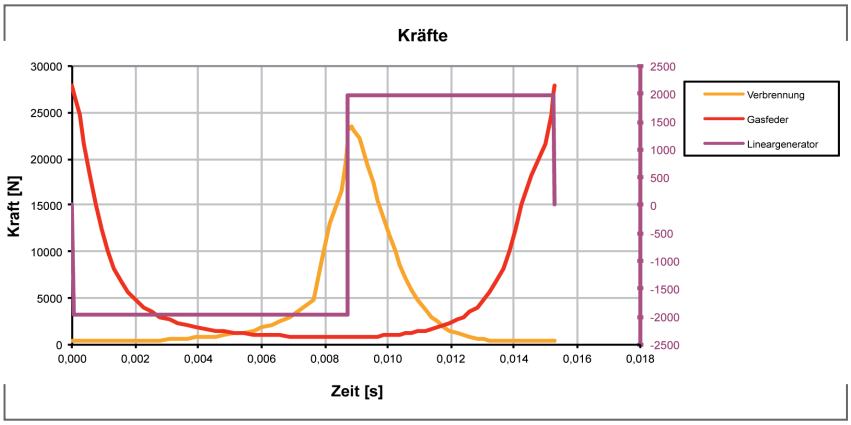


Abbildung 22: Kraftverläufe der Teilsysteme des FKLG über eine Periode

Die Summe der äußeren Kräfte ist gleich das Produkt aus der Beschleunigung der Kolbenstange mal der Kolbenmasse. Durch Integration der Beschleunigung erhält man die Kolbengeschwindigkeit und schließlich die Trajektorie der Kolbenbewegung (vgl. Abbildung 23). Während der Verbrennung wird der Kolben in der Expansionsphase stärker beschleunigt als in der Kompressionsphase durch die Expansion der Gasfeder. Das Resultat ist ein nicht-sinusförmiger Bewegungsverlauf.

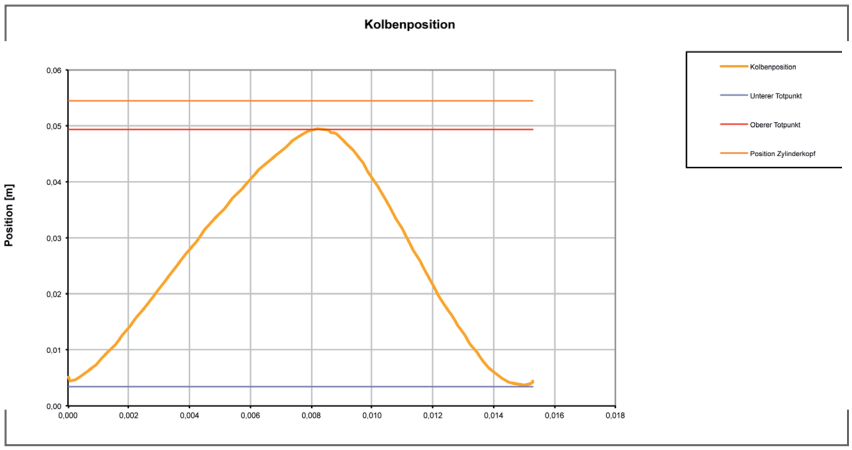


Abbildung 23: Trajektorie der Kolbenbewegung über einer Periode

Die Systemsimulation wird für eine Maximalleistung von 20 kW durchgeführt. Für die geometrische Auslegung erweist sich ein Kolbendurchmesser von 46 mm bei einem maximalen Hub von 54 mm als geeignet. Das Verdichtungsverhältnis wurde auf 10 festgelegt. Durch die Anpassung des Drucks im unteren Totpunkt der Verbrennung sowie einer Hubvariation wird eine Lastvariation von 25 % bis 100 % Last erreicht (vgl. Tabelle 12). Die Masse des frei schwingenden Kolbensystems, die konstruktiv mit 3,3 kg pro Aggregat angegeben wird, führte zu Werten der Betriebsfrequenz im Frequenzbereich von 50 - 65 Hz. In der Tabelle 12 wird zunächst die elektrische Systemleistung pro Aggregat angegeben. Für das komplette FKLG-Modul steht demzufolge die doppelte Leistung zur Verfügung. Die Lineargeneratorkräfte steigen von ca. 1200 N im 25%-Lastpunkt auf ca. 2000 N im Volllastpunkt (vgl. auch Abbildung 22).

Übersicht		**25 % Last**	**50 % Last**	**75 % Last**	**100 % Last**
Hub	mm	26,00	33,00	40,00	46,00
Druck im unteren Totpunkt	bar	1,20	1,57	1,83	1,92
Verdichtungsverhältnis epsilon_VB	-	10,00	10,00	10,00	10,00
Masse Kolbensystem	kg	3,30	3,30	3,30	3,30
Berechnete Frequenz	Hz	53,92	57,19	60,54	65,44
Berechnete el. Systemleistung (2-Takt) nach Abzug Nebenaggregate	kW	2,76	5,00	7,66	10,00
Systemleistung pro Modul	kW	5,52	9,99	15,33	20,01
Berechnete Lineargeneratorkraft	N	1236,37	1616,47	1879,51	1962,12
System					
Systemwirkungsgrad [%] inkl. Nebenaggregate	%	31,04	31,90	32,71	32,74
Mechanischer Wirkungsgrad [%] inkl. Nebenaggregate	%	34,16	35,02	35,82	35,83
Systemwirkungsgrad [%] ohne Nebenaggregate	%	35,86	35,84	35,75	35,57
Mechanischer Wirkungsgrad [%] ohne Nebenaggregate	%	38,98	38,95	38,86	38,66
Gasfederwirkungsgrad [%]	%	96,00	96,00	96,00	96,00
Verbrennungswirkungsgrad [%]	%	42,00	42,00	42,00	42,00
Lineargeneratorwirkungsgrad [%]	%	92,00	92,00	92,00	92,00

Tabelle 12: Parameter und Ergebnisse der Lastvariation des FKLG-Einzelbrennraumsystems

Zur Berechnung des Systemwirkungsgrads des Freikolbenlineargenerators werden neben den Wirkungsgraden der hier aufgeführten Subsysteme Verbrennung, Gasfeder und Lineargenerator auch die Kolbenreibung sowie die Nebenaggregate berücksichtigt (vgl. Tabelle 12). Die Bilanzierung der Nebenverbraucher berücksichtigt den Aufwand eines elektrisch unterstützten Abgasturboladers (ATL), der unter Nutzung der Abgasenergie für die Bereitstellung des Ladedrucks für die Verbrennung sorgt. Hinzu kommt die elektrische Leistungsaufnahme des elektromagnetischen Ventiltriebs, der elektrischen Ölpumpe und der elektrischen Kühlwasserpumpe. Für das FKLG-Einzelbrennraummodul ist die Summe der elektrischen Leistung der Nebenaggregate sowie der Leistungsbedarf der einzelnen Komponenten in Abbildung 24 dargestellt. Der Leistungsbedarf des elektrisch unterstützten ATL sowie des elektromagnetischen Ventiltriebs nimmt mit steigender Leistungsabgabe des FKLG-Moduls annähernd linear zu. Die restlichen Nebenaggregate hingegen sind relativ unabhängig vom Betriebspunkt.

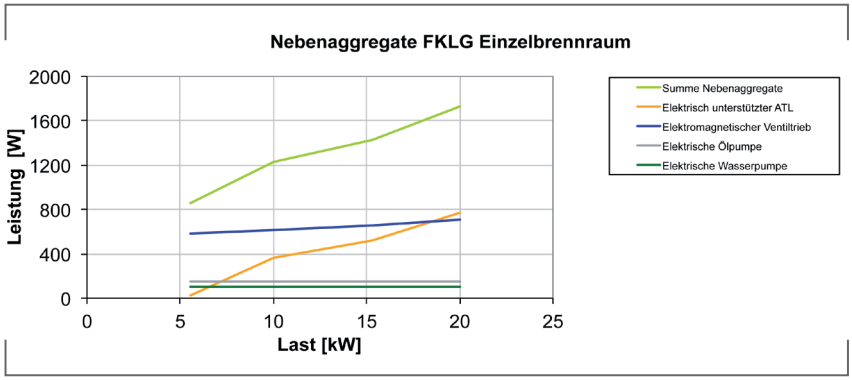


Abbildung 24: Leistungsbedarf der Nebenaggregate FKLG Einzelbrennraum

Für die Vergleichbarkeit des FKLG-Moduls mit anderen Motorkonzepten wird aus dem Systemwirkungsgrad des Gesamtsystems ein mechanischer Wirkungsgrad ohne die Energiewandlung im Lineargenerator berechnet. Dieser mechanische Wirkungsgrad beschreibt die Effizienz der Energiewandlung von der Umsetzung der Primärenergie in der Verbrennung bis zur mechanischen Energie. Ohne Berücksichtigung der Nebenaggregate liegt der mechanische Wirkungsgrad des FKLG-Einzelbrennraummoduls für alle Betriebspunkte oberhalb von 38,5 % (vgl. Abbildung 25). Mit Berücksichtigung der Nebenaggregate werden je nach Lastpunkt zwischen 34 und 36 % mechanischem Wirkungsgrad erreicht. Dabei nimmt der Wirkungsgrad mit zunehmender Last zu.

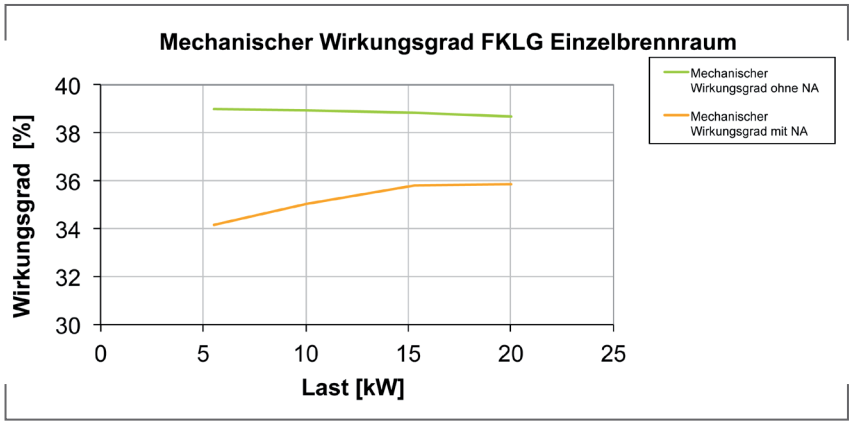


Abbildung 25: Mechanischer Wirkungsgrad des FKLG Einzelbrennraumsystems über der Last

Analog zur Auslegung des FKLG-Einzelbrennraums lassen sich die betrachteten Kenngrößen auch für ein Modul eines FKLG-Zentralbrennraums simulieren. Der mechanische Wirkungsgrad ohne Nebenaggregate entspricht nahezu den Werten des FKLG-Einzelbrennraums (vgl. Abbildung 26). Bei Berücksichtigung der Nebenaggregate werden im Vergleich zum FKLG-Einzelbrennraum für alle Betriebspunkte höhere Wirkungsgrade größer 37 % erzielt. Dies ist im Wesentlichen auf den Wegfall des elektromagnetischen Ventiltriebs beim Zentralbrennraumkonzept zurückzuführen.

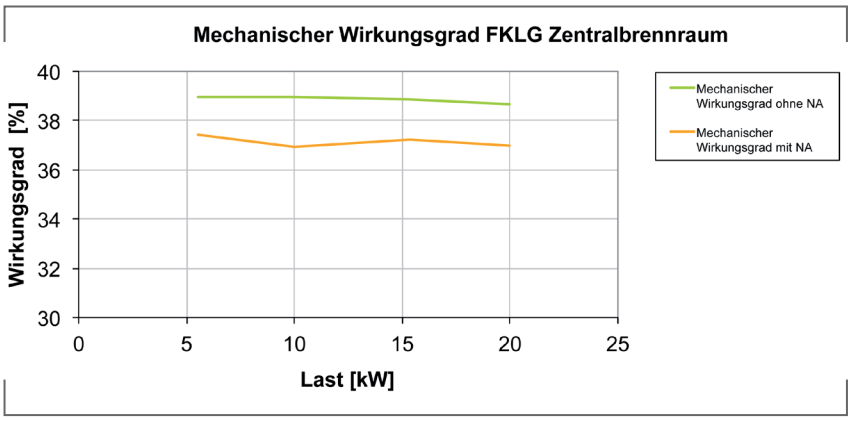


Abbildung 26: Mechanischer Wirkungsgrad des FKLG Zentralbrennraumsystem über der Last

2.2.6 Kühlung

Der Kühlbedarf des Freikolbenmotors wird in erster Linie durch die freigesetzte Abwärme des Verbrennungsprozesses bestimmt. Im Beispiel des 20 kW FKLG-Moduls werden bei Volllast aus der Brennstoffmasse mit dem unteren Heizwert zirka 60 kW Primärleistung umgesetzt. Bei einem Verbrennungswirkungsgrad von ca. 42 % stehen somit 25,6 kW als mechanische Leistung zur Verfügung. Für eine überschlagsmäßige Abschätzung des Kühlbedarfs wird angenommen, dass die verbleibende Abwärme von 34,4 kW je zur Hälfte über das Abgas und zur Hälfte über die Wandwärme abgeführt wird. Die über das Kühlwasser abzuführende Kühlleistung beträgt folglich zirka 17 kW. Eine Darstellung des Energieflusses ist in Abbildung 27 dargestellt.

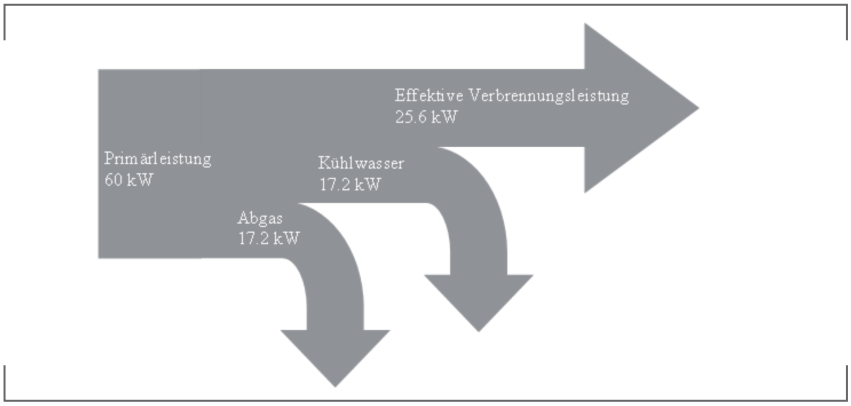


Abbildung 27: Energiefluss im Freikolbenlineargenerator (100 % Last)

Der für die Abführung der Kühlleistung erforderliche Kühlwassermassenstrom kann anhand folgender Gleichung berechnet werden:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{Rücklauf} - T_{Vorlauf}) \quad (1)$$

Bei einer Wärmekapazität des Kühlwassers von c_p = 4,2 kJ/kgK ergibt sich der benötigte Kühlwassermassenstrom in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Vorlauftemperatur und Rücklauftemperatur. Dies ist in Abbildung 28 dargestellt. Bei einer Temperaturdifferenz von 40 Kelvin ist ein Massenstrom von 6 kg/min erforderlich.

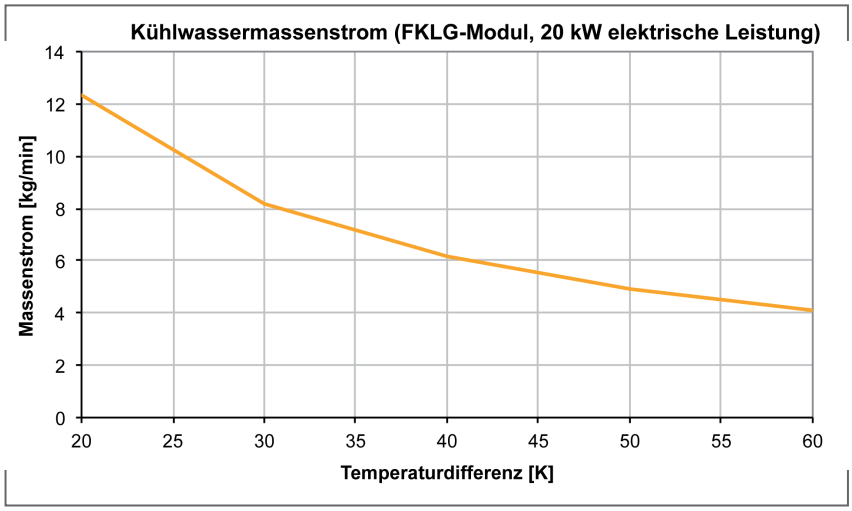


Abbildung 28: Kühlwassermassenstrom eines 20 kW FKLG-Modul in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz

2.2.7 Skalierbarkeit

Der Freikolbenlineargenerator kann neben dem bislang primär betrachteten Modul mit 20 kW Leistung auch für andere Leistungsklassen ausgelegt werden. Die Anpassung erfolgt im Gegensatz zur Variation der Betriebspunkte in Kapitel 2.2.5 durch eine konstruktive Variation der geometrischen Abmessungen des FKLG. Die elektrische Komponente lässt sich einfach über die Anpassung der Größe der Läufer und Statoren skalieren. Für die Verbrennungs- und Gasfederkomponenten bietet sich als Stellgröße eine Vergrößerung oder Verkleinerung des Hubraums an. Der in dieser Studie betrachtete Leistungsbereich von 5 – 50 kW lässt eine Beschränkung auf ein einzelnes FKLG-Modul zu, das aus zwei Aggregaten besteht. Prinzipiell ist für deutlich größere Leistungen auch eine Parallelschaltung mehrerer Aggregate möglich.

Ausgehend von den Kenngrößen des 20 kW FKLG-Moduls werden weitere Ausbaustufen berechnet. Die Variation des Hubraums erfolgt über eine Anpassung des Kolbenhubs unter Beibehaltung des konstanten Hub/Bohrungsverhältnisses von 1. Dadurch steigt die Leistung bei einer Erhöhung des Hubes in der dritten Potenz. Dies ist in Abbildung 29 dargestellt. Während die Leistung mit steigendem Hub (und damit Hubvolumen) zunimmt, bleibt die Frequenz des Gesamtsystems annähernd konstant, da die zunehmende Kolbenmasse die höheren Kräfte kompensiert.

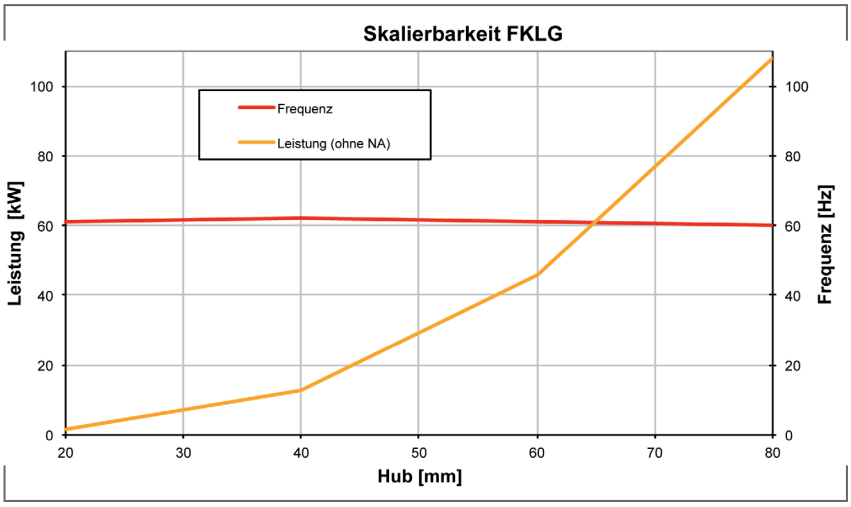


Abbildung 29: Skalierbarkeit FKLG-Modul

Die Ergebnisse zeigen, dass für die Ausbaustufe mit 5 kW Leistung ca. 25 mm Hub ausreichen und für 50 kW ca. 45 mm Hub benötigt werden. In der Auslegung nicht berücksichtigt ist der Leistungsbedarf der Nebenaggregate, die sich nicht beliebig verkleinern lassen. Bei geringen Leistungen (5 kW Modul) nimmt der Verlustanteil der Nebenaggregate im Verhältnis zur Verbrennungsleistung zu. In Summe bedeutet das, dass der Aufbau eines 5 kW Moduls im Hinblick auf den Wirkungsgrad optimiert werden muss, da die Verluste anteilig immer größer werden, je kleiner das Modul skaliert wird. Die Skalierung einer großen Ausbaustufe (50 kW) ist hingegen problemlos möglich. Die Nebenaggregate lassen sich hierfür optimal auslegen. Der FKLG kann somit problemlos skaliert werden, allerdings ist davon auszugehen, dass bei sehr geringen Leistungsklassen der Wirkungsgrad sinkt.

2.2.8 Kraftstoffflexibilität und Vielstofffähigkeit

Die Kraftstoffflexibilität beschreibt die Möglichkeit, eine Energiewandler-Technologie auf unterschiedliche Kraftstoffe anzupassen. Dabei erfolgt die Anpassung im Entwicklungsstadium und der Betrieb erfolgt weiterhin monovalent. Im Gegensatz hierzu wird die Vielstofffähigkeit als die Möglichkeit definiert, im Betrieb unterschiedliche Kraftstoffe zu verwenden, also einen mindestens bivalenten Betrieb zu ermöglichen.

Generell kann der FKLG für beliebige Kraftstoffe ausgelegt werden Er besitzt somit eine hohe Kraftstoffflexibilität. Abhängig vom gewählten Kraftstoff kann eine Anpassung des Einspritzsystems und Tanksystems, der Brennraumgeometrie und der Nebenaggregate erforderlich sein. Eine Randbedingung ist die Direkteinspritzung, die im Hinblick auf die Emissionen bei einem 2-Takt Prozess unerlässlich ist.

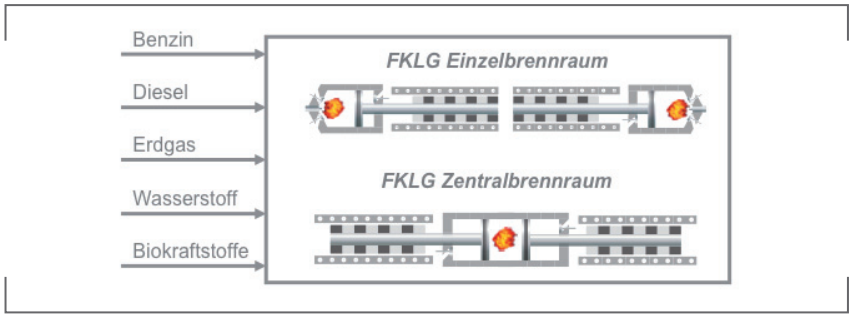


Abbildung 30: Potenzielle Kraftstoffe zur Verwendung in einem FKLG

Die Kraftstoffflexibilität und Vielstofffähigkeit von Verbrennungsmotoren wurde ausführlich in der Studie **[23]** behandelt. Betrachtet man die Vielstofffähigkeit, so müssen zwei Aspekte unterschieden werden:

1. Kraftstoffspeicher, Kraftstoffversorgung und Injektorsystem
2. Betriebsstrategie und Brennverfahren

Bezüglich der Kraftstoffversorgung können nicht alle Kraftstoffe beliebig variiert werden. So benötigt Erdgas ein anderes Kraftstoffversorgungssystem und auch Injektorsystem als Benzin. Benzin hingegen lässt sich mit Ethanol mischen. Hierbei müssen lediglich wenige Bauteile wie z. B. Dichtungen angepasst werden. Diesel wiederum erfordert nach aktuellem Stand ein Hochdrucksystem und bestimmte Injektoren, die mit denen eines Otto-Prozesses nicht vergleichbar sind. Somit ist es zwar theoretisch möglich, den Motor auf mehrere Kraftstoffe auszulegen, doch verbietet es die hardwaretechnische Umsetzung, Einspritzsysteme und Kraftstoffversorgungen für beliebig viele Kraftstoffe vorzusehen. Zielführend sind daher nur Kraftstoffe, die mit einem oder maximal zwei Kraftversorgungssystemen auskommen. Beispiel für ein System ist z. B. die beliebige Kombination von Benzin und Ethanol. Ein Beispiel für zwei Systeme sind Fahrzeuge, die einen bivalenten Betrieb mit Benzin und Ergas ermöglichen.

Betrachtet man die optimale Umsetzung der unterschiedlichen Kraftstoffe, so ist die Anpassung des Verdichtungsverhältnisses von großem Vorteil. Bedeutend ist vor allem die Cetan-Zahl (Zündwilligkeit) bzw. Oktanzahl (Klopffestigkeit) eines Kraftstoffs. Bei heterogener Selbstzündung (Dieselverfahren) ist die Cetan-Zahl bedeutend, für die fremdgezündete Prozesse wird normalerweise die Oktanzahl angegeben. Je höher die Oktanzahl eines Kraftstoffs ist, desto höher kann verdichtet werden, ohne dass Klopfen auftritt. Eine Erhöhung der Verdichtung hat im Allgemeinen eine Erhöhung des Wirkungsgrades zur Folge. So liegt die Oktanzahl von Benzin im Bereich von 95, die von Ethanol bei 114, so dass das Verdichtungsverhältnis mit zunehmendem Ethanolanteil erhöht werden kann.

Der Freikolbenlineargenerator mit seiner Variabilitäten ermöglicht eine einfache Anpassung an unterschiedliche Kraftstoffe sogar im Betrieb. Vor allem die Variation des Verdichtungsverhältnisses ermöglicht es, unterschiedliche Kraftstoffe verbrauchsoptimal umzusetzen. Somit steht ein zentrales Merkmal zur Verfügung, um Vielstofffähigkeit im Betrieb effektiv realisieren zu können.

2.2.9 Dynamik

Für die Betrachtung des dynamischen Verhaltens des Freikolbenlineargenerators sind drei Vorgänge in Bezug auf den Einsatz als Range Extender von Interesse. Im Betrieb ist die Dynamik eines Lastsprungs von 0 auf 100 % Last relevant. Bezüglich des Startens ist relevant, wie schnell ein Kaltstart bzw. Warmstart mit anschließendem Lastsprung auf 100 % Last erfolgen kann.

Die dynamische Anpassung der elektrischen Ausgangsleistung wird im FKLG unter anderem durch eine Variation der Drücke in der Verbrennungs- und in der Gasfederkomponente erreicht (vgl. Kapitel 2.2.5). Bei einem Lastsprung von einem Betriebspunkt niedriger Last auf einen Betriebspunkt hoher Last ist für die Dynamik des Motors zunächst das Laderkonzept maßgebend. Wird der Ladedruck im Einlasskanal erhöht, so nimmt auch der Frischluftmassenstrom und damit die maximal mögliche Leistung zu. Die Simulation des Ansprechverhaltens eines FKLG-Aggregats zeigt, dass bei einem Sprung auf 20 kW eine Zeitkonstante von zirka 0.6 s erreicht wird. Die Simulation wurde mit einer einfachen Reglerstrategie für den Druckregler ermittelt. Mit optimierten Reglerparametern wird in einer späteren Serienentwicklung eine weitere Verbesserung der Ansprechdynamik erwartet.

Der Start des Freikolbenlineargenerators erfordert keinen separaten Starter. Zur Inbetriebnahme des Systems wird der Lineargenerator motorisch betrieben; in der Einschwingphase verdichtet der Kolben auf der Verbrennungs- und der Gasfederseite Luft und erreicht nach wenigen Zyklen seine Betriebsfrequenz. Erst dann wird auf der Verbrennungsseite Kraftstoff eingespritzt und gezündet.

Für den Kaltstart ist prinzipiell eine Vorwärmung des Systems möglich. Durch die Bestromung der Wicklungen des Lineargenerators kann das Kühlwasser erwärmt werden und über den Kühlwasserkreislauf das ganze System vorgeheizt werden. Alternativ kann das System während der Einschwingphase ohne Verbrennung auch auf eine beliebige Frequenz und Verdichtung abweichend von den Betriebsparametern eingestellt werden. Eine Erhöhung der Verdichtung in der Startphase führt zur Verbesserung der Verbrennung und verringert die Rohemissionen.

Der Warmstart ist prinzipiell vergleichbar mit dem Verhalten herkömmlicher Verbrennungsmotoren. Zum Anfahren des Systems kommt wieder der Lineargenerator zum Einsatz. Abhängig von der Dauer der Betriebspause und beispielsweise den Temperaturen in den Komponenten für die Abgasnachbehandlung kann, wie auch beim Kaltstart, das Verdichtungsverhältnis angepasst werden, um schnell wieder eine ausreichende Betriebstemperatur zu erreichen.

2.2.10 NVH

Für Freikolbenmotoren gelten bezüglich des Geräuschverhaltens vergleichbare Bedingungen wie bei Hubkolbenmotoren. Allerdings treten aufgrund der linearen Bewegung keine freien Massenkräfte und Massenmomente auf. Erreicht wird dies durch die Synchronisation von zwei gegenläufigen FKLG-Aggregaten. Die Vibrationen eines FKLG sind sehr gering.

Im Hinblick auf die Geräuschentwicklung ist das Verbrennungsgeräusch dominant. Der Verbrennungsdruckverlauf ist hierfür die maßgebende Größe. Er wird durch die Menge und Geschwindigkeit der Kraftstoffumsetzung im Verlauf der Verbrennung bestimmt. Im Ansaugsystem lassen sich Strömungspulsationen durch geeignete Luftfiltersysteme

reduzieren. Gleiches gilt für das Abgassystem, in welchem die zyklischen Druckwellen durch Schalldämpfer absorbiert werden können. Mechanische Geräusche, die sich beispielsweise aus dem Lauf der Lagerung ergeben, werden als verhältnismäßig gering eingeschätzt.

2.2.11 Emissionen

Im Hinblick auf die Emissionen wird der FKLG als Otto-Version betrachtet. Für Ottomotoren gelten in Europa die in Tabelle 13 dargestellten Grenzwerte.

Otto	**Euro 3** $_{2001}$	**Euro 4** $_{2006}$	**Euro 5** $_{2011}$	**Euro 6** $_{2016}$
CO	2300	1000	1000	1000
HC	200	100	100	100
NO_x	150	80	60	60
NMHC	-	-	68	68
PM	-	-	5	5
Angaben in mg/km	NMHC Nichmethankohlenwasserstoffe		PM Partikel	

Tabelle 13: Grenzwerte der EURO-Gesetzgebung für Otto-Motoren

Die Aufnahme des Partikelgrenzwertes ab Euro 5 ist vor allem in der Verbreitung von direkteinspritzenden Ottomotoren begründet.

Die Herausforderungen im Hinblick auf geringe Emissionen bei einem 2-Takt Otto Prozess bestehen in der Gemischaufbereitung und der Vermeidung von HC-Emissionen durch das gleichzeitige Öffnen der Ein- und Auslassventile. Letzteres lässt sich dadurch vermeiden, dass die Einspritzung erst nach dem Schließen des Auslassventils erfolgt. Auch ist einen Direkteinspritzung zwingend erforderlich, da mit einer Saugrohreinspritzung die HC-Kurzschlussströmung nicht vermieden werden kann.

Für den Betrieb des Motors existieren prinzipiell mehrere Möglichkeiten. So kann der Motor über die gesamte Last-Kennlinie mit Lambda = 1 betrieben werden, wodurch die Verwendung eines herkömmlichen 3-Wege Katalysators möglich wird. Eine solche Strategie kann unter anderem durch Anpassung des Hubes, des Ladedrucks oder der Ventilsteuerzeiten oder durch Kombination dieser Parameter erreicht werden. Bei einer Lambda = 1 Strategie ist darauf zu achten, dass die Kurzschlussströmung während des Gaswechsels minimiert wird, da ansonsten trotz eines stöchiometrischen Gemisches im Brennraum global ein mageres Gemisch entsteht.

Neben dem Lambda = 1 Betrieb kann der Motor in der Teillast auch mager betrieben werden, was allerdings die Verwendung eines NO_x-Speicherkatalysators erfordert. Bei Verwendung eines solchen Katalysators wäre auch eine Kurzschlussströmung unkritisch, da bereits ein mageres Gemisch im Brennraum vorliegt.

Neben den herkömmlichen Brennverfahren ist die Implementierung eines homogenen Selbstzündungs-Brennverfahrens möglich. Die Freiheitsgrade Hub, Verdichtung und Ventilsteuerzeiten bei annähernd konstanter Frequenz über der Last-Kennlinie bilden ideale Voraussetzungen für die Realisierung. Der Vorteil der homogenen Selbstzündung liegt vor allem in den erhöhten Wirkungsgraden und geringeren Emissionen (vor allem NO_x und Partikel **[21]**, **[22]**).

Unabhängig vom Brennverfahren bleibt die größte Herausforderung die optimale Gemischaufbereitung im Brennraum. Hier kann jedoch die moderne Einspritztechnik mit hohen Drücken und der Verwendung von Mehrlochinjektoren bzw. ggf. auch Piezo-Injektoren unterstützen. Aufgrund des momentanen Entwicklungsstandes können keine validierten Aussagen über die Emissionen getroffen werden, doch scheint die Erreichung der Euro-Grenzwerte aufgrund der vielen Freiheitsgrade sowie der in herkömmlichen Verbrennungsmotoren eingesetzten und bekannten Einspritztechnik sehr wohl möglich. Gelingt die Implementierung einer homogenen Selbstzündung, so sind sogar noch deutlich niedrigere Emissionswerte erreichbar.

2.2.12 Kompetenzen am Standort Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg existieren zahlreiche Unternehmen, die verbrennungsmotorische Komponenten herstellen. Darunter finden sich beispielsweise OEM's wie Daimler, Porsche und Audi sowie zahlreiche Zulieferer und mittelständische Betrieb wie Mahle, Bosch, Behr, ZF, Tognum, Elgan, Elring-Klinger, Kolbenschmidt Pierburg, Stihl und viele mehr. Das Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Stuttgart besitzt weltweit einzigartiges Know-how bei der Entwicklung des Freikolbenlineargenerators. Mit den Forschungseinrichtungen IVK (Universität Stuttgart) und IFKM (Karlsruher Institut für Technologie) stehen hervorragende Forschungseinrichtungen zur Entwicklung des verbrennungsmotorischen Teilsystems zu Verfügung. Auch für die elektrischen und elektronischen Komponenten eines FKLG existieren zahlreiche Firmen. Beispiele hierfür sind Cyber Motor, SEW Eurodrive, Bosch, ZF und Epcos.

Brennstoffzelle

3.1 Darstellung der Brennstoffzellensysteme, welche für den Einsatz in einem Range Extender-Fahrzeug geeignet sind

3.1.1 Allgemeines

Der Einsatz der Brennstoffzellentechnik muss gemeinsam mit der Thematik der Wasserstoffversorgung und -speicherung betrachtet werden. Dies gilt auch, wenn die Brennstoffzelle als Range Extender genutzt wird. Ohne eine funktionierende Wasserstoffinfrastruktur und Speicherung muss auf Konzepte einer On-Board Wasserstoffherstellung über Reformer (Benzin, Diesel, Methanolreformer) oder Direkt Methanol Systeme zurückgegriffen werden. Im Folgenden wird deshalb kurz auf diese Punkte eingegangen. Die Betrachtung der möglichen Konzepte und der Vor- und Nachteile der Verwendung von mehr als einem Kraftstoff an Board ist eine zusätzliche Aufgabe. Untersuchungen zeigen deutlich, dass in Zukunft mehr Fahrzeuge mit Hybrid- und Range Extenderkonzepten zum Einsatz kommen (Abbildung 31), hieraus ergibt sich ein steigender Forschungsbedarf auf diesem Gebiet.

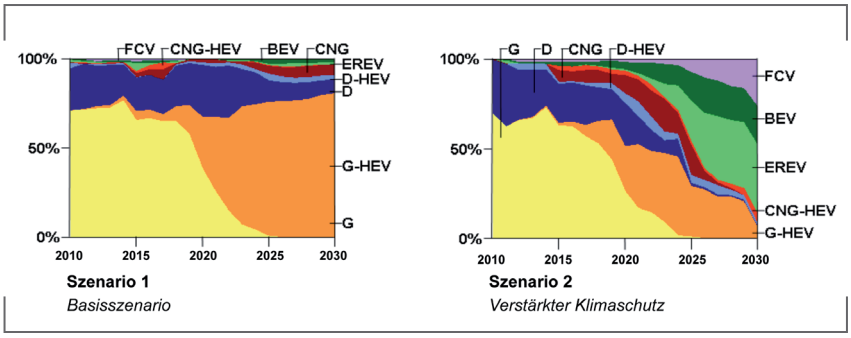


Abbildung 31: Prognosen für die Entwicklung der Fahrzeugtypen bis 2030

In der Untersuchung von **[1]** ergeben sich je nach Wahl der Szenarioparameter unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der zu erwartenden Fahrzeugflottenentwicklung. Während bei einer konservativen Annahme die Dominanz hybrider Antriebe signifikant ist, wird bei einem verstärkten Klimaschutzszenario der Großteil der Fahrzeugflotte, aus Elektrofahrzeugen mit einem elektrischen Range Extender (EREV) bestehen, zudem wird ein beträchtlicher Anteil durch Brennstoffzellenfahrzeuge abgedeckt.

Entwicklungsperspektiven und Lösungsansätze der Brennstoffzellentechnik in Fahrzeugen auf den Weg zur wirtschaftlichen Umsetzung der bisher entwickelten und demonstrierten Technologien sind bereits gegeben. Zur Serienumsetzung der Technologien sind in der ganzen Bandbreite von der Materialentwicklung bis zur Wasserstofferzeugung und versorgung noch jede Menge Konzept- und Detailarbeiten zu leisten, damit Serienfahrzeuge Realität werden können. Die im folgenden aufgelisteten Eigenschaften sind ein Ausschnitt des Aufwandes, der noch betrieben werden muss und soll Anreiz sein, sich mit Firmen, die bereits Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie betreiben, in Verbindung setzen zu können. Die Förderung und Entwicklungsfortschritte in den einzelnen Anwendungsbereichen und Technologien weisen Synergieeffekte auch in anderen Bereichen auf und führen zu Verbesserungen der Markteinführung dieser umweltfreundlichen und energiewirtschaftlich relevanten Technologien.

3.1.2 Anwendungsbereiche

Die Anwendungen der Brennstoffzelle als Wandler chemischer Energie in elektrische und Wärmeenergie umfassen ein breites Spektrum. Dies ist hauptsächlich dem hohen Wirkungsgrad (Abbildung 32) und der guten ökologischen Verträglichkeit der Brennstoffzellen geschuldet, bei Verwendung von „grünem Wasserstoff" entstehen keine klimaschädlichen bzw. gesundheitsschädlichen Stoffe.

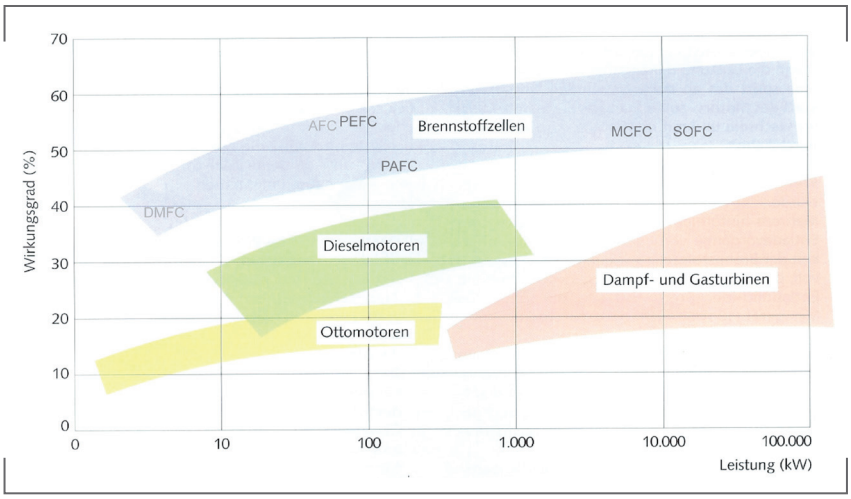


Abbildung 32: Vergleich der Wirkungsgradbereiche von Carnot-Kreisprozessen und offenen elektrochemischen Prozessen

Die Anwendungsbereiche der Brennstoffzellentechnologie lassen sich in drei Teilbereiche untergliedern (Abbildung 33) **[24]**

- Transport
- Stationär
- Portabel

Betrachten wir nur den Bereich Transport, so setzt sich dieser wiederum aus den Gebieten

- Straßenverkehr
- Schienenverkehr
- Schifffahrt
- Luftfahrt
- Raumfahrt

zusammen. Das Anwendungsfeld Straßenverkehr beinhaltet die zwei Hauptapplikationen Antrieb und Hilfsgenerator, zu denen auch der Range Extender zu zählen ist. Zur Realisierung eines Brennstoffzellensystems als Range Extender gibt es zahlreiche Möglichkeiten an Fahrzeugkonzepten und unterschiedliche Brennstoffzellentechnologien, auf die im Weiteren in Abschnitt 3.1.3. eingegangen wird und die in 3.2. für den Einsatz als Range Extender bewertet werden.

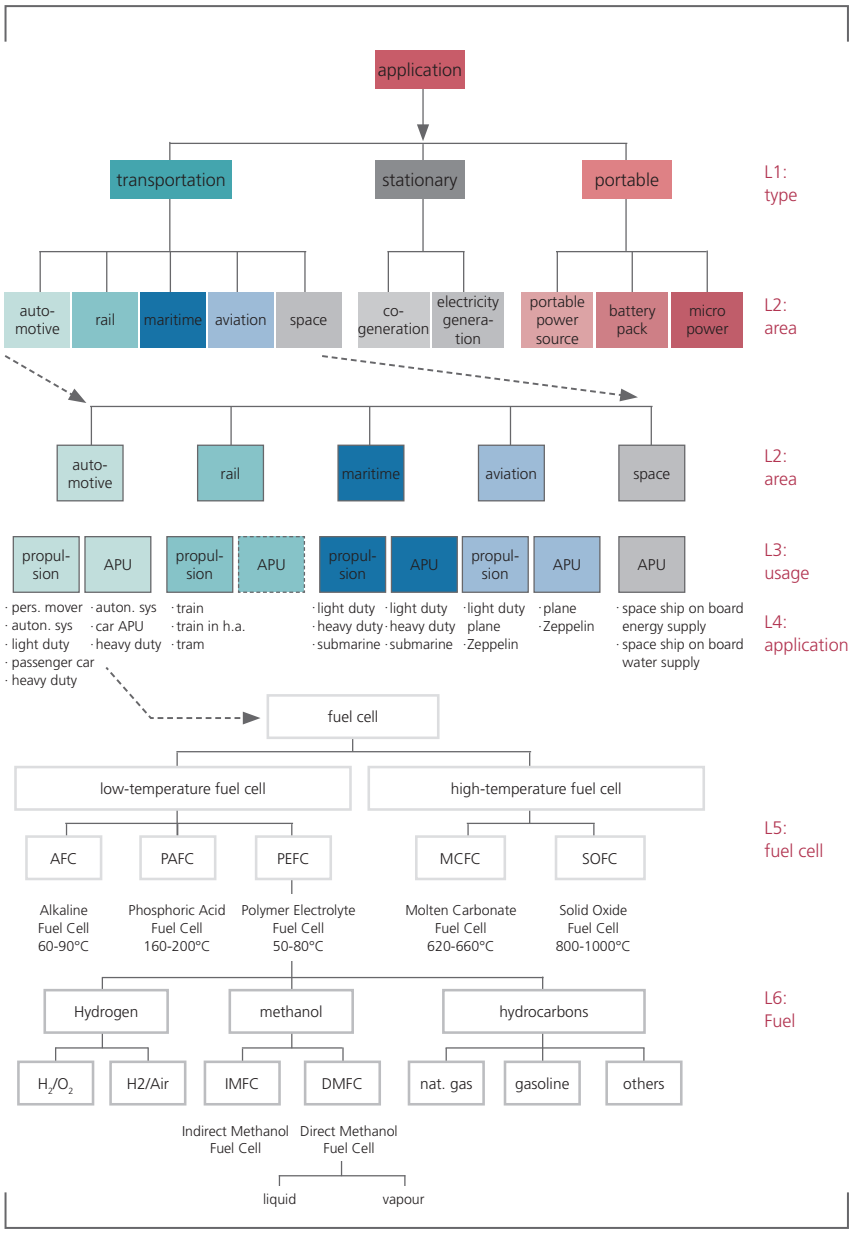


Abbildung 33: Klassifizierung der Anwendungen der Brennstoffzellentechnologien (Level 1 bis 6)

3.1.3 Brennstoffzellentechnologien

Aktuell werden 6 verschiedene Brennstoffzellentypen unterschieden, die in Abbildung 34 zusammengefasst sind (s.a. Kapitel 3.2). Elektrochemisch differenzieren sich die Brennstoffzellentechnologien prinzipiell nach der Transportrichtung der Ionen durch die Membran und der Art der transportierten Ionen (OH^-, H^+ CO_3^{2-} oder O^{2-}-Ionen). Diese Unterschiede resultieren aus der Art und dem Aufbau der Membran-Elektroden-Einheit, weitere Differenzierungsmerkmale sind die Arbeitstemperatur, der Brennstoffeinsatz, sowie der Einsatzzweck, kontinuierlicher oder dynamischer Betrieb.

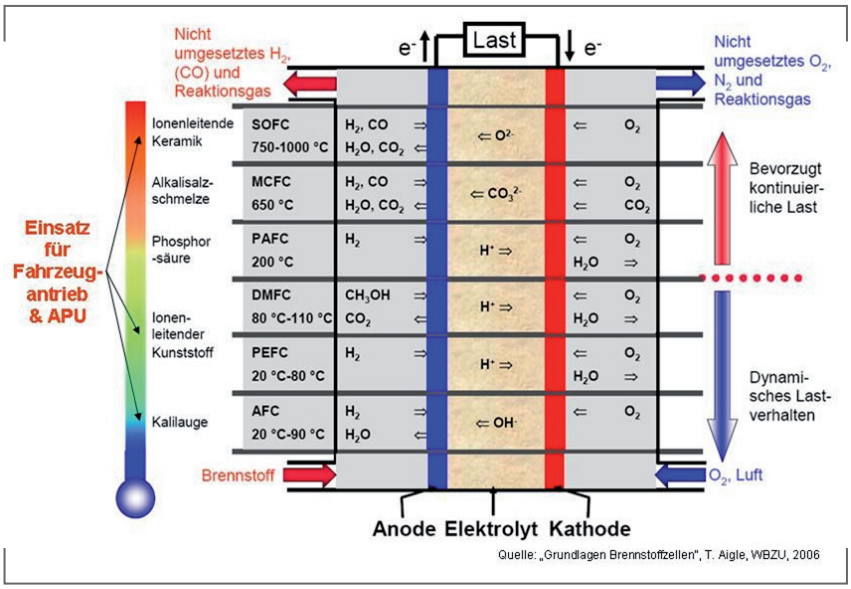


Abbildung 34: Brennstoffzellentypen

Der erste technische Einsatz einer Brennstoffzelle war bei der Apollo Mission, hier kam eine AFC (Alkaline Fuel Cell), mit flüssiger Kalilauge als Elektrolyt bei bis zu 90°C Betriebstemperatur, zum Einsatz.

Die Niedertemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (NT-PEFC = Nieder Temperatur Polymer Electrolyte Fuell Cell) enthält eine ionenleitende Kunststoffmembran, die Leitfähigkeit wird durch Sulfonsäuregruppen im perfluorierten Polymergerüst garantiert, hierzu ist jedoch ein hoher Wassergehalt nötig. Dies beschränkt die Betriebstemperatur auf max. 80°C. Neuere Membrantechnologien auf Basis von Polybenzimidazol erlauben höhere Betriebstemperaturen, Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (HT PEFC = Hoch Temperatur Polymer Electrolyte Fuell Cell), da die Protonenleitfähigkeit der Membran mit einem deutlich geringeren Feuchtigkeitsgehalt erreicht werden kann.

Die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC = Direct Methanol Fuel Cell) arbeitet über die direkte katalytische Zerlegung von flüssigem Methanol an der Anode bei ca. 110°C.

Die Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC = Phosphoric Acid Fuel Cell) nutzt Phosphorsäure zur Ionenleitung bei ca. 200°C und entspricht im Ionentransportmechanismus der DMFC und PEFC.

In der Schmelzkarbonat -Brennstoffzelle (MCFC = Molten Carbonate Fuel Cell) wird eine Alkali-Salzschmelze als Elektrolyt bei ca. 650°C genutzt, wobei das Reaktionswasser wie bei der AFC auf der Anodenseite entsteht.

In der Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC = Solid Oxid Fuel Cell) wird eine ionenleitende Keramik, deren Leitfähigkeit für Sauerstoffionen in einem Betriebstemperaturbereich von 750 – 1000°C liegt, als Elektrolyt verwendet. In der SOFC entsteht das Wasser ebenfalls auf der Anodenseite.

3.1.4 Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip aller Brennstoffzellen ist die elektrochemische Energiewandlung. Hierbei wird die gespeicherte chemische Energie in elektrische Energie und Wärmeenergie umgesetzt. Bei der PEFC ist der Energieträger reiner Wasserstoff, der Umwandlungsprozess ist in Abbildung 35 dargestellt.

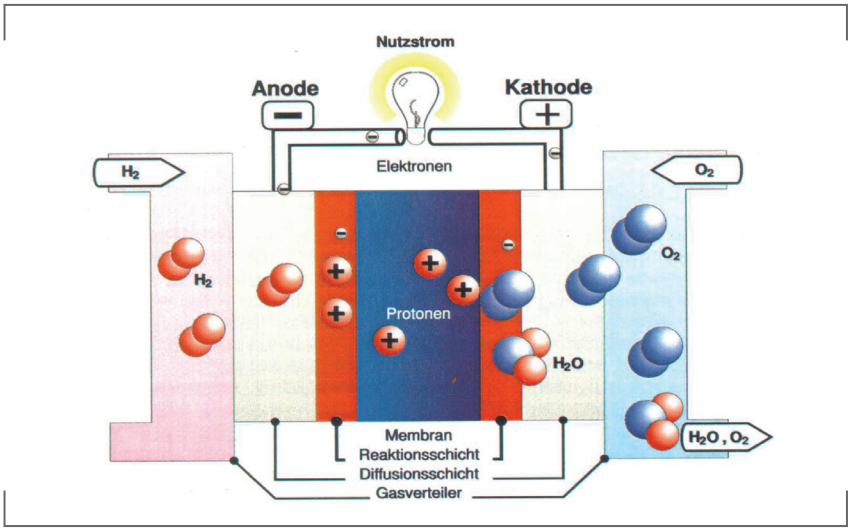


Abbildung 35: Funktionsprinzip der H_2/O_2-Brennstoffzelle

Eine Basis-Brennstoffzelle besteht aus nur fünf Teilen, zwei Gehäusehälften, einer Membran-Elektroden-Einheit (MEA) und zwei Gasdiffusionsschichten. Mittels der gasdichten Gehäusehälften mit separaten Gaszu- und Abläufen werden getrennte Gasräume gebildet (s. Abbildung 36). Zwischen den beiden Gasräumen befindet sich die gasdichte Membran, die im Falle der PEFC einen protonenleitenden Elektrolyten enthält, auf den zwei katalytisch wirksame Elektroden, Anode und Kathode, aufgebracht sind. Die beiden Elektroden sind gasdurchlässige, elektrisch leitfähige Diffusionsschichten und über elektrische Leitungen mit einer äußeren elektrischen Last verbunden sind. Dem Anoden Gasraum wird Wasserstoff oder wasserstoffreiches Gas zugeführt, dessen Moleküle auf der Anodenoberfläche am Übergang zur Membranoberfläche an den Katalysatoren in Protonen und Elektronen dissoziieren. Durch das sich aufbauende Konzentrationsgefälle diffundieren die Protonen durch die protonenleitfähige Membran. Da diese Membran für die Elektronen nicht durchgängig ist, gibt es eine Ansammlung von Elektronen auf der Anodenseite. Dem Kathodenraum wird Sauerstoff oder sauerstoffreiches Gas zugeführt. Der Sauerstoff wird an den Kathodekatalysatoren in Ionen zerlegt und angelagert. Das sich so aufbauende elektrochemische Potenzial hat sein

Gleichgewicht bei 1,23 Volt. Wird eine elektronenleitende Verbindung zwischen der Anode und der Kathode hergestellt, so können die Elektronen über diese zur Kathode fließen und in Verbindung mit den durch die Membran diffundierenden Protonen und den Sauerstoffionen zu Wasser reagieren. Die über die elektrische Verbindung durch die elektrische Last von der Anode zur Kathode fließenden Elektronen können somit eine elektrische Leistung der Höhe U·I zur Verfügung stellen.

Prinzipiell entspricht diese elektrochemische Reaktion der Formel:

$$2\ H_2 + O_2 \longrightarrow 2\ H_2O \qquad (2)$$

Durch die Auftrennung in Teilreaktionen in die Anodenreaktion (3) und Kathodenreaktion (4)

Anodenreaktion: $2\ H_2 \longrightarrow 4\ H^+ + 4\ e^-$ (3)

Kathodenreaktion: $O_2 + 4\ H^+ + 4\ e^- \longrightarrow 2\ H_2O$ (4)

und die Trennung des Transport von Protonen durch die Membran und der Elektronen über eine elektrische Verbindung mithilfe der Membran-Elektroden-Einheit erfolgt die Reaktion (2) kontrolliert und die elektrische Energie kann auf einem geregeltem Weg genutzt werden.

3.1.5 Der Brennstoffzellenstapel

Aufgrund der geringen äußeren Klemmenspannung einer Brennstoffzelle im Arbeitspunkt unter Last, typischerweise 0,7 V und bei einer Stromdichte von etwa 0,75 A/cm², werden Brennstoffzellen zur Leistungsabgabe im Kilowattbereich mit Elektrodenflächen von einigen hundert Quadratzentimetern gebaut und viele Brennstoffzellen in einem sog. Brennstoffzellenstapel sowohl elektrisch, als auch verfahrenstechnisch zusammengefasst. Zur Veranschaulichung des technischen Aufbaus ist eine Brennstoffzelle mit ihren Einzelbauelementen, sog. Filterpressanordnung, in Abbildung 36 als Explosionsbild dargestellt.

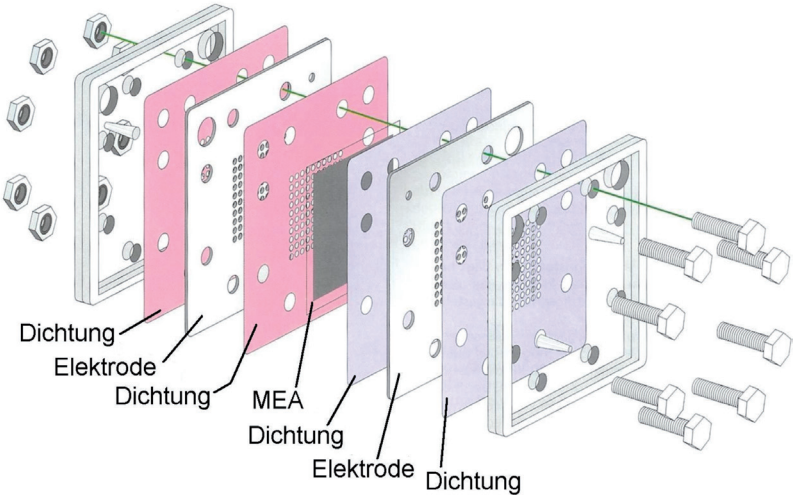


Abbildung 36: Aufbau eines Brennstoffzellenstapels

3.1.6 Verfahrenstechnisches Konzept eines Brennstoffzellesystems

Das verfahrenstechnische Grundkonzept eines PEFC-Systems ist recht einfach und lässt sich sehr gut anhand des Prinzipbildes Abbildung 37 **[24]** erläutern.

Der Brennstoffzellenblock benötigt für den elektrochemischen Umsetzungsprozess Wasserstoff und Sauerstoff sowie ein Kühlmedium zur Abgabe der Prozesswärme und eine Befeuchtung der Membran, die extern oder auch in manchen Konzepten intern realisiert ist. Der Wasserstoff wird über ein Regelventil aus einem H_2-Speicher mit höherem Druckniveau dem Block mit einem niedrigeren Druckniveau kontrolliert zugeführt. Es ist möglich, die Wasserstoffzufuhrmenge abhängig vom aktuellen direkt mengenproportionalen elektrischen Strom geregelt zuzuführen. Dies ist jedoch nicht zwingend notwendig, da der Wasserstoff vollständig als Ionen und Elektronen auf die Sauerstoffseite transportiert wird, so dass sich bei Einstellung eines konstanten Druckniveaus mittels einer Druckmindereinheit (Regelventil) ein kontrolliertes Nachströmen des Wasserstoffs von Speicher zum Block aufgrund des Wasserstoffverbrauchs einregelt und keine Rückführung von Überschuss-Wasserstoff vom Ausgang zum Blockeingang notwendig ist (Dead-End-Prinzip).

In dem verfahrentechnischen Konzept, Abbildung 37, wurde auch zur Brennstoffaufbereitung die Module Reformer und Gasreinigung aufgeführt, um auch die Range Extender-Konzepte mit dieser Technologie, prinzipiell als mögliche Kandidaten abzudecken. Diese Technologien werden aber im Weiteren nicht betrachtet.

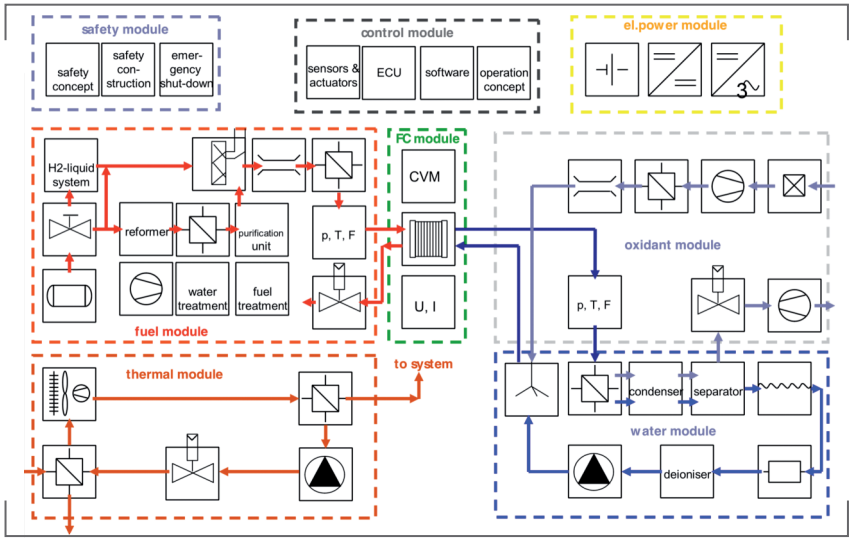


Abbildung 37: Systemdefinition eines repräsentativen PEFC-Systems mit Systemmodulen und deren Subsystemen

Auf der Sauerstoffseite kann der Block mit gefilterter Umgebungsluft versorgt werden. Die Luft wird über einen Luftverdichter (Kompressor) aus der Umgebung angesaugt und unter Druck dem Block zugeführt. Luftseitig kommt das System nicht ohne eine Steuerung, besser Regelung, des Luftverdichters, aus. Da es keine prozesskontrollierte Zufuhrregelung der Verbrennungsluft gibt, ist die eingangsseitige, umsatzabhängige Luftmengenregelung notwendig. Über den einfachen Zusammenhang <Strom-Wasserstoffmenge-Sauerstoffmenge-Luft-Sauerstoffgehalt> kann die Luftmenge in jedem

Betriebszustand als Regelgröße eindeutig bestimmt werden. Da es für jeden Luftverdichtertyp aufgrund des Funktionsprinzips einen Zusammenhang von Luftmenge und Lieferdruck gibt, die Luftmenge aber abhängig vom Strom variiert und die Druckdifferenz zum Wasserstoff aber aufgrund der sehr dünnen Zellmembranen in engen Toleranzen konstant gehalten werden muss, ist es in vielen Systemkonzepten erforderlich, den Luftbetriebsdruck unabhängig von der Liefermenge mit einem zusätzlichen Regelventil am Blockausgang zu kontrollieren.

Bei externer Membranbefeuchtung, wird die Zufuhr von Feuchte über die Luft- und/oder auch die Wasserstoffseite geregelt. Bei interner Befeuchtung wird diese hauptsächlich über eine entsprechende Betriebsstrategie realisiert. Welche der Verfahren eingesetzt werden kann, hängt primär von der verwendeten Membran-Elektrolyt-Einheit (MEA) ab.

Der erreichte Wirkungsgrad eines Brennstoffzellenstapels liegt derzeit bei ca. 68% im optimalen Arbeitsbereich, der Restanteil des Energieinhaltes wird im Block als thermische Abwärme abgegeben. Um die thermische Energie abzuführen, ist eine Kühlung notwendig, dafür gibt es sowohl die Möglichkeit der Luft- bzw. Wasserkühlung. Für eine hohe elektrische Energieausbeute ist es erforderlich, den optimalen thermischen Betriebspunkt der BZ zu erreichen, hierzu ist eine geregelte Kühlung notwendig.
Die elektrische Bruttoleistung des Blocks wird nicht direkt an den Verbraucher weitergeben, sondern ein Teil davon wird für den Eigenbedarf des Brennstoffzellen Systems benötigt.

3.1.7 Wasserstoffspeichertechnologie

Wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, ist in PKWs ein PEFC-System mit Wasserstoff als Brennstoff derzeit der aussichtsreichste Kandidat für einen Range Extender. Außer der PEFC verwenden drei weitere der sechs in Kap. 3.1.3 beschriebenen Brennstoffzellen-Technologien für den optimalen Betrieb Reinstwasserstoff als Brennstoff. D.h. für einen stabilen Langzeitbetrieb benötigen AFC, PEFC und PAFC Wasserstoff mit einem CO-Gehalt kleiner 50 ppm. Die SOFC ist ebenfalls optimalerweise mit Wasserstoff zu betreiben. Bei der SOFC ist jedoch auch wenn mit Leistungseinbußen, eine direkte interne Reformierung von Erdgas auf der Anodenseite möglich.

Massenspezifisch ist Wasserstoff mit dem 2,8-fachen Energieinhalt von Benzin nicht zu schlagen. Volumenspezifisch kann Wasserstoff gegenüber Benzin jedoch nur knapp 27% des Energieinhaltes speichern[1]. Um vergleichbare Reichweiten zu kohlenwasserstoffbetriebenen Fahrzeugen zu erreichen, ist deshalb neben dem energieoptimierten Betrieb ein Speicher mit hoher volumenspezifischer Energiedichte entscheidend.

Wasserstoff kommt auf der Erde als frei verfügbares Gas nicht vor. Er ist deshalb keine Energiequelle, sondern ein Sekundärenergieträger, der mit Wirkungsgradverlust in der Energiekette aus einer Primärenergiequelle erzeugt werden muss. Eine zweite begrenzte Bezugsmöglichkeit ist seine Gewinnung als Beiprodukt der Erdgasgewinnung bzw. als Restgas bei einigen Chemieprozessen wie z.B. Chlor-Alkali-Elektrolyse.

Wasserstoff kann ein sehr sauberer Energieträger sein, aber in der ökologischen Gesamtbilanz wird er nicht besser sein als die Primärenergie, mit der er erzeugt wird. Eine CO_2-freie Erzeugung von Wasserstoff ist nur mit nichtfossilen Energiewandlungsprozessen möglich. Wasserstoffherstellung kann nicht billiger sein, als die Primärenergie mit deren Hilfe er erzeugt wird.

[1] Vergleichsreferenz: Flüssig-Wasserstoff bei -253°C und 1,013 bar

In Abbildung 38 sind nach Betriebstemperatur und Vergleichsenergieaufwand in von links nach rechts ansteigender Reihenfolge, die verschiedenen zur H_2-Herstellung/Freisetzung bekannten Speichertechnologien dargestellt.

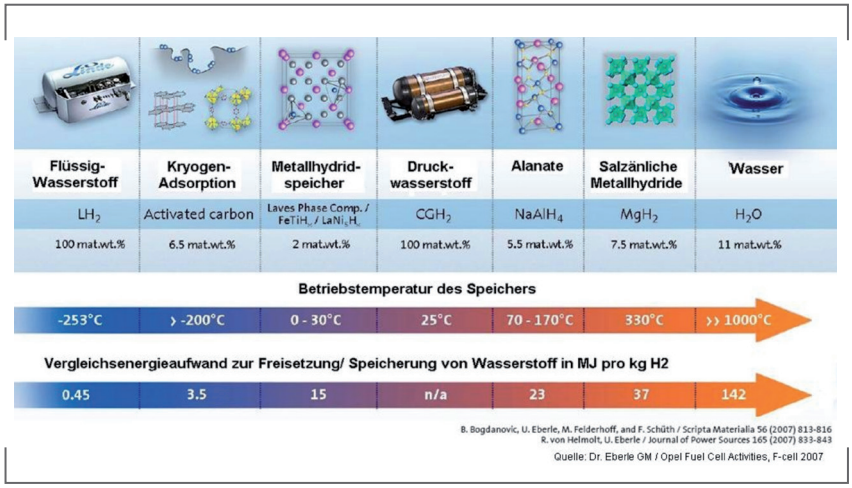


Abbildung 38: Verfahren und Technologie zur Wasserstoffspeicherung über der Temperatur aufgetragen mit Speicherdichte und Energieaufwand.

Momentan wird für den verbrennungsmotorischen Einsatz hauptsächlich der Flüssig-Wasserstofftank genutzt, bei einer Betriebstemperatur von -253°C, auf der Basis von doppelwandigen Dewargefäßen mit integrierter Superisolation. Eine Speicherart mit hoher gravimetrischer Speicherdichte, von derzeit ca. 7 Gew.-%. Die Flüssigkeits-Speicherdichte ist 800 Mal höher als die gasförmige, bei Umgebungsdruck. Jedoch beträgt der Energieaufwand zur Verflüssigung 30-40% **[25]** des Energieinhaltes, bezogen auf den Heizwert, zudem ist eine ständige Verdampfung, durch von außen eingebrachte Wärme (boil-off-effect), nicht zu verhindern. Die Standzeit eines vollen Behälters bis zur vollständigen Entleerung beträgt heute zwischen 4 und 9 Tagen. Eine Möglichkeit der Wasserstoffspeicherung im tiefkalten gasförmigen Zustand ist die adsorptive Speicherung in hochporöser Aktivkohle (ca. 1Gew-% bei Umgebungstemperatur), die bei ca. -200°C ein Potenzial bis zu ca. 6,5Gew.-% Speicherkapazität hat. Zwar verspricht diese höhere Betriebstemperatur mit vergleichbarem Isolationsaufwand und als Druckbehälter lange Standzeiten, aber technisch genutzt wird diese Art momentan nicht. Metallhydridspeicher auf der Basis einfacher AB2 und AB5-Legierungen haben nur ein geringes reversibles Speicherpotenzial um oder knapp über 2Gew.-% , dafür sind sie bei niedrigen Drücken mit geringem Energie- und apparativem Aufwand beladbar, sind dauerhaft dicht, preiswert und formvariabel realisierbar. Die Speicherdichte ist für den Einsatz im PKW, bei den gestellten Anforderungen, nicht ausreichend aber für andere Fahrzeuge, die nicht primär restriktiven Reichweite- oder Gewichtsbeschränkungen unterliegen, gut verwendbar. Das DLR arbeitet an entsprechenden Fahrzeugkonzepten für Spezialeinsätze. Es existieren technische Kleinserienprodukte in verschiedenen Größenklassen. Die heute gängigste Art des Wasserstoffspeichers ist der Druckspeicher, der in den Druckbereichen 200, 300, 350 und 700 bar erhältlich ist. Bis zu 350 bar handelt es sich um Serienprodukte, die bei 200 und 300 bar als Stahl- oder Aluminiumflaschen und für 350 bar als Aluminium-Glas-/Kohlefaser-Kompositspeicher in verschiedenen Größen hergestellt werden. 700 bar-Flaschen als hoch belastete Faser-Wickelflaschen befinden sich derzeit im Entwicklungs- und Erprobungsstadium, vgl. z.B. Daimler F-Cell

B-Klasse. Druckspeicher bis 350 bar können betriebsmäßig dichte Speicher sein. Beim Einsatz von Druckspeichern ist zu berücksichtigen, dass nicht nur vom Brennstoff Wasserstoff sondern auch vom hohen inneren Überdruck Gefahren ausgehen, die sicher vermieden werden müssen. Bei den Speichern im 700 bar-Bereich spielt zusätzlich eine wesentliche Rolle, dass der Energieaufwand für die Betankung bei 700 bar etwa 15 % beträgt. Komplexe Metallhydride wie Alanate auf Natrium- und Magnesiumbasis haben im Gegensatz zu den vorher genannten Hydriden das Potenzial, eine höhere reversible Speicherkapazität (Natriumalanat ca. 5,5Gew.-%) zu erreichen. Dies gilt allerdings nur für das Speichermaterial, Abschläge an der Speicherkapazität aufgrund des Speicherhüllengewichts und Einbauten für das Wärmemanagement werden die Tankkapazität auf ca. 3,5 – 4Gew.-% herabsetzen. Andere Alanate auf Magnesium- und Lithiumbasis zeigen an kleinen Mengen gemessene Speicherkapazitäten bis knapp über 10Gew.-%. Jedoch sind, bis auf wenigen Versuchsexemplare mit Natriumalanat, die anderen Alanate noch im Forschungsstadium. Nachteile der Alanate, die nur mit intensiven Forschungsaktivität eliminiert werden können, sind die träge Reaktionskinetik mit langen Beladezeiten und die hohe thermische Stabilität und daher erforderlichen hohen Betriebstemperaturen, die nicht mit den aktuellen PEFC-Betriebstemperaturen kompatibel sind. Eine weitere Variante der Hydride sind die binären salzähnlichen Metallhydride, die im Falle vom Magnesium eine reversible Speicherkapazität von 7,5Gew.-% haben, deren träge Reaktionskinetik bei Adsorption und Desorption und der Betriebstemperaturbereich oberhalb 300° C nicht zum mobilen Einsatz passen. Diese Hydride sind momentan noch Gegenstand intensiver Grundlagenforschungsarbeiten. Durch geeignete Materialaufbereitungs- und Strukturierungsverfahren sowie Katalysatorbeimengungen besteht die Hoffnung, einen Kompromiss mit akzeptablen Be-/Entladezeiten und Temperaturen aber noch hoher Speicherkapazität zu erreichen. Am oberen Ende der Temperatur- und Energieaufwandsskala in Abbildung 38 ist Flüssigwasser genannt, bei dem der Wasserstoffanteil immerhin 11Gew.-% ausmacht. Das Zersetzungstemperaturniveau mit weit über 1300 K und damit einem enorm hohen Vergleichsenergieaufwand, fast dem vierfachen der binären Metallhydride, lassen flüssiges Wasser als Speichermedium nicht zu.

3.2 Darstellung der Vor- und Nachteile von Brennstoffzellensystemen für den Einsatz als Range Extender

Die im Abschnitt 3.1.3 dargestellten Brennstoffzellentechnologien werden hier im Einzelnen, für die Anwendung als Range Extender, auf ihre Eignung hin beurteilt. In diesem Kontext werden auch die Vor- und Nachteile einzelner Brennstoffzellentechnologien erörtert.

AFC:
Die AFC weist mit den höchsten Wirkungsgrad von bis zu 70% für den Stapel und bis zu 60% als Systemwirkungsgrad auf, benötigt allerdings Reinst-Wasserstoff und Reinst-Sauerstoff für den Betrieb, da bei CO_2-Anteil im Brennstoff Kaliumkarbonat ausfällt. Auch wenn dieses System kostengünstig herstellbar ist, da zur Herstellung sehr preiswerte Materialien: Raney-Nickel als Katalysatoren und sonst nur Kunststoffe verbaut werden, ist für den Automotiveinsatz dieses System aufgrund der Degradationsprobleme bei CO_2-Verunreinigung und damit ein Blockieren der Poren durch Kaliumkarbonat, eher ungeeignet. Daher wurde im Wesentlichen in der EU die Entwicklung eingestellt.

PEFC:
Die PEFC ist mittels festen Elektrolyts als Membran (Polymer Electrolyte Membran – PEM) aufgebaut, siehe Abbildung 36. Mit diesem Brennstoffzellen-Typ sind ähnlich hohe Leistungsdichten wie mit der AFC, d.h. bis knapp 70%, erzielbar. Auch die Systemwirkungsgrade mit bis zu 60% sind mit denen der AFC vergleichbar. Die PEFC Stapel (engl. Stack) werden aus Graphit, Metall oder leitfähigen Composit Materialien gefertigt. Als Katalysatoren kommen Platin oder Platin/Ruthenium zum Einsatz. Diese Katalysatoren sind zwar CO empfindlich (max. Konzentration 10-20 ppm) aber CO_2 tolerant. Durch die Katalysatorvergiftung mit CO erfolgt eine Degradation der Brennstoffzellen. Die Entwicklung geht daher in Richtung Hochtemperatur-PEFC 120°-200°C (z. B. mit PBI (Polybenzimidazol) als Membranmaterial – Fa. PEMEAS, Celanese). Höhere Temperaturen bedeuten eine Verbesserung des Wirkungsgrades, Vereinfachung des Wärmemanagements und eine Verringerung der CO Empfindlichkeit der Katalysatoren. Aufgrund dieser Eigenschaften, der Schnellstartfähigkeit und einer guten Dynamik, ist die PEFC für den Einsatz im automobilen Bereich besonders prädestiniert, im Bereich der PEFC erfolgen derzeit die meisten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Einige der Forschungsschwerpunkte sind: das Niederdrucksystem, Reduktion des Eigenenergiebedarfs, wasserfreie Membranen (keine Kaltstartproblematik), Leistungselektronik und andere mehr (s. Kapitel 3.4).

DMFC:
Der Vorteil des flüssigen Brennstoffs Methanol, ist die nicht vorhandene Speicherproblematik, was diesen Brennstoffzellentyp besonders qualifiziert für den Einsatz im Fahrzeug. Dieser Vorteil wiederum verursacht bei den heutigen im Einsatz befindlichen Membranen durch die Methanolpermeation eine Blockierung der Kathoden-Katalysatoren. Dies führt wiederum zu geringeren Wirkungsgraden, damit ist auch die Hauptforschungsrichtung bestimmt. Die wesentlichsten Arbeiten zielen auf die Entwicklung einer methanolundurchlässigen Membran und der Entwicklung von methanolresistenten Kathodenkatalysatoren. Dieser Brennstoffzellentyp wird in unserer Betrachtung als Range Extender ebenfalls nicht berücksichtigt, da derzeit nur Systeme bis ca. 5 kW realisiert sind.

PAFC:
Der größte Vorteil der PAFC ist die CO_2-Unempfindlichkeit, da dieser Brennstoffzellentyp Säure als Elektrolyt verwendet. Die derzeit erzielbaren Wirkungsgrade mit ca. 35% bis 55% für die Stapel und bis zu 45% fürs System sind im Vergleich zu den PEFC und AFC Technologien relativ niedrig. Daher wird dieser Brennstoffzellen Typ hauptsächlich für den stationären Einsatz betrachtet. Zudem ist die Markteinführung derzeit ungewiss, da bis dato keine Kostenreduktion in Aussicht steht. Dieser Brennstoffzellentyp ist damit nicht relevant für die weiteren Betrachtungen.

MCFC:
Die MCFC kann auch kohlendioxidhaltige Gase umsetzen und besteht aus günstigen Materialien (keine Edelmetalle). Aufgrund des flüssigen Elektrolyts, der als Karbonatschmelze bei 650°C gehalten werden muss, ist dieses System relativ aufwendig und daher für den automobilen Einsatz nicht geeignet.

SOFC:
Die SOFC weist zwar eine hohe Toleranz bei Brennstoffverunreinigung auf und kann außer Wasserstoff auch mit anderen Brennstoffen wie Erdgas, Biogas oder Kohlengas, wenn auch bei geringeren Wirkungsgraden, betrieben werden, arbeitet aber bei sehr hohen Temperaturen von ca. 800 bis 1000°C. Die Probleme der SOFC und damit die Entwicklungsaufgaben liegen primär in der hohen Temperatur begründet.

Diese ist für die die Leitfähigkeit der Sauerstoffionen Voraussetzung. Daher ist die Materialforschung zur Stabilität des Keramikelektrolyts und die Ausdehnungsanpassung bei der thermischen Zyklisierung und den damit die einhergehenden Problemen der Dichtung die Herausforderungen dieser Technologie. Besonders aufgrund vielseitigeren Kraftstoffverträglichkeit wurden Versuche, die SOFC im automobilen Einsatz zu verwenden unternommen. Die erforderlichen Temperaturen stellen speziell beim Einsatz dieser Technologie im Fahrzeug, eine große Herausforderung an die Isolierung dar und führen zusätzlich zu langen Aufheizzeiten. Auch der Keramikelektrolyt, der extrem dünn ausgeführt sein muss, ist zerbrechlich und daher erschütterungsempfindlich, so dass diese Technologie sich bis heute im Fahrzeug nicht durchsetzte und in unserer Bewertung daher als Range Extender nicht betrachtet wird.

Im Fahrzeugeinsatz wurden bereits AFC, PEFC, DMFC und SOFC getestet. AFC-Systeme werden aufgrund des schwierigen Umgangs mit der benötigten Kalilauge in Elektro-Fahrzeugen nur selten eingesetzt. DMFC-Systeme werden momentan nur Leistungsklassen bis ca. 100 W_{el} kommerziell angeboten (z.B. Smartfuelcell), höhere Leistungen bis 5 kWel konnten in einzelnen Forschungsprojekten dargestellt werden (Jülich, DLR). Die hohe volumetrische Energiedichte des Energieträgers Methanol und die einfache Handhabung der Flüssigkeit sind ein Vorteil der DMFC-Systeme. Bei SOFC-Systemen gibt es aktuell Demonstratoren ab ca. 1kW_{el} im mobilen Bereich und ab ca. 100 kW_{el} im stationären Bereich als Blockheizkraftwerke. Diese Systeme sind für den mobilen Einsatz nur in Kombination mit einem Benzin- oder Dieselreformer oder für Erdgasfahrzeuge auf Grund einer guten Verträglichkeit von Kohlenwasserstoffen sinnvoll, so dass mit solchen Systemen als Range Extender, im Gegensatz zu PEFC-Systemen, auf eine Nachreformierung bzw. Gasreinigung verzichtet werden kann. Zur erreichung einer nachhaltigen Langzeitperspektive mit einer klimafreundlichen „elektromobilen Zukunft“ (Abbildung 31), mit dem Maximalanteil von Elektrofahrzeugen mit einem elektrischen Range Extender (EREV) ist eine Forschung und Förderung dieser Technologie zur Reichweitenerhöhung relevant. Bei diesen Fahrzeugkonzepten würde man Batteriefahrzeuge für eine Reichweitenerhöhung mit BZ-Range Extender mit dem Energieträger Wasserstoff oder Methanol einsetzen, da diese Systeme ohne Reformater auskommen und eine geringere Systemkomplexität bei gleichzeitig großer Robustheit, sowie einfacher Handhabung aufweisen. In hoch entwickelten BZ-Fahrzeugen kommen heute daher hauptsächlich PEFC-Systeme im Leistungsbereich bis zu einigen hundert Kilowatt zum Einsatz. Zusätzlich würden hier technologische Entwicklungsparallelen von Brennstoffzellen Fahrzeugen (FCV) für den Langstreckeneinsatz und deren Förderung zu Synergien in der Entwicklung führen.

In der folgenden Tabelle 14 sind die Vor- und Nachteile der einzelnen Brennstofftechnologien zusammengestellt.

	AFC	PEFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Wirkungsgrad Stapel (realisiert)	60%-70%	50%-68%	20%-40%	35%-55%	45%-65%	55%-65%
Wirkungsgrad System	~60°%	~50-58%	-	40%-45°%	45%-55%	45%-55%
Leistungsbereich (realisiert)	bis 120 kW	bis 250 kW	bis 5 kW	3 kW-11 MW	10 kW-2,2 MW	1-25 kW
Gewicht	-	1kg/kW	-	-	-	-
Leistungsdichte Zellen (erreicht)	gut	hoch (1,9 kW/ Liter)	niedrig	gut	gut	hoch
Kosten	Günstig (Ni/ Kunststoff)	hoch (Pt/PEM)	-	gut	gut	hoch
Skalierbarkeit	gut	sehr gut	sehr gut	gut	gut	gut
Packaging	aufwendig	sehr gut	gut	gut	aufwendig	aufwendig
Elektrolyt	KOH (Kali-lauge)	PEM (Protonen Leitende Membran)	PEM (Protonen Leitende Membran)	H_3PO_4 (Phosphor-säure)	Li_2CO_3, K_2CO_3 (Karbonatschmelze)	ZrO_2/YO_3 (Oxidkeramik)
Brennstoff	Reinst H_2	H_2	Methanol	H_2	H_2, CO_2	H_2, CO, Erdgas, Kohlegas, Biogas
Temperatur	20°C-90°C	60°C-80°C	80°C-130°C	200°C	650°C	800°C-1000°C
NVH	-	-	-	-	-	-
Hauptanwendung	Raumfahrt, Militär, U-Boot	Antrieb, BHKW, Raumfahrt, Batterieersatz, Militär, port. Stromerzeuger	Antrieb, Batterieersatz, port. Stromerzeuger	BHKW	BHKW, BuD	BHKW, APU, BuG
Hauptprobleme	CO_2 -> Kaliumkarbonat	Kosten (Pt/Ru, PEM)	Kostenreduktion	Kostenreduktion	Kostenreduktion	Stabilität, Ausdehnungsprobleme
Entwicklungstrends	im wesentlichen in der EU Entwicklung eingestellt	Hochtemperatur 120°-200°C (PBI). Reduktion der System-komplexität und damit der Kosten, Katalysator-Optimierung, Niederdruck, Wasserfreiheit	Systemvereinfachung, Kostenreduktion	Systemoptimierung zur Kostenreduktion zur Markteinführung	Systemoptimierung zur Kostenreduktion zur Markteinführung	Verarbeitung der keramischen Strukturen, Adaption des Ausdehnungsverhaltens von Keramiken und Metallen, Thermische Spannungen, Dichtigkeit

Tabelle 14: Übersicht und Vergleich der Brennstoffzellentechnologien

Die Analyse der hier aufgeführten Vor- und Nachteile der einzelnen Brennstoffzellentechnologien zeigen, dass derzeit die aussichtsreichste Brennstoffzellentechnologie für den automobilen Einsatz die PEFC darstellt, vor allem, wenn weitere Entwicklungsaspekte wie in Kapitel 3.5 beschrieben und die in Kapitel 3.1.7 angesprochene Wasserstoffspeicherung on board inklusive der zur Bereitstellung der dazu erforderlichen Versorgungsinfrastruktur vorangetrieben werden.

3.3 Überblick über bereits im Einsatz befindliche Brennstoffzellensysteme und deren Leistungsklassen

3.3.1 Allgemeines

Derzeit befinden sich auf dem Markt eine Reihe Demonstratoren und für einige Brennstoffzellentechnologien auch Kleinserien von Brennstoffzellensystemen. AFC Systeme sind derzeit bis ca. 120 kW realisiert. Hauptanwendung dieser Technologie sind Raumfahrt, Militär und U-Boote. Wie bereist in Kapitel 3.2 dargestellt wird diese Brennstoffzellenart nicht für einen Range Extender im automobilen Bereich favorisiert und hier nicht darauf eingegangen, was auch für die PAFC, MCFC und SOFC Systeme gilt. DMFC-Systeme werden derzeit in Kleinserien hergestellt und bis zu Leistungsbereichen von 5 kW realisiert. Dieser Leistungsbereich ist aber für den anvisierten Range Extender nicht ausreichend. Die Anwendungsfelder der DMFC sind der Batterieersatz oder Lader für mobile Anwendungen. Daher werden auch in diesem Abschnitt nur die PEFC-Systeme behandelt. Diese Systeme sind in fast jeder Leistungsklasse verfügbar und mehrfach auch in Demonstratoren und Kleinserien für den automobilen Bereich realisiert worden. Abbildung 39 zeigt exemplarisch die Leistungsklassen und Anwendungen, die am DLR Stuttgart, Institut für Fahrzeugkonzepte, realisiert wurden.

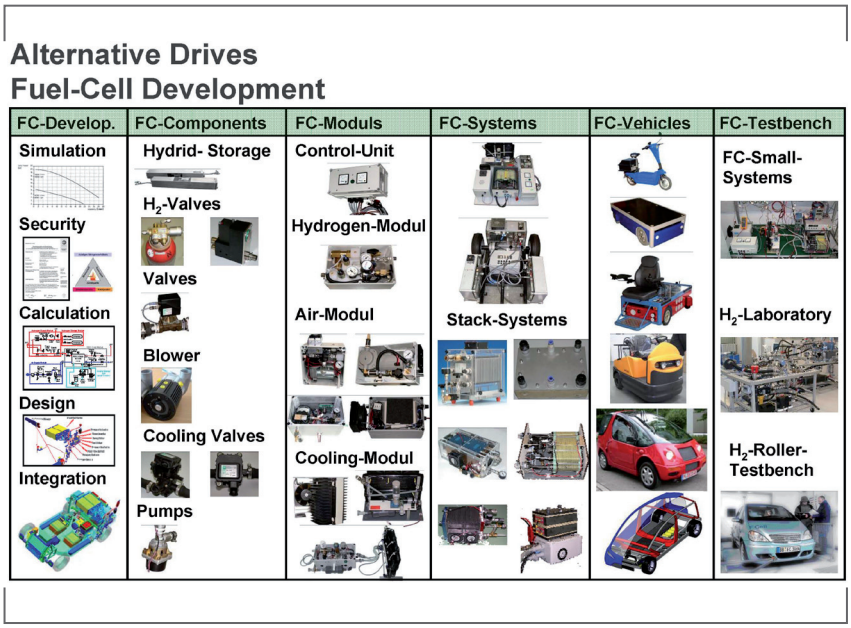


Abbildung 39: Exemplarischer Ausschnitt der Komponenten, Module, PEFC-Systeme und Anwendungen für unterschiedliche Leistungsklassen, die am DLR Stuttgart, Institut für Fahrzeugkonzepte realisiert wurden

3.3.2 Brennstoffzellensystem-Hersteller

Aufgrund der Übersichtlichkeit werden erst im Anhang Rechercheergebnisse **[26]** aufgezeigt, welche weltweit tätige Firmen darstellt, die PEFC-Brennstoffzellensysteme und deren Subsysteme anbieten. Einige der Hersteller fertigen noch Einzelstücke, bei anderen werden jedoch schon nach zertifizierten Verfahren Komponenten hergestellt.

Ein gesamtheitlicher Überblick über die Brennstoffzellenhersteller und Zuliefererindustrie kann immer nur als Momentaufnahme dienen, da sich die Branche erst im Aufbau befindet.

3.4 Abschätzung weiterer Entwicklungspotenziale eines PEFC Brennstoffzellensystems

Wie in Abbildung 40 veranschaulicht, ist der ideale Wirkungsgrad einer PEFC Brennstoffzelle unter Standardbedingungen 83,3 %. Liegt das Produktwasser in der Gasphase vor, ist der ideale Wirkungsgrad einer PEFC Brennstoffzelle sogar 94,5 % **[27]**. Im Gegensatz zu dem über ein Jahrhundert optimierten und mit immensem Aufwand permanent weiter entwickelten Verbrennungsmotor, bei welchem man sich langsam dem theoretisch maximalen Wirkungsgrad nähert, ist man im Bereich der Brennstoffzellentechnologien, bei den derzeit realisierten Brennstoffzellenstapeln und Systemen noch weit vom idealen Wirkungsgrad entfernt. Wie in der Tabelle 14 aufgeführt, sind derzeit für PEFC-Stapel Wirkungsgrade im Bereich von 50 bis 68% und für Systeme im Bereich von 50 bis 58% realisiert (s. Kapitel 3.6.1).

Damit wird auch das Entwicklungspotential und die möglichen Ansatzpunkte zur Verbesserung verdeutlicht. Diese lassen sich damit in die zwei Kategorien, Stack- und Systemoptimierung, einteilen. Meistens sind allerdings die Auswirkungen einer Veränderung entweder des Systems oder des Stacks voneinander nicht unabhängig. Im Wesentlichen lässt sich sagen, dass neben der Kostenoptimierung zwei Ziele als technisches Entwicklungspotential verfolgt werden, einerseits Wirkungsgrad- so wie Leistungssteigerung der Brennstoffzellenstapel und Verringerung des Energieverbrauchs der Peripherie durch Systemvereinfachung sowie Optimierung der Nebenaggregate (s. Kapitel 3.6.1). Für den automobilen Einsatz kommen noch die Randbedingungen Gewichts- und Volumenreduktion als Optimierungsbedarf hinzu (s. Kapitel 3.6.3 und Kapitel 3.6.4).

Damit gilt die Aussage, dass eine Optimierung aller Parameter, welche einen direkten Einfluss auf die Leistungsdichte und Funktionsvereinfachung des Brennstoffzellesystems haben, die Weiterentwicklung bestimmt. Als Ansatzpunkte für ein mögliches Entwicklungspotential aus technischer Sicht sind derzeit zu benennen:

- Hochtemperaturmembranen
  Eine Hochtemperatur-PEFC würde in erster Linie eine Reduktion der Systemkomponenten bedeuten. Primär eine Verkleinerung der Wärmetauscher und je nach Bauart, eine Vereinfachung oder gar Wegfall einer Befeuchtung.
- Wasserfreie Membranen
  Auch die Verfügbarkeit einer wasserfreien, protonleitenden Membran für Brennstoffzellen würde eine gravierende Systemvereinfachung bedeuten. Durch die Elimination der gesamte Befeuchtung als Systembestandteil (s. Abbildung 37) ergibt sich eine einfachere Handhabung der Betriebstrategien so wie des Kaltstartverhaltens.

- Katalysatoren
  Eine Katalysatorreduktion bei gleichzeitiger Erhöhung des Dreiphasensystems, könnte zur Leistungssteigerung und Kostenreduktion der Brennstoffzelle beitragen. Ein weiterer Aspekt stellt auch eine Katalysatorentwicklungen dar, welche eine höhere CO-Toleranz aufweist, da damit der Anspruch an die Reinheit des Wasserstoffs gesenkt werden könnte, was die Brennstoffkosten, aufgrund des geringeren Reinigungsaufwands des Gases reduziert.

- Befeuchtung
  Die Beseitigung der Membranbefeuchtung, sowohl interne als auch einer externen, erwirkt eine Systemvereinfachung und führt somit zur Erhöhung des Systemwirkungsgrades, der Leistungsdichte und zu einer Kostenreduktion der Systeme.

- Wärmemanagement
  Auch die Kühlung von PEFC-Systemen stellt in Fahrzeugen einen Optimierungsbedarf dar. Aufgrund des geringen Temperaturgradienten, Umgebungstemperatur zu Stacktemperatur, müssen Kühler für PEFC-Systeme sehr großflächig ausgelegt werden, was im automobilen Bereich zu Platzproblemen und hohem Gewicht führt.

- Kühlung, Kühlmittel
  Für die direkte Flüssigkeitskühlung sind nichtleitfähige Kühlmittel von Interesse, im Speziellen in Kombination mit der Fragestellung der Kaltstartfähigkeit. Da bei flüssig gekühlten Systemen das Kühlmedium direkt durch die Zelle geführt wird, bedeutet schon eine geringe Leitfähigkeit des eingesetzten Kühlmittels Wirkungsgradverluste, da Ladungsströme dann nicht nur über den externen Verbraucher fließen, sondern auch als interne Verlustströme eine Leistungsminderung darstellen.

- Niederdrucksysteme
  Niederdrucksysteme stellen eine Wirkungsgradoptimierung auf der Systemebene dar. Da die Druckerzeugung durch Luftverdichtung sehr energieaufwendig ist, trägt dies stark zur Reduktion des Systemwirkungsgrades bei. Dieser Ansatz minimiert den Energiebedarf des Luftversorgungssystems. Da aber die Funktionen des Brennstoffzellenstapels stark druckabhängig sind, bedarf es einer Gesamtoptimierungen inklusive neuer Betriebsstrategien.

- Systemvereinfachung
  Eine Systemvereinfachung führt einerseits, durch die Gewichts- und Volumenreduktion, zur Erhöhung der gravimetrischen und der volumetrischen Leistungsdichte, aber auch zur Wirkungsgradverbesserung und zur Kostenreduktion. Eine Verringerung der System-Komplexität stellt auch eine Erhöhung der Systemrobustheit und Vereinfachung der Betriebsstrategien dar. Dies kann erreicht werden, durch funktionsintegrierte Komponenten, vereinfachte Systemkonzepte, so wie durch Entwicklungen kostengünstiger, spezieller, automobilgeeigneter Komponenten

- Nebenaggregate
  Da viele der heute in der Brennstoffzellentechnologie eingesetzten Komponenten der Verfahrenstechnik bzw. dem Anlagenbau entstammen liegt ein weiteres Entwicklungspotential in der Optimierung der Nebenaggregate selbst. Die meisten Nebenaggregate sind derzeit nicht für den speziellen Einsatz in einem Brennstoffzellsystem ausgelegt, besonders nicht für den Einsatz in Automobilen optimiert. Dies gilt in der Regel für Betrieb, Dynamik, Herstellungsverfahren und Laufzeiten. Auch die Anpassung der Arbeitsbereiche der Systemaggregate muss noch für eine Serienreife durchgeführt werden. Im speziellen würden Luftverdichter mit effizienten Antrieben und integrierter Elektronik zur Reduktion des Energieverbrauchs beitragen. Eine weitere Entwicklungsherausforderung stellt die Optimierung aller Systemkomponenten und der Betriebsstrategien für den dynamischen Betrieb dar.
- Sonstiges
  Die hier aufgeführten Entwicklungspotentiale und Optimierungsansätze bieten unter den oben aufgeführten Aussagen Raum für weitere Ansatzpunkte, die zur Verbesserungen und Systemoptimierungen führen.

Die Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik scheint hier noch ein großes Potential für weitere Forschungen und Entwicklungen zu besitzen.

Im Bereich der Kostenreduktion, s. Kapitel 3.6.5, besteht das Hauptentwicklungspotential in der Großserienherstellung bzw. Einführung automobiler Prozesstauglichkeit, Herstellung der notwendigen Zulieferer-Infrastruktur und des Servicebereichs. Eine Beschleunigung der Serienreife von Brennstoffzellentechnologien und deren Markteinführung, könnte somit vor allem durch Forschungsarbeiten an Herstellungsverfahren erreicht werden. Die Einführung geeigneter Infrastrukturen zur Wasserstoffversorgung würde dies positiv beeinflussen.

3.5 Abschätzung des weiteren Entwicklungsaufwands zur Optimierung des Systems hinsichtlich seines Einsatzes als Range Extender

Von Seiten der technischen Entwicklung liegt dabei ein Schwerpunkt auf der automobilgerechten Systemkonzeptionierung und -erstellung, insbesondere bei der Integration von Subsystemkomponenten und möglichen Betriebsstrategien. Alle Subsysteme müssen den Umwelt- und Lebensdaueranforderungen im Automobilbereich entsprechen. Ebenso muss die Recyclingfähigkeit der eingesetzten Materialien bei der Entwicklung berücksichtigt werden. Da bei allen Anforderungen stets die Kosten im Vordergrund stehen und eine Stückzahlerwartung, wie beispielsweise bei einer heutigen Mittelklassewagenserie kaum realistisch ist, steht eine hohe Modularisierbarkeit im Vordergrund, verbunden mit einer möglichst hohen Einzelfunktionalität.

Die Fertigungs- und Zulieferprozesse müssen auf das automobile Umfeld abgestimmt sein, was Verfügbarkeit, Zugang zu Zweitlieferanten bzw. zu Produktvarianten, die Absicherung der Produktion gegen Ausfälle bei unvorhergesehenen Ereignissen, die Rückverfolgbarkeit der Prozess-Schritte bei Unfällen und gegebenenfalls die Sicherstellung der Einflussnahme auf untergeordnete Prozesse der Zulieferer, speziell bei sicherheitsrelevanten Teilen, anbelangt.

Ebenso besteht Entwicklungsbedarf im Bereich Schulungen im Umgang mit Hochvolteinrichtungen und Wasserstoff

- in der Entwicklung,
- der Produktion,
- den Servicewerkstätten,

aber auch in denen an der Verkehrsinfrastruktur teilnehmenden Partner, wie Feuerwehr, Polizei und Krankendienste.

Ein wichtiger Eckpunkt ist weiterhin die Bereitstellung einer geeigneten Wasserstoffinfrastruktur, diese ist einer der entscheidenden Faktoren für die Marktakzeptanz und -durchsetzung von Brennstoffzellen in Kraftfahrzeugen. Nicht zuletzt sind Normen und Standards für die Herstellung, Prüfung und Beurteilung zu schaffen, um eine Vergleichbarkeit und Qualitätssicherung zu erreichen.

3.6 Untersuchung und Beschreibung hinsichtlich der Bewertungskriterien

3.6.1 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad wird beschrieben durch das Verhältnis der im Treibstoff unsetzbaren chemisch gebundenen Energie zur elektrischen Leistungsabgabe. Abbildung 40 zeigt den idealen Wirkungsgrad einer PEFC-Brennstoffzelle im Vergleich zum Carnot-Wirkungsgrad, der unter Standardbedingungen bei 83,3% (94,5%) liegt (s. Kapitel 3.4).

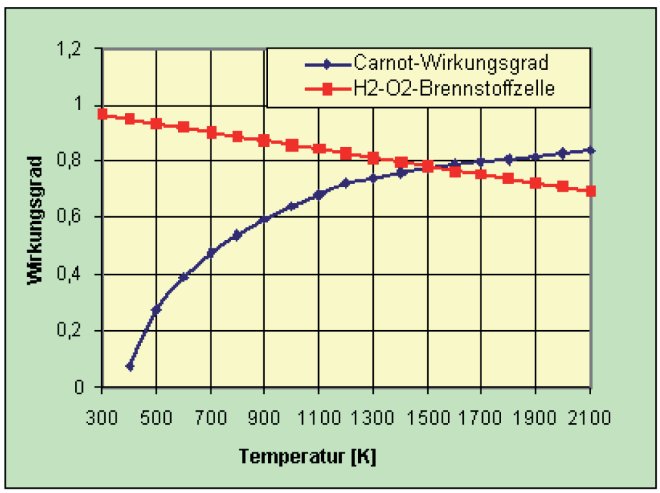


Abbildung 40: Wirkungsgrad einer PEFC-Brennstoffzelle und des Carnot-Prozesses in Abhängigkeit von der Temperatur

Aufgrund von internen Verlusten wie elektrische Leitfähigkeit, Protonenleitfähigkeit, Reaktionskinetik, Diffusionsbegrenzungen u.a. ist der real erreichbare Wirkungsgrad niedriger. Technisch sind heute, wie in Tabelle 14 aufgeführt, bei PEFC-Brennstoffzellen bereits elektrische Wirkungsgrade von bis zu 68% und bei den PEFC-Systemen bis zu etwa 60% **[28]** realisiert. Der Restenergieanteil des Wasserstoffs wird als thermische Abwärme umgesetzt. Zur Austragung der thermischen Energie aus dem Block ist in der Regel eine forcierte Kühlung notwendig. Dafür gibt es sowohl Kühlkonzepte mit Luftkühlung als auch mit flüssigem Kühlmittel. In jedem Fall hat dabei eine möglichst betriebstemperatur-optimale Kühlung zu erfolgen, damit der Brennstoffzellenstapel im optimalen Wirkungsgradbereich gehalten wird. Dies erfordert üblicherweise den Einsatz eines temperaturgeregelten Kühlmittelkreislaufs.

Die elektrische Bruttoleistung des Brennstoffzellenstapels wird nicht direkt an den Verbraucher weitergeben, sondern ein Teil davon wird als Eigenbedarf des Systems benötigt. Bei kleineren Systemen beträgt er zwischen 5 und 20% kann aber bei größeren Systemen und höherer Belastung bis über 35% der Nennleistung anwachsen. Bei der Auslegung des Systems und der Betriebstrategie ist deshalb sowohl auf den minimalen Energieverbrauch der eingesetzten Komponenten, als auch auf ihren effizienten, leistungsabhängigen Einsatz Wert zu legen, da der Eigenverbrauch in die Gesamtsystemeffizienz eingeht.

3.6.2 NVH

Die energetische Umsetzung in der Brennstoffzelle erfolgt direkt von chemisch gespeicherter Energie in elektrische Energie, hierbei wird keine mechanische Arbeit verrichtet, dementsprechend ist die Problematik der NVH nicht gegeben. Einzig die Nebenaggregate, und dort speziell die Luftversorgung, ist aber nicht ohne Geräuschentwicklung. Die Luftversorgung kann mittels Strömungs- oder auch Kolbenverdichtern erfolgen. Während Strömungsmaschinen im Betrieb ein Rauschen oder Pfeifen verursachen, machen sich Kolbenverdichter durch Brummen und Rattern bemerkbar. Die Schwingungsanregung, also der Körperschall, wird im Allgemeinen durch Tiefabstimmung mit Gummilagern von den Übertragungswegen entkoppelt, soweit dies den im Automobilbereich üblichen Schwingbeanspruchungen noch sinnvoll zugänglich ist, d.h. bis etwa 3 g. Höherfrequente Geräusche der Strömungsmaschinen müssen durch zusätzliche Einhausungen vermindert werden.

3.6.3 Packaging

Beim Packaging gilt es, die Subkomponenten in einer geeigneten Form im verfügbaren Bauraum zu integrieren und dabei den Platzbedarf so gering wie möglich zu halten.

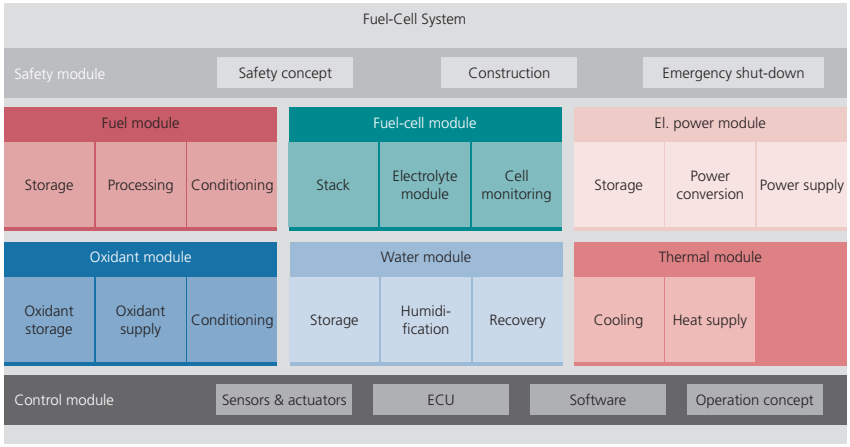


Abbildung 41: Systemdefinition eines repräsentativen PEFC-Systems mit Systemmodulen und deren Subsystemen auf den Klassifikationsniveaus L2 bis L6

Abbildung 41 veranschaulicht, wie die Komponenten eines Brennstoffzellensystems ihrer Funktionalität entsprechend zu Modulen und Submodulen zusammengefasst werden können. In Abbildung 42 wird ein solches Packaging dieser Module am Beispiel eines am DLR-FK entwickelten Systems aufgezeigt.

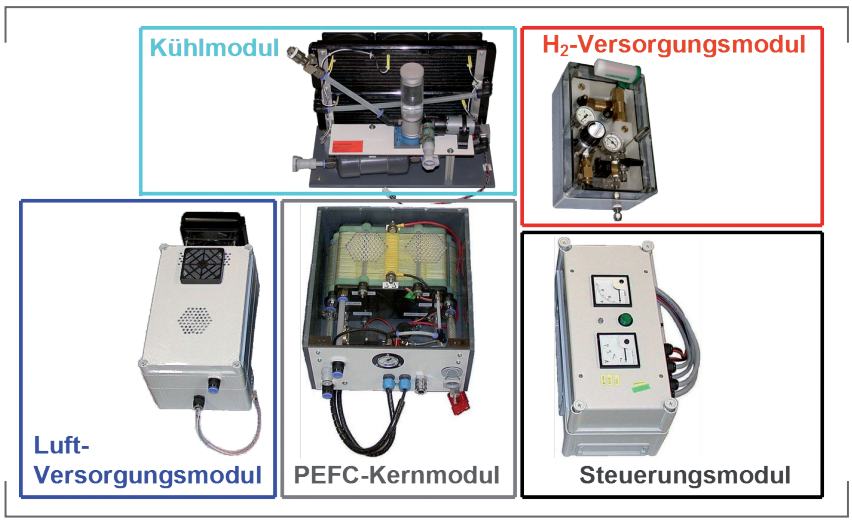


Abbildung 42: Packaging von Brennstoffzellen-Modulen eines am DLR-FK entwickelten Systems

Abbildung 43 zeigt die Bauform gängiger Brennstoffzellensysteme, welche in verschiedenen Anwendungen eingesetzt werden.

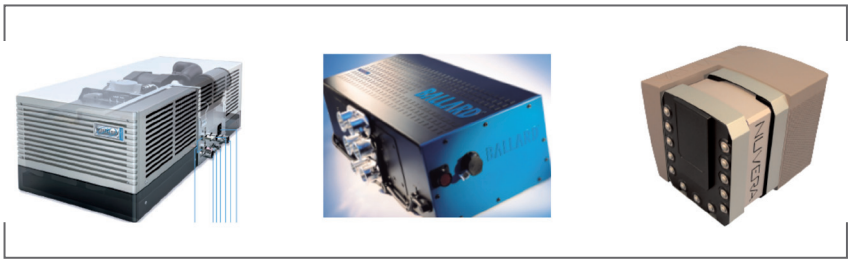


Abbildung 43: Bauform gängiger Brennstoffzellensysteme

Die Systemkomponenten werden heute üblich in rechteckige Gehäuse eingebaut. Geschuldet ist dies der Sicherheit, Einfachheit und der geringen Stückzahlen, keine aufwendige Fertigung. Es spricht nichts dagegen, die Systeme für das Fahrzeug auch in geschickterer Bauform und dem Platzangebot entsprechend zu integrieren. Das Prinzip des Brennstoffzellensystems bietet hierzu eine fast beliebige Variationsmöglichkeit, Abbildung 44. zeigt das Packaging des DLR-Brennstoffzellenfahrzeugs HyLite mit allen Brennstoffzellensystemkomponenten. Diese befinden sich hauptsächlich im Boden- und hinteren Bereich des Fahrzeuges, die Kühlung indes im Frontbereich.

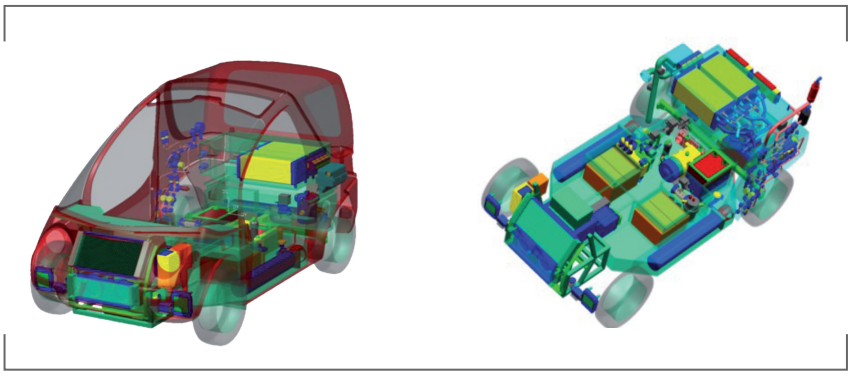


Abbildung 44: Packaging des HyLite-Fahrzeugs des DLR mit Brennstoffzellensystem

Eine interessante Möglichkeit des Packagings eines Brennstoffzellen Range Extender stellt die Integration des Systems in Form einer Box, wie in Abbildung 45 gezeigt, dar. Bei Bedarf einer maximalen Reichweite wird dieses System z.B. in den Kofferraum oder eine Schublade eingeklinkt und bei kurzen Strecken, zur Gewichtsminimierung bzw. größerem Stauvolumen nicht mitgeführt und kann im Haus zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden.

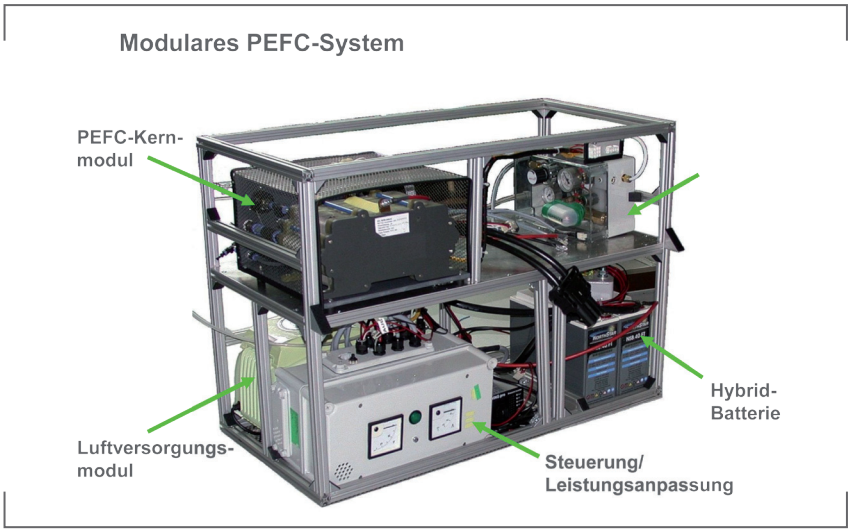


Abbildung 45: Packaging eines am DLR-FK entwickelten Brennstoffzellensystems

Das hoch variable Packaging, fast beliebige Anordnungsmöglichkeit der Komponenten des Brennstoffzellensystems z.B. in Form einer einsetzbaren Box (Abbildung 43 und 45), bis hin zu ständig integrierten und im Gesamtfahrzeug, je nach verfügbarem Einbauraum, fast beliebig verteilbaren Komponenten (Abbildung 44) stellt einen der Vorteile für den Einsatz eines Brennstoffzellensystems als Range Extender dar. Im Allgemeinen geht man davon aus, dass zur Erzeugung von 1 kW_{el} Leistung ein Volumen von 1 l und ein Gewicht von 1 kg für die eigentliche Brennstoffzelle erreichbar ist. Die Nebenaggregate verdoppeln diesen Wert in etwa. Die heute erreichten volumetrischen Leistungsdichten für Brennstoffzellenstapel entsprechen in etwa den Zielen des DOE von 2 kW/Liter (s. Abb. 46) **[1]**.

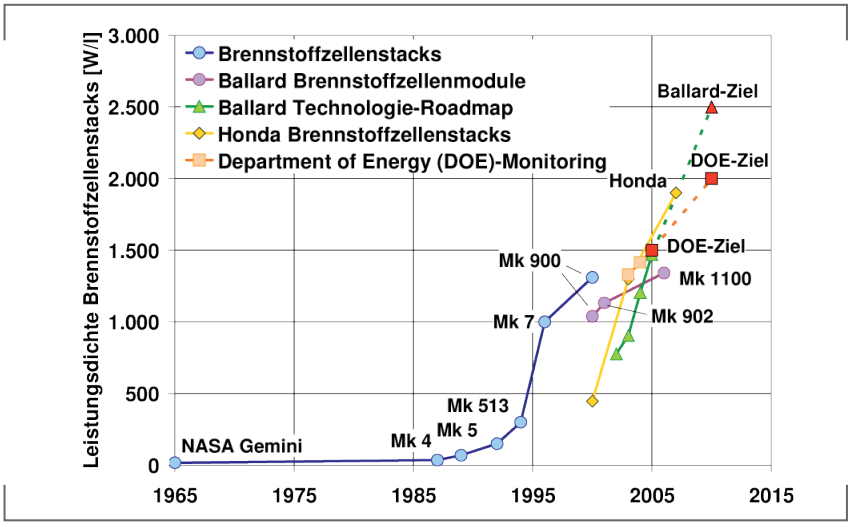


Abbildung 46: Volumetrische Leistungsdichte von Brennstoffzellenstacks-/modulen (zeitliche Entwicklung)

Für die Einstufung der volumetrischen Leistungsdichte von Brennstoffzellensystemen für die angefragten Leistungsklassen wurden die in Abbildung 43 dargestellten Systeme von Nuvera, Hydrogenics und Ballard herangezogen. Daraus ergeben sich zwar keine repräsentativen Werte, aber Größenordnungen als Trend. Im Einzelnen ergibt sich für kleinere Systeme ca. 63 W/l, für die mittleren ca. 113 W/l und für das Ballard Modul 1133 W/l.

3.6.4 Leistungsdichte

Brennstoffzellenstapel haben eine gravimetrische Leistungsdichte von bis zu 1200 W/kg, Abbildung 47 **[1]**, das DOE Entwicklungsziel für 2015 liegt bei 2kW/kg. Die benötigten Subkomponenten (BOP) fürs System senken die erreichten gravimetrischen Leistungsdichten erheblich. Ziehen wir die in Kapitel 3.6.3 bereits aufgeführten Systeme heran, so sinkt die gravimetrische Leistungsdichte eines Brennstoffzelle Systems auf 200 W/kg für das Hydrogenics-System und für das Ballard-Modul auf 885 W/kg.

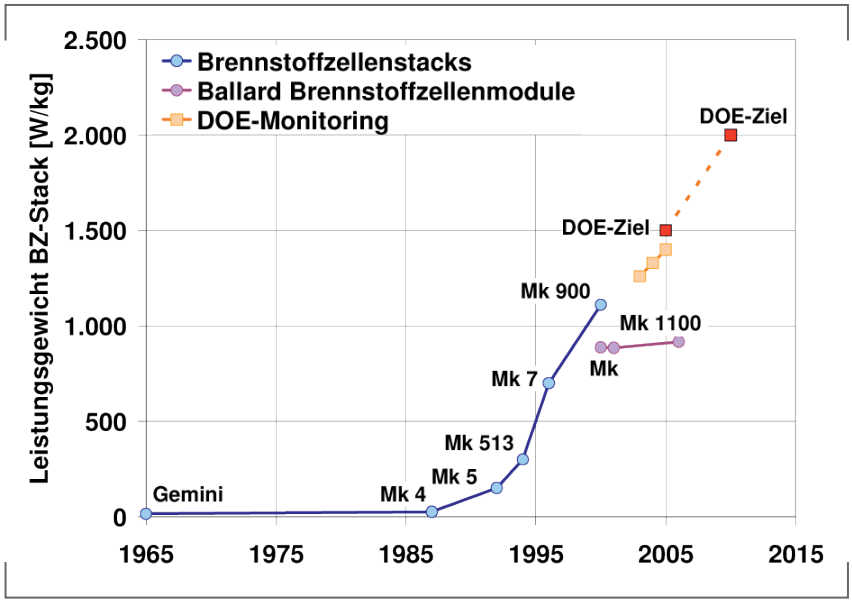


Abbildung 47: Gravimetrische Leistungsdichte von Brennstoffzellenstapeln

3.6.5 Kosten

Heutige Brennstoffzellensysteme werden noch nicht unter Großserienbedingungen hergestellt. Außerdem setzen die Hersteller unterschiedliche Werte für ihren Entwicklungsaufwand in Rechnung. So kann man Brennstoffzellensysteme im Bereich von 16 kW für 40.000.- € kaufen. Der Kostentreiber bei Brennstoffzellensystemen ist der Brennstoffzellenstapel, ca. 50% der Gesamtsystemkosten entfallen auf diese Baugruppe. Bei den Stapelkomponenten zeigt sich deutlich (Abbildung 48 **[29]**), dass die Elektroden der kostenintensive Faktor sind, dies ergibt sich aufgrund des verwendeten Katalysatormaterials Platin. In den letzten Jahren wurden hier bereits Fortschritte erzielt, was die Mengenreduktion anbelangt, ein günstigerer Werkstoff oder weitere Mengenreduzierungen würden sich positiv auf die Kosten auswirken.

Kostensenkungen ergeben sich vor allem, wie bereits im Kapitel 3.4 erwähnt, durch den Einsatz günstigerer Materialien oder verbesserter Fertigungsschritte, sowie die Großserienfertigung **[30]**.

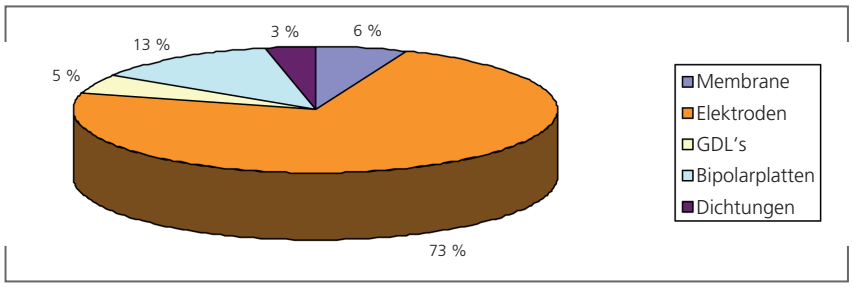


Abbildung 48: Prozentuale Kostenverteilung der BZ-Stapelkomponenten bei einer Großserienfertigung

3.6.6 Emissionen

Emissionen wie sei bei heutigen Verbrennungsmotoren bekannt sind gibt es bei Brennstoffzellensystemen nicht. Abgas- bzw. besser gesagt Abluftemissionen lassen sich auf Wasserdampf und einige ppm Wasserstoff reduzieren.

3.6.7 Skalierbarkeit

Prinzipiell lassen sich Brennstoffzellen beliebig aneinander stapeln und somit beliebige Spannungsebenen darstellen. Entsprechend der Flächenwahl der Zelle kann der benötigte Strom dann eingestellt werden. Auch die Möglichkeit einzelne Brennstoffzellenstapel seriell oder parallel zusammenzuschalten ist gegeben. Jede Kombination erfordert allerdings spezifische Medienversorgung und Betriebsstrategien, d.h. jede Variante bedarf eines eigenen Systemkonzepts. Hat man sich einmal festgelegt, so lassen sich einzelne Brennstoffzellensysteme nicht einfach beliebig zusammenschalten. Jedes einzelne System hat sein eigenes Regelsystem. Die Regelungsstrategie ist dabei prinzipiell so ausgelegt, dass entsprechend der angeforderten Leistung, der Medienzufluss geregelt wird. Die Spannung stellt sich dann entsprechend der Regelschnelligkeit und des Innenwiderstandes auf einen Wert ein, der prinzipiell einer idealen Spannungsquelle mit mehr oder weniger konstantem Innenwiderstand entspricht. Ein einfaches Parallelschalten der Systeme ist daher nicht immer möglich, da die systemeigenen Regelungen aufgrund ihrer Toleranzen zu ungleichmäßiger Leistungsverteilung zwischen den Systemen führen können. Über spezielle Steuerungen und Leistungselektronik kann diese Problematik umgangen werden. Hingegen ist eine Serienschalten von ganzen Systemen, bei Beachtung der Potentialtrennung zwischen Leistungs- und Steuerleitungen, ohne größeren Aufwand realisierbar.

3.6.8 Dynamik

Prinzipiell kann ein Brennstoffzellenstapel instantan Leistung abgeben. Damit aber keine Versorgungsarmut an den Reaktionsflächen z.B. durch Diffusionsprobleme oder Medienversorgung entstehen kann, werden von den Herstellern maximale Stromänderungen ($\delta I/\delta t$) vorgegeben. Diese liegen je nach Hersteller bei einem Sprung auf 90% unter einer Sekunde **[31]**. Ob eine Medienversorgung gewährleistet werden kann, hängt allerdings sehr stark vom Design des Brennstoffzellenstapels und vor allem, bei einem Brennstoffzellensystem, vom Systemkonzept und der Betriebstrategie ab. In der Regel sind die meisten Brennstoffzellensysteme selbst nicht für hoch dynamische Vorgänge ausgelegt. Da ein Brennstoffzellesystem in der Nutzung als Range Extender nicht als Energieversorgung für den Antrieb, sonder immer mit einer Batterie zusammen betrieben wird, ist die Dynamik eines solchen Systems nicht von großer Bedeutung, da die Batterie in einer solchen Kombination die Energie für die Leistungsspitzen liefern und der Range Extender eher als Batterielader, bei einem möglichst optimalen Wirkungsgrad, eingesetzt wird. Das Hochfahren des Systems im kalten Zustand kann innerhalb von 3 Sekunden erfolgen **[28]**.

3.6.9 Zusammenfassung

Die Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik scheint noch ein großes Potential für weitere Forschungen und Entwicklungen zu besitzen. Im Speziellen für wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge im Langstreckenbetrieb. Selbst bei nur teilweise ausgebauter Wasserstoffinfrastruktur wäre ein Brennstoffzellen Range Extender für Batteriefahrzeuge aufgrund seiner hohen Flexibilität ein attraktiver Kandidat. Ein weiterer hervorzuhebender Vorteil der Brennstoffzelle als Range Extender ist die lokale emissionsfreie Bereitstellung von elektrischer und thermischer Energie. Das bedeutet, dass der Heizbedarf des Fahrzeuges nicht aus der Batterie bedient werden muss, alleine hierdurch kann zusätzlich die Reichweite des Fahrzeuges erweitert werden.
Die oben genanten Teilaspekte für einen PEFC-Brennstoffzellen Range Extender sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

	10 kW	20 kW	50 kW
Wirkungsgrad Stack	56 % - 68 % Mit Potential	56 % - 68 % Mit Potential	56% - 68 % Mit Potential
Wirkungsgrad System	50 % - 58 % Mit Potential	50 % - 58 % Mit Potential	50 % - 58 % Mit Potential
Gewicht	11 – 50 kg	22 – 100 kg	56 – 250 kg
Leistungsdichte gravimetrisch	200 -900 W/kg	200 -900 W/kg	200 -900 W/kg
Volumen	10 -160 l	20 - 320 l	45 - 800 l
Leistungsdichte volumetrisch	100W/l – 1,1KW/l	100W/l – 1,1KW/l	100W/l – 1,1KW/l
Kosten PEFC Stapel	10000 €	20000 €	50000 €
Kosten System	ca. 20.000 €	ca. 40 000 €	ca. 100 000 €
Rohemissionen Schadstoffe	+++	+++	+++
Kraftstoffflexibilität	0	0	0
Skalierbarkeit	+++	+++	+++
Packaging Variabilität	+++	+++	+++
NVH	++	++	++
Dynamik	Kaltstart 3-30 s[2] Lastsprung im Betrieb < 1s	Kaltstart 3-30 s Lastsprung im Betrieb < 1s	Kaltstart 3-30 s Lastsprung im Betrieb < 1s

Tabelle 15: Zusammenfassung der Kenngrößen für Brennstoffzellen Range Extender

3.7 Kompetenzen am Standort Baden-Württemberg

Eine Serienproduktion von Brennstoffzellensystemen gibt es noch nicht, da der Durchbruch der Technologie noch nicht erfolgt ist. Die aufgebauten und realisierte Systeme sind in der Regel Einzelanfertigungen und als Unikate oder Kleinstserie zu betrachten. Einzig Kleinsysteme für den Methanolbetrieb im Leistungsbereich unter 100 Watt werden in Kleinserie bisher hergestellt und behaupten sich in der Nische „Kleinleistungs-Konstantladung von Batteriesystemen“ erfolgreich auf dem Markt.

Ob der Durchbruch und die Behauptung auf dem Markt gegen bestehende Energieversorgungssysteme auch für weitere Brennstoffzellensysteme gelingen wird und wenn ja insbesondere auch wann dies der Fall sein wird, hängt von einer Reihe von Randbedingungen ab und ist nicht im Rahmen dieses Projektes abschätzbar.

Ein Brennstoffzellensystem selbst besteht aus verschiedenen Modulen die in Bezug auf zu verwendete Technologien verschiedenste Ansprüche stellen. Dabei gibt es vorhandene Technologien, die aus artverwandten Bereichen und Branchen direkt oder angepasst verwendet werden können. Andererseits sind auch Module im System enthalten, die technologisches Neuland darstellen und sich zum Teil noch im Vorentwicklungs- oder Forschungsstatus befinden.

[2] ist abhängig von der Kaltstarttemperatur und dem Systemdesign, im speziellen gilt: je höher die Temperatur, desto schneller kann das Leistungsmaximum abverlangt werden

Im Bereich der PEFC-Systementwicklung und Forschung sind in Baden Württemberg unter anderem folgende aufgelistete Einrichtungen und Firmen tätig:

- ZSW, Ulm
- BWZU, Ulm
- DLR Stuttgart, FK, TT
- Brennstoffzellen + Batterie-Allianz Baden-Württemberg
- Uni Stuttgart
- Hochschule Esslingen
- DAIMLER, NuCellSys
- Fraunhofer, Freiburg
- SMART Electronic Development GmbH
- FuMA-Tech GmbH

Eine Auflistung von weltweit tätigen Firmen und Forschungseinrichtungen, die PEFC Brennstoffzellensystem- und -systemkomponenten herstellen und entwickeln, sind im Anhang 1 aufgeführt.

Wie der Auflistung zu entnehmen ist, fehlen in Baden-Württemberg Firmen welche Brennstoffzellenstapel oder Brennstoffzellensyteme in Serie herstellen. Dies gilt auch für die meisten Brennstoffzellenstapel und -systemkomponenten, wie z.B. Membrane, MEA's oder Luftverdichter.

Um marktfähige Brennstoffzellenprodukte in Baden-Württemberg anbieten zu können, ist es erforderlich, Technologiekompetenzen, Komponentenhersteller bis hin zu Systemherstellern zu fördern und Know-how zu bündeln. Diese Maßnahmen sind vor allem dann zielführend, wenn eine Markteinführung der Brennstoffzellensysteme und -technologien so gefördert wird, dass für Hersteller eine Serienfertigung attraktiv und wirtschaftlich lohnend ist.

4.

Mikrogasturbine

4.1 Funktionsprinzip

Mikrogasturbinen (MGT) sind thermische Strömungsmaschinen, die den realen Joule-Prozess in einem offenen Kreislauf abbilden und im Gegensatz zu Kolbenmaschinen eine kontinuierliche Verbrennung aufweisen. Die Prozessluft der Maschine wird, wie in Abbildung 49 dargestellt, zunächst mittels eines Kompressors verdichtet (1) und anschließend in einem Rekuperator/Regenerator mit Hilfe des heißen Turbinenabgases weiter erwärmt (2). Diese optionale Form der Wärmerückgewinnung ermöglicht eine erhebliche Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads bei den für MGT typischen niedrigen Verdichterdruckverhältnissen (π). Danach wird die Prozessluft der Brennkammer (3) zugeführt, mit dem Kraftstoff vermischt und verbrannt. Die Verbrennungsabgase werden dann über eine Turbine (4) entspannt und im Rekuperator/Regenerator (5) abgekühlt. Der größere Teil der abgegebenen Turbinenleistung wird zur Kompression der Prozessluft und zur Überwindung der Lagerreibung benötigt. Die überschüssige mechanische Leistung kann dann z. B. durch einen Permanentmagnetgenerator (6) in elektrische Energie umgewandelt werden.

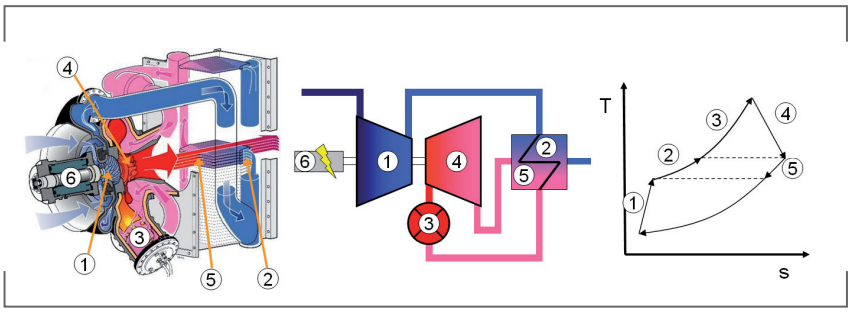


Abbildung 49: Schnittzeichnung durch eine Mikrogasturbine des Typs Turbec T100 (links), Schematische Darstellung eines MGT-Kreislaufs (Mitte), T-s Diagramm eines realen, offenen Joule Prozesses (rechts)

4.2 Stand der Technik

Für den Begriff Mikrogasturbine gibt es keine eindeutige Definition. Oftmals werden unter dieser Bezeichnung schnell laufende Gasturbinen mit elektrischen Leistungen kleiner 300 kW_{el}, niedrigen Verdichterdruckverhältnissen ($\pi < 5$) und radialen, ungekühlten Turbokomponenten zusammengefasst. In den nachfolgenden Unterkapiteln wird der Stand der Technik beim Einsatz der MGT als Direktantrieb und als Kraftmaschine eines seriellen Hybridantriebs beschrieben.

4.2.1 Gasturbinen-basierter Direktantrieb

Fahrmanöver, wie beispielsweise das Verzögern oder Beschleunigen eines Kraftfahrzeugs, stellen beim Direktantrieb hohe Anforderungen an die Dynamik des Antriebsaggregats. Die Dynamikeigenschaften einer MGT mit Wärmeübertrager sind im Wesentlichen beim Kaltstart limitiert. Hierbei darf die Turbinenaustrittstemperatur (TOT) nur mit einem begrenzten zeitlichen Gradienten erhöht werden, um eine Beschädigung des Wärmeübertragers aufgrund von zu hohen thermischen Gradienten auszuschließen. Für einen Kaltstart mit einem anschließenden Lastsprung auf Volllastbedingungen werden cirka 90 Sekunden benötigt. Ein Lastwechsel von 0 % (Leerlauf) auf 100 % (Volllast) ist bei einer warmen Maschine in weniger als 10 Sekunden möglich. Der Abschaltvorgang aus Volllast dauert etwa 30 Sekunden **[47]**. Bei einer MGT ohne Wärme-

übertrager kann ein Kaltstart innerhalb von 15 Sekunden und ein Lastwechsel von 0% auf 100% in weniger als 5 Sekunden durchgeführt werden. Die höchste mechanische Leistungen und Wirkungsgrade erreichen Mikrogasturbinen normalerweise bei den jeweiligen maximalen Drehzahlen. Diese liegen je nach Maschinentyp und -leistung zwischen 70.000 und 250.000 Umdrehungen pro Minute.

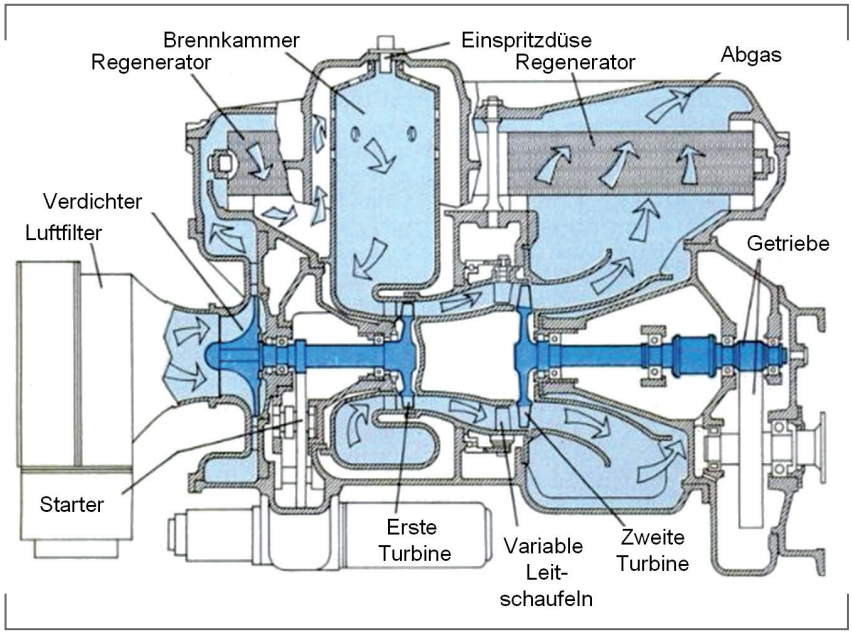


Abbildung 50: Schematische Darstellung eines Direktantriebs (Daimler Auto 2000, Quelle: „Popular Science" Magazin)

Damit die MGT als Direktantrieb eingesetzt werden kann, muss der Gasturbinenbetrieb auf das Fahrprofil abgestimmt werden. Eine Möglichkeit zur Realisierung der geforderten Dynamik bietet der Einsatz einer MGT mit separater Lastturbine. Ein entsprechender Aufbau ist in Abbildung 50 exemplarisch skizziert. Im Gegensatz zu der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Funktionsweise wird das Abgas in der ersten Turbine nur so weit entspannt, dass die abgegebene mechanische Energie ausreicht um den Verdichter anzutreiben. Das verbleibende Enthalpiegefälle wird anschließend in einer zweiten langsam drehenden Turbinenstufe, der sogenannten Lastturbine, umgesetzt. Diese ist über eine separate Welle direkt mit dem Fahrzeuggetriebe verbunden. Die Regelung der Wellendrehzahl und somit der Last erfolgt hierbei über variable Leitschaufeln. Die Drehzahl und Last der ersten Welle bleibt annähernd unbeeinflusst vom Fahrmanöver.

Der Direktantrieb wurde erstmals 1950 vom englischen Automobilhersteller Rover eingesetzt. Das Grunddesign der MGT lehnt sich hierbei an eine Boeing Hubschrauber-gasturbine ohne Wärmeübertrager an. Neben Rover setzten u.a. auch Chrysler und Daimler dieses System in Prototypenfahrzeugen, die in Abbildung 51 dargestellt sind, ein. Zur Verbesserung der dynamischen Eigenschaften und mechanischen Wirkungsgrade wurden die Gasturbinen mit Regeneratoren oder Rekuperatoren, variablen Turbineneinlassgeometrien (Lastturbine) sowie Automatikgetrieben ausgerüstet.



Abbildung 51: Fahrzeuge mit MGT-basiertem Direktantrieb, Rover (links), Chrysler (Mitte), Daimler Auto 2000 (rechts)

Die Entwicklungsarbeiten wurden in den 1980 Jahren eingestellt. Wesentliche Probleme des Direktantriebs waren der komplexe Aufbau und die damit verbundenen hohen Herstellungskosten. Weitere Punkte waren die hohen Emissionswerte vor allem beim Kaltstart, die im Vergleich zur Kolbenmaschine geringeren mechanischen Wirkungsgrade, das Startverhalten, die Dynamik sowie der hohe Leerlaufverbrauch.

4.2.2 Gasturbinen-basierter serieller Hybridantrieb

Funktionsweise:
Im seriellen Hybridbetrieb wird die Antriebsleistung von einem E-Motor erzeugt, der von einer Batterie gespeist wird. Zum Laden der Batterie wird die mechanische Leistung der MGT durch einen Permanentmagnetgenerator in Strom umgewandelt. Optional kann der erzeugte Strom auch ohne Zwischenspeicherung in der Batterie direkt an den E-Motor abgegeben werden. Durch die Umgehung der Batterie kann diese entweder entlastet oder kleiner ausgeführt bzw. die Leistung des E-Motors kurzfristig gesteigert werden. Ebenfalls dient die Batterie als Speicher der rekuperierten Bremsenergie sowie als Energielieferant zum Start der MGT.
In Abbildung 52 sind die möglichen Energieflüsse graphisch dargestellt. Beim Einsatz der Mikrogasturbine zur Reichweitenverlängerung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen, wird diese oftmals auch als Turbo Range Extender (TRE) bezeichnet.

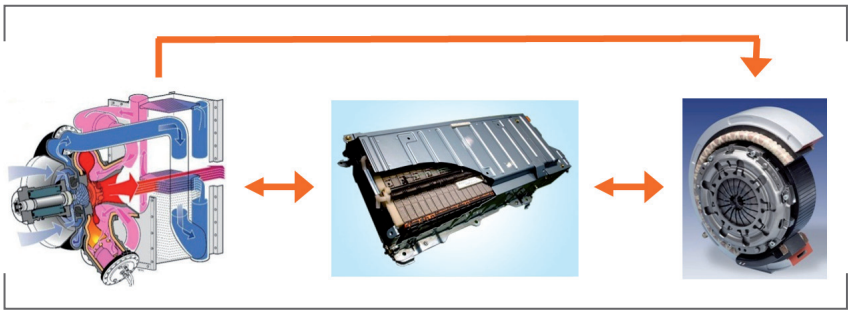


Abbildung 52: Mögliche Energieflussrichtungen beim seriellen Hybridantrieb zwischen TRE (links), Batterie (Mitte) und E-Motor (rechts)

Durch die Verwendung der Batterie als Pufferspeicher ergeben sich im Vergleich zum Direktantrieb wesentlich niedrigere Dynamikanforderungen an die MGT. Als Folge kann die kompaktere und kostengünstigere Einwellenbauweise eingesetzt und auf ein mechanisches Getriebe verzichtet werden. Der Start des Fahrzeuges ist unabhängig vom dynamischen Kaltstartverhalten der MGT, da dieser über die Batterie erfolgt. Die

Betriebspunkte der Mikrogasturbine sind beim seriellen Hybridantrieb weitgehend unabhängig vom Fahrmanöver. Daher ist es möglich, die MGT effizient und schadstoffarm zu betreiben.

Der Aufbau eines TRE ist exemplarisch in Abbildung 49 dargestellt. Die oftmals einstufigen radialen Turbokomponenten liegen zusammen mit dem Generatorläufer auf einer Welle. Eine wesentliche Begrenzung stellt neben dem Verdichterdruckverhältnis ($\pi < 5$) die maximale Turbineneintrittstemperatur (TIT) bei ungekühlten, metallischen Schaufeln von bis zu 1050 °C dar. Gekühlte oder keramische Schaufeln werden aus Komplexitäts- und/oder Kostengründen derzeit nicht eingesetzt. Aus den vorab genannten Limitierungen resultieren hohe Turbinen- (> 600 °C) sowie niedrige Kompressoraustrittstemperaturen (< 300 °C). Daher können zur Wärmerückgewinnung aus dem Abgas der MGT Wärmeübertrager eingesetzt werden. Stand der Technik sind hierbei Rekuperatoren.

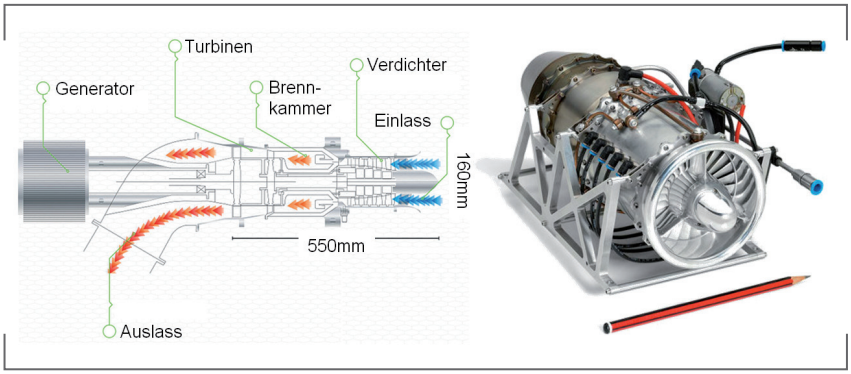


Abbildung 53: Bladon Jets MGT – Schnittzeichnung (links), MGT ohne Generator (rechts)

Abweichend von der vorab beschriebenen Bauweise setzt die englische Firma Bladon Jets mehrstufige Axialturbokomponenten ein, wie in Abbildung 53 dargestellt. Zur Erzielung eines hohen Leistungsgewichts von über 2 kW_{el}/kg und einer Leistungsdichte von über 5 kW_{el}/Liter (70 kW_{el} bei 35 kg inklusive Generator; Umbautes Volumen von 14 Liter ohne Generator) wird bei diesem System auf einen Rekuperator verzichtet **[38]**.

MGT-Technologie:
Mikrogasturbinen zeichnen sich durch eine kontinuierliche Verbrennung sowie eine systemimmanente Vielstofffähigkeit aus. Somit können verschiedene Kraftstoffe des gleichen Aggregatszustands innerhalb einer weiten Bandbreite von Heizwerten umgesetzt werden **[23]**. Bei Änderung des Aggregatszustands sind jedoch der Brenner und die Brennstoffzufuhr anzupassen. Die höchste Flexibilität wird durch den Einsatz von so genannten Hybrid-Brennern gewährleistet. Diese ermöglichen in einer gewissen Bandbreite die Oxidation von flüssigen als auch gasförmigen Kraftstoffen. Zur Verdichtung des Kraftstoffs wird ein Kompressor bzw. eine Pumpe benötigt.

Weiterhin können aufgrund der kontinuierlichen Verbrennung geringe NO_x- und CO-Emissionen auch ohne komplexe, kostspielige und Bauraum einnehmende Abgasnachbehandlung realisiert werden. Die TRE „C30 CNG“ und „C30 Liquid Fuel“ von Capstone halten beispielsweise die strengen Vorschriften der Luftreinhaltungskommission Kaliforniens (CARB) ein. Die NO_x-Emissionen liegen bei diesen Systemen um >75%

und die CO-Emissionen um >99% unter den geforderten gesetzlichen Grenzwerten. Die Grenzwertunterschreitungen werden sowohl im Erdgas-**[32]** als auch im Dieselbetrieb **[33]** erreicht. Daten zu dieser und der ebenfalls CARB zertifizierten C65 sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Aus den Gewicht- und Volumenangaben wird ersichtlich, dass die Mikrogasturbinen aus dem Kraft-Wärme-Kopplung-Bereich (KWK) übernommen und nicht speziell für den Einsatz im Fahrzeug entwickelt wurden.

Modell	**C30 Range Extender**	**C65 Range Extender**
El. Leistung	30 kW	65 kW
El. Wirkungsgrad	26%	29%
Gewicht mit Generator	91 kg	135 kg
Schallemission	65 dB(A) @ 10m	70 dB(A) @ 10m
Abmessungen mit Generator	57.2 x 72.9 x 83.6 [cm]	66.6 x 89.3 x 75.9 [cm]
Mögliche Brennstoffe	Erdgas, Diesel, Biodiesel, Kerosin	
NO_x-Emissionen	< 9 ppmv (Erdgas); < 35 ppmv (Flüssigbrennstoff)	
CO-Emissionen	< 50 ppmv (Erdgas); < 15 ppmv (Diesel)	

Tabelle 16: Technische Daten der Capstone TRE Systeme (Volllast; Abgasemissionen @ 15 Vol.% Restsauerstoff) [34][35][36][37][49]

Ein weiteres Merkmal des TRE ist, dass der Verbund aus Welle, Generatorläufer und Turbosatz das einzige bewegliche Bauteil darstellt. Da es sich hierbei um eine rein rotierende Bewegung handelt, gibt es keine freien Massenkräfte oder Massenmomente. Als Folge der hohen Laufruhe treten nur geringe Vibrationen und kaum Körperschall auf. Die verbleibenden Schallemissionen sind aufgrund der hohen Drehzahlen hochfrequent und können somit einfach gedämpft werden. Die Schallemissionen der Capstone MGT sind in Tabelle 16 aufgelistet. Im Vergleich dazu liegt der Schallemissionswert der Turbec T100 bei 65 dB(A) in 1 m Abstand. Diese Werte können noch weiter reduziert werden, da die Maschinen zwar über eine Wärmeisolation verfügen aber über keine spezielle Schallreduzierung. Mit einer für den Fahrzeugbetrieb vorgesehenen Schalldämmung ist es möglich, Geräuschemissionen unter 63 dB(A) in der Fahrgastzelle zu realisieren. Die Fa. DesignLine gibt an, dass der mit einem TRE betriebene Bus „EcoSaver IV" circa 75% niedrigere Schallemissionen aufweist, als ein herkömmlicher Bus mit Dieselmotor **[41]**.

Auf einen Schmiermittelkreislauf kann verzichtet werden, wenn die Lagerung der Welle anstelle einer Öllagerung mittels dynamischer Luftlager erfolgt. Dieser Lagerungstyp, wie er beispielsweise von Capstone und Bladon Jets eingesetzt wird, hat den weiteren Vorteil, dass aufgrund des fehlenden Ölkreislauf auch kein Kühlkreislauf für die MGT benötigt wird.

Die Wartungsintervalle sowie die Laufzeiten einer MGT sind aufgrund der einfachen Bauweise und dem Einsatz von wenigen Verschleißteilen lang. Die Produktlebensdauer einer 30 kW_{el} MGT von Capstone liegt beispielsweise bei 80.000 Stunden. Die Wartungsintervalle betragen in etwa 8.000 Stunden. Die Wartungskosten eines TRE liegen im Bereich von 0,3-0,8 ct/kWh_{el}. Ein Kaltstart reduziert die Laufleistung um circa 5-6 h. Somit sind bis zum Erreichen der Produktlebensdauer beispielsweise 10.000 Betriebsstunden und bis zu 14.000 Kaltstarts möglich. Da in Fahrzeuganwendungen nur Laufleistungen von 5.000 h gefordert werden, kann der TRE, im Vergleich zur stationären Anwendung, mit höheren thermischen Gradienten und TIT (bis zu 1050 °C anstelle 950 °C) betrieben werden. Der Vorteil hierbei ist eine erhöhte Dynamik sowie die Steigerung der Maschinenperformance.

Die mechanischen Wirkungsgrade von ausgewählten MGT-Systemen im Leistungsbereich bis zu 100 kW_{el} sind in Abbildung 54 dargestellt. Zur Berechung der mechanischen Wirkungsgrade aus den öffentlich zugänglichen elektrischen Wirkungsgraden wurde im Volllastpunkt eine Leistungselektronik- und Generatoreffizienz von jeweils 97% angenommen. Somit erreicht beispielsweise die C65 einen mechanischen Wirkungsgrad von η_{mech} = 31% bei einer elektrischen Leistung von 65 kW. Im Allgemeinen steigt der mechanische Wirkungsgrad mit der Leistungsklasse der MGT, da sich u.a. die Spaltverluste der Turbomaschine sowie die Wärmeverluste des Gesamtsystems reduzieren. Abweichungen von diesem Trend können z.B. durch die fortlaufenden Entwicklungsarbeiten im Bereich der MGT-Technologie erklärt werden. Wie in Abbildung 54 gezeigt, besitzt die in der Entwicklung befindliche MGT des Herstellers C, trotz einer sechsfach geringeren elektrischen Leistung, fast das gleiche Wirkungsgradpotential wie die Capstone C30.

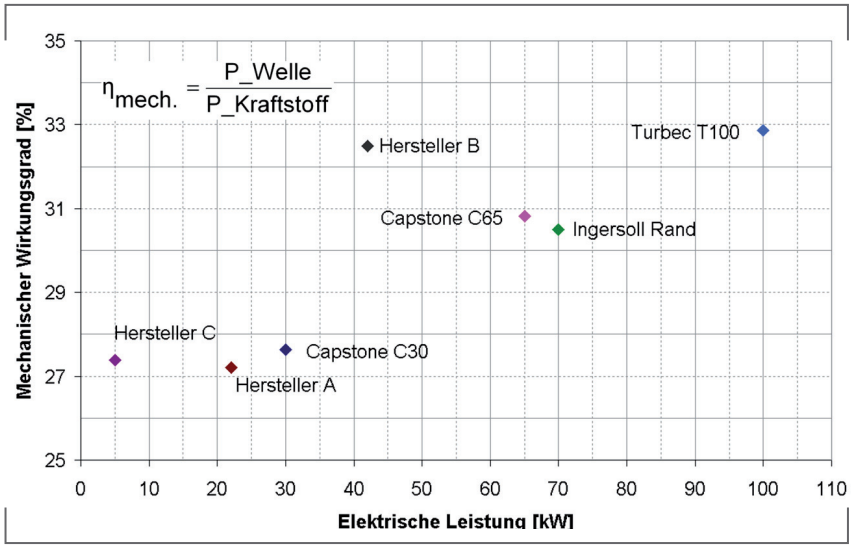


Abbildung 54: Mechanischer Wirkungsgrad als Funktion der elektrischen Leistung für verschiedene in Entwicklung befindliche und kommerziell verfügbare MGT-Systeme (Hersteller A, B, C dürfen nicht genannt werden)

Die spezifischen Herstellungskosten einer MGT liegen derzeit bei circa 700-850 €/kW_{el} und damit noch über denen eines konventionellen Kolbenmotors. Diese Kostendifferenz ist hauptsächlich auf die niedrigen Produktionszahlen der MGT zurückzuführen. So wurden in der Leistungsklasse <100 kW_{el} im Jahr 2010 circa 800 Einheiten produziert.

Die Hauptkosten werden durch den Rekuperator verursacht. Nach Abschätzungen von Capstone wird bei den TRE das Kostenniveau der Kolbenmaschinen ab einem Produktionsvolumen größer 10.000 Einheiten pro Jahr erwartet **[45]**.

Konzept- und Serienfahrzeuge:
Ein TRE System mit Rekuperator und Radialturbokomponenten wurde bereits 1992 von Volvo in dem seriellen Hybridfahrzeug „Environmental Concept Car (ECC)" eingesetzt. In jüngster Zeit folgten eine Reihe weiterer Konzeptfahrzeuge dieser Bauart. Die Basis der von Capstone (2010) und LPEngineering (2009) entwickelten Konzepte bildet das in Abbildung 55 gezeigte TRE C30 System. ETVMotors baute 2009 einen Toyota Prius zum Plug-In Hybrid mit TRE um. Im Konzeptfahrzeug C-X75 setzt Jaguar (2010) zwei Bladon Jets TRE ein. Der erzeugte Strom wird hierbei entweder für die Aufladung der Batterie oder zur Direkteinspeisung in die E-Motoren eingesetzt.

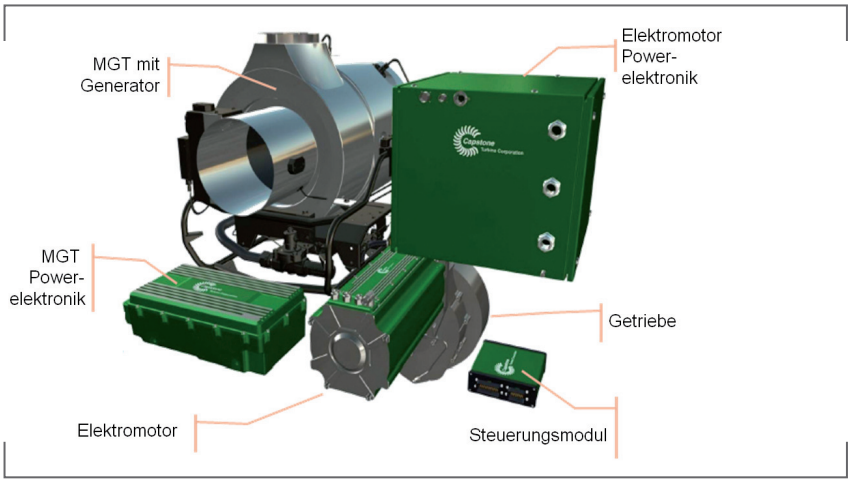


Abbildung 55: TRE Komplettsystem auf der Basis der Capstone C30 MGT ohne Batterie (Quelle: Capstone)

Kommerziell verfügbar ist der mit einem seriellen Hybridantrieb ausgestattete Bus „EcoSaver IV" der Fa. DesignLine. Eine baldige Markteinführung im PKW-Bereich plant die Fa. Velozzi, die zwei Fahrzeuge basierend auf der C65 bzw. der C30 entwickelt hat. Darüber hinaus arbeit die Firma Calmotors in Kooperation mit Capstone an der Entwicklung von TRE Systemen für LKW mit einer zulässigen Gesamtmasse von über 15 t **[46]**.

Die Betriebsweisen der Konzept- und Serienfahrzeuge unterscheiden sich. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Auslegung der einzelnen Komponenten des seriellen Hybridantriebs. Beispielsweise verfügt der DesignLine Bus über einen 250 kW E-Motor. Da die Maximalleistung nur selten und dann über die Batterie abgerufen wird und viele Standzeiten vorkommen, genügt ein TRE mit einer Leistung von 30 kW_{el} zum Laden der Batterie. Die E-Motoren des C-X75 von Jaguar verfügen über eine elektrische Leistung

von 580 kW_{el}, bei einer nur circa viermal geringeren TRE Leistung. Die relativ hohe TRE Leistung wird benötigt, um einen lang anhaltenden hohen Leistungsbedarf abzudecken.

Hersteller	Bezeichnung	MGT	Abbildung
Capstone [40]	CMT-380 (Konzeptfahrzeug)	C30 (30 kW_{el})	
Jaguar [38]	C-X75 (Konzeptfahrzeug)	Bladon Jets (2 x 75 kW_{el})	
LPEngineering [39]	Whisper Eco-Logic (Konzeptfahrzeug)	C30 (30 kW_{el})	
ETVMotors [44]	Toyota Prius Conversion (Konzeptfahrzeug)	Eigenentwicklung (8 kW_{el})	
DesignLine [42]	EcoSaver IV (auf dem Markt)	C65 (65 kW_{el})	
Velozzi [43]	Supercar (Markteinführung 2011)	C65 (65 kW_{el})	
Velozzi [43]	Solo Crossover (Markteinführung 2011)	C30 (30 kW_{el})	

Tabelle 17: Fahrzeuge mit seriellem MGT-basiertem Hybridantrieb

4.3 Entwicklungspotentiale

Entwicklungspotentiale bei der Mikrogasturbine bestehen in der Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads und der Entwicklung von innovativen Brennkammerkonzepten zur weiteren Reduzierung der Schadstoffemissionen und Erhöhung der Kraftstoffflexibilität.

Kurz- und mittelfristig kann eine Erhöhung des mechanischen Wirkungsgrads der MGT durch die Verbesserung der Einzelkomponenten sowie die Optimierung des Packagings erreicht werden. Zur Darstellung des Entwicklungspotentials wurden anhand einer Kennfeld-basierten Referenzgasturbine mit einer maximalen elektrischen Leistung von 22 kW_{el} numerische Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Bei den Turbokomponenten handelt es sich um Bauteile aus einer Serienfertigung, die noch nicht weiter für den Einsatz in einer Mikrogasturbine optimiert wurden. Die wesentlichen Randbedingungen der Systemsimulation sind in Tabelle 18 zusammengefasst. Zur Simulation wurde ein am DLR Institut für Verbrennungstechnik entwickeltes Werkzeug zur Auslegung von MGT-Prozessen eingesetzt.

Umgebungsbedingungen	
Temperatur	15 °C
Druck	101,3 kPa
Relative Luftfeuchtigkeit	60%
Relative Druckverluste $\Delta p/p$	
Brennkammer	2,8%
Rekuperator Heiß-/Kaltgasseite je	1,8%
Verrohrung	1,3%
Sonstiges	
Wärmeverlust	8% der Verbrennungswärme
Rekuperatoreffizienz	85%
Reibungsverlust und Kraftstoffpumpe	3% der Wellenleistung
Maximale Rekuperatortemperatur	800 °C
Maximale TIT	1000 °C

Tabelle 18: Zusammenstellung der Randbedingungen für die MGT-Prozesssimulation

In Abbildung 56 ist der Verlauf des mechanischen Wirkungsgrads der Referenzgasturbine für den Teil- und Volllastbetrieb dargestellt. Der höchste mechanische Wirkungsgrad wird bei der maximalen Leistung von 22kW_{el} erreicht. Im oberen Leistungsbereich fällt infolge der Rekuperation der mechanische Wirkungsgrad nur gering ab. So reduziert sich dieser bei einer Halbierung der elektrischen Leistung um nur 3%-Punkte. Erst im unteren Teillastbereich findet ein stärkerer Abfall dieser Größe statt.

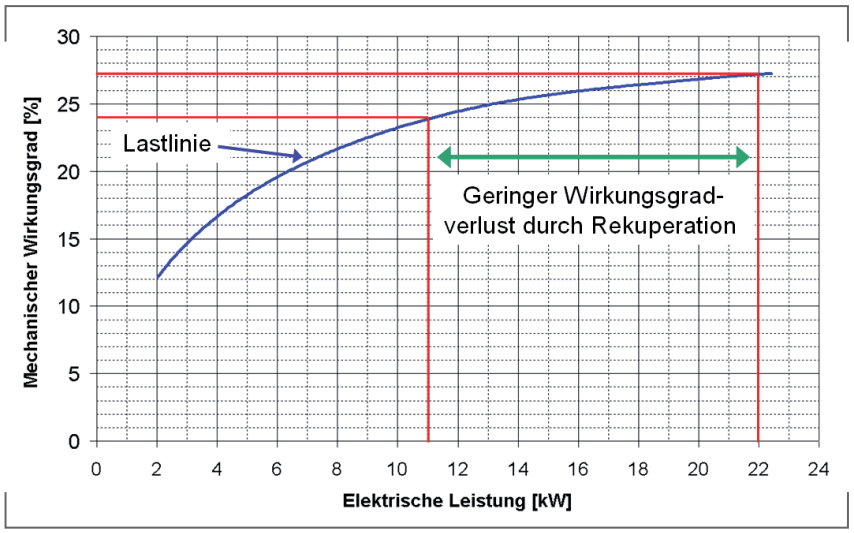


Abbildung 56: Simuliertes Teillastverhalten der Referenzgasturbine

4.3.1 Komponenten- und Systemanalysen im Volllastpunkt

Zur Analyse des Einflusses der Einzelkomponenten auf den mechanischen Wirkungsgrad des TRE wurden für den Volllastpunkt Parameterstudien durchgeführt. Gegenstand der Untersuchungen waren hierbei die Verbesserung der Effizienz des Rekuperators, des Verdichters und der Turbine sowie die Reduktion der Wärme- und Druckverluste des Systems. Die Ergebnisse der Studien sind in Abbildung 57 zusammengefasst.

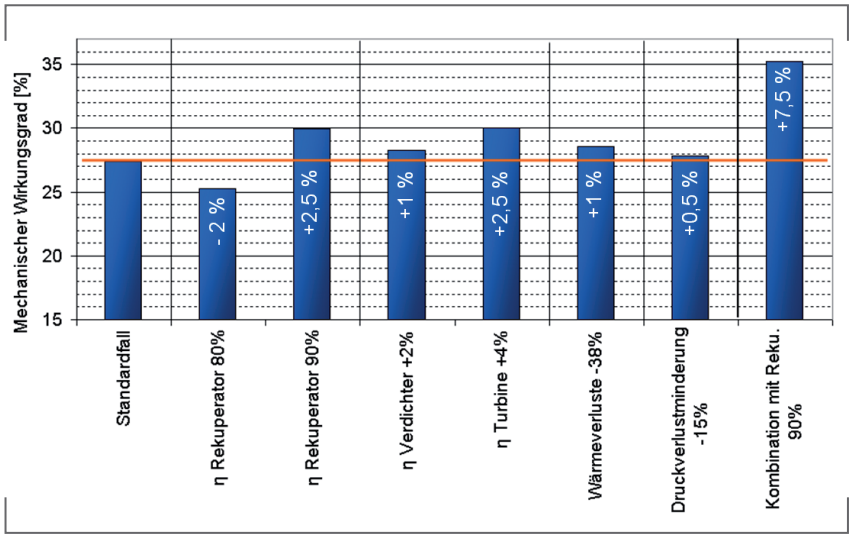


Abbildung 57: Ergebnisse der numerischen Sensitivitätsanalyse zur Bewertung des Optimierungspotentials anhand der Referenzgasturbine

Rekuperator:
Die Effizienz des Rekuperators trägt erheblich zur Performance der MGT bei. Durch die Steigerung dieser Größe von 85% auf 90% kann der mechanische Wirkungsgrad des TRE um 2,5%-Punkte gesteigert werden. Bei einer Effizienz von 95% ist sogar eine Erhöhung auf 30% möglich. Jedoch hat die Steigerung der Rekuperatoreffizienz einen erheblichen Einfluss auf die Leistungsdichte und das Leistungsgewicht des TRE. Der Zusammenhang zwischen diesen Größen ist in Abbildung 58 dargestellt. Eine Reduktion der Rekuperatoreffizienz von 90% auf 85% verringert beispielsweise das Gewicht des Rekuperators um 38% und das Volumen um 56%.

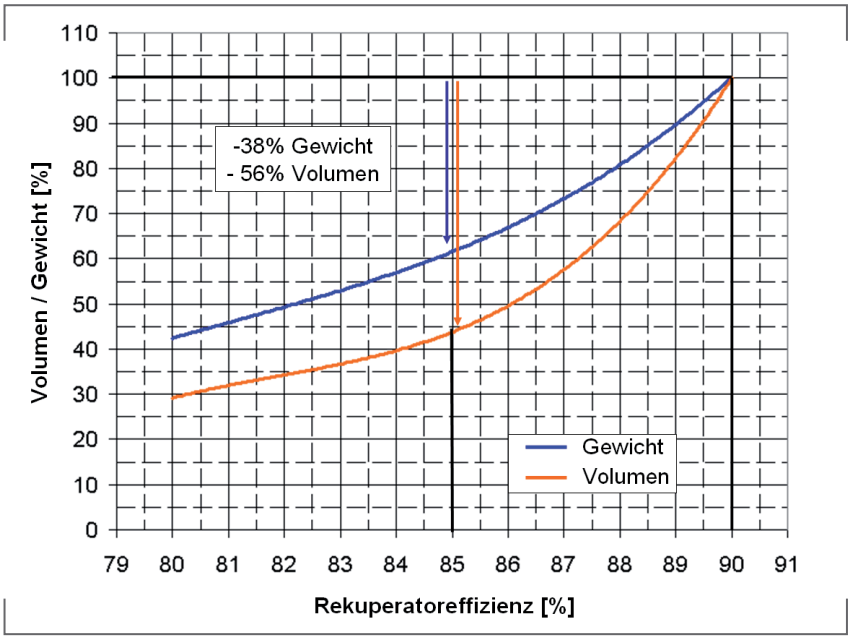


Abbildung 58: Zusammenhang zwischen der Effizienz, des Gewichts und Volumens des Rekuperators

Die Abbildung 59 zeigt exemplarisch die Auswirkung der Wahl des Rekuperators auf die Gesamtmasse, das Gesamtvolumen und den mechanischen Wirkungsgrad am Beispiel einer 42 kW_{el} MGT. Die ideale Größe des Rekuperators hängt vom jeweiligen Anwendungsfall ab und stellt immer ein Kompromiss aus Effizienz und Leistungsdichte bzw. -gewicht dar.

Bei einer Effizienz von 90% beträgt der Anteil des Rekuperators an den Systemkosten derzeit bis zu 40%. Diese Kosten ergeben sich aus den aktuell geringen Stückzahlen und können durch Erhöhung des Produktionsvolumens gesenkt werden. Ebenso ist der Preis von der Materialwahl abhängig. Bis zu einer Temperatur von 650 °C können Edelstähle verwendet werden. Der Einsatz von höherlegierten Materialien (z.B. ATI AL 20-25+Nb) ermöglicht Rekuperatortemperaturen bis 750 °C, bei etwa einer Vervierfachung der Kosten. Bei höheren Temperaturen bis 1050 °C werden nickelbasierte Legierungen (z.B. Inconel 625) verbaut, die preislich über den höherlegierten Stählen liegen. Da im Automobilbereich die Laufzeiten mit circa 5.000 Betriebsstunden deutlich unter denen von BHKW (~80.000 Stunden) liegen, können höhere thermische Belastungen akzeptiert und gegebenenfalls kostengünstigere Stähle verbaut werden.

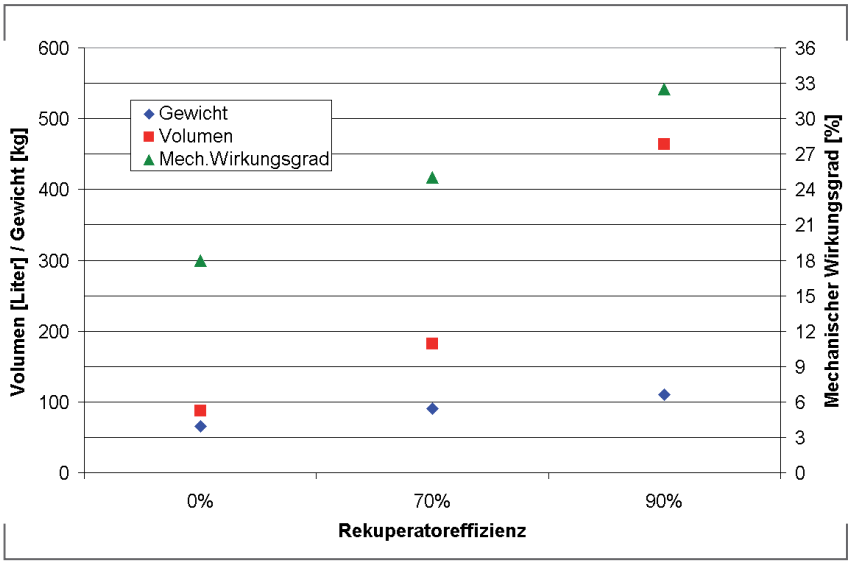


Abbildung 59: Zusammenhang zwischen der Rekuperatoreffizienz, dem Systemgewicht und -volumen sowie dem mechanischen Wirkungsgrad eines 42 kW_{el} TRE

Eine mittelfristig einsetzbare Alternative zum Rekuperator stellen Regeneratoren dar. Diese Technik wurde bereits bei den Direktantrieben als Wärmeübertrager verwendet. Die Funktionsweise eines Regenerators ist in Abbildung 60 veranschaulicht. Das heiße Turbinenabgas strömt durch den sich kontinuierlich drehenden Regenerator und heizt diesen lokal auf. Durch die Rotation wird das erhitzte Material aus der Heißgasseite gedreht und gibt die gespeicherte Wärmeenergie an das verdichtete frische Prozessgas ab. Prinzipiell können mit Regeneratoren im Vergleich zu Rekuperatoren höhere Effizienten erreicht werden. Jedoch ist die Abdichtung zwischen der Heiß- und Kaltgasseite noch nicht technisch vollständig gelöst.

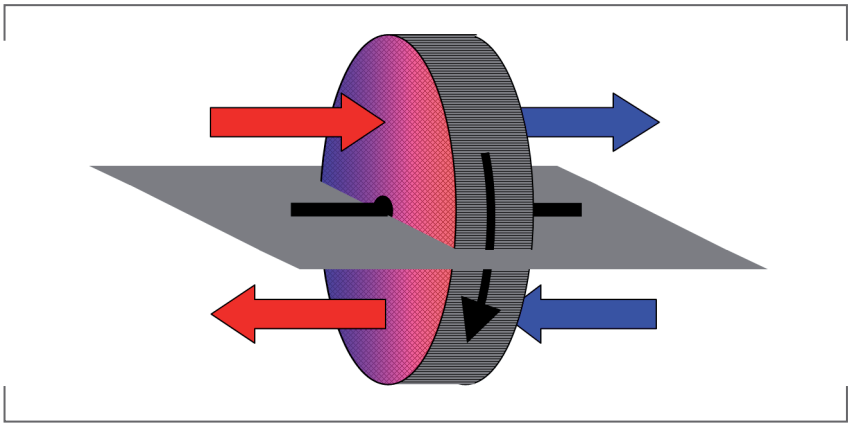


Abbildung 60: Schematische Darstellung eines Regenerators (Abgas oben, Frischluft unten)

Turbokomponenten:
Zur Analyse des Einflusses der Turbokomponenten auf den mechanischen Wirkungsgrad der MGT wurde im Rahmen der Potentialanalyse der isentrope Verdichterwirkungsgrad um 2%-Punkte und der isentrope Turbinenwirkungsgrad um 4%-Punkte gesteigert. Wie in Abbildung 57 gezeigt, erhöht sich der mechanische Wirkungsgrad des TRE durch diese Modifikationen um 1%-Punkt (Verdichter) bzw. um 2,5%-Punkte (Turbine). Die Optimierungsannahmen beruhen auf der realistischen Annahme, dass sowohl die Strömungsführung verbessert als auch die Verluste der Turbokomponenten der Referenzgasturbine weiter reduziert werden können.

Gesamtsystem:
Weitere Entwicklungspotentiale liegen in einer optimierten Wärmeisolierung und einer druckverlustärmeren Strömungsführung. Bei einer Reduzierung der Wärmeverluste um 38% steigt beispielsweise der mechanische Wirkungsgrad um 1%-Punkt. Weiter resultiert die Absenkung der Druckverluste um 15% in einer Steigerung des mechanischen Wirkungsgrads um 0,5%-Punkte. Unter Berücksichtigung aller Optimierungsansätze ist es möglich, den mechanischen Wirkungsgrad der Referenzgasturbine, die dem Stand der Technik entspricht, um 7,5%-Punkte auf über 35% zu steigern.

4.3.2 Optimierungspotential durch den Einsatz von Keramik

Eine wesentliche Erhöhung der mechanischen Wirkungsgrade kann langfristig nur durch eine Steigerung der TIT über die eigentlichen Grenztemperaturen des metallischen Werkstoffes erreicht werden. Diese Vorgehensweise ist bei Luftfahrttriebwerken oder Kraftwerksgasturbinen Stand der Technik. Das Material der Axialturbinen wird hierbei durch Thermalbeschichtungen und/oder unterschiedlichen Kühlungskonzepte geschützt. Bei einer MGT-Radialturbine ist dies aufwändiger zu realisieren und aus Kostengründen nicht praktikabel. Daher kann die TIT nur durch den Einsatz thermisch widerstandsfähigerer Materialien weiter erhöht werden. Durch den Einsatz von Keramiken im Bereich der Turbine, der Brennkammer, der Verbindungsstücke sowie des Rekuperators kann die maximale TIT von derzeit 1050 °C auf etwa 1350 °C angehoben werden **[48]**.

Abbildung 61 zeigt den Zusammenhang zwischen der TOT, dem Verdichterdruckverhältnis π, der Rekuperatoreffizienz und dem mechanischen Wirkungsgrad am Beispiel der Referenzgasturbine mit einem um 5%-Punkte erhöhten Turbinenwirkungsgrad. Ebenfalls wurde im Vergleich zu den Referenzbedingungen (vgl. Tabelle 18) der Verdichterwirkungsgrad um 2%-Punkte gesteigert sowie die Wärmeverluste um 38 % und die Druckverluste um 15 % reduziert. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei höheren Rekuperatoreffizienzen niedrigere Verdichterdruckverhältnisse erforderlich sind, um den maximalen mechanischen Wirkungsgrad zu erreichen. Ein niedriges π führt jedoch zu einem reduziertem Leistungsgewicht bzw. -dichte und höheren Turbinenaustrittstemperaturen, wodurch teurere Rekuperatormaterialien erforderlich werden.

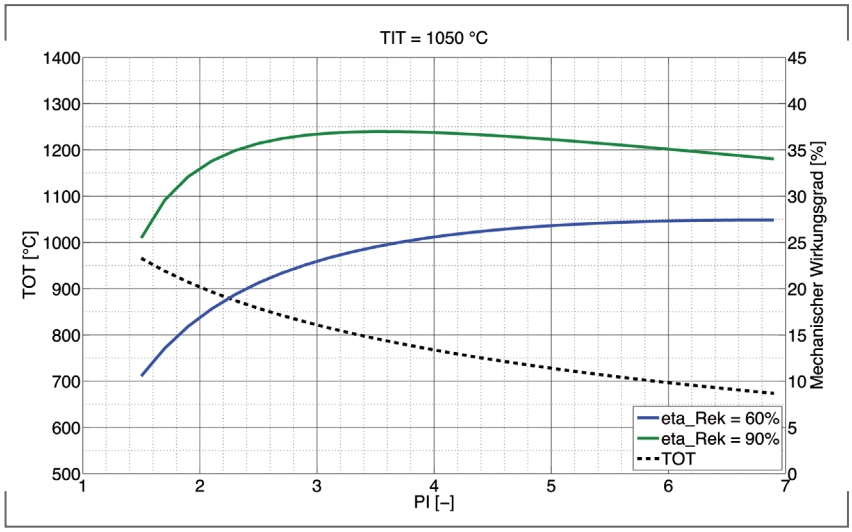


Abbildung 61: Zusammenhang zwischen dem Verdichtungsverhältnis π, der Rekuperatoreffizienz (eta_Rek), der TOT und dem mechanischen Wirkungsgrad einer metallischen MGT (TIT = konst. = 1050 °C)

Abbildung 62 zeigt die gleiche Studie für eine keramische MGT mit einer TIT von 1350 °C. Bei der Simulation wurde der Turbinenwirkungsgrad um 1%-Punkt im Vergleich zu der metallischen Variante reduziert. Der Grund hierfür ist, dass mit den derzeit vorhandenen keramischen Werkstoffen und Fertigungstechnologien die Geometrien einer metallischen Turbine noch nicht komplett nachgebildet werden können. Die maximale Rekuperatoreffizienz wurde auf 93 % angehoben, da ein keramischer Wärmeübertrager potentiell dünnere Trennschichten mit höheren Wärmeleitwerten ermöglicht.

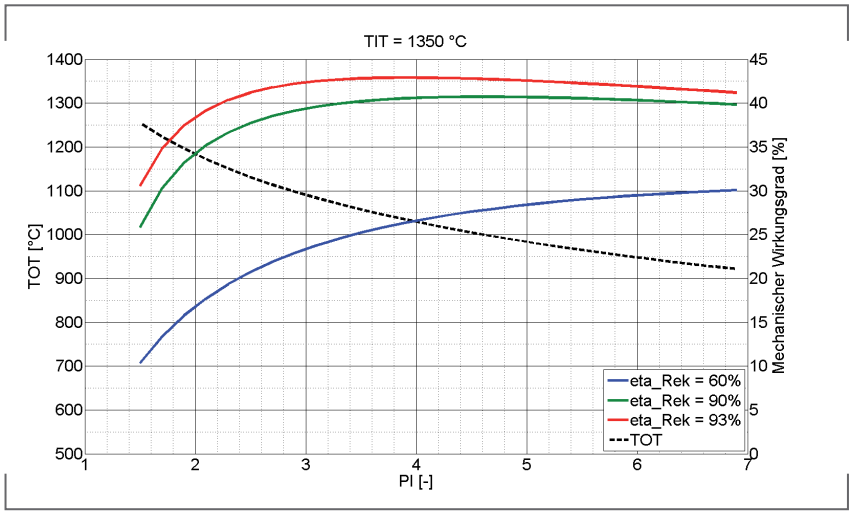


Abbildung 62: Zusammenhang zwischen dem Verdichtungsverhältnis π, der Rekuperatoreffizienz (eta_Rek), der TOT und dem mechanischen Wirkungsgrad einer keramischen MGT (TIT = konst. = 1350 °C)

Im Vergleich zu Abbildung 61 wird deutlich, dass das optimale π durch eine Erhöhung der TIT steigt. Weiterhin ist der Wirkungsgradabfall bei steigendem π und einer hohen Rekuperatoreffizienz weniger ausgeprägt. Daher kann neben einer deutlichen Steigerung des mechanischen Wirkungsgrads auf bis zu 43 % auch π erhöht werden. Dadurch steigert sich die Leistungsdichte bzw. das -gewicht.

4.3.3 Optimierungspotentiale im Teillastbereich

Der Abfall des Turbinenwirkungsgrads bei niedrigeren Volumenströmen kann durch den Einsatz einer variablen Turbineneinlassgeometrie (VTG) deutlich reduziert werden. Hierbei wird durch bewegliche Turbinenleitschaufeln die Anströmung des Turbinenrades immer so gesteuert, dass diese unabhängig vom Betriebspunkt möglichst optimal erfolgt. Dadurch bleibt der Turbinenwirkungsgrad über einen weiten Betriebsbereich annähernd konstant. Die VTG Technologie, dargestellt in Abbildung 63, ist im Bereich der Turbolader bereits Stand der Technik.

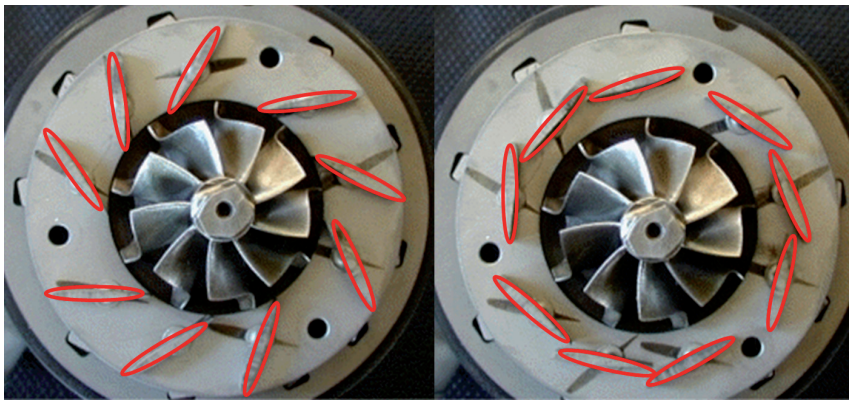


Abbildung 63: Beispiel einer Radialturbine mit VTG (variable Leitschaufeln sind rot gekennzeichnet); Leitschaufelstellung für hohe Volumendurchsätze links und geringere rechts

4.4 Kompetenzen am Standort Baden-Württemberg

In der nachfolgenden Tabelle sind exemplarisch einige Komponentenhersteller aus Baden-Württemberg aufgeführt. Die Übersichtsliste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Einen Hersteller von kompletten TRE-Systemen gibt es derzeit in Baden-Württemberg nicht, jedoch sind bis auf die Produktion von für MGT geeignete Rekuperatoren alle Kernkompetenzen vorhanden.

Turbokomponenten	Bosch Mahle Turbo Systems GmbH, Voith GmbH
Brennkammer Komponenten	Bosch GmbH, Lechler GmbH, BorgWarner BERU Systems GmbH, WS-Wärmeprozesstechnik GmbH
E-Motoren	ATE GmbH
Leistungselektronik	Aradex GmbH

Tabelle 19: Hersteller von TRE Komponenten in Baden-Württemberg

4.5 Zusammenfassung Mikrogasturbine

Die Nachteile der Gasturbine beim Direktantrieb, die dazu geführt haben, dass sich diese Technologie nicht am Markt durchsetzen konnte, werden durch den seriellen Hybridantrieb überwunden. Neben ihrem hohen mechanischen Teil- und Volllastwirkungsgrad von bis zu 37 %, wurde eine Reihe von systemimmanenten Vorteilen der MGT beschrieben, die ihre sehr gute Eignung als Range Extender belegen. So werden aufgrund der kontinuierlichen Verbrennung sehr niedrige Schadstoffemissionen ausgestoßen, bei hoher Vielstofffähigkeit und Kraftstoffflexibilität. Durch das Wegfallen der Abgasnachbehandlung, des Ölkreislaufs und eines Kühlkreislaufs für die MGT wird die TRE-Einheit kompakt, leicht und kostengünstig. Der verbleibende Aufbau mit nur einem beweglichen Bauteil ermöglicht eine hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit, bei langen Wartungsintervallen und niedrigen Wartungskosten. Die ebenfalls daraus resultierende hohe Laufruhe und einfache Schalldämpfung erhöhen den Fahrkomfort. Durch die frei wählbare Rekuperatoreffizienz kann die MGT an das gewünschte Betriebskonzept und den vorhandenen Bauraum des Fahrzeugs angepasst werden. Damit ist es möglich, einen optimalen Kompromiss zwischen Wirkungsgradsteigerung und höherer Leistungsdichte bei niedrigeren Kosten einzugehen.

5.

Hubkolben- und Wankelmotor

5.1 Einteilung der Verbrennungsmotoren nach Arbeitsverfahren

Um einen übersichtlichen Vergleich und eine aussagekräftige Bewertung der verschiedenen Motortypen bezüglich der Eignung als Range Extender anzustellen, ist es sinnvoll diese in einem ersten Schritt nach Ihrem Arbeitsverfahren zu unterteilen. Eine weitere Einteilung der Motorbauarten, wie z.B. Zylinderanzahl, erfolgt innerhalb des Arbeitsverfahrens.

5.1.1 Der 4-Takt-Otto-/Dieselmotor

Der heutzutage am häufigsten verwendete Motor ist der Viertaktmotor, welcher sich nach dem Otto- und Dieselprozess weiter unterscheiden lässt. Nachfolgend soll das Arbeitsverfahren eines Viertaktottomotors mit Saugrohreinspritzung näher erklärt werden. Das Verfahren ist, wie der Name verdeutlicht, in vier Arbeitstakte unterteilt. Erster Takt ist das Ansaugen eines im Saugrohr gebildeten Kraftstoff-Luft-Gemischs in den Arbeitsraum. Hierzu öffnet das Einlassventil, der Kolben bewegt sich abwärts und erzeugt somit eine Sogwirkung. Das Auslassventil ist während des ersten Taktes geschlossen. Mit der Kolbenaufwärtsbewegung ab dem unteren Umkehrpunkt, auch unterer Totpunkt (UT) genannt, beginnt der zweite Arbeitstakt, das Verdichten. Hierbei sind Ein- und Auslassventil geschlossen. Durch die Aufwärtsbewegung des Kolbens wird das Kraftstoff-Luftgemisch stark verdichtet. Kurz vor dem Kolbenumkehrpunkt, oberer Totpunkt (OT), wird das zündfähige Gemisch mittels Zündkerze kontrolliert gezündet. Durch die Verbrennung und die einhergehende Temperatur- und Druckerhöhung erfolgt eine Expansion des Gases und der Kolben wird nach unten gedrückt. Das Gas verrichtet Arbeit am Kolben, was zugleich auch den dritten Takt darstellt. Beim vierten und letzten Takt, dem Ausstoßen, öffnet das Auslassventil und das Gas wird durch die Aufwärtsbewegung des Kolbens aus dem Arbeitsraum geschoben. Im oberen Totpunkt schließt das Auslassventil, es öffnet sich das Einlassventil und der Kreislauf beginnt von neuem. Abbildung 64 zeigt schematisch das 4-Takt-Prinzip eines Ottomotors **[50]**.

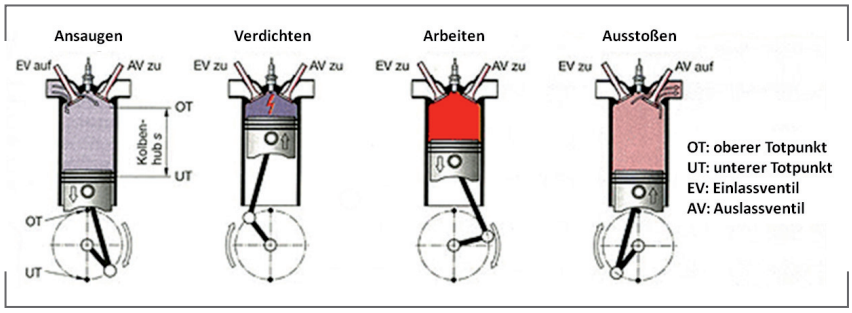


Abbildung 64: Schematische Darstellung 4-Takt-Ottomotor [51]

Ein Dieselmotor unterscheidet sich vom Ottomotor zum einen durch die Bildung, zum anderen durch die Zündung des Gemisches. Beim Dieselmotor wird nicht wie beim Ottomotor ein Kraftstoff-Luft-Gemisch in den Arbeitsraum angesaugt, sondern lediglich Frischluft. Der für die Verbrennung benötigte Kraftstoff wird mittels Einspritzdüsen direkt in den Arbeitsraum (Direkteinspritzungsmotor) oder in einen geteilten Arbeitsraum (indirekte Einspritzung – Kammermotor) eingespritzt. Dies erfolgt kurz vor Verdichtungsende. In Folge der hohen Verdichtung erwärmt sich die Luft stark. Die Temperatur der hochverdichteten Luft im Arbeitsraum ist ausreichend, um den eingespritzten Kraftstoff direkt zu entzünden. Dieser Vorgang wird auch Selbstzündung genannt **[50]**.

5.1.2 Der 2-Takt-Ottomotor

Eine Kurbelwellenumdrehung stellt beim 2-Takt-Motor einen Arbeitszyklus dar. Durch die einfachste Variante eines 2-Takt-Motors mit Kurbelkastenspülung und Schlitzsteuerung werden keine Ventile und die damit verbundene Nockenwelle benötigt, was den 2-Takt-Motor zum einen leichter, aber auch günstiger gegenüber einem 4-Takt-Motor werden lässt.

Der erste Takt bildet das Verdichten oberhalb des Kolbens sowie das Ansaugen des Kraftstoff-Luft-Gemischs unterhalb des Kolbens. Dabei ist der Einlasskanal geöffnet und der Auslasskanal geschlossen. Die Zündung erfolgt wie beim 4-Takt-Ottomotor mittels Fremdzündung über den Zündfunken einer Zündkerze kurz vor dem oberen Totpunkt. Es folgt der zweite Takt. Aufgrund der Expansion des Gases oberhalb des Kolbens wird dieser wieder abwärts bewegt. Gleichzeitig wird das im ersten Takt angesaugte Gemisch durch die Kolbenabwärtsbewegung unterhalb des Kolbens vorverdichtet. Beim Übergang vom zweiten zum ersten Takt wird der Einlasskanal geschlossen und der Auslasskanal geöffnet. Dies führt dazu, dass das vorverdichtete Gemisch mittels Überströmkanal in den Brennraum gedrückt und das dort vorhandene Restgas ausgeschoben wird (Ladungswechsel). Abbildung 65 zeigt schematisch das 2-Takt-Prinzip eines Ottomotors **[50]**.

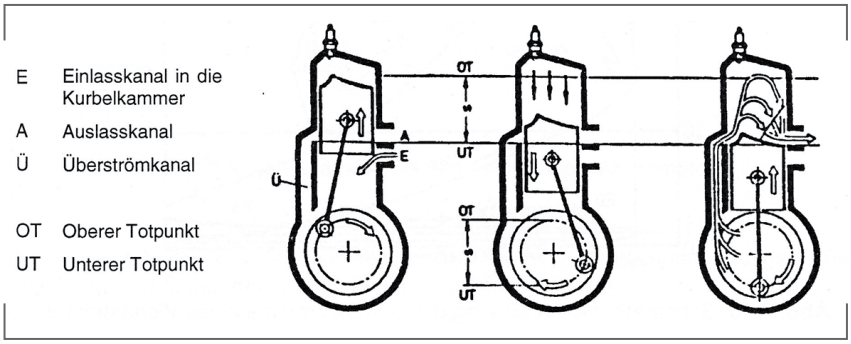


Abbildung 65: Arbeitsverfahren 2-Takt-Ottomotor [50]

5.1.3 Der 4-Takt-Wankelmotor

Der Wankelmotor ist ein Rotationskolbenmotor, der nach dem 4-Takt-Otto-Prinzip arbeitet. Die Kolbenflanken bilden zusammen mit der Gehäusekontur drei Arbeitskammern, die mit dem Kolben umlaufen und dabei ihre Größe ändern (siehe Abbildung 66).

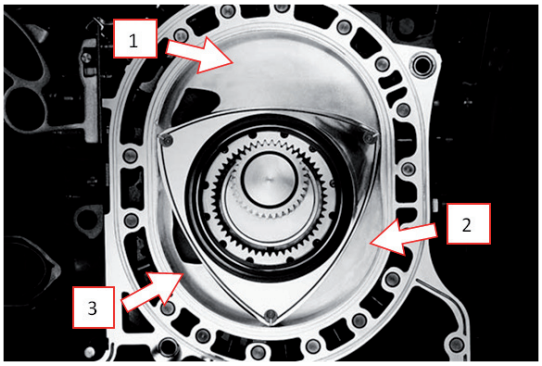


Abbildung 66: Schnittansicht eines Wankelmotors

In jeder Arbeitskammer läuft während einer Kolbenumdrehung ein Viertaktprozess ab. Der Taktverlauf ist gleich dem des Viertakt-Hubkolbenmotors, bestehend aus erstens Ansaugen, zweitens Verdichten, drittens Arbeiten und viertens Ausstoßen. Während also das Kraftstoff-Luft-Gemisch in die erste Arbeitskammer angesaugt wird (1. Takt), findet in der Zweiten die Verdichtung (2. Takt) und in der Dritten das Expansionsende (3. Takt) statt. Anschließend wird in der ersten Arbeitskammer verdichtet (2. Takt), in der Zweiten wurde gezündet und es läuft die Expansion der verbrennenden Gase (3. Takt), während in der Dritten das Ausschieben der verbrannten Gase (4. Takt) erfolgt. Die erste Arbeitskammer eilt sozusagen der Zweiten, die Zweite der Dritten hinterher. Abbildung 67 zeigt schematisch das Viertaktprinzip eines Wankelmotors.

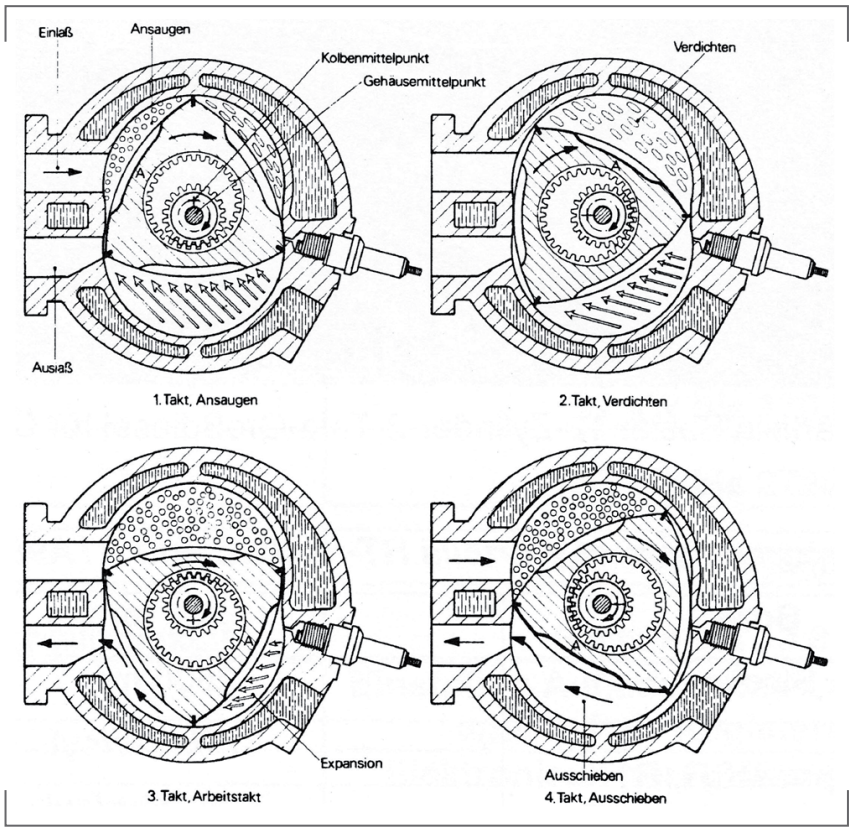


Abbildung 67: 4-Takt-Prozess des Wankelmotors

5.2 Vergleich und Bewertung

Im Folgenden werden unterschiedliche Motorkonzepte basierend auf bereits vorhandenen Verbrennungsmotoren mit Motorleistungen um 20 kW auf ihr Potential als Range Extender untersucht. Dies können Motoren sein, welche bereits in herkömmlichen PKW und Leichtkrafträdern zum Einsatz kommen, aber auch Motoren, die speziell für die Verwendung als Range Extender entwickelt wurden.

Im Bereich der Zweitaktottomotoren ist die Auswahl momentan sehr begrenzt. Es lässt sich auf Motoren von Leichtkrafträdern zurückgreifen, wobei diese aber nicht dem aktuell möglichen Stand der Zwei-Takt-Technik entsprechen. Für Zweiräder über 50 ccm, egal ob Zweitakt- oder Viertaktmotor, gelten seit 1. Juni 2006 die Abgasnormen Euro2 bzw. Euro3. Dies führte oberhalb 50 ccm zu einer weitreichenden Verdrängung von Zweitaktmotoren. Infolgedessen wurde die Weiterentwicklung seitens der Motorradhersteller nicht fortgesetzt. Spitzenreiter in der Entwicklung von Zweitaktmotoren ist die für seine Kettensägen bekannte Stihl AG & Co. KG. Jedoch sind dessen Motorenpalette nicht leistungsstark genug, um den gegebenen Anforderungen zu genügen. Im Bereich der Viertaktottomotoren ist die Auswahl erheblich größer. Auch haben sie über die letzten Jahre viel Neuerung und Optimierung erfahren. Dies hat dazu geführt, dass sie bei den Verbrauchswerten mit sparsamen Dieselmotoren mithalten können. Hierzu gehört der „Lotus Range Extender", welcher eigens zum Zweck des Betriebs als Range Extender entwickelt wurde. Ein weiterer Kandidat kommt vom österreichischen Hersteller BRP-Powertrain. Dieser stellt Motoren für die verschiedensten Einsatzbereiche her, so auch der leistungsstarke „Rotax ACE 600", welcher bisher in einem Schneemobil als Antriebsaggregat dient. Die AVL List GmbH kann ebenfalls einen interessanten Motor aufweisen. Wie auch der Lotus-Motor, ist er speziell für die Verwendung als Range Extender entwickelt worden.

Auch im Dieselsegment stehen potentielle Motoren zur Verfügung. Es wurden für diese Studie Motoren herausgesucht, deren Motorleistung in einem niedrigen Nennleistungsbereich (ca. 20 kW), der für den Einsatz als Range Extender als ausreichend betrachtet wird, liegen. Diese Aggregate sind unter anderem für den stationären Einsatz kostengünstig konzipiert und verfügen teils nicht über eine Aufladung oder direkte Einspritzung, weshalb sie auch nicht das technologisch hochentwickelte Niveau von aktuell in Fahrzeugen verbauten Dieselmotoren erreichen. Die Hersteller Kohler, Kubota und Lombardini haben Aggregate im Angebot, welche sich zwar bzgl. Leistung und Verbrauch in Wertebereichen befinden, die durchaus für den Einsatz als Range Extender sprechen würden, jedoch in Hinblick auf Gewicht und Größe Optimierungspotentiale bergen. Laut Hersteller soll der „Lombardini LDW 1404" in naher Zukunft auch als kompakte Range Extender-Einheit erhältlich sein **[52]**.

Aus der Rubrik der Rotationskolbenmotoren ist es bisher nur dem Hersteller AVL List GmbH gelungen, ein konkurrenzfähiges Produkt auf den Markt zu bringen. Dieser arbeitet nach dem Wankelprinzip und wird ebenfalls als Range Extender Einheit vermarktet. Für die folgende Betrachtung wird jedoch immer nur der alleinige Verbrennungsmotor samt seiner charakteristischen Eigenschaften herangezogen.

Für die folgenden Vergleiche und Bewertungen werden die auf dem Markt und in der Forschung führenden Motorkonzepte betrachtet und anschließend hinsichtlich ihrer verbrennungsmotorischen Eigenschaften und Potentiale zur Verwendung als Range Extender unabhängig vom Hersteller oder Forschungsinstitut bewertet. Als Grundlage für die Bewertung werden für jeden Motor zwei verschiedene Betriebspunkte festgelegt. Der Betriebspunkt 1 (BP1) wird im Bereich des geringsten spezifischen Verbrauchs gelegt, während der Betriebspunkt 2 (BP2) den Betriebspunkt mit maximaler Motorleistung, der Nennleistung, darstellt.

Die Motordaten der für die Bewertung zugrundeliegenden Motorenkonzepte werden in Tabelle 20 aufgeführt. Anhand der in Tabelle 20 aufgeführten Motoren soll festgestellt werden, welches der vorgestellten Motorprinzipien das Optimum für den Einsatz als Range Extender darstellt

Prinzip	Hubkolbenmotor								Rotations-kolbenmotor
	Otto					Diesel			Otto
	2-Takt		4-Takt			4-Takt			4-Takt
Hersteller	BRP Powertrain	Universität Graz	Lotus	BRP Powertrain	AVL List GmbH	Kohler	Kubota	Lombardini	AVL List GmbH
Bezeichnung	Rotax Type 122	Versuchs-motor	Lotus Range Extender	Rotax ACE 600	AVL 2-Zylinder	KD625-3	D1105T	LDW 1404	AVL Wankelmotor
Anordnung / Zyl.anzahl	Einzylinder	Einzylinder	R3	R2	R2	R3	R3	R4	Einscheiben-Wankelmotor
Hubraum	124,8 ccm	250 ccm	1193 ccm	600 ccm	570 ccm	1870 ccm	1123 ccm	1372 ccm	254 ccm
Kühlung	flüssig	flüssig	flüssig	flüssig	flüssig	Luft	flüssig	flüssig	Flüssig
Gewicht	21,5 kg[3]	kA	56 kg	40 kg	40 kg[4]	170 kg	97 kg	98 kg	29 kg[4]
Verdichtung	12,5:1	kA	10:1	12:1	11:1	17:1	kA	22,8:1	
Einspritz-verfahren	Membran-vergaser	LPDI	MPI	MPI	MPI	DI	IDI	IDI	Saugrohr
Betriebspunkt (BP1)									
Leistung [kW]	15	18	29,5	22	18	15	15	14,5	18
Drehmoment [Nm]	17	31	102	50	kA	91	80	70	kA
Drehzahl [1/min]	8500	5500	2750	4000	5000	1600	1850	2000	5000
spezifischer Verbrauch [g/kWh]	kA	275	243	245	250-260	220	250	255	260
Betriebspunkt (BP2)									
Leistung (max.) [kW]	22	32	36,8	42	25	24	21,7	21,8	30
Drehmoment [Nm]	19	35	100	52	kA	77	70	58	kA
Drehzahl [1/min]	11250	8800	3500	7250	6000	3000	3000	3600	7000
spezifischer Verbrauch [g/kWh]	kA	340	241	275	kA	280	275	320	kA
Leistungs-dichte [kW/kg]	1,02	> 1,0	0,61	1,05	0,83	0,14	0,22	0,22	1,03
Länge [mm]	404	kA	kA	420	346	662	498	596	250
Breite [mm]	384	kA	kA	550	472,5	495	433	412	240
Höhe [mm]	292	kA	kA	480	394	549	626	515,5	240
Volumen [m³]	0,045	kA	kA	0,111	0,064	0,18	0,135	0,127	0,014

Tabelle 20: Motordaten der untersuchten Motorkonzepte [53][54][55][56][57][58][59][60][61][62][63][64]

[3] Das Gewicht entspricht der Einheit aus Motor und Getriebe. Lässt sich konstruktiv nicht trennen.
[4] Das Gewicht entspricht der Einheit aus Motor und Generator.

Die Vergleiche und Bewertungen unterliegen folgender neun Kriterien:

1. Wirkungsgrad
2. Kosten
3. Gewicht
4. Leistungsdichte
5. Packaging
6. Emissionen
7. NVH
8. Kraftstoffflexibilität
9. Skalierbarkeit.

Diese werden in oben aufgeführter Reihenfolge abgearbeitet. Zuerst erfolgt die Definition, darauf der Vergleich der verschiedenen Motorkonzepte. Im Anschluss daran erfolgt die Bewertung der Motorkonzepte unter Zuhilfenahme der spezifischen Daten, bevor das nächste Kriterium abgearbeitet wird. Die Bewertung wird mittels Punktesystem von Eins bis Fünf durchgeführt, wobei ein Punkt für eine sehr schlechte, fünf Punkte für eine sehr gute Umsetzung steht. Die zugrunde liegende Punkteskala ist in Tabelle 21 aufgeführt.

Bewertung	sehr gut	gut	neutral	schlecht	sehr schlecht
Punkte	5	4	3	2	1

Tabelle 21: Punkteskala zur Bewertung

Nach der Bewertung der Einzelkriterien werden abschließend im Kapitel Auswertung die Einzelpunkte mit und ohne Berücksichtigung einer Gewichtung der Kriterien aufsummiert und das Endergebnis in einer einfachen Nutzwertanalyse vorgestellt.

5.3 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors beschreibt die Güte der Ausnutzung der Kraftstoffenergie. Wobei im Allgemeinen ausgedrückt, ergibt sich der Wirkungsgrad durch das Verhältnis aus Nutzen zu Aufwand. Hier angewendet ist der Nutzen die Motorleistung und der Aufwand die dem Motor durch den Kraftstoff zugeführte chemische Energie.

Konzeptvergleich
In diesem Abschnitt werden die Unterschiede bezüglich des Wirkungsgrades zwischen Otto- und Dieselmotor erläutert. Im darauf folgenden Absatz soll zwischen Zwei- und Viertaktottomotor differenziert werden. Der letzte Absatz befasst sich mit der Gegenüberstellung von Wankelmotor und Hubkolbenmotoren.
Der thermische Wirkungsgrad η_{th} eines Verbrennungsmotors ist abhängig von dessen Verdichtungsverhältnis ε und von den kalorischen Eigenschaften des Arbeitsmediums, ausgedrückt durch den Adiabatenexponent κ. Das Verdichtungsverhältnis ε ergibt sich aus Hubvolumen V_{Hub} und Kompressionsvolumen V_{Kom} zu **[50]**:

$$\eta_{th} = \frac{V_{Hub} + V_{Kom}}{V_{Kom}} \tag{5}$$

Als Hubvolumen wird der Raum bezeichnet, den der Kolben in einer kompletten Bewegung vom oberen bis zum unteren Totpunkt zurücklegt. Der darüber liegende Raum wird als Kompressionsvolumen bezeichnet. Der Adiabatenexponent κ ist das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten c_p und c_v und ist somit abhängig von den Eigenschaften bzw. Zusammensetzung des Gases/Gemisches und der Temperatur. Mit steigender Temperatur des Arbeitsmediums nimmt dessen Adiabatenexponent κ ab.

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \tag{6}$$

Abbildung 68 zeigt den thermischen Wirkungsgrad η_{th} über dem Verdichtungsverhältnis ε für verschiedene Adiabatenexponenten κ . Beim Viertakt-Ottomotor liegen die Verdichtungsverhältnisse im Bereich von 8,8:1 bis 12-13:1, bei Dieselmotoren je nach Einspritzungsverfahren im Bereich von 15:1 bis 22:1 **[50]**.

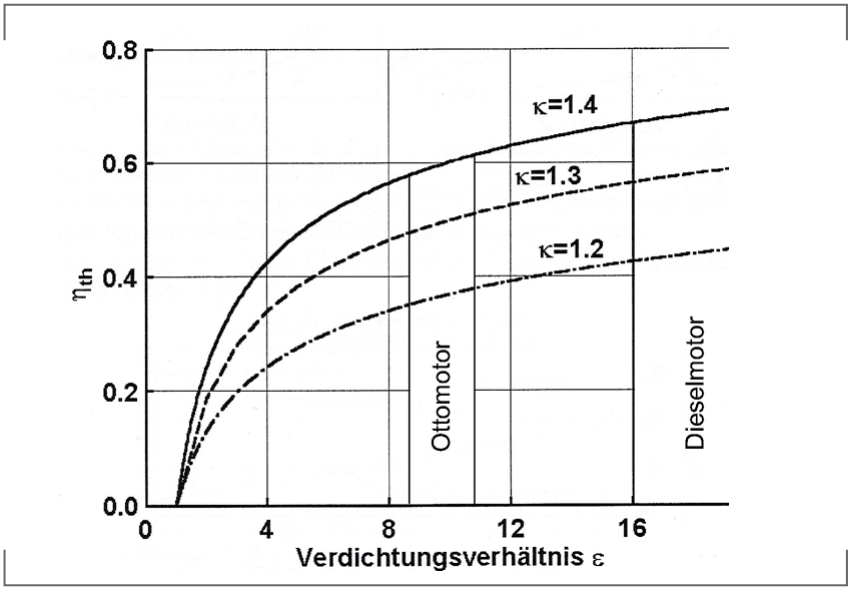


Abbildung 68: Thermischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis [50]

Wie aus Abbildung 68 ersichtlich, liegt der thermische Wirkungsgrad von Ottomotoren unter dem der Dieselmotoren. Steigt die Temperatur des Arbeitsmediums im Brennraum, so sinkt der Wirkungsgrad aufgrund der spezifischen Wärmekapazitäten. Die obere Grenze für das Verdichtungsverhältnis beim Ottomotor wird durch die Selbstzündung des Gemischs (Klopfen) bestimmt. Es tritt Klopfen auf, wenn sich das Gemisch an anderen Stellen des Verbrennungsraums entzündet als an der Flammenfront, die von der Zündkerze ausgeht. Die dabei entstehenden hochfrequenten Druckwellen führen zu thermischer und mechanischer Überbelastung **[66]**. Der Wirkungsgrad wird auch aufgrund von Arbeitsverlusten weiter gesenkt. Beim Ladungswechsel auftretende Verluste entstehen zum einen durch Öffnen des Auslasses vor UT, wodurch die Expansionsarbeit verringert wird, zum anderen durch das Ausschieben des Abgases gegen Überdruck. Des Weiteren treten Strömungsverluste während des Ansaug- und Ausschiebetaktes an Steuerorganen wie Drosselklappe und Ventilen auf. Viertaktottomoto-

ren werden meist mit Drosselklappe und Saugrohr- beziehungsweise Kanaleinspritzung ausgeführt. Die durch die Drosselklappe auftretenden Drosselverluste im Teillastbereich können je nach Betriebsstrategie des Range Extenders jedoch vernachlässigt werden, da die Bestbetriebspunkte im Bereich der Volllastkurve liegen, bei der die Drosselklappe nahezu vollständig geöffnet ist. Ein Dieselmotor kommt gänzlich ohne Drosselklappe aus. Der zur Verbrennung notwendige Anteil von Luft wird konstant gehalten. Die Gemischbildung erfolgt entweder in einem ungeteilten Brennraum (Direkteinspritzermotoren) oder in einem geteilten Brennraum (Kammermotoren). Je nach eingespritzter Kraftstoffmenge werden verschiedene Kraftstoff-Luft- Verhältnisse λ erzeugt. Diese variieren von λ=1,3 im Volllastbereich, bis zu λ=18 im Teillastbereich und Leerlauf **[50]**.

Beim Zweitakter treten gegenüber Viertaktern neben den Strömungsverlusten zusätzlich noch Spülverluste beim Ladungswechsel auf. Das Ausschieben des Abgases durch das angesaugte Kraftstoff-Luft-Gemisch (Frischgas) wird Spülung genannt. Die Güte der Spülung ist abhängig vom Spülgrad λ_s, sowie von der Zylinderfüllung, welche durch den Fanggrad λ_z beschrieben wird.

$$\lambda_S = \frac{m_F}{m_F + m_R} \tag{7}$$

Dabei ist m_z die Masse der Frischladung im Zylinder, und m_R die Restgasmasse im Zylinder nach Schließen der Steuerorgane. Der Fanggrad λ_z ist das Verhältnis aus Liefergrad λ_l und dem Luftaufwand λ_a.

$$\lambda_z = \frac{\lambda_l}{\lambda_a} \tag{8}$$

Der Liefergrad λ_l ist ein Maß für die Güte des Ladungswechsels und wird gebildet durch das Verhältnis der im Zylinder tatsächlich verbleibenden Frischgasmenge zur theoretisch möglichen Ladungsmasse bei Schließen des Einlasses. Der Luftaufwand λ_a ist das Verhältnis von tatsächlich im Zylinder vorhandener zu theoretisch möglicher Luftmenge. Der Fanggrad λ_z wird durch das Verhältnis von tatsächlicher Frischladung zur gesamten angesaugten Ladungsmasse gebildet und ist im Idealfall $\lambda_z = 1$. Aufgrund der Überschneidung von „Auslass geöffnet" und „Einlass öffnet", ist jedoch der Fanggrad $\lambda_z < 1$, da Frischgas, ohne an der Verbrennung teilzunehmen, in das Abgassystem übergeschoben wird. Folglich gilt es beim Zweitaktmotor abzuwägen, ob Frischgas unverbrannt übergeschoben oder ein gewisser Anteil von Restgas im Brennraum erhalten bleibt. Um einen möglichst hohen Fanggrad zu erreichen und damit den spezifischen Kraftstoffverbrauch zu senken, gibt es konstruktive Möglichkeiten wie z.B. das Auslasssteuern mittels Ventilen oder die Verwendung einer Direkteinspritzung, welche jedoch die Komplexität des Motors und damit die Kosten erhöht.

Damit die Spülung ablaufen kann, muss ein positives Spülgefälle mittels Spülgebläse erzeugt werden. Ein positives Spülgefälle wird durch frühes Auslass Öffnen erreicht, da bei Einlass Öffnen der Zylinderdruck unter dem Spüldruck (Druck des Frischgases) liegen muss. Dies verhindert zugleich ein Rückschlagen des Abgases in den Einlass, ist jedoch zwangsläufig mit einem Verlust an Expansionsarbeit verbunden. Die einfachste Ausführung eines Spülgebläses stellt die Kurbelkammerspülpumpe dar. Sie nutzt das zyklisch veränderliche Volumen der Kurbelkammer und der Unterseite des Kolbens zur Verdichtung und Förderung des Frischgases mittels Überströmkanal in den Brennraum. Prozessbedingt bringen Spülgebläse weitere Arbeitsverluste mit sich **[50]**.

Der Wirkungsgrad von Rotationskolbenmotoren liegt unter dem der Hubkolbenmotoren. Dies ist auf die geringere Verdichtungsmöglichkeit zurückzuführen. Das Verdichtungsverhältnis eines Wankelmotors ist konstruktiv durch den sogenannten K-Faktor bestimmt. Der K-Faktor ist das Verhältnis aus erzeugendem Rotorradius R und Exzentrizität e. Vereinfacht gesagt, je größer der K-Faktor, desto höher kann verdichtet werden. Je kleiner der K-Faktor, desto kleiner der Brennraum, welcher in Abbildung 69 im verdichteten Zustand mit V_{min} gekennzeichnet ist. Aufgrund der ungünstigen Brennraumgeometrie, welche mit größer werdendem Brennraum V_{min} breiter und flacher wird (vgl. Abbildung 69 a)), ist für homogene Gemische ein eher kleiner Brennraum anzustreben (vgl. Abbildung 69 c)). Mit kleiner werdendem Brennraum sinkt jedoch auch das mögliche Verdichtungsverhältnis. Es gilt je nach Einsatzzweck das optimale Verhältnis zwischen möglicher Verdichtung und Homogenisierung des Gemischs umzusetzen.

Ein größerer Brennraum lässt höhere Verdichtungsverhältnisse zu, birgt aber aufgrund der größer werdenden Dichtflächen Verluste an diesen und die Homogenisierung des Gemischs ist weniger stark ausgeprägt. Abbildung 69 zeigt den Zusammenhang zwischen K-Faktor und dem theoretisch möglichen Verdichtungsverhältnis ε. Nimmt der K-Faktor ab, so vergrößern sich die Toträume und das mögliche Verdichtungsverhältnis nimmt ab **[67]**.

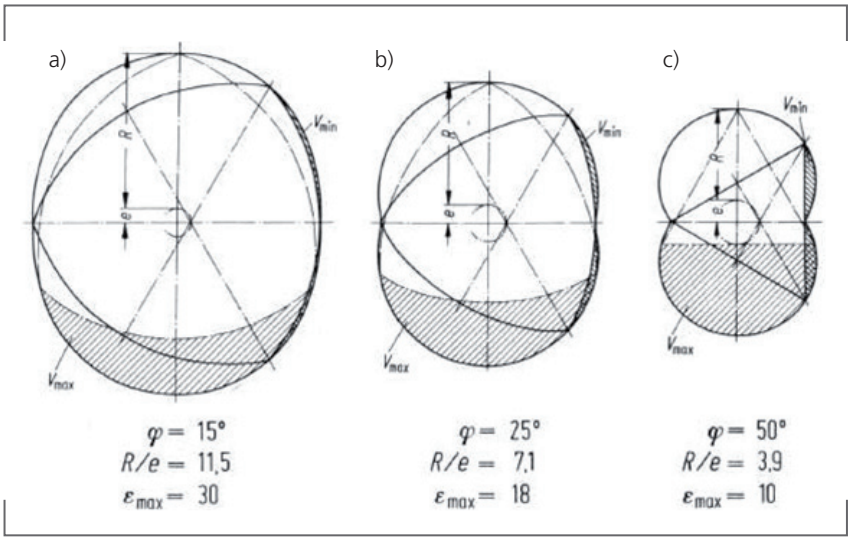


Abbildung 69: Verdichtungsverhältnis ε in Abhängigkeit von R/e [67]

Bedingt durch den geänderten Betriebsbereich des Verbrennungsmotors bei rein serieller Range Extender Anwendung kann der Wankelmotor gegenüber einem konventionellen Wankelmotor völlig geändert ausgelegt werden. So ist zum Beispiel die Umsetzung eines auf den Wankelmotor angepassten Miller-Zyklus möglich. Vorreiter des Miller-Zyklus war der Atkinson-Zyklus. Hauptmerkmal des Atkinson-Zyklus ist, dass Verdichtung und Expansion unterschiedlich lange andauern. Es wird eine Wirkungsgradsteigerung durch eine längere Expansion im Vergleich zur Verdichtung angestrebt. Beim Hubkolbenmotor wird diese Wirkungsgradsteigerung des Miller-Zyklus durch ein frühes Einlassschließen erreicht. Bei diesem Verfahren wird zur Füllungseinstellung des Zylinders keine Drosselklappe benötigt. Mit Abwärtsbewegung vom OT beginnt das Ansaugen des Frischgases.

Das Einlassventil schließt noch während der Abwärtsbewegung, sobald die gewünschte Frischgasmenge im Zylinder vorhanden ist. Anschließend wird die Zylinderladung bis zum UT expandiert. Dadurch verringern sich vor allem im Teillastbereich die Verluste beim Ladungswechsel aufgrund des Entfalls der Drosselklappe (Entdrosselung) und die Expansion dauert gegenüber der Verdichtung länger an. Des Weiteren senkt sich die Kompressionsanfangstemperatur, was sich positiv auf die spezifischen Wärmekapazitäten und somit auf den thermischen Wirkungsgrad auswirkt. Beim Wankelmotor lässt sich dieses Prinzip aufgrund der Kreisbewegung des Rotationskolbens nicht durch Steuern des Einlasses realisieren. Um die Expansionsarbeit, und damit den Wirkungsgrad zu erhöhen, wird beim Wankelmotor der Auslass später geöffnet. Daraus folgt, dass bei gleich hoher Verdichtung der Wirkungsgrad des Miller-Zyklus höher als der des Otto-Zyklus ist. Eventuelle Nachteile im Teillastbetrieb wegen zu starker Abkühlung bei der Expansion des Gemischs (Kondensation von Kraftstoff) sind im Fall der Verwendung als Range Extender aufgrund der Betriebsstrategie nahe Volllast zu vernachlässigen. So kann durch geschickte Wahl des K-Faktors ($K_{Wankel} < K_{Konventionell}$) und Anwendung des Miller-Zyklus ein optimierter Wankelmotor realisiert werden. Dieser zeichnet sich durch einen kleinen Brennraum und folglich durch homogenere Gemische aus und kann dabei einen gesteigerten Wirkungsgrad gegenüber einem konventionellen Wankelmotor aufweisen **[50]**, **[53]**.

Bewertung
Zur Bewertung werden die spezifischen Verbräuche, welche ein Maß für den Wirkungsgrad sind, der untersuchten Motoren im Niedriglast-Betriebspunkt herangezogen, da der Betrieb mit einer Leistung von rund 15 kW den häufigsten Anwendungsfall darstellt **[68]**. Die angegebenen spezifischen Verbräuche bestätigen die im Konzeptvergleich genannten Unterschiede in der Wirkungsgradausbeute der verschiedenen Arbeitsverfahren. So liegt der spezifische Kraftstoffverbrauch des direkteingespritzten Dreizylinder-Dieselmotors der Marke Kohler mit 220 g/kWh rund 9% unter dem des besten Viertaktottomotors **[62]**. Der Hersteller Kubota setzt bei seinem Dreizylinder Dieselmotor auf Aufladung und indirekte Einspritzung (Kammermotor). Aufgrund der hohen Luftverhältnisse infolge Aufladung sowie des hohen Verdichtungsverhältnisses liegen die spezifischen Verbräuche über das gesamte Drehzahl- und Leistungsspektrum im Bereich von 250 g/kWh **[63]**. Damit erhalten die beiden Dreizylinderaggregate in Kombination 5 Punkte. Der Vierzylinder Dieselmotor von Lombardini liegt mit einem spezifischen Verbrauch mit 255 g/kWh nur knapp über dem der beiden anderen Dieselmotoren und erhält darum 4,5 Punkte **[64]**.

Die Viertaktottomotoren, unabhängig von der Zylinderanzahl, liegen trotz der geringeren Maximalverdichtung ebenfalls um 250 g/kWh. Dies ist vor allem auf die intensive Reibungsminimierung durch die Hersteller zurückzuführen. Zum anderen treten die sonst üblichen Drosselverluste bei Teillastbetrieb aufgrund der geänderte Betriebspunkte nahe der Volllast nur in geringem Maße auf **[58]**, **[59]**, **[60]**. Folglich entfallen auf die Zwei- und Dreizylinder Ottomotoren jeweils 4,5 Punkte.

Die verwendete Direkteinspritzung beim Zweitaktversuchsmotor der Universität Graz bringt aufgrund der vollständigeren, homogeneren Zylinderfüllung gegenüber der veralteten Vergasertechnik eine deutliche Verbesserung beim Kraftstoffverbrauch. So liegt der Verbrauch des Einzylindermotors bei rund 275 g/kWh und erhält damit 3,5 Punkte **[57]**.

Der AVL List GmbH ist es gelungen, das Wankelkonzept erfolgreich aufzugreifen und umzusetzen. Trotz der konzeptbedingten geringeren möglichen Verdichtung der Rotationskolbenmotoren liegt der erzielte spezifische Kraftstoffverbrauch bei 260 g/kWh **[54]**.

Grund hierfür ist die Auslegung des Motors auf festgelegte Betriebspunkte, wie z. B. die der Kolbengeometrie und der Umsetzung des Miller-Zyklus **[53]**. Da der Verbrauch zwischen dem der betrachteten Viertakt- und Zweitaktottomotoren liegt, erhält der Wankelmotor 4 Punkte.

Die Punkteverteilung zum Wirkungsgrad der einzelnen Konzepte ist Tabelle 22 zu entnehmen.

Wirkungsgrad	2-Takt-Otto	4-Takt-Otto		4-Takt-Diesel		4-Takt-Einscheiben-Wankel
		2-Zylinder	3-Zylinder	3-Zylinder	4-Zylinder	
Bewertung	3,5	4,5	4,5	5	4,5	4

Tabelle 22: Punktebewertung Wirkungsgrad

5.4 Kosten

Ein Verbrennungsmotor besteht aus vielen verschiedenen Bauteilen, welche den Hauptanteil der Gesamtkosten verursachen. Steigt die Komplexität der Bauteile, so steigen auch die Kosten. Weitere fallen an, wenn noch zusätzliche Abgasnachbehandlungssysteme wie Katalysatoren oder Partikelfilter benötigt werden. Die Kosten der Abgasnachbehandlungssysteme sollen jedoch nicht hier, sondern in dem Kapitel Emissionen berücksichtigt werden. Im folgenden Abschnitt sollen lediglich die Kosten für den Verbrennungsmotor selbst untersucht werden.

Konzeptvergleich
Die Selbstkosten eines Produkts, in diesem Fall eines Verbrennungsmotors, lassen sich nach dem in Abbildung 70 gezeigten Schema ermitteln.

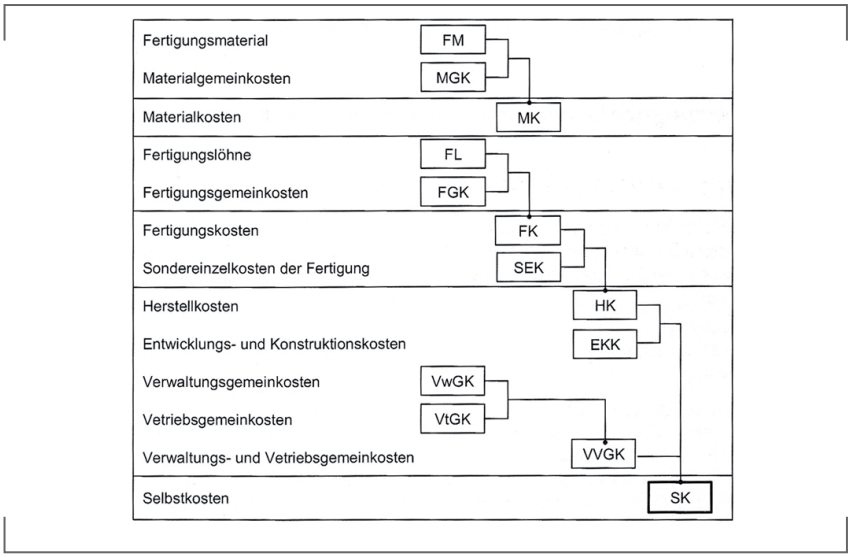


Abbildung 70: Differenzierte Zuschlagskalkulation [82]

Im Folgenden soll jedoch nur auf die Einzelkosten eingegangen werden, da die Gemeinkosten, welche sich unter anderem aus Lagerhaltung, Verwaltung und Vertrieb zusammensetzen, für jeden Motor in etwa in gleichem Maße anfallen (gleiche Firmenstruktur etc. vorausgesetzt), so dass diese nicht maßgebend für die Bewertung sind. Einzelkosten sind Kosten, die einem Kostenträger direkt zugerechnet werden können, wie z.B. Werkstoff und Fertigungslohn **[69]**.

Für den Vergleich und die Bewertung sind also nur die Herstellkosten von Interesse. Diese sind in besonderem Maße an die Zylinderanzahl des Motors gekoppelt. Mit steigender Zylinderanzahl nimmt die Komplexität der elektronischen Steuerung, die Anzahl an benötigten Bauteilen und zum Teil auch deren Größe zu. So steigen z.B. Gewicht und Volumen von Motorblock sowie Kurbelwellen- und Nockenwellenantrieb. Folglich steigen auch die damit verbundenen Materialkosten. Zusätzlich benötigte Bauteile sind unter anderem Pleuel, Kolben, Kompressions- und Dichtringe sowie Zünd- oder Glühkerzen. Die Fertigungskosten entstehen unter anderem durch Drehen, Fräsen und Bohren an Halbzeugen, sowie durch Oberflächennachbehandlung. Darunter fällt zum Beispiel das Honen der Zylinderinnenwände oder das Beschichten von Bauteilen wie den Stößeln, um deren Härte, Leichtlauf oder Dichtfähigkeit zu erhöhen.

Weitere Materialkosten entfallen auf das verwendete Einspritzsystem. Kostenverursachende Bauteile sind dabei die Injektoren, Kraftstoffleitungen und Pumpensysteme zur Kraftstoffförderung und Aufbau des nötigen Einspritzdrucks. Einfachste Ausführung ist die beim Ottomotor häufig verwendete Saugrohr- bzw. Kanaleinspritzung. Aufgrund der höheren Einspritzdrücke beim Dieselmotor muss das gesamte Einspritzsystem belastbarer ausgelegt werden. Darum wird auch von Hochdruckpumpen und Hochdruckleitungen gesprochen, welche dementsprechend dickwandiger und massiver ausgeführt werden müssen. Doch nicht nur die Drücke im Einspritzsystem sind beim Dieselmotor höher, sondern auch die im Brennraum, aufgrund der höheren Verdichtung. So müssen auch Zylinder, Zylinderkopf, Ventile, Kolben und weitere Bauteile belastbarer ausgelegt werden. Auch ist das Einspritzsystem des Dieselmotors mit Vor-, Haupt- und Nacheinspritzung deutlich komplexer und erfordert eine kostenintensivere Regelung.

Zusätzliche Material- und Fertigungskosten verursachen das Kühl- und Schmiersystem. Wegen der unterschiedlichen Verbrennungstemperaturen von Otto- und Dieselmotor, sind auch die Kühlsysteme entsprechend anzupassen. Beim Ottomotor treten generell höhere Temperaturen auf, so dass das Kühlsystem mehr Wärme abführen muss. Dies kann zum einen durch größere Kühlkanäle und Kühlflächen in den Zylinderwänden erfolgen, oder aber durch Erhöhung des Durchflusses mit leistungsstärkeren Wasserpumpen. Dies sind aber eher konstruktive Maßnahmen, so dass es aus Kostensicht kaum eine Rolle spielt, ob Kühlkanäle mit beispielsweise fünf oder zehn Millimeter ausgeführt werden. Wasserpumpen mit höheren Förderraten sind jedoch in der Regel kostenintensiver.

Bei der Motorschmierung gilt es zu differenzieren. Die kostengünstigste Variante stellt die Gemischschmierung beim Zweitaktmotor dar. Der benötigte Schmierölanteil wird hierzu dem Kraftstoff beigemischt. Zweitaktmotoren werden jedoch auch mit Getrenntschmierung ausgeführt. Hierbei wird das separat mitgeführte Schmiermittel durch eine Ölpumpe dem Kraftstoff beigemischt. In beiden Fällen wird das Schmiermittel mit verbrannt, daher werden diese auch Verbrauchs- oder Verlustschmierung genannt.

Die heutzutage am häufigsten angewandte Schmierung bei Viertaktmotoren ist die Druckumlaufschmierung, auch Nasssumpfschmierung genannt. Das zur Schmierung notwendige Öl befindet sich bei dieser Variante unterhalb der Kurbelwelle in der Ölwanne. Eine oder auch mehrere Ölpumpen saugen aus dieser das Öl an und befördern es durch Ölführungskanäle an die zu schmierenden Stellen wie z.B. Kurbel- und Nockenwellenlager. Das abtropfende Öl wird wieder in der Ölwanne gesammelt **[58]**. Ein eher selten zur Anwendung kommendes System ist das der Trockensumpfschmierung. Bei diesem System kommen zwei Pumpen zum Einsatz. Die Druckpumpe fördert Öl aus einem Öltank, welcher nicht zwangsläufig direkt am Motorblock verankert sein muss, an die zu schmierenden Bauteile. Das abtropfende Öl wird im Ölsumpf aufgefangen und durch die Saugpumpe zurück in den Öltank gefördert. Diese muss eine höhere Förderleistung aufweisen als die Druckpumpe, um sicher zu stellen, dass immer genügend Öl zu Schmierung im Öltank vorhanden ist. Die zur Kühlung und Schmierung benötigten Öl- und Wasserpumpen gehören zur Kategorie Nebenaggregate **[59]**. Drosselorgane beim Ottomotor sowie die Aufladung des Dieselmotors mittels Turbolader, wie sie häufig Anwendung findet, verursachen weitere Kosten.

Bewertung
Der wohl kostengünstigste Motor stellt der schlitzgesteuerte Einzylinder Zweitaktmotor von Rotax dar. Er kommt ohne Ventile und folglich ohne Ventiltrieb aus. Durch die Getrenntschmierung benötigt er zwar eine Ölpumpe, jedoch sind dabei die Fertigungskosten kaum über denen einer Gemischschmierung, da wegen der Beimischung von Öl zum Kraftstoff keine Ölführungskanäle benötigt werden **[56]**. Der Einzylinder Zweitaktversuchsmotor der Technischen Universität Graz fällt aufgrund der verwendeten Niederdruck-Einspritztechnik geringfügig teurer aus **[57]**. In Kombination erhalten die beiden Zweizylinderaggregate 4,5 Punkte.

Wie die Zweitaktmotoren kommt auch der Wankelmotor ohne Ventiltrieb und den damit verbunden Bauteilen aus. Wegen der komplexeren Kolben- und Zylindergeometrie sind der Fertigungsaufwand und die damit verbundenen Fertigungskosten höher als bei Hubkolbenmotoren, um die Dichtheit zwischen Zylinder- und Kolbenwand gewährleisten zu können. Jedoch sind die gesamten Bauteilkosten geringer, da teure Einspritztechnik und der Ventiltrieb entfallen können. Deswegen erhält er ebenso 4,5 Punkte. Die betrachteten Viertaktmotoren sind aufgrund der Zylinderanzahl und den damit verbundenen zusätzlichen Bauteilen sowie des höheren Materialeinsatzes die kostenintensiveren Motoren, als die eben erwähnten Einzylinder bzw. Einscheibenmotoren. Die Viertaktottomotoren unterscheiden sich zum einen durch das verwendete Schmierverfahren, zum anderen durch die Anzahl der Zylinder. So kommt der Zweizylinder Viertaktmotor der AVL List GmbH durch besondere Konstruktion ohne Ölpumpe aus. Die Schmierung wird nur mittels Ölnebel, welcher entsteht, wenn die Kurbelwelle durch den Ölsumpf rotiert, sichergestellt **[60]**. Der Zweizylinder Rotax ACE 600 wird aufgrund seines bisherigen Einsatzgebietes mit einer Trockensumpfschmierung ausgeführt, die zusätzliche Kosten gegenüber einer Nasssumpfschmierung aufweist **[59]**. Daraus resultiert für die beiden Zweizylindermotoren in Kombination eine Punktzahl von 4 Punkten. Der Motor von Lotus ist mit einer konventionellen Druckumlaufschmierung ausgeführt, ist jedoch infolge der Dreizylinderausführung kostenintensiver als die Zweizylindervarianten der Konkurrenz und erhält somit 3,5 Punkte.

Die kostenintensivsten Motorkonzepte stellen die Dieselaggregate dar. Aufgrund der höheren Einspritz- und Brennraumdrücke erfordern sie einen erheblich größeren Materialeinsatz, um den höheren Druckbelastungen dauerhaft standhalten zu können. Des Weiteren sind sie als Drei- bzw. Vierzylindermotoren ausgeführt und sind infolgedessen mit mehr Bauteilen versehen als die oben genannten Viertaktottomotoren. In

der Regel werden zur Kraftstoffförderung auch zwei Pumpen benötigt, zum einen die Vorförderpumpe, zum anderen die Hochdruckpumpe, welche den nötigen Einspritzdruck erzeugt. So entfallen auf die beiden Dreizylindermotoren 2,5 Punkte und auf den Vierzylindermotor 2 Punkte.

Die Punkteverteilung zu den Kosten der einzelnen Motorkonzepte ist Tabelle 23 zu entnehmen.

Kosten	2-Takt-Otto	4-Takt-Otto		4-Takt-Diesel		4-Takt-Einscheiben-Wankel
		2-Zylinder	3-Zylinder	3-Zylinder	4-Zylinder	
Bewertung	4,5	4	3,5	2,5	2	4,5

Tabelle 23: Punktebewertung Kosten

5.5 Gewicht

Das Fahrzeuggewicht spielt im Fahrzeugbau eine große Rolle. Da bis auf den Luftwiderstand alle Fahrwiderstände direkt vom Fahrzeuggewicht abhängig sind, und damit direkte Auswirkungen auf den Energieverbrauch haben, gilt es das Fahrzeuggewicht möglichst gering zu halten. Das Gewicht des Motor-Packages wird primär durch das verwendete Material, Anzahl der Zylinder und der damit verbundenen Teile sowie Anzahl an Anbauteilen bestimmt. Sind aufgrund unsauberer Verbrennung noch Abgasnachbehandlungssysteme erforderlich, so steigt das Gewicht weiter an.

Konzeptvergleich
Das Motorgewicht ist analog zu den Kosten an die Zylinderanzahl, das Zylindervolumen und die verwendeten Bauteile und Aggregate gekoppelt. So sind schlitzgesteuerte Zweitaktmotoren, aufgrund des Entfallens eines Ventiltriebs sowie aufwendigem Einspritz- und Schmiersystem, die leichtesten Motoren. Bei einfachster Ausführung des Zweitaktmotors mit Gemischschmierung wird keine Ölpumpe benötigt. Bei Getrenntschmierung eine deutlich kleinere, leistungsschwächere Ölpumpe als bei Viertaktmotoren mit Druckumlaufschmierung, welche folglich auch leichter ist. Der Wankelmotor benötigt ebenso wie der Zweitaktmotor für den Ladungswechsel keinen Ventiltrieb. Der Betrieb mit Verlustschmierung mittels kleinen, dosierenden Ölpumpen ist möglich, Wankelmotoren werden jedoch häufig wie Viertakthubkolbenmotoren mit Druckumlaufschmierung ausgeführt. Die beim Hubkolbenmotor häufig eingesetzten Ausgleichswellen zur Kompensierung von Massenkräften und Momenten können beim Wankelmotor aufgrund der gleichmäßig rotierenden Körper um ihren Schwerpunkt entfallen. Dieselmotoren sind aufgrund der höheren Drücke im Einspritzsystem und Brennraum und dem damit verbundenen höheren Materialeinsatz nicht nur kostenintensiver, sondern zugleich deutlich schwerer als Ottomotoren. Dies resultiert zum einen aus den dickwandigeren und stabileren Bauteilen, zum anderen aus der Mehrzahl an Bauteilen, so zum Beispiel dem Bedarf von zwei Kraftstoffpumpen.

Wie bereits erwähnt, nimmt mit steigender Zylinderanzahl Gewicht und Volumen von Bauteilen wie Motorblock, Kurbelwellen- und Nockenwellenantrieb zu. Die Massen der Bauteile können jedoch durch konstruktive Maßnahmen sowie durch den Einsatz von besonders leichten aber dennoch temperaturbeständigen Materialien reduziert werden.

So können zum Beispiel Wellen aus Vollmaterial durch Hohlwellen ersetzt und Gussteile wie Motorblock oder Zylinderkopf aus Magnesium- bzw. Aluminiumlegierungen hergestellt werden.

Welche Gewichtseinsparungen dadurch erreicht werden können, wird in Tabelle 24 veranschaulicht.

Legierung	Aluminium		Magnesium	Gusseisen
Bezeichnung	Al 226 (GD-$AlSi_8Cu_3$)	Al 230 (GD-$AlSi_{12}$)	AM 50 (GD-$MgAl_5$)	GG-30
Dichte	2,75 g/cm³	2,65 g/cm³	1,8 g/cm³	7,25 g/cm³

Tabelle 24: Dichteangaben von Legierungswerkstoffen [70],[71]

Durch die Verwendung dieser Legierungswerkstoffe lässt sich das 2,5- bzw. 4-fache an Gewicht gegenüber Gusswerkstoffen sparen, gleiche Wandstärken und Bauteilvolumina vorausgesetzt. Des Weiteren können Abdeckungen und Gehäusedeckel, welche keine hohen Temperaturanforderungen erfüllen müssen, aus leichten Kunststoffmaterialien ausgeführt werden. Bauteile mit hohen Festigkeitsanforderungen können durch glasfaser- bzw. kohlefaserverstärkte Kunststoffe realisiert werden. Weitere Gewichtsersparnis wird durch eine höhere Integration des Motors und seiner Nebenaggregate erreicht. So lässt sich zum Beispiel die Rückwand des Motorblocks zugleich auch als Seitenwand für einen möglichen Öltank verwenden. Durch durchdachte Konstruktionen können Bauteile und damit das Motorgewicht auf ein Minimum reduziert werden.

Bewertung
Zur Bewertung werden die Gewichtsangaben der verschiedenen Motorkonzepte aus Tabelle 20 herangezogen. Wie bereits angenommen, weisen Zweitaktmotoren aufgrund des Entfalls von Ventiltrieb und der damit verbundenen Bauteile sowie die Ausführung als Einzylindermotoren das geringste Gewicht auf. Der Einzylinder Zweitaktmotor von Rotax ist nur mit 6-Gang-Schaltgetriebe erhältlich, da Kurbelgehäuse und Getriebegehäuse aus einem Gussteil bestehen. Die Einheit des Zweizylindermotors wiegt dennoch nur 21,5 kg und ist trotz des Getriebes der leichteste im Feld **[55]**. Folglich liegt ein alleiniger Motor ohne Getriebe deutlich darunter. Somit erhalten die Zweitaktmotoren 5 Punkte.

Die Viertaktottomotoren sind aufgrund der Verwendung von zwei bzw. drei Zylindern nochmals schwerer. Durch den hohen Integrationsgrad des AVL Zweizylindermotors, der nur zum Zweck des Betriebs als Range Extender konstruiert und entwickelt wurde, ist der Motor nur als System erhältlich. Das Systemgewicht, bestehend aus Verbrennungsmotor und Generator, beträgt 40 kg. Eine Verwendung bzw. Betrachtung ohne Generator wäre zwar möglich, ist aber aufgrund der Integration des Generators ins Kurbelgehäuse und den dementsprechenden geometrischen und konstruktiven Anpassungen nicht als sinnvoll zu erachten **[60]**.

Das Mehrgewicht des aufwendigeren Ventiltriebs mit zwei obenliegenden Nockenwellen und die Verwendung einer Trockensumpfschmierung am Zweizylinder Viertaktmotor von Rotax werden durch Gussteile aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen sowie dem Entfall der Ausgleichswelle kompensiert. Die beiden Zweizylinder Ottomotoren mit je 40 kg erhalten somit 4 Punkte **[59]**.

Der Dreizylinder Viertaktmotor von Lotus ist als einziger Motor in Monoblock Bauweise ausgeführt. Durch diese spezielle Konstruktion sind Zylinderblock, Zylinderkopf und Abgaskrümmer ohne Schraubverbindungen miteinander vereint und reduzieren somit das Gesamtgewicht. Durch Entfall der Ausgleichswelle und Verwendung optimierter Motorlager kann das Gesamtgewicht des Lotus um weitere 4 kg auf 56 kg reduziert werden. Damit ist er gut 50% leichter als die vergleichbaren Dreizylinder Dieselmotoren dennoch aber rund 16 kg schwerer als der Zweizylinder Rotax mit ähnlichen Leistungsdaten und erhält daher 3 Punkte **[58]**.

Die Dieselmotoren sind in Folge des höheren Materialeinsatzes aufgrund höherer Drücke im verwendeten Einspritzsystem und Brennraum erheblich schwerer. Der großvolumige Dreizylinder Dieselmotor mit 1870 ccm ist 170 kg schwer, was zugleich auch das K.O.-Kriterium für den Einsatz als Range Extender darstellt. Er ist rund acht Mal so schwer wie der leichteste Zweitaktmotor im Feld **[62]**. Der Dreizylinder Kubota sowie der Vierzylinder Lombardini Dieselmotor sind aufgrund eines Gewichts von 97 kg bzw. 98 kg ebenfalls für den Einsatz als Range Extender im Anwendungsfeld um 20 kW nur bedingt zu empfehlen **[63]**, **[64]**. Die Punktevergabe für die beiden Dreizylinder entfällt somit in Kombination auf 1,5 Punkte, für den Vierzylinder auf 2 Punkte.

Die AVL List GmbH vertreibt ihre Motoren ausschließlich als Range Extender Einheit, weswegen ihre Gewichtsangaben immer den Verbrennungsmotor inklusive der Generatoreinheit beinhalten. Wegen der größeren Kolbengeometrie und des geringfügigen Mehreinsatzes von Material für Kolben, Brennkammer und Exzenterwelle liegt der Wankelmotor inklusive Generator mit 29 kg knapp über dem Zweitaktmotor **[54]**. Daraus resultieren 4,5 Punkte für den Wankelmotor.

Die Punkteverteilung zum Kriterium Gewicht der einzelnen Motorkonzepte ist Tabelle 25 zu entnehmen.

Gewicht	2-Takt-Otto	4-Takt-Otto		4-Takt-Diesel		4-Takt-Einscheiben-Wankel
		2-Zylinder	3-Zylinder	3-Zylinder	4-Zylinder	
Bewertung	5	4	3	1,5	2	4,5

Tabelle 25: Punktebewertung Gewicht

5.6 Leistungsdichte

Die Leistungsdichte I_{VM} ist definiert als der Quotient aus effektiver Leistung P_{eVM} und Masse m_{VM} des Verbrennungsmotors. Sie wird in Kilowatt je Kilogramm angegeben. Häufig wird auch von Leistungsgewicht gesprochen, dies ist der Reziprokwert der Leistungsdichte und ist entsprechend in Kilogramm je Kilowatt angegeben.

$$I_{VM} = \frac{P_{eVM}}{m_{VM}} \tag{9}$$

Konzeptvergleich
Die effektive Leistung P_e eines Motors ist abhängig von dessen Hubvolumen V_{Hub}, dem effektivem Mitteldruck p_{me}, der Drehzahl n sowie dem Faktor k für die Arbeitsspiele pro Umdrehung (k=1 für Zwei-Takt; k=0,5 für Vier-Takt)

$$P_e = k \cdot n \cdot p_{me} \cdot V_H \tag{10}$$

Der effektive Mitteldruck ist die Differenz aus indiziertem Mitteldruck p_{mi} und Reibmitteldruck p_{mr}. Um Motoren verschiedenen Hubraums miteinander vergleichen zu können wird der indizierte Mitteldruck p_{mi} herangezogen. In Abhängigkeit des Hubvolumens ist der indizierte Mitteldruck proportional zu der auf den Kolben wirkenden Arbeit. Der Reibmitteldruck beschreibt die Verluste durch mechanische Reibung des Triebwerks und Pumpverluste auf der Unterseite des Motorkolbens im Kurbelgehäuse. Diese können durch geeignete Kurbelgehäuseentlüftungen minimiert werden **[50]**.

$$p_{me} = p_{mi} - p_{mr} \tag{11}$$

Ein Zweitaktmotor müsste theoretisch nach Gleichung (10) die doppelte effektive Leistung eines hubraumgleichen Viertaktmotors entwickeln, da er bei gleicher Motordrehzahl die doppelte Arbeitstaktzahl hat. Da jedoch die Pump- und Spülverluste und folglich der Reibmitteldruck des Zweitakters höher als die eines hubraumgleichen Viertaktmotors sind, ist der effektive Mitteldruck und die daraus resultierende effektive Motorleistung geringer als angenommen. Anhand von Gleichungen (10) und (11) lässt sich festhalten, dass die erreichbaren effektiven Motorleistungen von hubraumgleichen Viertaktmotoren bei gleicher Drehzahl vom effektiven Mitteldruck und damit vom indizierten Mitteldruck und Reibmitteldruck abhängig sind. Der indizierte Mitteldruck ist zum einen konstruktiv durch das Verdichtungsverhältnis ε, zum anderen von der Last und von innermotorischen Vorgängen wie Schwerpunktlage und Verlauf der Verbrennung abhängig **[50]**. Auf das Gewicht des Verbrennungsmotors m_{VM} sowie auf Maßnahmen zur Gewichtsreduzierung wurde bereits im Kapitel Gewicht eingegangen.

Bewertung
Im Folgenden werden nun die maximalen Leistungen der verschiedenen Motorkonzepte auf ihre Massen bezogen, um eine Aussage über deren Leistungsdichte geben zu können. Aufgrund der Auswahl von Motoren um 20 kW kann vorab gesagt werden, dass Motoren mit einem hohen Gewicht zugleich auch eine geringe Leistungsdichte aufweisen.

Der Einzylinder Zweitaktmotor von Rotax erreicht mit einer maximalen Leistung von 22 kW und einem Gewicht von 21,5 kg eine Leistungsdichte von rund 1,0 kW/kg. Das Gewicht beinhaltet jedoch das 6-Gang-Schaltgetriebe. Wird nun eine Konstruktion des Motors ohne Getriebe angenommen, so ergibt sich eine Leistungsdichte deutlich über 1,0 kW/kg **[55]**. Zum hubraumgrößeren Zweitaktmotor der Technischen Universität Graz liegen leider keine Gewichtsdaten vor, jedoch ist ebenfalls von einer Leistungsdichte über 1,0 kW/kg auszugehen. Damit sind sie gegenüber den anderen verglichenen Motorkonzepten die mit der höchsten Leistungsdichte und erhalten folglich 5 Punkte.

Der Rotax ACE 600 Zweizylinder Viertaktmotor mit einer maximalen Leistung von 42 kW und einem Gewicht von 40 kg und einer daraus resultierenden Leistungsdichte von 1,05 kW/kg liegt auf einem Niveau knapp unterhalb der Zweitaktmotoren **[59]**.

Eine etwas geringere Leistungsdichte hat der Zweizylindermotor der AVL List GmbH mit 0,83 kW/kg **[60]**. In Kombination erhalten sie darum 4 Punkte. Der schwerere Dreizylindermotor von Lotus weist eine Leistungsdichte von rund 0,66 kW/kg bei Betrieb ohne Ausgleichswelle auf und erhält damit 3,5 Punkte **[58]**.

Wie bereits angenommen, weisen die schweren Dieselmotoren die geringsten Leistungsdichten auf. Diese betragen nur rund ein Fünftel der Zweitaktmotoren und liegen im Bereich von 0,14 bis 0,22 kW/kg **[61]**, **[62]**, **[63]**. Folglich erhalten sie, zylinderunabhängig, jeweils 1 Punkt.

Der leichte Wankelmotor mit 29 kg und einer maximalen Leistung von 30kW bei 7000 1/min hat eine Leistungsdichte von rund 1 kW/kg und liegt damit auf dem Niveau des leistungsstarken Rotax ACE 600 und knapp unter dem der Zweitaktmotoren **[53]**, **[54]**. Somit ist er unterhalb Letzterer mit 4,5 Punkten zu bewerten.

Die Punkteverteilung zur Leistungsdichte der einzelnen Motorkonzepte ist Tabelle 26 zu entnehmen.

Leistungs-dichte	2-Takt-Otto	4-Takt-Otto		4-Takt-Diesel		4-Takt-Einscheiben-Wankel
		2-Zylinder	3-Zylinder	3-Zylinder	4-Zylinder	
Bewertung	5	4	3,5	1	1	4,5

Tabelle 26: Punktebewertung Leistungsdichte

5.7 Packaging

Unter dem Begriff Packaging oder auch Package wird die geometrische und funktionale Anordnung von Bauteilen und Baugruppen verstanden **[52]**. Ziel des Packaging ist es, sämtliche Bauteile und Aggregate auf möglichst engem Bauraum anzuordnen, jedoch weiterhin Arbeiten wie Wartung und Kontrollen sowie Austausch von Verschleißteilen zu ermöglichen.

Konzeptvergleich
Zunächst soll auf die Faktoren eingegangen werden, welche die Größe des Motorpackagings beeinflussen. Wie das Gewicht, sind auch die Abmaße eines Motors stark von der Zylinderanzahl, deren Anordnung und dem Hubraum eines Zylinders abhängig. Die zurzeit am häufigsten verwendeten Motoren weisen eine Reihen- oder V-Anordnung auf, zum Teil auch die Boxeranordnung, bei der sich die Kolben um 180° versetzt gegenüber liegen und die Pleuelstangen der sich gegenüberliegenden Kolben von einer Kurbelwellenkröpfung angelenkt werden. Es kann festgehalten werden, dass das Volumen mit zunehmender Zylinderanzahl ansteigt und durch die Zylinderanordnung die Höhe, Breite und Tiefe des Motors bestimmt wird. Weiteren Einfluss auf die Abmaße eines Motors haben die angebauten Nebenaggregate. So kann je nach Kühl- und Schmiersystem Bauraum für eine Wasserpumpe sowie für eine oder auch mehrere Ölförderpumpen benötigt werden. Auf Letztere kann bei der einfachsten Ausführung eines Zweitaktmotors mittels Gemischschmierung verzichtet werden. Vorteilhaft bezüglich der Bauhöhe eines Motors ist die Verwendung einer Trockensumpfschmierung. Mit dieser kann die Bauhöhe verringert werden, da keine tiefe Ölwanne benötigt wird. Weiteren Bauraum nehmen Abgasnachbehandlungssysteme, die ebenso zu den Nebenaggregaten gehören, ein. Diese sind entsprechend der komplexeren Abgas-

nachbehandlung bei Dieselmotoren bauraumbedürftiger. Dies ist vor allem durch die Vielzahl an Systemen, wie Diesel-Oxidations-Katalysator, Partikelfilter, Stickoxid-Katalysatoren sowie Abgasrückführung bestimmt. Beim Ottomotor wird in der Regel nur ein Dreiwegekatalysator verwendet. Dieses Konzept ist folglich deutlich platzsparender. Wird der Ein- und Auslass mittels Ventilen gesteuert, so nimmt die Höhe des Motors aufgrund des Ventiltriebs mit seinen Bauteilen wie Nockenwelle, die dafür nötige Lagerung etc., zu. Die einfachen Zweitaktmotoren und auch Wankelmotoren kommen ohne Ventiltrieb aus und haben infolgedessen einen Vorteil gegenüber ventilgesteuerten Viertaktmotoren. Das Einspritzsystem beansprucht durch Einspritzpumpen, Kraftstoffleitungen, Einspritzdüsen und Steuergeräte weiteren Bauraum.

Bewertung
Zur Bewertung werden die Maßangaben der Hersteller herangezogen und die jeweiligen Gesamtvolumina berechnet. Teilweise waren keine genauen Maßangaben verfügbar, so dass eine Abschätzung der Motorgröße erfolgen musste. Das Gesamtvolumen eines Motors bezieht sich jedoch auf die maximalen Abmessungen, d.h. das tatsächliche Volumen ist deutlich unter dem errechneten Gesamtvolumen. Dennoch lassen sich unter Zuhilfenahme der Gesamtvolumina die Motoren besser vergleichen und bewerten.

Die beiden Zweitaktmotoren sind als Einzylinderaggregate ausgeführt. Der kleinvolumige Rotax Motor mit 125 ccm ist schlitzgesteuert, d.h. er besitzt keinen Ventiltrieb und baut folglich flacher. Des Weiteren kann durch die Verwendung einer Verlustschmierung die Ölwanne unterhalb des Kurbeltriebs entfallen, wodurch seine Bauhöhe nochmals reduziert wird. Die Abmaße des Motors, welche im Anhang aufgeführt sind, beziehen sich auf das System aus Zylindereinheit, Kurbelgehäuse und Getriebe. Die Abmaße betragen in der Länge 404 mm, in der Höhe 292 mm und in der Breite 384 mm. Daraus resultiert ein Gesamtvolumen von 0,045 m^3. Das Volumen des reinen Verbrennungsmotors ohne Getriebe soll mittels Abbildung 71 abgeschätzt werden. Unter Annahme, dass sich die Länge des Motors um die Hälfte, die Breite und Höhe jeweils um ein Viertel verkürzt, so ergibt sich ein Gesamtvolumen von rund 0,013 m^3.

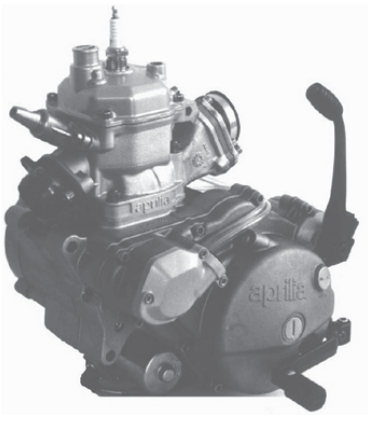


Abbildung 71: Rotax Typ 122 mit 6-Gang Schaltgetriebe [56]

Zu dem direkteingespritzten Einzylinder Zweitaktmotor der TU Graz, welcher einen Hubraum von 250 ccm besitzt, sind bislang keine Angaben zu Abmessungen bekannt. Dennoch ist davon auszugehen, dass die Abmaße nur unwesentlich über dem des

125 ccm Motors von Rotax liegen. Wird für den 250 ccm Motor der gleiche Hubweg wie beim 125 ccm Motor von Rotax zu Grunde gelegt, so vergrößert sich der Kolbendurchmesser um gerade einmal 40 % bzw. die Kolbenfläche um den Faktor Zwei bei einem Hubraum von 250 ccm. Folglich weisen die Zweitaktmotoren die geringsten Volumina auf und sind deshalb mit 5 Punkten zu bewerten **[55]**, **[56]**.

Vorteilhaft bezüglich Packaging ist die besondere Konstruktion des AVL Motors. Da dieser Motor für die Verwendung als Range Extender entwickelt wurde, weist er als Besonderheit die Integration des Generators in das Kurbelgehäuse auf. Der Stator ist dabei direkt in das Gehäuse eingepresst, der Rotor befindet sich auf der Kurbelwelle. Trotz des integrierten Generators weist dieser mit einer Länge von 346 mm, einer Breite von 302 mm und einer Höhe von 615 mm ein Gesamtvolumen von 0,064 m^3 auf **[60]**. Damit liegt er rund 50 % unter dem Gesamtvolumen des Zweizylinder Rotax ACE 600, dessen Abmaße 420 mm in der Länge, 550 mm in der Breite sowie 480 mm in der Höhe betragen. Aus den Abmessungen resultiert ein Gesamtvolumen von rund 0,11 m^3. Das tatsächliche Gesamtvolumen liegt jedoch deutlich darunter, da die maximale Breite des Rotax Motors vor allem durch die seitlich angesetzte Airbox bestimmt ist. Die reduzierte Höhe gegenüber dem AVL Aggregat ist insbesondere auf die verwendete Trockensumpfschmierung zurückzuführen **[59]**.

Zum Dreizylindermotor von Lotus liegen leider keine Abmessungen vor, jedoch ist davon auszugehen, dass diese und das daraus resultierende Gesamtvolumen aufgrund des größeren Hubraums von 1200 ccm und der Dreizylinder Reihenanordnung, über denen des Zweizylindermotors von AVL liegen **[58]**. Die beiden Zweizylinder Viertaktmotoren erhalten in Kombination 4 Punkte, der Dreizylinder Lotus Motor 3 Punkte. Der luftgekühlte Dreizylinder Dieselmotor von Kohler benötigt mit einem Gesamtvolumen von 0,180 m^3 den meisten Bauraum. Die Abmessungen betragen 662 x 495 x 549 mm (L x B x H). Dies ist zum einen auf den relativ großen Hubraum von 1870 ccm, zum anderen auf die verwendete Luftkühlung, welche frontal am Motorblock untergebracht ist, zurückzuführen **[62]**. Die Abmessungen des wassergekühlten Dreizylinder Dieselmotors von Kubota betragen in der Länge 498 mm, in der Breite 433 mm und in der Höhe 626 mm, woraus sich ein Gesamtvolumen von 0,135 m^3 ergibt. Der Hubraum beträgt 1123 ccm. Wegen der Aufladung und der damit verbundenen Ansaugbrücke, welche oberhalb des Zylinderkopfs verläuft, baut der Dieselmotor höher als die anderen untersuchten Motoren **[63]**. Der Vierzylinder Dieselmotor von Lombardini mit einem Hubraum von 1372 ccm, liegt durch bessere Integration der Nebenaggregate bzgl. des Gesamtvolumens unter dem des aufgeladenen Dreizylinder Dieselmotors von Kubota. Das Gesamtvolumen, welches aus den Abmessungen von 596 x 412 x 515 mm (L x B x H) resultiert, beträgt 0,127 m^3 **[64]**. Die beiden Dreizylindermotoren sind daher in Kombination mit 1,5 Punkten hinter dem Vierzylindermotor mit 2 Punkten zu bewerten.

Wankelmotoren weisen durch ihre runde Bauform großes Potential für die Integration einer Generatoreinheit auf. So wird auch der Wankelmotor von AVL direkt mit Generatoreinheit angeboten. Aufgrund der kompakten Anordnung von Exzenterwelle und Rotationskolben (Läufer) fällt der benötigte Bauraum gegenüber Hubkolbenmotoren mit Kolben, Pleuel und Kurbelwelle deutlich kleiner aus. Das Gesamtvolumen der kompletten Einheit inklusive Generator beträgt mit 0,039 m^3 rund zwei Drittel des AVL Zweizylindermotors inklusive Generator. Die Abmaße des reinen Verbrennungsmotors betragen 250 mm in der Länge, sowie 240 mm im Durchmesser. Daraus ergibt sich ein Gesamtvolumen von 0,014 m^3, welches in etwa dem der Zweitaktmotoren entspricht **[50]**. Folglich erhält der Wankelmotor ebenfalls 5 Punkte.

Die Punkteverteilung zum Kriterium Packaging der einzelnen Motorkonzepte ist Tabelle 27 zu entnehmen.

Packaging	2-Takt-Otto	4-Takt-Otto		4-Takt-Diesel		4-Takt-Einscheiben-Wankel
		2-Zylinder	3-Zylinder	3-Zylinder	4-Zylinder	
Bewertung	5	4	3	1,5	2,5	5

Tabelle 27: Punktebewertung Packaging

5.8 Emissionen

Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe treten eine Reihe von Schadstoffen sowie wegen des Kohlenstoffgehalts dieser Brennstoffe auch beträchtliche Anteile der klimarelevanten Kohlendioxid-Emissionen auf. Von der Gesetzgebung werden im Bereich der Fahrzeugantriebe allgemein die Schadstoffkomponenten Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Stickoxide (NO_x), zum Teil auch Schwefeldioxid und Ruß bzw. Partikel erfasst und reglementiert. Wegen des inhomogenen Kraftstoff-Luft-Gemischs beim Dieselmotor und der damit unvollständigen Verbrennung kommt es zur Bildung von Rußpartikeln **[72]**. Prinzipiell lassen sich die Emissionen bei einem seriellen Hybriden in zwei Arten unterscheiden. Zum einen gibt es die indirekten Emissionen, welche bei der Energiegewinnung in Kraftwerken entstehen, sowie die direkten Emissionen, die bei der Energieumsetzung durch den Verbrennungsmotor im PKW entstehen. Abbildung 72 zeigt die Zusammensetzung der erzeugten Energie in Deutschland, welche auch Kraftwerksmix genannt wird. Bei der Erzeugung einer Kilowattstunde mit dem Kraftwerksmix Deutschland werden 625 g CO_2 verursacht **[50]**. Diese Angabe wird zur Berechnung und Bewertung der indirekten CO_2-Emission herangezogen.

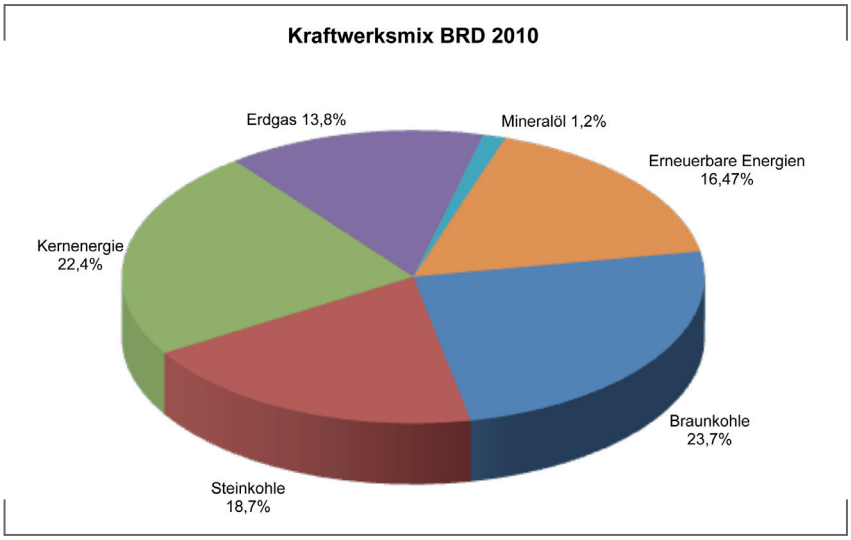


Abbildung 72: Zusammensetzung der Energieerzeugung in Deutschland 2010 [73]

Konzeptvergleich
Im Folgenden soll auf die Bedingungen eingegangen werden, bei der die einzelnen Schadstoffe entstehen. Darauf erfolgt der Vergleich in Bezug auf das Verbrennungsverfahren. In Abhängigkeit von den entstehenden Schadstoffen steigt der Aufwand und notwendiger Bauraum zur Schadstoffreduzierung bzw. Abgasnachbehandlung und damit die Kosten, welche maßgebend für die Bewertung sind. Kohlendioxid (CO_2) ist zwar vom Gesetzgeber reglementiert, ist jedoch nur indirekt abhängig vom Arbeitsverfahren der Motoren. Es entsteht proportional zum verbrauchten Kraftstoff. Je größer die benötigte Kraftstoffmenge pro Arbeitsspiel, desto höher ist der Anteil der ausgestoßenen CO_2-Menge. Folglich soll nachstehend nur auf die Schadstoffe wie Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickoxide eingegangen werden.

Je nach Einspritzverfahren liegt im Brennraum ein homogenes oder inhomogenes Gemisch vor. Von einem homogenen Gemisch wird gesprochen, wenn ein Gemisch in großen Bereichen näherungsweise das gleiche Kraftstoff-Luft-Verhältnis aufweist. Bei der Saugrohr- bzw. Kanaleinspritzung, wie sie häufig bei Ottomotoren angewandt wird, erfolgt die Gemischbildung außerhalb des Brennraums. Durch die räumliche Entfernung zum Brennraum steht ausreichend Zeit zur Homogenisierung des Gemischs zur Verfügung. Die bei Dieselmotoren häufig eingesetzte Direkteinspritzung erzeugt ein inhomogenes Gemisch mit lokalen Kraftstoff-Luft-Verhältnissen von Null bis unendlich in Folge der Einspritzung von Kraftstoff in die vorverdichtete Luft. Bessere Durchmischungen können mittels Drall- und Tumbleströmungen durch konstruktive Anpassung der Kolbengeometrie und des Einlasskanals erreicht werden. Bei der Verbrennung treten in Abhängigkeit von der Brennraumtemperatur sowie von lokalen und globalen Kraftstoff-Luft-Verhältnissen unterschiedliche Schadstoffe auf. So nimmt in mageren, heißen Zonen die Anzahl der Stickoxide zu, die Menge des Kohlenmonoxids hingegen ab. Kohlenmonoxid (CO) entsteht infolge Luftmangel ($\lambda < 1$) als Produkt unvollständiger Oxidation. Bei Luftverhältnissen $\lambda > 1$ sinkt der Mengenanteil von Kohlenmonoxid gegen Null.

Verbindungen aus Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) werden unter dem Begriff Stickoxide (NO_x) zusammengefasst. Die Stickoxid Bildung ist im Gegensatz zu anderen Schadstoffen nicht von der Kraftstoffzusammensetzung abhängig, sondern primär von der Temperatur und dem vorliegenden Kraftstoff-Luft-Verhältnis.

Das sogenannte thermische NO entsteht aus Luftstickstoff in Folge hoher Temperaturen und Luftüberschuss ($\lambda > 1$) und hat mit 90-95 % den größten Anteil an den gesamt entstehenden Stickoxiden. Promptes NO (5-10 %) entsteht bei niedrigen Temperaturen aus Luftstickstoff in der Flammenfront **[50]**, **[72]**.

Kohlenwasserstoffe (HC) entstehen primär in Zonen unvollständiger Verbrennung. Diese Zonen liegen im Bereich wandnaher Schichten, in denen die Brenngeschwindigkeit zum Teil so stark abnimmt, dass es zum Erlöschen der Flamme kommt. Weitere Kohlenwasserstoffe entstehen während der Expansionsphase durch Desorption aus dem Schmierfilm an der Zylinderwand, welche zum Teil aber bei der Verdichtung wieder absorbiert werden **[50]**, **[72]**.

Viertaktottomotoren mit Drosselklappe und Saugrohr bzw. Kanaleinspritzung werden mit stöchiometrischem Kraftstoff-Luft-Verhältnis ($\lambda = 1$) betrieben. Dies ist durch den verwendeten Dreiwegekatalysator begründet, welcher Kraftstoff-Luft-Verhältnisse in engem Bereich um $\lambda = 1$ benötigt, damit Oxidation und Reduktion von Schadstoffen optimal ablaufen können. Aufgrund ausreichender Anteile von Sauerstoff entstehen bei $\lambda = 1$ nur sehr geringe Konzentrationen von Kohlenmonoxid. Die Stickoxidbildung

hat ihr Maximum bei leicht magerem Betrieb um $\lambda = 1{,}1$ und fällt mit fetter oder mager werdendem Gemisch stark ab. Daraus resultiert, dass auch hier der Betrieb mit $\lambda = 1$ vorteilhaft für die Minderung von Stickoxiden ist, da weniger Luftstickstoff sowie elementarer Sauerstoff zur Reaktion bereit stehen. Um Kohlenwasserstoffanteile im Abgas zu senken, können diese im Abgassystem nachverbrannt werden. Hierzu werden jedoch hohe Temperaturen und Sauerstoffanteile benötigt, die bei Verhältnissen von $1{,}1 < \lambda < 1{,}25$ vorliegen. Um die Abgasvorschriften beim Viertaktottomotor einzuhalten, wird ein Dreiwegekatalysator verwendet. Dieser erreicht bei seiner Betriebstemperatur von ca. 270 °C Konvertierungsraten von bis zu 90 % **[50]**, **[72]**.

Wankelmotoren arbeiten ebenso nach dem Viertaktprinzip und werden stöchiometrisch betrieben. Infolgedessen sind ihre Emissionswerte den Viertakthubkolbenmotoren sehr ähnlich. Aufgrund der ungünstigen Brennraumform kann es jedoch zum frühzeitigen Flammenabbruch kommen, wodurch die Anteile von Kohlenwasserstoffen steigen. Die Verwendung von Umfangseinlass und -auslass ist nicht zu empfehlen, da unverbranntes Frischgas aus den Randzonen des Kolbens direkt ins Abgas geschoben werden kann. Ebenso kann das Schmiermittel von den Dichtflächen in den Umfangsauslass gewischt werden. Beide Fälle treten bei Verwendung von Seiteneinlass und Seitenauslass nur in geringerem Maße gegenüber Umfangseinlass und Umfangsauslass auf. Dennoch lassen sich ohne Mehraufwand Abgasgrenzwerte mittels Verwendung eines Dreiwegekatalysators einhalten **[74]**.

Kostengünstige Zweitakt-Ottomotoren haben typischerweise eine Verbrauchsschmierung. Dies hat zur Folge, dass nicht nur der Kraftstoff mit Luft sondern auch Anteile des Öls verbrannt werden und so Schadstoffe wie Kohlenwasserstoffe entstehen. Des Weiteren kann je nach Spülverfahren unverbranntes Frischgas in den Auslass übergeschoben werden. Dieser Anteil kann jedoch konstruktiv durch Verwendung einer Schnürle-Umkehrspülung mit Spülvorlage minimiert werden. Bei diesem Verfahren erfolgt das Ausspülen zunächst mit vorgelagerter Reinluft bis das nachfolgende Gemisch nachströmt. Alternativ ist ein Auslasssteuern mittels Ventilstößeln oder die Verwendung einer Direkteinspritzung denkbar, um die Emissionswerte zu senken. Dennoch reicht bei Verwendung einer Schnürle-Umkehrspülung ein Dreiwegekatalysator aus, da dieser die entstehenden Schadstoffe ausreichend umwandeln kann.

Beim Dieselmotor liegt aufgrund der Kraftstoffeinspritzung kurz vor OT in die vorverdichtete Luft ein sehr inhomogenes Gemisch vor, so dass Kraftstoff-Luft-Verhältnisse über ein breites Spektrum vorliegen. In Folge von inhomogenem Kraftstoff-Luft-Gemisch und unvollständiger Verdampfung existieren lokale fette Bereiche ($\lambda = 0{,}25$) in der Flamme, was zur Entstehung von Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid aufgrund Sauerstoffmangel führt. Ebenso steigt der Rußertrag in Zonen fetter Verbrennung. Ideale Verhältnisse zur Rußbildung herrschen bei Temperaturen zwischen 1200 °C und 1600 °C und Luftverhältnissen von $\lambda < 0{,}6$. Des Weiteren existieren aber auch Zonen mit Luftüberschuss ($\lambda >> 1$). Durch hohe Temperaturen in der Flammenfront und übermäßigen Anteilen von Luftstickstoff und elementarem Sauerstoff läuft in diesem Bereich bevorzugt die Bildung von Stickoxiden ab. Daraus folgt beim Dieselmotor der Konflikt, dass bei geringeren Temperaturen vermehrt Rußpartikel, bei hohen Temperaturen vermehrt Stickoxide entstehen (Ruß-NO_x-Schere). Um die auftretenden Emissionen auf die zulässigen Werte zu reduzieren werden beim Dieselmotor zwangsläufig mehr Abgasnachbehandlungssysteme benötigt. Zur Senkung der CO- und HC-Emissionen kommt ein Diesel-Oxidations-Katalysator zum Einsatz. Bei Betriebstemperaturen über 400 °C erreicht dieser Konvertierungsraten von über 90%. Zur Abscheidung von Partikeln aus dem Abgas wird ein Partikelfilter verwendet. Dieser lagert Partikel bis zu einem gewissen Füllgrad ein, darauf erfolgt die Regeneration (Freibrennen)

mittels kurzzeitigem Anfetten des Gemischs. Für die Nachbehandlung von Stickoxiden stehen mehrere Verfahren zur Verfügung. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung einer Abgasrückführung (AGR). Ein wesentlicher Effekt der AGR ist die Verringerung der Brenngeschwindigkeit und die daraus resultierende Absenkung der Spitzentemperatur durch einen erhöhten Inertgasanteil und folglich die Reduzierung der Stickoxidbildung. Das zurückgeführte Abgas fungiert dabei als Inertgas, d.h. es nimmt nicht an den chemischen Reaktionen teil. Des Weiteren stehen zur Minderung von Stickoxiden NO_X-Reduktions-Katalysatoren zur Verfügung. Diese können noch weiter nach Arbeitsverfahren unterschieden werden. Eine Möglichkeit ist die selektive katalytische Reduktion (SCR), bei der unter Verwendung von Ammoniak (NH_3) Stickoxide zu Stickstoff reduziert werden. Weitere Möglichkeiten sind die nicht selektive katalytische Reduktion (NSRC) sowie die Verwendung eines NO_X-Speicherkatalysators (NSC). Welche Abgasnachbehandlung das richtige Konzept für einen Dieselmotor darstellt, ist stark abhängig von dessen Betriebsbereich. Es lässt sich jedoch festhalten, dass Dieselmotoren gegenüber Ottomotoren aufgrund der größeren Anzahl benötigter Abgasnachbehandlungssysteme aber auch aufgrund ihrer Bauweise und ihres aufwendigeren Einspritzsystems die kostenintensiveren Motoren sind **[50]**, **[72]**.

Bewertung
Für die Bewertung sollen zum einen die Rohemissionen der verschiedenen Motorkonzepte berücksichtigt werden, zum anderen aber auch der Aufwand und die damit verbundenen Kosten, um gesetzliche Abgasvorschriften zu erfüllen.

Aufgrund des stöchiometrischen Betriebs mit $\lambda = 1$ entstehen sowohl bei beiden Zweizylinder als auch beim Dreizylinder Viertaktottomotor nur geringe Mengen von Schadstoffen, die unter Verwendung eines herkömmlichen Dreiwegekatalysators beseitigt werden können, um aktuelle Abgasgrenzwerte einzuhalten. Sie erhalten jedoch nicht die maximal möglichen 5 Punkte, sondern 4,5 Punkte, da die sauberste Lösung der Betrieb mit Wasserstoff wäre, bei dem als Schadstoffe nur Stickoxide auftreten würden. Der Wankelmotor hat aufgrund seiner ungünstigen Brennraumform höhere Rohemissionen. Durch vorzeitigen Flammenabbruch kommt es zum Mehrausstoß von HC. Diese können jedoch mit ausreichender Temperatur und Sauerstoff im Abgassystem mit einem Dreiwegekatalysator nachverbrannt werden. Die Punktevergabe beim Wankelmotor fällt auf 3,5 Punkte.
Gleiches gilt für die Zweitakt Ottomotoren. Durch die verwendete Verlustschmierung treten höhere Rohemissionen auf, die aber mittels Dreiwegekatalysator umgewandelt werden können. Damit fällt die Punktevergabe für Zweitakter ebenso auf 3,5 Punkte. Bei den Dieselmotoren treten neben den HC und CO mehr NO_X sowie Partikel (Ruß) gegenüber Ottomotoren auf. Folglich ist der Aufwand zur Schadstoffreduzierung erheblich größer. Ein Diesel-Oxidations-Katalysator genügt nur für die auftretenden HC- und CO-Emissionen. Stickoxide müssen mittels AGR oder NO_X-Katalysatoren beseitigt werden. Für die auftretenden Partikel muss ein Partikelfilter eingesetzt werden. Aufgrund des hohen Aufwands und der damit verbundenen Kosten sind die untersuchten Dieselmotoren mit nur einem Punkt zu bewerten. Die Zylinderanzahl spielt, wie auch bei den Ottomotoren, hier keine Rolle.

Die Punkteverteilung zu den Emissionen der einzelnen Motorkonzepte ist Tabelle 28 zu entnehmen.

Emissionen	2-Takt-Otto	4-Takt-Otto		4-Takt-Diesel		4-Takt-Einscheiben-Wankel
		2-Zylinder	3-Zylinder	3-Zylinder	4-Zylinder	
Bewertung	3,5	4,5	4,5	1	1	3,5

Tabelle 28: Punktebewertung Emissionen

5.9 Noise, Vibration, Harshness (NVH)

NVH ist die in der Fahrzeugtechnik gebräuchliche Abkürzung für Noise, Vibration and Harshness, welche das Akustik- und Schwingungsverhalten beschreibt. In Fahrzeugen sind Nebengeräusche meistens unerwünscht. Feines Sirren von Stellmotoren oder das Klappern von Kunststoffteilen im Innenraum senken den Komfort für die Insassen beträchtlich. Auch Maschinen und Geräte müssen so leise wie möglich arbeiten, um die Konzentrationsfähigkeit der Nutzer zu erhalten. Schwingungen sowie Vibrationen können dazu beitragen, den Komfort im Auto stark zu beeinträchtigen und erzeugen Störgeräusche. Der Nutzer kann sich diesen Störungen nicht entziehen und empfindet sie daher als besonders schwerwiegend. Ein ausgewogener Vibrationskomfort wird daher von Kunden üblicherweise als Selbstverständlichkeit empfunden **[75]**.

Konzeptvergleich
Der Fahrer eines Fahrzeuges nimmt diverse Geräuschquellen wahr, die sich aus mehreren Teilschallquellen zusammensetzen. Als Schall werden mechanische Schwingungen und Wellen in einem elastischen Medium bezeichnet, insbesondere im hörbaren Frequenzbereich zwischen 16 und 20000 Hz **[72]**. Dabei gilt es zwischen Luftschall und Körperschall zu differenzieren. Schwingungen im Medium Luft werden Luftschall bzw. direkt erzeugter Luftschall genannt. Unter dem Begriff Körperschall werden Schwingungen in Motor- oder Fahrzeugbauteilen verstanden. Diese Körperschallschwingungen können an Oberflächen zur Abstrahlung von Luftschall führen, welcher auch indirekt erzeugter Luftschall genannt wird. Zur direkten Luftschallanregung gehören die beim Ladungswechsel entstehenden Strömungspulsationen im Ansaug- bzw. Abgassystem **[72]**.

Der indirekte Luftschall wird in das Verbrennungsgeräusch sowie in das mechanische Geräusch unterteilt. Die Verbrennungsgeräusche sind vom Verbrennungsdruckverlauf abhängig. Da bei Dieselmotoren die Zylinderdruckverläufe und Druckgradienten über denen von Ottomotoren liegen, sind auch die daraus resultierenden Schalldruckpegel entsprechend höher. Um die Verbrennungsgeräusche beim Dieselmotor zu mindern, wird der Verbrennungsablauf weicher gestaltet. Eine Maßnahme zur Geräuschverbesserung ist die Voreinspritzung. Durch Einspritzung einer kleinen Kraftstoffmenge während der Kompressionsphase vor der Haupteinspritzung wird das Temperatur- und Druckniveau im Brennraum erhöht. Dadurch verkürzt sich die Zündverzugszeit der Haupteinspritzung durch schnellere Radikalbildung und die Druckanstiegsgeschwindigkeit $dp/d\varphi$ wird gemindert, welche maßgeblich für das Verbrennungsgeräusch ist. Es kommt infolgedessen zu einer weicheren Verbrennung. Eine weitere zündverzugsverkürzende Maßnahme ist die Aufladung.

Die freien Kräfte und Momente aus den rotierenden und oszillierenden Massen des Kurbeltriebs erzeugen mechanische Schwingungen, welche zu Kräften und Momenten am Motor führen. Diese Körperschallanregung kann wiederum zu indirektem Luft-

schall, den mechanischen Geräuschen, führen. In der Regel sind beim Dieselmotor die Verbrennungsgeräusche, beim Ottomotor üblicherweise die mechanischen Geräusche dominant **[72]**.

Beim Hubkolbenmotor entstehen durch rotierende und oszillierende Massen des Kurbel- und gegebenenfalls des Ventiltriebes infolge zyklischer Beschleunigung bzw. Verzögerung oder Fliehkrafteinwirkung freie Kräfte und Momente. Diese sind vor allem in erster und zweiter Ordnung zu berücksichtigen. Höhere Ordnungen sind betragsmäßig sehr klein und sind daher in der Regel nicht zu beachten. Die auftretenden Kräfte und Momente sind abhängig von der Zylinderanzahl, Zylinderanordnung, Kröpfungsfolge der Kurbelwelle, den oszillierenden Massen, der Drehzahl, dem Pleuelstangenverhältnis, der Zündfolge und den Einzelzylinderparametern (Hub, Bohrung etc.). Diese können jedoch durch zusätzliche Wellen mit Unwuchtmassen ausgeglichen werden. Bei gleichzeitigem Vorhandensein freier Massenwirkungen erster und zweiter Ordnung wird meist nur die erste Ordnung ausgeglichen. Dies ist zum einen durch Package- und Kostengründe bestimmt, da der vollständige Ausgleich zweiter Ordnung zweier Ausgleichswellen bedarf, zum anderen sind die zweiten Ordnungen bei üblichen Pleuelstangenverhältnissen betragsmäßig kleiner als die ersten Ordnungen. Des Weiteren sind die mit doppelter Kurbelwellendrehzahl rotierenden Ausgleichswellen der zweiten Ordnung mechanisch und akustisch schwierig zu beherrschen und erfordern einen höheren Entwicklungsaufwand.

Ein Rotationskolbenmotor besitzt keine oszillierenden Massen, entsprechend treten auch keine Massenkräfte und Momente infolge der Kolbenbeschleunigungen im oberen und unteren Totpunkt auf. Dadurch, dass sich alle Teile nur um eine Schwerpunktachse drehen, nämlich die der Exzenterwelle, kann ein Wankelmotor vollkommen ausgewuchtet werden. Die Folge ist ein weicher und vibrationsarmer Lauf **[76]**, **[77]**, **[78]**.

Bewertung
Die bei Ansaugen und Ausschieben auftretenden Strömungspulsationen, welche zum direkt erzeugten Luftschall gezählt werden, sollen bei der Bewertung weniger ins Gewicht fallen. Sie treten bei allen Motoren in ähnlichem Umfang auf und können durch Beeinflussung der Schallwege durch reflektierende Wände vermindert werden. Das Ansauggeräusch kann hinreichend durch Luftfiltersysteme reduziert werden. Die im Abgasstrang auftretenden Geräusche können durch Auspuff-Schalldämpfer durch Schallabsorption und Schalldämmung gemindert werden **[72]**.

Die vorliegenden Zweitaktmotoren weisen aufgrund ihrer hohen Drehzahlen höhere oszillierende Massenkräfte und Momente gegenüber vergleichbarer Viertaktmotoren auf, da diese quadratisch von der Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit der Kurbelwelle abhängig sind. Des Weiteren muss für den nahezu vollständigen Ausgleich der Massenkräfte enormer Aufwand betrieben werden. Zum Ausgleich der ersten Ordnungen werden zwei zur Kurbelwelle gegenläufige Ausgleichswellen mit entsprechend angeordneten Gegengewichten benötigt. Diese müssen mit gleicher Drehzahl wie die Kurbelwelle selbst drehen. Zum Ausgleich der oszillierenden Massenkräfte zweiter Ordnung werden nochmals zwei gegenläufige Ausgleichswellen mit entsprechenden Gewichten benötigt, die mit doppelter Kurbelwellendrehzahl rotieren **[77]**. Aus Package-Gründen ist die Verwendung von insgesamt vier Ausgleichswellen jedoch nicht anzustreben, sondern nur der Ausgleich der Kräfte und Momente erster Ordnung. Die dadurch entstehenden mechanischen Geräusche können konstruktiv durch spezielle Motorlagerungen minimiert werden. So können sogenannte Schwingungstilger oder Hydrolager die Entstehung von Körperschall reduzieren. Eine Kombination aus Kom-

pensierung von Massenkräften und –momenten erster Ordnung mittels Ausgleichswellen und Verwendung einer Motorlagerung zur Schwingungstilgung stellt eine akzeptable Lösung dar. Daraus resultieren für die Zweitaktmotoren 3 Punkte.

Bei der Entwicklung und Konstruktion des AVL Zweizylinder Viertaktmotors wurde besonderes Augenmerk auf das NVH-Verhalten gelegt. Durch den Versatz (Kröpfung) der Kurbelwellenzapfen um 90° können die freien Massenkräfte zweiter Ordnung eliminiert werden. Die bei dieser Anordnung auftretenden Momente erster und zweiter Ordnung sind vernachlässigbar klein, so dass nur die Massenkräfte erster Ordnung zu berücksichtigen sind. Die rotierenden Massenkräfte erster Ordnung werden mittels Gewichten auf der Kurbelwelle, die oszillierenden Massenkräfte erster Ordnung durch eine zur Kurbelwelle gegenläufige, gleichschnelldrehende Ausgleichswelle mit Unwuchtmassen ausgeglichen. Der Zündabstand zwischen Zylinder eins und zwei beträgt 270° und 450°, um so auch die Massenkräfte und Momente erster und zweiter Ordnung zu minimieren **[60]**.

Die Kurbelwellenzapfen des Zweizylindermotors von Rotax sind um 180° versetzt angeordnet. Dadurch treten keine rotierenden Massenkräfte erster Ordnung auf. Die Momente erster Ordnung werden durch Gegengewichte auf der Kurbelwelle kompensiert. Folglich treten nur noch Kräfte und Momente zweiter Ordnung auf, welche jedoch betragsmäßig kleiner als die der ersten Ordnungen sind. Der erste Zylinder wird bei einem Kurbelwinkel von 0° gezündet, der Zweite bei einem Kurbelwinkel von 540°. Vorteil der Kröpfung von 180° bzw. eben genannter Zündfolge ist, dass der Nockenwellensensor, welcher in Verbindung mit dem Kurbelwellensensor Rückschlüsse auf die aktuelle Kolbenposition ermöglicht, entfallen kann. Aufgrund der auftretenden Drehzahlschwankungen der Kurbelwelle infolge der Zündfolge von 0°/540° kann die aktuelle Kolbenposition errechnet und entsprechend exakt gezündet werden **[59]**.
Beim Dreizylindermotor von Lotus mit einem Kröpfungswinkel von 120° treten keine Massenkräfte erster und zweiter Ordnung auf. Massenmomente erster Ordnung können durch Gegengewichte auf der Kurbelwelle kompensiert werden. Für die auftretenden Momente zweiter Ordnung kann eine Ausgleichswelle zum Einsatz kommen, der Motor wird jedoch auch ohne Ausgleichswelle angeboten, was eine Gewichtsreduzierung von 4 kg mit sich bringt **[58]**.

Die Viertaktmotoren weisen somit einen ruhigeren Lauf gegenüber Zweitaktmotoren auf, wobei es noch zwischen Zwei- und Dreizylindermotoren zu differenzieren gilt. Das Verbrennungsgeräusch ist bei allen Viertaktottomotoren ähnlich präsent, jedoch kann der Dreizylindermotor von Lotus unter Verwendung der Ausgleichswelle einen ruhigeren Lauf als die beiden Zweizylindermotoren aufweisen. Folglich ist der Dreizylindermotor mit 4,5 Punkten, die beiden Zweizylindermotoren mit 4 Punkten zu bewerten.
Bei den beiden Dreizylinderdieselmotoren können selbige Maßnahmen wie beim Motor von Lotus zur Schwingungsreduzierung von rotierenden bzw. oszillierenden Massen getroffen werden. Beim Vierzylindermotor treten nur Massenkräfte zweiter Ordnung auf. Diese können durch zwei, mit doppelter Kurbelwellengeschwindigkeit drehender, zur Kurbelwelle gegenläufigen Ausgleichswellen eliminiert werden. Diese können durch einen Höhenversatz die auftretenden last- und drehzahlabhängigen Kippmomente zweiter Ordnung um die Motorlängsachse ausgleichen **[75]**. Da bei Dieselmotoren aufgrund der höheren Brennraumdrücke das Verbrennungsgeräusch das vorherrschende Geräusch ist, gilt es dieses zu optimieren und geringe Massenkräfte und Momente zweiter Ordnung zu akzeptieren, welche des Weiteren über die Motorlager zu kompensieren sind. Wegen des höheren Verbrennungsgeräuschs sind die Dieselmotoren schlechter einzustufen als die genannten Viertaktottomotoren, daher erhalten die beiden Dreizylinder- als auch der Vierzylinderdieselmotor jeweils 3,5 Punkte.

Der Wankelmotor kann wie bereits genannt, vollkommen ausgewuchtet werden. Die auftretenden Verbrennungsgeräusche entsprechen denen der Viertaktottomotoren in Hubkolbenausführung aufgrund ähnlicher Brennraumdrücke. Wegen seines extrem ruhigen und gleichmäßigen Laufs erhält der Wankelmotor 5 Punkte.

Die Punkteverteilung zum NVH-Verhalten der einzelnen Motorkonzepte ist Tabelle 29 zu entnehmen.

NVH	2-Takt-Otto	4-Takt-Otto		4-Takt-Diesel		4-Takt-Einscheiben-Wankel
		2-Zylinder	3-Zylinder	3-Zylinder	4-Zylinder	
Bewertung	3	4	4,5	3,5	3,5	5

Tabelle 29: Punktebewertung NVH

5.10 Kraftstoffflexibilität

Der Begriff Kraftstoffflexibilität bedeutet, dass ein Verbrennungsmotor eines Fahrzeuges mit unterschiedlichen Kraftstoffen betrieben werden kann. Dabei können Änderungen an der Hardware erforderlich sein. Der Energiewandler ist somit prinzipiell für mehrere Kraftstoffe geeignet, kann jedoch in einer Bauweise mit nur einem Kraftstoff betrieben werden. Ist der Betrieb ohne konstruktive Änderungen an der Hardware möglich, so wird von der Vielstofffähigkeit gesprochen. Zum Beispiel kann ein Ottomotor mit Benzin, den Alkoholen Methanol und Ethanol sowie mit beliebigen Mischungen dieser drei Kraftstoffe betrieben werden. Fahrzeuge dieser Art werden Flexible Fuel Vehicle (FFV) genannt. Für den Verbraucher bedeutet dies eine einzigartige Flexibilität, da er je nach Verfügbarkeit und Preis zwischen Kraftstoffen wählen kann. In Europa steht das sogenannte E85 zur Verfügung, welches sich aus rund 85% Bioethanol und 15% Benzin zusammensetzt. Bisher gibt es jedoch nur wenige Fahrzeuge, die mit E85 betrieben werden können **[79]**. Seit Anfang 2011 gibt es den Kraftstoff E10 an Tankstellen in der EU-Zone, welcher analog zu oben, aus 10% Bioethanol und 90% Benzin besteht. Diese Kraftstoffmischung kann von nahezu jedem aktuell produzierten Fahrzeug mit Ottomotor verwendet werden. Die Verwendung von Bioethanol beruht darauf, dass CO_2-Emissionen und die Abhängigkeit von den Ölförderstaaten gesenkt werden sollen **[80]**. Beim Dieselmotor ist die Auswahl der verwendbaren Kraftstoffe geringer. Lediglich Dieselkraftstoff und Biodiesel stehen zur Auswahl. Verwendbar sind sie nur dann, wenn Motor und Nebenaggregate sowie Leitungen dafür ausgelegt sind.

Konzeptvergleich
Für den Betrieb eines Verbrennungsmotors steht eine Vielzahl von verschiedenen Kraftstoffen zur Verfügung. Dazu gehört herkömmlicher Otto- und Dieselkraftstoff, Alkoholkraftstoff bestehend aus Methanol (CH_3OH) oder Ethanol (C_2H_5OH), Druck- oder Flüssiggas sowie reiner Wasserstoff. Darüber hinaus sind beliebige Mischungen aus Ottokraftstoff, Methanol und Ethanol möglich.

Zweitakt-Ottomotoren sind in herkömmlicher Bauweise für den Betrieb mit reinem Alkohol oder Erdgas ungeeignet. Dies ist vor allem durch die in der Regel verwendete Verbrauchsschmierung (Schmierstoffbeimischung zum Frischgas) begründet. Alkohole sind stark polar, wohingegen Kohlenwasserstoffe (Schmieröl) unpolar sind, so dass diese sich nur schlecht miteinander vermischen und so keine ausreichende Schmierung aller Bauteile sichergestellt werden kann. Ebenso sind die Schmierungseigenschaften

von Alkoholen und Erdgas aufgrund der geringen Viskosität mangelhaft. Kraftstoffmischungen aus Benzin und geringen Anteilen von Ethanol wie z.B. E5 oder E10 sind denkbar. Der Betrieb mit Wasserstoff ist aufgrund der Überschneidung von „Auslass geöffnet" und „Einlass öffnen" und dem Ausschieben des Abgases durch Frischgas gänzlich ungeeignet. So könnte es zu unkontrollierten Verbrennungsvorgängen kommen, wenn sich das Frischgas durch noch im Brennraum befindliches heißes Abgas entzündet **[72]**.

Viertakt-Ottomotoren können außer mit herkömmlichem Ottokraftstoff auch mit den Alkoholen Methanol und Ethanol und beliebigen Mischungen aus diesen sowie mit Druckgas (CNG)[5] oder Flüssiggas (LPG)[6] betrieben werden. Ein Betrieb mit Wasserstoff ist ebenso möglich, bedarf aber eines höheren Anpassungsaufwands. Alkohole besitzen eine höhere Klopffestigkeit und lassen sich folglich höher verdichten, was eine Erhöhung des Wirkungsgrades mit sich bringt. Der Betrieb mit Alkoholen erfordert aufgrund der höheren Verdichtungsverhältnisse in der Regel auch konstruktive Anpassungen der Gemischbildung und des Ansaugsystems. Hierzu wird mittels Sensor der Alkoholgehalt im Kraftstoff ermittelt und entsprechend die Gemischbildung bzw. die Ansaugung geregelt, um eine kontrollierte Verbrennung ablaufen lassen zu können. Bei der Verwendung von Druck- oder Flüssiggas muss ein besonderes Augenmerk auf den Ventiltrieb mit seinen Komponenten gegeben werden. Aufgrund der geringeren Brenngeschwindigkeit dauert die Verbrennung länger an und die Abgase sind folglich heißer. So müssen entsprechende Maßnahmen wie z.B. das Verändern des Zündzeitpunktes vorgenommen werden, um Ventile und Ventilsitz nicht thermisch zu überlasten. Der Betrieb mit Wasserstoff stellt sich momentan noch als problematisch dar. Es kann zu sogenannten Rückzündungen kommen, wenn Frischgas einströmt und durch noch vorhandenes heißes Restgas entzündet wird, bevor das Einlassventil geschlossen ist. Darüber hinaus kann es zu einem unkontrollierten Verbrennungsvorgang kommen, auch Frühzündung genannt, wenn sich das Frischgasgemisch während der Verdichtung an den noch heißen Auslassventilen entzündet **[72]**.

Dieselmotoren weisen nur eine geringe Vielstofffähigkeit auf. Neben dem Betrieb mit herkömmlichem Dieselkraftstoff kann zusätzlich noch Biodieselkraftstoff verwendet werden, welcher durch Umesterung von Rapsöl mit Methanol gewonnen wird **[59]**. Ebenso sind beliebige Mischungen aus diesen möglich.

Konstruktiv bedingt eignet sich der Wankelmotor sehr gut für den Betrieb mit Wasserstoff. Aufgrund der räumlichen Trennung von Verdichtungs- und Verbrennungsraum kann es zu keiner Rückzündung in den Auslass bzw. keiner Entzündung von Frischgas durch Restgas kommen. Ein Betrieb mit reinem Alkoholkraftstoff ist mit einem Wankelmotor ebenso möglich. Es muss jedoch gewährleistet sein, dass das Kraftstoff-Luft-Gemisch ausreichend vorverdichtet und verdampft wird um die Zündfähigkeit des Gemisches sicher zu stellen. Dazu muss das theoretisch mögliche Verdichtungsverhältnis ε, welches vom K-Faktor abhängig ist, ausreichend hoch sein **[74]**. Ein Betrieb mit Erdgas ist ebenso möglich und die Gefahr thermischer Überbelastung an Ventilen ist nicht gegeben, da ein Wankelmotor ohne Ventiltrieb und folglich ohne Ventile auskommt. Ein genereller Nachteil von Alkoholkraftstoffen und Druck- bzw. Flüssiggasen ist die geringere Energiedichte gegenüber Otto- und Dieselkraftstoffen, so dass größere Kraftstofftanks benötigt werden, um gleiche Reichweiten gewährleisten zu können. Ein Wechselbetrieb zwischen Erdgas und Ottokraftstoff ist prinzipiell möglich, jedoch bei Verwendung in einem seriellen Hybrid mit Range Extender aufgrund der benötigten zwei Tanks und deren Größe nicht sinnvoll.

[5] CNG = Compressed Natural Gas = Komprimiertes Erdgas
[6] LPG = Liquidified Petroleum Gas = Flüssiges Gemisch aus Propan und Butan

Weiterer Nachteil von Alkoholkraftstoffen ist die hohe elektrische Leitfähigkeit und der relativ hohe Sauerstoffgehalt, welche Korrosion im Kraftstoffsystem und im Zylinder verursachen können **[72]**.

Bewertung
Der schlitzgesteuerte Einzylinder Zweitaktmotor von Rotax mit Verbrauchsschmierung eignet sich aufgrund der unzureichenden Durchmischung von Alkoholen mit Schmiermittel für den Betrieb mit reinem Ethanol oder Methanol nicht. Für den Betrieb mit Wasserstoff ist dieser ebenso ungeeignet, da es beim Ausschieben des Abgases durch Frischgas zu unkontrollierten Früh- und Fehlzündungen kommen kann. Auch die verwendete Direkteinspritzung beim Versuchsmotor der Technischen Universität Graz lässt keinen Betrieb mit Wasserstoff zu, da weiterhin die Gefahr besteht, dass das eingespritzte Frischgas sich an noch heißem, im Brennraum befindlichen Abgas entzündet. Da Zweitaktmotoren lediglich mit herkömmlichem Ottokraftstoff und geringen Beimischungen von Alkoholen (E5 und E10) betrieben werden können, entfällt die Punktevergabe auf 2,5 Punkte.

Im Gegensatz zu Zweitaktmotoren weisen die Viertaktottomotoren eine erheblich größere Kraftstoffflexibilität auf. Die vorliegenden Zwei- und Dreizylindermotoren weisen alle gleich gute Kraftstoffflexibilität bzw. Vielstofffähigkeit auf. So ist ein Betrieb mit Ottokraftstoff, Alkoholen, beliebigen Mischungen aus diesen und Erdgas möglich, ohne an der Hardware Veränderungen vornehmen zu müssen. Es setzt allerdings voraus, dass der Betrieb mit diesen Kraftstoffen von vornherein bei der Konstruktion des Motors berücksichtigt wird. Um die Wirkungsgradvorteile der höher verdichtbaren Alkohole und Erdgas ausnutzen zu können, muss das Verdichtungsverhältnis konstruktiv verändert werden. Da der Betrieb mit Wasserstoff momentan noch als problematisch einzustufen ist, erhalten die Viertaktottomotoren, zylinderunabhängig, jeweils 4 Punkte.

Für die untersuchten Dieselmotoren steht außer herkömmlichem Dieselkraftstoff nur noch Biodieselkraftstoff zur Verfügung. Ohne Veränderung des Schmiersystems können keine weiteren Kraftstoffe verwendet werden. Daher erhalten die Dieselmotoren jeweils 3 Punkte.

Der Wankelmotor der AVL List GmbH ist der einzige Motor im Feld, der für den Betrieb mit Wasserstoff, aufgrund räumlicher Trennung von Verdichtungs- und Verbrennungsraum, geeignet ist. Der Betrieb mit Alkoholen und Erdgas stellt sich als ebenso unproblematisch dar. Folglich ist der Wankelmotor mit 5 Punkten zu bewerten.

Die Punkteverteilung zum Kriterium Kraftstoffflexibilität der einzelnen Motorkonzepte ist Tabelle 30 zu entnehmen.

Kraftstoff-flexibilität	2-Takt-Otto	4-Takt-Otto		4-Takt-Diesel		4-Takt-Einscheiben-Wankel
		2-Zylinder	3-Zylinder	3-Zylinder	4-Zylinder	
Bewertung	2,5	4	4	3	3	5

Tabelle 30: Punktebewertung Kraftstoffflexibilität

5.11 Skalierbarkeit

Unter dem Begriff Skalierbarkeit wird die Veränderung der abgegebenen Motorleistung verstanden. Diese kann mit oder ohne bauliche Veränderung am Verbrennungsmotor umgesetzt werden. Eine Vergrößerung oder Verkleinerung des Hubraums, Variation der Zylinderanzahl beim Hubkolbenmotor oder Anzahl der Scheiben beim Rotationskolbenmotor, oder aber die Aufladung des Motors mittels Turbolader oder Kompressor (Verdichtung der Ladeluft) sind Möglichkeiten der baulichen Veränderung. Eine Methode ohne bauliche Veränderung wäre der Wechsel der Betriebspunkte des Motors durch Drehzahl- oder Laständerung.

Konzeptvergleich
Die Nutzleistung eines Verbrennungsmotors berechnet sich aus dem effektivem Mitteldruck p_{me}, dem Hubvolumen V_{Hub}, der Zylinderanzahl z, der Kurbelwellendrehzahl n; sowie dem Faktor k für die Arbeitsspiele pro Umdrehung (k=1 für 2-Takt; k=0,5 für 4-Takt).

$$P_e = p_{me} \cdot V_H \cdot z \cdot n \cdot k \tag{12}$$

Aus Gleichung (12) ergeben sich nun mehrere Möglichkeiten, die Leistung zu steigern. Eine Möglichkeit besteht in der Erhöhung des Hubraums V_{Hub}, eine weitere durch Erhöhung der Zylinderzahl z. Beide haben jedoch ein höheres Bauvolumen und folglich eine höhere Motormasse zur Folge. Die Leistung kann auch durch Erhöhung der Nenndrehzahl n erfolgen. Nachteile dieser Variante sind ein höherer Verschleiß beweglicher Bauteile sowie steigende Reibungs- und Strömungsverluste. Ebenso treten höhere Massenkräfte und die damit verbundenen Geräuschemissionen auf. Eine weitere Möglichkeit zur Leistungssteigerung kann durch Erhöhung des effektiven Mitteldrucks p_{me} erreicht werden **[50]**.

Zur Erhöhung des effektiven Mitteldrucks p_{me}, sollen Gleichung (13) bei äußerer Gemischbildung bzw. Gleichung (14) bei innerer Gemischbildung betrachtet werden.

$$p_{me} = \eta_e \cdot \frac{\rho_G \cdot H_U}{\lambda \cdot L_{st} + 1} \cdot \lambda_l \tag{13}$$

$$p_{me} = \eta_e \cdot \frac{\rho_L \cdot H_u}{\lambda \cdot L_{st}} \cdot \lambda_l \tag{14}$$

Der effektive Mitteldruck kann nur durch Erhöhung des effektiven Wirkungsgrades η_e oder durch Erhöhung der Dichte ρ_G bzw. Dichte ρ_L erfolgen. Da der effektive Wirkungsgrad η_e nur in geringem Maß gesteigert werden kann, ist eine deutliche Erhöhung des effektiven Mitteldrucks nur durch Dichteerhöhung umsetzbar. Um dies zu realisieren, kommt die Aufladung zum Einsatz. Diese wird heutzutage häufig in modernen Verbrennungsmotoren, sowohl in Diesel- als auch in Ottomotoren eingesetzt. Die genannten Maßnahmen zur Leistungssteigerung der Hubkolbenmotoren gelten auch für Wankelmotoren. Es wird jedoch von der Anzahl der Scheiben und nicht von der Anzahl der Zylinder gesprochen. Des Weiteren wird der Hubraum des Wankelmotors durch die Exzentrizität und/oder durch die Breite der Scheibe verändert. Der Aufladung sind natürlich Grenzen gesetzt. Durch die Aufladung steigen die Spitzendrücke im Motor

und folglich die mechanischen Belastungen. Weiterhin sind Bauteile wie Kolben, Ventile und Zylinderkopf thermisch höher belastet. Beim Ottomotor begrenzt zusätzlich die Klopfgrenze die Aufladung. Um die Leistung eines Motors zu senken, müssen genau die gegenteiligen zu den oben aufgeführten Maßnahmen getroffen werden **[50]**.

Bewertung
Für die Bewertung ist maßgebend, wie gut die untersuchten Motoren bezüglich ihrer Leistung skalierbar sind. Die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten wurden in vorherigem Kapitel bereits erläutert.

Die vorliegenden Zweitaktmotoren können hinsichtlich Hubraum und Zylinderanzahl in ihrer Leistung angepasst werden. Eine Anpassung über die Drehzahl ist prinzipiell immer möglich, jedoch durch die Maximaldrehzahl begrenzt. Eine Aufladung ist ebenso möglich, würde beim Einzylinder Zweitaktmotor der Technischen Universität Graz in Verbindung mit der eingesetzten Direkteinspritzung sogar Vorteile für die Emissionswerte bringen , da das Abgas durch Frischluft ausgeschoben wird. Durch Verwendung der Aufladung kann die Leistung infolge des höheren effektiven Mitteldrucks gesteigert werden. Zugleich nimmt der Wirkungsgrad zu, da die Expansion verlängert wird. Das sonst frühe Öffnen des Auslasses zur Erreichung eines positiven Spülgefälles kann später erfolgen, da durch die Aufladung der Druck des Frischgases erhöht wird und auch bei späterem Öffnen des Auslasses noch über dem des Brennraums liegt **[50]**.

Bei den Viertaktottomotoren kann die Leistung des Motors ebenso über den Hubraum, die Zylinderanzahl, die Drehzahl sowie durch Aufladung angepasst werden. Dies gilt sowohl für die Zweizylindermotoren, als auch für den Dreizylindermotor. Der Zweizylindermotor der AVL List GmbH kann bezüglich der Anpassung des Hubraums eine konstruktive Besonderheit aufweisen. Die separate Zylindereinheit ermöglicht die Bohrung der Zylinder und damit den Hubraum zu variieren, ohne weitere konstruktive Änderungen am Verbrennungsmotor vornehmen zu müssen. Jedoch sind damit nur kleine Leistungssteigerungen realisierbar **[60]**.

Wie die Viertaktottomotoren, können auch die untersuchten Viertaktdieselmotoren in gleicher Weise skaliert werden. Einzige Ausnahme stellt der Dreizylinder Dieselmotor von Kubota dar. Dieser besitzt bereits eine Aufladung mittels Turbolader **[63]**. Die Leistung kann jedoch prinzipiell auch noch weiter durch Erhöhung des Ladedrucks gesteigert werden, erfordert aber gegebenenfalls eine stabilere und massivere Konstruktion, aufgrund der höheren mechanischen und thermischen Belastungen der Bauteile. Die Vergrößerung des Hubraumes sowie die Erhöhung der Zylinderanzahl an einem Dieselmotor wirken sich jedoch negativer auf das Gewicht aus, als bei gleichen Veränderungen an einem Ottomotor. Dies ist durch den höheren Materialeinsatz bei Dieselmotoren aufgrund der höheren Drücke begründet.

Der Wankelmotor inklusive Generator der AVL List GmbH wird in drei Hubraumvarianten angeboten. Eine Leistungssteigerung des Motors ohne konstruktive Änderung ist mittels Drehzahländerung möglich. So hat die Basisvariante mit einer Scheibenbreite von 50 mm bei 5000 1/min eine elektrische Leistung von 15 kW. Wird die Drehzahl auf 7000 1/min angehoben, so erhöht sich die elektrische Leistung auf 25 kW. Die zweite Variante ist mit einer breiteren Scheibe von 70 mm bestückt. Damit erreicht der Wankelmotor bei 7000 1/min eine elektrische Leistung von 36 kW. Die dritte und letzte Variante ist die Umsetzung mittels zweier Scheiben, mit je einer Breite von 50 mm, wodurch bei 7000 1/min eine elektrische Leistung von 50 kW erreicht wird. Bei der zuletzt genannten Variante mit zwei Scheiben ändert sich der Durchmesser des Wankelmotors nicht, lediglich die Länge vergrößert sich von 250 mm auf 400 mm, was einem Ge-

samtvolumen von 0,023 m^3 entspricht. Damit ist dieser immer noch rund 1/5 kleiner als der Rotax Zweizylindermotor mit einer maximalen Leistung von 42 kW. Eine Aufladung des Motors wird nicht angeboten, ist jedoch ebenso denkbar **[53]**.

Werden die unterschiedlichen Materialeinsätze und Kosten bei Skalierung des Hubraums und der Zylinderanzahl nicht berücksichtigt, sondern nur die zur Verfügung stehenden Maßnahmen, so sind alle untersuchten Motoren mit gleicher Punktzahl zu bewerten. Dies ist dadurch begründet, dass Gewicht und Kosten bereits extra bewertet wurden. Da kein Motor ohne oder nur mit geringem Aufwand von 20 kW auf 50 kW skaliert werden kann, erhält jeder Motor, wie in Tabelle 31 aufgeführt, 4 Punkte.

Die Punkteverteilung bzgl. der Skalierbarkeit der einzelnen Motorenkonzepte ist in Tabelle 31 zu entnehmen.

Skalierbarkeit	2-Takt-Otto	4-Takt-Otto		4-Takt-Diesel		4-Takt-Einscheiben-Wankel
		2-Zylinder	3-Zylinder	3-Zylinder	4-Zylinder	
Bewertung	4	4	4	4	4	4

Tabelle 31: Punktebewertung Skalierbarkeit

5.12 Auswertung

Zur Auswertung wird die einfache Nutzwertanalyse verwendet. Für jedes Motorkonzept wird zu jedem Kriterium der Teilnutzwert gebildet. Dieser ist das Produkt aus Gewichtungsfaktor und vergebener Punktzahl. Im Anschluss daran wird für jedes Motorkonzept der Gesamtnutzwert gebildet. Dieser ist die Summe aller Teilnutzwerte eines Motorkonzepts. Die durchschnittliche Punktzahl der einzelnen Motorkonzepte wird durch Division der einzelnen Gesamtnutzwerte mit 100 berechnet. Anhand der durchschnittlichen berechneten Punktzahlen kann eine Aussage über die Güte des Konzepts getroffen und das Optimum ermittelt werden.

5.12.1 Gewichtung

Aufgrund der unterschiedlichen Bedeutungen der einzelnen Kriterien für das Gesamtkonzept sollen diese eine Gewichtung erfahren. Die Gewichtung erfolgt mittels Gewichtungsfaktoren, welche in die Nutzwertanalyse einfließen.

Das Kriterium mit höchster Bedeutung ist das Kosten-Kriterium mit einer Gewichtung von 20 %. Darauf folgt das Gewicht mit 15 %. Sie sind ausschlaggebend, ob der Einsatz des betrachteten Motorkonzeptes als Range Extenders wirtschaftlich und technisch sinnvoll ist. Im reinen Elektrobetrieb stellt der Range Extender ein unnötiges Zusatzgewicht dar und sollte infolgedessen so leicht wie möglich ausgeführt werden. Die für größere Reichweiten benötigte Energie soll anstelle von schweren und teuren Batterien durch den leichteren und kostengünstigeren Range Extender bereitgestellt werden. Das NVH-Verhalten sowie die Emissionen werden ebenfalls mit 15 % gewichtet. Der Endnutzer wird ein Fahrzeug mit Range Extender nur dann erwerben, wenn seine Ansprüche in puncto Geräusch- und Fahrkomfort erfüllt sind. Eine konstante Geräuschquelle, die über den Abroll- und Windgeräuschen liegt sowie eine vom Range Extender dauerhaft angeregte Fahrgastzelle, werden von Insassen nicht akzeptiert. Damit sich ein Fahrzeug langfristig auf dem Markt etablieren kann, müssen aktuelle und zukünftige Emissionsvorschriften eingehalten werden. Insbesondere die gesetzliche

Reglementierung der Schadstoffemissionen kann zum Ausschlusskriterium für den Einsatz eines bestimmten Motorkonzeptes als Range Extender werden. Bis zum aktuellen Stand der Recherche ist eine Gesetzgebung für die Emissionen von Range Extender nicht vorhanden, so dass dies in der hier durchgeführten Studie nicht beachtet werden konnte.

Das Kriterium des Wirkungsgrads sowie des Packaging wird mit je 10 % gewichtet. Die Betriebsdauer des Verbrennungsmotors in einem Fahrzeug mit Range Extender ist gegenüber einem konventionell angetriebenem Fahrzeug um ein vielfaches geringer, somit fallen die spezifischen Verbräuche der unterschiedlichen Motorkonzepte, die ohnehin nah beieinander liegen, weniger ins Gewicht. Aufgrund des geringen Platzangebots in Kleinwagen, ist auch beim Range Extender auf geringe Abmaße zu achten, um die Fahrgastzelle nicht weiter zu verkleinern. Leistungsdichte, Kraftstoffflexibilität sowie Skalierbarkeit spielen eine nicht ganz so wichtige Rolle für die Systemauswahl und werden darum mit je 5 % gewichtet. In Tabelle 32 sind die Bewertungskriterien mit entsprechender Gewichtung aufgelistet.

Kosten	Gewicht	NVH	Emissionen	Wirkungsgrad	Packaging
20%	15%	15%	15%	10%	10%
Leistungsdichte		**Skalierbarkeit**		**Kraftstoffflexibilität**	
5%		5%		5%	

Tabelle 32: Gewichtung der Kriterien

5.12.2 Ergebnis

Mit und ohne Berücksichtigung der Gewichtung können die Gesamtnutzwerte sowie die daraus resultierenden durchschnittlichen Punktzahlen errechnet werden. In Tabelle 33 sind zu jedem Kriterium die Einzelpunktzahlen zu den verschiedenen Motorkonzepten sowie die berechneten durchschnittlichen Punktzahlen dargestellt.

Eine grafische Darstellung der Einzelpunktzahlen kann in einem Netzdiagramm umgesetzt werden. Für jedes Kriterium existiert eine Achse. Diese sind kreisförmig mit gleichmäßigem Winkel angeordnet. Auf den Achsen sind die möglichen Punkte aufgetragen. Dabei nimmt die Punkteanzahl von Innen nach Außen hin zu.

Kriterium	Gewich-tung	2-Takt-Otto	4-Takt-Otto		4-Takt-Diesel		4-Takt-Wankel
			2-Zyl.	3-Zyl.	3-Zyl.	4-Zyl.	
Wirkungsgrad	10%	3,5	4,5	4,5	5	4,5	4
Kosten	20%	4,5	4	3,5	2,5	2	4,5
Gewicht	15%	5	4	3	1,5	2	4,5
Leistungsdichte	5%	5	4	3,5	1	1	4,5
Packaging	10%	5	4	3	1,5	2,5	5
Emissionen	15%	3,5	4,5	4,5	1	1	3,5
NVH	15%	3	4	4,5	3,5	3,5	5
Kraftstoffflexibilität	5%	2,5	4	4	3	3	5
Skalierbarkeit	5%	4	4	4	4	4	4
Durchschnittliche Punktzahlen (mit Gewichtung)		**4,05**	**4,13**	**3,83**	**2,45**	**2,48**	**4,43**

Tabelle 33: Nutzwertanalyse der betrachteten Motorkonzepte

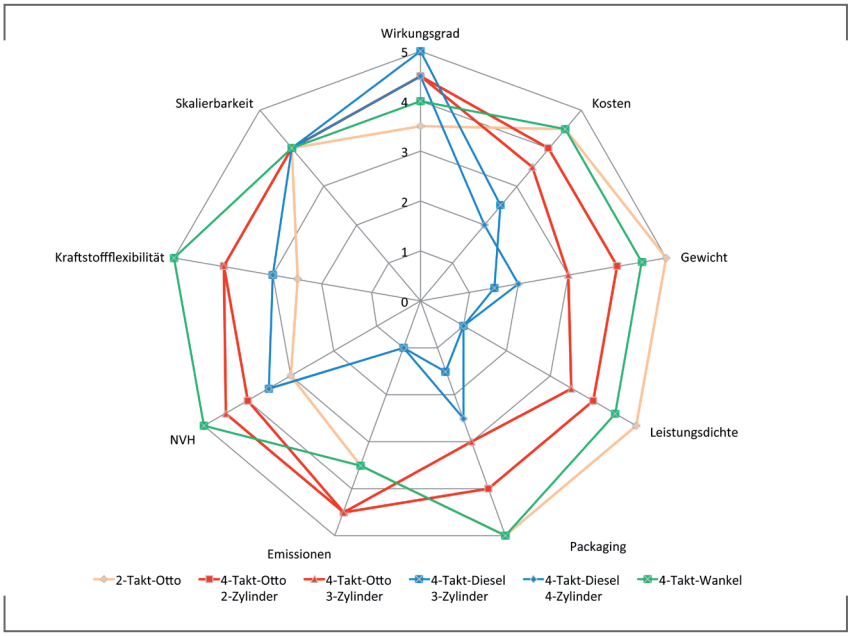


Abbildung 73: Netzdiagramm zur Motorkonzeptbewertung

Die erreichten Einzelpunkte eines Motorkonzepts werden nun auf die entsprechenden Achsen aufgetragen und miteinander verbunden. Für die weiteren Motorkonzepte wird analog vorgegangen. Mit Hilfe des in Abbildung 73 dargestellten Netzdiagramms kann nun jedes Motorkonzept direkt miteinander verglichen werden. So lässt sich beispielsweise erkennen, dass die mit blauen Linien eingetragenen Dieselmotoren nur in puncto Wirkungsgrad vor den anderen Motorkonzepten liegen.

5.12.3 Fazit

Wie in Tabelle 33 ersichtlich, stellt das Konzept mit Wankelmotor mit einer durchschnittlichen Punktzahl von 4,43 das Optimum dar. Aufgrund des geringen Gewichts, den kompakten Abmessungen sowie des sehr guten NVH-Verhaltens kann sich der Wankelmotor von seinen Kontrahenten absetzen. Ebenso könnte er für zukünftige Projekte auch für den Betrieb mit Wasserstoff ausgelegt und verwendet werden. Des Weiteren ermöglicht er auch durch seine zylindrische Bauform die nahezu perfekte Integration des Generators. Das zweitbeste Konzept stellen die Zweizylinder Viertaktottomotoren mit einer durchschnittlichen Punktzahl von 4,13 knapp vor den Zweitaktmotoren mit einer durchschnittlichen Punktzahl von 4,05 dar. Die Einzylinder Zweitaktmotoren sind zwar kompakter, leichter und weisen höhere Leistungsdichten auf, können aber aufgrund der Einzylinderausführung und den konzeptbedingten hohen Drehzahlen im NVH-Verhalten nicht mit den Zweizylinder-Viertaktmotoren mithalten. Zusätzlich sind die Rohemissionen aufgrund des Überschiebens von Frischgas in den Auslass und der häufig eingesetzten Gemischschmierung höher. Der Dreizylinder Ottomotor liegt aufgrund der größeren Abmaße, des höheren Mehrgewichts und der daraus resultierenden geringeren Leistungsdichte mit einer durchschnittlichen Punktzahl von 3,83 hinter den eben genannten Motorkonzepten. Die Dieselmotoren sind mit durchschnittlichen Punktzahlen von 2,45 für den Vierzylinderdieselmotor und 2,43 für die Dreizylindervarianten an letzter Stelle. Dies ist vor allem auf die komplexe und kostenintensive Abgasnachbehandlung zurückzuführen, aber auch auf deren Abmaße sowie das enorme Gewicht der Dieselaggregate. So wiegt der leichteste Dieselmotor rund das Fünffache des leichtesten Motors im Feld. Entsprechend sind auch die Leistungsdichten der Dieselmotoren gering.

5.12.4 Optimierungsmöglichkeiten

Welches Potential ein Zweitaktmotor besitzt, konnte bereits aufgezeigt werden. Seine Schwächen können durch Optimierungsmaßnahmen minimiert werden. Die Verwendung einer Direkteinspritzung, wie sie im Versuchsmotor der Technischen Universität Graz zum Einsatz kommt, stellt bereits einen guten Ansatz dar. Durch die Direkteinspritzung können Kraftstoffverbräuche ähnlich denen von Viertaktottomotoren realisiert werden. Die Umsetzung beim Versuchsmotor der Technischen Universität Graz erfolgte mit zwei Einspritzdüsen, welche radial in den Zylinder montiert wurden. Durch diese besondere Position der Einspritzdüsen ist es möglich, je nach Einspritzzeitpunkt oberhalb der Kolbens (siehe Abbildung 74 a)) oder aber mittels Fenster in der Kolbenaußenwand unterhalb ins Kurbelgehäuse einzuspritzen, um ein möglichst homogenes Gemisch im Teillastbetrieb zu erzeugen (siehe Abbildung 74 b)) **[57]**.

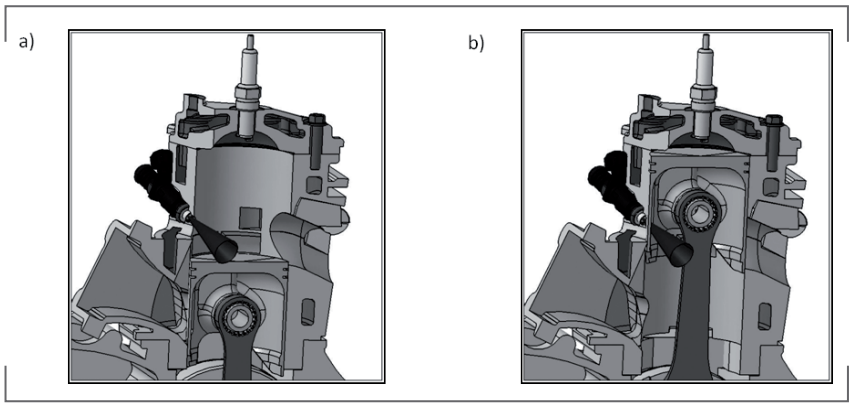


Abbildung 74: a) Einspritzzeitpunkt für Direkteinspritzung
b) Einspritzzeitpunkt für homogenen Betrieb [57]

Eine weitere Verbesserung konnte mittels Veränderung der Injektoren umgesetzt werden. Hierzu wurden die zuvor installierten Injektoren, welche eine Tropfengröße mit einem Sauterdurchmesser[7] von 98 µm erzeugten, durch Injektoren mit kleineren Tropfengrößen (SDM = 69 µm) ersetzt. Ein homogeneres Gemisch war die Folge, was vor allem im Teillastbereich den spezifischen Kraftstoffverbrauch nochmals deutlich senkte **[57]**. Um die Spülverluste zu minimieren kann entweder eine sogenannte Spülvorlage oder eine Aufladung zum Einsatz kommen. Dadurch kann erreicht werden, dass Abgas durch Frischluft ausgeschoben wird. Dies führt zum einen zu weniger Restgas im Zylinder, des Weiteren wird auch weniger bis kein Frischgas in den Auslass übergeschoben, so dass auch der Ausstoß von unverbrannten Kohlenwasserstoffen verringert werden kann.

Bei Viertakthubkolbenmotoren kann zur Optimierung des Wirkungsgrades und dem damit verbundenen Kraftstoffverbrauch der Weg der Reibungsminimierung gegangen werden. So können z. B. leichte, geschmiedete Kolben mit optimierten Kolbenringen zur Minimierung der Reibung, der Kompressionsverluste sowie des Ölverbrauchs eingesetzt werden. Eine weitere Maßnahme zur Reibungsminimierung ist die Verwendung einer DLC-Beschichtung[8] auf den Hydrostößeln **[59]**. Diese Schicht verfügt über eine besonders hohe chemische Stabilität und Härte. Des Weiteren zeichnet sie sich durch sehr gute Gleiteigenschaften gegen Metalle und eine gute Antihaftwirkung aus **[81]**. Bezüglich der Verbrennungsoptimierung kann die Geometrie des Einlasses angepasst werden, um mittels Drall eine möglichst gute Durchmischung des Kraftstoff-Luft-Gemisches zu erreichen **[59]**. Durch individuelle Regelung der Wasserpumpe kann die Warmlaufphase des Motors und der Energieverbrauch der Pumpe verbessert werden **[58]**.

Ein speziell zum Zweck als Range Extender entwickelter Dieselmotor, der nahe dem Volllastbereich, das bedeutet beim Dieselmotor ein Betrieb mit geringem Luftüberschuss ($1{,}0 < \lambda < 1{,}3$) betrieben wird, könnte theoretisch ohne Abgasnachbehandlungssysteme, wie Dieselpartikelfilter oder NO_x-Katalysator, sondern lediglich mit einem Dieseloxidationskatalysator auskommen. Dieses Optimierungspotential basiert auf dem Betrieb mit geringem Luftüberschuss, da hier aufgrund des Luftüberschusses nur geringe Anteile an Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen. Zusätzlich liegt die Verbrennungstemperatur im hohen Bereich, wodurch weniger Partikel entstehen. Wegen des Luftüberschusses und den damit verbundenen hohen Anteilen von elementarem Sauerstoff (O) und Luftstickstoff (N) wird in Verbindung mit den hohen Temperaturen die Bildung von Thermischem NO gesteigert. Um die Stickoxid-Anteile zu verringern, kann eine Abgasrückführung (AGR) eingesetzt werden. Dadurch wird der Abgasmassenstrom gesenkt, die Brenngeschwindigkeit verringert und infolge dessen die Spitzentemperaturen durch den erhöhten Inertgasanteil gesenkt. Zudem verringern sich die lokalen Luftverhältnisse λ. Durch die Wahl der Betriebspunkte nahe des Volllastbereichs und der Verwendung einer AGR sowie durch weitere innermotorische Maßnahmen, wie Veränderung an der Einspritzung (Einspritzbeginn, Einspritzverlauf, Einspritzdruck etc.) könnten die Rohemissionen so weit gesenkt werden, dass ein alleiniger Diesel-Oxidationskatalysator genügen würde **[50]**, **[72]**.

[7] Sauterdurchmesser (SDM) = Verhältnis von Gesamtvolumen der eingespritzten Kraftstoffmenge zur Gesamtoberfläche aller Tröpfchen
[8] Diamond-Like-Carbon (DLC) = diamantähnliche Kohlenstoffschicht

5.13 Kompetenzen am Standort Baden-Württemberg

Der Technologiestandort Baden-Württemberg gehört zu einem der wichtigsten in Europa. Die Automobilindustrie und der Fahrzeugbau setzen neben dem Maschinen- und Anlagenbau und der metallverarbeitenden Industrie einen Schwerpunkt in der Wirtschaftsregion.

Für die Entwicklung und Herstellung von Hub- und Rotationskolbenmotoren für den Einsatz als Range Extender stehen in Baden-Württemberg international agierende und hochinnovative Unternehmen zur Verfügung. In erster Linie gehören dazu die Automobilhersteller Daimler AG, Porsche AG und Audi AG, die durch ihre Erfahrung und Kompetenzen einen kompletten Entwicklungs- und Produktionsprozess gewährleisten können. Zudem ist Baden-Württemberg in der vorteilhaften Lage, dass nicht nur Automobilhersteller sondern auch wichtige Zulieferer und Motorkomponentenhersteller wie Mahle GmbH, ZF Friedrichshafen AG, Mann + Hummel Gruppe und Robert Bosch GmbH in der Region ansässig sind. Darüber hinaus verfügt Baden-Württemberg über sowohl private Forschungs- als auch Hochschuleinrichtungen und Entwicklungsdienstleister, wie das FKFS, Bertrand AG und zahlreiche Ingenieurdienstleister, die sich auf die Automobilindustrie spezialisiert haben.

Der Standort Baden-Württemberg verfügt demnach sowohl über Entwicklungskompetenzen als auch über die Ressourcen zur Produktion eines Verbrennungsmotors als Range Extender.

6.

Elektrische Maschinen

Elektrische Maschinen haben sich nach der Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips durch Hjorth (1851), Jedlik (1861) und Siemens (1866) mannigfaltig entwickelt. Zur Jahrhundertwende stellten elektrische Antriebe auch in der Mobilität die Hauptantriebsquelle dar. Erst mit dem Siegeszug der Verbrennungsmotoren haben die elektrischen Antriebe ihre Bedeutung verloren. Mit zunehmenden Anforderungen an die Umweltverträglichkeit von Fahrzeugen halten elektrische Antriebe nun wieder im Bereich des Antriebsstrangs Einzug.

Die Aufgabe der elektrischen Maschine in einem Range Extender System ist primär die generatorische Wandlung der mechanischen in elektrische Energie. In einem verbrennungsmotorischen Range Extender Konzept kann sie zusätzlich die Funktion des Starters übernehmen.

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Beschreibung und Bewertung möglicher Generatorenkonzepte in Bezug auf die jeweilige Range Extender Applikation. Um eine Bewertung in Bezug auf die generatorische Funktionalität im Range Extender System vorzunehmen zu können, müssen Bewertungskriterien aufgestellt werden, anhand derer eine Einordnung erfolgen kann (Tabelle 34).

	Einheit
Wirkungsgrad	%
Leistungsgewicht	kW/kg
Herstellkosten	€
Skalierbarkeit (5-50 kW)	-
Packaging	l · b · h
NVH	dB

Tabelle 34: Bewertungstabelle für elektrische Maschinen in Bezug auf eine Range Extender Applikation

6.1 Maschinentypen

Um ein Basisverständnis für die konzeptspezifische Auswahl der elektrischen Maschinen für einen Range Extender zu schaffen, wird in diesem Kapitel ein kurzer Überblick über mögliche Maschinentypen gegeben. Dabei wurde bereits eine sinnvolle Vorauswahl getroffen.

6.1.1 Gleichstrommaschinen GM

Gleichstrommaschinen bestehen aus einem Stator und einem Rotor, der auch als Anker bezeichnet wird. Im Stator wird ein feststehendes Magnetfeld mit Hilfe von Permanentmagneten oder einer elektrischen Erregerwicklung erzeugt. Der Rotor trägt die so genannte Ankerwicklung. Um ein konstantes Drehmoment erzeugen zu können, müssen gerade die Leiter richtungsabhängig bestromt werden, die sich quer zum feststehenden Statorerregerfeld bewegen. Da der Anker rotiert, kann dies nur mit einem Kommutator erfolgen, der über Bürsten die elektrische Energie auf den Rotor überträgt und gleichzeitig die entsprechend positionierten Spulen im Anker bestromt. Die mechanische Kommutation des Stromes ist wartungsanfällig und inzwischen durch die elektronische Kommutation moderner Stromrichter ersetzt worden. Eine nähere Betrachtung der Gleichstrommaschine kann deshalb entfallen.

6.1.2 Geschaltete Reluktanzmaschinen GRM

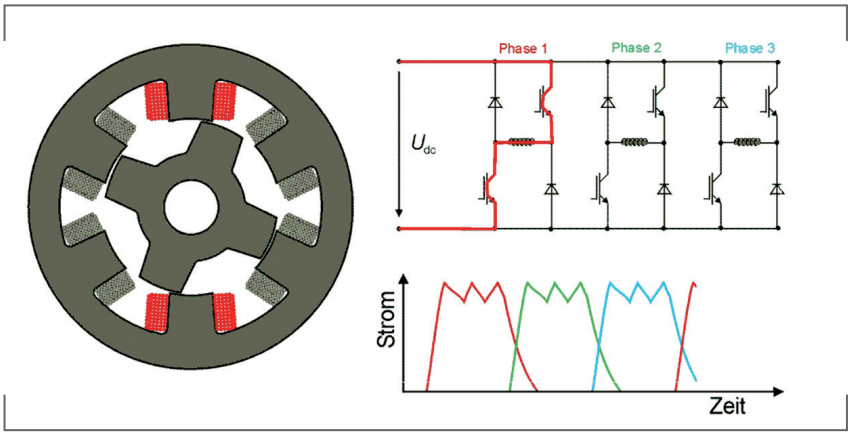


Abbildung 75: Schematischer Aufbau einer geschalteten Reluktanzmaschine [83]

Gleichstrommaschinen, Synchronmaschinen bzw. Asynchronmaschinen (ASM) arbeiten nach dem Prinzip der Kopplung des Statormagnetfelds mit einem Rotormagnetfeld bzw. der Kraftwirkung eines Magnetfelds auf einen stromdurchflossenen Leiter. Geschaltete Reluktanzmaschinen (engl. Switched Reluctance Motor SRM) arbeiten nach einem anderen Prinzip. Technische Systeme haben immer die Eigenschaft, einen energieminimalen Zustand einzunehmen. Dieses Prinzip findet in der geschalteten Reluktanzmaschine seine Anwendung. Der Rotor hat bei diesem Maschinentyp magnetische Vorzugsrichtungen, beispielsweise durch Ausgestaltung einer ausgeprägten Zahnstruktur. Dadurch existieren am Umfang des Rotors Bereiche mit hohem und mit niedrigem magnetischen Widerstand (=Reluktanz). Wenn nun im Stator ein Magnetfeld erzeugt wird, versucht sich der Rotor in die Position zu bringen, indem das Gesamtsystem einen energiemimimalen Zustand einnimmt. Dieser Vorgang setzt eine Drehbewegung in Gang, die durch gezieltes Schalten der Statorwicklungen aufrechterhalten und dabei ein kontinuierliches Drehmoment erzeugt werden kann. Da der Läufer sich ebenfalls synchron mit dem Statordrehfeld bewegt, gehören die geschalteten Reluktanzmaschinen ebenfalls in die Gruppe der Synchronmaschinen.

Der Stator besteht im Normalfall aus Einzelzahnwicklungen, die von der Leistungselektronik phasenrichtig angesteuert werden, um ein möglichst konstantes Drehmoment zu erzeugen. Der Luftspalt muss systembedingt sehr klein sein. Geschaltete Reluktanzmaschinen zeichnen sich durch ihre geringen Herstellungskosten und eine große Robustheit aus. Nachteile ergeben sich in der Effizienz, die maximal im Bereich der Effizienz einer ASM liegt und somit hinter der Effizienz einer permanentmagneterregten Synchronmaschine zurückbleibt. Die Geräuschentwicklung ist höher als bei anderen Maschinentypen, da die ausgeprägte Zahnstruktur zum Schwingen und damit zur Geräuschanregung neigt. Moderne, mehrphasige Motor- und Umrichterkonzepte können dies aber teilweise kompensieren, so dass sich dieser Maschinentyp aufgrund der mechanischen Robustheit insbesondere für Hochdrehzahlanforderungen gut eignet.

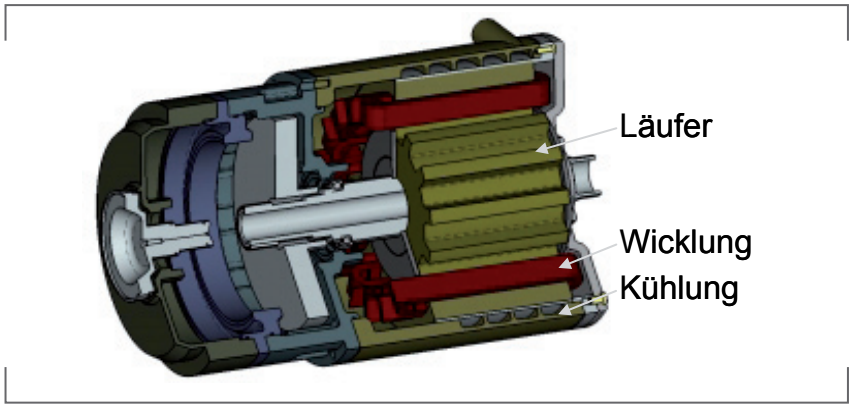


Abbildung 76: Geschaltete Reluktanzmaschine [84]

Die in Abbildung 76 dargestellte SRM ist im Projekt OKOFEH (Optimierte Komponenten für Elektro- und Hybridfahrzeuge) in Zusammenarbeit zwischen den Partnern ISET (Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe), Emotron und dem Volkswagenkonzern entstanden. Es muss darauf hingewiesen werden, dass es sich bei der Beispielmaschine um einen Motor im Forschungsstadium handelt. Durch Optimierung hinsichtlich Leistungsdichte und industrieller Fertigung kann mit einer Reduzierung im Volumen gerechnet werden.

SRM		
Nennleistung	55.0	kW
Nenndrehmoment	170	Nm
Nenndrehzahl	3000	U/min
Maximalleistung	75	kW
Maximaldrehzahl	12000	U/min
Maximaler Wirkungsgrad (wirkungsgradoptimiert)	94	%
Gewicht	75	kg
Spezifisches Leistungsgewicht	0.7	kW/kg
Durchmesser	528	mm
Länge	150	mm

Tabelle 35: Geschaltete Reluktanzmaschine: Technische Daten [85]

6.1.3 Asynchronmaschinen ASM

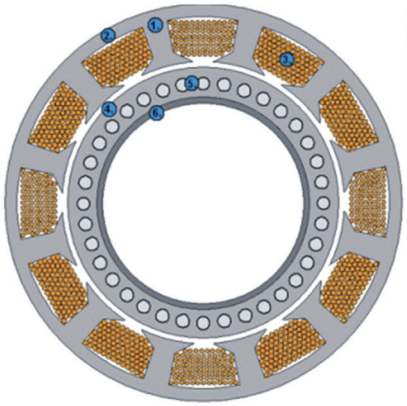


Abbildung 77: Schematischer Aufbau einer Asynchronmaschine [86]

Im Stator einer Asynchronmaschine erzeugt ein dreiphasiges Wechselspannungssystem ein am Maschinenumfang umlaufendes Magnetfeld, dass mit Hilfe eines modernen Umrichters in Frequenz und Amplitude eingestellt werden kann. Der Rotor einer Käfigläuferasynchronmaschine besteht aus Läuferstäben und Kurzschlussringen. Das umlaufende Statordrehfeld induziert in den Kurzschlusswicklungen des Rotors eine Spannung, die einen Stromfluss in den Läuferstäben zur Folge haben. Das dabei entstehende Magnetfeld fungiert wie die elektrische bzw. permanentmagnetische Erregung einer Synchronmaschine. Dieser Effekt tritt aber nur bei einer Relativbewegung (Schlupf) des Statordrehfelds gegenüber dem Läuferdrehfeld auf. Daher rührt auch der Begriff „asynchron". Vorteilhaft ist der einfache Aufbau ohne Permanentmagneten, die hohe Drehzahlfestigkeit aufgrund der Kurzschlussläuferwicklung und auch der sichere Betrieb im Fehlerfall, da keine hohen induzierten Spannungen auftreten können. Nachteilig ist, dass der Stromanteil zur Rotorfelderzeugung im Stator zusätzliche Verluste verursacht, wodurch die Wirkungsgrade von Asynchronmaschinen niedriger sind als von permanentmagneterregten Synchronmaschinen.



Abbildung 78: Beispiel einer Asynchronmaschine, BRUSA Motor ASM6.17.12 [87]

Um den Feldanteil des Stroms im Stator am Gesamtstrom möglichst klein zu halten, werden Asynchronmaschinen mit kleinen Luftspalten gefertigt, die den Aufwand zur Magnetisierung des Läufers geringer halten, was sich in relativ gesehen höheren Wirkungsgraden zeigt. Der Größenminimierung des Luftspalts sind aber mechanische Grenzen gesetzt, um ein Anschlagen des Rotors am Stator sicher zu verhindern. Als Beispiel für eine ASM, die im Automobilbereich als Traktionsantrieb zum Einsatz kommt, ist in Abbildung 78 und Tabelle 36 die ASM6.17.12 der Firma Brusa dargestellt.

ASM		
Nennleistung	27.0	kW
Nenndrehmoment	65	Nm
Nenndrehzahl	4000	U/min
Maximalleistung	54	kW
Maximaldrehzahl	11000	U/min
Maximaler Wirkungsgrad (wirkungsgradoptimiert)	94	%
Gewicht	49	kg
Spezifisches Leistungsgewicht	0.6	kW/kg
Durchmesser	284	mm
Länge	245	mm

Tabelle 36: Asynchronmaschine: Technische Daten, BRUSA Motor ASM6.17.12 [87]

6.1.4 Synchronmaschinen (SM, PSM)

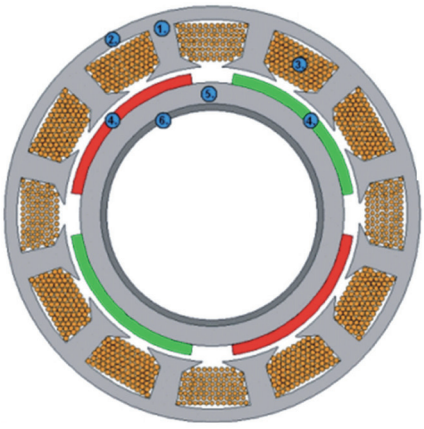


Abbildung 79: Schematischer Aufbau einer permanenterregten Synchronmaschine mit Innenläufer [88]

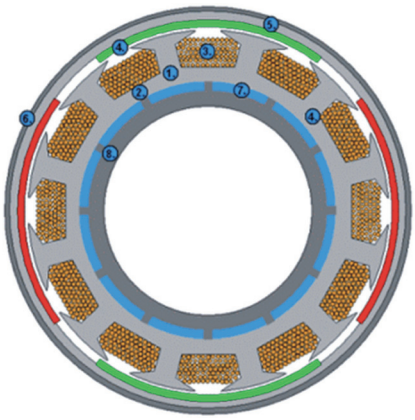
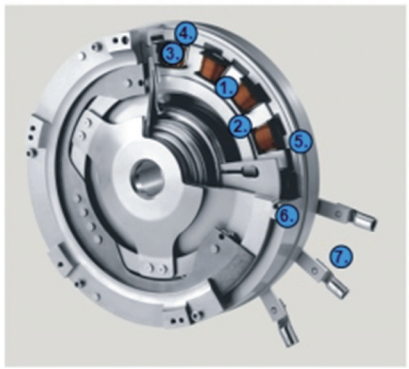


Abbildung 80: Schematischer Aufbau einer permanenterregten Synchronmaschine mit Außenläufer [89]

Der Begriff „synchron" beschreibt die Eigenschaft einer elektrischen Maschine, dass sich das magnetische Feld des Rotors mit synchroner Geschwindigkeit zum Statormagnetfeld bewegt. Konventionelle Synchronmaschinen haben normalerweise den gleichen Statoraufbau wie Synchronmaschinen mit verteilter Wicklung. In den letzten Jahren haben sich allerdings vermehrt Synchronmaschinen mit konzentrierter Wicklung durchgesetzt, weil damit die Wickelköpfe deutlich verkleinert werden konnten. Haupttreiber war die Entwicklung der Kurbelwellenstatorgeneratoren, bei denen die axiale Länge eine wesentliche Rolle spielt. Positiver Nebeneffekt war gleichzeitig die Reduktion von Kupferverlusten. Die Erregung im Rotor kann durch elektrische Wicklungen oder durch Permanentmagneten erfolgen. Der Nachteil der elektrischen Erregung ist durch die verlustbehaftete Energieübertragung über Schleifringe gegeben, weshalb diese Technologie im Wesentlichen im Kraftwerksbereich zum Einsatz kommt, da über den Erregerfluss die Blindleistung geregelt werden kann. Für Fahrzeugantriebe hat Continental eine fremderregte Synchronmaschine vorgestellt, die mit hohen Wirkungsgraden und einem großen Feldschwächbereich aufwarten kann. Da für die generatorische Energieerzeugung in einem Inselnetz eines Autos Feldschwächung keine Anforderung darstellt und darüber hinaus die Erregerleistung als Verlust in die Energiebetrachtung mit eingeht, kommen für die Range Extender Applikation nur permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PSM) in Betracht. Darunter fallen auch die Kategorie der Transversalflussmaschinen und die permanentmagneterregten Linearmotoren, auf die weiter unten noch näher eingegangen wird.

In der Bauform können noch Innen- und Außenläufer unterschieden werden. Der Vorteil der Außenläufer liegt in dem weiter außen liegenden Luftspalt, wodurch Außenläufermaschinen in der Tendenz höhere Drehmomentdichten wie Innenläufermaschinen aufweisen. Ebenso kann das Bandagieren der Permanentmagnete entfallen, da die Rotorglocke die Fliehkräfte aufnimmt.

ZF Sachs hat die Technologie der permanentmagneterregten Außenläufer Synchronmaschinen mit konzentrierter Wicklung inzwischen zur Serienreife entwickelt:



Permanenterregte Aussenläufer Synchronmaschine

1. Stator
2. Statorrücken
3. Kupferwicklungen
4. Oberflächenmagnete
5. Rotorblechpaket
6. Rotorwelle in Aussen-Läuferbauweise
7. Hochvolt-Steckverbinder

Abbildung 81: Permanentmagneterregte Außenläufer Synchronmaschinen mit konzentrierter Wicklung [89]

Diese kommt in der S-Klasse 400 Hybrid von Mercedes-Benz zum Einsatz und zeichnet sich durch eine sehr kurze axiale Länge aus.

PSM		
Nennleistung	25.0	kW
Nenndrehmoment	165.0	Nm
Nenndrehzahl	2000.0	U/min
Maximalleistung	40.0	kW
Maximaldrehzahl	6500.0	U/min
Maximaler Wirkungsgrad	97.0	%
Gewicht	25.0	kg
Spezifisches Leistungsgewicht	1.0	kW/kg
Durchmesser	280.0	mm
Länge	55	mm

Tabelle 37: Technische Daten einer permanentmagneterregten Außenläufer Synchronmaschinen mit konzentrierter Wicklung [90]

6.1.5 Transversalflussmaschinen (TFM)

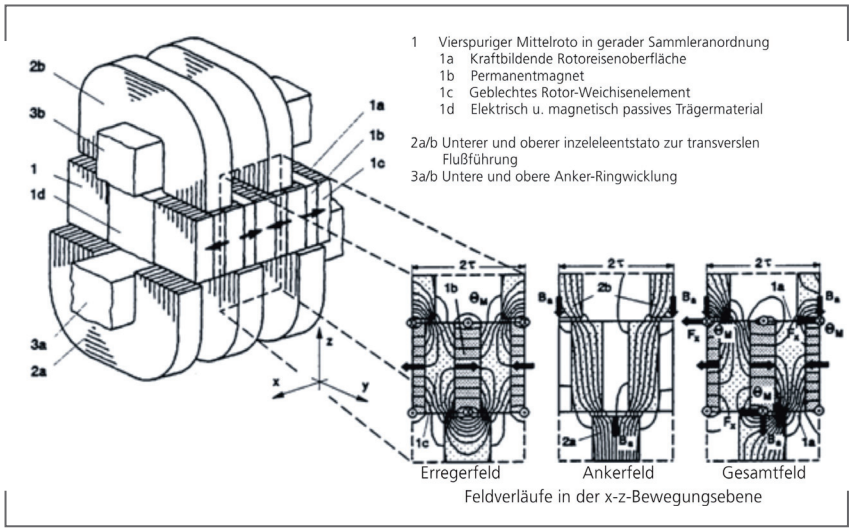


Abbildung 82: Transversalflussmaschine in Sammleranordnung [91]

Die Transversalflussmaschine ist eine Sonderbauform der permanentmagneterregten Synchronmaschine. Besonderes Kennzeichen der TFM ist die dreidimensionale Flussführung. Transversalflussmaschinen können mehrphasig ausgeführt werden, wobei insbesondere 2- oder 3-phasige Varianten zum Einsatz kommen. Die Wicklungen laufen in Umfangsrichtung, was die eigentliche Besonderheit darstellt. Die Wicklungen haben zudem keine Wickelköpfe mehr. Die Konkurrenzsituation hinsichtlich des Bauraums zwischen Nut (Spulenquerschnitt) und Zahn (Eisenquerschnitt) wird bei diesem Maschinentyp entflochten. Prinzipiell kann der Spulenquerschnitt und der Eisenquerschnitt in viel freieren Grenzen gewählt werden als bei so genannten Longitudinalflussmaschinen (ASM, PSM). Es können sehr kleine Polteilungen gewählt werden, womit eine hohe Drehmomentdichte erreicht werden kann. Durch Verbesserungen im Bereich der Soft Magnetic Composites (SMC) kann die Problematik der dreidimensionalen Flussführung elegant gelöst und die bis dahin hohe Herstellungskomplexität stark reduziert werden. Einhergehend sinken damit die Kosten, was diesen Maschinentyp zunehmend interessanter erscheinen lässt. Aktuell wird dieser Maschinentyp von der Firma Compact Dynamics in einem Wankel-RE-Konzept eingesetzt.

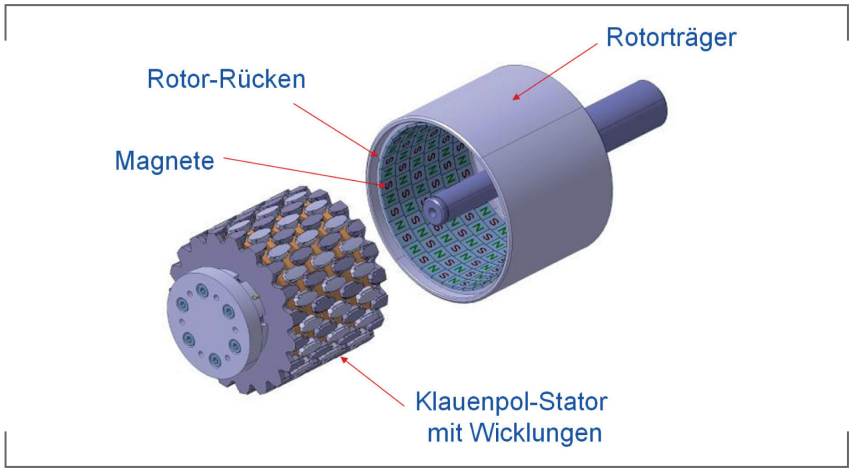


Abbildung 83: Dynax Transversalflussmaschine: Aufbau [92]

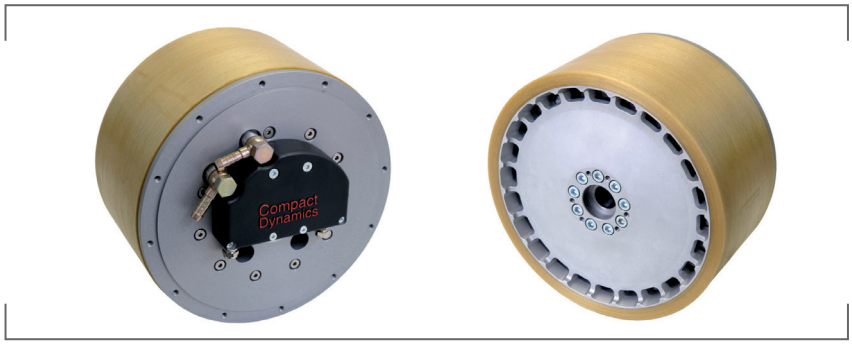


Abbildung 84: Dynax Transversalflussmaschine: Ansichten [92]

TFM		
Nennleistung	25.0	kW
Nenndrehmoment	85.0	Nm
Nenndrehzahl	2800.0	U/min
Maximalleistung	40.0	kW
Maximaldrehzahl	10000.0	U/min
Maximaler Wirkungsgrad (gewichtsoptimiert)	> 85.0	%
Maximaler Wirkungsgrad (wirkungsgradoptimiert)	> 90.0	%
Gewicht (gewichtsoptimiert)	9.0	kg
Spezifisches Leistungsgewicht	2.8	kW/kg
Durchmesser	209.0	mm
Länge	66	mm

Tabelle 38: Dynax Transversalflussmaschine: Technische Daten [92]

6.1.6 Permanentmagneterregte Linearmotoren (PLM)

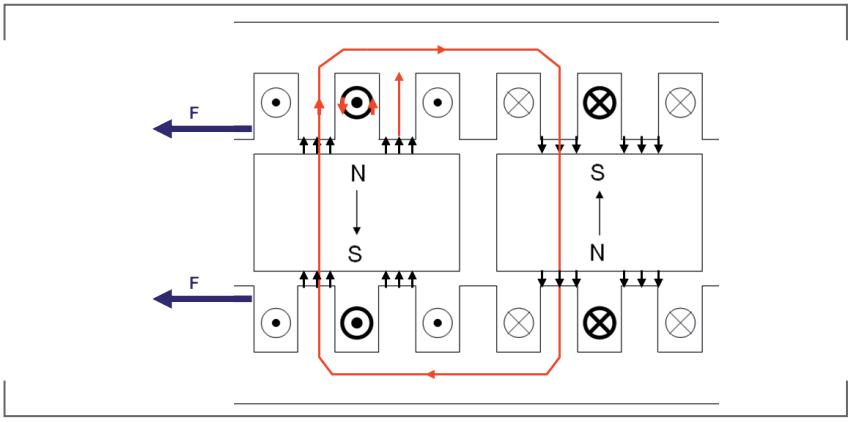


Abbildung 85: Lineargenerator in Doppelkammanordnung

Für die Energiewandlung in einem Freikolbenmotor wird ein elektrischer Lineargenerator benötigt. Prinzipiell können alle elektrischen Maschinentypen auch in Linearbauweise realisiert werden. Da aber praktisch nur Erfahrungen mit permanenterregten Linearmotoren vorliegen, wird auf die Betrachtung der anderen Maschinentypen verzichtet. In einem Freikolbensystem werden für den vollständigen Massenausgleich immer 2 Systeme und damit auch 2 Lineargeneratoren benötigt. In einer 20 kW Range Extender Applikation muss eine Lineargeneratoreinheit folglich 10 kW elektrisch bereitstellen können. Die Besonderheit in einer Freikolbenanwendung ist, dass im Gegensatz zu rotierenden Anwendung keine konstante Luftspaltgeschwindigkeit in einem stationären Betriebspunkt vorliegt, sondern dass das vollständige Geschwindigkeitsspektrum von Null bis Maximalgeschwindigkeit durchfahren wird. Die Systemfrequenz des Freikolbensystems wird damit zur Nennfrequenz des Lineargenerators. Zielstellung in einem Freikolbensystem ist ein minimales Läufergewicht, da die Systemfrequenz des abstrahierten Feder-Masse-Schwingers primär von der Läufermasse abhängt. Daraus ergibt sich die Forderung nach einer Doppelkammanordnung des Stators (Abbildung 85), um den Läuferrückschluss einzusparen. Der Läufer besteht dabei nur aus Permanentmagneten, die in einer GfK-Matrix gehalten werden. Die flächenbezogene Kraftdichte des Lineargenerators kann so Werte von 120 kN/m² bei gleichzeitig minimalem Läufergewicht erreichen. Die folgende Abbildung verdeutlicht den Aufbau einer läufereisenfreien Doppelkammanordnung:

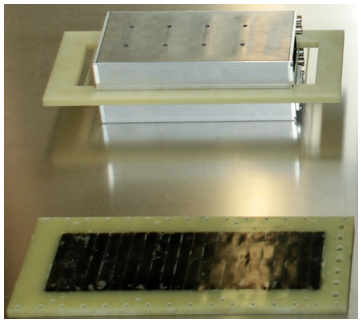


Abbildung 86: Lineargenerator des FKLG: Doppelstator mit Läuferleitermatrix aus GfK und fertiger Läufer mit Permanentmagneten

Mit dieser Anordnung wurden folgende Messwerte für eine Freikolbenlineargenerator-anwendung erzielt:

	Ist	Ziel	
Nennleistung	5.4	10.0	kW
Nennkraft	1810	1485	N
Nennfrequenz	20	50	Hz
Durchschnittsgeschwindigkeit bei Nennkraft	3.0	6.74	m/s
Hub	80.0	67.4	mm
Wirkungsgrad im Nennpunkt	91	93	%
Gewicht Statoren	14.4	7.2	kg
Gewicht Läufer	3.6	1.8	kg
Spezifisches Leistungsgewicht	0.3	1.1	kW/kg
Länge	267	145	mm
Breite	126	130	mm
Höhe	115	100	mm
Kraftdichte (bezogen auf die Maschinenfläche)	53.8	78.8	kN/m²
Aktive Länge	220	111.2	mm
Aktive Breite	100	111.2	mm
Kraftdichte (bezogen auf die aktive Fläche)	82.3	120.1	kN/m²

Tabelle 39: Ist- und Zielwerte der Lineargeneratorentwicklung des FKLG-RE-Projekts

Die Ist-Werte wurden bei 20 Hz Systemfrequenz gemessen. Dies entspricht dem Entwicklungsstand der Verbrennungstechnik der FKLG-Entwicklung. Die Zielgröße der Systemfrequenz liegt bei ca. 50 Hz in der ottomotorischen Anwendung. Die Wicklung kann die Nennkraft bis zu einer maximalen Geschwindigkeit von 12.7 m/s (ca. 50 Hz) erreichen.

Die verwendeten Lineargeneratoren sind dem Werkzeugmaschinenbereich entnommen. Diese sind nicht auf die Anforderung einer automobilen Anwendung hin optimiert. Es wird deshalb eine Steigerung der Kraftdichte von 50 % gegenüber der Werkzeugapplikation unterstellt.

6.2 Zusammenfassung der allgemeinen Eigenschaften verschiedener Maschinentypen

	GM	GRM	ASM	PSM	TFM	PLM
Wirkungsgrad	o	+	+	++	++	++
Leistungsgewicht	-	o	o	+	++	+
Herstellkosten	+	++	++	+	+	+
Skalierbarkeit (5-50 kW)	++	++	++	++	++	++
Packaging	o	+	+	+	+	++
NVH	++	-	++	++	+	++

Tabelle 40: Eigenschaften verschiedener Maschinentypen im Vergleich

Die Wirkungsgradwerte können in den einzelnen Kapiteln anhand der aufgeführten Beispiele nachgelesen werden. Es muss dabei betont werden, dass elektrische Maschinen immer ein Kompromiss zwischen Wirkungsgrad und Gewicht bzw. Bauraum eingehen. Die oben zitierte Transversalflussmaschine hat ein Leistungsgewicht von 2.8 kW/kg. In dieser Auslegung erreicht sie nicht die höchsten Wirkungsgrade. Wenn das Leistungsgewicht niedriger ausfallen darf, können auch Wirkungsgrade deutlich größer als 90 % erreicht werden. Die Tendenzaussage, dass permanenterregte Maschinen die höchsten Wirkungsgrade erreichen, bleibt aber generell bestehen.

Die Herstellkosten elektrischer Maschinen hängen von vielen Faktoren ab. Die permanenterregten Maschinen leiden unter dem Einfluss der hohen Preise für Neodym-Eisen-Bor. Geschaltete Reluktanzmaschinen und Asynchronmaschinen können hier Vorteile aufweisen. Ein wichtiger Kostenaspekt stellt auch die Wicklungsherstellung dar. Asynchronmaschinen mit verteilter Wicklung sind deutlich aufwendiger in der Statorherstellung als beispielsweise die konzentrierten Wicklungen von geschalteten Reluktanzmaschinen und permanentmagneterregten Synchronmaschinen, die inzwischen üblicherweise mit konzentrierten Wicklungen ausgestattet werden. Noch einfacher ist die Wicklung einer Transversalflussmaschine. Sie besteht aus 3 einfachen Ringwicklungen. Die Blechpakete verschiedener Maschinen unterscheiden sich nur wenig. Hier kommt die thermisch limitierte Kraftdichte (kN/m²) zum Tragen, die über die Materialmenge letztlich entscheidet. Die Transversalflussmaschine verwendet für die dreidimensionale Flussführung so genannte Soft Magnetic Compounds (SMC). Dies bestehen aus hochverdichteten, elektrisch isolierenden Eisenpartikeln. Das Herstellverfahren und die Isolationstechniken wurden stark verbessert, so dass sich hier der Durchbruch in der Fertigungstechnik abzeichnet und diesen Maschinentyp unter Seriengesichtspunkten sehr interessant erscheinen lässt.

Die folgende Grafik zeigt die Kostenziele, die seitens des Department of Energy (DoE) als Zielgrößen ausgegeben werden:

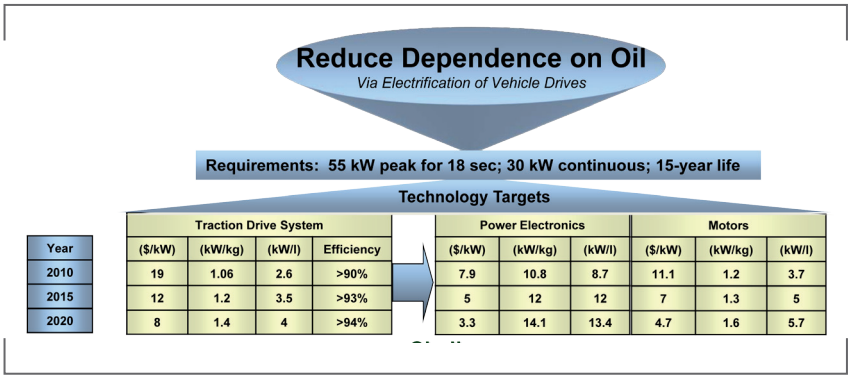


Abbildung 87: Kostenziele für elektrische Maschinen und der zugehörigen Leistungselektronik [93]

Die Kosten für elektrische Maschinen im Leistungsbereich von 30 kW sollen bis 2020 auf 4.7 $/kW (~ 3.3 €/kW) sinken. Dimensionale Unterschiede werden sich bei den unterschiedlichen Maschinentypen nicht ergeben. Die Spannbreite für Range Extender Generatoren wird zwischen 100 € und 200 € in der Großserie zum Liegen kommen. Bezüglich der Skalierbarkeit gibt es bei elektrischen Maschinen keine relevanten Grenzen. Elektrische Maschinen werden im Bereich von 1 W bis 1 GW gebaut. Im Bereich von 5-50 kW gibt es keinerlei Einschränkungen für die oben aufgeführten Maschinentypen.

Das Geräuschverhalten (relevanter Anteil der NVH-Eigenschaften) elektrischer Maschinen (ohne Umrichter) ist gegenüber den Verbrennungsgeräuschen vernachlässigbar. Das Augenmerk muss hier lediglich auf die geschaltete Reluktanzmaschine gelegt werden, da systembedingt die Zahnstruktur zur Geräuschanregung neigt. Dies muss im fertigen System betrachtet werden, wobei bei konstanter Drehzahl im Blockbetrieb eine sinnvolle Auslegung gewählt werden kann, die das Problem lösbar erscheinen lässt.

6.3 Zusammenfassung der Eignung verschiedener Maschinentypen in Bezug auf Range Extender Generatorapplikationen

	FKLG	GT	VM
GM		--	-
GRM		++	+
ASM		+	+
PSM		+	++
TFM		-	++
PLM	++		

Tabelle 41: Eignung elektrischer Maschinen in Bezug auf Range Extender Applikationen

Prinzipiell eignen sich alle Maschinentypen für die generatorische Energiewandlung. Lineargeneratoren kommen ausschließlich für die Freikolbenanwendung in Frage. Gleichstrommaschinen scheiden aufgrund der prinzipbedingten Nachteile (Kommutator) aus.

In der Gasturbinenanwendung (GT) eignet sich insbesondere die geschaltete Reluktanzmaschine, die aufgrund des einfachen Rotoraufbaus für Höchstdrehzahlanwendungen wie der Gasturbinenanwendung prädestiniert erscheinen. Prinzipiell lässt sich die Aufgabe auch mit 2-poligen Asynchronmaschinen und permanenterregten Synchronmaschinen (z. B. Capstone C30) erledigen. Transversalflussmaschinen scheiden aufgrund der hochpoligen Ausführung aus, da Drehzahlen im Bereich von 100.000 U/min die Eisenverluste extrem ansteigen lassen würden.

Im Bereich der verbrennungsmotorischen, rotatorischen Anwendung können alle Maschinentypen zur Anwendung kommen, wobei die permanenterregten Synchronmaschinen aufgrund der Wirkungsgradvorteile im Fokus stehen.

6.4 Kompetenzen am Standort Baden-Württemberg

Das Land Baden Württemberg ist mit zahlreichen, sehr innovativen Firmen im Bereich elektrischer Maschinen sehr gut aufgestellt. Auf diesem Gebiet sind sowohl große Player, wie zum Beispiel die Robert Bosch GmbH, ZF Friedrichshafen AG und SEW Eurodrive, als auch klein- und mittelständische Unternehmen tätig. Die Zulieferindustrie ist in Baden-Württemberg ebenfalls gut vertreten. In Bezug auf Magnetwerkstoffe können die Hersteller unter anderem auf die Kompetenzen und Produkte der Firma Magnetfabrik Schramberg zurückgreifen. Im Bereich der Forschungseinrichtungen sind im Land Baden-Württemberg die Universitäten in Stuttgart und Karlsruhe mit der Entwicklung von elektrischen Maschinen beschäftigt. Als außeruniversitäre Forschungseinrichtung arbeitet das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt ebenfalls an der Erforschung von Technologien, die zur Verbesserung von Generatoren beitragen.

7.

Leistungselektronik

Die Leistungselektronik in einem Range Extender-Konzept eines batterieelektrischen Fahrzeugs hat die Aufgabe, die in elektrischer Form zur Verfügung gestellte Energie umzuwandeln, so dass damit die Fahrzeugbatterie (Traktionsbatterie) nachgeladen, bzw. auch der elektrische Antrieb direkt versorgt werden kann. Je nach Range Extender-Konzept wird für diese Aufgabe ein unterschiedlicher Wandler benötigt.

Ziel dieses Arbeitspaketes der Studie ist die Betrachtung und Beschreibung möglicher Wandlerkonzepte. Es sollen des Weiteren folgende Kriterien beschrieben werden:

- Wirkungsgrad
- Packaging
- Gewicht
- Leistungsdichte
- Kosten
- Skalierbarkeit

7.1 Leistungselektronische Wandler für Range Extender Konzepte

Die Grafik (Abbildung 88) zeigt den Einsatz leistungselektronischer Wandler in den vier verschiedenen Range Extender Konzepten (A1 Brennstoffzelle, B1 Freikolbenmotor, B2 Hubkolben- und Wankelmotor, sowie B4 Gasturbine).

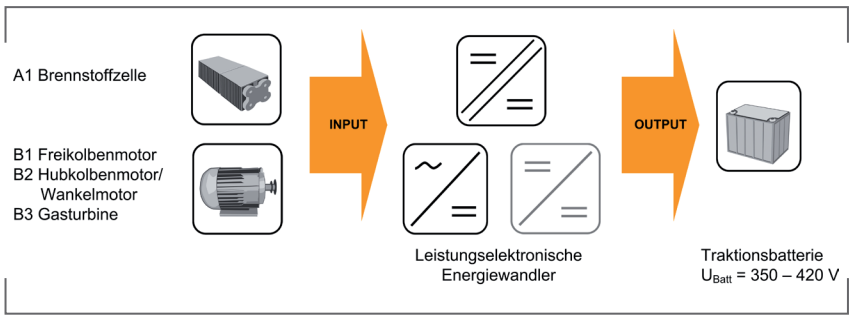


Abbildung 88: Leistungselektronische Komponenten

	A1 Brennstoff-zelle	B1 Freikolben-motor	B2 Hubkolben-motor; Wankelmotor	B3 Gasturbine
Mechanische Größen (Input)	-	f_N ~ 40-60 Hz	n = 2000-4000 min^{-1} bzw. 5000-6000 min^{-1} M = 40-80 Nm bzw. 30-50 Nm	n = 134000 min^{-1}
Elektrische Größen (Input)	U_{DC} =160-265 V I_{DCMAX} =125 A	p = ? f_N = ?	p = ? f_N = ?	p = 1 f_N=2266 Hz
		$\hat{U}_S = \frac{U_{DC}}{2} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}$ $\hat{U}_{AL} = \sqrt{3} \cdot \hat{U}_S < 350V$ nicht angeschlossener Sternpunkt des Generators; "Super-Sinus-Modulation"		
Elektrische Größen (Output)	U_{Blatt} = 350 - 420 V I_N = 47 - 57 A I_{ripple} < 0.02 · I_N			
Anforderungen Leistungs-elektronik	Galvanische Trennung zw. Eingang und Ausgang	motorischer und generatorischer Betrieb, Bereitstellung eines in Amplitude und Grund-schwingungsfrequenz veränderlichem 3~Spannungssystems, 4-Quadrantensteller		
Anforderungen Regelung	stromgeregelt, spannungs-begrenzt	Einstellung des Arbeitspunktes durch Stromregelung		
Wandler-topologie	DC/DC-Wand-ler mit galvani-scher Trennung	Drehstrombrücke B6-Brücke oder Neutral Point Clamped Inverter (NPC)		

Tabelle 42: Anforderungen an die leistungselektronischen Wandler

7.2 Brennstoffzelle A1

Die Brennstoffzelle im Einsatz als Range Extender liefert am Ausgang eine DC-Spannung, welche sich in Abhängigkeit des Laststromes verändert. Mit steigender Stromdichte entstehen in der Zelle unterschiedliche Verluste, die als „Überspannungen" bezeichnet werden (Abbildung 91).

Die Aufgabe des leistungselektronischen Wandlers ist nun die im gewünschten Arbeitspunkt anliegende Spannung der Brennstoffzelle auf das Niveau der Batteriespannung anzupassen und dabei den Leistungsfluss zu kontrollieren.

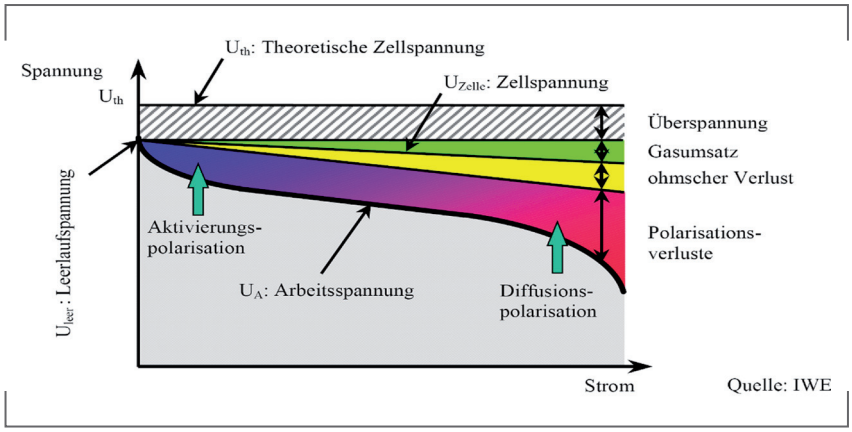


Abbildung 89: Strom-Spannungs-Kennlinie der PEM-Brennstoffzelle [95]

Eine weitere Anforderung insbesondere bei der Brennstoffzelle ist ein festes Spannungspotential der Zellen gegenüber dem Fahrzeugmassepotential. Da die Traktionsbatterie üblicherweise kein festes Potential gegenüber Fahrzeugmassepotential haben darf, ergibt sich daraus für den Wandler die Notwendigkeit einer galvanischen Trennung zwischen Brennstoffzelle und Traktionsbatterie.

7.2.1 Auswahl und Beschreibung des Wandlers

Um allen Anforderungen gerecht zu werden, bietet sich ein Gegentaktflusswandler an. Dieser Wandler besteht aus einem Eingangskondensator, einer H-Brücke, einem Transformator, einem Diodengleichrichter, einer Filterdrossel und einem Filterkondensator. Die Funktionsweise dieses Wandlers lässt sich anhand der Signalverläufe von Strom und Spannung erklären.

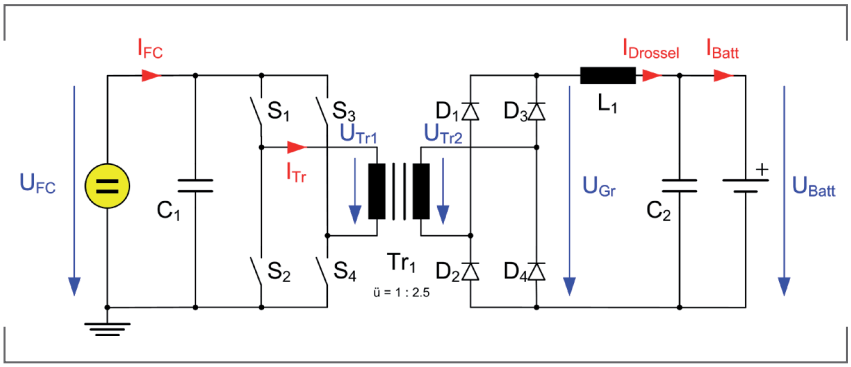


Abbildung 90: DC/DC-Wandler, Gegentaktflusswandler mit Vollbrückenansteuerung

Die am Eingang anliegende Gleichspannung U_{FC} der Brennstoffzelle wird über die H-Brücke pulsweitenmoduliert und mit abwechselnder Polarität an die Primärwicklung des Hochfrequenztrafos angelegt. Somit wird der Transformator während einer Periode in beide Richtungen magnetisiert. Auf der Sekundärseite liegt die, um den Übersetzungsfaktor ü, größere Spannung an. Diese Spannung wird mit Hilfe der Diodenbrücke gleichgerichtet. Die positive pulsförmige Spannung abzüglich der Traktionsbatteriespannung U_{Batt} fällt nun über der Filterdrossel ab. Die Filterdrossel integriert die Spannungsdifferenz zu einem Strom $I_{Drossel}$ auf. Während der Freilaufphase liegt die Batteriespannung über der Drossel und der Strom wird wieder abgebaut. Dadurch entsteht ein Drosselstrom mit der doppelten Frequenz von t_p. Das maximale Verhältnis von Eingangs- und Ausgangsspannung ist durch das Übersetzungsverhältnis des Transformators bestimmt. Die Schaltung hat durch die Filterdrossel ein „tiefsetzendes" Verhalten und somit lassen sich durch kleinere Aussteuergrade auch kleinere Verhältnisse zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung einstellen. Dadurch lässt sich die Spannung im Arbeitspunkt der Brennstoffzelle an die veränderliche Traktionsbatteriespannung anpassen und gleichzeitig der Leistung- bzw. der Stromfluss kontrollieren.

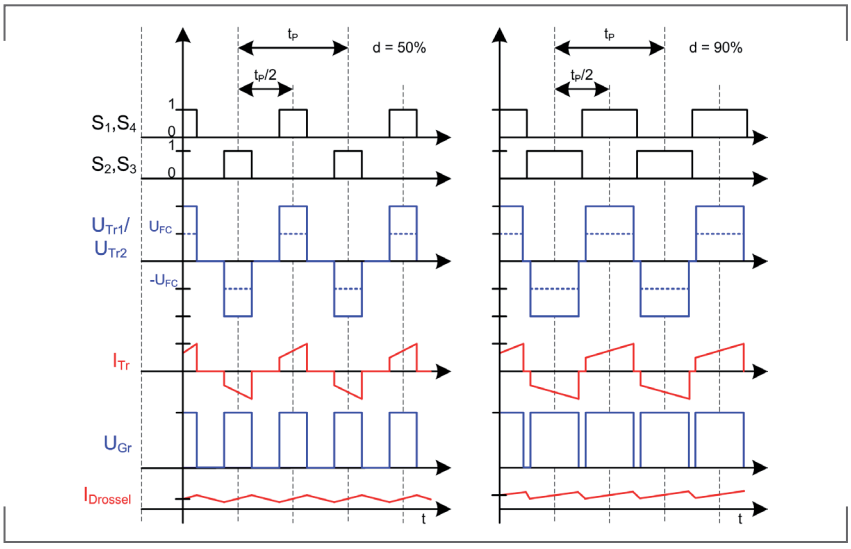


Abbildung 91: Zeitlicher Verlauf der Schaltsignale, Strom und Spannung

Es bietet sich an, bei größeren Leistungen mehrere Wandler parallel zu betreiben. Durch ein phasenverschobenes Takten der H-Brücke kann die Summe der Stromrippel verkleinert und somit die Kapazität des Filterkondensators minimiert werden. Durch diese Vorgehensweise lässt sich die Leistungsdichte (kW/l) beibehalten und Vorteile in der Auswahl standardisierter und handelsüblicher Komponenten erreichen. Ebenso verteilt sich die Verlustleistung auf mehrere Komponenten und lässt sich daher leichter abführen.

7.2.2 Abschätzung von Wirkungsgrad, Gewicht und Leistungsdichte

Die Dimensionierung der Bauteile ist stark von der verwendeten Taktfrequenz abhängig. Grundsätzlich führen höhere Taktfrequenzen zu kleineren induktiven Bauteile, jedoch ebenso zu höheren Schaltverlusten in den Halbleitern. Im Automobilbereich sind aus Platzgründen und aus Gründen des Packaging eine hohe Leistungsdichte und somit kleine induktive und kapazitive Komponenten gefordert. Taktfrequenzen im Bereich von ~50 kHz sind hier anzustreben.

Im Falle des Gegentaktflusswandlers werden durch die hohe Taktfrequenz der Transformator und die Drossel kleiner.

Um die Schaltverluste in den Schaltern zu verringern, bietet es sich an MOSFETs einzusetzen. MOSFETs lassen sich aufgrund ihres positiven Temperaturkoeffizienten einfach parallel verschalten. Durch die Erwärmung aufgrund der Verluste erhöht sich der Durchlasswiderstand des MOSFETs, wodurch sich der Stromfluss reduziert und parallele Schalter diesen übernehmen. Durch die Parallelschaltung eigenen sich diese Bauelemente auch für Schaltungen größerer Leistung. Im Bereich der Power MOSFETs mit hohen Sperrspannungen bietet z.B. die Firma Infineon unter dem Produktnamen CoolMOS™ verschiedene Schalter an.

Eine Möglichkeit besteht darin IGBTs als Schalter einzusetzen und als Gleichrichterdioden Siliziumcarbid-Dioden zu nutzen. Diese zeichnen sich vor allem durch ihre nicht vorhandene „Reverse Recovery"-Ladung und daher gutem Schaltverhalten aus.

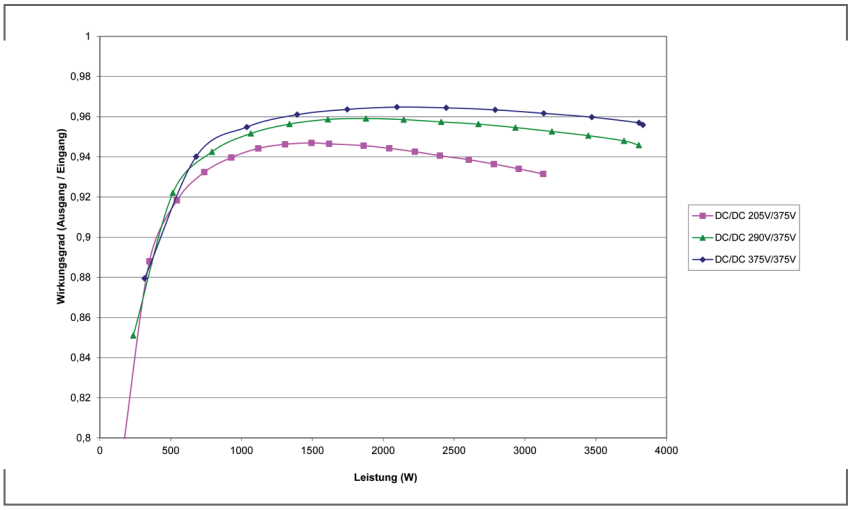


Abbildung 92: Wirkungsgradmessungen DC/DC-Wandler 3,5 kW; 16 kHz; IGBTs; Si-Dioden

Abbildung 92 zeigt den Wirkungsgradverlauf eines am Fraunhofer ISE entwickelten galvanisch getrennten DC/DC-Wandlers mit 3,5 kW Leistung. Die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Eingangsspannung (205 V, 290 V und 375 V) wird deutlich. Der Wandler hat den maximalen Wirkungsgrad bei der maximalen Eingangsspannung (Einschaltverhältnis d = 1, Trafo ü = 1) und der halben Nennleistung. Es wurde eine Taktfrequenz von 16 kHz verwendet und IGBTs als Schalter eingesetzt. Bei einer höheren Taktfrequenz von 50 kHz (Faktor 3) ist mit einem schlechteren Wirkungsgrad zu rechnen (ca. -5%).

Die für das Gewicht und Volumen entscheidenden Komponenten für diesen Wandler sind die Halbleiterschalter, HF-Transformator, Drossel, Kühlkörper und Filterkondensatoren. Für einen 20 kW Wandler lassen sich folgende Abschätzungen treffen:

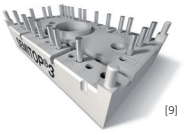
	Randbedingungen	**Abmessungen** LxBxH [mm] V [l]	**Gewicht** M [kg]	**Abbildungen**
Halbleiter	MOSFET od. IGBT, Halbleitermodul	55x31x15 mm³ 0,03 l	-	 [9]
HF Transformator	fs = 20-50 kHz	160x70x90 mm³ 1,0 l	~ 4 kg	 [10]
Drossel	fs = 40-100 kHz	0,3 l	~ 1 kg	-
Kühlkörper	Wasserkühlung Verluste ~ 1-2 kW	300x150x20 mm³ 0,9 l	~ 2 kg	 [11]
Filter-Kondensatoren	Folienkondensatoren	-	-	-
Platine, Elektronik, Gehäuse, Stecker, etc.	-	-	~ 2 kg	-
Gesamtaufbau		**300x200x100 mm³ 6 l**	**~ 10 kg**	
Leistungsdichte		**3,3 kW/l**	**2,2 kW/kg**	

Tabelle 43: Technische Daten eines 20 kW DC/DC-Wandler mit galvanischer Trennung

[9] Semikron: IGBT Modul, 600V, 75A
[10] CEFEM, Technologies, HF Transformator, 50 kHz, 20kW
[11] Fischer Elektronik, Flüssigkeitskühlkörper

7.2.3 Abschätzung der Kosten

Es gibt im Moment keine kommerziell erhältlichen DC/DC-Wandler mit galvanischer Trennung und den zuvor beschriebenen Anforderungen. Im Automobilbereich werden diese Wandler mit geringerer Leistung und für eine niedrigere Eingangsspannung eingesetzt. Eine Abschätzung der Kosten ist daher sehr schwierig und ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich.

7.2.4 Skalierbarkeit

Der zuvor beschriebene DC/DC-Wandler mit galvanischer Trennung lässt sich aufgrund des zum Einsatz kommenden HF-Transformators nicht beliebig skalieren. Das Problem stellt die Kühlung, bzw. Wärmeabfuhr der Verlustleistung aus dem Transformator dar. Durch die Parallelschaltung mehrerer Wandler lassen sich die Verluste auf mehrere Bauelemente aufteilen. Ein Vorteil der Parallelschaltung ist die Möglichkeit die einzelnen Wandler phasenverschoben zu takten. Dadurch lässt sich die Summe der einzelnen Stromripple reduzieren. Dies spart Filteraufwand in den Kondensatoren auf der Eingangs-, sowie Ausgangsseite des Wandlers.

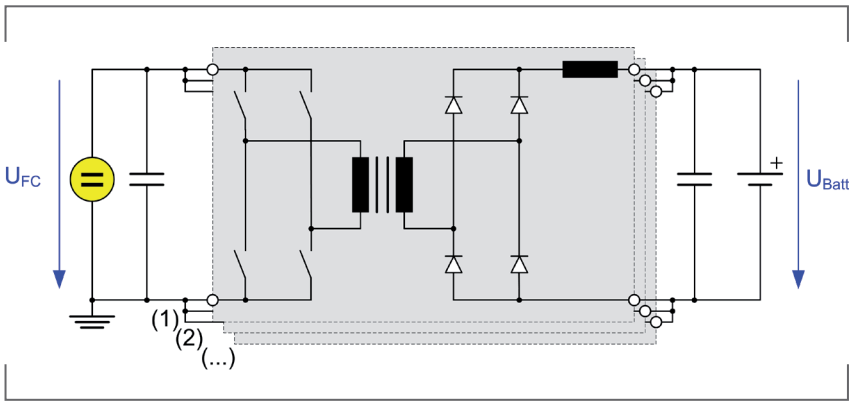


Abbildung 93: Multiphasen-Gegentaktflusswandler für größere Leistungen

Automotivetaugliche DC/DC-Wandler mit galvanischer Trennung sind, wie bereits zuvor erwähnt, lediglich im Prototypen- Kleinstserienstatus erhältlich. Ein Beispiel für diese Art von Wandler ist in Abbildung 94 zu sehen. Dieser Wandler erreicht mit der zuvor erwähnten Schaltungstopologie einen Wirkungsgrad von 92 %.

7.2.5 Packaging

Das Packaging ist vor allem durch die induktiven Bauteile wie HF-Transformator und Filterdrossel sowie durch den Kühlkörper definiert. Es ist jedoch möglich einen kompakten Aufbau zu realisieren. Im Gegensatz zu einem Antriebsumrichter, der keine induktiven Bauteile benötigt ist die Bauform jedoch quaderförmiger und nicht so flach.



Abbildung 94: Galvanisch trennender DC/DC-Wandler, 16 kW[12]

7.3 Freikolbenmotor B1, Hubkolbenmotor und Wankelmotor B2

Der Freikolbenmotor, Hubkolbenmotor und Wankelmotor stellen aus elektrischer Sicht vergleichbare Anforderungen an die Leistungselektronik.

Drehzahlen und Drehmoment sind ähnlich, und somit kann auch der Generator ähnlich aufgebaut werden. Aus Sicht des Range Extenders ist ein motorischer und generatorischer Betrieb notwendig. Die Leistungselektronik muss nicht nur Leistung in Richtung Batterie liefern, sondern auch den Freikolben-, Hubkolben bzw. Wankelmotor antreiben können. Dadurch ist der Einsatz von einfachen Gleichrichterschaltungen (gesteuert oder ungesteuert) nicht möglich.

Die Drehstrombrückenschaltung (kurz: B6-Brücke) ist ein vierquadranten-fähiger Steller und kann unabhängig von der Motor- bzw. Generatorspannung ein Drehstromsystem aufbauen, welches in der Lage, ist einen motorischen, sowie generatorischen Betrieb der Maschine zu gewährleisten. Vierquadrantenfähig bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Steller in der Lage ist eine Spannung beliebiger Polarität (Wechselspannung) und ein Strom beliebiger Polarität (Wechselstrom) am Ausgang des Stellers einzuprägen. Die Phasenlage von Strom und Spannung ist in dem Bereich cos Φ = -1 bis 1, kapazitiv und induktiv einstellbar.

7.3.1 Auswahl und Beschreibung des Wandlers

Die Drehstrombrückenschaltung kann mit Hilfe der Schalter (S_1 und S_2, Abbildung 96) entweder die Spannung $+U_{Batt}/2$ (S_1 ein) sowie $-U_{Batt}/2$ (S_2 ein) an die Phase A schalten. Die Maschineninduktivität integriert diese blockförmige Spannung abzüglich der Gegenspannung in einen sägezahnförmigen Strom. Die Einschaltdauer der Schalter wird üblicherweise mit Hilfe der Pulsweitenmodulation (PWM) bestimmt, dabei wird die im zeitlichen Mittel gewünschte Spannung mit einem Dreiecksignal verglichen. Das Ergebnis des Vergleichs ergibt direkt das Einschaltsignal für S_1 bzw. das Ausschaltsignal für S_2 und umgekehrt. Die Frequenz des Dreiecksignals wird in modernen pulsweitenmodulierten Umrichter um mindestens den Faktor 10 größer der gewünschten Grundschwingungsfrequenz gewählt **[94]**. Üblicherweise wird der Motor/Generator Drehmoment- oder Drehzahlgeregelt. Unterlagert befindet sich ein Stromregler welcher als Ausgang eine mittlere Brückenspannung bzw. das Einschaltverhältnis der Schalter

[12] Quelle: Prisma Ecotech; galvanisch trennender DC/DC-Wandler,
U_{in} = 37-80 V, U_{out} = 500-650 V, 16 kW, 92% Wirkungsgrad

ausgibt. Dies bedeutet, dass zur Regelung der Strom der einzelnen Phasen gemessen werden muss. Drehzahl und Drehmoment können durch ein im Regler hinterlegtes Modell bestimmt werden, ebenso können diese Ist-Größen auch durch Sensoren direkt gemessen werden.

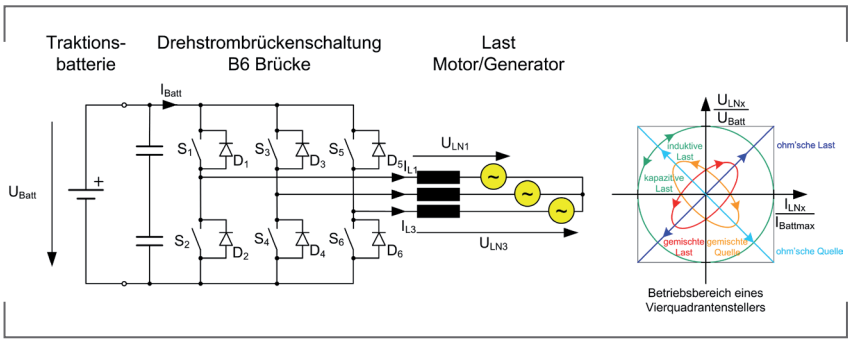


Abbildung 95: Drehstrombrückenschaltung mit Vierquadrantenbetriebsbereich

Eine Erweiterung der Drehstrombrückenschaltung stellt der Dreipunktwechselrichter dar. Durch die Anordnung von vier Schaltern in Reihe (S_1 bis S_4, Abbildung 96) und zweier zusätzlicher Dioden pro Phase lassen sich nicht nur die Spannungen $+U_{Batt}/2$ (S_1 und S_2 ein) sowie $-U_{Batt}/2$ (S_3 und S_4 ein) an die jeweilige Phase anlegen, sondern auch die Spannung 0 (S_2 und S_3 ein). Dadurch erhöhen sich die möglichen Schalterkombinationen für die gesamte Schaltung von $2^3 = 8$ auf $3^3 = 27$ Möglichkeiten. Die Schalterkombinationen sind in der Raumzeigerebene als rote Punkte dargestellt (Abbildung 96). Die Vorteile dieses zusätzlich schaltbaren Spannungsniveaus sind:

- kleinerer Stromrippel in der Motorwicklung, dadurch geringere Verluste
- kleinerer Spannungsunterschiede während eines Schaltvorgangs, dadurch geringere Verluste
- kleinere benötigte Sperrspannungen der Halbleiter, da zwei Schalter immer in Reihe sind
- kleinere Gleichtaktspannungen zwischen dem Sternpunkt der Maschine und dem DC-Kreis und dadurch besseres EMV-Verhalten und geringere Lageströme im Motor/Generator

Diese Vorteile werden durch einen höheren Bauteileaufwand und Ansteuerkomponenten erkauft. Im Bereich der leistungselektronischen Wandler für Photovoltaikanwendungen, hat sich in der Vergangenheit ein Trend hin zu Dreipunktwechselrichtern gezeigt. Im Elektromobilitätsbereich ist dieser noch nicht abzusehen. Der Vorteil der doppelten Spannungsfestigkeit, da zwei Schalter immer in Reihe geschaltet sind, ist im Elektromobilitätsbereich hinfällig, da lediglich kleinere DC-Spannungen von unter 600 V auftreten. Die anderen Vorteile werden durch den erhöhten Schaltungsaufwand (= geringere Leistungsdichte, höhere Kosten) aufgehoben.

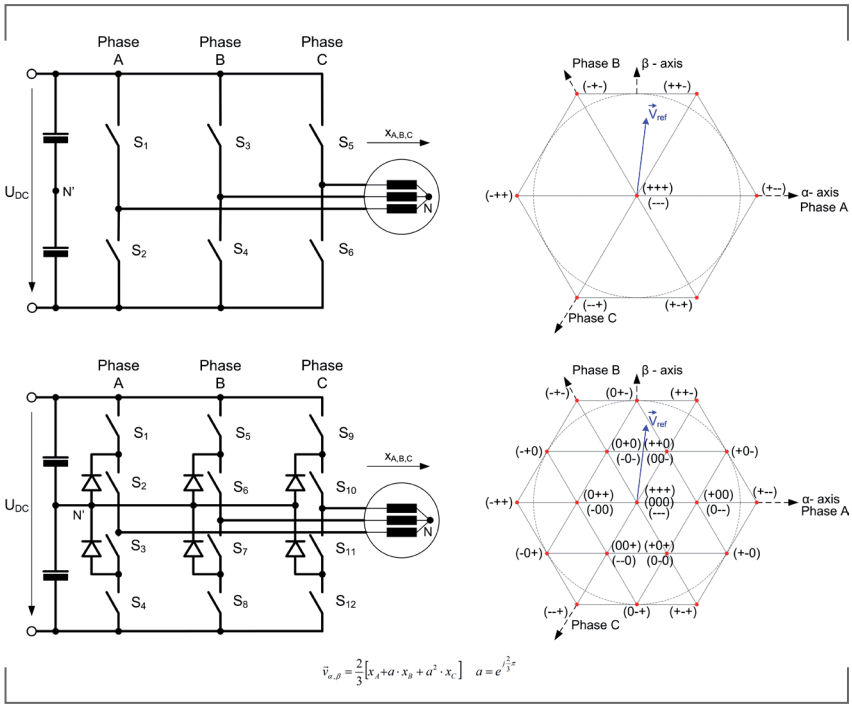


Abbildung 96: Vergleich Drehstrombrückenschaltung und Dreipunktwechselrichter, Schalterkombinationen in Raumzeigerdarstellung

In heutigen Drehstromantriebs- bzw. Generatorsystemen findet die Drehstrombrückenschaltung die häufigste Anwendung. Aufgrund der zuvor genannten Vorteile und der kommerziellen Verfügbarkeit und weiten Verbreitung wird in dieser Studie diese Schaltung betrachtet.

7.3.2 Abschätzung von Wirkungsgrad, Gewicht und Leistungsdichte

Der Wirkungsgrad der Drehstrombrückenschaltung als Antriebsumrichter liegt im Nennpunkt bereits heute im Bereich größer 97 % und ist daher schon recht gut **[98]**. Neue Schaltungstopologien, wie die zuvor erwähnte Dreipunktschaltung können den Wirkungsgrad erhöhen. Auch der Einsatz neuer Halbleiterschalter aus Materialien wie Gallium-Nitrid (GaN) und Siliziumcarbid (SiC) können zu einer Verminderung speziell von Schaltverlusten und dadurch zu höheren Wirkungsgraden führen. SiC-Halbleiter haben zum Beispiel aufgrund sehr großer Spannungsfestigkeiten sehr gute Eigenschaften bei hohen Taktfrequenzen.

Ein Vorteil von Umrichtern für Range Extender-Konzepte ist die Auslegung und Dimensionierung des Umrichters lediglich für den Nennpunkt. Im Gegensatz zu Antriebsumrichtern in einem Elektrofahrzeug muss kein Fahrzyklus zur Wirkungsgradoptimierung und Dimensionierung zu Grunde gelegt werden.

Zukünftige Entwicklungen im Bereich neuer Schaltungstopologie und neuer Halbleitermaterialien (SiC und GaN) können dazu führen, dass sich der Wirkungsgrad bis auf 98-99 % steigern lässt, was eine Halbierung der Verluste entsprechen würde.

Es werden im Moment Leistungsdichten von ca. 10,8 kW/kg (8,7 kW/l) erreicht **[96]**. Diese lassen sich in den nächsten 10 Jahren z. B. durch den Einsatz neuer Halbleiter- und Kondensatormaterialien (Keramik- statt Folienkondensatoren) noch steigern.

7.3.3 Abschätzung der Kosten

Die Materialkosten für leistungselektronische Komponenten im Elektrofahrzeug verteilen sich in etwa gleich auf die folgenden vier Bereiche

- Leistungshalbleiter (Schalter)
- Passive Bauelemente (Kondensatoren)
- Steuerung & Sensorik (Regler-IC, Strommessungen, usw.)
- Aufbautechnik & Kühlung (Platine und Kühlkörper)

Aus diesem Grund sollte eine Optimierung der Kosten stets unter der Betrachtung dieser vier verschiedenen Komponenten erfolgen.

Als Leistungshalbleiter werden momentan IGBTs mit Freilaufdioden, Leistungs-MOSFETs (z.B. COOLMOS™) sowie in Zukunft auch SiC-MOSFETs oder JFETs eingesetzt. Vor allem durch hohe Stückzahlen und dem Einsatz von Halbleiter-Modulen können die Kosten weiter gesenkt werden.

Bei den Passiven Bauelementen werden im Moment Folienkondensatoren als Zwischenkreispuffer verwendet. In Zukunft ist auch der Einsatz von Keramikkondensatoren denkbar, welche sich durch einen größeren zulässigen Temperaturbereich auszeichnen. Die Kosten für Antriebsumrichter (30 kW Dauerleistung) liegen momentan bei 7,9 $/kW und sollen bis 2015 auf 5 $/kW gesenkt werden **[96]**.

7.3.4 Skalierbarkeit

Antriebsumrichter lassen sich hervorragend im Leistungsbereich von wenigen kW bis hin zu 100 kW skalieren. Halbleitermodule, Kondensatoren, sowie Kühlflächen lassen sich der jeweiligen Leistung anpassen und sind in verschiedenen leistungsbezogenen Ausführungen am Markt erhältlich. Sonstige periphere Elektronik wie z.B. Spannungsversorgungen, Strommessungen, Controller usw. bleiben für den genannten Leistungsbereich in Bezug auf Preise und Baugröße gleich. D.h. für größere Umrichterleistungen (>20 kW) sinken die leistungsspezifischen Kosten und die Leistungsdichte nimmt zu.



Abbildung 97: Beispiele für Antriebsumrichter der Firmen Brusa[13], Continental AG[14], Fräger Gruppe[15] und Semikron[16]

Auf dem Markt sind verschiedene, automotivtaugliche Umrichtersysteme vorhanden. Als Auswahl sind hierzu jeweils ein Umrichter der Firma Brusa, der Continental AG, Fräger Gruppe und Semikron abgebildet. (Abbildung 97).

7.3.5 Packaging

Üblicherweise werden Motor/Generator und Leistungselektronik in verschiedenen Gehäusen untergebracht. Ein Grund für diese Vorgehensweise sind die unterschiedlichen Anforderungen in Bezug auf Kühlung, Vibrationsfestigkeit und Bauraum. Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie in Erlangen untersuchte in einem Projekt die Möglichkeit, beide Komponenten in einem Gehäuse zu vereinigen. Vorteile sind hier vor allem die geringen Leitungslängen zwischen Umrichter und Motor. Dadurch lassen sich parasitäre Kapazitäten in den Leitungen vermeiden. Diese Kapazitäten können aufgrund hoher Schaltflanken (du/dt) zu EMV-Problemen führen. Des Weiteren kann mit einer Kostenersparnis bei Gehäuse und Kühlkomponenten gerechnet werden.

[13] Quelle Brusa: Antriebsumrichter, DMC5, 120-450 V, 20 kW continuous power, 97 % efficiency, 88x360x470mm, 6.5 kg, 24 kHz Taktfrequenz
[14] Quelle Continental AG: Antriebsumrichter mit integriertem DC/DC-Wandler, EOF2-2, P_{1h} = 52 kW, 650 V, 400 A
[15] Quelle Fräger Gruppe: Antriebsumrichter, FMC3, 65 kW continuous power,
[16] Quelle Semikron: Skai2IGBT System, 600V, bis zu 150 kVA

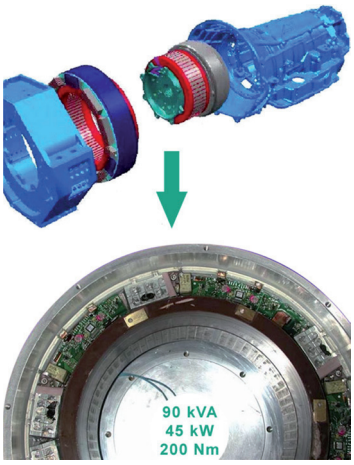


Abbildung 98: Integrierter Umrichtermotor für KFZ-Hybridantrieb, Fraunhofer IISB

Bei getrennter Ausführung des Antriebsumrichters und elektrischer Maschine kann der Umrichter als flacher Stackaufbau realisiert werden. Kühlkörper, Halbleitermodul, Kondensator, sowie Treiber und Regelungs-IC sind in verschiedenen Lagen übereinander gestapelt.

7.4 Gasturbine B3

Die Gasturbine stellt, aufgrund der hohen Drehzahlen erhöhte Anforderungen an die Leistungselektronik. Als Grundschaltung kann hier ebenso die Drehstrombrückenschaltung verwendet werden. Die höhere Nenndrehzahl führt, da sich die Polpaarzahl nicht beliebig verringern lässt, zu einer höheren elektrische Frequenz des Generators. Dies erfordert eine höhere Schaltfrequenz des Umrichters, damit das Verhältnis zwischen Grundschwinungsfrequenz und Taktfrequenz gleich bleibt.

7.4.1 Auswahl und Beschreibung des Wandlers

Um die notwendige Schaltfrequenz abzuschätzen, lassen sich folgende Annahmen treffen:

Drehzahl	$n_{Gasturbine}$	= 136000 min^{-1}	
Polpaarzahl	p	= 1	
Grundschwingungsfreq.	f_N	= (n / 60 [sec/min]) · p	= 2266 Hz
Taktfrequenz	f_s	~ 10 · f_N	= 22,6 kHz

Durch den Einsatz von Schaltfrequenzen >20 kHz nehmen die Schaltverluste bei IGBTs im Vergleich zu den Durchlassverlusten sehr stark zu. Dies führt zu höheren Gesamtverlusten und zu einer großen Wärmeentwicklung im Halbleitermodul und im Chip, welche unter Umständen nicht mehr abgeführt werden können.

Als Alternative bieten sich die bereits erwähnten SiC-MOSFETs an. Die Kosten für diese Art von Halbleiter sind im Moment noch sehr hoch. Dies liegt vor allem an der geringen Anzahl von Anbietern und auch der dadurch bedingt geringen Nachfrage auf diesem Markt. Daher ist der Einsatz von SiC-MOSFETs erst bei einem vorhandenen Massenmarkt und mit IGBTs vergleichbaren Kosten sinnvoll.

Die Firma Cree bietet laut Pressemitteilung vom 17.01.2011 als erster Hersteller kommerziell erhältliche SiC-Leistungsmosfets mit einer Sperrspannung von 1200 V und 80 m $R_{DS(ON)}$-Widerstand an.

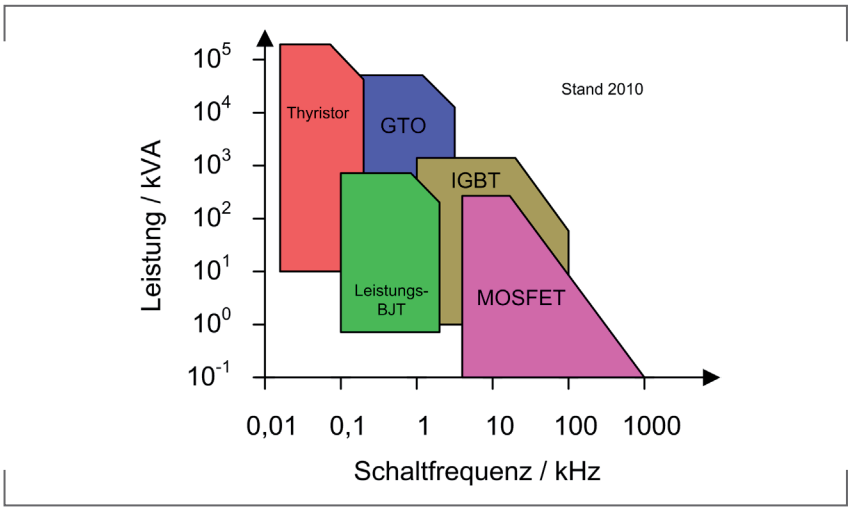


Abbildung 99: Einsatzbereich leistungselektronischer Schalter [97]

7.4.2 Abschätzung von Wirkungsgrad, Gewicht und Leistungsdichte

Durch die hohen Taktfrequenzen nehmen die Schaltverluste zu. Dadurch ist mit einem geringfügig schlechteren Wirkungsgrad zu rechnen. Das Gewicht und die Leistungsdichte sind von der Taktfrequenz unabhängig, da keine induktiven Bauelemente im Umrichter enthalten sind.

7.4.3 Skalierbarkeit

Je höher die Nennleistung der Gasturbine, desto geringer ist ihre Nenndrehzahl. So wird zum Beispiel bei einer Leistung von 100 kW_{el} eine Drehzahl von lediglich 60000 min^{-1} verwendet. Dadurch ist es möglich, bei größeren Leistungen die Taktfrequenz zu reduzieren, was sich positiv auf den Wirkungsgrad auswirkt.

7.5 Kompetenzen am Standort Baden-Württemberg

Der Standort Baden-Württemberg ist im Bereich Leistungselektronischer Wandler für Automotiv-Anwendungen durch ein größeres Unternehmen, sowie mehrere kleinere mittelständische Unternehmen gekennzeichnet.

Mit dem Hauptsitz der Robert Bosch GmbH in Stuttgart und verschiedenen weiteren Standorten im Land, ist ein größerer Hersteller stark in Baden-Württemberg vertreten. Die Robert Bosch GmbH investiert nach eigenen Angaben ca. 400 Mio. Euro jährlich in Entwicklungen für die Elektrifizierung des Antriebs.

Die Continental AG als zweites großes Unternehmen auf diesem Gebiet hat in Baden-Württemberg im Bereich „Division Powertrain“ keine nennenswerten Standorte. Als kleinere mittelständische Unternehmen in diesem Bereich sind zu erwähnen:

- Brose-SEW Elektromobilitäts GmbH & Co KG, Bruchsal
  Antriebs- und Ladesysteme im Elektromobilitätsbereich
- KACO new energy GmbH, Neckarsulm
  Solarwechselrichter, Umrichter für Bahnstromanlagen; in Zukunft Leistungselektronik im Automotiv-Bereich

Mit dem neu eingerichteten Lehrstuhl „Hybridelektrische Fahrzeuge“ KIT (Elektrotechnisches Institut) ist das Thema Elektromobilität in Baden-Württemberg auch im Universitäts- bzw. Forschungsbereich angekommen.

Es gilt vorhandene Kompetenzen im Bereich automotive-tauglicher leistungselektronischer Wandler in Baden-Württemberg auszubauen. Bisheriger Fokus der Industrie und Hersteller in Baden-Württemberg liegt auf leistungselektronischen Wandlern für Industrieantriebe, Umrichter für mobile Stromversorgung (Bahnbereich) sowie Niedervoltanwendungen.

Die Elektrifizierung des Antriebsstranges und die Bereitstellung elektrischer Energie durch Range Extender-Konzepte im Fahrzeug erfordern unterschiedlichste leistungselektronische Wandler, welche für die Anwendung im Fahrzeug zusätzlichen Anforderungen genügen müssen. Vor allem die Forderungen nach höchster Leistungsdichte und hohem Wirkungsgrad bei geringen Leistungskosten stellt hier eine neue Schwierigkeit dar.

Die zusätzlichen härteren Ansprüche wie Temperaturbeständigkeit, Vibrationsfestigkeit aller Komponenten und härteren Umgebungsbedingen, wie Schutz vor Schmutz und Wasser, stellt die Leistungselektronik vor neue Herausforderungen.

7.6 Zusammenfassung „Leistungselektronische Wandler“

Es konnte für jedes Range Extender Konzept ein entsprechender leistungselektronischer Wandler ausgewählt werden. Baugrößen, Leistungsdichten und der damit verbundene Wirkungsgrad wurden beschrieben und diskutiert.

Die Skalierbarkeit stellt bei dem Konzept A1 „Brennstoffzelle“ eine Besonderheit dar, da hier durch die Parallelschaltung mehrerer Wandler höhere Leistungen realisiert werden können, wodurch jedoch die Leistungsdichte gleich bleibt.

Bei den anderen Konzepten lassen sich die verwendeten Halbleitermodule und sonstige Komponenten einfacher skalieren und somit die Leistungsdichte sogar noch erhöhen. Galvanisch isolierte DC/DC-Wandler, welche die für das Range Extender-Konzept A1 beschriebenen Anforderungen erfüllen, sind am Markt nicht erhältlich. Diese Wandler werden lediglich als Prototypen oder speziell für Forschungszwecke in Kleinstserien entwickelt und betrieben.

Antriebsumrichter (Drehstrombrückenschaltungen) für den Vier-Quadranten-Betrieb (Generator/Motor) sind zahlreich vorhanden und im Zuge der Elektrifizierung des Antriebstranges von mehreren Herstellern auch für den Automotivbereich entwickelt. Die vorhandene Technik ist ausgereift, wobei es noch Forschungs- und Entwicklungsaufgaben zum Einsatz neuer Halbleitermaterialien, höheren Taktfrequenzen und zur Vermeidung von EMV-Problemen gibt.

	A1 Brennstoffzelle	B1 Freikolben-motor	B2 Hubkolbenmotor Wankelmotor	B3 Gasturbine
Wandlertyp	Galvanisch isolierter DC/DC-Wandler	Drehstrombrückeschaltung B6		
Technologie	HF-Trafo, IGBT/MOSFET SiC-Dioden	IGBTs, (antiparallele SiC-Dioden)		
Taktfrequenz	f_s ~ 20-50 kHz	f_s ~ 10-20 kHz		f_s > 20 kHz
Kosten	-	7,9 $/kW (2010) – 5 $/kW (2015)		
Wirkungsgrad	92-97% taktfrequenzabh.	97% - 98%		97%
Leistungsdichte	~3,3 kW/l 2,2 kW/kg @50 kHz	8,7 kW/l 10,8 kW/kg		
Skalierbarkeit (1 kW - 100 kW)	Parallelschaltung der Wandlerstufen	✓	✓	✓
Packaging	Stark abhängig von HF-Trafo und Speicherdrossel; quaderförmige Abmessungen	?	Integration in Motorgehäuse möglich (Demonstrator) Kompakter Aufbau möglich; flache, quaderförmige Abmessungen	

Tabelle 44: Zusammenfassung leistungselektronische Wandler

8.

Bewertung System

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die einzelnen Technologien dargestellt und im Hinblick auf die eingangs erwähnten Kenngrößen untersucht. Die Brennstoffzelle, ein chemisch-elektrischer Energiewandler wurde in Kapitel 3 beschrieben. In den Kapiteln 2, 4 und 5 wurden die chemisch-mechanischen Energiewandler Freikolbenmotor, Hubkolbenmotor, Wankelmotor und Gasturbine dargestellt, wobei der Hubkolben- und Wankelmotor zusammengefasst wurden. Kapitel 6 behandelt die elektrischen Maschinen, die für die chemisch-mechanischen Energiewandler zur Erzeugung von elektrischer Energie benötigt werden. Alle Energiewandler – auch die Brennstoffzelle – benötigen darüber hinaus eine Leistungselektronik. Diese ist Gegenstand von Kapitel 7.

In diesem abschließenden Kapitel wird eine komparative Bewertung der unterschiedlichen Technologien vorgenommen. Dabei werden alle verfügbaren Informationen berücksichtigt. Die Ergebnisse werden in Form von Bewertungsmatrizen zusammengestellt (Tabelle 45 bis Tabelle 47). Tabelle 45 zeigt die Bewertungen für die Brennstoffzelle und die chemisch-mechanischen Energiewandler. In Tabelle 46 ist die Bewertungsmatrix für die elektrischen Maschinen dargestellt. Eine elektrische Maschine wird für den Freikolbenmotor, den Hubkolbenmotor, den Wankelmotor und die Gasturbine benötigt. Dabei unterscheiden sich die Anforderungen an die elektrische Maschine abhängig von dem chemisch-mechanischen Energiewandler. So wird beispielsweise für den Freikolbenmotor eine lineare elektrische Maschine benötigt, wobei bei den übrigen Technologien eine rotierende Maschine zum Einsatz kommt. In Tabelle 47 sind die Bewertungen für die Leistungselektronik dargestellt.

Für den Gesamtwirkungsgrad eines Range Extender Systems ergibt sich nach obiger Aufteilung der Gesamtsystemwirkungsgrad η_{CE}, definiert als Verhältnis von elektrischer Energie nach der Leistungselektronik zu zugeführter chemischer Energie, zu

$$\eta_{CE} = \eta_{CM} \cdot \eta_{ME} \cdot \eta_{EE} \tag{15}$$

wobei η_{CM} den Wirkungsgrad des chemisch-mechanischen Energiewandlers, η_{ME} den Wirkungsgrad des mechanisch-elektrischen Energiewandlers und η_{EE} den Wirkungsgrad der Leistungselektronik beschreibt.

Die Frage, ob ein Range Extender in einem optimalen Betriebspunkt (Blockbetrieb) oder über einen weiten Betriebsbereich betrieben werden soll, ist nicht pauschal zu beantworten und wird auch in Zukunft von der Betriebsstrategie bzw. der Fahrzeugklasse abhängen. Aus diesem Grund wird in dieser Studie keine Empfehlung gegeben; vielmehr werden bei der Betrachtung der Range Extender Technologien die unterschiedlichen Betriebsstrategien berücksichtigt.

8.1 Vergleich der chemisch-mechanischen Energiewandler und der Brennstoffzelle

	Brennstoffzelle (PEFC)	Freikolbenmotor	Hubkolbenmotor 4-Takt Diesel	Hubkolbenmotor 2-Takt Otto	Hubkolbenmotor 4-Takt Otto	Wankelmotor	Gasturbine mit Rekuperator (eta = 90%)	Gasturbine ohne Rekuperator
Effektiver Wirkungsgrad mit allen Nebenaggregaten Bestpunkt 20 kW	58% (SdT) 70% (Potenzial)	37% (Potenzial)	36% (SdT) 38% (Potenzial)	25% (SdT) 30% (Potenzial)	30% (SdT) 32% (Potenzial)	28% (SdT) 29% (Potenzial)	28% (SdT) 37% (Potenzial) metallisch	15% (SdT)
Effektiver Wirkungsgrad mit allen Nebenaggregaten 5 kW - 20 kW	56-70% (Potenzial)	35-37% (Potenzial)	30-38% (Potenzial)	21-30% (Potenzial)	22-32% (Potenzial)	20-29% (Potenzial)	22-28% (SdT) 29-37% (Potential)	7-15% (SdT)
NVH	++	o	--	-	-	o	+	+
Packaging Variabilität	++	-	-	-	-	-	o	o
Leistungsdichte gravimetrisch [W/kg]	900	750	220 [17]	1000	830	1030	400	750
Leistungsdichte volumetrisch [W/Liter]	1100	510	160 [17]	490	390	2143	100	520
Herstellkosten	--	+	o	++	+	+	o	++
Rohemissionen Schadstoffe	++	-	--	-	o	-	++	++
Emissionen nach Abgasnachbehandlung Schadstoffe	entfällt	+	+	+	+	+	entfällt	entfällt
Kraftstoffflexibilität (technologisch realisierbar)	o	+	o	+	+	+	++	++
Vielstofffähigkeit (im Betrieb realisierbar)	--	+	o	+	+	+	++	++
Skalierbarkeit	++	++	++	++	++	++	++	++
Dynamik	Kaltstart < 30s Warmstart < 3s Lastsprung < 1s	Kaltstart < 1s Warmstart < 1s Lastsprung < 1s	Kaltstart < 1s Warmstart < 1s Lastsprung < 1s	Kaltstart < 1s Warmstart < 1s Lastsprung < 1s	Kaltstart < 1s Warmstart < 1s Lastsprung < 1s	Kaltstart < 1s Warmstart < 1s Lastsprung < 1s	Kaltstart < 90s Warmstart <20s Lastsprung <10s	Kaltstart < 15s Warmstart < 12s Lastsprung < 5s

Tabelle 45: Bewertungsmatrix für die chemisch-mechanischen Energiewandler und die Brennstoffzelle

[17] Zu der geringen Leistungsdichte beim Dieselmotorkonzept ist zu beachten, dass in dieser Studie existierende Motoren betrachtet werden, deren Motorleistung in einem niedrigen Nennleistungsbereich (ca. 20 kW) liegen. Diese Aggregate sind unter anderem für den stationären Einsatz kostengünstig konzipiert und verfügen teilweise nicht über eine Aufladung oder direkte Einspritzung, weshalb sie auch nicht das technologisch hochentwickelte Niveau und die entsprechenden hohen Leistungsdichten (ca. 700 bis 900 W/kg) von aktuell in Fahrzeugen verbauten Dieselmotoren erreichen.

Effektiver Wirkungsgrad
Bei der Betrachtung des Wirkungsgrads wird eine Unterscheidung zwischen Wirkungsgrad im besten Punkt sowie Wirkungsgrad über einen bestimmten Betriebsbereich getroffen. Zusätzlich wird eine Unterscheidung getroffen zwischen dem Stand der Technik (SdT) und dem Potenzial, welches für die Technologie ermittelt wurde. Anhand dieser Unterscheidung wird auch deutlich, welchen Entwicklungsstand die jeweiligen Technologien aufweisen.

Betrachtet man den Stand der Technik, dann weist die Brennstoffzelle den besten Wirkungsgrad auf. Mit einem Wirkungsgrad von 36 % folgt der Dieselmotor. Es folgen der 4-Takt Ottomotor, der Wankelmotor und die Gasturbine mit Rekuperator sowie der 2-Takt Ottomotor und die Gasturbine ohne Rekuperator. Beim Freikolbenmotor kann kein Stand der Technik angegeben werden, da bisher kein lauffähiger Prototyp zur Verfügung steht.

Hinsichtlich des Wirkungsgrad-Potenzials ergibt sich ein ähnliches Bild, allerdings ist hier das große Potenzial des Freikolbenmotors und der Gasturbine mit Rekuperator hervorzuheben. Zwar bleibt die Brennstoffzelle unangefochten, jedoch liegen der Otto-Freikolbenmotor, die Gasturbine mit Rekuperator und der Dieselmotor in einem ähnlichen Bereich. Beim 2-Takt Otto-Motor wird ein Optimierungspotenzial von 5 % Punkten gesehen, so dass ein Wirkungsgrad von 30 % erreicht werden kann.

Im Hinblick auf einen Betriebsbereich von 25 % bis 100 % Last fällt die geringe Spreizung beim Freikolbenmotor auf, der über den gesamten Betriebsbereich einen relativ konstanten Wirkungsgrad aufweist. Aufgrund der variablen Verdichtung ist es möglich, auch im Teillastbereich einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Allerdings ist einschränkend zu erwähnen, dass diese Wirkungsgrade eine reine Potenzialangabe basierend auf Simulationsergebnissen darstellen und bisher nicht nachgewiesen werden konnten. Bei den übrigen Technologien liegt der Wirkungsgrad in den ungünstigeren Lastpunkten ca. 20 bis 30 % unterhalb des Maximalwertes.

NVH
Das Geräusch- und Vibrationsverhalten spielt für einen Range Extender eine wichtige Rolle, da das Zuschalten des Range Extenders vom Fahrer möglichst nicht wahrgenommen werden sollte bzw. nur eine geringe Veränderung eintreten soll. Die Brennstoffzelle zeichnet sich durch sehr gutes NVH-Verhalten aus, da der Stack geräusch- und vibrationslos funktioniert. Einzig die Nebenaggregate wie Luftverdichter verursachen Geräusche, welche allerdings sehr niedrig sind bzw. gut gedämpft werden können. Ein positives NVH-Verhalten zeigt aufgrund der kontinuierlichen Verbrennung und der rotatorischen Bewegung auch die Gasturbine, deren hochfrequenten Geräuschemissionen gut gedämmt werden können. Weiterhin verfügt die Gasturbine nur über rotierende Bauteile, deren hochfrequente Lärmemissionen gut dämmbar sind. Als neutral werden die Eigenschaften des Freikolbenmotors und des Wankelmotors eingestuft. Der Freikolbenmotor weist bei zwei synchronisiert gegenläufigen Aggregaten keinerlei freie Massenkräfte und -momente auf, so dass für das NVH-Verhalten die Geräuschentwicklung des Verbrennungsprozesses maßgebend ist, die mit der in einem Otto-Hubkolbenmotor vergleichbar ist. Der Wankelmotor weist durch den Rotationskolben ebenfalls ein besseres NVH-Verhalten als herkömmliche Hubkolbenmotoren auf. Bei den Hubkolbenmotoren wird eine Abstufung zwischen Otto-Prozess und Diesel-Prozess vorgenommen.

Leistungsdichte gravimetrisch
Die Leistungsdichte wird bei der Bewertung in eine gravimetrische und volumetrische Leistungsdichte unterteilt. Bei der gravimetrischen Leistungsdichte wird die Leistung ins Verhältnis zur Masse gesetzt, bei der volumetrischen Leistungsdichte wird die Leistung auf das benötigte Volumen bezogen.

Bei der gravimetrsichen Leistungsdichte erzielen der Wankelmotor mit 1030 W/kg, der 2-Takt Otto Hubkolbenmotor mit 1000 W/kg und die Brennstoffzelle mit 900 W/kg die besten Werte. 4-Takt Otto Hubkolbenmotor, Freikolbenmotor und Gasturbine ohne Rekuperator folgen im Bereich zwischen 750 und 830 W/kg. Mit großem Abstand folgt die Gasturbine mit Rekuperator (400 W/kg) sowie der 4-Takt Dieselmotor (220 W/kg).

Leistungsdichte volumetrisch
Auch bei der volumetrischen Leistungsdichte, dem Verhältnis von Leistung und Volumen, wurden große Unterschiede ermittelt. Der Wankelmotor mit über 2000 W/l erzielt eine sehr hohe volumetrische Leistungsdichte. Die Brennstoffzelle erreicht Werte von 1100 W/l. Gasturbine ohne Rekuperator, Freikolbenmotor und 2-Takt Otto Hubkolbenmotor folgen im Bereich von 490 bis 550 W/l. Der Dieselmotor und die Gasturbine mit Rekuperator weisen mit 160 bzw. 100 W/ die niedrigste volumetrische Leistungsdichte auf. Für den Dieselmotor gilt hier analog zur volumetrischen Leisungsdichte, dass verfügbare Motoren betrachtet werden, die diesbezüglich nicht optimiert sind.

Packaging Variabilität
Neben den quantifizierbaren Leistungsdichten ist für einen Range Extender auch relevant, wie das Packaging des Systems verändert und somit den spezifischen Randbedingungen unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte angepasst werden kann. Aus diesem Grund wurde die Kenngröße ‚Packaging Variabilität' eingeführt, die dies berücksichtigen soll.

Eine herausragende Variabilität weist die Brennstoffzelle auf, da die Nebenaggregate annähernd beliebig um den Stack angeordnet werden können. Somit können unterschiedlichste Anordnungen realisiert werden. Neutral wurde die Eigenschaft bei den Gasturbinen sowohl mit als auch ohne Rekuperator eingestuft. Bei allen anderen Konzepten wurde eine negative Bewertung vergeben, da die Geometrie der Motoren und die Anordnung der Nebenaggregate nur geringfügig verändert werden kann.

Herstellkosten
Die Herstellkosten einer Gasturbine ohne Rekuperator und eines einfachen 2-Takt Ottomotors mit Schlitzen liegen auf einem ähnlich niedrigen Niveau. Etwas höher liegen die Herstellkosten bei einem 4-Takt Otto Hubkolbenmotor, Wankelmotor und Freikolbenmotor. Die Herstellung eines Dieselmotors ist im Vergleich teurer, so dass hier eine neutrale Bewertung vorgenommen wurde. Durch den Einsatz eines Rekuperators erhöhen sich die Herstellkosten einer Gasturbine merklich, so dass mit Rekuperator eine neutrale Einordnung erfolgt. Mit Abstand die höchsten Herstellkosten weisen Brennstoffzellensysteme auf. Die genaue Ermittelung der Herstellkosten ist problematisch, dennoch kann eine qualitative Einordnung erfolgen.

Rohemissionen Schadstoffe
Unter dieser Kenngröße werden die Rohemissionen von Schadstoffen zusammengefasst. Die Berücksichtigung der CO_2-Emissionen erfolgt durch die Darstellung des Wirkungsgrades, der sich direkt auf die CO_2-Emissionen auswirkt. Allerdings muss dort der verwendete Kraftstoff berücksichtigt werden. Unter Rohemissionen versteht man die Emissionen des Energiewandlers ohne Abgasnachbehandlung.
Brennstoffzelle und Gasturbine weisen sehr geringe Rohemissionen auf. Aufgrund der kontinuierlichen Verbrennung erfolgt in einer Gasturbine eine vollständige Verbrennung mit nur geringer Entstehung von Schadstoffen. Mit Abstand folgt der 4-Takt Otto Hubkolbenmotor. Die Rohemissionen eines Wankelmotors, und der im 2-Takt Prozess betriebenen Otto Hubkolben- und Freikolbenmotoren liegen auf einem vergleichbaren Niveau und werden negativ bewertet. Der Dieselmotor weist die höchsten Rohemissionen auf.

Emissionen Schadstoffe nach Abgasnachbehandlung
Die Emissionen können mit Hilfe von Abgasnachbehandlungssystemen minimiert werden. Zwar müssen hierfür zum Teil sehr komplexe Systeme implementiert werden, doch kann damit ein Großteil der Schadstoffe umgewandelt werden. Die Kosten der Abgasnachbehandlungssysteme unterscheiden sich jedoch zum Teil erheblich, was hier allerdings nicht explizit berücksichtigt wird. Aufgrund der geringen Rohemissionen bei Brennstoffzellensystemen und Gasturbinen entfällt hier die Abgasnachbehandlung.

Kraftstoffflexibilität
Die Kraftstoffflexibilität beschreibt die Möglichkeit, eine Energiewandler-Technologie auf unterschiedliche Kraftstoffe anzupassen. Dabei erfolgt die Anpassung im Entwicklungsstadium und der Betrieb erfolgt weiterhin monovalent. Im Gegensatz hierzu wird die Vielstofffähigkeit als die Möglichkeit definiert, im Betrieb unterschiedliche Kraftstoffe zu verwenden, also einen mindestens bivalenten Betrieb zu ermöglichen.

Eine sehr gute Kraftstoffflexibilität weist die Gasturbine auf, die mit sehr vielen flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen betrieben werden kann. Eine gute Kraftstoffflexibilität weisen alle Ottomotoren auf, da hier prinzipiell alle Ottokraftstoffe, Ethanolmischungen, Erdgas oder auch Wasserstoff umgesetzt werden können. Beim Dieselmotor ist der Einsatz von Diesel oder Biodiesel möglich, so dass hier eine neutrale Bewertung erfolgt. Der Stack einer Brennstoffzelle kann nur mit Wasserstoff betrieben werden, jedoch kann der Wasserstoff theoretisch an Bord des Fahrzeugs durch Reformation aus anderen Kraftstoffen erzeugt werden, woraus sich die Möglichkeit gibt, ein Brennstoffzellensystem auch mit anderen Kraftstoffen zu betreiben.

Vielstofffähigkeit
Die Einordnung der Vielstofffähigkeit erfolgt analog zur Kraftstoffflexibilität mit Ausnahme der Brennstoffzelle. Der Betrieb eines Brennstoffzellensystems mit mehreren Kraftstoffen ist zwar theoretisch möglich, doch stehen Aufwand und Nutzen in einem Verhältnis, der eine solche Auslegung nicht sinnvoll erscheinen lässt. Bei einer Gasturbine kann im Betrieb bei gleichem Aggregatszustand der Einsatz unterschiedlicher Kraftstoffe erfolgen, lediglich bei Verwendung von Kraftstoffen unterschiedlicher Aggregatszustände muss eine hardwaretechnische Auslegung vorgesehen werden. Bei Ottomotoren können unterschiedliche Ethanol-Mischungen mit demselben Injektorsystem verwendet werden; der Einsatz von Gas oder Wasserstoff erfordert jedoch ein zusätzliches Einspritzsystem, welches bereits bei Serienmodellen zum Einsatz kommt.

Skalierbarkeit
Die Untersuchungen in dieser Studie beruhen auf einem Basisszenario eines Range Extenders mit 20 kW Leistung. Skalierbarkeit wird als die Möglichkeit definiert, die Technologie auf weitere Leistungsklassen zu skalieren. Insbesondere wurden hier die Leistungsklasse 5 kW und 50 kW betrachtet. Die Skalierbarkeit wird bei allen System mit sehr gut bewertet, da eine Anpassung prinzipiell möglich ist. Zwar gehen mit der Skalierung Veränderungen der anderen Eigenschaften wie z.B. effektiver Wirkungsgrad einher, jedoch wird dies hier nicht explizit aufgeführt. Generell ist eine Skalierung auf andere Leistungsbereiche bei allen Technologien möglich.

Dynamik
Die Dynamik der einzelnen Technologien ist sowohl für eine Blockbetrieb-Betriebsstrategie als auch für eine Kennfeld-Betriebsstrategie relevant. Für den Blockbetrieb bedeutsam ist die Dynamik des Kalt- bzw. Warmstarts, da bei einem Blockbetrieb das mehrmalige An- und Abschalten des Range Extenders möglich ist. Relevant ist dies vor allem auch im Hinblick auf die Emissionen, die prinzipiell beim Start deutlich größer sind als im laufenden Betrieb. Betrachtet man eine Kennfeld-Betriebsstrategie, so ist der dynamische Lastsprung im Betrieb relevant. Zur Beschreibung der dynamischen Eigenschaften wird deshalb zwischen Kaltstart, Warmstart und Lastsprung im Betrieb unterschieden. Der Kaltstart beschreibt den Start des Energiewandlers aus dem kalten Zustand mit einem anschließenden Lastsprung auf 100 % der Last. Der Warmstart beschreibt den Start aus dem warmen Zustand mit einem Lastsprung auf 100 %. Bei dem Lastsprung im Betrieb wird ein Sprung von 0 % Last auf 100 % Last bei warmem, laufendem Betrieb angenommen.

Die höchste Dynamik erzielen die Hubkolbenmotoren, der Wankelmotor und der Freikolbenmotor. Die Werte unterscheiden sich nur geringfügig und liegen alle im Bereich unterhalb einer Sekunde. Die Werte sind für Kalt- und Warmstart annähernd gleich; für einen Lastsprung im Betrieb sind sie im Vergleich noch geringer, da der Motor bereits läuft. Bei der Brennstoffzelle ist es entscheidend, ob ein Kaltstart oder ein Warmstart durchgeführt wird, wobei bei einem Kaltstart wiederum die Temperatur des Systems eine bedeutende Rolle spielt. Legt man eine Außentemperatur von 20 °C zu Grunde, so ergibt sich eine Zeitdauer von zirka 30 s für den Kaltstart. Für den Warmstart und den Lastsprung im Betrieb werden 3 s respektive <1 s angegeben. Deutlich höhere Werte weist die Gasturbine auf. Der Kaltstart mit anschließendem Lastsprung benötigt bei einer Gasturbine mit Rekuperator zirka 90 s und ohne Rekuperator weniger als 15 s. Bei einem Warmstart sinken die Werte auf 20 bzw. 12 s. Im Betrieb schlägt ein Lastsprung mit Rekuperator mit weniger als 10 s und ohne Rekuperator mit weniger als 5 s zu Buche.

Aufgrund der relativ hohen Zeitkonstanten eignet sich die Gasturbine eher für einen Blockbetrieb als für eine Kennfeld-Betriebsstrategie, bei der die Antriebsenergie direkt aus dem Energiewandler zur Verfügung gestellt werden soll. Bei den übrigen verbrennungsmotorischen Antrieben werden zwar sehr gute Ansprechzeiten erreicht, jedoch sind hier die hohen Schadstoffwerte bei einem Kaltstart zu beachten.

8.2 Vergleich der elektrischen Maschinen

Elektrische Maschinen	Brenn-stoff-zelle (PEFC)	Frei-kolben-motor	Hub-kolben-motor 4-Takt Diesel	Hub-kolben-motor 2-Takt Otto	Hub-kolben-motor 4-Takt Otto	Wankel-motor	Gastur-bine mit Reku-perator (eta = 90%)	Gas-turbine ohne Rekupe-rator
Wirkungsgrad	entfällt	++	++	++	++	++	++	++
NVH	entfällt	++	++	++	++	++	+	+
Packaging Variabilität	entfällt	++	o	o	o	o	o	o
Leistungsdichte volumetrisch	entfällt	o	o	+	o	+	++	++
Leistungsdichte gravimetrisch	entfällt	o	o	+	o	+	++	++
Herstellkosten	entfällt	o	o	+	o	+	++	++

Tabelle 46: Bewertungsmatrix für die elektrischen Maschinen im Hinblick auf die unterschiedlichen Energiewandler-Technologien

Die elektrischen Maschinen unterscheiden sich in Bezug auf den Wirkungsgrad nur geringfügig. Alle Maschinen erreichen sehr gute Werte von deutlich über 90 %. Aufgrund der sehr hohen Drehzahlen ist der Wirkungsgrad der elektrischen Maschine einer Gasturbine tendenziell etwas geringer, allerdings werden auch hier sehr gute Werte erreicht. Das NVH-Verhalten aller Maschinen befindet sich auf einem hohen Niveau, so dass die elektrische Maschine im Vergleich zu den vorgeschaltenen Energiewandlern keinen großen Einfluss hat. Die Variabilität des Packaging berücksichtigt die Möglichkeit, die elektrische Maschine auf unterschiedliche Weise am Energiewandler anbringen zu können, um somit das Packaging des Gesamtsystems zu beeinflussen. Diese Variabilität ist bei einem Freikolbenmotor sehr hoch, da der Lineargenerator beinahe beliebig angeordnet werden kann und zudem eine sehr geringe Bauhöhe von ca. 15 cm aufweist. Bei den übrigen Technologien ist die Anbringung der elektrischen Maschinen auf der rotierenden Welle vorgegeben und somit die Variabilität beschränkt. Die volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte ist bei den Gasturbinen aufgrund der hohen Drehzahlen sehr hoch. 2-Takt Otto-Hubkolbenmotor und Wankelmotor erreichen etwas niedrigere Werte. Aufgrund der im Vergleich niedrigeren Drehzahl der 4-Takt Diesel- und Ottomotoren wird die Leistungsdichte hier als neutral bewertet. Die Leistungsdichte des Lineargenerators eines Freikolbenlineargeneratros kann aufgrund des Aufbaus aus mehreren Teilstatoren ebenfalls mit neutral bewertet werden. Die Herstellkosten der elektrischen Maschine sind für die Gasturbine am geringsten – bedingt durch die hohe Drehzahl und damit sehr kompakte Maschine. Im Vergleich fallen die Herstellkosten für 2-Takt Otto und Wankelmotor etwas höher aus. Eine weitere Abstufung erfolgt für die 4-Takt Motoren und den Freikolbenmotor gemäß der geringeren Leistungsdichte. Die Unterschiede sind aber tendenziell eher gering.

8.3 Vergleich der Leistungselektroniken

Leistungs-elektronik	Brennstoffzelle (PEFC)	Freikolben-motor	Hub-kolben-motor 4-Takt Diesel	Hub-kolben-motor 2-Takt Otto	Hub-kolben-motor 4-Takt Otto	Wankel-motor	Gasturbine mit Rekupe-rator (eta=90%)	Gasturbine ohne Rekupe-rator
Wirkungs-grad	o (mit galv. Trennung) ++ (ohne galv. Trennung)	++	++	++	++	++	+	+
NVH	nicht vorhanden	nicht vorhanden	nicht vorhanden	nicht vorhanden	nicht vorhanden	nicht vorhanden	nicht vorhanden	nicht vorhanden
Leistungs-dichte volu-metrisch	-- (mit galv. Trennung) - (ohne galv. Trennung)	++	++	++	++	++	+	+
Leistungs-dichte gravi-metrisch	-- (mit galv. Trennung) - (ohne galv. Trennung)	++	++	++	++	++	+	+
Herstell-kosten	-- (mit galv. Trennung) - (ohne galv. Trennung)	++	++	++	++	++	++	++

Tabelle 47: Bewertungsmatrix für die Leistungselektronik im Hinblick auf unterschiedliche Energiewandler-Technologien

Für die Hubkolbenmotoren, den Freikolbenmotor und den Wankelmotor bestehen nur geringfügige Unterschiede im Hinblick auf die benötigte Leistungselektronik. Alle Kenngrößen wurde für diese Technologien mit sehr gut bewertet. Aufgrund der hohen Drehzahlen wird die Leistungselektronik für eine Gasturbine beim Wirkungsgrad sowie den volumetrischen und gravimetrischen Leistungsdichten abgestuft. Bei der Brennstoffzelle muss unterschieden werden, ob bei der Leistungselektronik eine galvanische Trennung vorgesehen werden muss. Mit galvanischer Trennung werden niedrigere Kennwerte erreicht, da das System aufwändiger ist. Auch ohne galvanische Trennung weisen die Leistungsdichten und die Herstellkosten im Vergleich zu den anderen Technologien eine geringere Bewertung auf. Einzig der Wirkungsgrad erreicht ohne galvanische Trennung die gleiche Bewertung. Zusammenfassend ergeben sich im Hinblick auf die Leistungselektronik somit nur geringfügige Unterschiede zwischen den verbrennungsmotorischen Technologien, kleine Unterschiede im Vergleich der verbrennungsmotorischen Technologien zur Gasturbine und bedeutende Unterschiede zur Brennstoffzelle.

8.4 Kompetenzen am Standort Baden-Württemberg

Der Standort Baden-Württemberg als „Mutterland des Automobils“ weist hervorragende Kompetenzen im Bereich der herkömmlichen Verbrennungsmotoren aus. Betrachtet man den mechanischen Teil aller verbrennungsmotorischen Technologien (Hubkolbenmotor, Freikolbenmotor und Wankelmotor), so existieren zahlreiche große und mittelständische Firmen, die die erforderlichen Kompetenzen und Fertigungsmöglichkeiten besitzen. Auch im Bereich der elektrischen Maschinen und der Leistungselektronik existieren zahlreiche Hersteller. Im Bereich der Forschungseinrichtungen gibt es zahlreiche Institute der Universitäten und Hochschulen, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt sowie der Fraunhofer Gesellschaft, die Kompetenzen auf dem Gebiet der Range Extender besitzen, so dass der Standort Baden-Württemberg sehr gute Voraussetzungen für die erfolgreiche Entwicklung und Vermarktung von Range Extender-Konzepten bietet.

9.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Studie wurden verschiedene Range Extender Technologien analysiert. Diese umfassen den herkömmlichen Hubkolbenmotor (Diesel- oder Benzinausführung, 2- oder 4-Takt), den Wankelmotor, den Freikolbenmotor, die Brennstoffzelle sowie die Gasturbine. Diese Technologien unterscheiden sich zum Teil erheblich in ihren für eine Range Extender Anwendung relevanten Eigenschaften. Bei der durchgeführten Bewertung wurden auch die für das Gesamtsystem Range Extender erforderlichen Komponenten, die elektrische Maschine und die Leistungselektronik betrachtet.

Das Ergebnis dieser Studie stellt eine wissenschaftliche prospektive Aussage über Range Extender Konzepte dar, in der die Vor- und Nachteile und das Potenzial der einzelnen Technologien hinsichtlich ihres Einsatzes als Range Extender gegenüberstellt und bewertet werden. Die Aussagen der einzelnen Kapitel erlauben es dem Leser, einen Einblick in die entscheidenden Eigenschaften der unterschiedlichen Technologien zu erlangen. Dabei lässt sich feststellen, dass die Wahl des Range Extender Konzepts zum einen von den dargestellten Eigenschaften und zum anderen von dem Fahrzeugkonzept abhängt, in welches der Energiewandler integriert werden soll. Ein hoher Wirkungsgrad eines Range Extender Systems ist beispielsweise für interurbane Fahrzeugkonzepte mit kleinen Batterien sehr gut geeignet, da in diesem Fall der Energiewandler oft eingesetzt werden muss und somit eine hohe Gesamteffizienz erzielt werden kann. Sollte der Range Extender in Fahrzeugkonzepten Anwendung finden, in denen er selten zum Einsatz kommt, ist der Einfluss des Range Extender Wirkungsgrades auf die Gesamteffizienz des Antriebsstranges geringer. Die Wahl des richtigen Range Extender Konzepts ist somit stark von der Auswahl des Fahrzeugkonzepts abhängig. Ein Überblick über die konkreten Ergebnisse der Bewertung der Range Extender Systeme ist in Kapitel 8 dargestellt.

Der Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg verfügt über hervorragende Kompetenzen im Bereich der Verbrennungsmotoren. Betrachtet man den mechanischen Teil aller verbrennungsmotorischen Technologien (Hubkolbenmotor, Freikolbenmotor und Wankelmotor), so existieren zahlreiche große und mittelständische Firmen sowie Forschungseinrichtungen, die die erforderlichen Kompetenzen und Fertigungsmöglichkeiten besitzen. Im Bereich der Gasturbine sind ausreichende Kompetenzen vorhanden. Im Hinblick auf die Brennstoffzelle ist ein hohes Maß an Kompetenz vorhanden, jedoch werden hier einige Komponenten auch in anderen Regionen entwickelt, so dass das Know-how nicht so gebündelt vorliegt, wie dies bspw. bei den Verbrennungsmotoren der Fall ist. Im Bereich der elektrischen Maschinen und der Leistungselektronik existieren zahlreiche Hersteller und Forschungseinrichtungen, die über hervorragendes Fachwissen und hocheffiziente Fertigungsverfahren verfügen. Da es sich bei einem Range Extender um ein hochmechatronisches System handelt, das abhängig von der gewählten Technologie aus einem verbrennungsmotorischen Teilsystem oder einer Brennstoffzelle, einem Generator sowie einer Elektronik und Software besteht, bedingt dessen Entwicklung eine verstärkte Vernetzung der involvierten Ingenieursdisziplinen. Diese Vernetzung sollte sowohl im jeweiligen Bereich der Forschungseinrichtungen und der Industrie als auch zwischen Industrie und den Forschungseinrichtungen vorangetrieben werden. Die aktuellen Perspektiven der e-Mobil BW oder des Spitzenclusters Elektromobilität Süd West können diese Wissensbasis attraktiv erweitern. Gerade das Land Baden-Württemberg verfügt über sehr gute Voraussetzungen für die erfolgreiche Entwicklung und Positionierung von Range Extender Konzepten in künftigen Fahrzeuggenerationen.

Das Institut für Fahrzeugkonzepte des DLR und seine an der Studie beteiligten Partner danken dem Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg für die Möglichkeit, an dieser aktuellen und querschnittlichen Aufgabe arbeiten zu können.

Anhang

Anhang 1: Firmen sortiert nach Komponenten eines PEFC Brennstoffzellensystems, weltweit

Gesamtsysteme:
- Asia Pacific Fuel Cell Technologies,
- BEOS Elektronik-Technologie GmbH
- FutureE
- H-tec
- IDATECH Fuel Cells GmbH
- Hydrogenics Europe - Fuel Cell Power Systems
- Masterflex Brennstoffzellentechnik GmbH
- NedStack Fuel Cell Technology BV
- Nuvera Fuel Cells Europe
- RWE fuel cells gmbh
- LiEtec GmbH
- PowerAvenue GmbH

Brennstoffzellenmodule und Komponenten:

Stack:
- Asia Pacific Fuel Cell Technologies, Ltd.
- Ballard Power Systems Inc.
- Baltic Fuel Cells GmbH
- h-tec

Membrane:
- 3M Deutschland GmbH
- Asia Pacific Fuel Cell Technologies, Ltd.
- Ballard Power Systems Inc.
- Baltic Fuel Cells GmbH
- BASF Fuel Cell GmbH
- DuPont
- Dow Automotive
- FuMA-Tech GmbH
- Gore
- Johnson Matthey Fuel Cells (UK)
- SolviCore GmbH & Co. KG
- Süd-Chemie AG
- Toray International Europe GmbH
- Zoltek

Bipolarplatten:
- Asia Pacific Fuel Cell Technologies, Ltd.
- borit Leichtbau-Technik GmbH
- ff fluid forming GmbH
- Ticona GmbH
- Hüttenberger Produktionstechnik Martin GmbH
- Schaeffler Gruppe (INA, FAG, LuK)
- ElringKlinger AG (Bipolarplatten, Dichtungen)
- Alantum Europe GmbH (Werkstoff für Bipolarplatten)

Fertigungstechnologien für Bipolarplatten:
- FIX Maschinenbau GmbH (graphitisch)
- Schunk Ingenieurkeramik GmbH
- Theodor Gräbener GmbH & Co. KG

Kühlungskomponenten oder Systeme:
- AKG GmbH & Co. KG
- Balcke-Dürr GmbH
- ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG (Lüfter)
- Gardner Denver Schweiz AG
- Haugg Kühlerfabrik GmbH
- Kolbenschmidt Pierburg AG
- Protherm Wärmeschutztechnik (Thermoschalter)
- Schmöle GmbH (Wärmetauscher)
- Tuthill UK Ltd. (Pumpenhersteller)

Luftversorgung/Kompressor/Luftfilter:
- Alcatel Hochvakuumtechnik GmbH ADIXEN
- Dipl.-Ing. Wagner Mess- und Regeltechnik GmbH
- ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG
- Filterwerk Mann + Hummel GmbH
- Gardner Denver Schweiz AG
- Gebr. Becker GmbH
- Haugg Kühlerfabrik GmbH
- IWAKI Europe GmbH (Pumpen)
- Kolbenschmidt Pierburg AG
- Nitto Kohki Deutschland GmbH
- Norgren Automotive GmbH(pneumatische Lösungen)
- Oerlikon Leybold Vacuum GmbH
- Rotrex A/S
- Riegler & Co. KG
- Tuthill UK Ltd. (Pumpen)

Gas/Gas Befeuchter:
- Asia Pacific Fuel Cell Technologies, Ltd.
- Dipl.-Ing. Wagner Mess- und Regeltechnik GmbH
- Perma Pure LLC

Wasserstoffzirkulation:
- Alcatel Hochvakuumtechnik GmbH ADIXEN
- ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG
- iHoerbiger - Automatisierungstechnik GmbH
- IWAKI Europe GmbH
- Rotrex A/S
- Tuthill UK Ltd. (Pumpen)

Ventile, Leitungen, Dichtungen:
- Buschjost Norgren GmbH + Co. KG
- GSR Ventiltechnik GmbH & Co. KG
- HEROSE GMBH Armaturen und Metalle
- Hoerbiger - Automatisierungstechnik GmbH
- Hochdruck-Reduziertechnik GmbH
- Mannesmannröhren-Werke GmbH

- Otto Egelhof GmbH&Co.KG
- PTEC Pressure Technology GmbH
- Riegler & Co. KG
- SKF Sealing Solutions GmbH
- Ticona GmbH/Celanese
- Trelleborg Sealing Solutions Germany GmbH (Dichtungen)
- VOSS Automotive GmbH

Wasserstofftanksysteme:
- Baltic Fuel Cells GmbH
- WEH GmbH Gas Technology
- Asia Pacific Fuel Cell Technologies, Ltd.
- CARDEC hydrogen storage GmbH (Feststoffspeicher)
- Dynetek Europe GmbH
- LiEtec GmbH
- MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG
- Quantum Fuel Systems Technologies (Tanksysteme)

Druckbehälter:
- Quantum Fuel Systems Technologies
- WEKA AG
- Lincoln Composites, Inc.

Druckminderung:
- HEROSE GMBH Armaturen und Metalle (Tieftemperatur)
- Hochdruck-Reduziertechnik GmbH
- WEKA AG

Kupplung:
- HEROSE GMBH Armaturen und Metalle (Tieftemperatur)
- WEKA AG

Drucksensoren, Fittings und Leitungen:
- VOSS Automotive GmbH
- WEKA AG

Elektrische und elektronische Komponenten:

Sensorik:
- AppliedSensor Hydrogen Sensors
- Baltic Fuel Cells GmbH
- BlueSens
- Bronkhorst Mättig GmbH
- Dipl.-Ing. Wagner Mess- und Regeltechnik GmbH
- ELBAU Elektronik Bauelemente GmbH Berlin
- KROHNE Messtechnik GmbH & Co KG
- Micronas GmbH
- Robert Bosch GmbH
- Sensoric Gas Sensors
- Sensors Europe GmbH
- SMART Electronic Development GmbH
- UST Umweltsensortechnik GmbH
- WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG

Steuerungen und Regelungen:
- Bronkhorst Mättig GmbH
- Buschjost Norgren GmbH + Co. KG
- Dipl.-Ing. Wagner Mess- und Regeltechnik GmbH
- ENITECH Energietechnik-Elektronik GmbH (Steuerungen)
- Hellmuth electronics GmbH
- Hochdruck-Reduziertechnik GmbH
- Hoerbiger - Automatisierungstechnik GmbH
- Innecken Elektrotechnik GmbH
- Ritter Elektronik GmbH
- Robert Bosch GmbH
- SMART Electronic Development GmbH (Zellspannungsüberwachung)

Leistungselektronik:
- APtronic AG
- Benning GmbH & Co KG
- COSEL EUROPE GmbH
- DORFMÜLLER SOLARANLAGEN GMBH
- Delta Energy Systems
- Innecken Elektrotechnik GmbH
- Munk GmbH
- Ritter Elektronik GmbH
- SMA Solar Technology AG

Sonstiges:
- U. I. Lapp GmbH (Kabel)
- Tannhäuser-Elektronik GmbH (Kabel, Platinen)

Bezugsquellen:
- Quintech
- Wittrin Electronic e.k.
- Quantum Fuel Systems Technologies

Testing:
- ELBAU Elektronik Bauelemente GmbH Berlin
- EVT Gesellschaft für Energieverfahrenstechnik mbH
- FuelCon AG
- IGENO Fahrzeug- und Automatisierungstechnik GmbH
- KROHNE Messtechnik GmbH & Co KG
- MS2 Engineering und Anlagenbau GmbH
- MAGNUM Fuel Cell AG (Brennstoffzellenprüftechnik)
- SMART Electronic Development GmbH

Abkürzungsverzeichnis

AFC	Alkaline Fuel Cell
AGR	Abgasrückführung
BOP	Balance of Plant (Hilfsgenerator)
CNG	Compressed Natural Gas
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO2	Kohlenstoffdioxid
DI	Direct-Injection
DLC	Diamond-Like-Carbon
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
DOE	United States Department of Energy
E10	Super Kraftstoff mit bis zu 10% Ethanolanteil
E5	Super Kraftstoff mit bis zu 5% Ethanolanteil
E85	Kraftstoff mit 85% Ethanolanteil
EREV	elektrischer Range Extender
EU	Europäische Union
FFV	Flexible Fuel Vehicle
HC	Kohlenwasserstoff
HT-PEFC	Hoch Temperatur Polymer Electrolyte Fuel Cell
IDI	Indirect-Injection
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LPDI	Low-Pressure-Direct-Injection
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
MEA	Membran Elektroden Einheit (Membrane Electrode Assembly)
MGT	Mikrogasturbine
MPI	Multi-Point-Injection
NH3	Ammoniak
NMHC	Nichtmethankohlenwasserstoffe
NO	Stickstoffmonoxid
NOX	Stickoxide
NSC	NOX-Speicherkatalysator
NSCR	nicht selektive katalytische Reduktion
NT-PEFC	Nieder Temperatur Polymer Electrolyte Fuel Cell
NVH	Noise, Vibration and Harshness
OT	Oberer Totpunkt
PAFC	Phosphoric ACID Fuel Cell
PBI	Polymerbenzimidazol
PEFC	Polymer Electrolyte Fuell Cell
PEM	Polymer Electrolyte Membran
PKW	Personenkraftwagen
PM	Masse der Partikel
Pi	Verdichterdruckverhältnis
PoC	Proof of Concept
ppm	Parts per million
ppmv	Volumenmischungsverhältnis (parts per million)
RE	Range Extender
SCR	selektive katalytische Reaktion
SDM	Sauterdurchmesser
SOFC	Solid Oxid Fuel Cell
TIT	Turbineneintrittstemperatur
TOT	Turbinenaustrittstemperatur
TRE	Turbo Range Extender
UT	Unterer Totpunkt
VTG	Variable Turbineneinlassgeometrie

Literaturverzeichnis

[1] Mock, Peter, Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO2-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR 21), 2010, DLR Stuttgart

[2] McKinsey, BOOST: Transforming the powetrain value chain – a portfolio challenge, 2010

[3] Pohl, Sven-Erik: Der Freikolbenlineargenerator – Theoretische Betrachtungen des Gesamtsystems und experimentelle Untersuchungen zum Teilsystem der Gasfeder. Dissertation, Universität der Bundeswehr, Hamburg, 2007

[4] Jarret, J. H.; Jarret, J. M. B. Thermischer Motor mit innerer Verbrennung, 9.April 1971. Aktenzeichen P22 17 194.4

[5] Van Blarigan,P.; Goldsborough, S: Toward the Development of a Thermodynamic Fuel Cell. Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program, Merit Review and Peer Evaluation, May 19-22, 2003

[6] Van Blarigan,P.: Free-Piston Engine. 2010 DOE Vehicle Technologies Program Annual Merit Review, June 8, 2010

[7] Blarigan, P. 2010 DOE Vehicle Technologies Program Annual Merit Review, 2010, https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/merit_review_2010/combustion/ace008_vanblarigan_2010_o.pdf

[8] Clark, N.; Taylor, S.; Shoukry, E.; Famouri, P.: Numerical Simulation for Parametric Study of a Two- Stroke Direct Injection Linear Engine. SAE International, 2002

[9] Mikalsen,R; Roskilly A.P.: A review of free-piston engine history and applications. Applied Thermal Engineering 27, 2339-2352, 2007

[10] Free-Piston Engine Project; Online im Internet URL: http://www.free-piston.eu/ [Stand: 03.03.2011 um 09:55 Uhr]

[11] Mikalsen R.; Roskilly A.P.: The design and simulation of a two-stroke free-piston compression ignition engine for electrical power generation. Applied Thermal Engineering 28, 589-600, 2008

[12] LCE Linear Combustion Engine Project: Basic principle; Online im Internet URL: http://www.lceproject.org/en/principle/ [Stand: 04.03.2011 um 14:12 Uhr]

[13] Němeček, P., Šindelka, M., Vysoký, O.: Control of Two-Stroke Free-Piston Generator. The 6th Asian Control Conference: Bali, Indonesia, 2006, ISBN 979-15017-0

[14] Carter, D., Wechner, E.: The Free Piston Power Pack: Sustainable power for Hybrid Electric Vehicles. Pempek Systems Pty. Ltd., Australia, SAE 2003

[15] Pempek Systems: Free Piston Power Pack; Online im Internet URL: http://www.freepistonpower.com [Stand: 09.03.2011 um 11:35 Uhr]

[16] Hansson, Jörgen: Analysis and control of a hybrid vehicle powered by free-piston energy converter. Dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Schweden 2006

[17] Erland, Max: FPEC Free Piston Energy Converter, In Proceedings of the 21st Electric Vehicle Symposium & Exhibition, EVS 21, Monaco, 2005

[18] Xu, Z.; Chang, S.: Prototype testing and analysis of a novel internal combustion linear generator integrated power system. Applied Energy 87, 1342–1348, 2010

[19] Xu, Z.; Chang, S.: Improved Moving Coil Electric Machine for Internal Combustion Linear Generator. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 25, No. 2, 2010

[20] Lotus ACT Active CrankTrain Free Piston Engine; Online im Internet URL: http://www.lincoln.ac.uk/engineering/Research/Free%20Piston%20Project.htm [Stand: 11.03.2011 um 10:53 Uhr]

[21] Sauter, W.: Reduzierung der Motoremissionen durch kontrollierte Selbstzündung im Ottomotor, Motorentechnische Zeitschrift, 01/2008

[22] Fraidl, G.: Homogene Selbstzündung – die Zukunft der Benzin-Direkteinspritzung, Motorentechnische Zeitschrift, 2002/10.

[23] Studie zur Ausarbeitung von Forschungs- und Entwicklungsbedarf für vielstofffähige Kraftfahrzeugantriebe, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 2008
[24] Philipps, Franz, Balance of Plant, WP4, in Final FCTESTNET Meeting 2006: Estoril
[25] Gardiner, Monterey, Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs, 2009, Department of Energy
[26] Kersting, M., Literaturrecherche und Datenbankaufbau für Niedertemperatur-Brennstoffzellensysteme (PEFC) für den automobilen Einsatz, 2009, Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte: Stuttgart
[27] Heinzel, Angelika, et al., Brennstoffzellen - Entwicklung, Technologie, Anwendung. 3te Ausgabe, 2006, Heidelberg: C.F. Müller Verlag.
[28] Fickel, Hans-Christian, et al., Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug für emissionsfreie Mobilität, in ATZ 04/2011.
[29] Carlson, E.J., et al., Cost Analysis of PEM Fuel Cell Systems for Transportation, National Renewable Energy Laboratory, Editor 2005: Cambridge.
[30] The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles, 2009, Nationale Organisation Wasserstoff.
[31] Verfügbar auf: http://www.schunk-group.com/sixcms/media.php/1722/HandbuchSchunkFC-42FC-08gerV40.pdf [aufgerufen am 13.05.2011].
[32] Capstone Turbine Corporation, "Capstone Turbine C30 CNG Microturbine Certified to CARB 2010 Requirement for On-Road Heavy Duty Diesel Engines for Urban Bus", Pressebericht, http://capstoneturbine.com, Dezember 2010
[33] Capstone Turbine Corporation, "Capstone Announces Launch of Carb Emissions Certified Product to Operate in Hybrid Electric Vehicles", Pressebericht, http://capstoneturbine.com, Juni 2010
[34] Capstone Turbine Corporation, "Capstone Drive Solution - Range Extender", Produktdatenblatt, http://capstoneturbine.com
[35] Capstone Turbine Corporation, "C30 MicroTurbine Liquid Fuels", Produktdatenblatt, http://capstoneturbine.com
[36] Capstone Turbine Corporation, "C65 & C65-ICHP MicroTurbine Liquid Fuels", Produktdatenblatt, http://capstoneturbine.com
[37] E-quad Power Systems GmbH, "Capstone Micro Turbine", Präsentation, http://microturbine.com, Oktober 2009
[38] www.greencarcongress.com, "Jaguar Introduces C-X75 Gas Micro-turbine Extended Range Electric Vehicle Concept", Pressebericht, September 2010
[39] Capstone Turbine Corporation, "Capstone C30 Successfully Integrated Into Ford Vehicle By Langford Performance Engineering Ltd.", Pressebericht, http://capstoneturbine.com, Juni 2009
[40] Capstone Turbine Corporation, "Hybrid Electric Supercar With Microturbine Technology to Debut at LA Auto Show", Pressebericht, http://capstoneturbine.com, November 2009
[41] Capstone Turbine Corporation, "Capstone Receives HEV Bus Order for $5 Million from DesignLine International", Pressebericht, http://capstoneturbine.com, April 2008
[42] DesignLine Corporation, "ECOSaver IV™ Hybrid Electric Bus by DesignLine USA", Flyer, http://www.designlinecorporation.com/
[43] Capstone Turbine Corporation, "Velozzi to Integrate Capstone C65 and C30 Microturbines Into Electric Supercar and Sports Crossover Vehicle", Pressebericht, http://capstoneturbine.com, Februar 2010
[44] ETV Motors Ltd, "ETV Motors successfully completes milestone demonstration of turbine-charged electric vehicle", http://etvmotors.com, Juli 2009

[45] Capstone Turbine Corporation, "Can a microturbine be cost competitive with ICE supplying power to hybrid automobiles?", http://capstoneturbine.com/investor/ask-management.asp, Januar 2010
[46] Capstone Turbine Corporation, "Capstone Working With US 1 Industries and CalMotors to Install C65 HEV Microturbine System in Class 8 Tractor-Trailer Truck", Pressebericht, http://capstoneturbine.com, Februar 2011
[47] Setiawan, E. A., „Dynamics Behavior of a 30 kW Capstone Microturbine", Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V. (ISET): Kassel, 2007
[48] Van Roode, M., „Ceramic Gas Turbine Development: Need for a 10 Year Plan", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power vol. 132, 2010
[49] Bolszo, C.D., „Emissions optimization of a biodiesel fired gas turbine", Proceedings of the Combustion Institute 32 2949–2956, 2009
[50] Bargende, M.: Grundlagen der Verbrennungsmotoren Skript. Universität Stuttgart, 2010
[51] ATU Techniklexikon: Das Viertaktverfahren; Online im Internet URL: http://www.atu.de/pages/werkstatt/unsere-werkstatt/technik-wissen-motor.html [Stand: 21.01.2011 um 16:18 Uhr]
[52] Lombardini ECOMOVE; Online im Internet URL: http://www.lombardinigroup.it/lombardini-products/new-projects/ecomove [Stand: 23.02.2011 um 19:14 Uhr]
[53] AVL List GmbH: Der Range Extender Praxiseinsatz. Vortrag / 31. Int. Wiener Motorensymposium. Wien, 29./30. April 2010
[54] AVL List GmbH: Herausforderungen an automotive Steuerungen der Zukunft. Vortrag / Automotive Elektronik, 31.05.2010, Technische Universität Graz
[55] BRP-Powertrain GmbH & Co.KG: Datenblatt Rotax Type 122. Gunskirchen, Österreich
[56] aprilia s.p.a.: Reparaturhandbuch Type 122. Noale, Italien
[57] SAE International: High Efficient 125- 250 cm3 LPDI Two-Stroke Engines, a Cheap and Robust Alternative to Four- Stroke Solutions?;
Online im Internet URL: http://papers.sae.org/2010-32-0019,
[Stand: 24.01.2011 um 16:02 Uhr]
[58] SAE International: The Lotus Range Extender Engine;
Online im Internet URL: http://papers.sae.org/2010-01-2208
[Stand: 19.01.2011 um 21:25 Uhr.]
[59] SAE International: The New Rotax ACE 600 Engine for Ski-Doo;
Online im Internet URL: http://papers.sae.org/2010-32-0001
[Stand: 24.01.2011 um 16:03 Uhr
[60] SAE International: Two-Cylinder Gasoline Engine Concept for Highly Integrated Range Extender and Hybrid Powertrain Applications;
Online im Internet URL: http://papers.sae.org/2010-32-0130
[Stand: 24.01.2011 um 16:04 Uhr]
[61] AVL Powertrain Engineering, Inc: Powertrain Strategies for the 21st Century: Looking Beyond 2016. Plymouth, MI, 2010
[62] Kohler: Produktblatt Kohler KD 625-3; Online im Internet URL: http://www.kohlerengines.com/onlinecatalog/pdf/kd625_3.pdf
[Stand: 24.01.2011 um 00:30 Uhr]
[63] Kubota GmbH: Produktblatt Kubota D1105T-E3B; Online im Internet URL: http://www.engine.kubota.ne.jp/english/catalog2/pdf/12_d1105t_30.pdf, [Stand: 26.01.2011 um 16:33 Uhr]
[64] Lombardini: Produktblatt Lombardini LDW 1404; Online im Internet URL: http://www.lombardinigroup.it/lombardini-products/liquid-cooled-diesel-engines/ldw-1404 [Stand: 10.01.2011 um 18:06 Uhr]
[65] Motorlexikon.de: Wirkungsgrad, Motor; Online im Internet URL: http://motorlexikon.de/?l=7405 [Stand: 23.02.2011 um 14:22 Uhr]

[66] Hahne, Erich: Technische Thermodynamik. München: Oldenbourg, 2004, ISBN: 3-486-57651-8
[67] Bensinger, W.-D: Rotationskolben - Verbrennungsmotoren. Berlin: Springer, 1973, ISBN: 9780387058863
[68] ATZ Online: Der Range Extender rettet das Elektrofahrzeug; Online im Internet URL: http://www.atzonline.de/Aktuell/Interviews/35/208/Der-Range Extender-rettet-das-Elektrofahrzeug.html [Stand: 18.01.2011 um 19:39 Uhr]
[69] Hybrid-Auto.info: Audi A1 e-tron 2010; Online im Internet URL: http://www.hybrid-autos.info/Elektro-Fahrzeuge/Audi/audi-a1-e-tron-2010/Drucken.html [Stand: 30.11.2010 um 12:48 Uhr]
[70] Fischer, Ulrich: Tabellenbuch Metall. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, 2002, ISBN: 3-8085-1722-0
[71] Laukötter Gusstechnik: Werkstoffdaten. Wadersloh
[72] Fußhoeller, H.: Kraftfahrzeugantriebe und Umwelt Skript. Universität Stuttgart, 2009
[73] AG Energiebilanzen: Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2010 nach Energieträgern; Online im Internet URL: www.ag-energiebilanzen.de [Stand: 17.12.2010 um 22:25 Uhr]
[74] Bensinger, W.-D: Rotationskolben - Verbrennungsmotoren. Berlin: Springer, 1973, ISBN: 9780387058863
[75] Becker, K.: NVH.Lab - Broschüre. Köln, 2010
[76] MTZ: Die Entwicklung von Massenausgleichseinrichtungen für Pkw-Motoren, Ausgabe 5/2003
[77] Gheorghiu, V.: Kolbenmaschinen Skript. HAW Hamburg
[78] Köhler, Eduard: Verbrennungsmotoren. [Wiesbaden]: Vieweg + Teubner, 2009, ISBN: 978-3-8348-0490-7
[79] CropEnergies AG: Flexible Fuel Vehicle. Mannheim, 2010
[80] Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT): E10 Verträglichkeit von Kraftfahrzeugen. Ostfildern, Januar 2011
[81] Kaiser, Hasso: Edelmetallschichten. Bad Saulgau: Leuze, 2002, ISBN: 3-87480-173-X
[82] Westkämper, Engelbert; Warnecke, Hans-Jürgen; Decker, Markus; Gottwald, Bernhard: Einführung in die Fertigungstechnik. Stuttgart: Teubner, 2004, ISBN: 3-519-56323-1
[83] N.N.: Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, Geschaltete Reluktanzmaschine und –antrieb, RWTH Aachen, http://www.isea.rwth-aachen.de/electricaldrives/focus
[84] Inderka, R. B.; Altendorf, J.-P.; Sjöberg, L.; De Doncker, R. W.: Design of a 75 kW Switched Reluctance Drive for Electric Vehicles EVS18, OKOFEH-Projekt, RWTH-ISEA, 2001
[85] N.N.: Geschaltete Reluktanzmaschine: Technische Daten, OKOFEH-Projekt, RWTH-ISEA
[86] N.N.: Schematischer Aufbau einer Asynchronmaschine, http://www.hybrid-autos.info/Technik/E-Maschinen/innenlaeufer-asynchronmaschine-mit-kurzschlusslaeufer.html, Download am 21.06.2011
[87] http://www.brusa.biz/index.php?id=133, Brusa Asynchronmotor ASM6.17.12, Download am 21.06.2011
[88] http://www.hybrid-autos.info/Technik/E-Maschinen/pmsm-mit-oberflenmagneten.html, Schematischer Aufbau einer permanenterregten Synchronmaschine mit Innenläufer, Download am 22.06.2011
[89] http://www.hybrid-autos.info/Technik/E-Maschinen/aussenler-synchronmaschine-mit-oberflenmagneten.html, Schematischer Aufbau einer permanenterregten Synchronmaschine mit Außenläufer, Download am 22.06.2011

[90] N.N.: Beispiel-Daten: Permanentmagneterregte Außenläufer Synchronmaschinen mit konzentrierter Wicklung, ZF Sachs
[91] http://www.energie.ch/at/sonder/index.26.gif, Transversalflussmaschine in Sammleranordnung, Download am 22.06.2011
[92] Dynax Transversalflussmaschine, Compact Dynamics
[93] Rogers, S.: Advanced Power Electronics and Electric Motors (APEEM) R&D Program Overview, U.S. Department of Energy, May 2011
[94] Braun, M. Skript zur Vorlesung Selbstgeführte Stromrichter Leistungselektronik II, 2000, Universität Karlsruhe (TU)
[95] Ivers-Tiffée E. Skript Brennstoffzellen und Batterien, 2001, Universität Karlsruhe (TU)
[96] Rogers, S.: Advanced Power Electronics and Electric Machines, 2010 DOE Hydrogen and Vehicle Technologies AMR, 2010
[97] Schröder, D. Leistungselektronische Bauelemente, Springer Berlin, 2006
[98] VDE Studie, Elektrofahrzeuge, Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf, 2010

IMPRESSUM

Diese Studie wurde im Auftrag des Ministeriums für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg mit Mitteln der Baden-Württemberg Stiftung durchgeführt und vom Institut für Fahrzeugkonzepte des DLR e.V. koordiniert

Beteiligte Institute
Institut für Fahrzeugkonzepte, DLR e.V., Stuttgart
Institut für Verbrennungstechnik, DLR e.V., Stuttgart
Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK), Universität Stuttgart
Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Fraunhofer Gesellschaft, Freiburg

Herausgeber

Deutsches Zentraum für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Anschrift
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart
Telefon: 0711 6862 256
E-Mail: info-st@dlr.de
www.dlr.de

Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg

Anschrift
Neues Schloss, Schlossplatz 4
70173 Stuttgart
Telefon: 0711 279-0
E-Mail: poststelle@mfw.bwl.de
www.mfw.baden-wuerttemberg.de

Redaktion
Prof. Horst E. Friedrich
Institut für Fahrzeugkonzepte
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

Projektleiter
Cornelius Ferrari
Institut für Fahrzeugkonzepte
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

Autoren

Freikolbenmotor
Cornelius Ferrari, Institut für Fahrzeugkonzepte
Stefan Offinger, Institut für Fahrzeugkonzepte

Brennstoffzelle
Dr. Michael Schier, Institut für Fahrzeugkonzepte
Franz Philipps, Institut für Fahrzeugkonzepte

Mikrogasturbine
Axel Widenhorn, Institut für Verbrennungstechnik
Martin Henke, Institut für Verbrennungstechnik

Hubkolbenmotor und Wankelmotor
Dr. Ulrich Philipp, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen
Adalbert Wolany, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen

Elektrische Maschinen
Frank Rinderknecht, Institut für Fahrzeugkonzepte

Leistungselektronik
Stefan Reichert, Institut für Solare Energiesysteme

Gestaltung/Druck
Hacker Media
Amselweg 10, 71384 Weinstadt

Drucklegung
Stuttgart, im April 2012

Abdruck (auch von Teilen) oder sonstige Verwendung
nur nach vorheriger Absprache mit den Herausgebern.

Das DLR im Überblick

Das DLR ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr und Sicherheit sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrt-Agentur im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zudem fungiert das DLR als Dachorganisation für den national größten Projektträger.

In den 13 Standorten Köln (Sitz des Vorstands), Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Göttingen, Hamburg, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Stuttgart, Trauen und Weilheim beschäftigt das DLR circa 6.900 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Das DLR unterhält Büros in Brüssel, Paris und Washington D.C.

Die Mission des DLR umfasst die Erforschung von Erde und Sonnensystem, Forschung für den Erhalt der Umwelt und umweltverträgliche Technologien, zur Steigerung der Mobilität sowie für Kommunikation und Sicherheit. Das Forschungsportfolio des DLR reicht von der Grundlagenforschung zu innovativen Anwendungen und Produkten von morgen. So trägt das im DLR gewonnene wissenschaftliche und technische Know-how zur Stärkung des Industrie- und Technologiestandortes Deutschland bei. Das DLR betreibt Großforschungsanlagen für eigene Projekte sowie als Dienstleistung für Kunden und Partner. Darüber hinaus fördert das DLR den wissenschaftlichen Nachwuchs, betreibt kompetente Politikberatung und ist eine treibende Kraft in den Regionen seiner Standorte.

DLR **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt** e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

www.DLR.de

Abschlussbericht REXEL – 04/12