

Armin Buchroithner

Systematische Analyse von Hybridfahrzeugen mit Schwungradspeicher unter Erfassung von Entwicklungstendenzen

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur

Studienrichtung Verkehrstechnik

Technische Universität Graz

Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik

Beurteiler: O. Univ.-Prof Dipl.-Ing. Dr. techn. Gunter Jürgens

Betreuer: Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-techn. Michael Bader

Graz, 2011

Zusammenfassung:

Kinetische Energiespeicher, und im Speziellen Schwungräder, waren in den letzten Jahren Thema intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf internationaler Ebene. Diese Technologie birgt zweifelsfrei großes Potential für den Einsatz in Elektro- und Hybridfahrzeugen, kann aber keinesfalls als neu bezeichnet werden. Schwungradspeicher sind in der Automobilindustrie bereits viele Male aufgetaucht und wieder verschwunden. Im Rahmen dieser Diplomarbeit am *Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik* der *TU Graz* wurde eine umfangreiche Datenbank über mehr als 50 Schwungradfahrzeuge erstellt. Die Fahrzeugkonzepte reichen von historischen Entwicklungen aus dem Jahre 1791 bis hin zu den aktuellen Konstruktionen, welche in den kommenden Jahren den Praxistests unterzogen werden. Der Entwicklungsverlauf der Schwungradtechnologie im Gesamtsystem des Fahrzeuges wurde im historischen Kontext analysiert. Unstetigkeiten in der Entwicklungsaktivität wurden mit externen Parametern (z.B. gesellschaftlicher, wirtschaftlicher, gesetzlicher Natur) in Verbindung gebracht und evaluiert. Darüber hinaus wurden die Entwicklungstrends technischer Parameter wie Energieinhalt, Energiedichte und Betriebsdrehzahl erarbeitet und diskutiert.

Um die Daten auf den systematischen Aufbau der Analyse vorzubereiten, wurden die Fahrzeuge nach unterschiedlichen Gesichtspunkten kategorisiert, wobei die Eignung der Fahrzeugart für die Hybridisierung kritisch begutachtet wurde. Basierend auf der daraus resultierenden Klassifizierung wurde eine Bewertungsstrategie für Schwungradfahrzeuge entwickelt, welche einen holistischen Ansatz verfolgt und neben Allgemeingültigkeit und Nachvollziehbarkeit weiteren entwicklungsmethodischen Forderungen gerecht wird. Die Bewertungsstrategie wurde auf drei ausgewählte Konstruktionsbeispiele angewandt, welche allesamt sehr unterschiedliche Konzepte verfolgen. Potentiale und Schwachstellen wurden herausgearbeitet und, falls erforderlich, Lösungsvorschläge gegeben.

Ausgehend von den Ergebnissen der Analyse der Konstruktionsbeispiele und der Historienbeschreibung wurde auf die größten Chancen und den optimalen Einsatzbereich der Schwungradtechnologie geschlossen.

Abstract:

Kinetic energy storage and, in particular flywheels, have been the object of intensive research and development activities in recent years. This technology holds, without any doubt, promising potential for use in electric and hybrid vehicles but can, by no means, be considered new. Flywheels as energy-storage devices have disappeared and reappeared many times in automotive engineering. Within a master's thesis at *the Institute of Machine Elements and Methods of Development* of the *Graz University of Technology*, Austria, a profound database of more than 50 flywheel-powered vehicles has been compiled, ranging from historic concepts dating back to 1791 up to current developments that will be released in the years to come. The discontinuities in the development-activity were analyzed, linked to external influences (society, legal situation, economic influences etc.) and evaluated. Furthermore, development trends regarding the content of energy, flywheel-speed and other parameters were discussed. The vehicles were categorized with a critical view their suitability for hybridization. Based on the resulting classification, an assessment strategy for flywheel hybrids was developed and applied to three specific examples. Each example followed a different concept in terms of energy transfer and vehicle type. The advantages and weaknesses of the concepts were elaborated and suggestions for improvements were given. Based on the results and the knowledge acquired through the analysis of the vehicles themselves and their historic development, the greatest opportunities and the ideal field of application for flywheel kinetic energy storage were determined.

Inhalt

1.	Einleitung	1
2.	Konkrete Aufgabenstellung	2
3.	Entwicklungsmethodisch-theoretischer Hintergrund der systematischen Konzeptanalyse	3
4.	Physikalische Grundlagen der Schwungradspeicher	5
4.1	Grundgrößen der energetischen Auslegung	6
4.2	Kräfte am Kreisel im drehenden Referenzsystem	8
4.3	Lagerkräfte bei Winkelbeschleunigung	9
4.4	Festigkeit und Spannungen in Schwungrädern (6),(7)	9
4.	Energiespeicher für Hybridfahrzeuge	12
4.1	Erörterung der allgemeinen Möglichkeiten	12
4.2	Die Energiedichte – Ein <i>Knock-Out</i> Kriterium	13
4.3	Gegenüberstellung im <i>Ragone-Plot</i>	15
4.3.1	Batterien für Hybridfahrzeuge	15
4.3.2	Supercaps für Hybridfahrzeuge (13)	19
4.3.3	Schwungradspeicher für Hybridfahrzeuge	19
5.	Struktur und Funktion von Hybridantrieben	22
6.	Charakteristika und Entwicklungspotential des Hybridantriebs mit Schwungradspeicher	22
7.	Die bestehenden Flywheel-Hybride	24
7.1	Einflussfaktoren auf den Entwicklungsverlauf von Schwungradspeichern	26
7.1.1	Generelle äußere Umstände	31
7.1.2	Parallele und verwandte Entwicklungen	33
7.1.3	Entwicklung von Komponenten	35
7.2	Abzeichnung von Trends	39
7.2.1	Trend der Drehzahlen mobiler Schwungradspeicher	40
7.2.2	Trend des Energieinhaltes mobiler Schwungradspeicher	43
7.2.3	Trend der Energiedichte mobiler Schwungradspeicher	45
7.3	Einteilung der schwungradgetriebenen Fahrzeuge	47
7.3.1	Vorhersagbarkeit des Lastkollektivs	47
7.3.2	Einteilung nach konstruktiven Strukturvarianten	48
7.3.3	Einteilung nach Art der Energieübertragung	50
8.	Erarbeitung der Bewertungsstrategie	51
8.1	Ablauf des analytischen Vorgehens	52
8.1.1	Erörterung: Kurzbeschreibung des Systems	53
8.1.2	Erörterung: Abstraktion	53
8.1.3	Erörterung: Verlustanalyse	54
8.1.4	Erörterung: Anwendung von Bewertungstools	55
8.1.5	Erörterung: Conclusio	62
8.2	Beeinflussbarkeit der Bewertungsstrategie	63
9.	VW T2 der RWTH Aachen, 1976	66
9.1	Kurzbeschreibung des Systems	66
9.2	Abstraktion VW T2 der RWTH Aachen	68
9.3	Verlustanalyse des VW T2 der RWTH Aachen	70

9.4	<i>Erweiterte Camelot Methode</i> VW T2 RWTH Aachen	74
9.5	Morphologische Matrix VW T2 RWTH Aachen	81
9.6	Nutzwertanalyse des VW T2 RWTH Aachen	81
9.7	Conclusio VW T2 der RWTH Aachen	84
9.7.1	SWOT-Analyse des VW T2 der RWTH Aachen	84
10.	<i>Volvo S40</i> der EUT Eindhoven, 1997	85
10.1	Kurzbeschreibung des Systems	85
10.2	Abstraktion des <i>Volvo S40</i> der EUT Eindhoven.....	86
10.3	Verlustanalyse des <i>Volvo S40</i> der EUT Eindhoven	88
10.3.1	Umsetzungsverluste in der VKM	89
10.3.2	Getriebeverluste in den Stirnradstufen	90
10.3.3	Reibungsverluste in den Kupplungen.....	91
10.3.4	Reibverluste im Zahnriementrieb des <i>PTO</i>	91
10.3.5	Reibungsverluste des CVT-Getriebes	91
10.3.6	Strömungsverluste des Schwungrades	94
10.3.7	Reibverluste der Vakuumdurchführung	95
10.3.8	Verluste des Niederdruck-Ölkreislaufs	96
10.3.9	Verluste des Hochdruck-Ölkreislaufs.....	97
10.3.10	Verluste der elektrischen Nebenaggregate.....	98
10.4	<i>Erweiterte Camelot Methode Volvo S40</i> der EUT Eindhoven.....	99
10.5	Morphologische Matrix <i>Volvo S40</i> der EUT Eindhoven	104
10.6	Nutzwertanalyse des <i>Volvo S40</i> der EUT Eindhoven	105
10.7	Conclusio <i>Volvo S40</i> der EUT Eindhoven.....	108
10.7.1	SWOT-Analyse des <i>Volvo S40</i> der EUT Eindhoven.....	109
11.	<i>Advanced Technology Transit Bus (ATTB)</i> , University of Texas	110
11.1	Kurzbeschreibung des Systems	110
11.2	Abstraktion des <i>ATTB</i>	114
11.3	Verlustanalyse des <i>ATTB</i>	116
11.3.1	Umsetzungsverluste der VKM	116
11.3.2	Umwandlungsverluste des Generators	117
11.3.3	Verluste des Generator-Umrichters	117
11.3.4	Verluste der 360 V DC Nebenaggregate	117
11.3.5	Verluste der Leistungselektronik der Antriebsmotoren.....	118
11.3.6	Umsetzungsverluste der Antriebsmotoren.....	118
11.3.7	Verluste des Schwungradspeichers	120
11.4	<i>Erweiterte Camelot Methode</i> des <i>ATTB</i>	122
11.5	Morphologische Matrix des <i>ATTB</i>	128
11.6	Nutzwertanalyse des <i>ATTB</i>	129
11.7	Conclusio <i>ATTB</i>	132
11.7.1	SWOT-Analyse des <i>ATTB</i>	132
	Abbildungsverzeichnis.....	137
	Literaturverzeichnis	139

1. Einleitung

Studiert man die aktuellen Publikationen zum Thema kinetische Energiespeicherung mittels Schwungrad, so könnte man beinahe den Eindruck gewinnen, findige Ingenieure haben soeben den letzten Baustein entdeckt, der erforderlich ist, um der Elektromobilität zum endgültigen Einzug in den Verkehr zu verhelfen und die Menschheit unabhängig von den schwindenden Ölreserven zu machen. Aber auch wenn das theoretische Potential des Konzeptes unumstritten ist und es somit durchaus über die Möglichkeit verfügt, Antriebskonzepte signifikant zu verbessern, so ist die Idee alles andere als neu.

Erste Prototypen gehen auf das Jahr 1791 zurück. Bereits in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts waren ganze Fahrzeugflotten für den Nahverkehr mit einem Schwungradspeicher in Kombination mit einer elektrischen Maschine ausgestattet, Triebwägen verwendeten schon vor geraumer Zeit *Flywheel-Speicher* um Lastspitzen zu kompensieren, und auf den *Detroit Auto Shows* wurden in den 60er und 70er Jahren einige *Gyro-Konzepte* vorgestellt.

Warum hat sich also ein auf den ersten Blick so gut geeignetes System zur Energiespeicherung bis heute noch nicht durchgesetzt? Worin liegen die Schwächen des Prinzips und der bisherigen Ausführungen?

Nach einem ersten Gespräch mit Prof. Dr. Jürgens, dem Institutsleiter des *Instituts für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik* war klar, dass es keinen Sinn macht, den Schwungradspeicher wieder einmal neu zu erfinden. Stattdessen definierten wir die *systematische Analyse der bisherigen Entwicklungen* als Kerngebiet meiner Arbeit. Und noch ein weiterer Punkt spricht für eine genaue Betrachtung der bisher entwickelten Schwungrad-Hybride:

In vielen Bereichen der High-End Forschung und gerade in der Automobilbranche geht es im weiteren Sinne um die Zukunft unserer Gesellschaft. Erfindungen wie die Verbrennungskraftmaschine, das Telefon oder das Internet haben unser Leben grundsätzlich verändert. Der Energiebedarf der Menschen steigt kontinuierlich, wobei die Abhängigkeit von unseren Ölreserven nur noch größer wird. Die Frage ist berechtigt: Was kommt als nächstes?

Nur eine systematische Analyse der Vergangenheit erlaubt einen Blick in die Zukunft!

Der nun folgende Abschnitt handelt von der Wichtigkeit einer systematischen, analytischen Vorgehensweise im Bezug auf die Entwicklung neuer Technologien, und ist in gewisser Weise eine Rechtfertigung des Titels dieser Arbeit.

2. Konkrete Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit lässt sich ja zum Teil bereits aus dem Titel ableiten. Es muss jedoch ad 1 definiert werden, was *systematische Analyse* im Zusammenhang mit Schwungradfahrzeugen bedeutet, und ad 2, welche Zwischenschritte oder Teilziele notwendig sind, um die Analyse durchführen zu können und sinnvolle Ergebnisse zu erzielen.

1. Im ersten Teil der Analyse bestand die Aufgabe darin, eine möglichst umfangreiche Datenbank über die bestehenden Schwungradfahrzeuge zu erstellen, eine Historienbeschreibung quasi, um auf Basis dieser Entwicklungstendenzen abzuleiten sowie den Entwicklungsverlauf im historischen Kontext zu analysieren und interpretieren.
2. Der zweite und wesentliche Teil dieser Arbeit war entwicklungsmethodischer Natur. Er bestand aus der Erstellung eines *Bewertungsschemas* für Schwungradfahrzeuge und der Anwendung desselben auf konkrete Fallbeispiele. Dabei war essentiell, Schwachstellen und Potentiale der bestehenden Ausführungen im Kontext des technologischen Standards aufzuzeigen und Lösungsvorschläge zu machen.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Bewertung, in Kombination mit den aus Punkt 1 hervorgegangenen Erkenntnissen, sollte eine Aussage darüber gemacht werden, welche Konzepte bzw. welche Technologien das größte Entwicklungspotential aufweisen. Darüber hinaus wird auch eine Antwort auf die Frage gesucht, ob die Zeit für kinetische Energiespeicher nun tatsächlich reif ist.

Eine untergeordnete Aufgabe, die sich jedoch im Laufe der Arbeit quasi von selbst erledigte, war, ein *Kompendium* der Schwungradhybride zu verfassen, das die Grundzüge der Auslegung beinhaltet und eine umfangreiche Sammlung der bisherigen Arbeiten bietet, um zukünftigen Entwicklern die Recherchearbeit zu erleichtern.

3. Entwicklungsmethodisch-theoretischer Hintergrund der systematischen Konzeptanalyse

Beinahe der gesamte akademische Wissenserwerb eines Ingenieurs während seiner Ausbildung an der Universität beruht auf dem Nachvollziehen bereits gelöster Probleme. Es wird in keinem Fall erwartet, dass der Student die fundamentalen Gleichungen der Physik oder Strömungslehre oder irgendeines anderen Teilgebietes des Maschinenbaus selbst neu entdeckt, da dieser Prozess nicht nur unglaublich zeitaufwändig wäre, sondern vermutlich etliche Lösungen auch stark fehlerbehaftet wären. Stattdessen werden dem hoffnungsvollen „Cand. Ing.“ bereits gelöste Beispiele präsentiert, diese analysiert und (hoffentlich) auch verstanden, denn Nachvollziehen ist um ein vielfaches schneller als neu Erfinden.

Nach Abschluss seines Studiums ist der Ingenieur mit umfangreichen Kompetenzen ausgestattet und vergisst leider allzu oft auf die Analyse konkurrierender und/oder historischer Produkte wenn es um die Entwicklung eines neuen geht. Selbst *Gustav Niemann*¹ verpackte im Vorwort seines Standardwerks *Maschinenelemente* (1) ein Plädoyer für die Analyse bestehender Systeme vor Beginn der eigentlichen Konstruktion. Aber es ist nicht nur die Zeitersparnis, die eine vorhergehende, umfangreiche Analyse rechtfertigt. Ein paar weitere Überlegungen, basierend auf Prof. Jürgens Vorlesung *Entwicklungsmethodik* und der dazugehörigen Unterlagen (2) kehren weitere Vorteile und aufs Erste schwer ersichtliche Aspekte hervor.

Ein erster Denkanstoß soll die Frage sein, was denn ein Konstruktionsprozess überhaupt ist. Im weiteren Sinne ist er der Versuch einer Vorhersage des Produktverhaltens auf Basis der bereits gewonnenen Erkenntnisse, die der Ingenieur als „wahr“, oder „richtig ansieht“, also auf Basis einer Historienbeschreibung. Je genauer die Geschichte, oder die vorhergehenden Konstruktionen dem gewünschten Produkt gleichen, desto besser kann das Verhalten des neuen Produktes vorhergesagt werden. Wir kommen also zu der hinlänglich bekannten Conclusio, dass eine Wiederholkonstruktion im Allgemeinen dem Anforderungsprofil besser nachkommt als die Erstkonstruktion.

Aber wann ist der Kundenwunsch tatsächlich erfüllt? Die Wünsche des Kunden müssen, um für den Konstrukteur von Wert zu sein, meist in ein Anforderungsprofil übersetzt bzw. erweitert werden.

Wenn man davon ausgeht, dass das Bauteilverhalten der individuellen Elemente der Konstruktion quantitativ auf analytischem Wege exakt vorhersagbar ist, dann ist die Güte der Vorhersage des gesamten Produktverhaltens direkt proportional zur Ausführlichkeit des Anforderungsprofils. Das Anforderungsprofil an sich muss jedoch gekonnt aus den Kundenwünschen abgeleitet und in quantitative Größen übersetzt werden. Wäre das Anforderungsprofil also zu 100% definiert, so könnte man – rein theoretisch - den Schritt der Erstellung eines Prototyps zur Verifikation überspringen und gleich in die Serienfertigung gehen.

Aber das nächste Problem liegt im genauen Elaborieren und der Formulierung des Anforderungsprofils an sich. Das widerspiegeln unzählige Beispiele in der Wirtschaft, in der immer wieder Erstserien so genannte „Kinderkrankheiten“ mit sich bringen, die dann in einer überarbeiteten Version, oder korrekt ausgedrückt in einer „Erneuerungskonstruktion“, beseitigt

¹ * in Rheine; † 1982 in München, Professor an der TU München und TU Darmstadt

werden. Durch genaue und kritische Analyse können (theoretisch) alle Eventualitäten berücksichtigt werden, da entweder schlechte Lösungen einen Schadensfall hervorgerufen haben können oder gute Ansätze einen direkten Anstoß für das Übernehmen einer Lösung liefern können. Dieser Sachverhalt wird durch ein Beispiel noch anschaulicher:

Wenn man an einen kinetischen Energiespeicher wie das hier behandelte Schwungrad denkt, so fallen dem Ingenieur als erstes die Parameter für die Auslegung des Energieinhaltes ein (Trägheitsmoment, Masse, Drehzahl, etc.). Nach der groben Dimensionierung geht es weiter mit der Ausführung aller „sichtbaren“ Elemente wie Schwungradmasse, Lager, Gehäuse, etc. Es besteht die Gefahr, auf einige „unsichtbare“ Faktoren wie zum Beispiel die Kreiselkräfte oder das thermische Verhalten des Systems im ersten Anlauf leicht zu übersehen. Diese konstruktiven Defizite treten möglicherweise erst in einem späten Entwicklungsstadium, in dem es schwierig wird, Änderungen vorzunehmen, oder gar erst bei Austestung des Prototyps zu Tage.

Die Analyse ist daher das effektivste Mittel, um aus den Fehlern Anderer zu lernen und diese nicht selbst zu begehen. Je komplexer ein Produkt ist, desto wichtiger ist es, dieses zuerst systematisch zu analysieren, da die Wahrscheinlichkeit, einen Teilaspekt des Anforderungsprofils oder eine Einflussgröße zu übersehen, mit zunehmender Anzahl an Teilen, Funktionen und Funktionsgruppen steigt. Gerade bei einem Schwungradhybrid ist man mit einer äußerst hohen Systemkomplexität konfrontiert, die weit über jene des ohnehin schon alles andere als trivialen Antriebseinheit eines konventionellen PKWs hinausgeht.

Durch die gegenseitige Vernetzung und Beeinflussung aller Module und Funktionsgruppen in einem Hybridfahrzeug ist es unabdingbar, einen holistischen Ansatz zu wählen und nicht nur den Schwungradspeicher an sich, sondern auch dessen Peripherie bis zu den Systemgrenzen des Basisfahrzeuges zu betrachten. Und selbst das kann noch zu wenig sein, da sowohl für das Nachvollziehen der Konstruktion als auch für die vergleichende Bewertung Kenntnisse über den Einsatzbereich des Fahrzeuges sowie der Konstruktion zu Grunde liegenden Lastkollektive oder Fahrzyklen erforderlich sind. Besonders im Fahrzeugbau können reale und ideale Fahrzyklen auch noch stark divergieren, sodass die hundertprozentige Ausnutzung des Potentials nicht gewährleistet werden kann.

Es ist also von großer Wichtigkeit, die Bauelemente und Module des zu analysierenden Schwungradhybrides und auch dessen Einsatzgebiet zu verstehen und beherrschen. Daher wurden im Zuge dieser Diplomarbeit auch Teilbereiche des Maschinenbaus elaboriert, die nicht in unmittelbarer und alleiniger Verbindung mit den Schwungradspeichern per se stehen, deren Hintergrundwissen aber für die Erstellung einer Bewertungsstrategie notwendig ist. Um den Seitenumfang der Arbeit nicht zu sprengen, wurden einige dieser Kapitel in den Anhang verlagert.

Doch umfangreiches Hintergrundwissen, welches einen guten „Allrounder“ auszeichnet, spielt bezüglich der Systemanalyse noch eine weitere, wesentliche Rolle. Oft sind in der Geschichte der Technik Erfindungen getestet oder sogar in Serie gefertigt worden, nach kurzer Zeit und erfolgloser Versuchsperiode von der Bildfläche verschwunden und Jahre oder gar Jahrzehnte später wieder aufgetaucht. Bei etlichen Erfindungen, die plötzlich einen unerwarteten Siegeszug feierten, war nicht allgemein bekannt, dass es sie schon einmal gab. Im Falle der Schwungradfahrzeuge ist dies wohl mehr als zutreffend.

Nun aber soll – wie es in der Aufgabenstellung bereits erwähnt wurde – erklärt werden, *weshalb* diese Technologie schon mehrmals wieder verschwunden ist, und ob dies auch heute ein weiteres Mal der Fall sein wird. Doch welche Voraussetzungen braucht der Ingenieur, um eine solche Frage beantworten zu können?

Im den letzten Jahrzehnten konnte ein starker Trend in Richtung Spezialisierung von Arbeitskräften wahrgenommen werden. Auch Prof. Jürgens spricht in (2) von der Segregation der Aufgabenbereiche und der Ausbildung stark spezialisierter Versuchs-, Berechnungs- und Konstruktionsingenieure. Dem Spezialisten bleibt jedoch der holistische Blick untersagt und er ist somit kaum in der Lage zu unterscheiden, ob es das Konzept der Erfindung war oder deren konkrete Umsetzung, welche für Erfolg oder Misserfolg verantwortlich war.

So besagen zum Beispiel die fundamentalen Gleichungen der Physik, dass ein Schwungradspeicher idealer Weise hohe Drehzahlen aufweist, um dadurch Energiedichten zu erreichen, die mit den bisher gut erforschten Batteriesystemen konkurrenzfähig sind. Die Drehzahl des Speichers ist jedoch durch die Tangentialspannungen² der Schwungradmasse limitiert, und wird der Werkstoff sowie die Geometrie nicht sorgfältig und adäquat gewählt, so lassen sich die theoretischen Vorteile nicht vollends ausschöpfen. Das Konzept an sich erlaubt also hohe Energiedichten, aber eine „schlechte“ Umsetzung kann diese Vorteile oft zunichte machen. Das Wort „schlecht“ ist bewusst unter Anführungszeichen gesetzt, da es immer im historischen Kontext zu sehen ist, und eine Bewertung nur unter Berücksichtigung des damaligen Standes der Technik durchgeführt werden kann. Technische Entwicklungen stehen generell in starker Wechselwirkung mit ihrem Umfeld, wie noch in Abschnitt 7.1 beschrieben werden wird – ein Umstand der bei der Analyse nicht vernachlässigt werden darf.

4. Physikalische Grundlagen der Schwungradspeicher

Um Hybridkonzepte, welche das Schwungrad als mechanischen Energiespeicher einsetzen, bewerten zu können, ist es unabdingbar, sich mit der Physik, welche diesem Maschinenelement zu Grunde liegt, zu beschäftigen. Es stellt sich heraus, dass es nur wenige Parameter sind, die über den Energieinhalt des Systems entscheiden. Da es sich jedoch um eine mobile Anwendung handelt, gestaltet sich eine optimale Auslegung eines Schwungradsystems im Bezug auf Gewicht, Bauraum, dynamisches Verhalten, Crashesicherheit etc. alles andere als trivial. Es liegt ein *mehrdimensionales Optimierungsproblem* vor, und ein Gesamtoptimum kann nur durch gekonnte Gewichtung der Parameter erreicht werden. Das bedeutet konsequenter Weise, dass die physikalischen Parameter, welche dem Schwungradspeicher zugrunde liegen, einwandfrei beherrscht werden müssen.

Im vom Autor verfassten Anhang sind die wichtigsten physikalischen Zusammenhänge, welche für die Auslegung von Schwungradspeichern relevant sind, besprochen und analytisch beschrieben. Die nun folgenden Ausführungen über die energetischen Eigenschaften des Schwungrades, dessen gyroskopische Kräfte und Zusammenhänge der Festigkeitslehre stellen eine kurze Zusammenfassung des Anhangs dar. Es werden lediglich die für die konstruktive Auslegung von Schwungradspeichern relevanten Zusammenhänge, nicht aber die zugrunde liegenden Herleitungen präsentiert. Diese sind dem Anhang zu entnehmen.

² Siehe Kapitel 4.4

4.1 Grundgrößen der energetischen Auslegung

Der Energieinhalt ist die wohl wichtigste technische Spezifikation eines Energiespeichers. So aussagekräftig diese Größe auch ist, so einfach ist sie im Falle eines Schwungrades zu bestimmen, was dieser Art der Energiespeicherung auch wesentliche Vorteile hinsichtlich des Energiemanagements von Fahrzeugen einbringt, wie diese Arbeit in weiterer Folge noch zeigen wird.

Der Energieinhalt des Flywheels hängt lediglich von 2 Faktoren ab: dem Trägheitsmoment des Rotors und seiner Drehzahl.

Um zur mathematischen Beschreibung des Trägheitsmoments zu gelangen, müssen zuerst ein paar Überlegungen über die kinetische Energie einer rotierenden Masse angestellt werden.

Wird eine Masse m auf einer geraden Bahn mit der Geschwindigkeit v bewegt, so errechnet sich ihre Energie zu:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

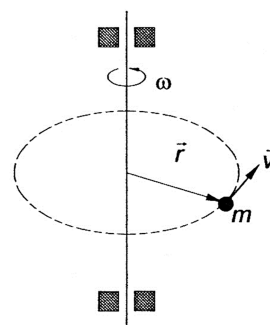


Abbildung 1: Massenpunkt auf einer Kreisbahn (3)

Bewegt sich die Masse nun auf einer Kreisbahn, so ist die Geschwindigkeit v proportional zur Winkelgeschwindigkeit ω und dem Radius r und es gilt: $v = r * \omega$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(r\omega)^2 = mr^2 \frac{\omega^2}{2}$$

Eine Analogie zur longitudinalen Bewegung wird sofort offensichtlich. Die Winkelgeschwindigkeit ω entspricht der Geschwindigkeit v und der Ausdruck mr^2 ist äquivalent der Masse bei der Längsbewegung und wird als Trägheitsmoment I bezeichnet.

$$E_k = \frac{1}{2}I\omega^2$$

Bei einem Hybridfahrzeug mit Schwungradspeicher soll - bei der Nutzbremmung - die kinetische Energie zwischen Translation (des gesamten Fahrzeuges) und Rotation (des Schwungrades) hin und her fließen, und das möglichst verlustfrei. Das in Abbildung 2 skizzierte Gedankenexperiment zeigt, dass bei Einwirken einer Kraft, Arbeit von Rotation in Translation (und umgekehrt) gesteckt werden kann. Im reibungsfreien Fall könnte also bei einer Bremsung die gesamte kinetische Energie des Fahrzeuges in den Schwungradspeicher und bei Bedarf wieder zurück fließen, sodass das Fahrzeug wieder auf die Ausgangsgeschwindigkeit beschleunigt werden kann. Die Energie „pendelt“ zwischen den 2 Formen:

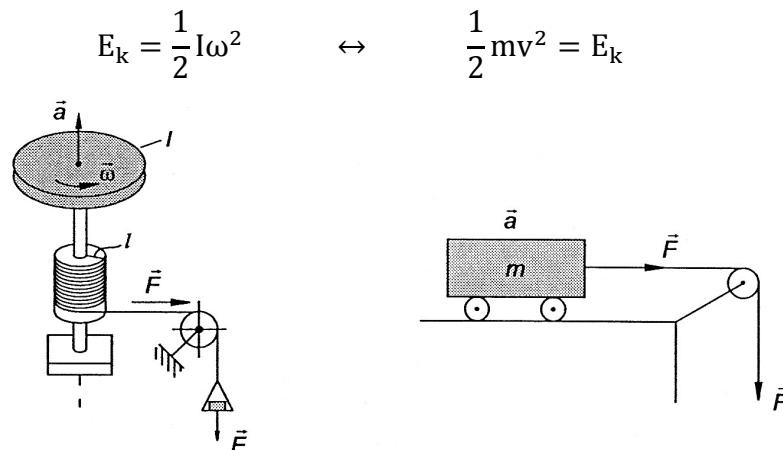


Abbildung 2: Gedankenexperiment zur dynamischen Grundgleichung (3)

Die große Herausforderung liegt nun in der Koppelung der beiden Energieformen. Meist erfolgt die Energieübertragung elektro-mechanisch und ist von Verlusten unterschiedlichster Art behaftet, wie die drei Analysebeispiele ab Kapitel 9 noch ausführlich demonstrieren werden.

Selbst wenn elektrische Maschinen an sich hohe Wirkungsgrade von 95% und mehr erreichen, ist die *Round-Trip-Efficiency*³ des gesamten *Flywheel*-unterstützten Hybrides um ein Vielfaches schlechter. Das „Hin- und Herspielen“ der Energie, und vor allem die auftretenden (Umwandlungs-)Verluste, sind daher Kernpunkt der Analyse der bestehenden Systeme in der Diplomarbeit.

Über die in einem Schwungrad gespeicherte Energie entscheiden also *Drehzahl* und *Trägheitsmoment*, welches wiederum durch die Masse und deren geometrische Anordnung bestimmt ist. Es bestehen also folgende Möglichkeiten, den Energieinhalt zu erhöhen:

1. **Gewichtserhöhung der Schwungmasse:** Diese Möglichkeit ist bei mobilen Anwendungen nicht zu bevorzugen, da eine höhere Beschleunigungsleistung des Gesamtfahrzeuges von Nöten ist, und vor allem hohe Fliehkräfte⁴ den Rotor erheblich belasten.
2. **Vergrößerung des Radius der Schwungmasse:** Bringt den gravierenden Nachteil der Bauraumvergrößerung mit sich, welcher im Kfz nicht tolerierbar ist und resultiert auch in höheren Umfangsgeschwindigkeiten.
3. **Erhöhung der Betriebsdrehzahl:** Diese ist lediglich von den Materialeigenschaften der Schwungmasse und von den Lagern begrenzt. Da die Winkelgeschwindigkeit quadratisch in den Energieinhalt eingeht, ist diese Variante grundsätzlich zu bevorzugen. Über die durch erhöhte Fliehkraft hervorgerufenen Probleme bezogen auf die Festigkeit und Sicherheit des Schwungrades wird in Kapitel 4.4 diskutiert.

³ Englische Bezeichnung für Gesamtwirkungsgrad des Energieflusses vom gebremsten Rad zum Speicher und wieder zurück zum angetriebenen Rad.

⁴ Eine analytische Beschreibung des Spannungszustandes ist in Abschnitt 4.4 zu finden.

4.2 Kräfte am Kreisel im drehenden Referenzsystem

Bring man einen *gefesselten Kreisel* in ein rotierendes System, welches sich mit einer definierten Winkelgeschwindigkeit ω_s dreht, so wirkt das so genannte *Kreiselmoment* M_k , welches versucht, die *Drehimpulsachse* \vec{L} des Kreisels und ω_s parallel zu stellen. Es gilt

$$\vec{M}_k = \vec{L} \times \vec{\omega}_s$$

wobei das *Störmoment* \vec{M}_s gleich dem *Kreiselmoment* \vec{M}_k und $\vec{\omega}_s$ gleich der *Präzessionswinkelgeschwindigkeit* $\vec{\omega}_p$ ist, welche im Anhang unter 3.6.1 genauer beschrieben ist.

Dreht sich also das Fahrzeug im Raum um eine Achse, welche nicht mit der *Figurenachse*⁵ des Kreisels zusammenfällt, so ist dieser bestrebt, seine eigene Rotationsachse mit der Rotationsachse des Fahrzeuges in Deckung zu bringen. Dadurch entstehen zusätzliche Lagerbelastungen, welche bei der Auslegung berücksichtigt werden müssen.

Für die Berechnung der gyroskopischen Kräfte und der daraus resultierenden Lager- bzw. Bauteilbelastungen im Allgemeinen sind die während des Fahrbetriebs auftretenden Bewegungen ausschlaggebend.

In der Fahrdynamik spricht man bei *Nick-* und *Wankbewegungen* von so genannten „kleinen“ Bewegungen, welche sich in der Modellbildung gut linearisieren lassen. Der *Gierwinkel* ω_z kann deutlich größere Werte annehmen. Daher ist der Einbau des Schwungrades vorzugsweise so vorzusehen, dass die Drehachse vertikal steht.

Die Größenordnungen, in welchen sich die *Nick-* und *Wankwinkel* eines Fahrzeuges im innerstädtischen Betrieb bewegen, können Tabelle 1 entnommen werden.

Beschreibung des Manövers	Ebene	Winkel α	Rate $\dot{\alpha}$
		[Grad]	[Grad/s]
Beschleunigung von 0 bis 50 km/h	Nicken	-0,36	0,36
Spurwechsel bei 50 km/h	Wanken	-3,00	4,50
Bremsmanöver 50 auf 30 km/h	Wanken	0,75	0,75
Sanfte Rechtskurve	Wanken	-3,00	3,00
Einfahren in Drainagerinne	Nicken	3,00	0,70
Überfahren tiefer Drainagerinne	Nicken	-3,00	1,50
Starke Linkskurve	Wanken	6,00	6,00
Auffahren auf 7%-Rampe bei 35 km/h	Nicken	-6,00	6,00
Sanfte Linkskurve	Wanken	3,00	1,50
Starke Bremsung bis Stillstand	Nicken	0,75	0,75
Spurwechsel bei 30 km/h	Wanken	-6,00	6,00
Auffahren auf 5,4%-Rampe bei 55 km/h	Nicken	-4,60	9,30

Tabelle 1: Typische Größenordnungen der Winkelbeschleunigung und Amplitude beim NFZ (4)

⁵ Beim symmetrischen Kreisel ist die Figurenachse gleich der Symmetrie- und Drehachse.

4.3 Lagerkräfte bei Winkelbeschleunigung

Die Gleichung $\vec{M}_k = \vec{L} \times \vec{\omega}_s$ gilt nur für den Fall einer stationären Drehung des Bezugssystems, in welchem sich der Kreisel befindet. Liegt eine Winkelbeschleunigung vor, so können die auf die Lager des Schwungrades wirkenden Kräfte nur mehr unter Zuhilfenahme der so genannten *Eulergleichung* analytisch berechnet werden. An dieser Stelle wird auf Fachliteratur wie zum Beispiel (5) verwiesen.

4.4 Festigkeit und Spannungen in Schwungrädern (6),(7)

Aus den soeben besprochenen Punkten sowie den im Anhang befindlichen Herleitungen geht klar und deutlich hervor, dass der Energieinhalt eines Schwungradspeichers durch die Drehzahl begrenzt ist. Diese wiederum wird durch konstruktive Faktoren limitiert. Werden konventionelle Wälzlager eingesetzt, so begrenzen diese oftmals die Drehzahl genauso wie die Erwärmung der elektrischen Maschine, falls diese in integraler Bauweise mit dem Schwungrad verbaut ist. Meist sind es jedoch die Fliehkräfte, die den Werkstoff an seine Grenzen treiben und somit den Energieinhalt bzw. die Energiedichte beschränken.

Um ausreichende Betriebssicherheit zu gewährleisten und kritische Betriebszustände zu vermeiden, dürfen die Spannungen im Werkstoff die maximal zulässigen Werte nicht überschreiten.

Bauteile, welche mit der Winkelgeschwindigkeit ω umlaufen, unterliegen Fliehkräften nach dem *d'Alembert'schen Prinzip*. Diese Trägheitskräfte negativer Massenbeschleunigung können angesetzt werden als:

$$\omega^2 r dm = \omega^2 r \rho dA dr$$

Es gilt nun die Fliehkräfte auf Spannungen zurück zu führen und deren Maximum zu ermitteln. Der erste Fall, der betrachtet werden soll, ist eine umlaufende Vollscheibe.

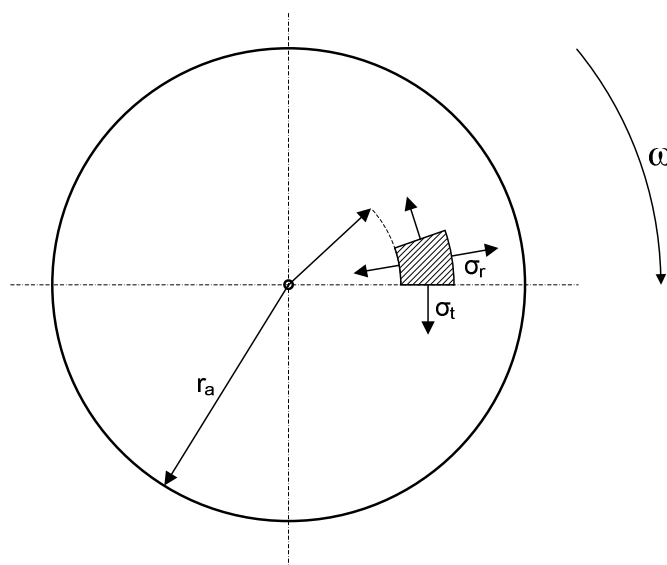


Abbildung 3: Umlaufende Vollscheibe mit Volumenelement (6)

Die größten Spannungen sind die Tangentialspannungen σ_t am Innenrand der Scheibe, da hier der tragende Querschnitt am kleinsten ist, jedoch die Fliehkräfte aufgrund der außenliegenden Massen am größten sind (7). Es gilt:

$$\sigma_{t \max} = \rho \omega^2 r_a^2 \frac{3 + \mu}{8} \left[2 + \left(\frac{r_i}{r_a} \right)^2 \left(1 - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} \right) \right]$$

wobei μ die Querkontraktionszahl beschreibt, und für Stahl mit ca. 0,3 angenommen werden kann. Nach Vereinfachung des Ausdrucks und Einsetzen des Radienverhältnisses $\frac{r_i}{r_a} \approx 0$ im Falle einer *kleinen Innenbohrung* erhält man:

$$\sigma_{t \max 0} = \rho \omega^2 r_a^2 \frac{3 + \mu}{4}$$

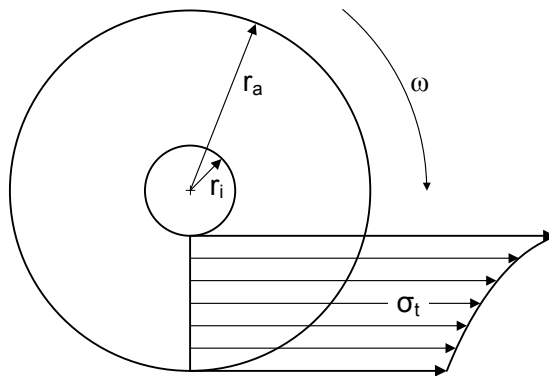


Abbildung 4: Spannungsverlauf in der gebohrten, umlaufenden Scheibe (6)

Ausgehend von den Gleichungen können die Beziehungen für eine ungebohrte Scheibe hergeleitet werden. Setzt man $r_i = 0$, so erhält man:

$$\sigma_{t \text{ voll}} = \rho \omega^2 r_a^2 \frac{3 + \mu}{8} \left[1 - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} \left(\frac{r}{r_a} \right)^2 \right]$$

$$\sigma_{r \text{ voll}} = \rho \omega^2 r_a^2 \frac{3 + \mu}{8} \left[1 - \left(\frac{r}{r_a} \right)^2 \right]$$

Im Mittelpunkt der Vollscheibe gilt $r = 0$ und in Folge $\sigma_{t \text{ voll}} = \sigma_{r \text{ voll}}$ mit der Größe:

$$\sigma_{\max \text{ voll}} = \rho \omega^2 r_a^2 \frac{3 + \mu}{8}$$

Man erkennt, dass die maximale Spannung einer Scheibe mit kleiner Bohrung doppelt so groß ist wie die der Vollscheibe. Hochbelastete, schnelldrehende Bauteile sollten also tunlichst ungebohrt ausgeführt werden. Eine Lösung für diese schwierige Welle-Scheibe-Verbindung ist ein angeschmiedetes Wellenende oder ein angeschraubter Wellenflansch nach *Zwerenz und Schaubberger* (8)

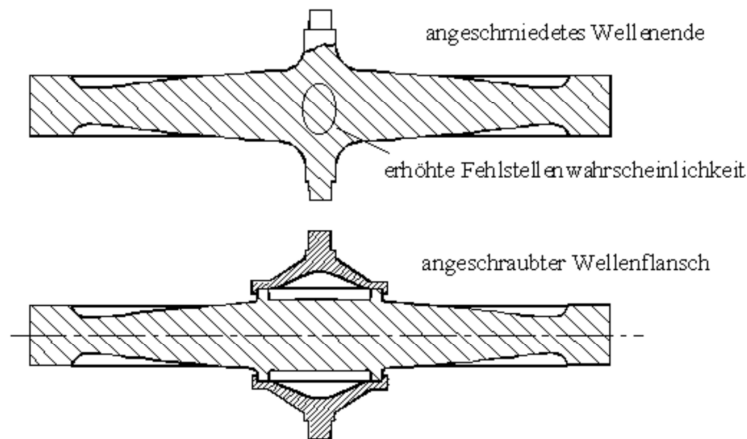


Abbildung 5: Mögliche Welle-Scheibe-Verbindungen zur Reduktion der Spannungen im Zentrum (8)

Es ist jedoch nicht immer sinnvoll, eine Scheibe gleicher Dicke zu betrachten und deren Spannungsverteilung zu berechnen. Vielmehr lohnt es sich, eine optimale Spannungsverteilung vorzugeben und daraus die Dicke der Scheibe abzuleiten. Eine Lösung dieses Problems ist seit Langem bekannt und wird als *de Laval Scheibe*, oder *Scheibe gleicher Festigkeit* bezeichnet.

Der Werkstoff kann optimal ausgenutzt werden, für den Fall dass:

$$\sigma_r = \sigma_t = \sigma$$

Ermittelt man hieraus den Höhenverlauf der Scheibe, so ergibt sich:

$$h(r) = h_0 e^{-\rho(\omega r)^2 / (2\sigma)}$$

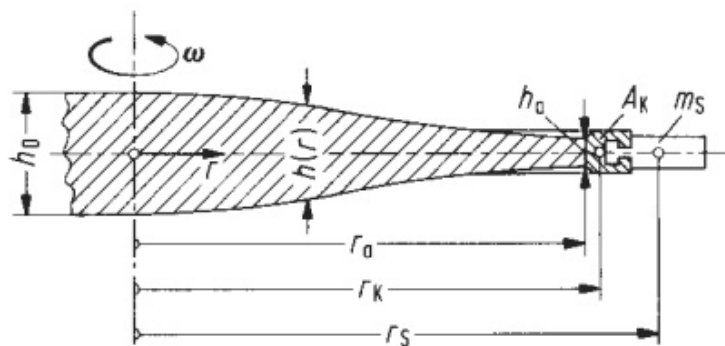


Abbildung 6: Scheibe gleicher Festigkeit (6)

In jedem Fall – egal ob mit oder ohne Bohrung ausgeführt – geht die Dichte des Rotorwerkstoffes linear in die Berechnung der Tangentialspannungen der Schwungscheibe ein. Abschnitt 4.1 hat gezeigt, dass der Energieinhalt zwar linear mit dem Massenträgheitsmoment des Rotors, aber quadratisch zu dessen Drehzahl ansteigt. Es folgt, dass sich leichte, hochfeste Werkstoffe am besten für Schwungräder hoher Energiedichte eignen, da sie eine geringere Fliehkraftbelastung hervorrufen und somit höhere Drehzahlen ermöglichen.

4. Energiespeicher für Hybridfahrzeuge

Da es sich bei der in dieser Arbeit betrachteten Thematik um eine mobile Anwendung handelt, scheiden einige Speichermethoden der Energiespeicherung schon alleine auf Grund ihrer Größe und ihres Gewichts aus. Energie- und Leistungsdichte stellen die wichtigsten Kenngrößen der Energiespeicher dar, und die Beträge des Energieinhalts und der maximalen Leistung müssen auf das strategische Energiemanagement des Fahrzeugs abgestimmt werden.

Im Segment der Hybridfahrzeuge haben aber dennoch stark unterschiedliche Technologien Einsatz gefunden. Neben der bereits etablierten, aber noch immer nicht vollends ausgereiften und zufriedenstellenden Batterietechnologie sind elektrische Speicher (Kondensatoren, sog. *SuperCaps*) und auch das Schwungrad in den letzten Jahren vermehrt im Gespräch. Nachdem alle drei der beispielhaft erwähnten Systeme sich zumindest bis zu einem gewissen Grad als praxistauglich erwiesen haben, muss der direkte Vergleich systematisch erfolgen. Eine Methode für den Vergleich von Energiespeichern im Bezug auf ihre Energie- und Leistungsdichte sei im Kapitel 4.3 präsentiert.

4.1 Erörterung der allgemeinen Möglichkeiten

Energiespeicher haben – wie der Name bereits verrät – die Aufgabe, Energie zu speichern um diese dann zu einem gewünschten späteren Zeitpunkt wieder frei zu geben. In den meisten Fällen muss die Energie vor der eigentlichen Speicherung in eine speicher- oder „transportierbare“ Form umgewandelt werden. Dieser Prozess ist mit Verlusten verbunden, die es so gering wie möglich zu halten gilt. Daraus folgt, dass aber auch eine steigende Anzahl an Lade- und Entlade- sowie Energietransformationszyklen den Gesamtwirkungsgrad verschlechtert.

Beim Schwungrad handelt es sich um einen *kinetischen Energiespeicher*. Das bedeutet, dass die zugeführte Energie – in welcher Form auch immer diese zum Speicher gelangt – in Form von Bewegung einer Masse gespeichert wird. Diese Aussage lässt schon erahnen, dass die Einteilung der Energiespeicher nach der gespeicherten Hauptenergieform erfolgt und nicht nach jener, die ihnen während des Auf- oder Entladungsprozesses zu- oder angeführt wird.

Zum Beispiel wird einer Batterie Energie in elektrischer Form zugeführt, welche aber in chemischer Form gespeichert wird. Es handelt sich also um einen *chemischen Energiespeicher*. Abbildung 7 stellt eine Übersicht der Möglichkeiten zur Energiespeicherung dar.

Betrachtet man die vielen unterschiedlichen Möglichkeiten, die uns zur Speicherung von Energie zu Verfügung stehen, so muss man sich die Frage stellen, warum für diese Arbeit der Schwungradspeicher gewählt wurde, und keine andere der verfügbaren Optionen. Eine Antwort auf diese Frage wird Kapitel 4.3.3 geben bzw. wird im Laufe dieser Arbeit mehrmals darauf Bezug genommen werden.

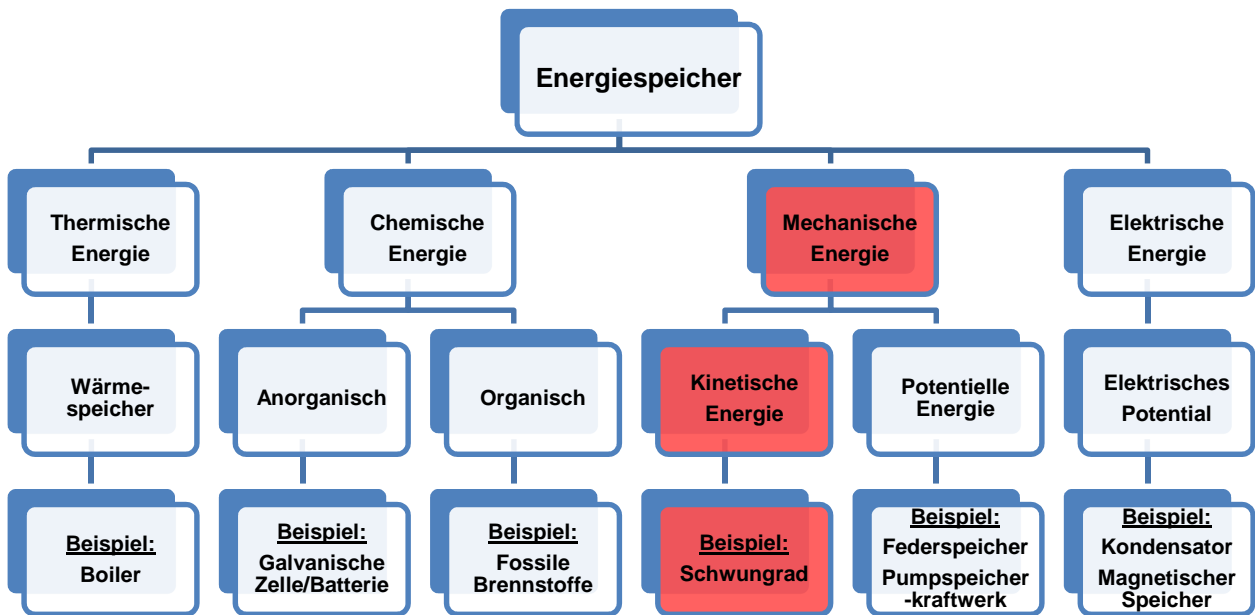


Abbildung 7: Arten der Energiespeicherung

4.2 Die Energiedichte – Ein *Knock-Out* Kriterium

Bereits durch öffentliche Medien wird man über eine Vielzahl alternativer Energien für den Individual- und Güterverkehr informiert. Angefangen von „neuen“ fossilen Brennstoffen, wie Erdgas, über erneuerbare Energien bis hin zu diversen elektrischen Quellen reicht das vielversprechende Angebot, welches als Hoffnungsträger für die baldige Unabhängigkeit der Menschen vom Erdöl gesehen wird. Und dennoch gab das Europäische Parlament 2009 an, dass sich unser Verkehrswesen zu 98 % auf fossile Brennstoffe stützt.

Grund hierfür ist nicht wie vielerorts angenommen eine Verschwörungstheorie, oder die Tatsache, dass die Ölindustrie jegliche Entwicklung alternativer Energien sofort im Keim erstickt, sondern eine physikalische Eigenschaft der Energieträger, nämlich die so genannte *Energiedichte*.

Während bei stationären Anwendungen Platz und Gewicht eine geringere Rolle spielen, so stehen diese Eigenschaften bei mobilen Anwendungen nahezu immer im Vordergrund. Besonders im Flugverkehr, wo das Startgewicht proportional zum Energieverbrauch ist, blieben die großen Erfolge anderer Energiequellen als fossiler Brennstoffe bislang aus⁶.

Eine Gegenüberstellung von Fakten bringt Klarheit und zeigt den eigentlich fast beängstigenden Vorteil von Benzin bzw. Diesel gegenüber anderer Energiequellen. Dieser Umstand muss von den heutigen Ingenieuren als Herausforderung gesehen werden.

Die letzten drei Zeilen von Tabelle 2 beschreiben Kraftstoffe, deren freisetzbare Verbrennungsenergie zum Teil in der Umgebungsluft gespeichert ist, wodurch die Energiedichte

⁶ Es sei erwähnt, dass es im Bereich der nicht kommerziellen Luftfahrt bereits einige elektrische Flugzeuge gibt. Im Jahr 2012 will der Schweizer Bertrand Piccard mit einem Solarflugzeug die Welt umrunden.

bezogen auf das reine Brennstoffgewicht noch weiter ansteigt. Für die vollständige Verbrennung eines Massenanteils Benzin oder Diesel werden 14 Massenanteile Luft benötigt. Müsste diese Luft an Bord mitgeführt werden, würde der PKW von heute vermutlich anders aussehen.

Auch zur Ermittlung der Leistungsdichte dieser Energieträger muss noch etwas angemerkt werden. Der Leistungsfluss einer Batterie lässt sich (unabhängig von der Effizienz und der Art des Verbrauchers) exakt durch die Messung von Strom und Spannung mit anschließender Produktbildung ermitteln. Im Falle eines Kraftstofftanks lässt sich nur ein Massenstrom in [g/s] messen, der aber völlig willkürlich gewählt werden kann. Dieser Massenstrom steht aber nicht notwendigerweise in direktem Zusammenhang mit der Leistung des Antriebsaggregates, sondern hängt vom eigentlichen Verbrennungsprozess und somit von der konkreten Ausführung der Verbrennungskraftmaschine (VKM) an sich ab. Es müsste also auch das Gewicht der VKM beachtet werden, um eine gravimetrische Leistungsdichte berechnen zu können. Die Systemgrenzen sind somit nicht so eindeutig festsetzbar wie bei elektrischen oder elektromechanischen Energiespeichern.

Speicherart	Leistungsdichte [W/Kg]	Energiedichte [Wh/Kg]	Temperaturbereich [°C]
Blei-Säure-Batterie (AGM)	400	35	-20 ... +70
NickelMetal Hydrid-Batterie			
-energieoptimiert	500	90	-10 ... +45
-leistungsoptimiert	1300	46	-10 ... +45
Lithium Ionen-Batterie			
-energieoptimiert	600	200	-30 ... +60
-leistungsoptimiert	3000	80	-30... +60
SuperCaps	1500	5	-40 ... +65
Schwungradspeicher (Kohlefaserkunststoff)	3000	100	Nahezu unabhängig
Benzin	Je nach Antrieb bis 1500	12.800	Nahezu unabhängig
Diesel	Je nach Antrieb bis 1200	11.800	Nahezu unabhängig
Wasserstoff	Je nach Zelle bis 50	33.000	

Tabelle 2: Energiedichte typischer Speicher für Hybridfahrzeuge, aktualisiert aus (9)

Nachdem es sich gerade bei Batterien um einen Energieträger handelt, dessen unterschiedliche Vertreter in etwa gleich gut erforscht wurden, sind die Schwankungen der Energiedichte je nach Bauart nicht so besonders groß. Das Kapitel 4 hat gezeigt, dass eine Verbesserung der Energiedichte des Schwungradspeichers idealer Weise über die Erhöhung der Betriebsdrehzahl zu erreichen ist. Diese ist wiederum durch die Werkstofffestigkeit bezogen auf die Werkstoffdichte begrenzt. Durch die fortschrittliche Entwicklung der Faserverbundwerkstoffe in den letzten Jahren konnten diese Werte deutlich angehoben werden, und es ist auch noch eine weitere Verbesserung zu erwarten, wie auch Kapitel 7.1.3 bestätigt.

4.3 Gegenüberstellung im Ragone-Plot

Diese Darstellung fällt in die Kategorie der *Bubble-Charts* und ist ein adäquates Werkzeug, um die Effizienz verschiedener Energiespeicher zu vergleichen. In solch einem *Ragone-Diagramm* wird die Energie- über die Leistungsdichte der jeweiligen Speichermedien aufgetragen. Durch die Wahl eines doppellogarithmischen Maßstabs können Energiespeicher unterschiedlichsten Typs und stark divergierender Spezifikationen miteinander verglichen werden.

Die Ordinate, welche die Energiedichte repräsentiert, veranschaulicht also, wie viel Energie pro Gewichtseinheit zur Verfügung steht, während die Leistungsdichte auf der Abszisse ein Maß dafür ist, wie schnell diese Energie abgegeben werden kann.

Wird ein Flywheel so wie z.B. beim *Power-KERS* in der Formel 1 strategisch als „Überhol-Booster“ eingesetzt, so ist die Angabe einer großen Energiemenge innerhalb kurzer Zeit von Bedeutung. Bei einem Schwungradspeicher, der einen Bus in einem Nahverkehrsnetz von Station zu Station bringen soll, wird man freilich mehr Wert auf die Energiedichte, also in weiterer Folge „Reichweite/kg“ legen.

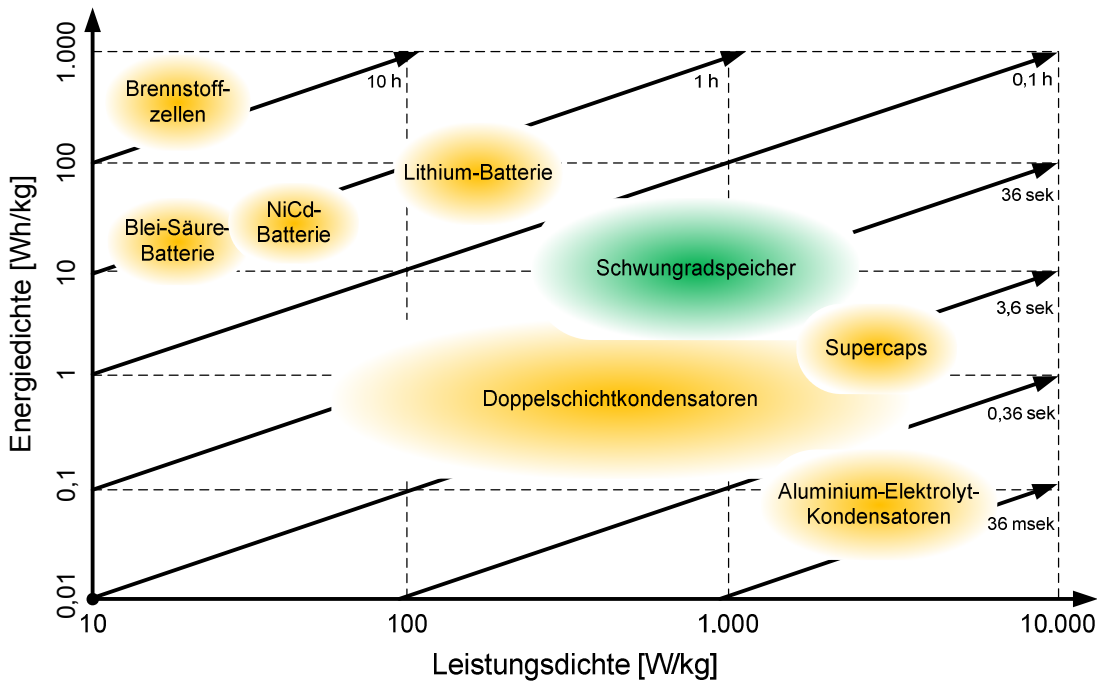


Abbildung 8: Ragone Plot verschiedener Energiequellen, erweitert aus den Daten von(10)

Die wesentlichen Charakteristika der momentan gebräuchlichen und mit dem Flywheel konkurrierenden Speicherarten werden folgend kurz umrissen.

4.3.1 Batterien für Hybridfahrzeuge

Batterien sind - neben den absolut dominierenden fossilen Brennstoffen - nach wie vor die am weitesten verbreiteten Energiespeicher in hybriden Fahrzeuganwendungen. Wie auch aus dem Kapitel 1.1 des Anhangs hervor geht, hat diese Speicherart eine mehr als hundertjährige

Geschichte, und wurde immer schon als eine für Kraftfahrzeuge geeignete Speichermethode angesehen, wird aber den heutigen Anforderungen noch immer nicht vollständig gerecht. Um die Entwicklung voran zu treiben wurde in den USA das von der Regierung unterstützte *United States Advanced Battery Consortium*, kurz *USABC* gegründet. Die kurz-, mittel- und langfristigen Ziele wurden definiert und sind in folgender Tabelle dargestellt. Aus der detaillierten Betrachtung der gängigen Batterietypen, die auf den nächsten Seiten folgt, geht hervor, dass die mittelfristigen „Commercialisation Criteria“, also die Voraussetzungen für einen erfolgreichen kommerziellen Einsatz bereits erreicht wurden. Man erkennt auch, dass sich leistungsoptimierte Batterien stark von Energieoptimierten unterscheiden, worauf Tabelle 3 nicht Rücksicht nimmt.

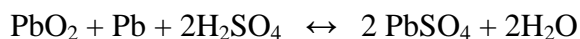
	Mid-Term Criteria	Commercialization Criteria	Long-Term Criteria
Price (\$/kWh)	< 150	< 150 (75 desired)	< 100
Cycle Life	600 @ 80 % DOD	1000 @ 80 % DOD 1600 @ 50 % DOD 2670 @ 30 % DOD	1000 @ 80 % DOD
Lifetime Range (miles)	100.000	100.000	100.000
Calendar Life	5 years	10 years	10 years
Power Density	250 W/l	460 W/l	600 W/l
Energy Density	135 Wh/l	230 Wh/l	300 Wh/l
Specific Power	150 W/kg	300 W/kg	400 W/kg
Specific Energy	80 Wh/kg	150 Wh/kg	200 Wh/kg
Regenerative Power	75 W/kg	150 W/kg	200 W/kg
End of Life (EOL)	20 % of rated power and capacity spec.	20 % of rated power and capacity spec.	20 % of rated power and capacity spec.
Operating Performance	- 30° to + 65° C	20 % loss at extremes of -40° and +50° C	- 40° to + 85° C
Normal Charge	6 hrs, 20 -100 % SOC	6 hrs, 20 -100 % SOC	3 - 6 hrs, 20 -100 % SOC
High Rate Charge	< 15 min, 40 -80 % COC	<30 min@150 W/kg 20 -70 % SOC	< 15 min, 40 -80 % COC
Efficiency at EOL	75 %	80 %	80 %

Tabelle 3: Entwicklungsziele für Batteriespeicher nach USABC, Stand 2007 (11)

Für Fahrzeuganwendungen kommen bestimmte Batterietypen in Frage. Vier bekannte Vertreter, welche mit dem Schwungradspeicher konkurrieren werden nun kurz erklärt.

- **Blei-Batterien (Pb/PbO₂)**

Der wohl bekannteste Vertreter dieser Batterieart ist die *Pb-Flüssigsäure-Batterie*, welche in Fahrzeugen als Starterbatterie eingesetzt wird. Zwei weitere Vertreter, die auf dem gleichen chemischen Prinzip basieren, sind die *Pb-Gel-Batterie* und die *Pb-AMG-Batterie*, wobei *AMG* für *Absorbent Glass Mat* steht. Die Reaktionsgleichung ist für alle Typen dieselbe:



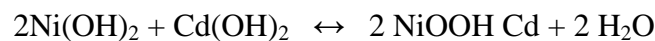
Typische Kenndaten der <i>Bleibatterien</i>			
		Elektrofahrzeugbatterie (energieoptimiert)	Hybridfahrzeugbatterie (leistungsoptimiert)
Gravimetrische Energiedichte	[Wh/kg]	35	32
Gravimetrische Leistungsdichte	[W/kg]	200	430
Volumetrische Energiedichte	[Wh/l]	90	68
Volumetrische Leistungsdichte	[W/l]	510	910

Tabelle 4: Typische Kenndaten der Bleibatterie (11)

- **Nickel-Cadmium-Batterien (Ni/Cd)**

Da die Leerlaufspannung dieses Systems mit 1,3 V deutlich geringer ist als bei Bleibatterien, erfordert der Aufbau einer Fahrzeugbatterie üblicherweise mindestens 150 Zellen.

Charakteristisch für diesen Batterietyp ist die Entstehung von Wasser während des Ladevorganges und der Verbrauch desselben während der Entladung:

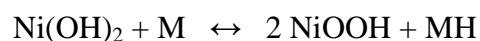


Typische Kenndaten der <i>Nickel-Cadmiumbatterien</i>			
		Elektrofahrzeugbatterie (energieoptimiert)	Hybridfahrzeugbatterie (leistungsoptimiert)
Gravimetrische Energiedichte	[Wh/kg]	50	32
Gravimetrische Leistungsdichte	[W/kg]	200	700
Volumetrische Energiedichte	[Wh/l]	150	100
Volumetrische Leistungsdichte	[W/l]	600	2000

Tabelle 5: Typische Kenndaten der Nickel-Cadmiumbatterie (11)

- **Nickel-Metallhydrid-Batterien (Ni/MH)**

Sie werden als Nachfolger der Ni/Cd-Batterie angesehen, weisen aber eine ähnliche Leerlaufspannung von etwa 1,25 bis 1,35 V auf. Eine Besonderheit stellt die Basisreaktion der Zellreaktion dar, welche ohne Beteiligung des Elektrolyts, welcher nur die Aufgabe des Transportmediums für die Protonen übernimmt, abläuft. Die Zellreaktion lautet:



Typische Kenndaten der <i>Nickel-Metallhydrid-Batterien</i>			
		Elektrofahrzeugbatterie (energieoptimiert)	Hybridfahrzeugbatterie (leistungsoptimiert)
Gravimetrische Energiedichte	[Wh/kg]	70	40
Gravimetrische Leistungsdichte	[W/kg]	140	1200
Volumetrische Energiedichte	[Wh/l]	200	100
Volumetrische Leistungsdichte	[W/l]	400	3000

Tabelle 6: Typische Kenndaten der Nickel-Metallhydrid-Batterie (11)

- **Lithium-Ionen-Batterien (Li/Ion)**

Lithium-Ionen-Batterien sind die neueste und eine vielversprechende Entwicklung im Batteriesektor. Vor allem im Bereich der Gerätestromversorgung sind Batterien dieses Typs erfolgreich und immer mehr zum Einsatz gekommen. Der starke Zuwachs der Lithium-Ionen-Batterieindustrie ist im folgenden Schaubild zu erkennen.

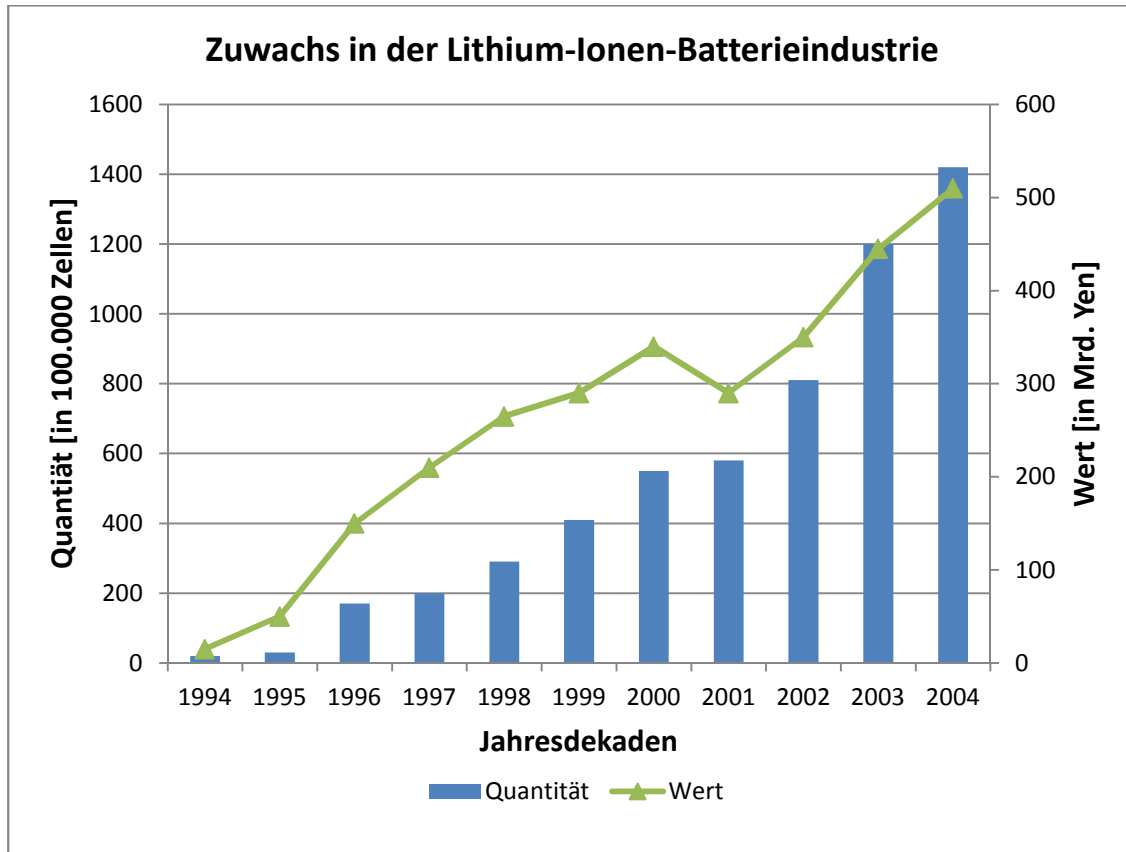
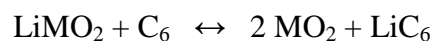


Abbildung 9: Zuwachs der Lithium-Ionen-Batterieindustrie (12)

Das Spannungsniveau dieser Batterien hängt von der Wahl des Elektrodenmaterials ab, liegt aber in der Regel um 3,6 V bis 4 V. Aus Kostengründen wird bei Fahrzeugen statt Lithium-Kobaltoxid eher Lithium-Nickel- oder Lithium-Manganoxid verwendet:



Typische Kenndaten der <i>Lithium-Ionen-Batterien</i>			
		Elektrofahrzeugbatterie (energieoptimiert)	Hybridfahrzeugbatterie (leistungsoptimiert)
Gravimetrische Energiedichte	[Wh/kg]	100	70
Gravimetrische Leistungsdichte	[W/kg]	200	2000
Volumetrische Energiedichte	[Wh/l]	250	150
Volumetrische Leistungsdichte	[W/l]	500	4200

Tabelle 7: Typische Kenndaten der Lithium-Ionen-Batterie (11)

4.3.2 Supercaps für Hybridfahrzeuge (13)

Der Supercapacitor, kurz *Supercap*, gehört zu den Doppelschichtkondensatoren, welche verglichen mit den herkömmlichen Elektrolytkondensatoren auf hohe Energiedichte optimiert sind. Erreicht wird diese Optimierung durch die große Oberfläche der stark porösen Kohlenstoffelektroden (bis zu 3000m²/g). Ist die Kapazität C des Kondensators bekannt, so errechnet sich der Energieinhalt zu:

$$W = \frac{1}{2} C U_{Lade}^2$$

Da die Energiespeicherung durch Ladungstrennung erfolgt und kein Massetransport auftritt, kann die Energie sehr schnell aufgenommen und abgegeben werden. Das Ergebnis sind hohe Leistungsdichten, die im Bereich von mindestens 1500 W/kg liegen und durch den geringen Innenwiderstand des Kondensators bestimmt sind. Als relativ gering gestaltet sich auf der anderen Seite die Leistungsdichte, die bei den heute gängigen Doppelschichtkondensatoren etwa 5 Wh/kg beträgt.

Einen Vorteil gegenüber der Batterietechnologie weist der *Supercap* im Bezug auf Temperaturunabhängigkeit und Wartungsfreiheit auf. Auch die Lebensdauer ist verhältnismäßig hoch und beträgt einige hunderttausend Lade- und Entladezyklen.

Der erforderliche DC-DC-Wandler ist nicht zu vernachlässigen und stellt einen entscheidenden Kostenfaktor dar, der auch auf Bauraum und Systemwirkungsgrad nachteilige Einflüsse hat.

Typische Kenndaten der <i>Supercaps</i>			
		Elektrofahrzeugbatterie (energieoptimiert)	Hybridfahrzeugbatterie (leistungsoptimiert)
Gravimetrische Energiedichte	[Wh/kg]	-	5 bis 15
Gravimetrische Leistungsdichte	[W/kg]	-	1500 bis 7000
Volumetrische Energiedichte	[Wh/l]	-	5
Volumetrische Leistungsdichte	[W/l]	-	um 5000

Tabelle 8: Typische Kenndaten der *Supercaps*, adaptiert aus (11) und (10)

4.3.3 Schwungradspeicher für Hybridfahrzeuge

Auf die charakteristischen Eigenschaften, besonderen Leistungsmerkmale und Entwicklungspotentiale sowie deren Hintergründe wird im Laufe dieser Arbeit noch verstärkt eingegangen. In diesem Kapitel soll lediglich ein kurzer Überblick gegeben werden, welcher einen Vergleich mit den konkurrierenden Energiespeichern, die soeben erörtert wurden, erlaubt. Für einen Einblick in die wesentlichen, energetischen Parameter wird auf das Kapitel 4 verwiesen.

Grund für das starke Schwanken der volumetrischen Angaben ist die Tatsache, dass die Größe des Systems stark von der notwendigen Aufhängung und den Nebenaggregaten abhängt.

Typische Kenndaten der <i>mobilen Schwungradspeicher</i>			
		Stahlrotoren	Faserverbundrotoren
Gravimetrische Energiedichte	[Wh/kg]	10 bis 30	50 bis 100
Gravimetrische Leistungsdichte	[W/kg]	-	3000
Volumetrische Energiedichte	[Wh/l]	-	bis 60
Volumetrische Leistungsdichte	[W/l]	-	bis 5000

Tabelle 9 : Typische Kenndaten von Schwungradspeichern, adaptiert aus (11) und (14)

Wie aus der Übersicht zu erkennen ist, liegen die Stärken des Schwungrades in der hohen Leistungsdichte, welche wiederum Voraussetzung für eine effektive Nutzbremung⁷ darstellt. Auch in Punkto Energiedichte kann das Flywheel mit herkömmlichen Batteriesystemen mithalten und diese in Ausnahmefällen sogar übertreffen. Ein großes Problem stellt jedoch die Selbstentladung des Speichers durch Strömungs- und andere Verluste dar. Im Wesentlichen kann der Schwungradspeicher durch folgende Vor- und Nachteile charakterisiert werden:

Vorteile des Schwungradspeichers:

- Sehr hohe Leistungen möglich → Ideal für Nutzbremung
- Energieinhalt nur durch Drehzahl limitiert → Potential für hohe Energiedichten
- Tiefentladung schädigt Speicher nicht
- Nahezu endlose Zyklenzahl ohne Leistungsabfall möglich (keine Alterung)
- Prinzipiell keine Temperaturabhängigkeit
- Lange Wartungsintervalle und lange Lebensdauer (abhängig von der Rotorlagerung)
- Energieinhalt über die Drehzahl exakt ablesbar
- Energieübertragung kann mechanisch oder elektrisch erfolgen.

Anmerkung: Besonders die exakte Quantifizierung des Energieinhaltes bringt enorme Vorteile im Bezug auf das Energiemanagement an die Anpassung der Betriebsstrategie des Fahrzeuges mit sich. Im Bereich der elektro- und batteriebetriebenen Hybridfahrzeuge werden enorme finanzielle und konstruktive Anstrengungen unternommen, um den aktuellen Ladezustand der Boardbatterie zu bestimmen⁸. Da dieser aber von äußeren Einflüssen, wie zum Beispiel der Umgebungstemperatur und der Alterung der Batterie abhängt, kann die mögliche Reichweite des Fahrzeuges nur ungenau vorhergesagt werden. Hier bietet das Schwungrad eine Alternative mit besonders hohem Potential.

Nachteile des Schwungradspeichers:

- Hohe Selbstentladung durch Verluste (Strömung, Lager, Vakuumpumpe, ...)
- Kreiselkräfte beeinflussen Fahrdynamik
- Aufwändige Sicherheitsmaßnahmen für den Berstfall erforderlich

⁷ Genaueres über die Nutzbremung siehe Anhang, Punkt 4.2

⁸ Das Problem wird in der Literatur auch oft als *State of Charge*, oder *SoC-Problematik* bezeichnet.

- Für höchste Drehzahlen sind aufwändige magnetische Lager notwendig
- Je höher die Energiedichte, desto mehr muss an die Werkstoffgrenzen gegangen werden
- Sehr hohe Energiedichten im Moment nur unter hohem Kostenaufwand erreichbar.

Als Konsequenz der Eigenschaften eines Schwungradspeichers folgt, dass sich dieser gegenwärtig ideal zur Lastpunktverschiebung, oder „load-averaging“, wie es in der englischsprachigen Fachliteratur genannt wird, eignet. Dabei wird die durchschnittlich erforderliche Leistung eines Fahrzyklus von einer deutlich verkleinerten primären Leistungseinheit zu Verfügung gestellt, während die Lastspitzen von einem Schwungrad, welches als so genannte *Surge Power Unit (SPU)*⁹ arbeitet, gedeckt werden. Das *SPU* stellt aber nicht nur kurzfristig hohe positive Leistungen zu Verfügung, sondern speichert auch durch Verzögerung oder Bergabfahrt anfallende Energie. Ein konkretes Beispiel zeigt Abbildung 10, welche den Leistungsbedarf eines Mittelklasse PKWs im *FTP*¹⁰-Zyklus über die Zeit sowie das korrespondierende Geschwindigkeitsprofil darstellt.

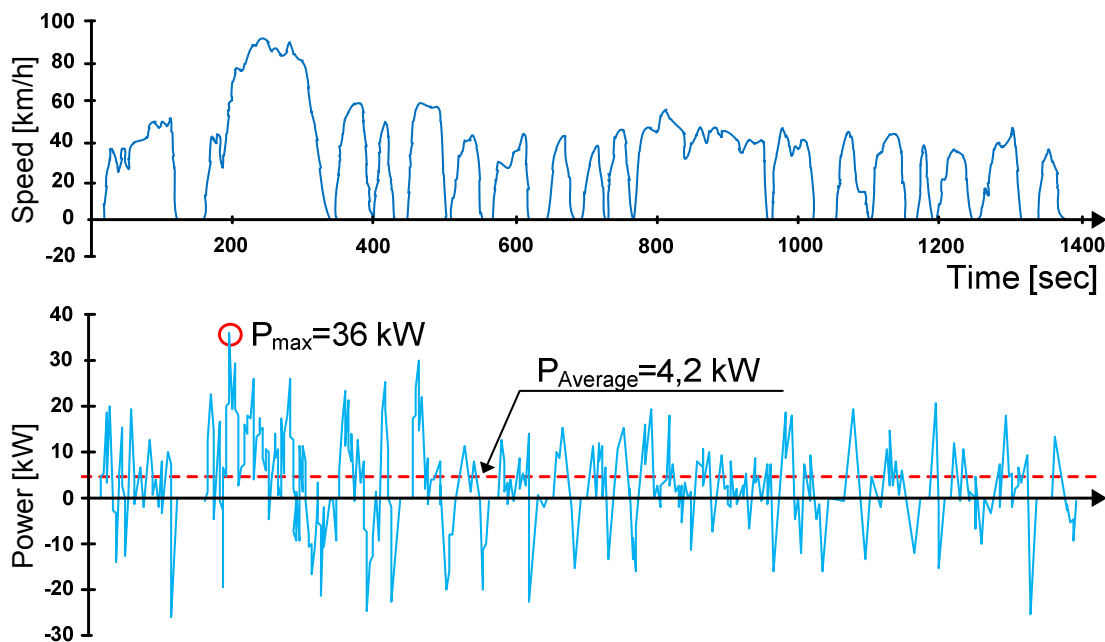


Abbildung 10: Leistungsbedarf und Geschwindigkeitsprofil des FTP-Zyklus (15)

Es zeigt sich, dass die erforderliche Dauerleistung nur 4,2 kW beträgt, während die Spitzenleistung 36 kW erreicht. Theoretisch wäre der Fahrzyklus also mit einem Fahrzeug, welches über eine primäre Leistungseinheit von 5 kW und ein 32-kW-Flywheel verfügt, realisierbar! Diese Erkenntnis deutet bereits darauf hin, dass der Einsatzbereich eines Fahrzeuges wesentlichen Einfluss darauf hat, wie effizient ein Schwungradspeicher eingesetzt werden kann – ein Umstand der in Abschnitt 7.3.1 noch genauer beschrieben wird.

Die physikalisch-energetischen Zusammenhänge sind im Anhang ab Kapitel 3 übersichtlich ausgearbeitet worden.

⁹ *SPU*, Abkürzung für *Surge-Power-Unit*; ein Kurzzeitenergiespeicher zur Lastpunktverschiebung

¹⁰ *FTP* steht für *Federal Test Procedure*, US-Fahrzyklus 1975

5. Struktur und Funktion von Hybridantrieben

Bis auf wenige Ausnahmen wurde der Schwungradspeicher in Fahrzeugen fast ausschließlich in hybriden Antrieben verwendet. Grund hierfür sind die bis dato noch relativ geringen Energiedichten der *Flywheels* verglichen mit fossilen Brennstoffen. Dadurch muss der kinetische Energiespeicher in den meisten Fällen mit einem herkömmlichen Benzin- oder Dieseltank kombiniert werden. In naher Zukunft wird die größte Chance für Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Bereich der Schwungradspeicher wohl auch der Hybridantrieb bleiben. Deshalb, und weil die unterschiedlichen strukturellen Ausführungen hybrider Antriebsstränge einen wesentlichen Einfluss auf die Betriebsstrategien, das energetischen Einsparungspotential und die Dimensionierung des Energiespeichers haben, wurde auch auf diese Thematik eingegangen, wobei die vollständige Ausarbeitung dem Anhang ab Kapitel 4.2.2 zu entnehmen ist. Folgend werden lediglich die relevantesten Erkenntnisse betreffend den Schwungradhybrid zusammengefasst.

6. Charakteristika und Entwicklungspotential des Hybridantriebs mit Schwungradspeicher

Das allgemeine Ziel des *Zero Emission Vehicles (ZEV)* kann durch Elektrofahrzeuge erreicht werden. Bislang konnten aber keine rein elektrischen Fahrzeugkonzepte auf den Markt gebracht werden, welche den Anforderungen des Kunden uneingeschränkt nachkommen. Zwar reichen die Beschleunigungsleistung und die Reichweite der Elektrofahrzeuge für den innerstädtischen Anwendungsbereich aus, aber für hohe Konstantleistungen, wie sie bei lang anhaltender, schneller Autobahnfahrt erforderlich sind, stehen noch keine Energiespeicher mit befriedigender Energiedichte zu Verfügung. Eine Möglichkeit, das Problem zu bewältigen, ist, dem Kunden unterschiedliche Fahrzeuge für unterschiedliche Einsatzbereiche anzubieten. Also ein Stadtauto, bei welchem die Reichweite eine untergeordnete, jedoch die Emissionsfreiheit eine große Rolle spielt, sowie ein Fahrzeug mit klassischem Antriebsstrang für den Langstreckenbetrieb. Da aber auch dieser Weg als nicht gerade ressourcenschonend angesehen werden kann, ist es erstrebenswert, *ein* Fahrzeug zu entwerfen welches allen Anforderungen gerecht wird.

Die Hybridisierung des Antriebsstranges bietet daher eine gute Möglichkeit, die Vorteile des elektrischen und die des konventionellen Antriebsstranges zu kombinieren.

Vorteile des elektrischen Antriebs:

- Lokal emissionsfreier Betrieb möglich
- Bremsenergie rückgewinnbar
- Extrem geräuscharm im innerstädtischen Betrieb¹¹
- Keine/wenige mechanische Elemente zur Energieübertragung notwendig
- Freiere Anordnung der Komponenten im KFZ möglich

¹¹ Bei höheren Geschwindigkeiten dominiert jedoch das Wind- und Reifengeräusch

Vorteile des Antriebs mit Verbrennungsmotor:

- Extrem hohe Energiedichte
- Energetisches Versorgungsnetz gut ausgebaut
- Etabliertes, zuverlässiges System → daher hohe Kundenakzeptanz
- Fahrer sind „Handling“ und „Sound“ gewöhnt
- Leistung nahezu unabhängig von Umgebungsparametern wie Temperatur etc.

Vorteile des Hybridantriebes:

- Betrieb der VKM im Bestpunkt möglich
- *Limp-Home-Mode* bei Ausfall eines Antriebssystems möglich
- Vorhandensein einer leistungsstarken, elektrischen Energiequelle (volles Drehmoment vom Stand weg)
- Drehzahlunabhängigkeit vieler Nebenaggregate durch Elektrifizierung
- Mehrwert durch temporären „elektrischen Allradantrieb“ möglich
- Erweiterung der elektrischen Reichweite durch *Range Extender* möglich
- Meist genügend elektrische Energie verfügbar, um Nebenaggregate und aufwändige Bordelektrik zu betreiben
- Je nach Konzept lokal emissionsfreier Betrieb möglich.

Die Hybridisierung der Antriebe kann als möglicher Zwischenschritt zum *ZEV* gesehen werden, welcher der Wissenschaft eine Forschungsplattform für die Verbesserung der Energiespeicher zu Verfügung stellt und gleichzeitig den Verbrauch und den CO₂-Ausstoß der Fahrzeugflotten verringert. Ob das *Zero Emission Vehicle* wirklich das Maß aller Dinge repräsentiert, ist eine andere Frage, die nur unter Betrachtung des Primärenergiemixes¹² zu beantworten ist, aber bislang als erstrebenswerte Zielsetzung angesehen wird.

Dennoch müssen auch einige prinzipbedingte Nachteile erwähnt werden, die Hybridfahrzeuge mit sich bringen.

Nachteile des Hybridantriebes:

- Deutlich höhere Kosten
- Höheres Gewicht, dadurch höherer Roll- und Beschleunigungswiderstand
- Komplexe Regelstrategien erforderlich
- Höhere Anzahl an möglichen Fehlerquellen
- Zwei Antriebe müssen konstruiert werden
- Mehr Bauraum erforderlich
- Geringe oder keine Verbrauchersparnis bei Stationärbetrieb
- Möglicherweise toxikologisch bedenkliche Materialien im Einsatz
- Höherer Energieaufwand für die Fahrzeugherstellung erforderlich, der sich erst amortisieren muss.

¹² Abbildung 52 in Kapitel 9.3 erläutert den Einfluss des Energiemixes auf die CO₂-Bilanz von Elektrofahrzeugen

7. Die bestehenden Flywheel-Hybride

Auch wenn Hybridfahrzeuge durch die alltäglichen Medien oder andere populärwissenschaftliche Berichterstattung bereits einen relativ hohen Bekanntheitsgrad erreicht haben, so sind schwungradgetriebene, oder schwungradunterstützte Fahrzeuge noch relativ unbekannt. Dieser Umstand verwundert ein wenig, wenn man einen Blick auf die bisher doch erheblichen Verbrauchseinsparungen wirft, welche die bestehenden *Flywheel-Hybride* bereits erreichen konnten.

Die ausgeführten Konstruktionen gehen zurück bis in das späte 18. Jahrhundert, wobei eine sinnvolle, detaillierte Analyse erst ab den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts möglich ist. Grund hierfür ist einerseits das Fehlen von Daten über die frühen Konstruktionen, andererseits die Tatsache, dass das Schwungrad als Energiespeicher erst in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts eine ernstzunehmende Renaissance erlebte. Mittlerweile, in den Jahren nach der Jahrtausendwende, sind die kinetischen Energiespeicher wieder verstärkt im Kommen und die Forschungs- und Entwicklungsarbeit wird vorangetrieben. Aber was sind die Gründe hierfür? Warum wird ein so altes Konzept nur so diskontinuierlich weiterentwickelt? Im Kapitel 7.1 wird versucht, auf diese Frage einzugehen und den Entwicklungsverlauf mit allen beeinflussenden Parametern zu verknüpfen und zu extrapolieren.

Ein weiterer Umstand, der die Analyse der Systeme erschwert, ist der stark schwankende Veröffentlichungsgrad. Manche Schwungradhybride sind außergewöhnlich gut dokumentiert worden, es liegen Veröffentlichungen in Magazinen und Büchern vor, Publikationen in Fachzeitschriften, auch Diplomarbeiten und Dissertationen. Das trifft üblicherweise auf Hochschulprojekte zu. Andere Konzepte unterlagen wohl eher strenger Geheimhaltung und wurden als Firmengeheimnis gehütet. Die relativ große Anzahl an erhobenen Systemen soll den Einfluss der eben genannten Umstände aber gering halten.

Die bisher gebauten, schwungradgetriebenen Fahrzeuge sind in Tabelle 10 in chronologischer Reihenfolge und in tabellarischer Form angeführt. Folgende Merkmale der Schwungradfahrzeuge wurden – sofern Informationen vorhanden – registriert:

- Baujahr
- Bezeichnung
- KFZ-Klasse
- Hybridart
- Hersteller / Entwickler
- Herkunftsland
- Prim. Energiequelle
- Energieinhalt des Schwungrades
- Max. Leistung des Schwungrades
- Energiedichte des Schwungrades
- Maximale Betriebsdrehzahl
- Minimale Betriebsdrehzahl
- Schwungradmasse
- Schwungraddurchmesser
- Massenträgheitsmoment
- Schwungradmaterial
- Masse der ges. Schwungradeinheit
- Laufmedium
- Art der Energieübertragung
- Bremsenergieerückgewinnung
- Reichweite mit Schwungradantrieb

Aufgrund des großen Umfangs ist die vollständige Tabelle dem (elektronischen) Anhang zu entnehmen. Die folgende Tabelle gibt nur einen Auszug wieder.

Die Daten sind teilweise noch äußerst lückenhaft und könnten vermutlich durch zeitintensive, vertiefte und akribische Recherche noch vervollständigt werden. Besonders die historischen Entwicklungen der Sowjet-Union, welche (wenn überhaupt) nur in russischer Sprache veröffentlicht wurden, aber laut Angaben der Literatur [(16), (17)] äußerst zahlreich waren, konnten bis auf drei Beispiele nicht in die Datenbank inkludiert werden. Hinzu kommt, dass das Einsatzgebiet gerade bei den mobilen Schwungradanlagen sehr unterschiedlich ist (Bus, Zug, PKW), und diese Systeme untereinander teilweise nur schwer vergleichbar sind.

	Baujahr	Bezeichnung	KFZ-Klasse	Hersteller/Entwickler	Land	Energieinhalt [kWh]	Drehzahl max [U/min]
1	1791	Kulibin Dreirad	sonstige	IP Kulibin	Russland	0,011	500
2	1860	Schuberski Lok	Schienefahrzeug	Leutnant Z. Schuberski	Russland	31,670	
3	1905	Lanchester Wagen	PKW	Frederick W. Lanchester	England		
4	1925	Werkswagen Kazan	Werkswagen	Verdichterwerke Kazan	Russland		
5	1948	British Rail Class 70	Schienefahrzeug		England		
6	1953	Gyrob	BUS	Oerlikon Werke	Schweiz	9,150	3000
7	1954	Gyro Lok Nr 4	Werkswagen	Oerlikon Werke	Schweiz	5,600	3000
8	1961	Gyreacta	BUS	Robert Clerk	England		150000
9	1974	New York Subway	Schienefahrzeug	Garrett Corp.	USA		14000
10	1974	VW Transporter T2 (V2.0)	LLKW	TH Aachen	Deutschland	0,211	11650
11	1975	Advanced Concept Train	Schienefahrzeug	Boeing Vertol Comp	USA	4,500	11000
12	1976	K-Wagen Prototyp	sonstige	M.V. Gulia	Russland		
13	1978	Uni Wisconsin Pinto	PKW	Uni Wisconsin, Andy Frank	USA		8000
14	1978	AFS Trinity	PKW	Lears Motors / AFS Trinity	USA		
15	1979	Stockholm City Bus	BUS	Volvo	Schweden		10000
16	1979	VW 2000	PKW	Volkswagen	Deutschland		
17	1978	Garrett 4 Passenger Sedan	PKW	Garrett Corp.	USA	1,000	25000
18	1978	Garrett Postal Wagon	Geländewagen	Garrett Corp.	USA		36000
19	1981	M.A.N. Versuchsbus	BUS	MAN	Deutschland	1,500	12000
20	1981	Fiat Versuchsbus	BUS	Fiat	Italien	0,750	
21	1983	Volvo 240	PKW	Volvo	Schweden		
22	1984	Kaiserslautern PKW	PKW	Universität Kaiserslautern	Deutschland		
23	1985	New York Bus System	BUS	Garrett Corp.	USA	16,000	16000
24	1988	Münchner Stadtbusse	BUS	MAN / Neoplan / Magent Motor	Deutschland	2 (2,75?)	11000
25	1992	PPM 50 Railcar	Schienefahrzeug	Parry People Movers	England	3,750	2600
26	1993	Chrysler Patriot	Rennfahrzeug	Chrysler	USA	1,000	58000
27	1994	AFS-20	PKW	American Flywheel Systems	USA	15 x ... kWh	200000
28	1995	O-Bus Basel	BUS	Neoplan / Magent Motor			
29	1996	Hybrid III	PKW	ETH Zürich	Schweiz	0,070	6000
30	1997	Eindhoven Volvo S40	PKW	TU Eindhoven / Van Doorne	Niederlande	0,120	17000
31	1998	CCM Trolleybus	BUS	CCM	Dänemark	2,000	
32	2000	Zero Inertia CVT - VW Bora	PKW	TU Eindhoven / Van Doorne	Niederlande	0,040	8000
33	2001	ULEV-TAP I	Schienefahrzeug	CCM		4,000	
34	2004	Lirex MDS K5	Schienefahrzeug	ALSTOM	Deutschland	2 x 2	12000
35	2004	PHILEAS	BUS	CCM			
36	2006	Lirex MDS K6	Schienefahrzeug	ALSTOM	Deutschland	2 x 6	21000
37	2006	AutoTram	sonstige	Fraunhofer Institut	Deutschland	4,000	23000
38	2008	PowerBeam Hybrid	PKW	HgKinesys Inc	USA	2 x 0,258	50000
39	2008	Williams F1 KERS	Rennfahrzeug	Williams Renault		0,220	100000
40	2008	FlybridSystems F1 KERS	Rennfahrzeug	Flybrid Systems	England	0,110	60000
41	2009	Porsche 911 GT3 R Hybrid	Rennfahrzeug	Porsche	Deutschland	0,110	40000
42	2009	Flybus	BUS	Ricardo Kinergy / Torotrak	England	0,280	
43	2009	Dynastore F1	Rennfahrzeug	Compact Dynamics	Deutschland	0,090	64500
44	2009	Dynastore HS	PKW	Compact Dynamics	Deutschland	0,780	
45	2010	Jaguar XF	PKW	Torotrak/Xtrac CVT	England	0,120	60000

Tabelle 10: Übersicht über die bestehenden Schwungradfahrzeuge (Auszug)

Es ist also fraglich, ob diese Datenbank - und sei sie noch so vollständig - umfangreich genug ist, um *statistisch signifikante* Aussagen treffen zu können. Der Datenumfang reicht jedoch auf jeden Fall aus, um auf dessen Basis *allgemeine Entwicklungstrends* und den *historischen*

Entwicklungsverlauf ableiten zu können sowie den Entwicklungsverlauf an sich in Kontext zu den historischen und aktuellen äußeren Einflüssen zu setzen. Des Weiteren sollen auf Basis von Tabelle 10 die Schwungradhybride durch eine Einteilung in die wesentlichen, auftretenden Typen kategorisiert werden, um darauf hin nicht nur die konkreten Ausführungen, sondern auch die ihnen zugrunde liegenden Strukturvarianten analysieren zu können.

Einfacher würde sich eine Analyse der *stationären Schwungradspeicher* gestalten, da diese ad Eins wesentlich weiter verbreitet und erforscht sind, also deutlich mehr Daten vorliegen, und ad Zwei unter homogenen Rahmenbedingungen arbeiten. Eine derartige Analyse entzieht sich jedoch dem Aufgabenbereich dieser Arbeit und es muss an dieser Stelle auf einschlägige Fachliteratur verwiesen werden, wie in (18) beschrieben.

7.1 Einflussfaktoren auf den Entwicklungsverlauf von Schwungradspeichern

Betrachtet man den Verlauf der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit im Bereich der schwungradgetriebenen Fahrzeuge, so stellt man eine große Inkonsistenz und zeitliche Inhomogenität fest. Vielfach haben sich Technologien, wie es einige Beispiele in der Informationstechnik und Telekommunikation zeigen, seit ihrer Einführung kontinuierlich weiterentwickelt, bis sie vollständig ausgereizt waren und / oder durch eine neue Entwicklung abgelöst wurden. Die Schwungradtechnologie, vor allem aber im Einsatz als mobiler Energiespeicher, scheint für die Automobilindustrie nur sporadisch von Interesse gewesen zu sein. Abbildung 11 stellt die Anzahl der verschiedenen Schwungradfahrzeuge in den jeweiligen Jahrzehnten dar. Jene Fahrzeuge, die tatsächlich gebaut wurden sind als blaue Balken, jene die nur am Papier oder Computer konstruiert worden, aber nie den Prototypenstatus erreicht haben, als rote Balken gekennzeichnet.

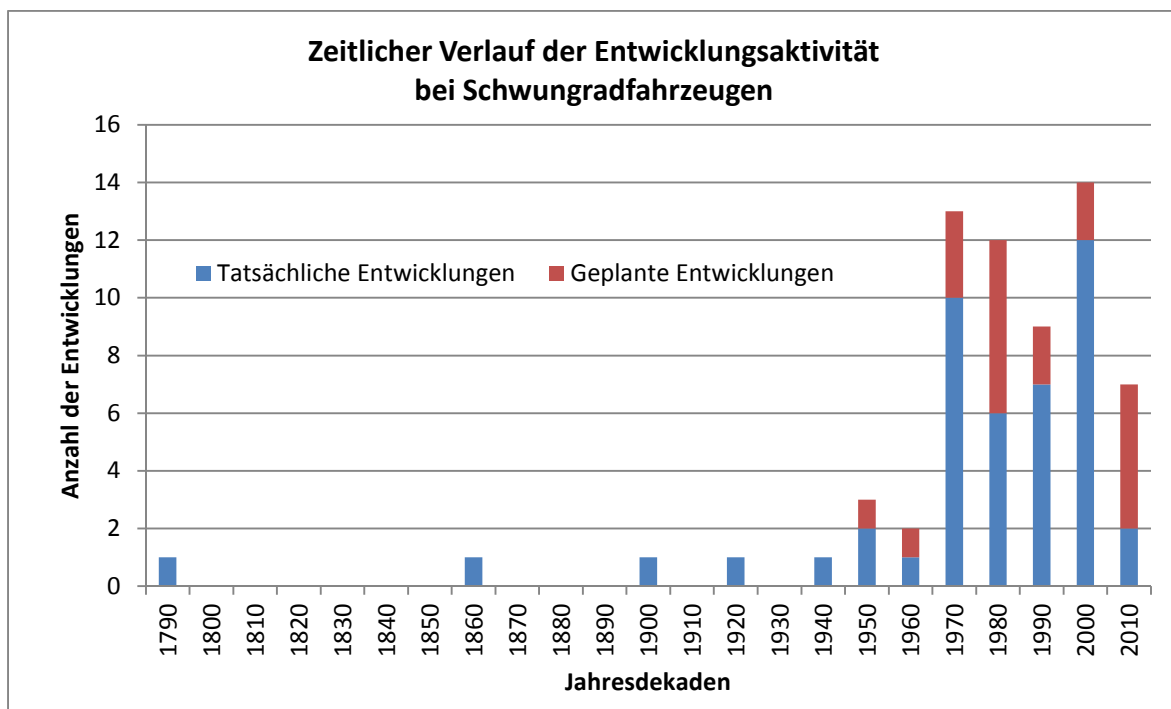


Abbildung 11: Anzahl der geplanten und tatsächlichen Schwungradfahrzeuge in den jeweiligen Jahrzehnten

Woher aber kommen diese eklatanten Unstetigkeiten in der Entwicklung? Welche Parameter haben den Entwicklungsverlauf gelenkt und beeinflusst? Das Prinzip des Schwungrades als Energiespeicher ist viele Tausende Jahre alt, wurde schon bei Töpferscheiben im alten Mesopotamien eingesetzt und erlangte besonders in der Zeit der Dampfmaschinen zu Beginn des 19. Jahrhunderts große Bedeutung, um die Leistungsabgabe von diskontinuierlich arbeitenden Kolbenmaschinen zu homogenisieren.

Die Idee, ein Schwungrad als Energiespeicher für ein Fahrzeug zu verwenden, wurde - den Recherchen des Autors nach¹³ - erstmals 1791 dokumentiert. Es handelt sich um ein Dreirad, entwickelt von dem russischen Mechaniker *I.P Kulibin*, welches durch Muskelkraft angetrieben wird und beim Bergabfahren und Verzögern Energie in ein Schwungrad aus Eisen speist und diese beim Beschleunigen wieder abgibt. Der maximale Energieinhalt des Schwungrades erlaubte eine ebene Strecke von etwa 400 m autark zurückzulegen. (16) Das Prinzip war also schon mindestens seit dieser Zeit bekannt, ihm wurde aber lange Zeit keine Beachtung geschenkt.

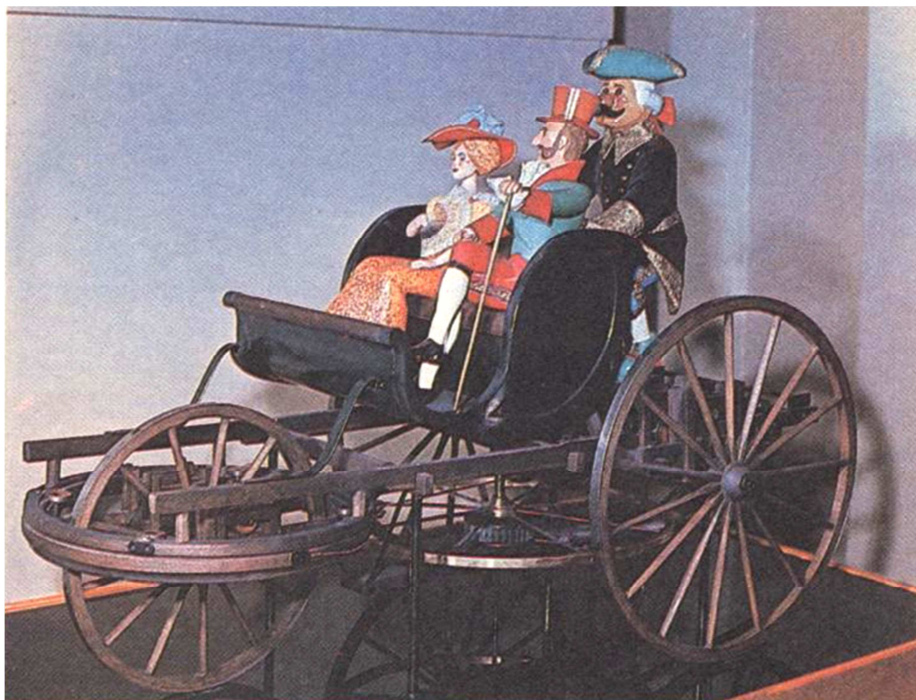


Abbildung 12: Modell von Kulibins Dreirad im technischen Museum in Moskau (16)

In den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts gelang es eine Schweizer Firma, den *OERLIKON Werken*, mit ihrem *Gyrobus* bekannt zu werden. Das Fahrzeug, welches 1953 in den Verkehr gestellt wurde, verfügte über eine stählerne Schwungmasse, welche um die Hochachse drehte und über einen elektrischen Asynchronmotor beschleunigt wurde. Während die Passagiere an den Haltestellen ein- und ausstiegen, wurde der Bus an ein 3-Phasennetz angeschlossen und dem Schwungrad so viel Energie zugeführt, dass er bis zur nächsten Haltestelle fahren konnte, ohne auf eine andere Energiequelle angewiesen zu sein.

Es folgte ein ähnliches Projekt auf Basis eines Hybridantriebes mit Schwungrad und Dieselmotor namens *Gyreacta* in Großbritannien, und ab diesem Zeitpunkt waren schwungradgetriebene Fahrzeuge erstmals in populärwissenschaftlichen Medien vertreten und wurden als „Technologie der Zukunft“ gepriesen.

¹³ Dies bestätigt auch der russische Schwungradexperte *N.V. Gulia* in seinem Werk (16)

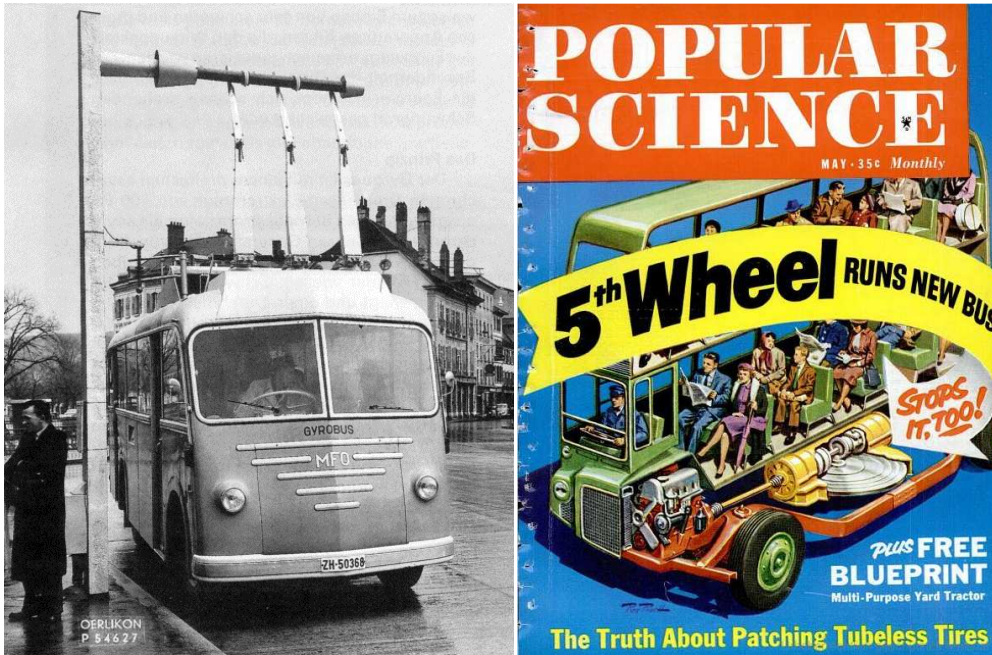


Abbildung 13: Der Gyrobus (links) (19) und der britische Gyreacta auf der Titelseite von Popular Science 1961

In den Sechzigerjahren des zwanzigsten Jahrhunderts wurde es dann wieder ruhiger um die Schwungradhybride, bis dann Anfang der Siebziger ein eklatanter Anstieg in der Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu verzeichnen ist. Zu den tatsächlich gebauten Fahrzeugen kommen noch etliche geplante Projekte hinzu und wieder gibt es euphorische Meldungen in den Medien, wie Abbildung 14 zeigt. Schwungradspeicher wurden in Busse, Untergrund- und Straßenbahnen sowie PKWs eingebaut und getestet. Eine Revolution des Fahrzeugantriebes schien nahe und unvermeidbar zu sein! Das Tor zur Elektrifizierung des Verkehrs schien offen zu stehen und dennoch, beinahe 40 Jahre später, zählen Schwungradbatterien noch immer zu den exotischen Spezialapplikationen im Maschinen- und Fahrzeugbau.



Abbildung 14: Das Popular Science Magazin von 1970 (li.) und 1994 (re.) propagiert Schwungradfahrzeuge

Trotzdem wurde der kinetische Energiespeicher in den letzten Jahren wieder aufgegriffen. In einer Zeit in der *Global Warming*, CO₂-Emissionen und das „grüne“ Image der Fahrzeughersteller in Aller Munde ist, floriert auch der Markt um die modernen Hybridfahrzeuge. Auch Hersteller, die im Allgemeinen nicht für verbrauchsoptimierte Fahrzeuge bekannt sind, sowie der Rennsport experimentieren mit Schwungradspeichern, um die Effizienz zu steigern.



Abbildung 15: Schwungradspeicher im Rennfahrzeug: Schnitt durch den Porsche GT3 Hybrid (20)

Aus der Geschichte der Schwungradfahrzeuge, die im Zuge der Erstellung einer tabellarischen Datenbank als Grundlage für diese Arbeit ebenfalls genau betrachtet wurde, gehen einige Einflüsse auf die Entwicklung klar hervor. Andere Parameter wiederum erscheinen auf den ersten Blick eher belanglos, aber durch die gegenseitige Beeinflussung vieler Faktoren ergibt sich ein komplexes System, welches die historische und aktuelle Entwicklung der Schwungradtechnologie von außen lenkt.

Abbildung 16 versucht, die wesentlichen beeinflussenden *Parameter* (gelb hinterlegte Kästchen) aufzuzählen, und diese drei *Kategorien* zuzuordnen (blau hinterlegte Kästchen). Für jeden Einflussfaktor wird ein *konkretes Beispiel* angeführt, um den Sachverhalt besser zu veranschaulichen (weiße Kästchen). Ganz klar ersichtlich wurden drei Hauptparameter definiert, auf welche noch im Detail eingegangen wird:

1. Generelle, äußere Umstände
2. Parallele und verwandte (Schwungrad-)Entwicklungen
3. Entwicklung von Komponenten

Die Zusammenhänge und gegenseitige Beeinflussungen der Parameter werden in Abbildung 16 graphisch wiedergegeben. In der korrekten Interpretation dieser Darstellung verbirgt sich die Antwort auf die Frage, warum die Entwicklung von Schwungradhybriden so verlaufen ist, wie sie verlaufen ist, und erlaubt möglicherweise auch eine Aussage darüber, wie diese weiter verlaufen könnte. Zu diesem Zweck sollen nun die Einflussparameter des Diagramms diskutiert werden und, falls möglich, durch statistische Belege sowie konkrete Zahlenwerte untermauert werden. Die folgenden Zeilen repräsentieren einen klassischen „Blick über den Tellerrand“.

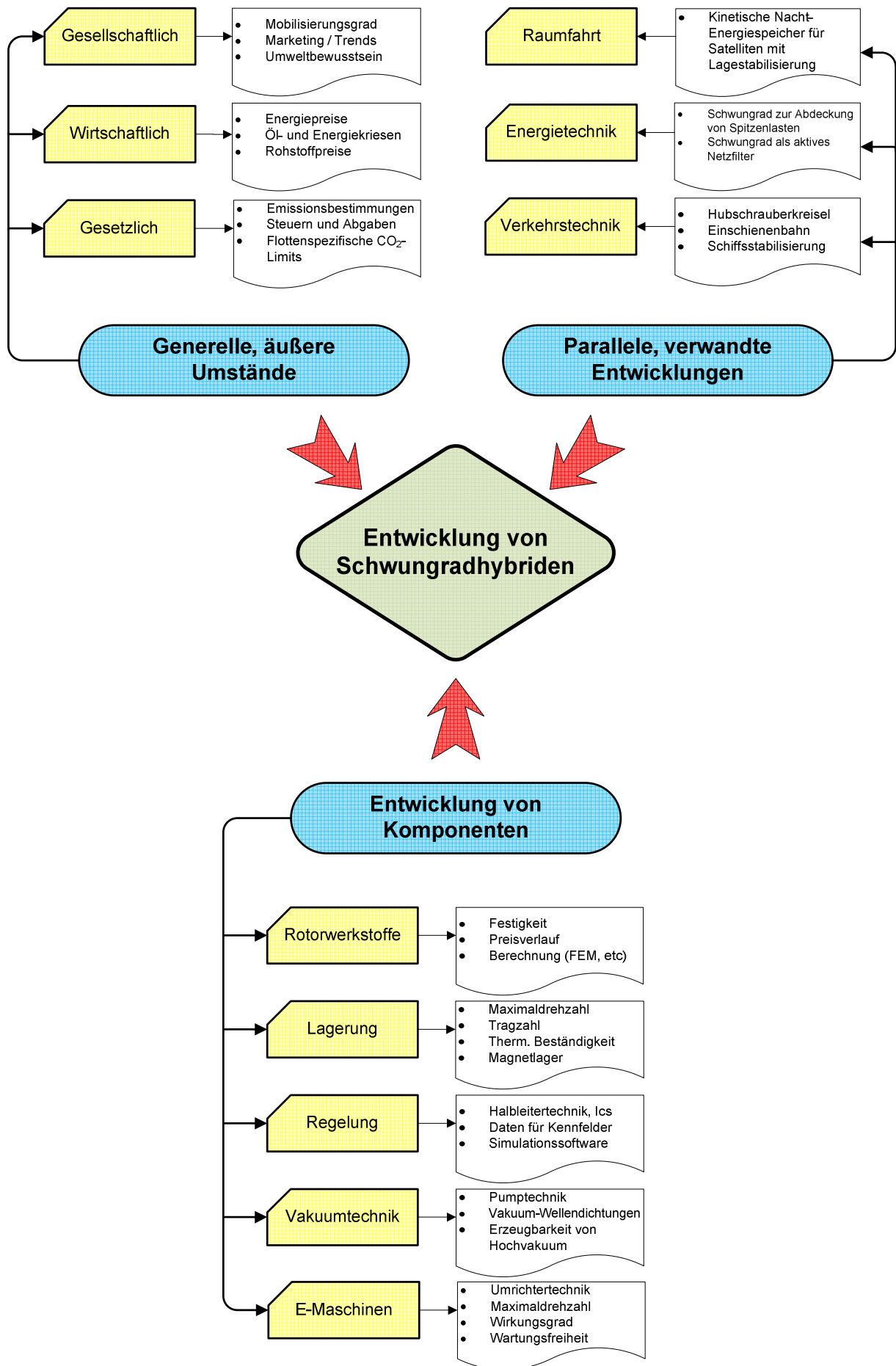


Abbildung 16: Einflüsse auf den Entwicklungsverlauf von schwungradunterstützten Hybridfahrzeugen

7.1.1 Generelle äußere Umstände

1. Gesellschaftliche Umstände

Der Einfluss unseres sozialen Gefüges war seit jeher maßgeblich für die Produktnachfrage und somit auch für den technischen Fortschritt verantwortlich. Wäre die Nachfrage im Automobilbereich gering, so würde dies selbstverständlich die Entwicklungsarbeit im Bereich der Schwungradhybride dämpfen. Dass dem nicht so ist, zeigt Abbildung 17, welche die steigende Anzahl der weltweiten Fahrzeugzulassungen darstellt, wobei die großen asiatischen Nationen wie China und Indien ein noch viel stärkeres Wachstum verzeichnen.

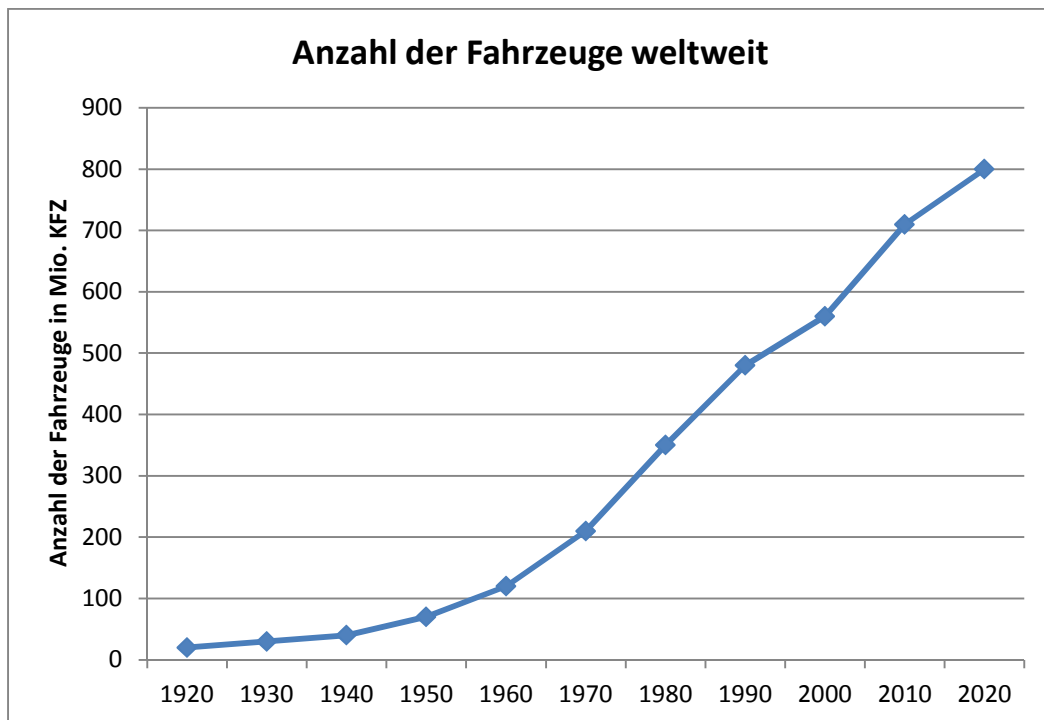


Abbildung 17: Verlauf des weltweiten Fahrzeugbestandes, erstellt auf Basis der Daten von (21)

Hinzu kommt der Einfluss teilweise nicht ganz trivial erklärbarer gesellschaftlicher Phänomene, wie das Aufspringen auf einen „grünen Trend“ oder ähnliche Ereignisse, die im Zusammenhang mit der heutzutage immer mehr an Wichtigkeit gewinnenden Prestige- und Imagefrage stehen. Zwar wurden diese Phänomene in den letzten Jahren auch im Automobilssektor immer mehr offensichtlich, bedürfen aber einer umfangreicheren, marktwirtschaftlichen Analyse als es in dieser Arbeit gestattet ist, und seien somit nur peripher erwähnt.

2. Wirtschaftliche Umstände

Der Einfluss der Weltwirtschaftssituation auf die Schwungradentwicklung ist offensichtlich, und der Spruch, dass Not erfinderisch mache, mehr als passend. Korreliert man die in Abbildung 11 erstellte Zeitleiste mit dem Verlauf des Rohölpreises, so erkennt man, dass es wohl kaum umwelttechnischer Idealismus war, der die Ingenieure in den Siebzigerjahren des vorigen Jahrhunderts dazu veranlasste, sich mit der Schwungradtechnik intensiv zu beschäftigen.

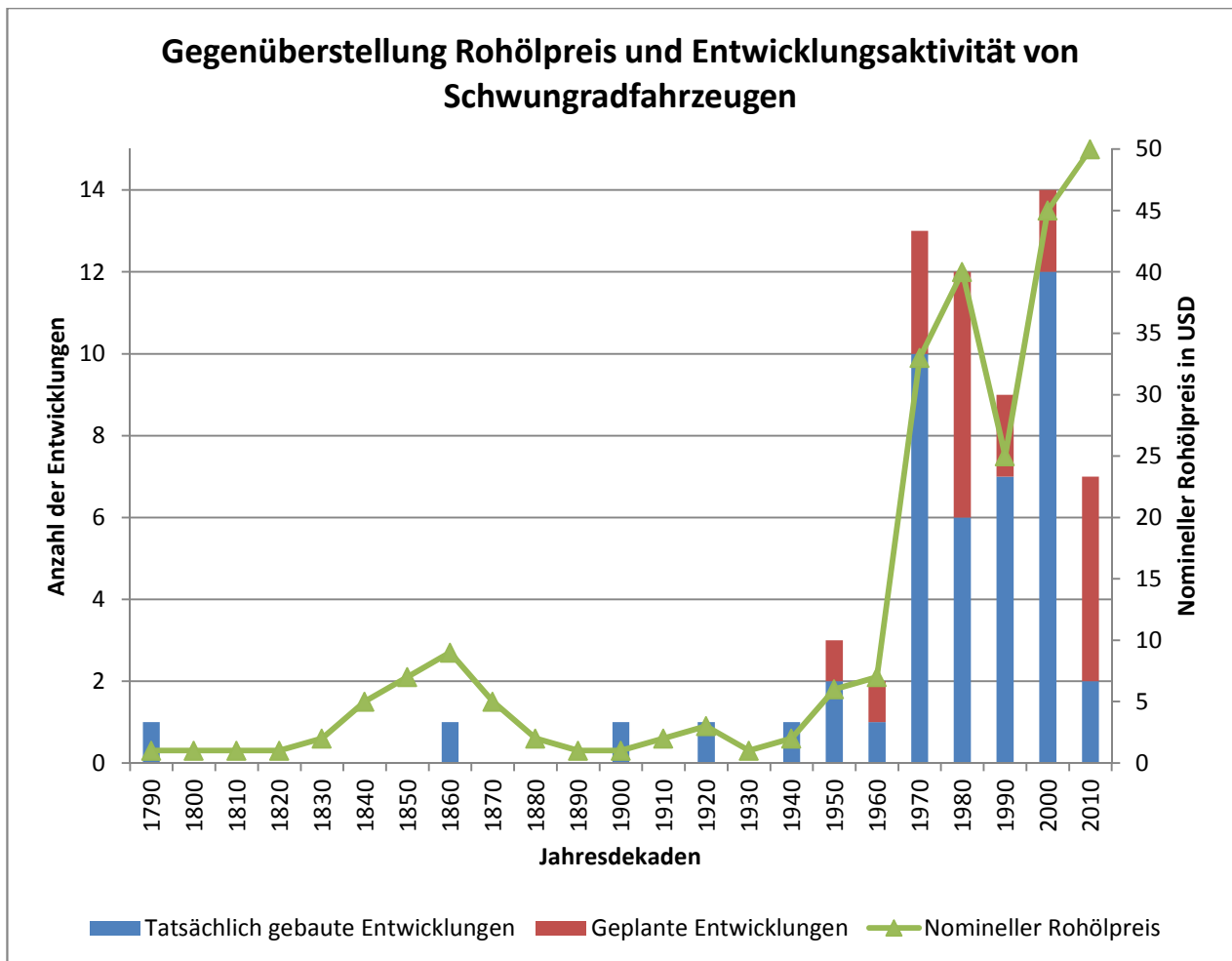


Abbildung 18: Gegenüberstellung Rohölpreis und Entwicklung von Schwungradfahrzeugen

Die Korrelation ist derart offensichtlich, dass es keiner weiteren Erklärung bedarf. Es bleibt jedoch anzumerken, dass die Jahresdekade 2010 bis 2020 gerade erst angebrochen ist und daher klarer Weise noch nicht alle Entwicklungen im Bereich der Schwungradfahrzeuge berücksichtigt werden konnten. Es ist anzunehmen, dass sich der gut erkennbare Trend fortsetzt und in naher Zukunft viele Neuentwicklungen im Bereich der Schwungradfahrzeuge hinzukommen werden. Ein weiterer Faktor, der auch der wirtschaftlichen Sparte zugeordnet werden kann, ist die Kaufkraft der Kunden, die sich aber zu einem gewissen Grad auch aus der Anzahl der Neuzulassungen an PKWs ableiten lässt. (Siehe Abbildung 17)

3. Gesetzliche Umstände

Die gesetzlichen Bestimmungen stellen den jüngsten Teil jener Einflüsse, die zu den generellen, äußeren Umständen gezählt werden, dar. Beispiele sind hier der flottenspezifische Verbrauch, verbrauchs- und emissionspezifische Steuern und Abgaben sowie gesetzliche Emissionsgrenzwerte. Letztere sind zwar in den USA seit den 1960er und in Europa seit den 1970er Jahren gesetzlich verankert, umfangreiche und einheitliche Prüfungen gibt es in Europa aber erst seit der Einführung der EURO-Normen 1992. Doch auch diese Normen wurden in den letzten 2 Jahrzehnten kontinuierlich verschärft und veranlassen somit auch dazu, einen Schritt in Richtung Hybridisierung oder Elektrifizierung des Verkehrs zu wagen, was wiederum Auswirkungen auf die Entwicklung von Schwungradfahrzeugen haben wird.

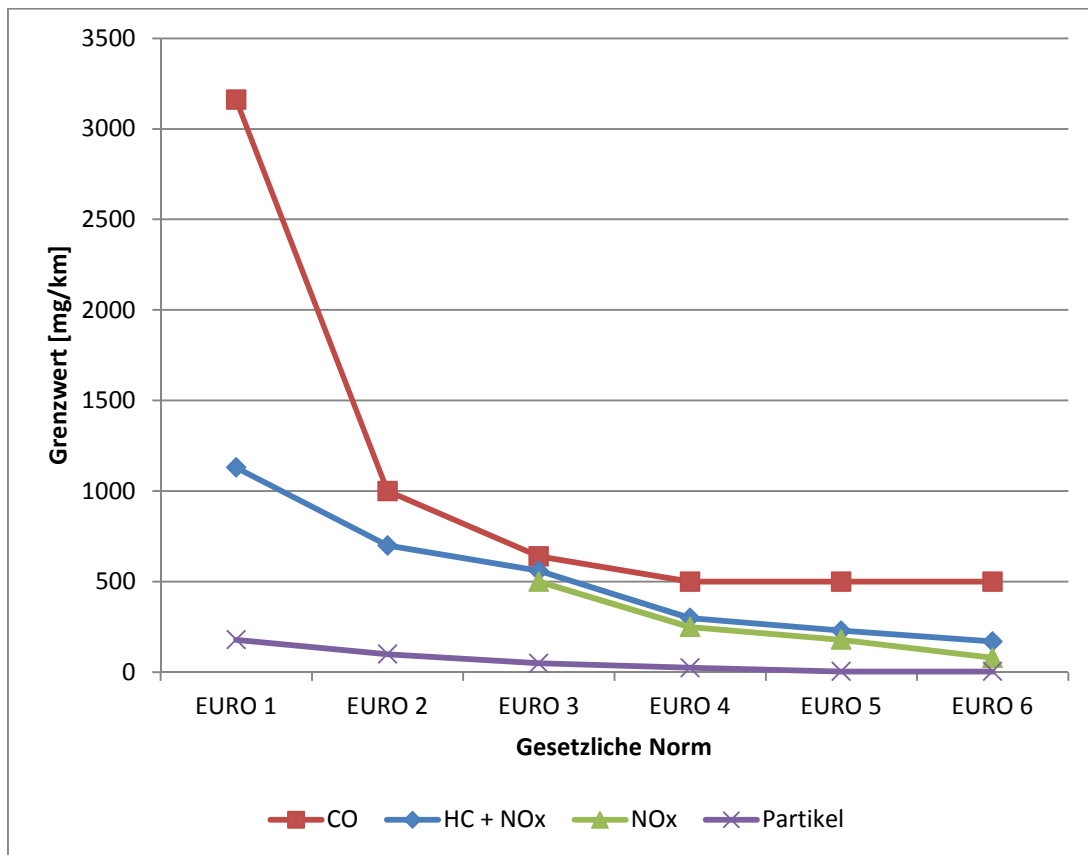


Abbildung 19: Verlauf der Verschärfung der Abgasnormen für PKWs mit Dieselmotor

7.1.2 Parallele und verwandte Entwicklungen

Hierbei sind in erster Linie konkrete Entwicklungen im Bereich der Schwungradtechnik gemeint, die jedoch nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Fahrzeugtechnik oder der Automobilindustrie im Allgemeinen stehen, aber deren gewonnene Erkenntnisse sich wiederum für Schwungradhybride als nützlich erwiesen haben.

1. Raumfahrt

Das Schwungrad wurde schon zu den Pionierzeiten der Raumfahrt als Lagestabilisator für Satelliten eingesetzt. Es wurde aber auch noch mit einer weiteren Aufgabe betraut, nämlich dem Speichern von Energie der Solarzellen für das Durchlaufen des Erdschattens. Zwar fallen im Weltraum die Strömungsverluste eines frei laufenden Rades ohnehin weg, aber um die Lagerreibung so gering wie möglich zu halten, wurden bereits in den 1970er Jahren magnetische Lager entwickelt, die heute auch Anwendung in Schwungradbatterien für Fahrzeuge finden werden. (22)

2. Energietechnik

Im Bereich der elektrischen Energietechnik konnten Schwungradspeicher als Ersatz für Batterien bis jetzt am erfolgreichsten getestet und eingesetzt werden. Es handelt sich um stationäre Anlagen, denen meist zwei Aufgaben zukommen:

1. Zur Übernahme von Spitzenlasten um die Energiekosten gering zu halten (Lastpunktverschiebung)
2. Als aktiver Netzfilter um kurzzeitige Stromausfälle zu verhindern

Die konstruktiven Anforderungen an stationäre Schwungradspeicher unterscheiden sich jedoch erheblich von denen bei mobilen Anlagen:

- Da keine dynamischen, äußeren Kräfte wirken, können magnetische Lager leichter eingesetzt werden.
- Das Gewicht spielt meist eine untergeordnete Rolle, wodurch die Drehzahl bei gleichem Energieinhalt geringer gehalten werden kann.
- Der Bauraum ist meist nicht limitiert, wodurch mehr Platz für ein Sicherheitsgehäuse sowie die peripheren Systeme bleibt.
- Da keine Lageänderung auftritt, müssen die Kreiselkräfte nicht beachtet werden.

Dennoch können viele der gewonnenen Erkenntnisse und Detailösungen für die Anwendung am Schwungradfahrzeug übernommen werden. Ein Beispiel für einen stationären Schwungradspeicher, der bereits erfolgreich in der Praxis eingesetzt wurde, zeigt Abbildung 20.

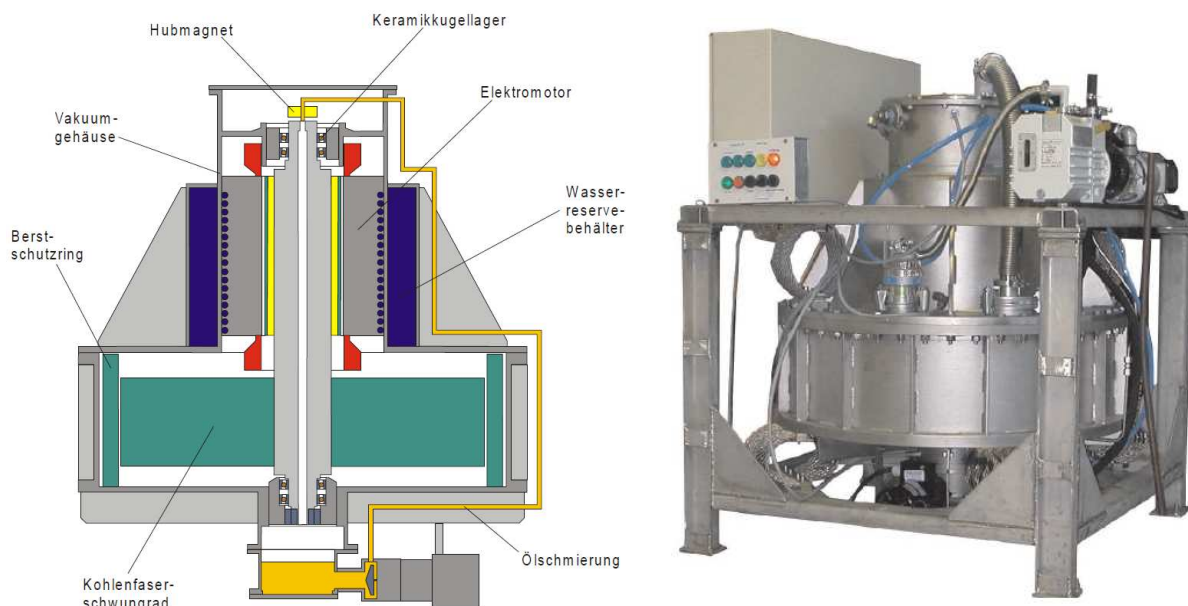


Abbildung 20: Stationärer Schwungradspeicher Model T2 der Firma Rosseta GmbH (23)

3. Verkehrstechnik

Abgesehen von der Anwendung des Schwungrades als Energiequelle für die Fortbewegung an sich wurde es im Bereich der Verkehrstechnik in erster Linie für die Lagestabilisierung durch die gyroskopischen Kräfte eingesetzt (vergleiche Anhang 3.5). Zu erwähnen sind hierbei die *Einschienebahn*, zweirädrige PKWs (wie in Abbildung 21 dargestellt), Schiffsstabilisatoren zur Schlingerdämpfung und Kreiseltechnik in Hubschraubern. Auch in der Messtechnik werden Kreiselpattformen häufig eingesetzt, etwa für die Lagebestimmung von Zügen, da während der Tunnelfahrt kein GPS-Signal zu Verfügung steht.

Eine weitere und sehr frühe Anwendung ist im Bereich der Kriegsmarine zu finden. Der *Howell Flywheel Torpedo* von 1892 wurde von einem 60 Kg schweren und 12000 U/min schnell drehenden Schwungrad angetrieben. (24)

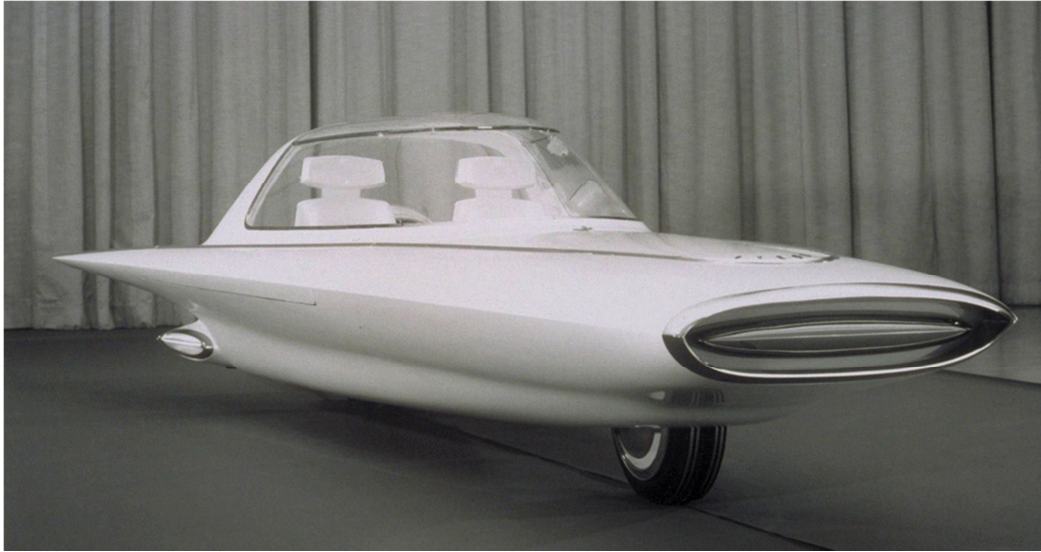


Abbildung 21: Der gyroskopisch stabilisierte zweirädrige PKW *Ford Gyron* von 1961 (25)

7.1.3 Entwicklung von Komponenten

1. Rotorwerkstoffe

Als die Schwungradtechnologie während der Ölkrise in den 1970er Jahren einen markanten Aufschwung erlebte, wurden unzählige Rotorwerkstoffe getestet. Daran war *Dr. David Rabenhorst* von der *John Hopkins University in Baltimore*, der als Pionier der Schwungradforschung gilt, maßgeblich beteiligt. Man erkannte sehr schnell, dass sich leichte, hochfeste Werkstoffe besser eignen, um hohe Energiedichten zu erreichen, als schwere Werkstoffe, wie zum Beispiel Stahl. (Eine analytische Beschreibung dieses Umstandes wurde bereits in Abschnitt 4.4 gegeben.)

Rabenhorst lobte zwar die gute Eignung des Kohlefaserverbundes für den Einsatz in *High-Speed Flywheels*, bedauerte aber gleichfalls den zu hohen Preis, der damals bei etwa 700 USD pro Kilogramm lag (26). Ein weiteres Problem war die ungleiche Dehnung von Faser und Matrix aufgrund der enormen Fliehkräfte, welche zum Lockern und Abwickeln der Randfasern und in weiterer Folge zum Versagen des Schwungrades führten. Aber in den letzten 40 Jahren sank, wie Abbildung 22 zeigt, der Preis für hochleistungsfähige Faserwerkstoffe eklatant, und auch die Simulationstechnik im Bereich der Festigkeitsberechnung von Verbundwerkstoffe machte große Fortschritte. Die spiegelt sich auch dadurch wider, dass immer mehr ehemals metallische Teile an Fahrzeugen durch Kunst- und Verbundwerkstoffe ersetzt werden. Grund hierfür sind wiederum auch gesetzliche Bestimmungen (vergleiche Kapitel 7.1.1), welche den Leichtbau forcieren, wodurch im Zeitraum von 2005 bis 2011 ein jährliches Wachstum des Kohlefasermarktes von 12% zu verzeichnen war (27). Das Szenario ist in Abbildung 23 anschaulich dargestellt.

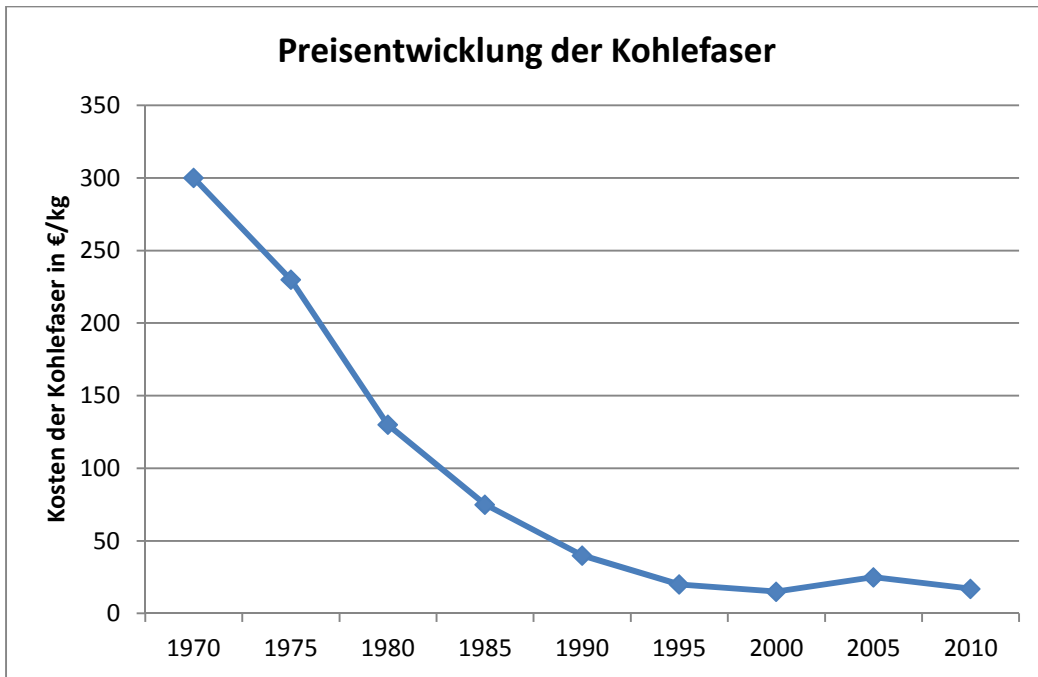


Abbildung 22: Preisentwicklung der Kohlenstofffaser, erstellt aus Daten von (28) und (29)

Nach aktuellen Angaben überstieg jedoch die Nachfrage das momentane Produktionsvolumen an Kohlefasern, was möglicherweise einen erneuten Preisanstieg zur Folge haben könnte. Alternativen bilden aber andere hochfeste Verbunde wie Glas- oder Aramidfaserwerkstoffe, sowie *Metal-Matrix-Compounds*, kurz *MMCs*, die sich allerdings noch im Forschungsstadium befinden.

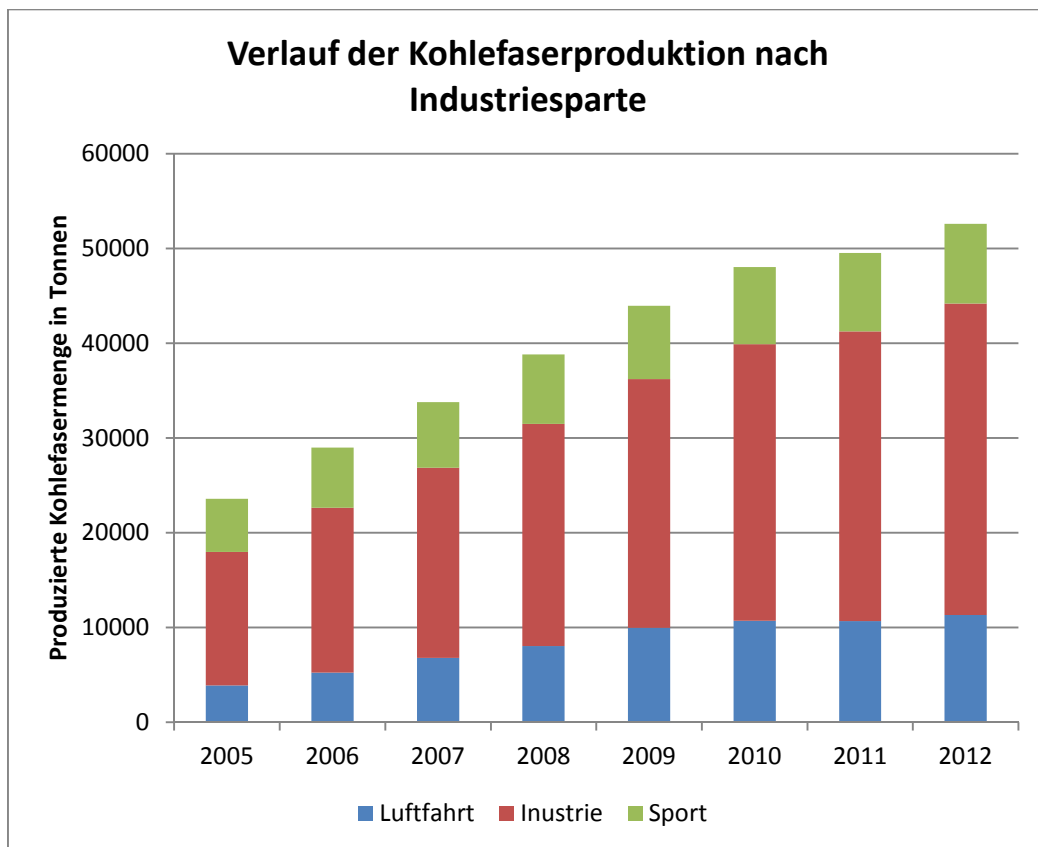


Abbildung 23: Masse an Kohlefaserprodukten nach Sparte und daraus ersichtliches Wachstum (27)

2. Lagerung des Rotors

Wie aus dem späteren Kapitel 4 hervorgeht, können mobile Schwungradspeicher nur dann konkurrenzfähig sein, wenn sie eine sehr hohe Energie- und Leistungsdichte erreichen. Dafür sind extrem hohe Drehzahlen von Nöten, welche eine besondere Anforderung an die Lager stellen. Im Bereich der berührungslosen Lagertechnik haben eigenstabile, *supraleitende Magnetlager* eine weitere Verbesserung in Aussicht gestellt. Sie sind selbstzentrierend, reibungsfrei und verschleißfrei, benötigen keine Regelkreise und können problemlos im Vakuum eingesetzt werden, da sie keine Schmiermittel besitzen, die zum Ausdampfen neigen. Laut Angaben in diversen Literaturstellen, wie zum Beispiel (30), ist das so genannte *Hochgradientenlager* bereits weit genug entwickelt, um in Serien eingesetzt zu werden. Es setzt allerdings eine Kühlung mittels flüssigen Stickstoffs voraus, was den mobilen Einsatz etwas erschweren könnte (Abbildung 24 links).

Durch Fortschritte in der Regelungstechnik bieten aber auch *aktiv geregelte Magnetlager*, wie in Abbildung 24 rechts dargestellt, eine gute Alternative. Aktive Magnetlager bestehen typischer Weise aus fünf Funktionsbausteinen, welche allesamt zu den deutlich höheren Kosten gegenüber Wälzlagern beitragen.

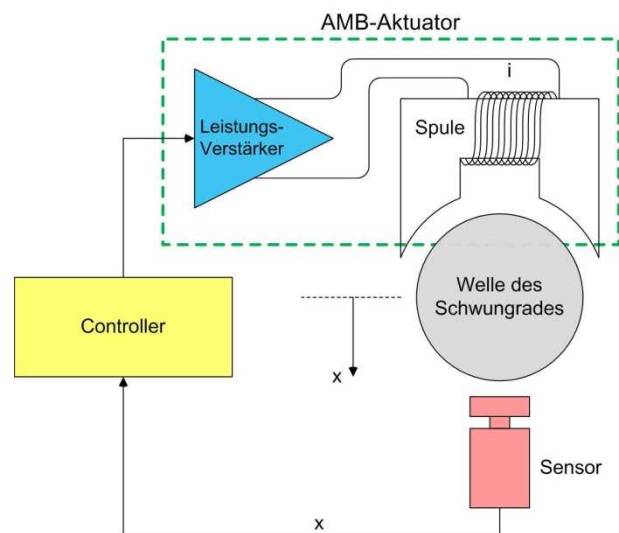


Abbildung 24: Schwebender Magnet über gekühltem Supraleiter (links) und aktives Magnetlager (rechts) (31)

Diese Komponenten sind:

- Elektromagneten/Aktuator
- Rotor
- Control-Unit
- Leistungsverstärker
- Achssensor

Doch auch die Leistungsfähigkeit von konventionellen Lagertypen, wie zum Beispiel dem Rillenkugellager, konnte entscheidend gesteigert werden. Durch den Einsatz von Keramik-

wälzkörpern¹⁴ wurde ein Hybridlager geschaffen, welches verbesserte Eigenschaften hinsichtlich Schmierung, Drehzahl, Temperaturbeständigkeit und Stromdurchgang aufweist. (32)

3. Regelung / Leistungselektronik

Die ständig verbesserte Leistungsfähigkeit bei gleichzeitiger Preissenkung in der Halbleitertechnik hat auf viele Teilbereiche der Schwungradtechnologie positive Auswirkungen. Zum Einen können Regelkreise für die Funktionsüberwachung preisgünstig und platzsparend gestaltet werden, zum Anderen konnte die Effizienz der elektrischen Energieübertragung von und zum Schwungrad durch moderne Leistungselektronik deutlich gesteigert werden. In diesem Fall spielt die Weiterentwicklung so genannter FETs (*Field Effect Transistors*) und IGBTs (*Insulated-Gate Bipolar Transistors*) eine wesentliche Rolle (33) und ist somit ausschlaggebend für den zukünftigen Erfolg oder Misserfolg elektromechanischer Energiespeicher.

Die reinen Kosten des *CMOS-Wafers* sind im letzten Jahrzehnt um rund 22% gesunken, aber gleichzeitig ist auch die Leistungsdichte der ICs dramatisch angestiegen, wodurch eine realistische Bewertung der Preisentwicklung erst durch die Betrachtung der Kosten pro Transistor auf einer Halbleiterplatte möglich wird, wie Abbildung 25 anschaulich zeigt. Die Kostensenkung von 1960 bis 1992 war sogar noch dramatischer, sodass sie nur logarithmisch dargestellt werden könnte und daher nicht im Verlaufsdiagramm der Abbildung 25 beachtet wurde.

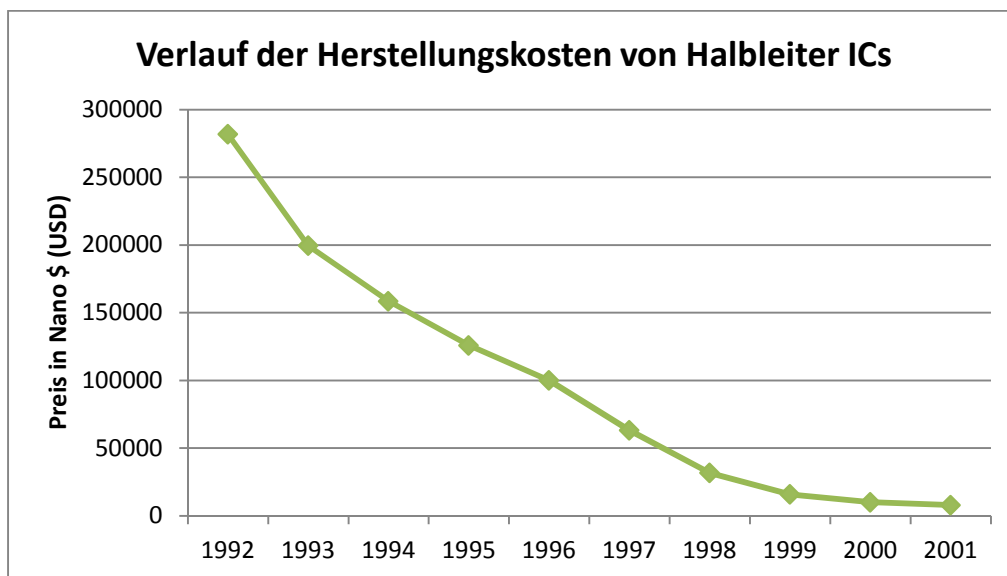


Abbildung 25: Verlauf der Herstellungskosten pro Transistor auf einem Halbleiter-IC (34)

4. Vakuumtechnik

Die verlustarme Durchführung drehender Wellen in einen evakuierten Raum stellt nach wie vor großes Entwicklungspotential dar. Durch permanente Leckageverluste ist es notwendig, eine Vakuumpumpe ständig in Betrieb zu halten, was sich negativ auf die Energiebilanz des Schwungradspeichers auswirkt. Zwar wurde durch den Umstieg von der Gleitringdichtung auf die *Ferrofluidichtung* eine Verbesserung in der möglichen Vakuumgüte erreicht, aber der absolute Durchbruch blieb bis jetzt aus. Vakuumdurchführungen auf Basis von Ferrofluiden, wie in Abbildung 26 dargestellt, können typischerweise einer Druckdifferenz von 200 mbar pro Stufe

¹⁴ Ein geeigneter Werkstoff ist Siliziumnitrid Si_3N_4 .

standhalten, es sind aber auch größere Druckdifferenzen möglich. Ferrofluide sind Flüssigkeiten, in welche mikroskopische, ferromagnetische Partikel eingelagert sind. Die Ferrofluide fungieren als Trennschicht zwischen den unterschiedlichen Druckniveaus und werden von Magneten daran gehindert, in Richtung des niedrigeren Systemdrucks abzuwandern. Das Prinzip wird in Kapitel 9.3 und 10.3 noch genauer beleuchtet.

Verzichtet man auf die Durchführung drehender Teile, indem man eine elektrische Energieübertragung anwendet und den Motor-Generator mit ins Vakuum versetzt, so treten Probleme thermischer Natur auf, da die Kühlung nicht mehr konvektiv sondern nur auf Basis der Strahlungswärme erfolgen kann.

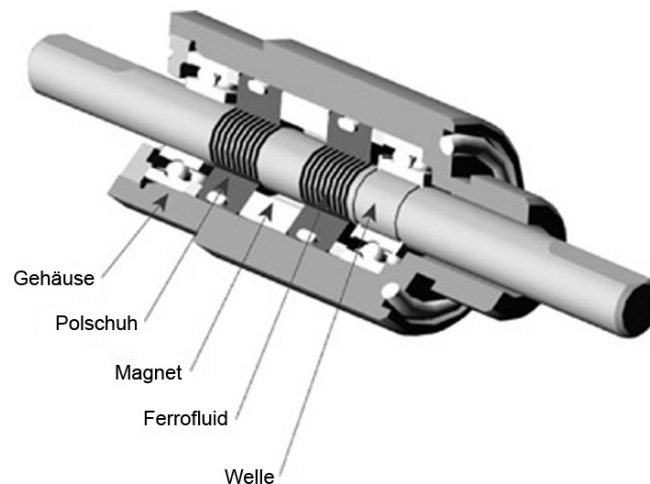


Abbildung 26: Typischer Aufbau einer Ferrofluiddichtung (35)

5. Elektromaschinen

Im Falle einer elektrischen Energieübertragung ist der Motor-Generator wohl als einer der wichtigsten Bausteine des Schwungradspeichers zu sehen. Ein geringes Verlustmoment ist essentiell für den Leerlaufbetrieb des Speichers, um die Selbstentladung, welche zurzeit noch ein gewaltiges Problem darstellt, so gering wie möglich zu halten. Ein hoher Wirkungsgrad ist nicht nur aus ökonomischer Sicht wünschenswert, sondern auch, um die eben schon erwähnte problematische Wärmeabfuhr in den Griff zu bekommen. Um genauer auf die aktuellsten Entwicklungen sowie deren typenspezifische Vorteile eingehen zu können, bedarf es einer eigenen Arbeit und der Expertise eines professionellen Elektrotechnikers.

7.2 Abzeichnung von Trends

Das vorhergehende Kapitel hat gezeigt, dass der Einfluss der äußeren Umstände auf die Entwicklung der Schwungradfahrzeuge erheblich, aber zu komplex, um ihn einfach quantifizieren zu können, ist. Zwar liegt mit über 50 erhobenen Schwungradfahrzeugen eine umfangreiche Datenmenge vor, aber der Versuch einer statistischen Auswertung der technischen Angaben wird zusätzlich dadurch erschwert, dass die verfügbaren Daten zu teilweise sehr unterschiedlichen Fahrzeugtypen gehören (vergleiche Abbildung 27). Man muss sich also bei der statistischen Analyse auf die wenigen technischen Spezifikationen beschränken, die in fast allen

Fällen detailliert beschrieben sind und einen eindeutigen und einheitlichen Trend aufweisen. Gewählt wurden die Spezifikationen *Drehzahl*, *Energieinhalt* und *Energiedichte*. Die Betrachtung der maximalen Leistung der jeweiligen Speicher ist beispielsweise nur wenig zielführend, da die der Leistungsbedarf eines Schienenfahrzeugs mit jenem eines PKWs nicht zu vergleichen ist. Des Weiteren gilt generell, dass die übertragbare Leistung von der Bauart des Schwungradspeichers und somit in den meisten Fällen von der elektrischen Maschine abhängt. Im Falle einer mechanischen Energieübertragung ergibt sich eine Leistungslimitierung nur aufgrund der zulässigen Werkstoffbeanspruchung und/oder der maximal übertragbaren Reibkräfte (CVT-Getriebe).

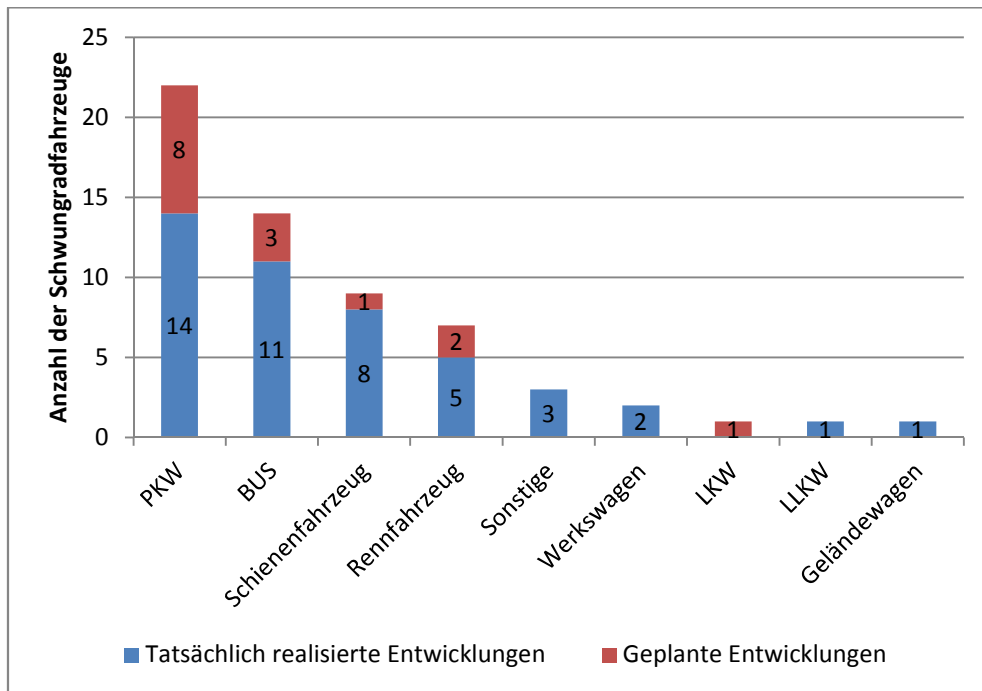


Abbildung 27: Übersicht der Fahrzeugtypen unter den Schwungradfahrzeugen

Anmerkung: In der nun folgenden Trendanalyse der Parameter Maximaldrehzahl, Energieinhalt und Energiedichte wurden in den Verlaufsdiagrammen (Abbildung 28, Abbildung 30 und Abbildung 32) zeitliche Entwicklungsintervalle festgelegt. Diese ergeben sich nicht aus der reinen Betrachtung der Diagramme, sondern wurden durch Korrelation mit dem geschichtlichen Hintergrund definiert.

7.2.1 Trend der Drehzahlen mobiler Schwungradspeicher

Wie erwähnt, sind die Drehzahl sowie der Energieinhalt jedoch bei so gut wie jedem Schwungradhybrid veröffentlicht worden und können daher gut für eine erste Trendanalyse herangezogen werden. In Abbildung 28 wurde die Maximaldrehzahl aller in dieser Arbeit registrierten Entwicklungen vom Jahr 1791 bis 2011 auf der logarithmischen Y-Achse aufgetragen. Grund für die nichtlineare Zeitachse ist die Tatsache, dass sich der Entwicklungsverlauf über eine extrem große Zeitspanne, aber äußerst diskontinuierlich hinzog.

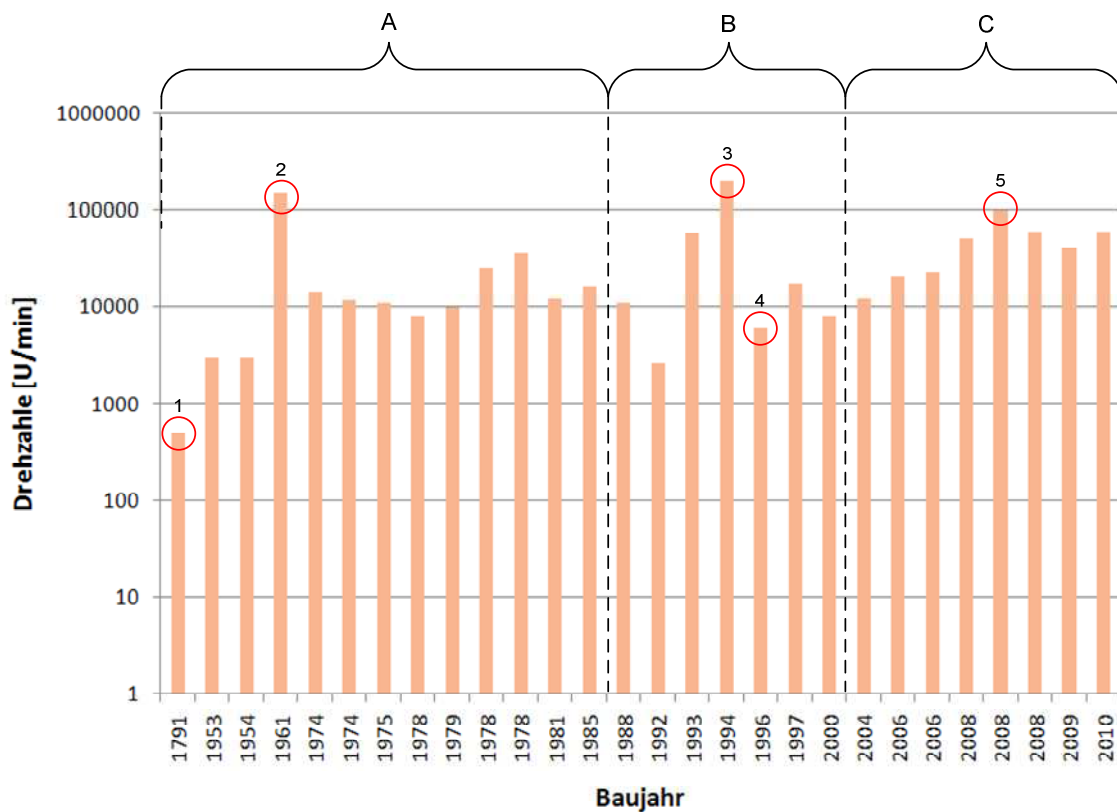


Abbildung 28: Statistischer Trend der Maximaldrehzahl von Schwungradspeichern in Hybridfahrzeugen

Technische Entwicklungen folgen oft dem Verlauf einer Treppenfunktion. Während des iterativen Entwicklungsprozesses wird ein Ziel verfolgt, das Produkt auf ein bestimmtes Merkmal hin optimiert, bis man erkennt, dass das vermeintliche Optimum doch Probleme mit sich bringt und man es schließlich verwirft, um einen anderen Ansatz zu wählen. Über einen längeren Zeitraum, oder über mehrere technische Epochen gesehen – wie es bei den Schwungradhybriden der Fall ist – können Entwicklungsperioden identifiziert werden, in denen unterschiedliche Charakteristika angestrebt wurden.

Entwicklungsintervall A, 1791 bis 1985: Es dominiert klar das Streben nach höheren Drehzahlen, angetrieben durch eine Herangehensweise, welche von den grundlegenden, physikalischen Eigenschaften des Schwungrades geprägt ist. Da der Energieinhalt definiert ist durch: $E_k = \frac{1}{2}I\omega^2$ galt es die Drehzahl so hoch wie möglich anzuheben, um viel Energie speichern zu können. Ermöglicht wurde dies, als man - motiviert durch das arabische Ölembargo – begann, mit Faserverbundwerkstoffen und sogar organischen Materialien wie Bambus zu experimentieren. Aufgrund des gutmütigeren Berstverhaltens wurde es auch relativ sicher, mobile Schwungräder in Bereichen von 10000 bis 30000 U/min zu betreiben. Statistischer Ausreißer Nummer 1 ist das *Kulibin Dreirad*, welches sich bei den Werkstoffen auf Holz und Schmiedeteile beschränken musste.

Entwicklungsintervall B, 1988 bis 2000: Noch immer gibt es Schwierigkeiten mit den elektrischen und elektronischen Komponenten der Speicher, welche keine ausreichend hohe

*Round Trip Efficiency*¹⁵ erreichen und wegen der Verlustleistung zu thermischen Problemen führen. Gleichzeitig erkennt man, dass die Herstellung von gewickelten Faserverbundrotoren nach wie vor extrem aufwändig ist und genauestens kontrolliert werden muss, um ausreichende Reproduzierbarkeit zu erreichen. Es entsteht eine zweite Fraktion, welche es vorzieht, einfache Schwungräder aus Stahl, die durch ein CVT Getriebe verbunden sind, einzusetzen, wodurch die Drehzahlen etwas geringer bleiben, aber praxistaugliche Prototypen mit gutem Gesamtwirkungsgrad entstehen.

Ausreißer Nummer 2 ist das *PPM 50 Railcar* der Firma *Parry People Movers*, ein Schienenfahrzeug, welches aufgrund des großen Platzangebotes einen langsam drehenden (2600 U/min) Stahlrotor besitzt.

Nummer 3 bezieht sich auf einen Prototypen von *Chrysler* namens *Patriot*, der beim 24 Stunden Rennen von Le Mans hätte Furore machen sollen, aber diversen Angaben zu Folge (36) nie funktioniert hat. Aufgrund der hohen Drehzahl brachte das Fahrzeug ein derart hohes Sicherheitsrisiko mit sich, dass es kein Fahrer wagte, es in Betrieb zu nehmen. Das Konzept basierte auf einem seriellen Hybrid, der als primäre Leistungseinheit eine Gasturbine besitzt, welche an einen elektrischen Generator gekoppelt ist. Zwischen ihm und dem elektrischen Antriebsmotor ist das Schwungrad geschaltet, welches eine Lastpunktverschiebung sowie eine Nutzbremmung erlaubt. Ein Screenshot des Fahrzeuges während der Konstruktion ist in Abbildung 29 dargestellt.

Ausreißer Nummer 4 ist eines der soeben besprochenen kostengünstigen Konzepte mit Stahlrotor und mechanischer Ankoppelung. Der *Hybrid III*, eine Entwicklung der ETH Zürich, wurde auf der Basis eines *VW Sharan* gebaut und sein Schwungrad erreicht Drehzahlen von maximal 6000 U/min.

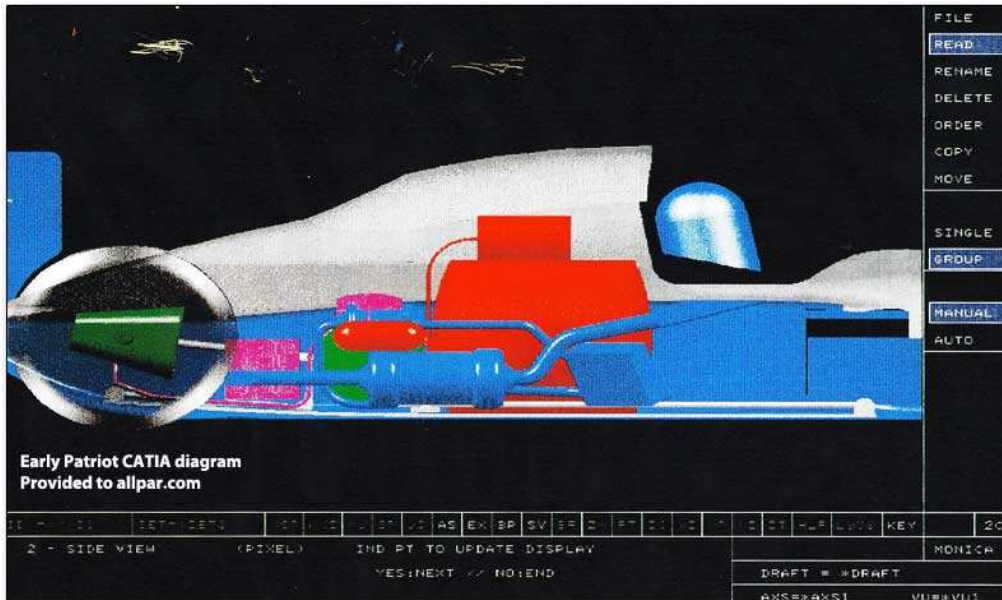


Abbildung 29: CATIA®-Darstellung des Chrysler Patriot zu Beginn der 1990er Jahre (36)

Entwicklungsintervall C, 2004 bis 2010: Maßgeblich für den erneuten und drastischen Anstieg der Drehzahlen war mit Sicherheit die Einführung des *KERS* in der *Formel 1* durch die *FIA*. Im Rennsport ist es essentiell, Grenzen auszuloten und zu erweitern, um gewinnen zu können. Preis, Lebensdauer sowie Wartungsaufwand spielen nur eine untergeordnete Rolle. Die aus dem

¹⁵ Siehe Gedankenexperiment in 4.1.

Rennbetrieb gewonnenen Erkenntnisse können aber sehr gut für die Weiterentwicklung serientauglicher Schwungradspeicher herangezogen werden und begünstigen daher den in diesem Intervall erkennbaren Trend zu höheren Drehzahlen.

Freilich ist aber auch ein genereller, auf das gesamte Diagramm bezogener Trend feststellbar: Der signifikante Anstieg der maximalen Betriebsdrehzahl ist ein wichtiger Schritt in Richtung hoher Energiedichte (vergleiche auch Kapitel 4.2) und bestätigt des Weiteren die in Abschnitt 7.1.3 getroffene Annahme, dass die Verbesserung von Rotorwerkstoffen ebenfalls eine positive Auswirkung auf schwungradgetriebene Hybridfahrzeuge haben würde. Diese These wird durch das Diagramm in Abbildung 32 bestärkt.

7.2.2 Trend des Energieinhaltes mobiler Schwungradspeicher

Interessant zu beobachten ist, dass der Energieinhalt der Schwungradspeicher – ganz im Gegensatz zur Maximaldrehzahl und der Energiedichte im Allgemeinen - deutlich geringer wurde. Eine Erklärung dieses gegenläufigen Trends ist nicht ganz trivial, da er, wie schon unter Kapitel 7.2.1 erläutert wurde, unter anderem damit zusammenhängt, dass völlig unterschiedliche Entwicklungsziele angestrebt wurden. Daher ist es wieder notwendig, einzelne Intervalle zu betrachten, welche einen einheitlichen Trend aufweisen. Generell ist für diesen Abschnitt anzumerken, dass konkrete Angaben über den Energieinhalt vorwiegend für Fahrzeuge, die dem Nahverkehr zugeordnet sind, verfügbar waren, und in dem folgenden Diagramm (Abbildung 30) nur wenige PKWs enthalten sind.

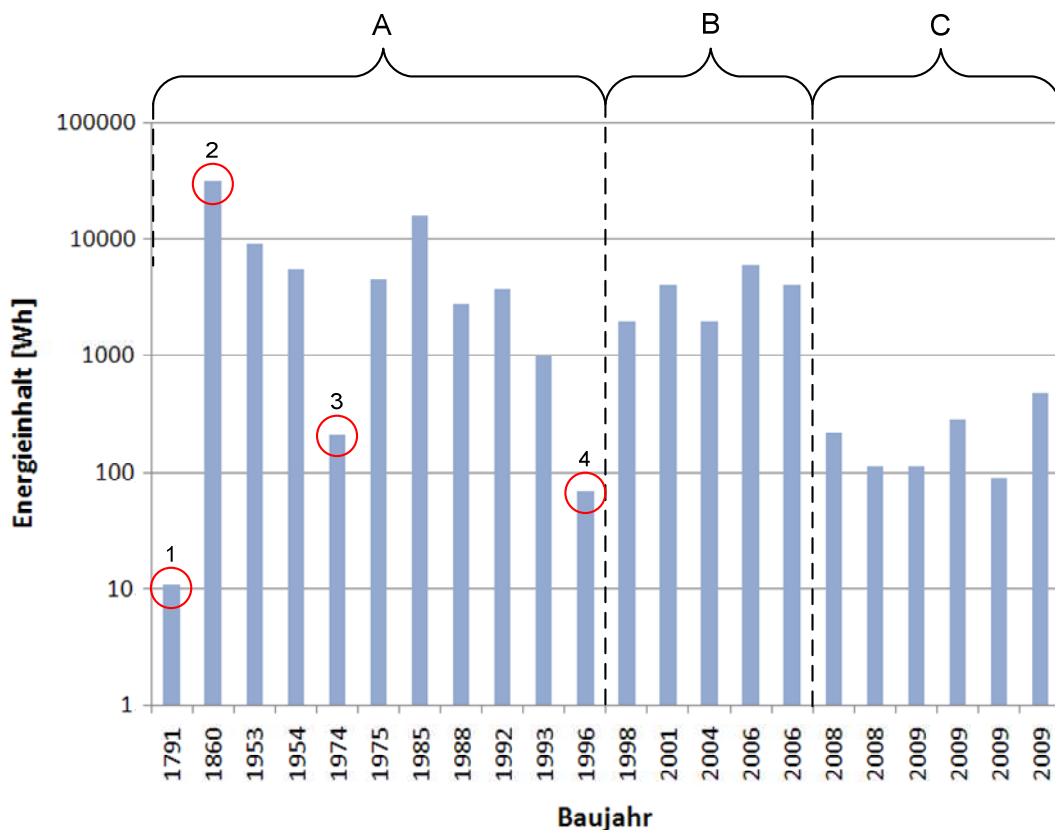


Abbildung 30: Statistischer Trend des Energieinhalts von Schwungradspeichern in Hybridfahrzeugen

Entwicklungsintervall A, 1791 bis 1996: Trotz der Ausreißer 1, 3 und 4 bliebe eine exponentielle Trendlinie, die leicht abfallend verlief, deutlich über der 1-kWh-Linie. Dies kann einerseits dadurch erklärt werden, dass unter den Konzepten in diesem Intervall vorwiegend Fahrzeuge, die dem öffentlichen Verkehr dienen, angesiedelt sind. Andererseits wird merkbar, dass in den 60er und 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts noch verstärkt das „reine“ Schwungradfahrzeug verfolgt wurde, wodurch ebenfalls ein hoher, absoluter Energieinhalt angestrebt wurde. Der leichte Abwärtstrend innerhalb dieses Intervalls ist auf den Umstand zurückzuführen, dass man sich ab den späten 1980ern wieder von der Idee des Plug-In-Schwungradfahrzeuges distanzierte und die Hybridtechnologie als Hoffnungsträger für die Revolution des Fahrzeugantriebes sah. Dies brachte mit sich, dass der Hauptanteil der Energie durch einen anderen Energiespeicher wie etwa Batterien oder einen konventionellen Kraftstofftank zu Verfügung gestellt wurde und somit die Notwendigkeit eines hohen Energieinhalts für das Schwungrad obsolet machte.

Entwicklungsintervall B, 1998 bis 2006: Alle sich in diesem Intervall befindlichen Konzepte sind kommerzielle Fahrzeuge, 4 davon sogar Schienenfahrzeuge, welche aufgrund der höheren Fahrzeugmasse auf jeden Fall einen höheren Energieinhalt benötigen. Ein Ausnahmefahrzeug stellt die 2006 am Fraunhofer Institut in Dresden entwickelte *AutoTram* dar, ein vollautomatisiertes Transportsystem, welches neben einem Schwungrad der Firma CCM noch andere Speichertechnologien, wie Brennstoffzellen einsetzt.

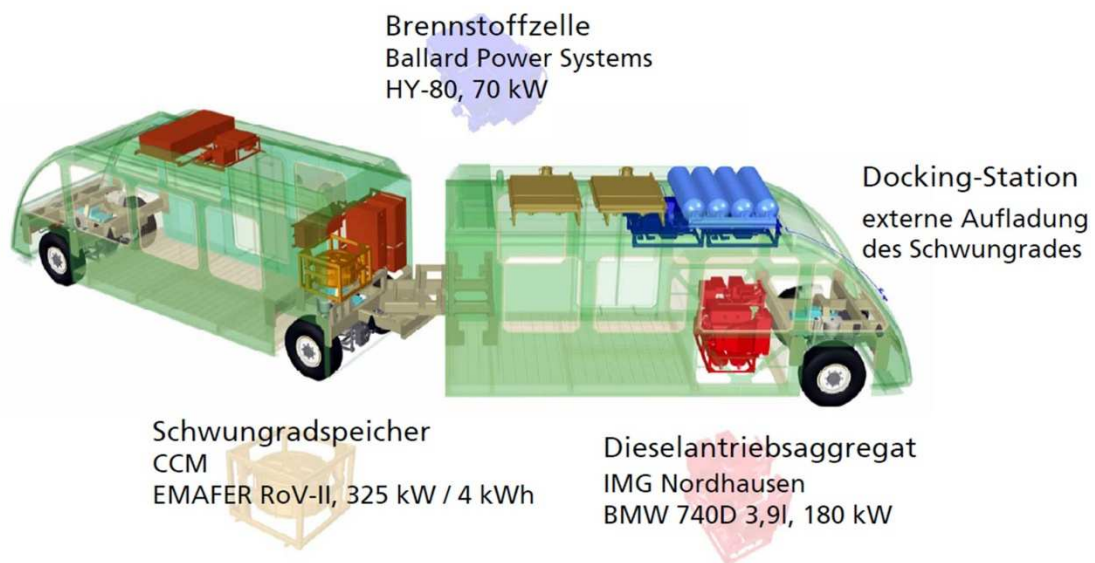


Abbildung 31: Das hybride Antriebssystem der *AutoTram* (37)

Entwicklungsintervall C, 2008 bis heute: Man musste eingestehen, dass die Vorteile des *Flywheels* eher in der hohen Leistungs- als in seiner Energiedichte zu finden waren. Es wurde daher als hochdynamischen „Pufferspeicher“ bzw. „Booster“ benutzt, um Lastspitzen zu kappen, also zur Lastpunktverschiebung, und umging somit eines der großen Probleme der Schwungradspeicher, nämlich die starke Selbstentladung durch ein unweigerlich hohes Verlustmoment. Zudem kann der Energieinhalt eines Schwungradspeichers, welcher in einem Hybridantrieb zum Einsatz kommt, durch die heute übliche numerische Simulation optimal ausgelegt werden, sodass eine Überdimensionierung selten vorkommt. Vielmehr wird danach

getrachtet, den Speicher optimal an das vorliegende Lastkollektiv bzw. den erforderlichen Fahrzyklus in Verbindung mit den restlichen Antriebskomponenten simulationstechnisch anzupassen. Wie im Entwicklungsintervall C unter Kapitel 7.2.1 war die Einführung des *KERS* im Rennsport stark verantwortlich für den Entwicklungsverlauf.

Eine weitere Verbesserung könnte die Verknüpfung des Energiemanagements des Fahrzeuges mit einem satellitengestützten Navigationssystem mit sich bringen. Nach erfolgter Zieleingabe des Fahrers würde eine virtuelle Route berechnet, welche aufgrund der vorliegenden geodätischen Daten genaue Informationen über die potentielle und kinetische Energie des Fahrzeuges sowie den Energiebedarf schon im Vorhinein zu Verfügung stellt. Somit könnte vermieden werden, dass der Schwungradspeicher vor Antritt einer langen Bergabfahrt bereits durch eine sekundäre Energiequelle aufgeladen würde und keine Rekuperation der Bremsenergie mehr möglich wäre, und/oder der Schwungradspeicher könnte vor Ankunft am Ziel noch leergefahren werden, um die Energie nicht während der Stehzeiten dem Verlustmoment zum Opfer fallen zu lassen.

Für die Hybridisierung der Fahrzeugantriebe ist der Trend eines geringeren Energieinhaltes also durchaus positiv zu bewerten. Sieht man das autarke Schwungradfahrzeug, wie es in den 1970ern verfolgt wurde, als langfristiges Ziel, so müsste sich sowohl dieser Trend umkehren, also auch die Energiedichte noch weiter signifikant steigen.

7.2.3 Trend der Energiedichte mobiler Schwungradspeicher

Deutlich weniger Daten liegen leider für die Ermittlung der Energiedichten vor, sodass es nicht möglich ist, klare Entwicklungsintervalle abzugrenzen. Zwar sind meist Angaben über den Energieinhalt der jeweiligen Speicher wie in Abbildung 30 dargestellt verfügbar, das Gewicht eines Schwungradspeichers wird dagegen nur selten inklusive der notwendigen peripheren Gerätschaften wie Gehäuse, Lagerung, Vakuumpumpe, Leistungselektronik oder Übertragungsmechanik angegeben. Um ein einigermaßen repräsentatives Diagramm erstellen zu können, wurde die Energiedichte auf das Gewicht der reinen Schwungmasse bezogen, da dieses – wenn überhaupt – etwas leichter zu eruiieren war als das Gewicht des Gesamtsystems. Bei Systemen mit mechanischer Energieübertragung würde sich außerdem bei der Ermittlung des Gesamtgewichts auch noch die Frage nach der Systemgrenze stellen, welche nicht immer eindeutig zu definieren ist, je nachdem welche Übertragungselemente mit einbezogen werden. Ein Bezug der Energiedichte auf das Gewicht der Schwungmasse an sich ist jedoch eindeutig.

Ausreißer 1 ist die um 1860 in Russland entwickelte *Schuberski-Lokomotive*, die natürlich in einer völlig anderen technischen Epoche angesiedelt ist als die restlichen Konzepte. Die Dampflokomotive verfügte über ein 5-Tonnen schweres Stahlschwungrad mit 3,6 Meter Durchmesser.

Die „positiv auffallenden“ Ausreißer 2 und 3 mit außergewöhnlich hoher Energiedichte kommen beide vom gleichen Hersteller, nämlich der US-amerikanischen *Garrett Corporation*. Zwar liegen nicht genügend Daten vor, um das Phänomen tiefgehend auf analytischer Basis zu erklären, es steht aber fest, dass *Garrett* bereits damals gewickelte Kevlarrotoren einsetzte und somit hohe Drehzahlen und folglich hohe Energiedichten erreichen konnte. Es ist jedoch zu bezweifeln, dass

die *Garrett*-Systeme zum damaligen Zeitpunkt kostengünstig genug waren, um mit den konventionellen Fahrzeugen zu konkurrieren.

Bei Ausreißer Nummer 4 handelt es sich um den unter Abschnitt 7.2.1 bereits erwähnten *Hybrid III* der *ETH Zürich*, der einerseits als *Low-Cost Variante* mit Stahlrotor konzipiert ist, und andererseits das Schwungrad als Kurzzeitspeicher einsetzt.

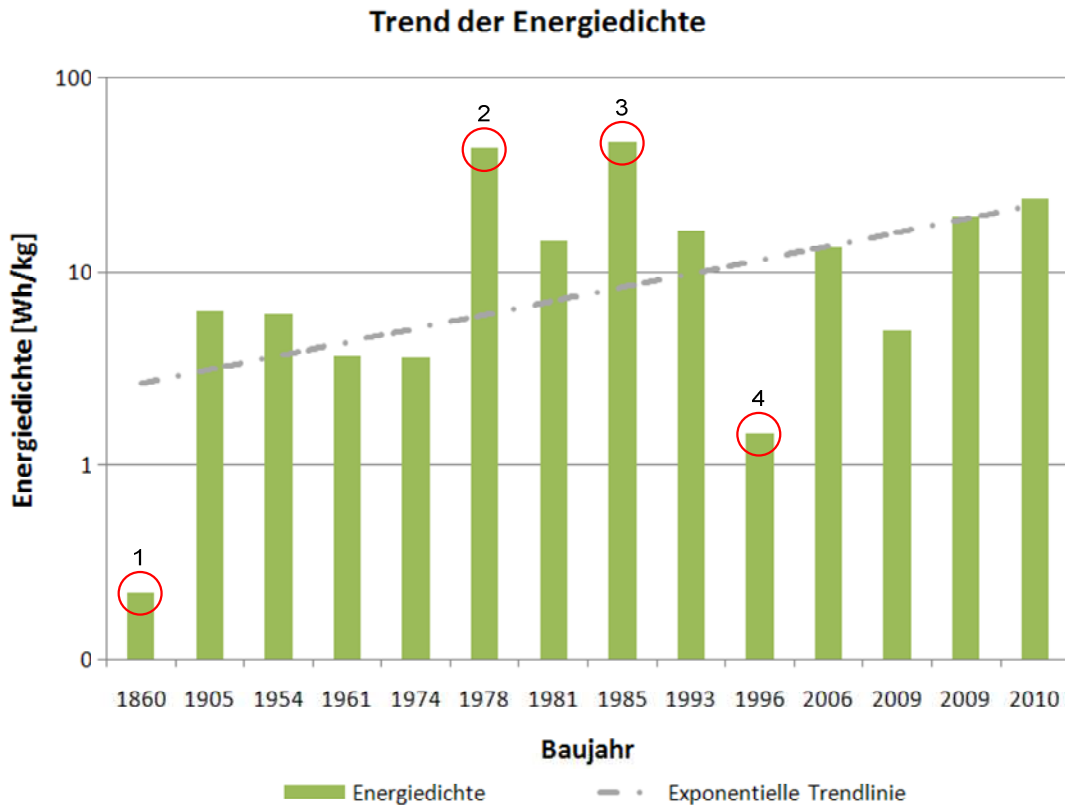


Abbildung 32: Statistischer Trend der Energiedichte¹⁶ von Schwungradspeichern in Hybridfahrzeugen

Die frühen Systeme mit sehr hohen Energiedichten wagten sich nahe an die Berstgrenze der Rotoren und sind hinsichtlich Praxistauglichkeit und Sicherheit nicht mit den heutigen Speichern vergleichbar, welche mittlerweile auch Crashtests bestanden haben (38). Über die Sicherheit schwungradgetriebener Fahrzeuge wird im Anhang, Kapitel 2, diskutiert.

Anders als beim Energieinhalt, welcher je nach Anwendung unterschiedlich ausgelegt werden muss, liegt bei der Energiedichte ein klares, erstrebenswertes Ziel vor, nämlich jenes der größtmöglichen Erhöhung. Die Stärke des Aufwärtstrends hängt also nur von den unter 7.1 diskutierten Einflüssen ab. Lediglich die Kostenfrage, welche wie immer einen Zielkonflikt zwischen Performance und Endpreis verursacht, ist für eine Trendabweichung oder einen Ausreißer nach unten verantwortlich.

¹⁶ Bezogen auf das Gewicht der Schwunngmasse

7.3 Einteilung der Schwungradgetriebenen Fahrzeuge

Die erhobenen Daten über (Hybrid-)Fahrzeuge mit Schwungradspeicher beinhalten eine große Variantenvielfalt an Fahrzeugtypen und beschreiben die verschiedensten Konzepte. Aus dem vorhergehenden Kapitel geht hervor, dass es notwendig ist, die bisher ausgeführten Systeme auf übersichtliche Art und Weise zu kategorisieren. In diesem Zusammenhang wurden drei unterschiedliche Eigenschaftsbereiche definiert, welche im Folgenden besprochen werden.

7.3.1 Vorhersagbarkeit des Lastkollektivs

In Kapitel 7.2.2 wurde die Möglichkeit erwähnt, das Energiemanagement eines Schwungradhybrides mit einem GPS zu kombinieren. Aber auch das ist nur ein (verzweifelter) und bislang noch theoretischer Versuch, das Lastkollektiv vorherzusagen. Dieses äußerst komplizierte Unterfangen wird zusätzlich dadurch erschwert, dass jeder Lenker eine individuelle Fahrweise an den Tag legt, beziehungsweise der konkrete Einsatzbereich des Fahrzeuges oftmals unbekannt ist und stark mit der geographischen Region variiert. Ohne tiefgehendes Wissen über das zu erwartende Lastkollektiv des Fahrzeuges ist es jedoch nicht möglich, den Schwungradspeicher exakt zu dimensionieren bzw. dessen Vorteile vollends auszuschöpfen. Unter den etwa 50 bisher gebauten Schwungradfahrzeugen sind 22 PKWs zu finden, also beinahe die Hälfte. Die Entwickler verweisen in ihren Publikationen fast ausschließlich auf die erreichten Einsparungen in den diversen Cityzyklen und erwähnen nur in einem Nebensatz, dass die Fahrzeugeffizienz im Überlandbetrieb meist nur marginal gesteigert werden konnte oder sich zum Teil sogar verschlechterte! Daraus folgt, dass es Fahrzeuggruppen gibt, die mehr für den Einsatz von Schwungradspeichern geeignet sind als andere. Die Vorhersehbarkeit des Lastkollektivs ist also direkt proportional zur Eignung eines Fahrzeuges zur Hybridisierung mittels Flywheel. Zwar ist die Annahme nicht falsch, dass diese Aussagen für jegliche Art des Hybrides gelten und nicht gezwungenermaßen auf den Schwungradhybrid beschränkt sind.

Wenn aber tatsächlich exakte Informationen über das Lastkollektiv vorliegen, kann ein Flywheel noch effizienter eingesetzt werden als konkurrierende Energiespeicher. Grund hierfür ist der über die Drehzahl exakt quantifizierbare Energieinhalt, wodurch der Ladezustand des Speichers keine Unbekannte mehr darstellt, wie es bei Batterien oft der Fall ist. Tiefgehendes Wissen über das Lastkollektiv des Fahrzeuges ist wertlos, wenn der aktuelle Energieinhalt des Energiespeichers oder des *SPU* nicht genau bekannt ist. (Vergleiche Kapitel 4.3.3)

Aus Abbildung 33 geht hervor, dass die Vorhersagbarkeit des Lastkollektivs im Wesentlichen mit der Eignung für eine Schwungradapplikation einher geht. Eine gute Vorhersagbarkeit ist also eine *notwendige*, aber keine *hinreichende* Bedingung für den effizienten Einsatz des *Flywheels*.

Neben dem Wissen über den Fahrzyklus stellt auch der Fahrzyklus selbst eine wichtige Bemessungsgrundlage dar. Einrichtungen für eine Nutzbremmung sind bei stationärer Fahrt sinnlos, und die Hybridkomponenten erhöhen höchstens durch ihr Gewicht den Rollwiderstand. Obwohl das Lastkollektiv eines *Intercity*-Zuges genau gleich gut vorhersagbar ist wie das einer Straßenbahn, weist diese eine deutlich höhere Eignung auf. Die fahrzeugtypbezogenen Felder in Abbildung 33 sind bewusst ohne scharfe Grenzen, aber mit verlaufenden Umrandungen dargestellt, da sie sich im konkreten Anwendungsfall noch leicht verschieben oder vergrößern

können. Bei den kommerziellen Langstrecken Anwendungen liegt zwar eine gute Vorhersagbarkeit des Lastkollektivs vor, aber die Eignung für die Hybridisierung hängt vom geographischen Einsatzgebiet des Fahrzeuges ab. Regionen, in denen ein extremes Relief vorherrscht, wie z.B. die Alpenländer, bieten ein größeres Potential für die Rekuperation als das Flachland.

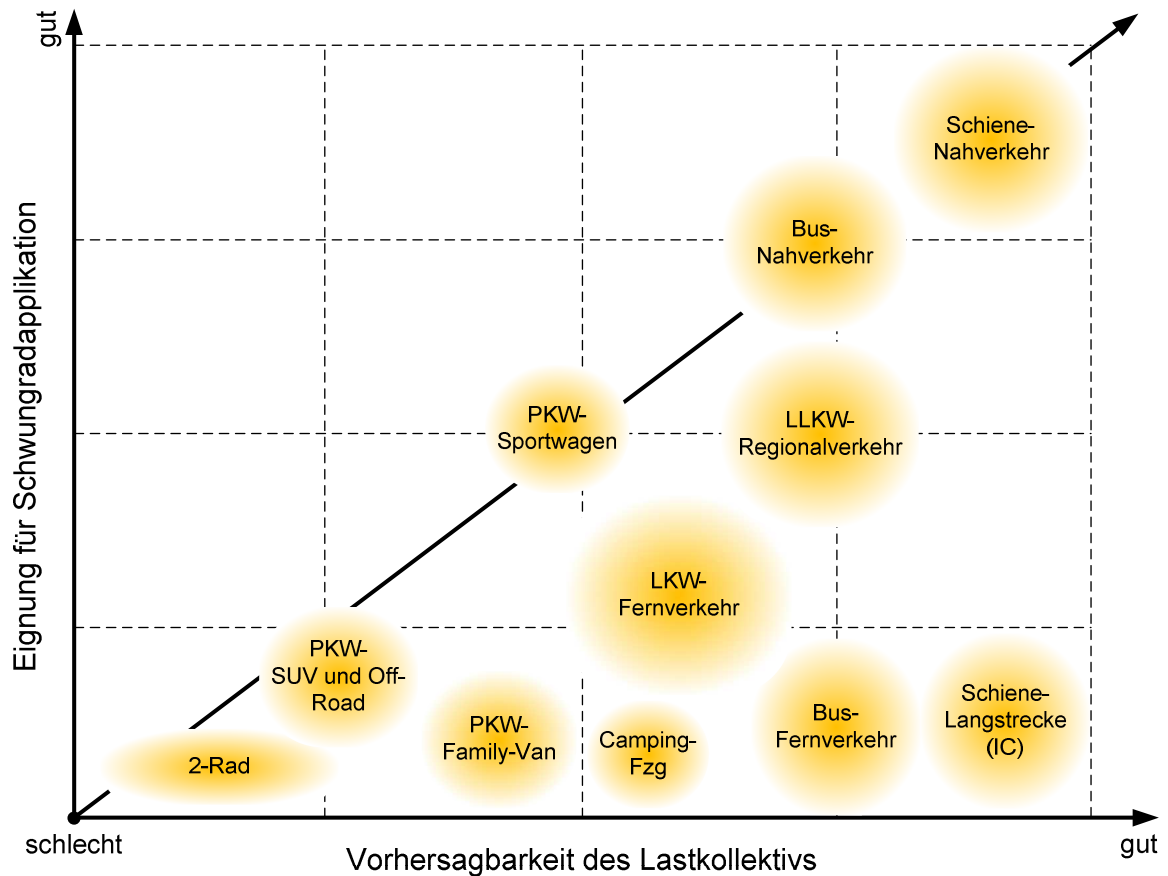


Abbildung 33: Zunahme der Eignung für die Schwungradhybridisierung über der Vorhersagbarkeit des Lastkollektivs (angenähertes, qualitatives Schaubild)

Das Schaubild versucht aber auch näherungsweise konstruktive Aspekte zu berücksichtigen, wie zum Beispiel das Platzangebot, welches notwendig ist, um einen Schwungradspeicher überhaupt installieren zu können. Dadurch werden klarer Weise wieder große Fahrzeuge bevorzugt. Eine Flywheel-Applikation im Zweirad ist nicht nur wegen des beschränkten Platzes sondern auch wegen der gyroskopischen Kräfte problematisch. Darüber hinaus lässt sich – ähnlich wie bei den meisten PKWs – der Einsatzbereich (Stadtverkehr oder Überland) und die Fahrweise (Raser oder Sonntagsfahrer) nur schwer errahnen.

7.3.2 Einteilung nach konstruktiven Strukturvarianten

Es ist kein leichtes Unterfangen, die bestehenden Schwungradhybride in Strukturvarianten zu unterteilen, da es eine große Anzahl an möglichen Kombinationen der Hybridelemente gibt, wodurch eine schematische Einteilung leicht unübersichtlich werden kann.

Das folgende Baumdiagramm ist ein Versuch, die bestehenden schwungradgetriebenen Fahrzeuge in eine Ordnung aus Haupt- und Unterkategorien zu bringen.

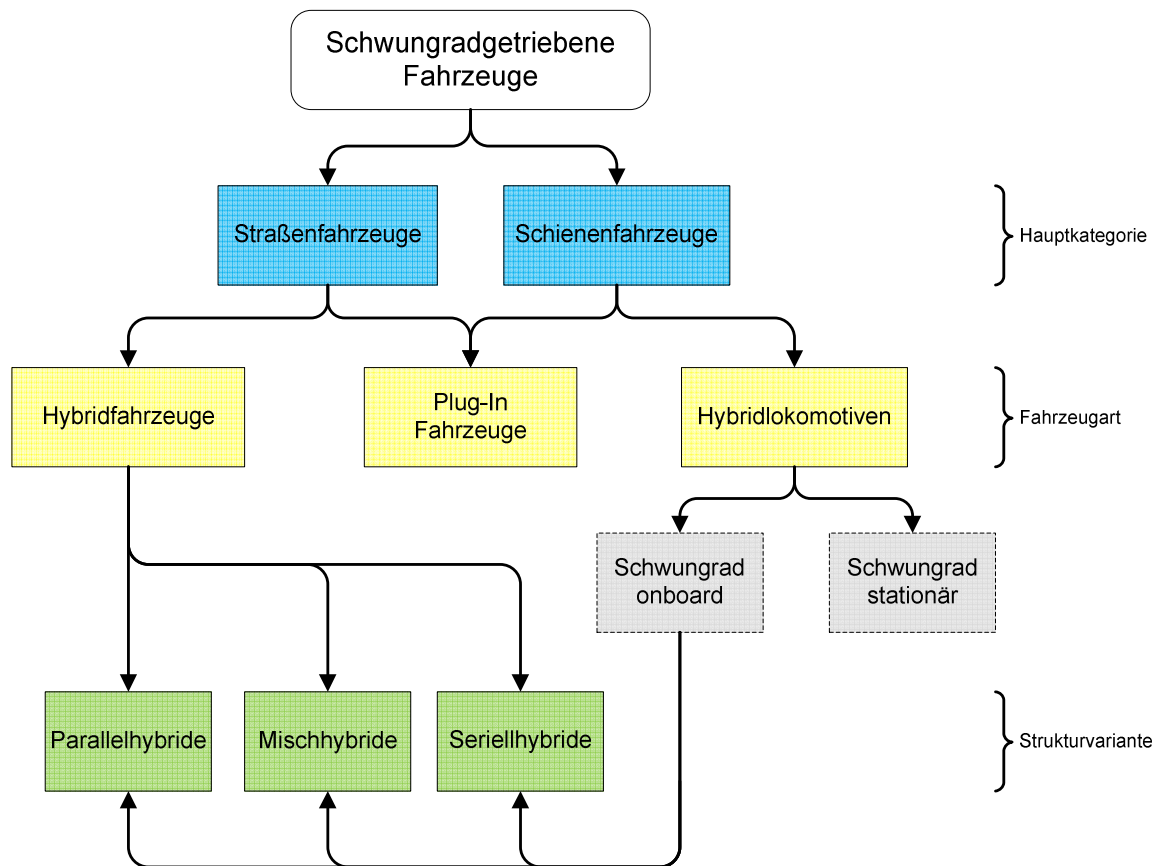


Abbildung 34: Einteilung der *Flywheel-powered Vehicles* nach Fahrzeugart und Strukturvariante

Der Begriff *Plug-In-Fahrzeug* unter den Schwungradfahrzeugen muss genauer erklärt werden. Er bezeichnet jene Fahrzeuge, die ein Schwungrad als alleinigen Energiespeicher besitzen und daher keine Hybride, sondern „reine“ Schwungradfahrzeuge sind. Dem Schwungrad wird während der Standzeiten Energie zugeführt, das heißt es wird beispielsweise über das elektrische Netz „aufgeladen“. Das erste und bekannteste Beispiel ist der *Gyrobus* der Firma *OERLIKON* von 1953. (Vergleiche Abbildung 13 in Abschnitt 7.1)

Eine Besonderheit ist auch unter den Schienenfahrzeugen zu finden, meist unter den Triebwägen für den Nahverkehr bzw. Straßenbahnen. Auch hier werden – wie bei den meisten mobilen Applikationen – Schwungräder für die Lastpunktverschiebung und die Bremsenergierekuperation eingesetzt. Die permanente Verbindung des Fahrzeuges mit dem elektrischen Netz erlaubt es jedoch das Schwungrad stationär, also beispielsweise am Ende eines Streckenabschnittes zu installieren und die Energie über den Fahrdrabt zu übertragen. Neben den deutlich günstigeren Montagebedingungen für das Schwungrad bringt diese Variante einen weiteren Vorteil mit sich. Verfügbarkeit und Nachfrage des Stroms im Netz sind zwar unvorhersehbare Größen, aber das Schwungrad ist immer bereit, Energie aufzunehmen und diese zu einem gewünschten Zeitpunkt wieder abzugeben. Als Anwender können die Verkehrsbetriebe in Zwickau und Dessau in Deutschland genannt werden, welche beide Schwungradspeicher der Firma *Rosseta Technik GmbH* in ihren Straßenbahnnetzen verwenden. (39)

7.3.3 Einteilung nach Art der Energieübertragung

Neben der soeben besprochenen Einteilung in (Fahrzeug-)Kategorien und Strukturvarianten gibt es ein weiteres, konstruktives Merkmal, durch welches sich die Schwungradfahrzeuge maßgeblich unterscheiden. Anders als bei einem batteriebetriebenen Fahrzeug, bei dem die Energie zwar chemisch gespeichert, aber dennoch stets elektrisch übertragen wird, kann die Energie auf unterschiedliche Arten zum Schwungrad gelangen, wo sie in kinetischer Form gespeichert wird. Die Art der Energieübertragung hat einen wesentlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad, die Anordnung der Komponenten, die erforderlichen Nebenaggregate, die Gesamtkosten, das Gewicht, die Systemkomplexität, das Thermomanagement etc. Aufgrund des tiefgreifenden Einflusses der Energieübertragungsart auf die konstruktive Erscheinung des Schwungradhybrides ist es notwendig, die Schwungradfahrzeuge auch dahingehend zu charakterisieren und zu kategorisieren.

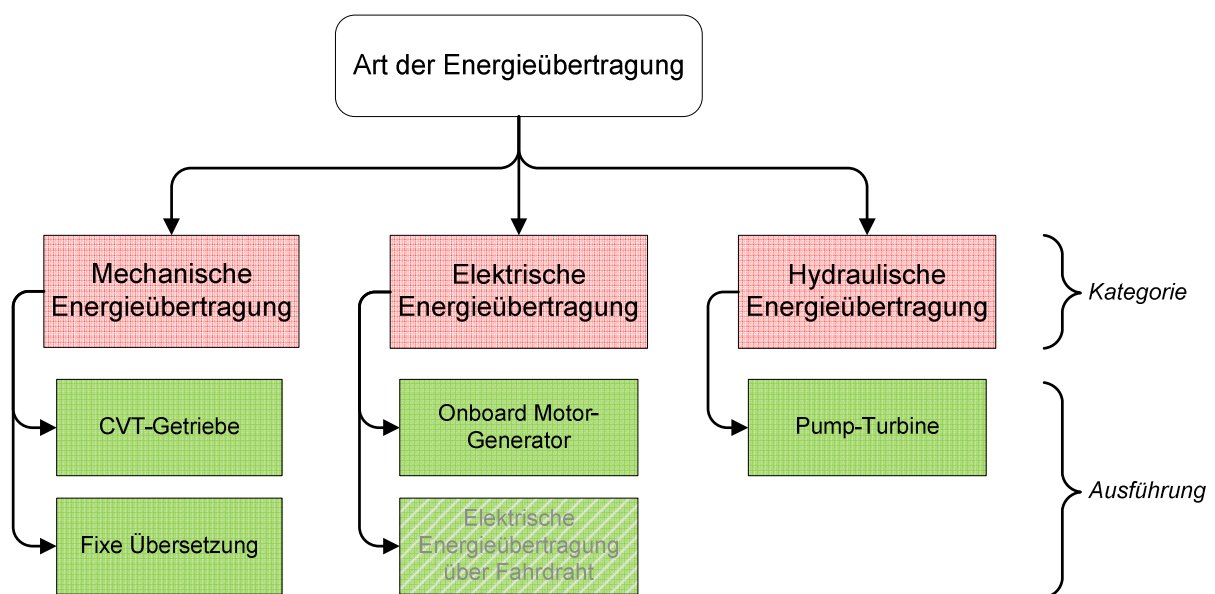


Abbildung 35: Einteilung der Schwungradfahrzeuge nach Art der Energieübertragung

Beim Vergleich konkurrierender Konzepte ist es folglich unabdingbar, der Energieübertragung besondere Beachtung zu schenken. Das Feld, welches die „elektrische Energieübertragung über den Fahrrad“ in Abbildung 35 beschreibt, wurde schraffiert, da die Anforderungen an stationäre Schwungradspeicher stark von jenen der mobilen Anlagen abweichen und daher nicht bewertet werden. Abbildung 35 liefert also die Grundlage für die *systematische Analyse* der Fallbeispiele durch Anwendung einer Bewertungsstrategie, wie in Kapitel 8.1 geschildert.

Allerdings wird nur für 3 der 6 Arten der Energieübertragung je ein repräsentatives Konstruktionsbeispiel herausgegriffen, welches im Detail analysiert wird. Gründe hierfür sind:

1. Pro Fahrzeuganalyse sind etwa 20 bis 30 Seiten erforderlich, wodurch 6 Beispiele den Rahmen einer Diplomarbeit sprengen würden.
2. Konzepte mit hydraulischer Übertragung werden zwar in der Literatur [(40), (41)] erwähnt, es stehen aber nicht genügend Informationen zu Verfügung, um das Gesamtfahrzeug in ausreichender Tiefe zu analysieren.

3. Schwungradspeicher mit Anbindung über Reibgetriebe werden zwar z.B. in (42) detailliert beschrieben, aber, wie in Punkt 2, ebenfalls nicht ausreichend in Kontext mit dem Gesamtfahrzeug gesetzt.
4. Die Unterschiede zwischen mechanischer und elektrischer Energieübertragung sind besonders groß, da sie sich auf völlig unterschiedliche Technologien stützen. Die Bewertungsstrategie soll jeden Typ – egal, wie konträr – erfassen und bewerten können.

8. Erarbeitung der Bewertungsstrategie

In den gesamten Ingenieurwissenschaften wird stets nach systematischen, strategischen Vorgehensweisen gestrebt bzw. versucht sich der Ingenieur an solche zu halten. Dies liegt vermutlich an den dem Maschinenbau zu Grunde liegenden Naturwissenschaften, der Mathematik, der Physik und so weiter, welche Werkzeuge darstellen, die systematisch angewandt zu der viel zitierten „Kochrezeptlösung“ eines Problems führen können. Für die meisten praktischen und vor allem ganzheitlichen Problemstellungen des Maschinenbaus gibt es so eine Lösung jedoch nicht!

Im Fall der *systematischen Analyse* von Schwungrad-Hybriden liegt klarer Weise noch keine vorgefertigte Herangehensweise vor. Also bleibt die Frage offen: Mit welcher Strategie entwickle ich eine Strategie? Zwar werden auch in der klassischen Entwicklungsmethodik ein paar „Tools“ wie zum Beispiel Bewertungsmatrizen oder die Kosten-Nutzen-Analyse vorgestellt, aber diese alleine bilden noch keine Bewertungsstrategie. Vielmehr geht es darum, diese Werkzeuge sinnvoll in eine strategische Herangehensweise zur Beurteilung der Systeme zu implementieren.

Die Problematik wird unter anderem dadurch erschwert, dass die zu analysierenden Fahrzeuge stark divergierend aufgebaut sind, unterschiedlichen Anforderungen und Zielgruppen gerecht werden müssen und aus teils völlig anderen technischen Epochen stammen. Um also nicht auf jedes einzelne Fahrzeug eingehen zu müssen und dennoch die gesamte Palette erfassen und bewerten zu können, muss stets eine geistige Trennung zwischen Konzept und Ausführung wie in Kapitel 7.3 durchgeführt berücksichtigt werden, sprich im weiteren Sinne eine Einteilung in Strukturvarianten, welche in Folge mit einer gewissen Allgemeingültigkeit analysiert werden können. Das Ergebnis sind die Stärken und Schwächen des jeweiligen zu Grunde liegenden Konzeptes ohne Berücksichtigung eventuell auftretender Schwächen bei der konkreten Ausführung.

Die systematische Analyse muss also immer zwei Aspekte berücksichtigen:

- die Analyse der *Strukturvarianten*, welche im folgenden Kapitel erst erstellt werden und
- die Analyse jeweils eines *konkreten Konstruktionsbeispiels* zu jeder Strukturvariante.

Dadurch kann ein guter Überblick ohne übertriebene Informationsflut gewährleistet und trotzdem auf alle bisher registrierten Konstruktionen eingegangen werden. Im nächsten Kapitel soll ein Schema vorgestellt werden, an welches man sich bei der Bewertung eines jeden einzelnen Systems halten kann.

8.1 Ablauf des analytischen Vorgehens

Als erstes wurde eine Anforderungsliste an die Bewertungsstrategie der Schwungradhybride erstellt. Dies ist ein wichtiger Schritt, denn aus den Anforderungen ergibt sich die eigentliche Vorgehensweise.

- Unmissverständliches Schema
 - Transparenz, Nachvollziehbarkeit
 - Reproduzierbarkeit
- Objektivität
- Allgemeingültigkeit (alle Systeme)
- Beachtung aller relevanten Parameter (holistischer Ansatz)
- Fokus auf die Schwungradtechnik

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien wurde nun eine Vorgehensweise erstellt. Als Grundlage diente diverse Literatur [(43), (6), (44), (45)] sowie das in den Lehrveranstaltungen *Design Principles*, *Maschinenelemente I* und *II*, *Project Management* und *Teambuilding* an der TU Graz erworbene Wissen. Ziel dieser Bewertungsstrategie ist es, eine möglichst gute Vergleichbarkeit unter den Systemen bei hoher Objektivität zu erreichen.

Im Wesentlichen stützt sich diese Vorgehensweise auf einen Ablauf bestehend aus 5 Punkten:

1. *Kurzbeschreibung des Systems*
2. *Abstraktion*
3. *Verlustanalyse*
4. *Anwendung von Bewertungstools*
 - *Modifizierte Camelot-Methode*
 - *Morphologische Matrix*
 - *Nutzwertanalyse*
5. *Conclusio*
 - *SWOT-Analyse*

Die einzelnen Punkte des Schemas sollen im Folgenden kurz erklärt werden.

8.1.1 Erörterung: Kurzbeschreibung des Systems

Selbsterklärend, jedoch wichtig, gestaltet sich der erste Punkt des Analyseschemas. In der Kurzbeschreibung werden Informationen wie:

- Fahrzeugtyp
- Baujahr
- Herkunftsland
- Schwungradspezifische Angaben
- Angaben über das Basisfahrzeug
- Angaben über prim. Leistungseinheit
- Angaben über den Entwickler
- Etc...

in einer Tabelle wiedergegeben. Des Weiteren werden charakteristische Eigenschaften sowie eventuell bekannte Probleme oder besondere Vorteile des Systems sowie Entwicklungsumstände in einem Kurztext erwähnt. Es wird beschrieben, ob es sich um einen Prototyp mit geringem Reifegrad handelt oder gar um ein Serienfahrzeug. Wo vorhanden, werden auch informative Bilder eingefügt.

8.1.2 Erörterung: Abstraktion

Es ist ein wesentlicher Schritt in der Entwicklungsmethodik, komplexe Systeme durch Abstraktion und Zerlegung in ihre wesentlichen Baugruppen in eine übersichtliche Form zu bringen. Im Fall der Schwungrad-Hybride bedeutet dies, dass jedes Konzept durch einfache „Bausteine“ mit definierten Funktionen in einem Blockschaltbild oder einer Getriebestrukturskizze charakterisiert wird, wie es die folgende Grafik beispielhaft veranschaulicht.

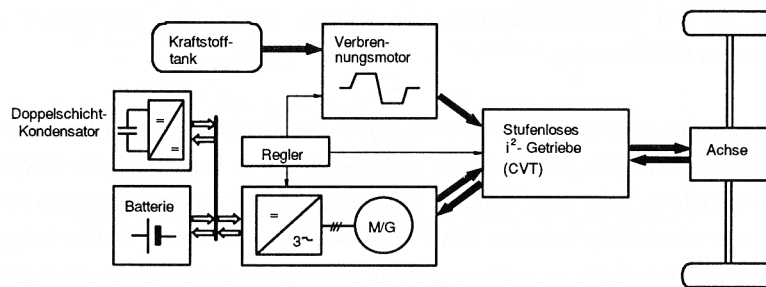


Abbildung 36: Beispiel eines Blockschaltbildes für ein Hybridfahrzeug (46)

Durch diese Reduktion des Gesamtsystems auf wesentliche Funktionsblöcke kann nicht nur die Übersichtlichkeit erhöht werden, sondern es werden auch die Unterschiede zwischen den Systemen leichter erkennbar. Für die Entwicklung und Darstellung einer Funktionsstruktur empfiehlt auch Prof. Jürgens an der TU Graz Strukturen unterschiedlichen Detailgrades (Funktionsgruppen, Untergruppen etc.) zu erarbeiten. Dies entspricht der in der VDI-Richtlinie 2221 empfohlenen Aufgliederung der gesamten Problemstellung in Detailprobleme, ebenfalls ersichtlich in Abbildung 42.

8.1.3 Erörterung: Verlustanalyse

Die Verlustanalyse ist essenzieller Bestandteil der Bewertung der meisten technischen Prozesse. Ziel ist immer das Erreichen eines möglichst hohen Wirkungsgrades bei *jedem* Betriebspunkt. Das Erreichen dieses Ziels setzt möglichst geringe *Verlustmomente* voraus, da diese einen besonders starken Einfluss auf den Teillastwirkungsgrad haben. Ein Schwungrad, wie in Abbildung 37 dargestellt, erreicht zwar unter Volllast einen Wirkungsgrad von 84,5 %, kann diesen auf Grund der auftretenden Reibmomente bei geringer Energieentnahme jedoch nicht aufrechterhalten. Der Sachverhalt ist auch bei Stirnradgetrieben nicht anders, sodass der Wirkungsgrad bei immer geringerer Last schließlich dem Schleppmoment zum Opfer fällt und gegen Null geht. (Vergleiche Abbildung 64 in Kapitel 10.3.2).

Um einen einfachen Vergleich der Schwungradsysteme durchführen zu können, wird dennoch oft auf eine Betrachtung der Wirkungsgrade zurückgegriffen. Hierfür sprechen folgende Argumente:

- In der Literatur über die bestehenden Schwungradfahrzeuge findet man oft Wirkungsgradangaben, aber kaum die erforderlichen Informationen, um die Verlustmomente adäquat quantifizieren zu können.
- Der bestmögliche Gesamtwirkungsgrad liefert anhand *einer* Zahl einen übersichtlichen Vergleichswert. Dieser muss jedoch kritisch hinterfragt und interpretiert werden, was im Zuge der Verlustanalyse geschehen soll. Die Einflüsse auf den Teillastwirkungsgrad und die Selbstentladung werden – falls nicht quantifizierbar – zumindest kurz diskutiert.
- In der Analyse sollen Systeme mit elektrischer und mechanischer Energieübertragung miteinander verglichen werden. Die Verlustleistung, die beispielsweise die Leistungselektronik der elektrischen Maschine verursacht, ist aber vom Betriebspunkt abhängig und ließe sich nur schwer in ein Moment übertragen. Dieser Vergleich kann anhand einer Betrachtung von Wirkungsgraden leichter durchgeführt werden.

Dort, wo die größten Verluste eines Systems auftreten, ist eine Schwachstelle, welche besondere Beachtung erfordert! Gleichzeitig liegt hier aber auch das größte Verbesserungspotential. Ein Werkzeug, welches diesen Sachverhalt graphisch darstellt, ist das so genannte *Sankey-Diagramm*, welches im Anhang unter Kapitel 4.3 diskutiert wird.

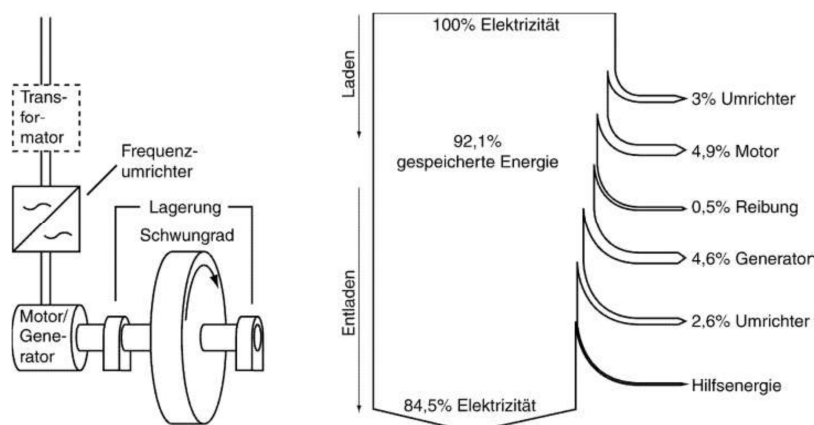


Abbildung 37: Sankey-Diagramm eines elektro-mechanischen Schwungradspeichers (47)

Da für jeden spezifischen Verlust nicht immer genaue Daten vorliegen, kann die Gestaltung des Diagramms nicht immer quantitativ erfolgen, sondern die Verluste müssen oft abgeschätzt werden. Grundlage für diese Abschätzungen bieten zum Beispiel Erfahrungswerte, welche von ähnlichen Teillösungen bekannt sind, oder der Vergleich mit momentanen *State-of-the-Art* Entwicklungen, von denen genaue Berechnungen zu den jeweiligen Verlusten vorliegen. Ebenso können Überschlagsrechnungen für die Abschätzung herangezogen werden.

Bei der Bewertung der Schwungradhybride werden alle relevanten Teilprozesse und Module, welche ihrerseits zum Gesamtverlust beitragen, diskutiert.

8.1.4 Erörterung: Anwendung von Bewertungstools

Diese Werkzeuge sind der Versuch einer gewissen „Objektivierung des Subjektiven“. Eindrücke, Potentiale, mögliche Risiken und positive Eigenschaften der jeweiligen Schwungradhybride sollen so gut wie möglich quantifiziert und dadurch objektiv vergleichbar werden.

- **Modifizierte *Camelot-Methode***

Hierbei handelt es sich um eine im Rahmen dieser Arbeit erstellte Erweiterung der in (44) vorgestellten *KPL*¹⁷-Technik zur Wahrnehmung von Problemen. Grundsätzlich baut diese Methode darauf auf, eine ideale Situation oder ein ideales Produkt gedanklich zu kreieren (analog der uneinnehmbaren Festung *Camelot*) und diese dann mit der tatsächlichen Situation zu vergleichen. Folgende Vorgehensweise im Vergleich zwischen den beiden Situationen wird hierfür vorgeschlagen:

1. Was erwartet sich der Kunde von einem Schwungradhybrid?
2. Wie sieht der optimale Schwungradhybrid von Seiten der technischen Gestaltung aus?
3. Welche Unterschiede können identifiziert werden?
4. Wodurch kommt es zu diesen Unterschieden?
5. Werden dadurch Probleme oder Potentiale ersichtlich?

Die Beantwortung dieser Fragestellung reicht aber noch nicht aus, um einen objektiven Vergleich zwischen den Strukturvarianten und Ausführungen der schwungradgetriebenen Fahrzeuge zu schaffen. Vielmehr ist es hilfreich, das ideale Schwungradfahrzeug in Tabellenform zu charakterisieren und diese wesentlichen Eigenschaften so gut es geht zu quantifizieren, wie in Abbildung 38 gezeigt.

¹⁷ *KPL* steht für Kreative Problemlösung

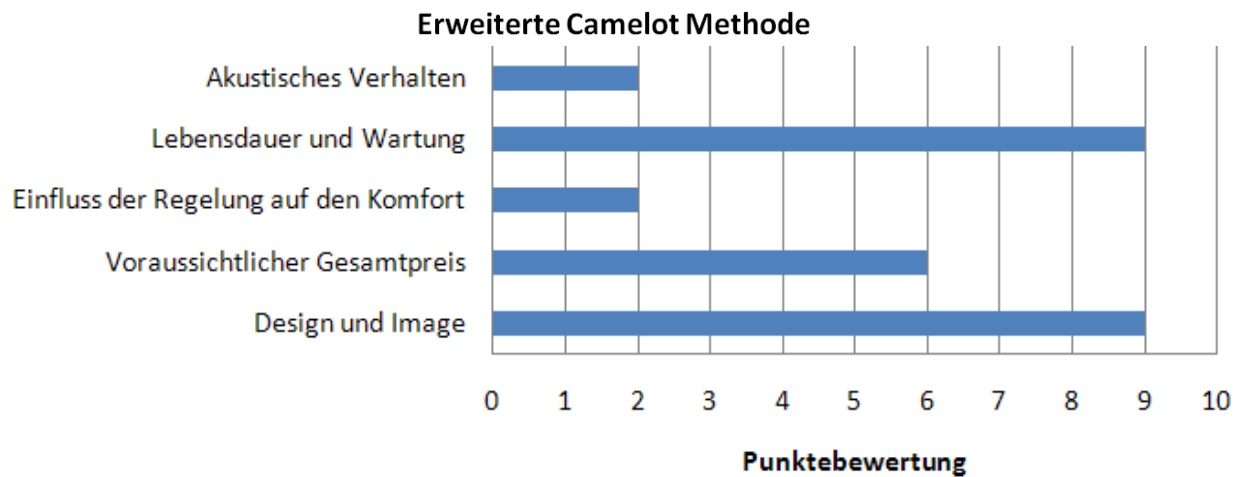


Abbildung 38: Beispiel für die Anwendung der modifizierten Camelot-Methode (Auszug)

Die Eigenschaften dieses Idealbildes stellen ein nur theoretisch erreichbares Ziel dar, welches mit 10 Punkten bewertet wird (Punktebewertung siehe auch S. 60 oben). Die einzelnen Parameter und Charakteristika des tatsächlichen Fahrzeuges werden nun jeweils mit dem Ideal verglichen, und zwar wird ihre Übereinstimmung angegeben. Die der Bewertung zu Grunde liegenden Argumente werden in einem kurzen Absatz angeführt. Bei der Auswahl der Parameter ist darauf zu achten, dass sich deren Anzahl in Grenzen hält und hohe Relevanz für den praktischen Einsatz gegeben ist.

Die zu bewertenden Eigenschaften wurden in 3 Bereiche gruppiert:

1. Eigenschaften betreffend den eigentlichen Schwungradspeicher und dessen Peripherie:

1	Energieinhalt / -dichte Schwungrad
2	Leistung /Leistungsdichte Schwungrad
3	Einfluss der Kreiselkräfte
4	Rekuperation
5	Selbstentladung des Schwungrades
6	Berst und Crashesicherheit

2. Eigenschaften betreffend das Gesamtfahrzeug:

7	Emissionsfreie Reichweite
8	Verbrauch und Gesamtwirkungsgrad
9	Beschleunigung
10	Höchstgeschwindigkeit
11	Gesamtgewicht

3. Eigenschaften betreffend subjektiver und objektiver Kundenwünsche:

13	Akustisches Verhalten
14	Lebensdauer und Wartung
15	Einfluss der Regelung auf den Komfort
16	Voraussichtlicher Gesamtpreis
17	Design und Image

Einige Parameter, wie zum Beispiel die Energiedichte, können in gewissen Fällen exakt quantifiziert werden und eignen sich daher optimal, um anhand dieser Methode verglichen zu werden. Ein kleines Beispiel veranschaulicht den Sachverhalt:

Wird eine Energiedichte von ca. 1000 Wh als Optimum betrachtet, die reale Konstruktion erreicht aber nur 200 Wh, so erreicht diese in der *modifizierten Camelot Methode* nur 2 von 10 Punkten.

Schwieriger wird die Bewertung bei Eigenschaften des Fahrzeuges, die sich aufgrund der teils nur beschränkt zu Verfügung stehenden Informationen nicht exakt ableiten lassen. Als Beispiel sei hier der Einfluss der Kreiselkräfte auf das Fahrverhalten des Kfz genannt. Ziel ist es, einen Speicher zu bauen, der keinen Einfluss auf die Fahrdynamik hat. Dieser Wunsch wird als ideal betrachtet. Um den Einfluss dennoch bewerten zu können, stützt man sich auf Überschlagsrechnungen sowie teilweise konkrete analytische Beschreibungen, Erfahrungsberichte aus der Literatur und das eigene Einschätzungsvermögen. Aber egal, mit welcher Detailliertheit die Informationen vorliegen, eine vollständige Objektivierung wird nicht gelingen, die prozentuelle Bewertung wird in diesem Fall stets subjektiv bleiben und daher eine relativ große Unschärfe aufweisen. Des Weiteren muss in so einer Situation wieder klar zwischen konstruktiver Ausführung und dem eigentlichen Speicherprinzip differenziert werden.

Es muss darüber hinaus angemerkt werden, dass die *modifizierte Camelot Methode* das Gesamtsystem bewertet, ohne ins Detail zu gehen. Es werden in erster Linie Kundenwünsche wie Handling, Fahrverhalten, etc. und wirtschaftliche Betrachtungsweisen herangezogen. Um die technische Ausführung zu analysieren, eignen sich die folgenden Methoden.

- **Morphologische Matrix**

Es handelt sich hierbei um ein bereits relativ altes und etabliertes Hilfsmittel des Schweizer Astrophysikers *Fritz Zwicky*¹⁸. Die morphologische Matrix erlaubt es auf übersichtliche Weise eine systematische Strukturanalyse durchzuführen. Obwohl das eigentliche Ziel dieser Methode im Finden neuer Kombinationen liegt, also eigentlich ein Ideenfindungswerkzeug ist, bietet sie auch im Fall der Analyse bestehender Systeme ein hervorragendes Mittel, um Funktionen und Funktionsgruppen darzustellen sowie vor Allem einen guten Überblick über das System und mögliche Alternativen zu verschaffen.

Für die Erstellung der Matrix sind folgende Arbeitsschritte charakteristisch:

1. Vorbereitend: Beschreibung der Situation und Problemdefinition (= Punkt 1 der Analyse)
2. Zerlegung des gesamten Fahrzeuges in Subsysteme oder „Teilkategorien“
3. Bestimmung der Parameter des zu analysierenden Schwungradhybrides
4. Generieren einer Liste aller möglichen Ausprägungen für jeden Parameter
5. Erstellen der Matrix bestehend aus den Parametern und deren Ausprägungen
6. Vergleich der aktuell vorliegenden Kombination der Ausprägungen mit den konkurrierenden Möglichkeiten

¹⁸ Geb. 1898 in Varna, Bulgarien, ab 1925 am *California Institute of Technology*, gestorben 1974 in Pasadena.

Diese Vorgehensweise alleine erlaubt aber noch keine objektive, quantitativ vergleichbare Bewertung des vorliegenden Hybridfahrzeuges, bietet aber eine gute Grundlage, um diese in einem weiteren Schritt, der so genannten Nutzwertanalyse, vorzunehmen.

Die strukturierte Zerlegung des Systems erfolgt entlang der Pfade des in Abbildung 39 dargestellten Baumdiagramms, wobei sich durch die Aufspaltung der Pfade eine Vielzahl von Diagrammen ergibt, um genau zu sein die Summe der Produkte aus der Anzahl der Teilkategorien (in diesem Fall 4) und den jeweils zugewiesenen Parametern.

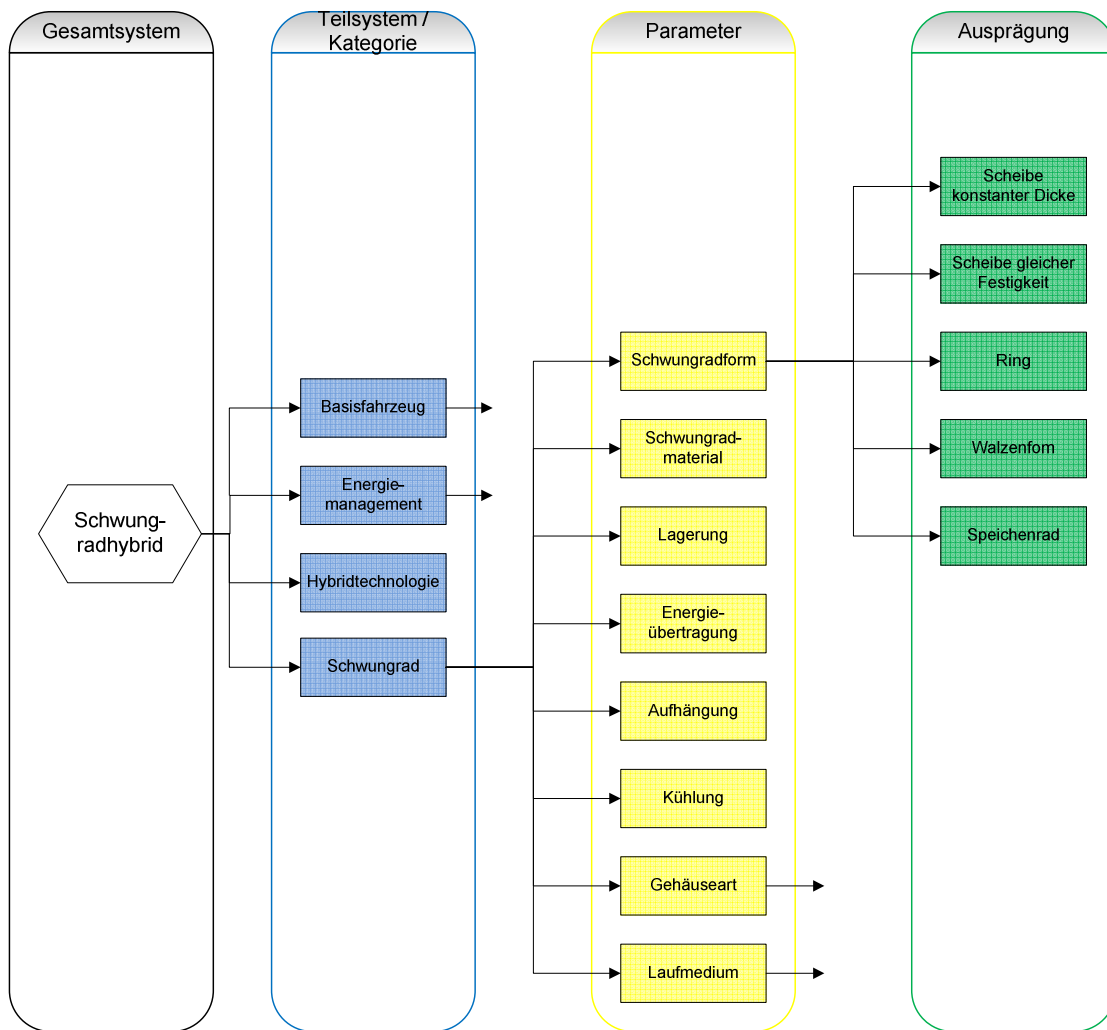


Abbildung 39: Baumdiagramm zur systematischen Strukturzerlegung des Schwungradhybrides

- **Nutzwertanalyse (NWA)**

Basierend auf der vorhergehend erstellten *morphologischen Matrix* werden die jeweiligen Ausprägungen der Parameter des Schwungradhybrides nun systematisch bewertet. Hierfür stehen drei wichtige Analysemethoden zur Auswahl: Die *Nutzwertanalyse*, die *technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225* und der *Binärvergleich*. Letzterer ist eine sehr einfache und schnelle Methode, eignet sich nur für grobe Abschätzungen und wird daher in diesem Fall nicht eingesetzt. In (45) werden die Charakteristika der zwei anderen Bewertungsmethoden wie folgt gegenübergestellt:

Nutzwertanalyse (45):

- Systematisiertes Aufstellen eines Zielsystems
- Faktoren g_i liegen zwischen Null und Eins oder zwischen Null und 100 Prozent
- Die Summe der Faktoren aller Bewertungskriterien ist entweder Eins oder 100 %, es liegt somit eine prozentuale Gewichtung der Teilziele untereinander vor
- Die Eigenschaftsgrößen entsprechen den Zielgrößen und werden in der Zielgrößenmatrix zusammengefasst
- Ergebnisse sind eindeutiger
- Arbeitsaufwand relativ groß
- Gewichtung ist obligatorisch
- Mit den gewichteten Kriterien wird der Gesamtwert¹⁹:

$$G_{g,j} = \sum_{i=1}^n g_i w_{ij}$$

Technisch- wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225 (45):

- Keine hierarchische Ordnung
- Bewertungskriterien leiten sich aus den Mindestanforderungen und Wünschen sowie aus den allgemein technischen Eigenschaften anhand einer Liste ab
- Es sind annähernd gleich bedeutende Bewertungskriterien aufzustellen
- Es erfolgt eine unmittelbare Bewertung ohne eine Zusammenstellung
- Nicht so differenziert wie die NWA
- Besser bei wenigen, annähernd gleichwertigen Kriterien
- Keine Gewichtung der Kriterien
- Der Gesamtwert ergibt sich ohne Gewichtung zu:

$$G_j = \sum_{i=1}^n w_{ij}$$

Daraus geht hervor, dass die Nutzwertanalyse der VDI-Richtlinie vorzuziehen ist. Die Vorgehensweise gestaltet sich wie folgt:

1. Für jede Ausprägung der Parameter des Hybrids wird eine Tabelle mit unterschiedlichen (*Teilziel-*)*Kriterien* erstellt. Diese sollten möglichst unabhängig voneinander sein. Es ist darauf zu achten, dass neben den *Soll-Kriterien* auch so genannte *Knock-Out-Kriterien* auftreten können, deren Nichterfüllung den sofortigen Verwurf der Lösung impliziert. Im Falle der Analyse bereits ausgeführter Konstruktionen ist mit dieser Situation jedoch eher nicht zu rechnen.
2. Den *Teilzielkriterien* w_{ij} werden nun unterschiedliche *Gewichtungsfaktoren* g_i zugeordnet. Die Summe all dieser muss einen Gesamtnutzen von 100% ergeben. Je nachdem, ob ein einfaches oder komplexes Teilsystem des Fahrzeuges betrachtet wird, können in der Tabelle mehr oder weniger Teilkriterien angeführt werden.
3. Die *Teilziele* w_{ij} müssen bestimmt werden, oder anders formuliert: Es muss die Frage beantwortet werden, wie gut die einzelnen Lösungen das Zielkriterium erfüllen. Hierfür eignet sich eine Punkteskala von 1 bis 10:

¹⁹ $G_{g,j}$ = Gesamtwert, g_i = Gewichtungsfaktor des Einzelkriteriums, w_{ij} = Bewertung des Teilzielkriteriums

- 0 Punkte: „Nicht Genügend“
- 1 bis 2 Punkte: „Genügend“
- 3 bis 5 Punkte: „Befriedigend“
- 6 bis 8 Punkte: „Gut“
- 9 bis 10 Punkte: „Sehr gut“

4. Rechnerische Ermittlung der Wertesynthese und Vergleich der Ergebnisse für den Gesamtwert untereinander. Dieser Vergleich kann natürlich nur am Ende des gesamten Kapitels erfolgen, wenn die verschiedenen Systeme bereits vollständig analysiert wurden. Um zu veranschaulichen, *wo* im System die Schwachstelle laut NWA liegt, können die Gesamtwerte der jeweiligen Ausprägungen oder Parameter in einem Spinnendiagramm dargestellt werden.

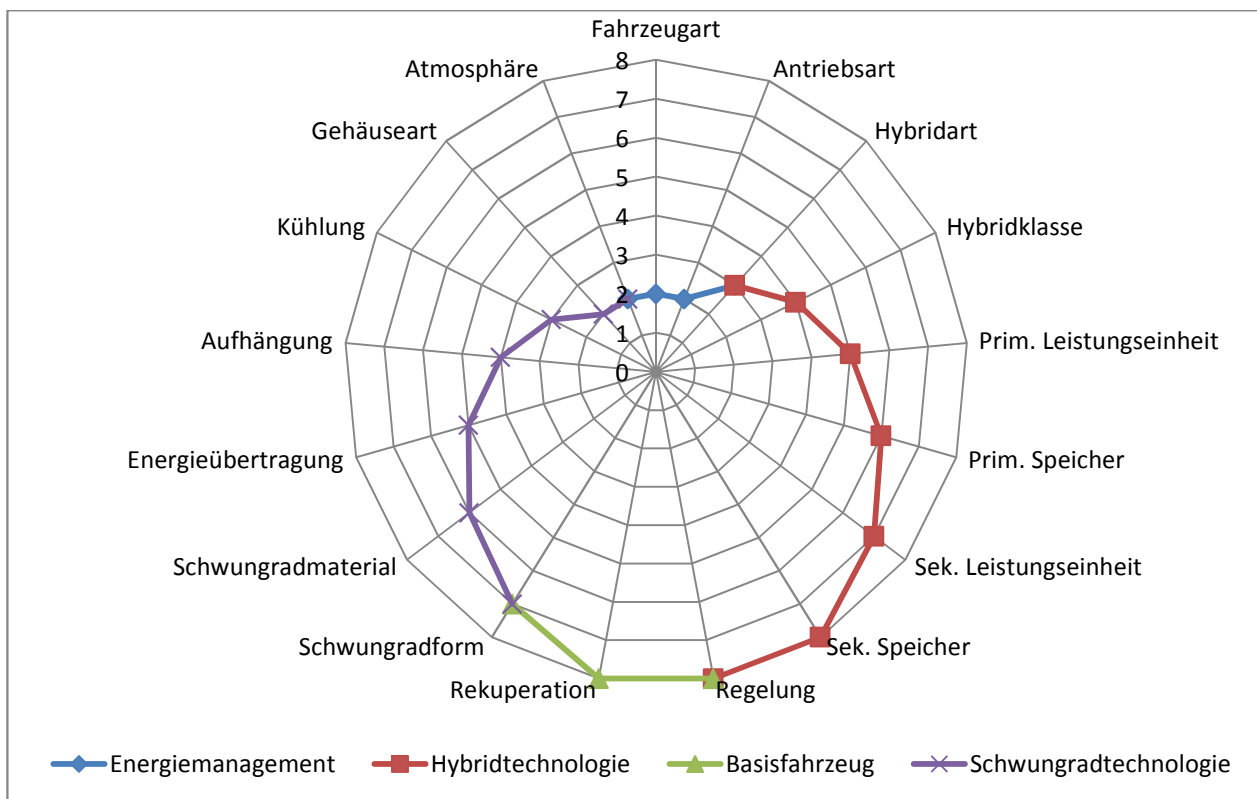


Abbildung 40: Spinnendiagramm zur Visualisierung der NWA mit korrekter, gruppierter Reihenfolge

Die Reihenfolge der Parameter in der Anordnung um das Spinnendiagramm spielt ebenfalls eine Rolle, da eine niedrige Punktwertung direkt neben einer hohen eine signifikante Schwachstelle suggeriert und stärker auffällt, wie es Abbildung 41 zeigt. Es werden die Parameter daher nach ihren Subsystemen zusammengefasst und im Diagramm farblich kodiert, wodurch auch gleich erkannt werden kann, in welchem Teilsystem sich jene Punkte, die einer genaueren Betrachtung bedürfen, befinden. Die Reihenfolge muss indes für jedes bewertete System ident sein.

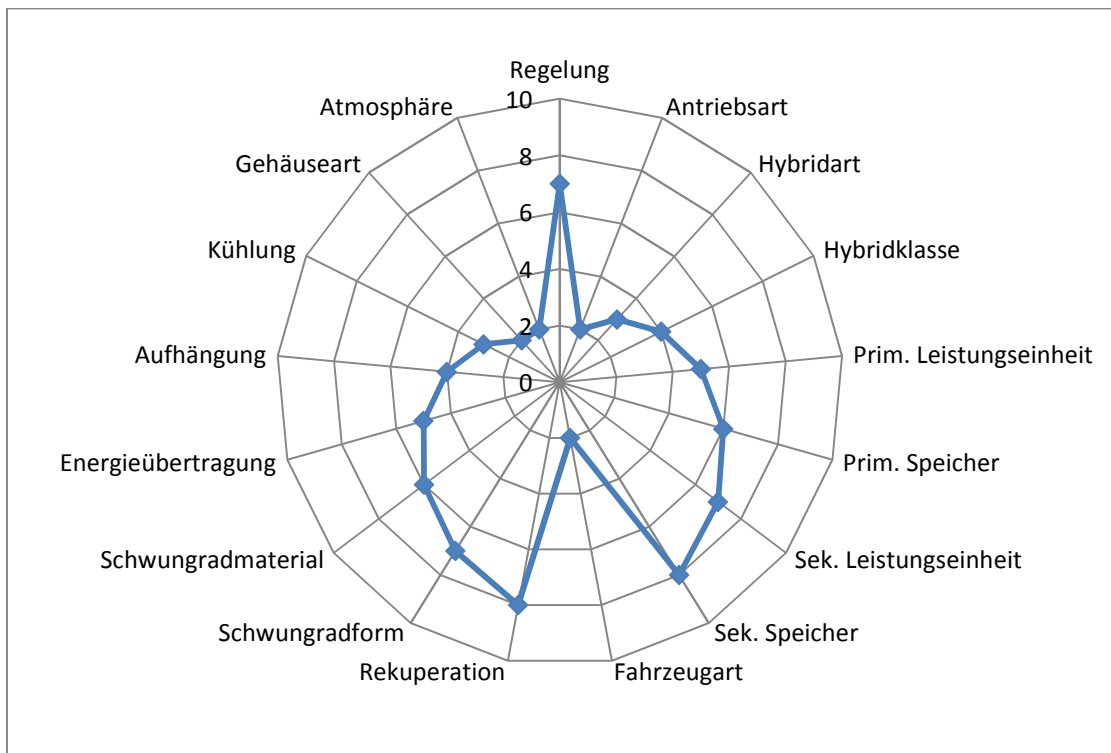


Abbildung 41: Spinnendiagramm zur Visualisierung der NWA mit inkorrektcr Reihenfolge

Wichtig: Die Punktebewertung in der NWA hängt natürlich auch mit dem Wissensstand der bewertenden Person zusammen!

Die Ergebnisse einer Nutzwertanalyse können darüber hinaus stark durch Variation der Gewichtungen beeinflusst werden. Es ist somit nicht möglich, eine absolute Bewertung zu erstellen und alle Eigenschaften des komplexen Systems Schwungradhybrid in eine Zahl zu verpacken. Bei konsistenter Anwendung der Nutzwertanalyse sowie der gesamten Bewertungsstrategie an sich gelingt es jedoch

1. einen **Vergleichswert** der Systeme untereinander zu schaffen
2. wahrscheinliche Schwachstellen/Potentiale aufzudecken (niedrige Punktezahlen)
3. einzelne Stärken herauszufiltern und aufzuzeigen (hohe Punktezahlen).

Punkt 2 und 3 werden besonders durch die Visualisierung in Diagrammform unterstützt.

Die Zerlegung des Gesamtsystems in seine *Subsysteme*, deren *Parameter* und *Ausprägungen* erfolgte bereits bei der Erstellung der morphologischen Matrix, ist aber auch für die Anwendung der Nutzwertanalyse von essentieller Bedeutung. Um die Komplexität des Schwungradfahrzeuges auf übersichtliche, aber nicht zu detaillierte Art und Weise zu strukturieren, wird wieder mit Baumdiagrammen gearbeitet. Die Nutzwertanalyse geht jedoch eine Ebene tiefer, indem für jede *Ausprägung* eine Reihe von *Teilzielkriterien* erstellt wird, wie in Abbildung 42 (rechts in Rot gehalten) zu sehen ist.

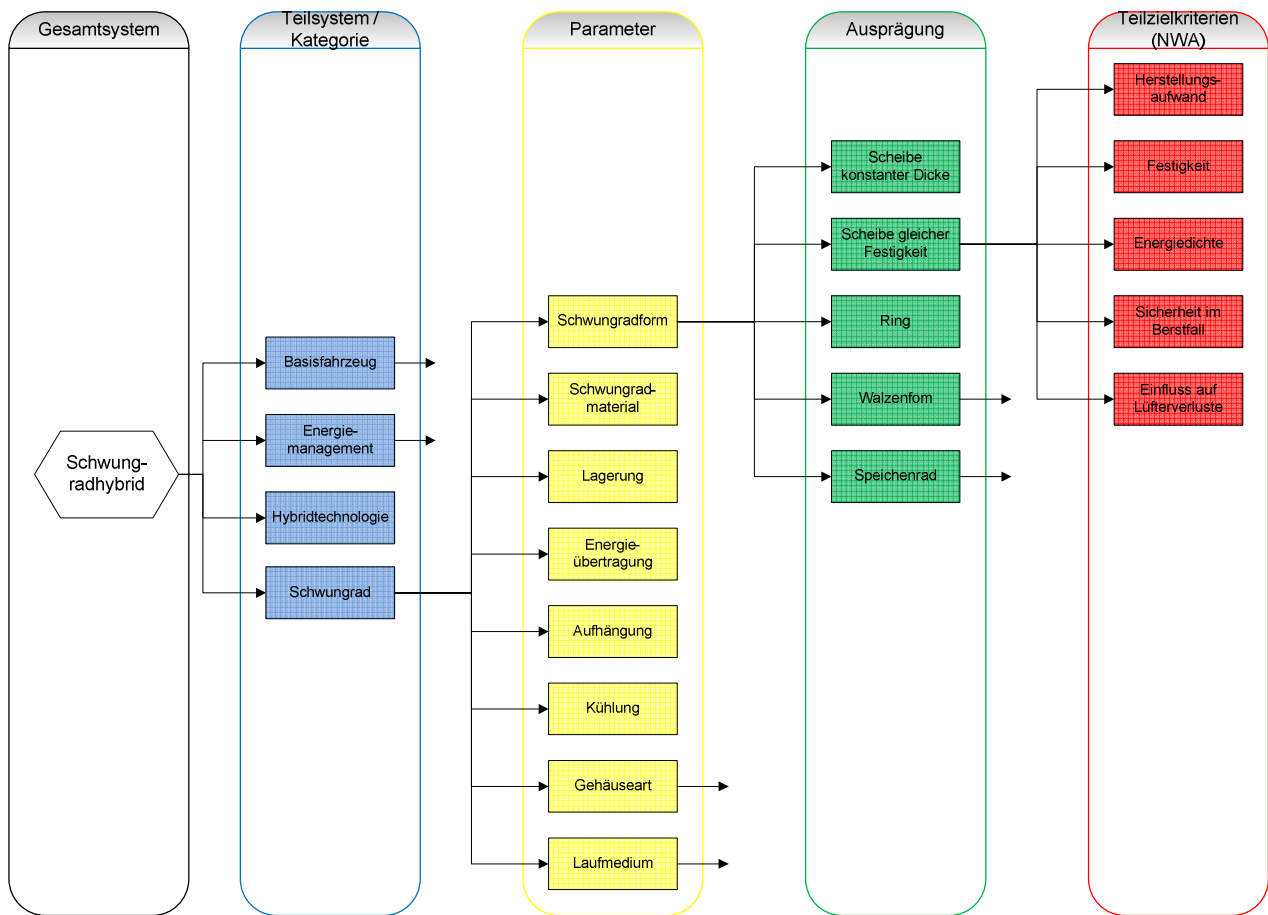


Abbildung 42: Systematisches Strukturieren durch das Baumdiagramm für die Nutzwertanalyse

Für die Applikation der dadurch strukturierten Daten in der morphologischen Matrix werden die Parameter in den Spalten und die dazugehörigen Ausprägungen in den Zeilen eingetragen. Bei der Nutzwertanalyse werden genauso viele Tabellen erstellt wie es Ausprägungen in Summe gibt. Die restliche Vorgehensweise erfolgt wie oben angeführt.

8.1.5 Erörterung: Conclusio

Hierbei geht es – die Überschrift weist bereits autoplusibel darauf hin - um eine Zusammenfassung und Interpretation der vorangegangenen Punkte.

Die wesentlichen konzeptbedingten Vor- und Nachteile eines jeden Systems sollen kurz und übersichtlich wiedergegeben werden. Klarer Weise liegt auch hier wiederum diese Bewertung im Auge des Betrachters, basiert aber auf den physikalischen Grundlagen und Erfahrungswerten aus der Literatur, die im Zuge dieser Arbeit akquiriert wurden.

- **SWOT-Analyse**

Ein Werkzeug, welches sich für die übersichtliche Aufschlüsselung dieser Zusammenfassung gut eignet, ist die so genannte SWOT-Analyse. SWOT steht für für **S**trengths (Stärken), **W**eaknesses (Schwächen), **O**pportunities (Chancen) und **T**hreats (Bedrohungen bzw. Risiken) und wird normalerweise im strategischen Management eingesetzt.

SWOT-Analyse	Interne Analyse	
	Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)
E x t e r n e A n a l y s e	Möglichkeiten (Opportunities)	<p><u>Strategische Zielsetzung für S-O:</u> Verfolgen von neuen Chancen, die gut zu den Stärken des Konzeptes passen.</p> <p><u>Strategische Zielsetzung für W-O:</u> Schwächen eliminieren, um neue Möglichkeiten zu nutzen.</p>
	Gefahren (Threats)	<p><u>Strategische Zielsetzung für S-T:</u> Stärken nutzen, um Bedrohungen abzuwenden.</p> <p><u>Strategische Zielsetzung für W-T:</u> Verteidigungsstrategien entwickeln, um vorhandene Schwächen nicht zum Ziel von Bedrohungen werden zu lassen.</p>

Abbildung 43: Aufbau der SWOT-Analyse, adaptiert aus (43)

Die Abschätzung eines theoretischen Entwicklungspotentials (Opportunities) betrifft in erster Linie die Analyse der Strukturvarianten, weniger die konkreten, bestehenden Ausführungen. Auf der anderen Seite können natürlich auch konkrete Lösungen in bestehenden Systemen ein großes Entwicklungspotential aufweisen. Gute, zukunftssträchtige Ideen und Lösungsansätze werden hier aus der SWOT-Analyse herausgegriffen und im Kurztext diskutiert.

Anmerkung: Die Bewertungsnoten und Ergebnisse werden, abhängig davon, wer bewertet, eine mehr oder weniger starke Streuung aufweisen. Wichtiger als die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse eines Systems sind die Konsistenz des Bewertungsschemas und die damit verbundene Vergleichbarkeit der Systeme untereinander!

8.2 Beeinflussbarkeit der Bewertungsstrategie

Eine wichtige Kenngröße einer Bewertungsmethode ist deren „Sensibilität“ auf Parameteränderungen. Resultiert die geringfügige Änderung einer *Einzelgewichtung*, oder eines *Teilzielkriteriums* der NWA in einem stark abweichenden Endergebnis, so kann keine gute Reproduzierbarkeit mehr gewährleistet werden und eine grundlegende Anforderung an die Bewertungsstrategie wird verletzt.

Es wird versucht, die „Angreifbarkeit“ der Bewertungsstrategie im Bezug auf die obige Überlegung durch folgende Aspekte so gering wie möglich zu halten:

- **Holistischer Ansatz:** durch die gesamtheitliche Betrachtung des Systems „Schwungradfahrzeug“ werden technische Eigenschaften aus den unterschiedlichsten Fachgebieten evaluiert. Dadurch sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass der bewertende Ingenieur lediglich einen Parameter einer ihm völlig fremden Thematik, oder seines Spezialgebietes bewerten muss. Es kann somit der Einfluss des fachspezifischen Wissens minimiert werden.
- **Anwendung verschiedener Bewertungstools:** Der Schwerpunkt der *Camelot-Methode* liegt auf jenen Eigenschaften des Fahrzeuges, die für den Kunden relevant sind, während die Nutzwertanalyse den Fokus auf die technische Umsetzung und die Schwungradtechnologie legt. Auch die Methodik der Bewertungstools ist grundverschieden. Divergieren die beiden Ergebnisse eklatant, so ist das ein Zeichen dafür, eine erneute Bewertung oder die Meinung Dritter erforderlich ist.
- **Einsatz qualitativer und quantitativer Bewertung:** Es wurde bereits erwähnt, dass die Punktebewertungen der *Camelot-Methode* und der *NWA* nur im Vergleich der unterschiedlichen Konzepte zueinander an Aussagekraft gewinnen. Diese Zahlenwerte verleiten aber zu einer Reihung der Fahrzeuge vom „besten“ bis zum „schlechtesten“, also wieder einer *absoluten Aussage*, die es ja zu vermeiden gilt, da das Analyseschema versucht, stets *objektiv* aber *relativ* zu bewerten. Qualitative Analysemethoden wie die *SWOT*-Analyse sind gute ergänzende Maßnahmen und relativieren die quantitativen Aussagen der Bewertungstools.
- **Graphische Aufschlüsselung:** Diese erlaubt „hinter das Zahlenergebnis zu blicken“, indem sie klar aufzeigt, welche Teilkategorien oder Ausführungen für besonders starken Punkteabfall oder besonders gute Bewertungen verantwortlich sind. (Vergleiche auch Kapitel 0)
- **Hohe Zahl an Teilzielkriterien der NWA:** Aus 4 *Teilkategorien* und 27 *Parametern* resultieren 95 *Teilzielkriterien* und ebenso viele *Teilgewichtungen*. Dadurch wird der Einfluss der Bewertung *eines* Teilzielkriteriums geschwächt und es verringert sich auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein ganzer Parameter, bzw. gar eine ganze Subkategorie davon betroffen sind.

Zur Veranschaulichung wird ein Zahlenbeispiel angeführt. Wir gehen von einem fiktiven Schwungradhybrid aus, welcher in der *NWA* 5 Punkte auf jedes Teilzielkriterium bekommen hat, also auch 5 Punkte auf jeden Parameter und folglich eine Gesamtnote von 5.

Als erstes wird die Änderung eines Teilzielkriteriums von 5 auf 0 Punkte demonstriert. Gewählt wurde das Kriterium „Verluste“ der „Schwungradlagerung“, da es mit 0,3, also 30% die höchste Gewichtung dieses Parameters aufweist.

Das Gesamtergebnis ändert sich von **5** lediglich auf **4,9625** Punkte! Dramatischer scheint sich die Bewertungsänderung auf die graphische Auswertung in Abbildung 44 auszuwirken, in der die Schwungradlagerung nun als deutliche Schwachstelle hervortritt.

Bei Veränderung der einzelnen *Gewichtungen* verhalten sich die Ergebnisse analog, da es durch die Produktbildung egal ist, ob ein *Teilzielkriterium* oder eine *Gewichtung* auf 0 gesetzt wird.

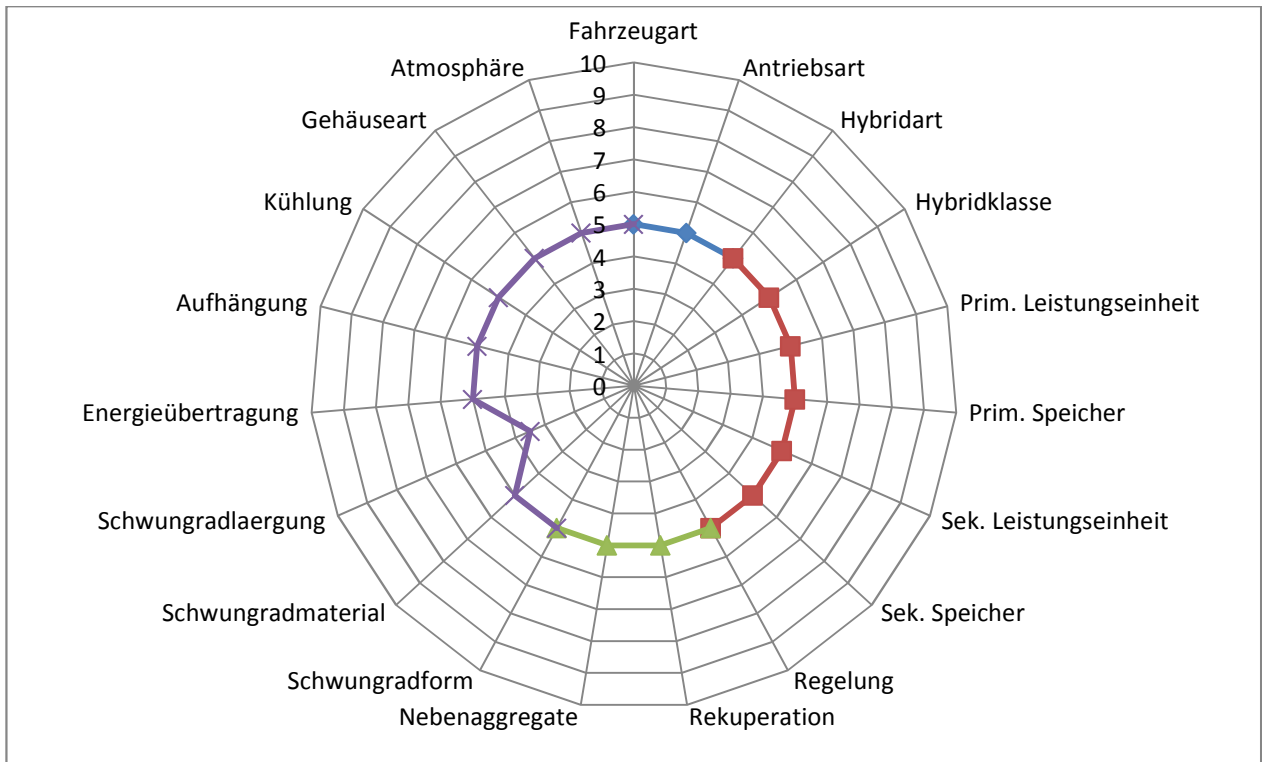


Abbildung 44: Veränderung eines *Teilzielkriteriums* *Verluste der Schwungradlagerung* von 5 auf 0 Punkte

Nächster Test ist Änderung einer ganzen *Parameterbewertung* auf 0 Punkte. (Alle *Teilzielkriterien* des Parameters *Schwungradlagerung* werden auf 0 gesetzt.) Obwohl Abbildung 45 bereits suggeriert, dass entweder ein Fehler in der Bewertung oder eine intolerable Schwachstelle im System vorliegt, ändert sich das Gesamtergebnis nur von 5 auf **4,875** Punkte.

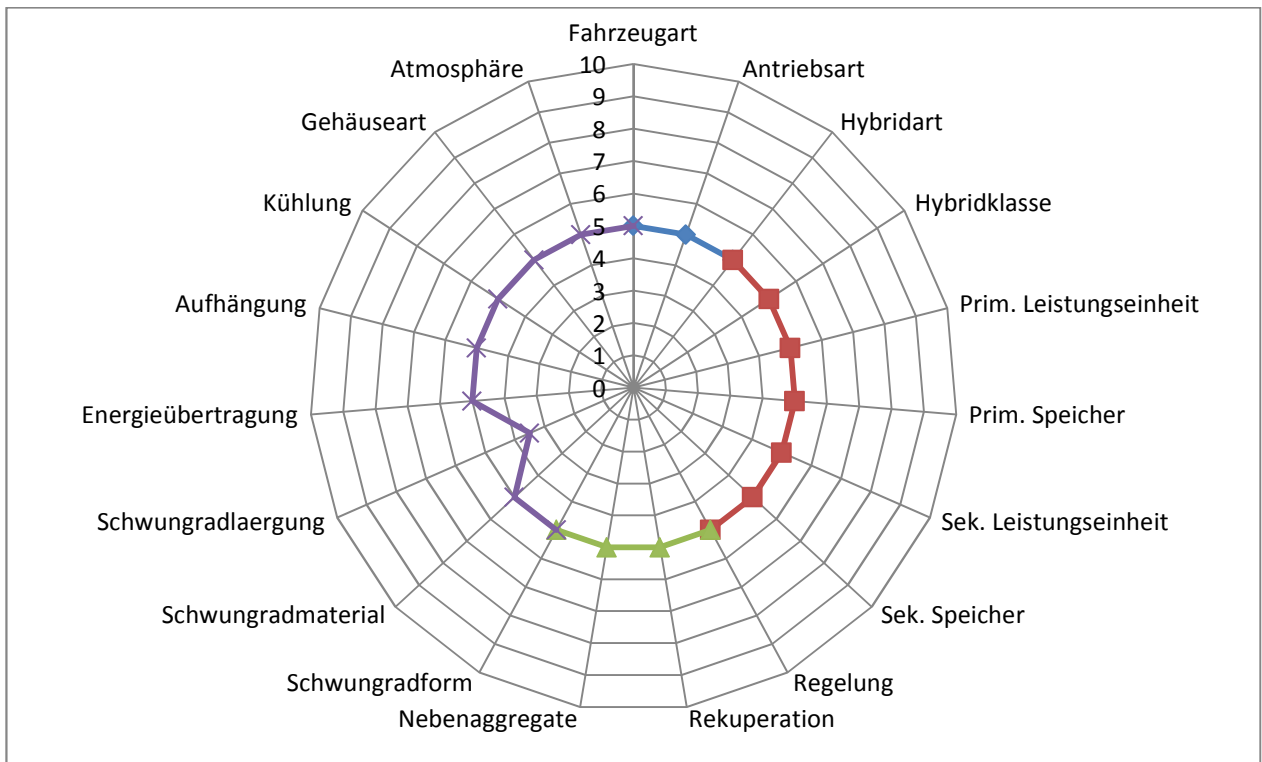


Abbildung 45: Veränderung aller *Teilzielkriterien* des Parameters *Schwungradlagerung* von 5 auf 0 Punkte

9. VW T2 der RWTH Aachen, 1976

9.1 Kurzbeschreibung des Systems

Ende der Siebzigerjahre wurde an der RWTH Aachen ein Versuchsfahrzeug gebaut, dessen Hybridantrieb aus einer Verbrennungskraftmaschine, einem Schwungradspeicher und einem Elektromotor bestand. Der Antrieb, welcher damals noch basierend auf den Simulations- und Rechenergebnissen von Analogrechnern dimensioniert wurde, wurde in einen Kleintransporter des Typs VW T2 eingebaut und am Rollenprüfstand sowie im realen Verkehr und Fahrbetrieb getestet. Neben der Erkenntnis, dass der Hybridantrieb tatsächlich große Kraftstoffeinsparungen erzielen kann, wurden einige Schwachstellen im Bereich des Fahrkomforts und der manuellen Fahrzeugregelung aufgedeckt. Eine Analyse dieses Systems erscheint gleich vorweg schon sinnvoll, da die Entwicklung der Werkstoffe, der Leistungselektronik usw. noch fernab vom heutigen Stand war und daher möglicherweise Vorteile des eigentlichen Konzeptes durch suboptimale Umsetzung zu Nichte gemacht wurden. Ein Indiz dafür, dass das Konzept an sich durchaus großes Verbrauchseinsparungspotential und große Praxistauglichkeit aufweist, ist die Tatsache, dass diese Art des leistungsverzweigten Hybrides momentan die meistverkaufte ist.



Abbildung 46: Außenansicht des Versuchsfahrzeuges VW T2 der RWTH Aachen (48)

Bei der Auslegung der Antriebseinheit wurde nicht nur auf energetische Gesichtspunkte geachtet, sondern auch versucht, die Adaptionen am Serienfahrzeug so gering wie möglich zu halten. Das heißt, es wurde eine kompakte Bauweise verfolgt, um mit dem bestehenden Platz das Auslangen zu finden. Die folgende Abbildung zeigt die Antriebseinheit des Prototyps.

Das Schwungrad, welches aus Gründen der Einfachheit aus Stahl, und nicht aus einem Faserverbundwerkstoff gestaltet ist, ist über ein Winkelgetriebe konstanter Übersetzung, also drehzahlproportional, mit der Verbrennungskraftmaschine verbunden und bewirkt daher eine starke Phlegmatisierung dieser.

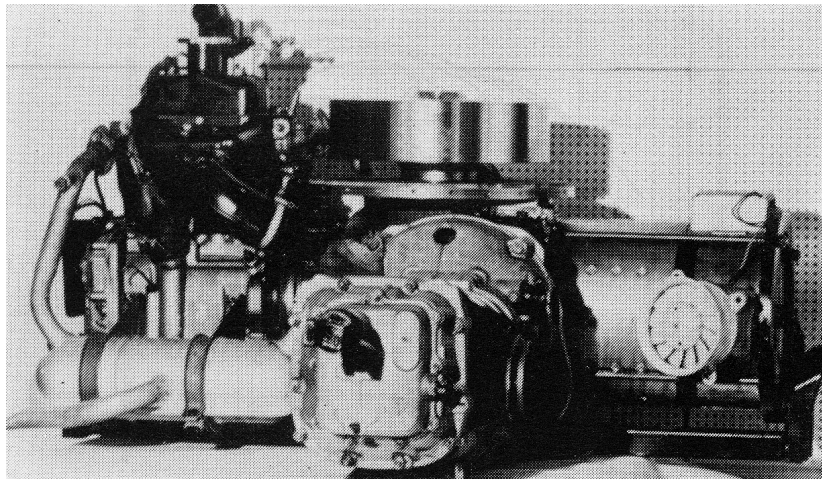


Abbildung 47: Bild des zusammengebauten Hybridantriebes des VW T2 der RWTH Aachen

Um die Massenkräfte und somit die Belastungen auf die Schwungradlager gering zu halten, musste eine Verbrennungskraftmaschine mit hoher Laufruhe zum Einsatz kommen. Die Wahl fiel deshalb zuerst auf einen Wankelmotor, der später wegen seiner geringen Leistung und des schlechten Wirkungsgrades durch einen Viertaktmotor von Fiat ersetzt wurde.

Daten Gesamtfahrzeug	
Entwickler / Hersteller	RWTH Aachen
Fahrzeugtyp	Kleintransporter VW T2
Baujahr	1975
Fahrzeugart	Leistungsverzweigter Hybrid
Gesamtmasse	1722 kg
Masse Serienfahrzeug	1405 kg
Daten Schwungrad	
Energieinhalt	0,211 kWh
Drehzahl	13400 U/min
Werkstoff	42CrMoV4
Maximale Leistung	k.A.
Gewicht d. Schwungrads	58 Kg
Durchmesser	326 mm
Form	Scheibe konstanter Dicke
Trägheitsmoment	0,77 kgm ²
Energieübertragung	Mechanisch, Winkelgetriebe
Aufhängung	Starr
Masse der Einheit	75 kg
Daten Verbrennungskraftmaschine	
Typ	Fiat 126
Arbeitsprinzip	2-Zylinder, Viertakter
Leistung	17 KW bei 4800 U/min

Masse	67 kg
Daten Elektromaschine	
Bezeichnung	Bosch KW 816/1 A 1
Typ	Gleichstrommaschine
Nominelle Leistung	11 kW bei 2000-6700 U/min
Maximale Leistung	22 kW bei 2000 U/min
Masse	68 kg
Leistungselektronik	Bosch BZ 45302009
Daten Batteriespeicher	
Batterietyp	Bleibatterie
Aufbau	12 Stück á 12 V, 45 Ah
Masse	174 Kg

Tabelle 11: Technische Daten des Schwungradhybrides VW T2 der RWTH Aachen (49)

9.2 Abstraktion VW T2 der RWTH Aachen

Basierend auf den Informationen aus der Literatur [(49), (48)] und den dadurch verfügbaren Fotos, Getriebeschnittbildern, Beschreibungen und Skizzen kann die Ausführung auf die wesentlichen Funktionen zurückgeführt werden.

Wesentliches Charakteristikum der Konstruktion ist, dass die Leistungen der VKM, des E-Motors und des Schwungrades in einem Umlaufgetriebe überlagert werden. Das Schwungrad ist mit fixer Übersetzung parallel zur VKM geschaltet und somit stehen die Momente der jeweiligen Leistungsquellen in einem über das Planetengetriebe bestimmten Verhältnis zueinander.

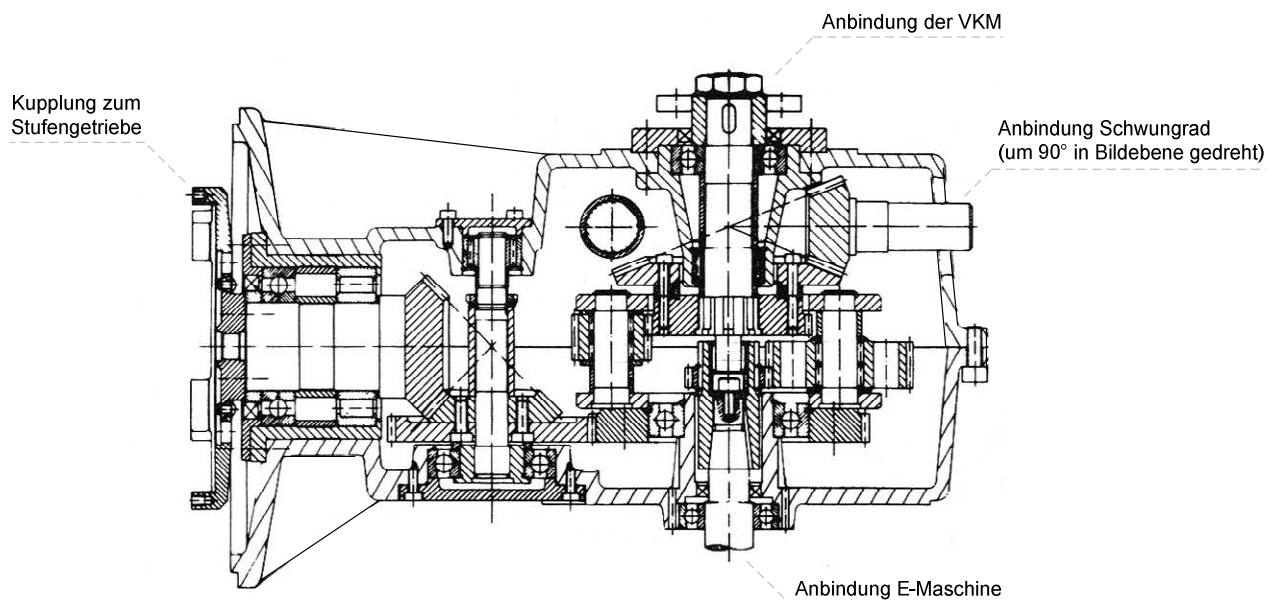


Abbildung 48: Horizontalschnitt durch das Umlaufgetriebe des VW T2 der RWTH Aachen (49)

Der E-Motor bestimmt also das Abtriebsmoment und die Abtriebsleistung und wird daher im Wesentlichen über das Fahrpedal gesteuert. Das gleiche Prinzip wird auch beim zurzeit erfolgreichsten Vollhybridmodell, dem *Toyota Prius* angewandt. Abbildung 49 zeigt die Abstraktion des Systems für die nunmehr leichter durchführbare Verlustanalyse und Bewertung.

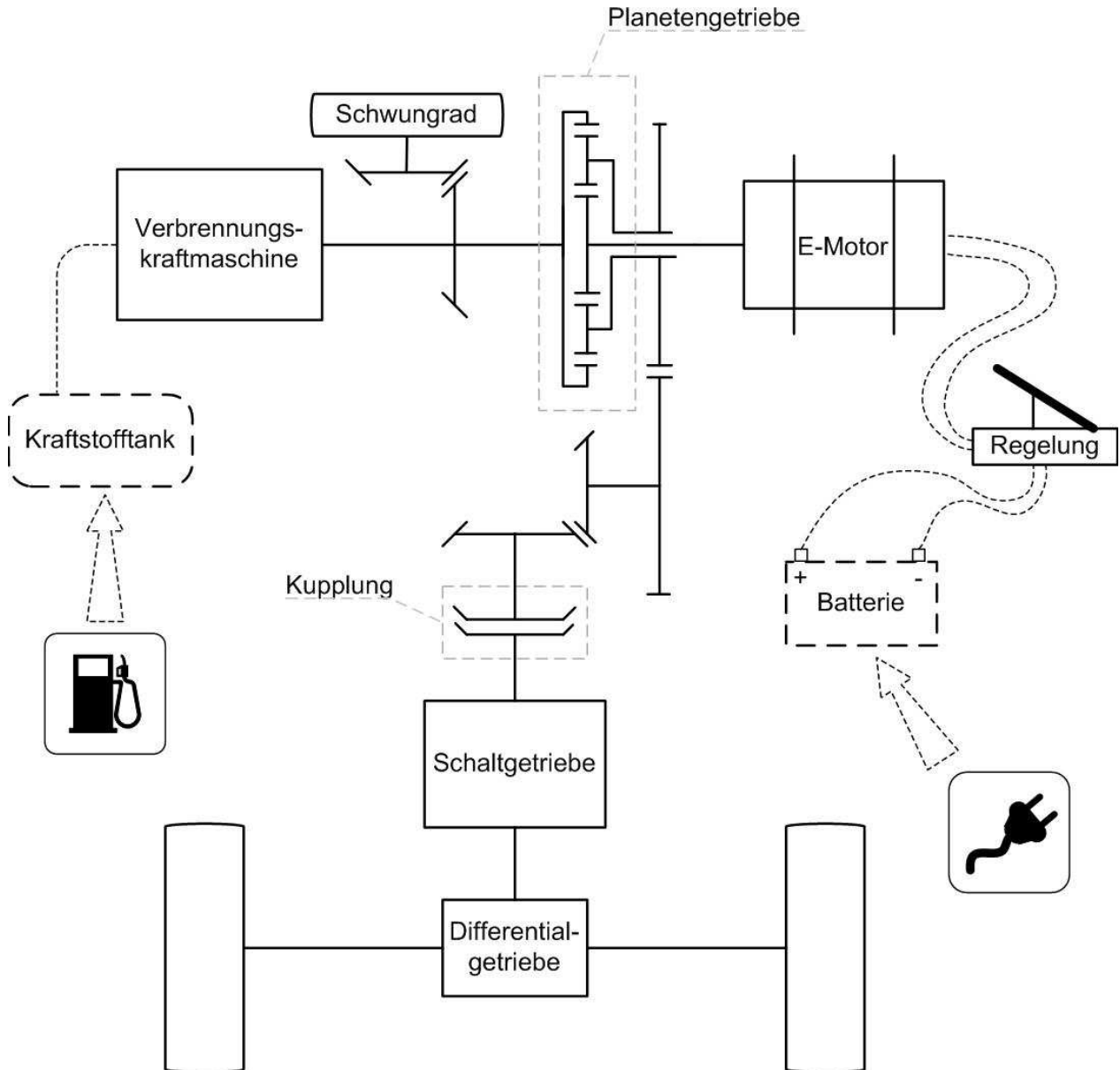


Abbildung 49: Prinzipskizze des VW T2 der RWTH Aachen

In der Literatur, welche über das Versuchsfahrzeug der RWTH Aachen zu finden war, befindet sich auch ein Nomogramm²⁰ welches die Arbeitsbereiche der Elektromaschine beschreibt.

²⁰ In der Literatur auch oft als *Kutzbach-Plan* bezeichnet

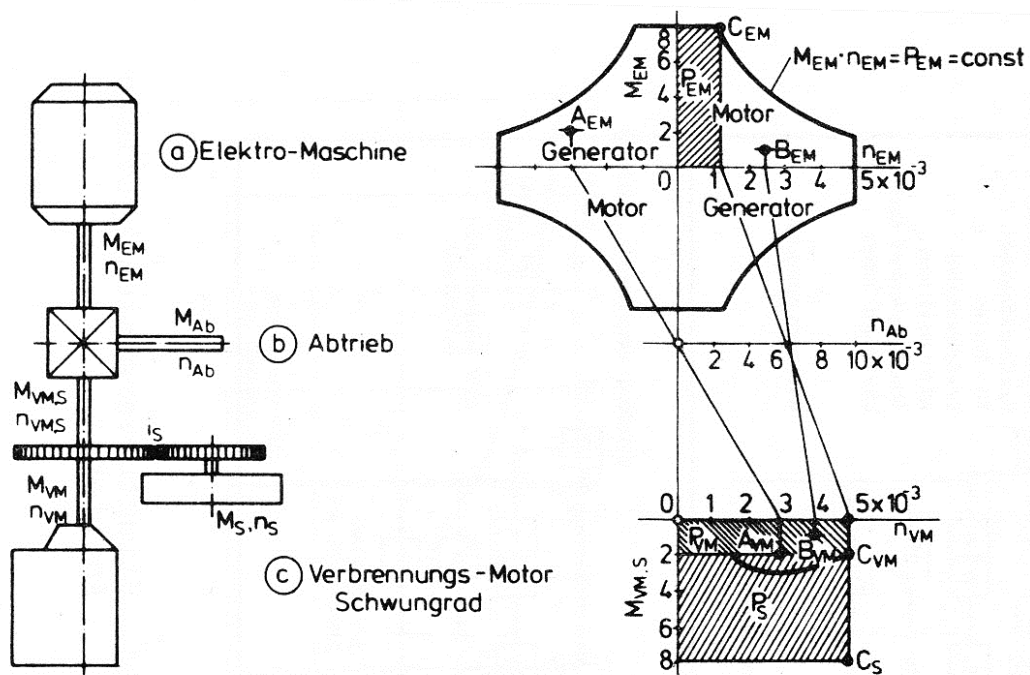


Abbildung 50: Nomogramm des Hybridantriebes des VW T2 der RWTH Aachen (50)

Der Index EM steht für Elektromaschine, AB für Abtrieb und VM für Verbrennungsmaschine. Die Drehzahl des Abtriebs, also die Stegdrehzahl des Planetengetriebes (vergleiche Abbildung 49) bewegt sich zwischen 0 und einer gewissen Maximaldrehzahl, in diesem Fall 6300 U/min. Sie kann jedoch nicht negativ werden, der Rückwärtsgang befindet sich ja im separaten Schaltgetriebe. Ebenso kann die Drehzahl der VKM nicht negativ werden, und auch nicht 0, sondern ist durch die Leerlaufdrehzahl nach unten limitiert. Durch das Schwungrad wird dieses untere Limit aber im Betrieb nicht erreicht, sondern die Drehzahl wird im Bereich von 2500 bis 4000 U/min gehalten. Daraus folgt, dass die Elektromaschine im 4-Quadrantenbetrieb arbeiten muss. Je nachdem, wie die Drehzahlverhältnisse ausfallen, liegt ein generatorischer oder motorischer Betrieb vor.

Die Leistung des Schwungrades ist um ein Vielfaches größer als die des Elektromotors. Beim Beschleunigen gibt es Energie ab und die Drehzahl sinkt. Durch die starke Phlegmatisierung des Systems aufgrund des Schwungrades wirkt sich die Leistung der Verbrennungskraftmaschine eigentlich nur auf die längere Konstantfahrt aus. Für die Beschleunigungsleistung im Allgemeinen ist die Dimensionierung der Elektromaschine ausschlaggebend.

9.3 Verlustanalyse des VW T2 der RWTH Aachen

Die Strukturvariante an sich erlaubt ein Konzept mit einem relativ hohen Gesamtwirkungsgrad. Grund hierfür ist die Tatsache, dass die Energie nur einmal von elektrischer bzw. fossiler Energie in mechanische umgewandelt wird und dann in dieser Form über Getriebestufen, welche einen guten Wirkungsgrad aufweisen, übertragen wird. Dies steht im Gegensatz zum seriellen Hybrid, bei dem die Wirkungsgradkette durch den Umwandlungsprozess *Fossil* → *Mechanisch* → *Elektrisch* → *Mechanisch* entsprechend lang ist.

Als erstes soll der Antriebsstrang von der Seite der Verbrennungsmaschine betrachtet werden. Das Prinzip weist hier einen offensichtlichen Mangel auf: Das Schwungrad läuft frei in der Umgebungsatmosphäre, wodurch erhebliche Strömungsverluste entstehen.

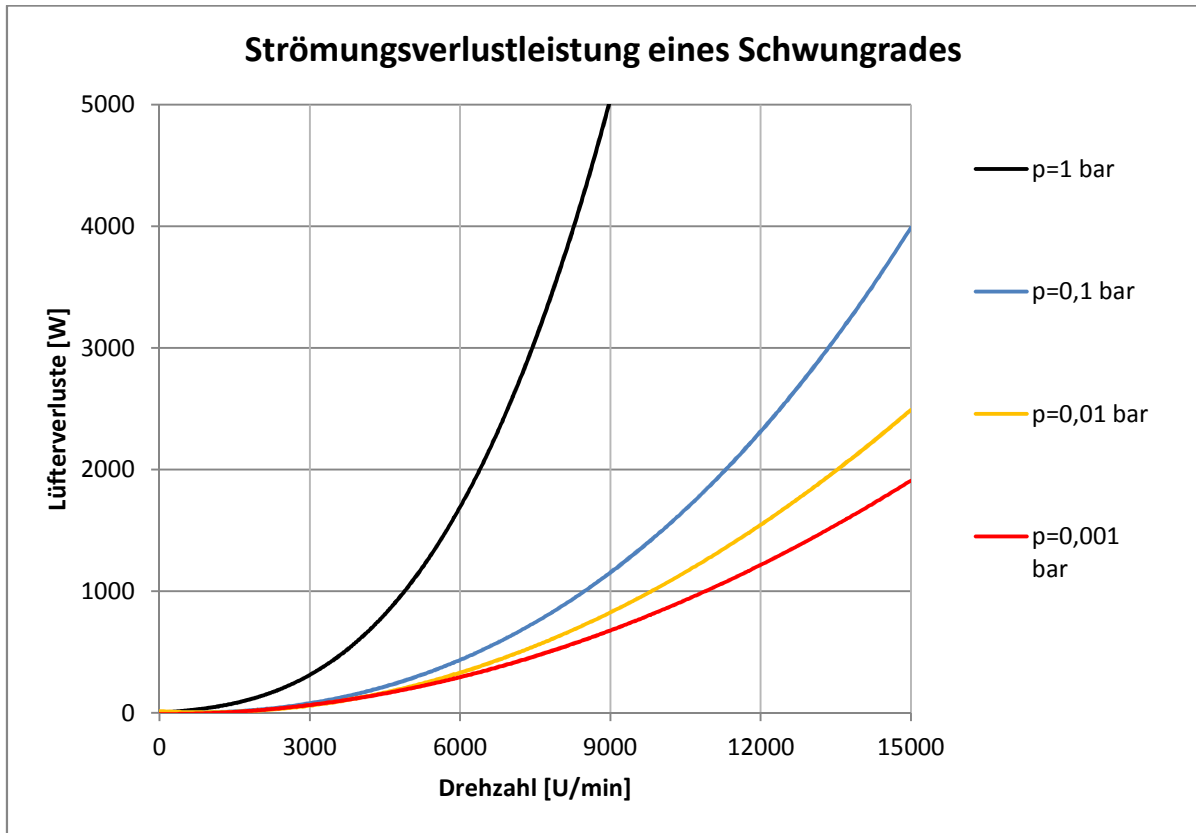


Abbildung 51: Allgemeine Strömungsverluste P_{VR} eines Schwungrades abhängig von Drehzahl und Atmosphärendruck basierend auf den Messungen von (51)

Das Diagramm in Abbildung 51 wurde auf Basis der Messdaten eines Schwungrades mit den Maßen $D = 482 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$ und einer Masse $m_s = 634 \text{ kg}$ erstellt. Durch den geringeren Durchmesser des Schwungrades des VW T2 und die geringere Höhe sind auch geringere Verlustleistungen zu erwarten. Laut Angabe in (49) belaufen sich die Lüfterverluste auf rund 1,3 kW bei der Maximaldrehzahl von 13400 U/min, das sind immerhin fast 8% der Leistung der VKM. Die Umfangsgeschwindigkeit des Schwungrades beträgt bei dieser Drehzahl knapp 229 m/s, was bei dem den Messungen zu Grunde liegenden Rad mit 0,482 m Durchmesser einer Drehzahl von 9000 U/min ergeben würde. Laut Diagramm würde sich dann die Lüfterleistung auf etwa 5 kW belaufen, was darauf zurückzuführen ist, dass das gemessene Schwungrad deutlich größer ist als jenes der RWTH Aachen, und die viskose Strömungsgrenzschicht am Umfang ihre Widerstandskraft auf einen größeren Hebel wirken lässt.

Nimmt man für die Dichte des Werkstoffes 42CrMo4 eine Dichte von $7,85 \text{ kg/dm}^3$ an, so kann über die Angaben in Tabelle 11 eine Höhe von 103,7 mm errechnet werden, also ungefähr Faktor 3, der sich auch im Quotienten der Verlustleistungen recht gut widerspiegelt. Somit kann der qualitative Verlauf des Diagramms durchaus auf den hier betrachteten Schwungradhybrid angewendet werden und dieser lässt darauf schließen, dass die Strömungsverluste selbst bei einer relativ schwachen Evakuierung der Umgebung auf etwa $\frac{1}{5}$, das wären in diesem Fall circa 260 Watt, schrumpfen. Wichtig zu bemerken ist, dass durch die hohe Selbstentladung des

Schwungrades Aufgrund von Strömungs-, Lager- und Getriebeverlusten der Wirkungsgrad im Teillastbereich massiv verschlechtert wird. Absolut betrachtet ist eine Bilanzierung über *Verlustmomente* oder *Verlustleistungen* erforderlich, da der Wirkungsgrad - je nachdem ob Teil- oder Volllast vorliegt - erheblich variiert.

Eine Alternative wäre also der Betrieb des Schwungrades in einer evakuierten Laufkammer. Die rotierende Welle kann bei diesen für heutige Standards geringen Drehzahlen durch den Einsatz von speziellen Vakuum-Dichtringen durchgeführt werden. Gleitringdichtungen und Ferrofluidichtungen sind zwei gängige Möglichkeiten der Vakuumdurchführung. (Vergleiche Kapitel 7.1.3, Punkt 4: Vakuumtechnik)

Bei Gleitringdichtungen, die im Vakuum Anwendung finden, wird meist ein in Öl drehender Ring auf Graphit axial an die Metalloberfläche gepresst. Die erforderliche Kraft wird durch Federn oder Magnete bereitgestellt. Die Gleitringdichtung ist für ein Vakuum von 10^{-3} Pa einsetzbar und ihr Reibungskoeffizient beträgt etwa 0,05-0,1 (52). Da durch die Reibung Wärmeverluste auftreten, kann eine Ölkühlung erforderlich sein (8). Die Ferrofluidichtung ist mit Flüssigkeit, in welcher Magnetit-Partikel eingelagert sind, gefüllt. Die viskose Flüssigkeit trennt die voneinander abzudichtenden Medien und wird durch einen Permanentmagneten davor gehindert, bei der Labyrinthdichtung auszutreten. Die besten Ausführungen dieser Art können bei mehrstufiger Ausführung Drücke bis zu 10^{-8} Pa gegenüber Atmosphärendruck aufrechterhalten. Als großer Nachteil ist der hohe Preis zu nennen (8). Ein Schwungrad, welches im Vakuum läuft und dennoch mechanisch mit dem Antriebsstrang verbunden ist, wurde 1996 von der Universität Eindhoven gebaut und wird in dieser Arbeit ebenfalls besprochen (Siehe Kapitel 10).

Betrachtet man jene Situation, in welcher der Steg des Planetengetriebes still steht und die gesamte Leistung in das Laden des Schwungradspeichers geht, und nimmt man einen Wirkungsgrad der Kegelradstufe von 95% an, so kommen Getriebeverluste in der Höhe von 0,85 kW dazu. Der Zweizylinder Fiat-Motor bietet im Bestpunkt, das heißt bei etwa 3000 U/min und 33 Nm Drehmoment einen Wirkungsgrad von 29%, was dem technischen Standard der 70er Jahre entspricht und daher nicht als Schwachstelle des Prinzips gewertet werden kann.

Die Leistung, die von Seiten des Elektromotors in das Antriebssystem kommt, unterliegt ebenso Umwandlungs- und Getriebeverlusten. Allerdings kommen in diesem Fall auch noch Speicherverluste hinzu, welche bei einem Kraftstofftank als vernachlässigbar angenommen werden können. Durch parasitäre Widerstände in den Batterien entleeren sich diese mit der Zeit. Da die Selbstentladung einer Bleibatterie bei korrekter, das heißt kühler Lagerung im Mittel 5 bis 10 % pro Monat beträgt, ist das Verbesserungspotential hier jedoch recht gering. [(11), (10)]

Anders sieht es aber beim Laden der Boardbatterie aus. Zwar war der Begriff *Plug-in-Hybrid* in den Siebzigerjahren noch nicht so populär wie heute, aber das vorliegende Prinzip kann als solches bezeichnet werden. Der Wirkungsgrad des Ladegerätes beeinflusst die Effizienz des gesamten Systems erheblich und hat folglich einen starken Einfluss auf die CO₂-Bilanz. Diese kann sogar zu Gunsten der Verbrennungskraftmaschine ausfallen.

Abbildung 52 zeigt die spezifische kumulierte CO₂-Emission je nach Energiespeicher. Man erkennt den starken Einfluss des Energiemixes, sodass eine Emission von mehr als 200g CO₂/100 km zu Stande kommen kann, je nachdem aus welcher Quelle der Strom bezogen wird. Würde die Primärenergie von Wasserkraftwerken bereitgestellt werden, so könnte dieser Wert erheblich reduziert werden.

Zusätzlich ergibt sich um die Energie vom Netz in die Batterie und dann wieder in den E-Motor zu bringen eine weitere Wirkungsgradkette (53). Sie setzt sich zusammen aus dem Wirkungsgrad des Ladegerätes und dem Lade- sowie Entladewirkungsgrad der Batterie. Wird jeder einzelne mit 90% angenommen, so bleibt ein Gesamtwirkungsgrad von etwa 73%.

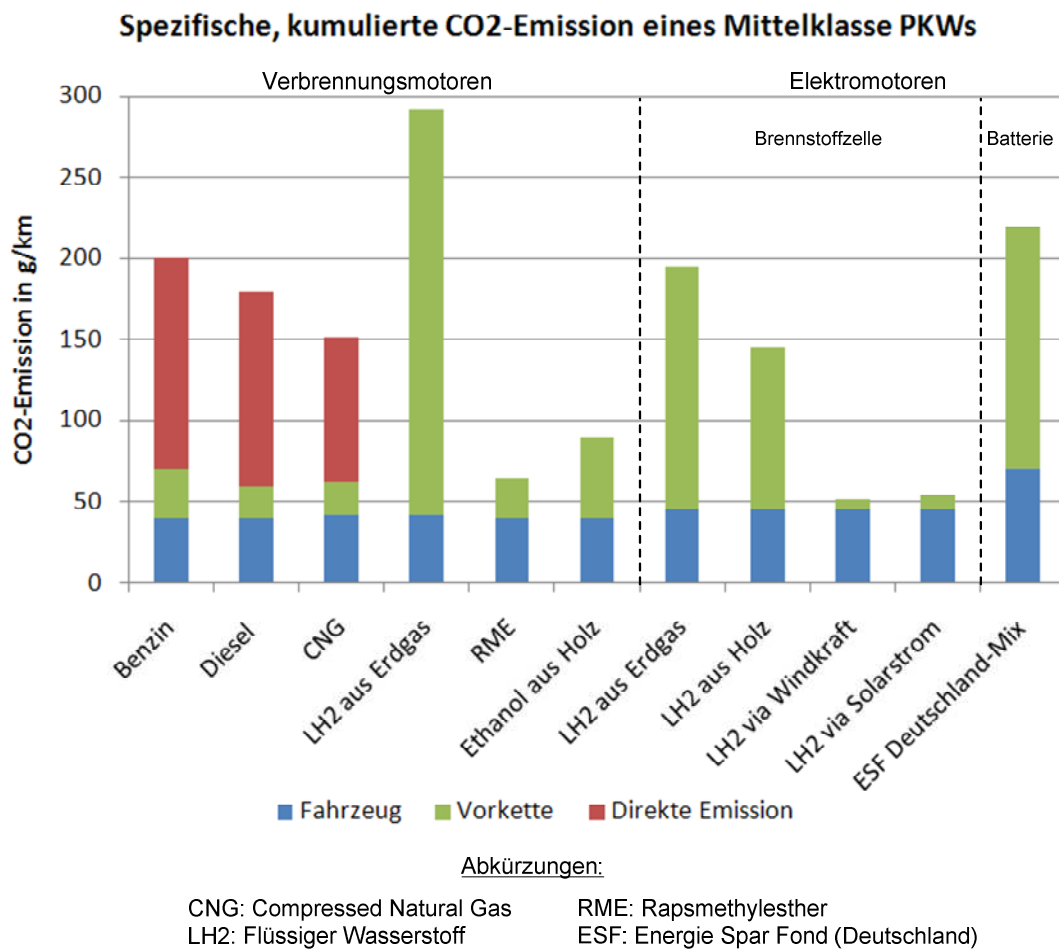


Abbildung 52: Spezifisch kumulierte CO₂-Emissionen für einen Mittelklasse PKW in Deutschland (11)

Über den Wirkungsgrad der Elektromaschine liegen leider keine Informationen vor. Generell erreichen moderne E-Motoren Wirkungsgrade über 90%. Zu beachten bleibt dabei jedoch, dass diese Wirkungsgrade für unterschiedliche Ausführungen bei unterschiedlichen Betriebspunkten optimal sind. Geschaltete Reluktanzmaschinen erreichen den besten Wirkungsgrad bei hohen Drehmomenten und in einem großen Drehzahlbereich. Permanent erregte Synchronmaschinen können schon bei Drehzahlen um den Typenpunkt²¹ Wirkungsgrade bis 93% aufweisen. Die Asynchronmaschine erreicht Wirkungsgrade bis zu 91% vor allem bei höheren Drehzahlen. Die Abbildung 53 zeigt die Bereiche maximalen Wirkungsgrades der unterschiedlichen E-Maschinen.

²¹ „Im sog. *Typenpunkt* erreicht die Spannung U_1 ihren maximalen Wert, der z. B. durch die Zwischenkreisspannung festgelegt ist. Für eine weitere Frequenzerhöhung kann die Spannung dann nicht mehr erhöht werden, wodurch der Drehfluss und damit das Drehmoment etwa proportional mit $1/f$, abfallen. Man bezeichnet diesen Arbeitsbereich daher auch als Feldschwäcbereich, der wegen $n \sim f$, durch eine konstante Leistung P_s gekennzeichnet ist.“ (94)

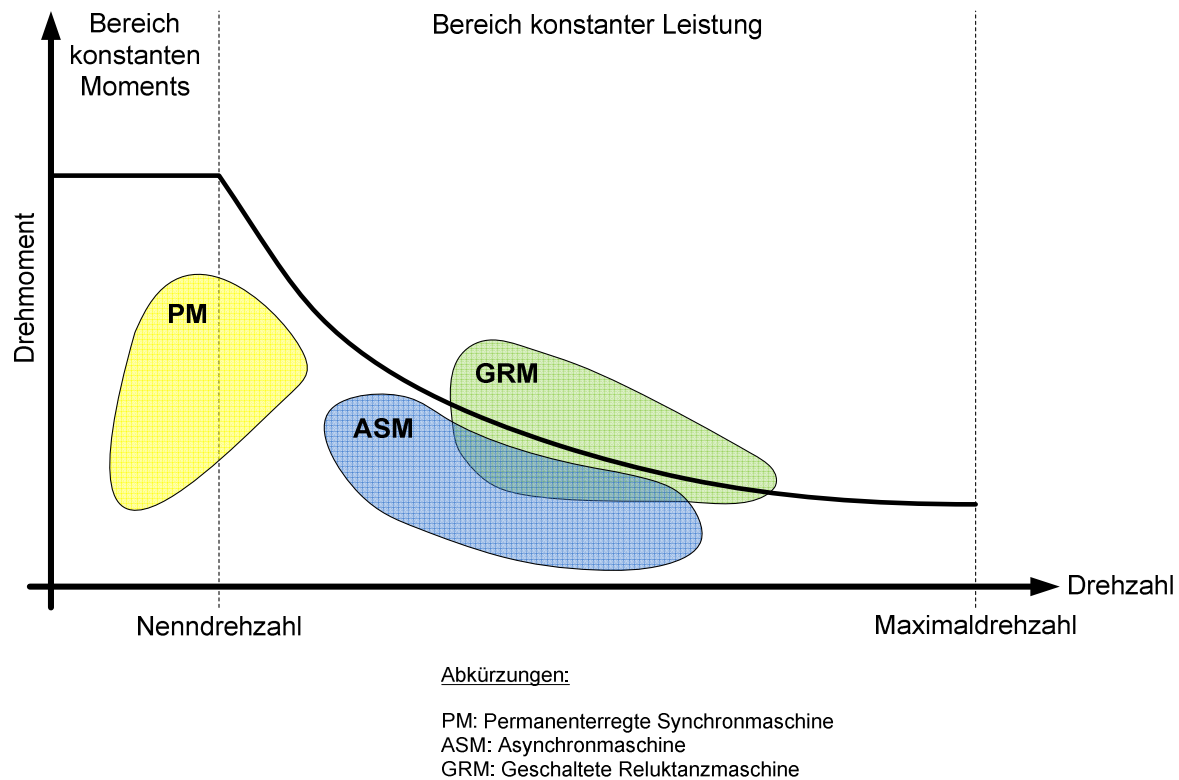


Abbildung 53: Gebiete maximalen Wirkungsgrades der unterschiedlichen E-Maschinen, erstellt aus den Daten von (11)

Um zu entscheiden, welche der Maschinen für die Anwendung im Versuchsfahrzeug dem heutigen Stand der Technik nach optimal wäre, müsste über einen typischer Weise auftretenden Fahrzyklus ein Drehzahl- und Drehmomentenlastkollektiv für E-Maschine ermittelt werden. Einen weiteren Einfluss hat die von der Maschinenart abhängige Leistungselektronik. Auch hier treten unvermeidbare Verluste durch die Ohmschen Widerstände in Form von Wärme sowie Blindleistung auf. Die Effizienz liegt im Bereich von 80 bis über 95% (54)

9.4 Erweiterte Camelot Methode VW T2 RWTH Aachen

Um möglichst hohe Transparenz und Objektivität zu erreichen, wird bei der Bewertung jedes einzelne Kriterium diskutiert.

1. Energie und Energiedichte Schwungrad

Mit 0,2 kWh siedelt sich der Energieinhalt im untersten Bereich der Skala an. Zwar ist bei modernen Schwungradhybriden, wie in Kapitel 7.2.2 ersichtlich, ein Trend in Richtung geringem Energieinhalt und hoher Leistung zu verzeichnen, aber dies verspricht nur dann Erfolg, wenn eine entsprechende Regelstrategie vorliegt.

Durch die drehzahlproportionale, direkte Koppelung des Schwungrades an die VKM wird diese bei starker Energieentnahme aus dem Schwungrad aus der Insel optimalen Wirkungsgrades – welche in Abbildung 54 zu sehen ist - verdrängt. Damit der Verbrennungsmotor nach wie vor effizient arbeiten kann, darf seine Drehzahl ausgehend von 3000 U/min nicht wesentlich unter 2500 U/min absinken, das entspricht nur etwa 20% Energieentnahme des Schwungrades.

$$E_k = \frac{1}{2} I (\omega_1^2 - \omega_2^2) = \frac{1}{2} 0,77 \left(\frac{26800}{60} \pi^2 - \frac{26800 * 0,8}{60} \pi^2 \right) \approx 272917 \text{ J} = 75,8 \text{ Wh}$$

Laut Angabe der Entwickler darf das Schwungrad maximal 75% seiner gespeicherten Energie abgeben, das heißt, seine Drehzahl sinkt auf die Hälfte ab. Ausgehend von der Betriebsdrehzahl ergibt das:

$$E_k = \frac{1}{2} I (\omega_1^2 - \omega_2^2) = \frac{1}{2} 0,77 \left(\frac{26800}{60} \pi^2 - \frac{13400}{60} \pi^2 \right) \approx 568576 \text{ J} = 157,9 \text{ Wh}$$

Im absolut verlustfreien Fall würde das bedeuten, dass das Fahrzeug mit der verfügbaren Schwungradenergie genau einmal von 0 auf 57,6 km/h beschleunigen kann. Unter Einfluss der Luft- und Rollreibungsverluste sowie des mechanischen Wirkungsgrades des Gesamtfahrzeuges erscheint ein weitaus größerer Energieinhalt von circa 0,5 kWh Gesamtenergie als sinnvoll und daher ist der Wert des VW T2 als unzureichend zu betrachten. Mit einer Masse von 58 kg ist das Schwungrad verglichen zu hochdrehenden Rädern aus Verbundwerkstoff relativ schwer, allerdings wird dadurch die Drehzahl gering gehalten und es können konventionelle Lager eingesetzt werden.

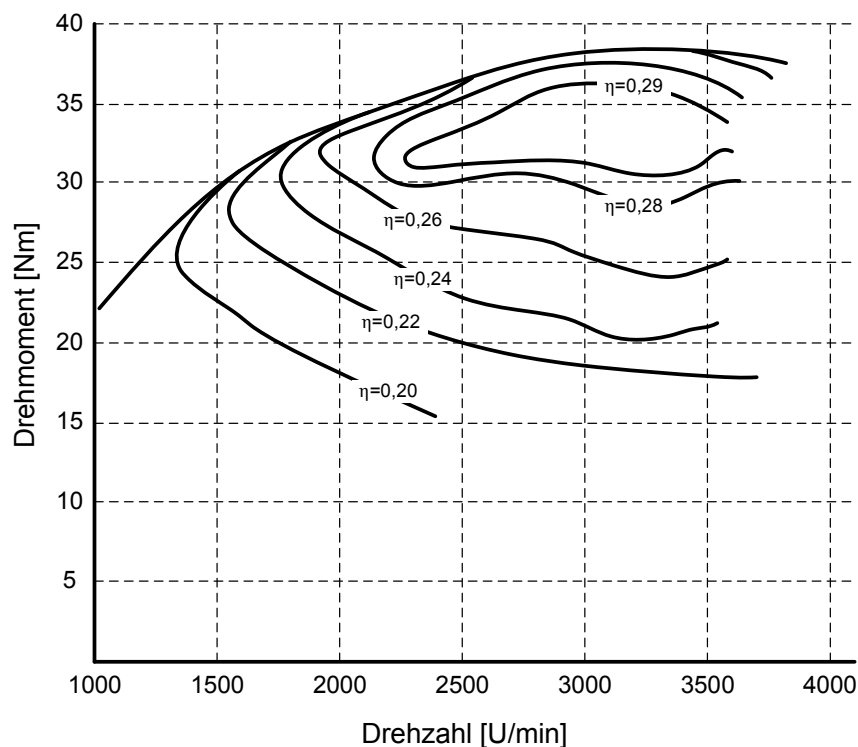


Abbildung 54: Muscheldiagramm des Verbrennungsmotors des VW T2 Hybrides (49)

2. Leistung und Leistungsdichte des Schwungrades

Durch die direkte Ankoppelung des Schwungrades an das Getriebe können sehr hohe Leistungen, die nur durch die Zahnfußfestigkeit sowie die zulässige *Hertz'sche Pressung* an den Zahnflanken und die Festigkeit der Wellen limitiert sind. Für die Überlegungen bezüglich der Dichte gelten die gleichen werkstoffspezifischen Betrachtungen wie oben.

3. Einfluss der Kreiselkräfte

Die Anbindung des Schwungrades an den Antriebsstrang hat einen Einfluss auf das Fahrverhalten bzw. auf die Lebensdauer des Antriebes. Im Allgemeinen kann bei Schwungrädern mit geringem Energieinhalt davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Kreiselkräfte für den Fahrer aber kaum wahrnehmbar ist. Auf Basis der im Anhang Abschnitt 3.4 und 3.6 erarbeiteten physikalischen Zusammenhänge können diese quantifiziert werden. \vec{M}_k ist das Kippmoment, welches der Drehimpuls des Schwungrades aufbringt, wenn versucht wird, seine Drehachse zu ändern:

$$\vec{M}_k = \vec{L} \times \vec{\omega}_S = I \omega \omega_S$$

wobei I das Trägheitsmoment des Schwungrades, ω die Winkelgeschwindigkeit des Schwungrades, und ω_S die Winkelgeschwindigkeit der Änderung der Drehachse (also z.B. Wanken des Fahrzeuges bei senkrechter stehender Drehachse des Flywheels) ist. Bei normalen Fahrmanövern treten Winkeländerungsraten von etwa 10 [°/Sek], auf (55), wobei jene, die sich in der horizontalen Ebene abspielen, durch die Kontaktkräfte der Reifen limitiert sind. Für den konkreten Fall des VW T2 der RWTH Aachen ergibt sich ein gyroskopisches Moment von:

$$M_k = 0,77 \frac{10 \cdot 2\pi}{360} 13400 \frac{2\pi}{60} = 188,6 \text{ Nm}$$

Diese Betrachtung berücksichtigt nur eine stationäre Winkeländerung der Drehachse, genügt aber den Anforderungen an eine erste Abschätzung. Wie „stark“ der Einfluss tatsächlich ist, bleibt der subjektiven Einschätzung des Fahrers überlassen. Aus konstruktiver Sicht stellt dies jedoch eine Schwachstelle dar, da die vertikale Drehachse zwar unproblematisches Gieren des Fahrzeuges erlaubt und somit die günstigste starre Anbindungsmöglichkeit bietet, jedoch Nick- und Wankbewegungen nicht uneingeschränkt ausgeführt werden können und somit zu hoher Lagerbelastung führen kann. Besonders bei der Durchführung von Missbrauchstests am Fahrzeug, bei denen Belastungen auftreten können, die um einen Faktor 10 höher sind als bei den vorgesehenen Fahrmanövern. (56)

4. Rekuperation

Das System bietet grundsätzlich zwei Wege der Rekuperation. Die Energie kann über den generatorischen Betrieb der Elektromaschine in die Batterie gespeist werden, oder direkt in das Schwungrad, wobei in diesem Fall ein Stützmoment vom E-Motor aufgebracht werden muss. Ein Vorteil des Rückspeisens direkt in das Schwungrad wäre der Umstand, dass die Energie nicht von mechanischer in elektrische umgewandelt werden muss. Noch gravierender wirkt sich aber die Tatsache aus, dass das Schwungrad im Vergleich zur Batterie viel größere Leistungen aufzunehmen vermag und daher eine äußerst gute Eignung für der Bremsenergierekuperation aufweist. (Siehe auch Kapitel 4 und Anhang 4.2) Diese Variante ist daher auf jeden Fall zu bevorzugen, und es könnte durch das Anbringen einer Bremse an der E-Motorwelle das Stützmoment übernommen werden. In beiden Fällen fallen Verluste in Form von Wärme an. Da das Fahrzeug ein Hecktriebler ist, kann allerdings nur Bremsenergie der Hinterachse rekuperiert werden. Durch die aus Sicherheitsgründen notwendige Bremskraftverteilung²² kann das Potential

²² Normalerweise 65/35% bis 80/20% Vorne/Hinten.

daher nicht vollends ausgeschöpft werden. Ein Überbremsen der Hinterachse ist unter allen Umständen zu vermeiden, und die Nutzbremse verlangt daher eine exakte Abstimmung mit der Betriebsbremse.

5. Selbstentladung des Schwungrades.

Diese wurde bereits in der Verlustanalyse behandelt und ist durch die hohen Lüfterverluste als schlecht zu bezeichnen. Da das Schwungrad jedoch von der VKM nicht entkoppelbar ist, kann das Schwungrad die Energie alleine schon aufgrund der konstruktiven Gegebenheiten bei längerem Stillstand nicht speichern.

6. Berst- und Crashesicherheit

Das Schwungrad wird mit 13400 U/min betrieben, wodurch sich nach den im Kapitel 4.4 erarbeiteten Zusammenhängen maximale Spannungen von 166 N/mm^2 ergeben. Der Stahl 42CrMoV4 bietet mit einer Mindeststreckgrenze von 900 N/mm^2 und hoher dynamischer Festigkeit ausreichende Sicherheit gegen Bruch durch die Zentrifugalkräfte. Daher ist für den normalen Betrieb auch kein Sicherheitsgehäuse vorgesehen. Problematisch kann die Kräftesituation allerdings im Crashfall werden, da sich das Schwungrad von der Welle lösen kann und die kinetische Energie unkontrollierbar freisetzt. Die Aufnahme des Schwungrades an die Getriebewelle ist in Abbildung 48 zu sehen.

7. Emissionsfreie Reichweite

Die emissionsfreie Fahrt kann durch die direkte Ankoppelung des Schwungrades an die VKM also nur durch rein elektrische Fahrt erfolgen. Mit 11 kW liegt die Leistung der E-Maschine für einen 2-Tonnen Transporter jedoch in einem Bereich, der die Eingliederung in den normalen Straßenverkehr beinahe unmöglich macht. Des Weiteren wären die Batterien nach einem kurzen Stadtzyklus bereits entleert und die VKM hätte kaum genügend Überschussleistung, um die Batterien danach wieder autark zu laden.

Selbst der deutlich leichtere *Toyota Prius* verfügt über 73 kW Leistung des Ottomotors und zusätzlichen 60 kW der E-Maschine. Die 1,2 kWh Energieinhalt der Batterie erlauben je nach Geschwindigkeit eine rein elektrische Fahrt von 2 bis 4 km. (57)

8. Kraftstoffverbrauch und Gesamtwirkungsgrad

Die Kraftstoffersparnis liegt laut den Entwicklern bei 20 bis 24% (abhängig vom jeweiligen Cityzyklus) gegenüber dem herkömmlichen Antriebsstrang (49). Allerdings handelt es sich hierbei um nutzlastbezogene Angaben. Dadurch wird das Mehrgewicht des Hybridantriebsstranges bereits berücksichtigt. Nachteilig auf die Bilanz wirkt sich der relativ niedrige Wirkungsgrad der Verbrennungskraftmaschine aus, die im realen Fahrzyklus nicht mehr nur im Bestpunkt arbeiten kann und daher nicht einmal 25% erreicht. Der Gesamtwirkungsgrad des Antriebes sinkt bei Fahrzyklen mit sehr hohem Dynamikfaktor unter 10%, woraus ein Kraftstoffverbrauch von 10 bis 16 l/100 km resultiert.

9. Beschleunigung

Die Auslegung des Antriebes erfolgte so, dass eine Beschleunigung von ca. 1 bis $1,5 \text{ m/s}^2$ möglich war. Das entspricht 0 – 50 km/h in 9 bis 14 Sekunden. Aus heutiger Sicht ist dieser Wert deutlich zu gering, da das aktuelle Pendant von VW, das Modell *T5* selbst mit der kleinsten

serienmäßigen Motorisierung (62 kW) 0 – 80 km/h in 12,7 Sekunden erreicht. Es drängt sich auch der Vergleich mit dem unter Punkt 7 bereits beschriebenen *Toyota Prius* auf, der eine Beschleunigung von 0 – 100 km/h in 10,3 Sekunden erreicht. (57)

10. Höchstgeschwindigkeit

Mit der im Schwungrad gespeicherten Energie kann das Fahrzeug auf etwa 70 km/h beschleunigt werden, danach muss die Leistung über die VKM und die E-Maschine bezogen werden. Bei längerer Konstantfahrt kann aufgrund der begrenzten Batteriekapazität nur mehr über die VKM angetrieben werden. Den Fahrzeugdaten ist $c_w * A = 1,75 \text{ m}^2$ und $f_R = 0,015$ zu entnehmen, woraus unter Annahme eines Antriebswirkungsgrades von $\eta_A = 0,8$ und einer maximalen Leistung der VKM von 17 kW eine ungefähre Höchstgeschwindigkeit errechnet werden kann. Für die Horizontalfahrt gilt:

$$\eta_A P_{\max_VKM} = v F_{Bed} = \left(mg (f_R) + \frac{1}{2} c_w A \rho_L v^2 \right) v$$

wodurch sich eine Geschwindigkeit von 19,9 m/s oder 71,6 km/h ergibt. Selbst wenn man die 11 kW der verfügbaren Dauerleistung des Elektromotors addiert, würde das Fahrzeug nur 24,7 m/s oder 88,8 km/h erreichen. Um 130 km/h erreichen zu können, wären für dieses Fahrzeug fast 74 kW Leistung von Nöten. Die verhältnismäßig großen Fahrwiderstände des Basisfahrzeuges fallen bei dieser Berechnung zum ersten Mal auf und können als Kriterium für die später folgende Nutzwertanalyse vorgemerkt werden.

11. Gesamtgewicht

Die Leermasse des Serienfahrzeuges beträgt 1475 kg. Für den umgebauten Zustand waren nur Angaben ohne Sitzbänke zu finden, diese aber belaufen sich auf 1722 kg. Das Fahrzeug wurde also durch die Komponenten des Hybridantriebs um 250 bis 350 kg schwerer.

12. Akustisches Verhalten

Durch das Konstanthalten der Drehzahl ergibt sich bei Stillstand des Fahrzeuges eine hohe Lärmbelastung, was besonders für den Einsatz im innerstädtischen Bereich nachteilig ist. Die Geschwindigkeit des Schwungrades mit 13400 U/min entspricht in etwa einer Anregung von 223 Hz für den Körperschall und erreicht daher noch nicht den sensibelsten Frequenzbereich des menschlichen Gehörs. Durch die Ablösung von Wirbeln einer turbulenten Grenzschicht können aber deutlich höhere Frequenzen entstehen.

Problematischer ist, dass die Leerlaufdrehzahl der VKM auch bei Fahrzeugstillstand auf 3000 U/min gehalten wird und daher das Verbrennungsgeräusch stark in den Vordergrund treten wird.

13. Lebensdauer und Wartung

Für die mechanischen Komponenten der Konstruktion kann im Wesentlichen Wartungsfreiheit angenommen werden, abgesehen vom herkömmlichen Öl- und Filterwechsel. Wesentlichen Einfluss hat die Lagerdimensionierung der Aufhängung des Schwungrades, für die aber keine Angaben vorliegen. Nachdem der etwas verschleißanfällige Wankelmotor auch durch einen Kolbenmotor ersetzt wurde, kann auch hier von üblichen Ölwechsel- und Serviceintervallen ausgegangen werden.

Die Gleichstrommaschine verlangt einen Austausch der Bürsten bei Erreichen eines bestimmten Verschleißes, der mit den vorliegenden Angaben auch nur schwer quantifiziert werden kann. Aus heutiger Sicht wäre ein bürstenloser Motor eine gute Alternative.

14. Einfluss der Regelung auf den Komfort

Hierbei fallen 2 Punkte ins Gewicht, welche beide in Verbindung mit dem Schaltgetriebe stehen. Erstens kann es vorkommen, dass die Drehzahl der E-Maschine von positiv auf negativ umschalten muss, was durch das starke Absinken des Moments in einem starken Ruck resultiert. Zweitens ist der Wirkungsgrad der Rekuperation stark von den manuellen Schaltpunkten abhängig, welche vom Fahrer gewählt werden müssen. Abbildung 55 stellt den Anteil der rückgewinnbaren kinetischen Energie in Abhängigkeit von der Bremsverzögerung für Fahrzeugdaten ähnlich jener des VW T2 Schwungradhybrides dar.

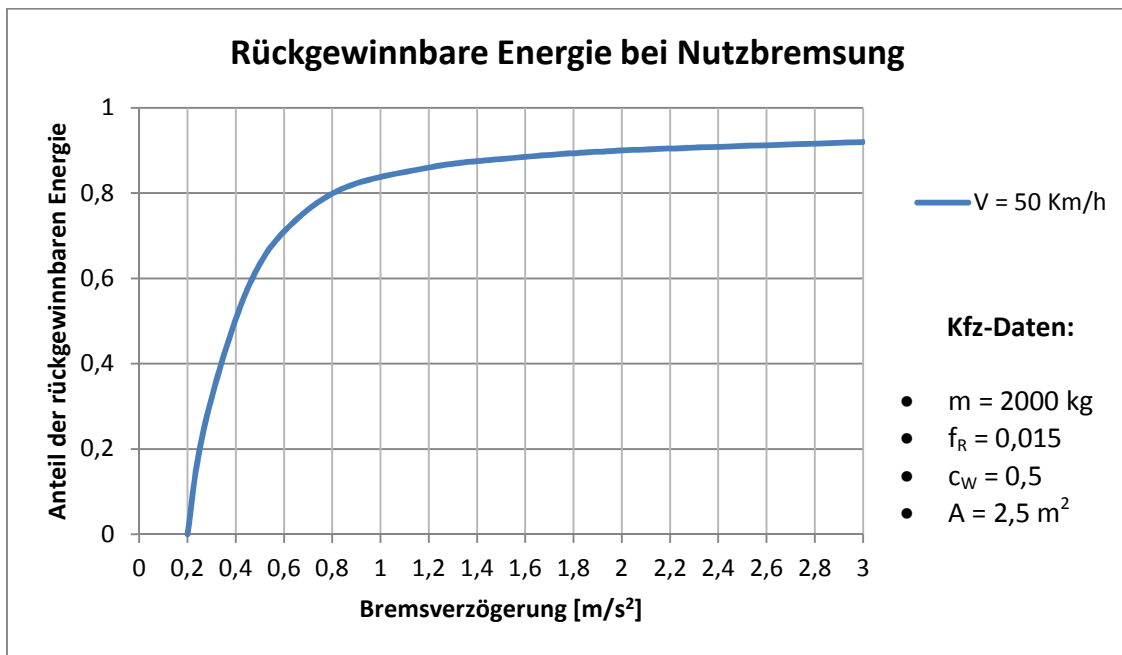


Abbildung 55: Rückgewinnbare kinetische Energie über Verzögerung basierend auf den Daten von (49)

Es geht hervor, dass ein sanftes Ausrollen des Fahrzeuges einen schlechten Einfluss auf die Rekuperation der Bremsenergie hat und idealer Weise ein Verzögerungsbereich von 0,6 bis 1,2 m/s^2 eingehalten werden sollte. Diese schwierige Aufgabe der Regelung ist dem normalen Kunden aber nicht zumutbar. Moderne, kennfeldbasierende Regelungselektronik kann hier Abhilfe schaffen.

15. Voraussichtlicher Gesamtpreis

Zwar liegen keine quantitativen Angaben vor, aber als Mehrkosten zum herkömmlichen Fahrzeug kommen im Wesentlichen das Schwungrad, das Planetengetriebe, die E-Maschine und der Batteriespeicher hinzu. Ersteres hat aufgrund der Einfachheit des Prinzips den geringsten Einfluss auf die Kosten. Die elektrischen Komponenten verursachen nach wie vor den Löwenanteil der Ausgaben. Man kann die Mehrkosten in etwa auf 30-40% des Fahrzeugpreises schätzen (Entwicklungsarbeit nicht mitgerechnet).

16. Design und Image

Optisch unterscheidet sich der VW Transporter nicht von einem serienmäßigen Gegenstück, daher muss davon ausgegangen werden, dass das Fahrzeug für den Kunden im Bezug auf Design und den Ruf des Herstellers lukrativ ist.

Die graphische Auswertung der oben diskutierten Punkte betreffend die erweiterte *Camelot-Methode* gestaltet sich wie folgt:

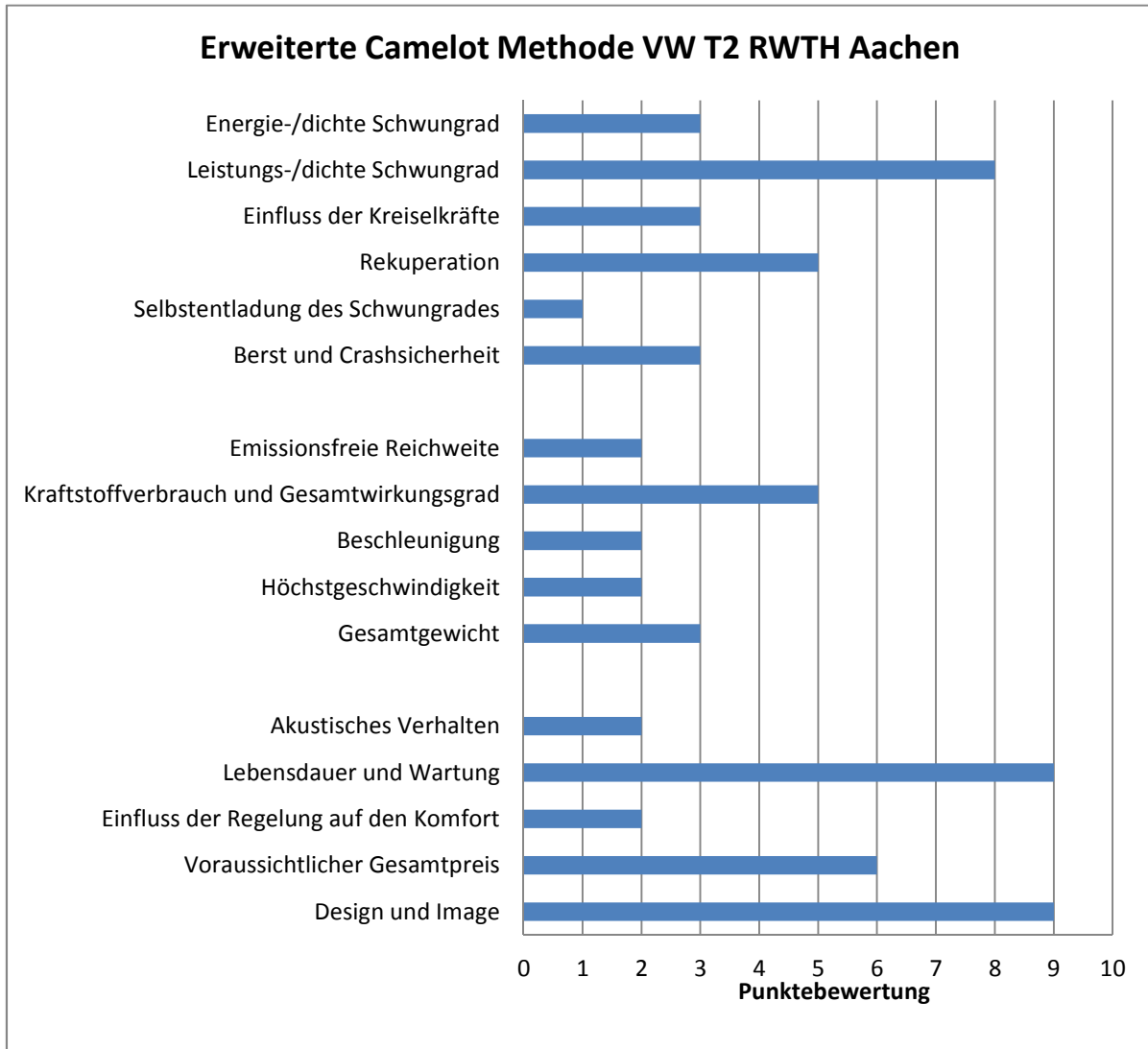


Abbildung 56: Erweiterte Camelot Methode VW T2 RWTH Aachen

Nach Mittelwertbildung der einzelnen gegebenen Teilnoten ergibt sich eine durchschnittliche Gesamtnote von 4,06 Punkten von 10. Man könnte zwar die Annahme treffen, dass der VW T2 Schwungradhybrid nur zu 40,6 % dem Ideal entspricht, aber dieses Ergebnis gewinnt erst an Aussagekraft, wenn es mit den Werten der *modifizierten Camelot Methode* der konkurrierenden Systeme verglichen wird. Eine absolute Aussage kann nicht gemacht werden und man muss sich vorerst mit der Erkenntnis begnügen, dass der VW T2 der RWTH Aachen keinesfalls perfekt ist, da er von den 10 erreichbaren Punkten weit entfernt ist. Wie gut sich das Konzept im Vergleich zu den konkurrierenden Fahrzeugen schlägt, kann den Kapiteln 10.4 und 11.4 entnommen werden.

9.5 Morphologische Matrix VW T2 RWTH Aachen

Durch die übersichtliche Darstellung der Teilkategorien, Parameter und ihrer Ausführungen (wie in Abschnitt 8.1.4 erwähnt) werden Alternativen und Verbesserungspotential ersichtlich. Da jedoch das Ziel nicht eine Neuentwicklung ist, stellt die morphologische Matrix in erster Linie eine Grundlage für die Nutzwertanalyse dar.

Die im Falle des VW T2 der RWTH Aachen gewählten Ausführungen sind gelb hinterlegt.

Basisfahrzeug						
Fahrzeugart	LKW	PKW	Transporter	Bus	Zug	Motorrad
Antriebsart	Front	Heck	Konv. Allrad	Hybridallrad	Andere	
Hybridtechnologie						
Hybridart	Seriell	Parallel	Mischhybrid	Kein Hybrid		
Hybridklasse	Micro	Mild	Full	Power	Kein Hybrid	
Primäre Leistungseinheit	Ottomotor	Dieselmotor	Wankelmotor	Elektromaschine	Turbine	Schwungrad
Primärer Speicher	Schwungrad	Batterie	Supercap	Fossiler Brennstoff	Erneuerbarer Träger	
Sekundäre Leistungseinheit	Verbrennungskraftmaschine	Schwungrad	Elektromaschine	Turbine	keine	
Sekundärer Speicher	Schwungrad	Batterie	Supercap	Fossiler Brennstoff	Erneuerbarer Träger	keiner
Energiemanagement						
Regelungsstrategie	Fahrer, voll manuell	Halbautomatisch	Kennfeldbasierend	Real-time / GPS gekoppelt	keine	
Rekuperation	Elektrisch	Mechanisch	Hydraulisch	Pneumatisch	keine	
Versorgung der Nebenaggregate	Elektrisch	Mechanisch	Hydraulisch	Pneumatisch	konventionell (Basisfzg.)	Gemischt
Schwungrad						
Schwungradform	Scheibe konst. Festigkeit	Scheibe konst. Dicke	dünner Ring	Walzenform	Speichenrad	
Schwungradmaterial	Metall	Kunststoff	Verbundwerkstoff	Organischer Werkstoff	Werkstoffkombination	
Lagerung	Wälzlager	Gleitlager	Magnetische Lagerung	Konv. mit magn. Unterstütz.	Supraleitened Magnete	
Energieübertragung	CVT Getriebe Schubglied	CVT Reibgetriebe	Stirnradgetriebe	Elektrisch	Hydraulisch	Pneumatisch
Aufhängung	Starr	biegeelastisch	Teil-Kardanisch	Vollkardanisch		
Kühlung	Wasserkühlung Stator	Konvektion	Strahlung	keine		
Gehäuseart	Berstschutz	Eingriffsschutz	Gasdichtes Gehäuse	keines		
Laufatmosphäre	Umgebung	Leichtes Gas	Schwaches Vakuum	Hochvakuum		

Tabelle 12: Morphologische Matrix des VW T2 der RWTH Aachen

In den Kategorien *Basisfahrzeug* und *Hybridtechnologie* sind auf den ersten Blick keine auffälligen Konfigurationen oder Ausführungen zu sehen. Dass die Regelungsstrategie vom Fahrer übernommen werden muss, ist sicherlich eine Schwachstelle, welche durch Alternativen wie eine kennfeldbasierende, elektronische Regelung eliminiert werden kann, wie bereits in der Auswertung der *modifizierten Camelot Methode* zu sehen war.

9.6 Nutzwertanalyse des VW T2 RWTH Aachen

Durch das Anwenden der *Nutzwertanalyse* auf die bereits erfolgte Funktionsanalyse durch die *morphologische Matrix* entsteht ein komplexes System aus einer Vielzahl von Tabellen. Durch die Vergabe von Einzel- und Gesamtgewichtungen wird sichergestellt, dass das Endergebnis nur zwischen 10 (= sehr gut) und 0 (= nicht genügend) schwanken kann.

Für die 4 Hauptkategorien: *Basisfahrzeug*, *Hybridtechnologie*, *Energiemanagement* und *Schwungrad* wurden jeweils Matrizen erstellt, die dem unten angeführten Beispiel folgen. Die Zeilenzahl korreliert jedoch mit der Anzahl der gelisteten Parameter der jeweiligen Kategorie.

Die gesamte *Nutzwertanalyse* ist aufgrund des großen Umfangs dem elektronischen Anhang zu entnehmen. Tabelle 13 gibt selbstverständlich nur einen kleinen Auszug der über 200 Zeilen langen *NWA* wieder.

Basisfahrzeug			
Fahrzeugart	Transporter	Parametergewichtung	0,05
	Gewichtung (%)	Punkte	Zwischenwert
Marktdurchdringung	0,1	7	0,7
Preis-Leistung	0,2	7	1,4
Eignung für Hybridisierung	0,3	8	2,4
Effizienz	0,3	4	1,2
Summe	1		5,7
Antriebsart			
	Heckantrieb	Parametergewichtung	0,05
	Gewichtung (%)	Punkte	Zwischenwert
Traktion	0,2	4	0,8
Mehrwert	0,3	0	0
Eignung für Schwungradintegration	0,3	8	2,4
Robustheit und Lebensdauer	0,2	10	2
Summe	1		5,2

Tabelle 13: Nutzwertanalyse des VW T2 der RWTH Aachen (Auszug)

Die Zwischenwerte für die einzelnen Parameter sowie deren gewichtetes Zwischenergebnisse und die Gesamtbewertung sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Kategorie	Parameter	Zwischenwert	Param.Gew.	Kateg.Gewichtung	Gewichteter Kategoriewert
Basisfahrzeug	Fahrzeugart	5,2	0,05	0,1	0,52
	Antriebsart	5,2	0,05		
Hybridtechnologie	Hybridart	6,1	0,05	0,35	2,12
	Hybridklasse	5,8	0,025		
	Prim. Leistungseinheit	6	0,075		
	Prim. Speicher	5,55	0,1		
	Sek. Leistungseinheit	7,9	0,05		
	Sek. Speicher	5,4	0,05		
Energiemanagement	Regelung	3,8	0,05	0,2	1,095
	Rekuperation	6,4	0,1		
	Nebenaggregate	5,3	0,05		
Schwungrad	Schwungradform	6,9	0,025	0,35	1,825
	Schwungradmaterial	4,1	0,025		
	Schwungradlagerung	6,6	0,025		
	Energieübertragung	6,7	0,1		
	Aufhängung	3,8	0,05		
	Kühlung	6,5	0,05		
	Gehäuseart	2	0,05		
	Atmosphäre	4	0,025		
Kontrollsumme			1	1	
Gesamtbewertung:					5,56

Tabelle 14: Ergebnis der Nutzwertanalyse des VW T2 der RWTH Aachen

Das vorliegende Konzept des Schwungradhybrides erreicht also 5,56 Punkte von 10. Damit ist klar, dass das System noch bei weitem nicht ausgereift ist, aber was dieses Ergebnis wirklich

ausragt, zeigt sich erst im Vergleich mit den anderen Konzepten, die in den folgenden Kapiteln nun analysiert werden. A priori können jedoch jene Parameter des Systems gefunden werden, welche als besondere Schwachstelle oder besondere Stärken des Systems anzusehen sind. Am besten eignet sich hier die Darstellung der Zwischenwerte in einem Spinnendiagramm, da die Abweichung vom Mittelwert als Anstieg oder Abfall der Diagrammlinie vom oder zum Zentrum gut erkennbar ist. Wie in Abbildung 57 zu sehen ist, betrifft nur ein einziger Schwachpunkt das Energiemanagement, nämlich die Regelung, welche vom Fahrer übernommen werden muss. Dies bringt nicht nur erhebliche Komforteinbußen mit sich, sondern verringert auch die Effizienz im Falle nicht korrekter Handhabung deutlich und könnte die Rekuperation sogar wirkungslos machen. Alle weiteren Schwachpunkte betreffen die Schwungradtechnik an sich. Das Nichtvorhandensein eines Gehäuses und die damit verbundene Tatsache, dass das Schwungrad keinen Berstschutz besitzt und nur unter erheblichen Strömungsverlusten in der Umgebungsatmosphäre laufen kann, wirken sich besonders stark aus. Auch die starre Aufhängung bietet ganz offensichtlich großes Verbesserungspotential bei diesem System.

Interessant ist, dass das Fehlen einer Kühlung des Schwungrades, welche in erster Linie bei Schwungrädern mit elektrischer Leistungsübertragung von Belang ist, hier einen eklatanten Punkteabfall mit sich bringt. Die vorliegende Konfiguration könnte durch das Einführen eines Kühlsystems nicht wesentlich verbessert werden, daher müsste das Bewertungsschema hier gegebenenfalls adaptiert werden, wodurch es allerdings seine Anwendbarkeit auf Systeme mit elektromechanischer Energieübertragung verlieren würde. Es zeigt sich, dass jede Analyse und jedes Ergebnis einer kritischen Interpretation bedarf und nicht vorbehaltlos hingenommen werden darf, sondern der Kontext ausnahmslos zu beachten ist.

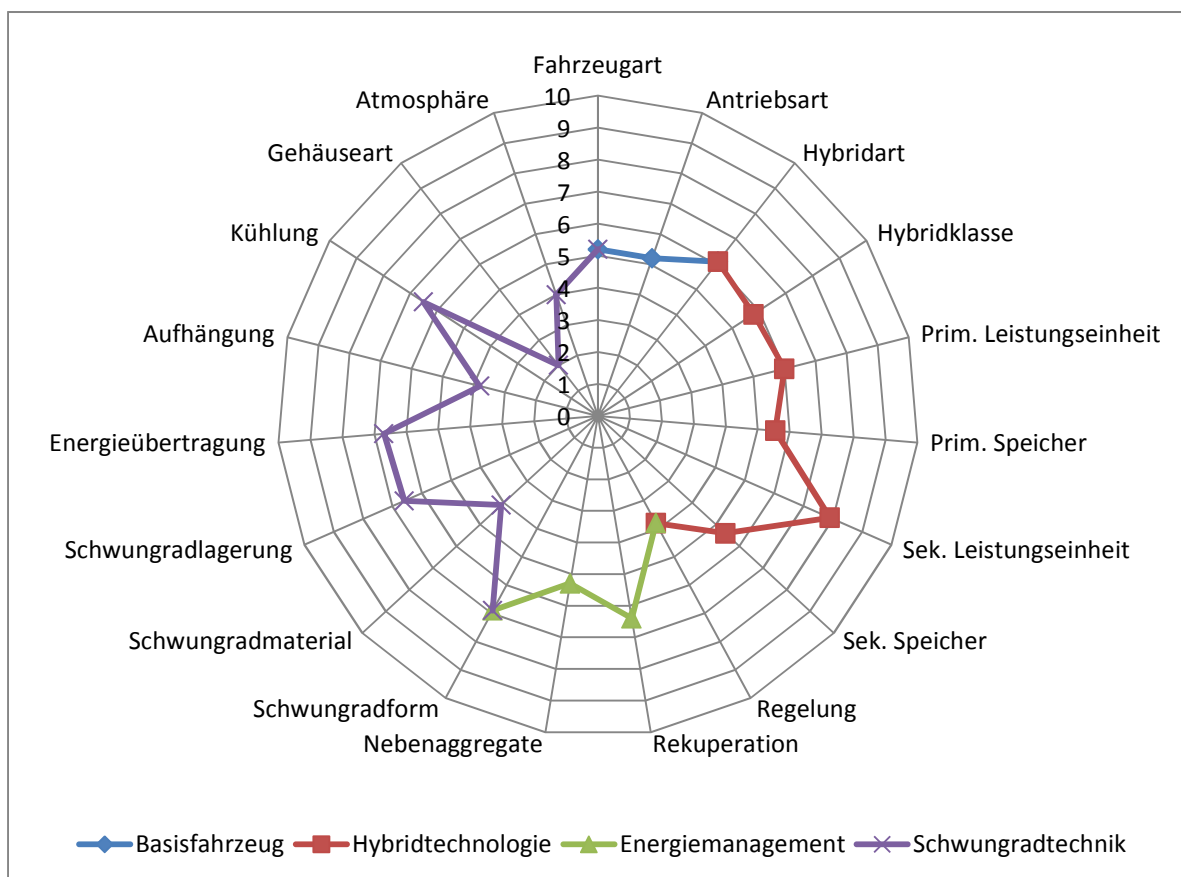


Abbildung 57: Graphische Darstellung der Ergebnisse der NWA des VW T2 der RWTH Aachen.

Besonders hohe Punkte erreicht die sekundäre Leistungseinheit, die Elektromaschine, deren Vorteile in dieser Arbeit bereits mehrfach diskutiert wurden. Ebenso erreicht die Energieübertragung, welche als Stirnradgetriebe ausgeführt ist, einen hohen Zwischenwert, was auf ihre Einfachheit und den sehr hohen Wirkungsgrad zurückzuführen ist. Hier fällt nicht ins Gewicht, dass dieses Konzept für höhere Drehzahlen ungeeignet ist und auch einen Einfluss auf die Regelbarkeit des Systems hat, da der Kraftfluss nur durch eine mechanische Kupplung unterbrochen werden könnte. Die drehzahlproportionale Koppelung des Schwungrades an die Kurbelwelle der VKM wurde schon in Abschnitt 9.2 als problematisch erkannt.

9.7 Conclusio VW T2 der RWTH Aachen

Es verwundert ein wenig, dass basierend auf den Ergebnissen dieses Forschungsfahrzeuges keine weiteren Projekte in diesem Segment durchgeführt wurden. Die durch die Parallelschaltung des Schwungrades zur Verbrennungskraftmaschine erreichten Verbrauchseinsparungen, sowie der erfolgreiche Einsatz des leistungsverzweigenden Planetengetriebes bestätigen diese Aussage erneut. Besonders regeltechnische Probleme könnten nach dem heutigen Stand der Technik leicht eliminiert werden. Die direkte Ankopplung des Schwungrades ohne Drehzahlwandler und Gehäuse ist zwar einfach in der Herstellung, bedarf aber dennoch einer gründlichen Überarbeitung um das akustische Verhalten sowie den Wirkungsgrad weiter zu verbessern.

9.7.1 SWOT-Analyse des VW T2 der RWTH Aachen

SWOT-Analyse		Interne Analyse	
		Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)
E x t e r n e	Möglichkeiten (Opportunities)	<ul style="list-style-type: none"> • Einfacher Aufbau des Antriebsstranges • Geringe Adaption des Serienfahrzeuges • Beinahe Wartungsfreiheit des Schwungrades • Deutlich gesteigerter Wirkungsgrad gegenüber Serienfahrzeug 	<ul style="list-style-type: none"> • Manuelle Systemregelung / Rekuperation • Lüfterverluste durch fehlendes Vakuum / Gehäuse • Schwerer Batteriespeicher • Limitierte emissionsfreie Reichweite • Mäßiges akustisches Verhalten • Geringe Fahrleistung
	Gefahren (Threats)	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherheitsrisiko durch Fehlen des Gehäuses • Nichtannahme der Kunden wegen Akustik / Komfort • Keine Erfahrungswerte bezüglich Lebensdauer²³ 	<ul style="list-style-type: none"> • Gutes Konzept für einfachen Markteinstieg • Image und Bekanntheitsgrad der Marke VW • Vorreiterrolle im Bereich der Schwungradhybride (1976)
A n a l y s e			

Abbildung 58: SWOT-Analyse des VW T2 der RWTH Aachen

²³ Die einzelnen Komponenten wurden unabhängig von diesem Fahrzeug bereits durchgehend getestet.

10. Volvo S40 der EUT Eindhoven, 1997

10.1 Kurzbeschreibung des Systems

Das hier besprochene Versuchsfahrzeug wurde von 1997 bis 1999 an der *Technischen Universität Eindhoven* (EUT) in Kooperation mit *Van Doorne's Transmissie* entwickelt. Das Basisfahrzeug, eine Mittelklasselimousine des Typs *Volvo S40* wurde mit einem kontinuierlich variablen Getriebe (*CVT-Getriebe*) und einem Schwungradspeicher ausgestattet. Das Schwungrad hat die Aufgabe eines Kurzzeit-Energiepuffers (*SPU*) in welchem einerseits Bremsenergie rekuperiert andererseits auch ein temporärer Energieüberschuss der Verbrennungskraftmaschine gespeichert werden kann. Die dadurch gewonnene Energie kann in weiterer Folge wieder dem Antriebsstrang zugeführt werden und erlaubt somit den intermittierenden Betrieb des Otto-Motors.



Abbildung 59: Außenansicht des Versuchsfahrzeuges *Volvo S40* der EUT, Eindhoven (58)

Das System weist nicht nur die offensichtlichen Vorteile des Betriebs der VKM im *On-Off-Modus* auf, sondern zeigt auch die damit verbundenen Probleme auf, nämlich die Energieversorgung der Nebenaggregate. Bei der Entwicklung des Fahrzeuges wurde das Hauptaugenmerk auf die Verbrauchsoptimierung gelegt, der Reduktion der Emissionen wurde nur geringere Bedeutung beigemessen. Es sei vorweggenommen, dass gerade eine VKM im intermittierenden Betrieb durch die mögliche Kaltstartproblematik schlechtere Emissionswerte als im Dauerbetrieb aufweisen kann.

Daten Gesamtfahrzeug	
Entwickler / Hersteller	EUT, Eindhoven
Fahrzeugtyp	Volvo S40
Baujahr	1996
Fahrzeugart	Leistungsverzweigter Hybrid
Gesamtmasse	-
Masse Serienfahrzeug	1330 kg
Daten Schwungrad	
Energieinhalt	0,12 kWh
Drehzahl max.	17000 U/min
Drehzahl min	8000 U/min
Werkstoff	Glasfaser-Epoxy-Verbund
Maximale Leistung	-
Gewicht d. Schwungrads	-
Durchmesser	-
Form	Zylinder
Trägheitsmoment	0,35 kgm ² (berechnet)
Energieübertragung	CVT-Getriebe (Schubgliederband)
Aufhängung	Starr
Masse der Einheit	-
Daten Verbrennungskraftmaschine	
Typ	Renault E7J
Arbeitsprinzip	4-Zylinder, Viertakt-OTTO
Leistung	46 KW bei 5750 U/min
Einspritzung	Single Point Injection

Tabelle 15: Technische Daten des Schwungradhybrides Volvo S40 der EUT [(58) , (59), (60)]

10.2 Abstraktion des Volvo S40 der EUT Eindhoven

Basierend auf den Informationen aus der Literatur [(58), (59), (60), (61), (62)] und den dadurch verfügbaren Fotos, Getriebeschnittbildern, Beschreibungen und Skizzen kann die Ausführung auf die wesentlichen Funktionen zurückgeführt werden.

Kern der Konstruktion ist das *CVT-Getriebe* mit dem *Van Doorne Schubgliederband*, welches in einem *i²-Modus*²⁴ betrieben wird. Um Verschiedene Fahrprogramme zu ermöglichen (High-, Low-, Flywheel-Lademodus und herkömmlicher CVT Betrieb), sind 4 Kupplungen vorgesehen,

²⁴ Ein „i²-Getriebe“ verfügt über 2 Leistungspfade, welche durch Kupplungen gewählt werden. Die Gesamtübersetzung i ergibt sich aus der Multiplikation des Übersetzungsverhältnisses der Variatorscheiben i_k und der Übersetzung der zwei sich im Leistungsfluss befindlichen Getriebestufen i_g . (61)

wodurch das Schwungrad auch vom Antriebsstrang entkoppelt werden kann, anders als bei dem in Abschnitt 9 diskutierten Konzept, welches das Schwungrad direkt mit der VKM koppelt. Im *Low Speed Modus* wird das Schwungrad mit der Primärseite des CVT-Getriebes verbunden, während die VKM wahlweise dazu geschaltet oder getrennt werden kann und somit ein intermittierender Betrieb ermöglicht wird. In diesem Fall herrscht ein fixes Übersetzungsverhältnis zwischen Schwungrad und VKM, welche bei nahezu konstantem Drehmoment und konstanter Drehzahl in der Region des optimalen Verbrauchs betrieben wird.

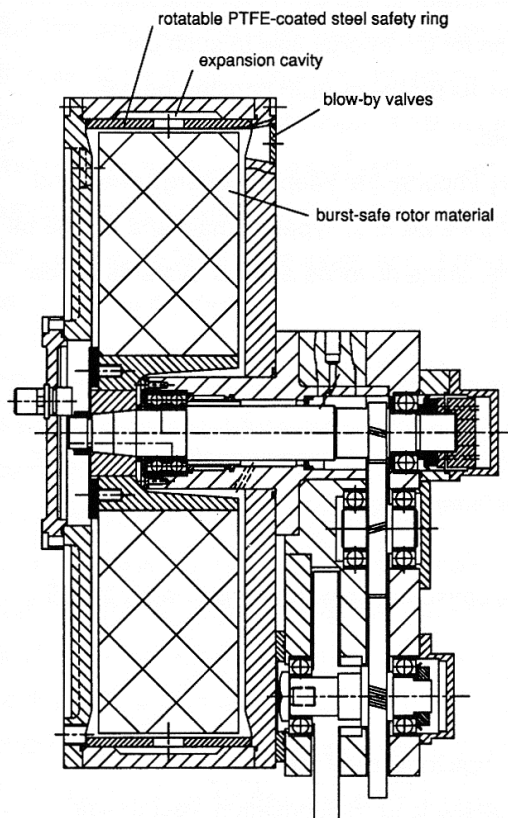


Abbildung 60: Querschnitt der Schwungradeinheit des Volvo S40 der EUT mit mechanischer Anbindung (58)

Im *High Speed Modus* wird das Flywheel direkt mit der Sekundärseite des CVT-Getriebes verbunden und läuft parallel zum Otto-Motor.

Um die Strömungsverluste des Schwungrades gering zu halten, wurde es in ein evakuiertes Gehäuse eingebaut, welches gleichzeitig als Berstschutz fungiert. Wie Abbildung 60 und Abbildung 61 zu entnehmen ist, erfolgt die Anbindung rein mechanisch über ein vorgelagertes Stirnradgetriebe, welches den Leistungsfluss über eine Kupplung zur sekundärwelle des CVT Getriebes leitet.

Für den Betrieb der Nebenaggregate wurde eine Art „Zapfwelle“ vorgesehen, welche als *Power Take-Off (PTO)* bezeichnet wird und unter eben dieser Bezeichnung in Abbildung 61 eingezeichnet ist. Das *PTO* kann entweder direkt von der VKM gespeist werden oder über einen Freilauf von Seite des Schwungrades, abhängig davon, wo die höhere Drehzahl anliegt.

Ein wichtiges Subsystem stellt die Ölversorgung der Aktuatoren des CVT-Getriebes und der Kupplungen dar, welches aufgrund der relativ hohen erforderlichen Drücke und Durchflussmengen unbedingt in die nun folgende Verlustanalyse inkludiert werden muss.

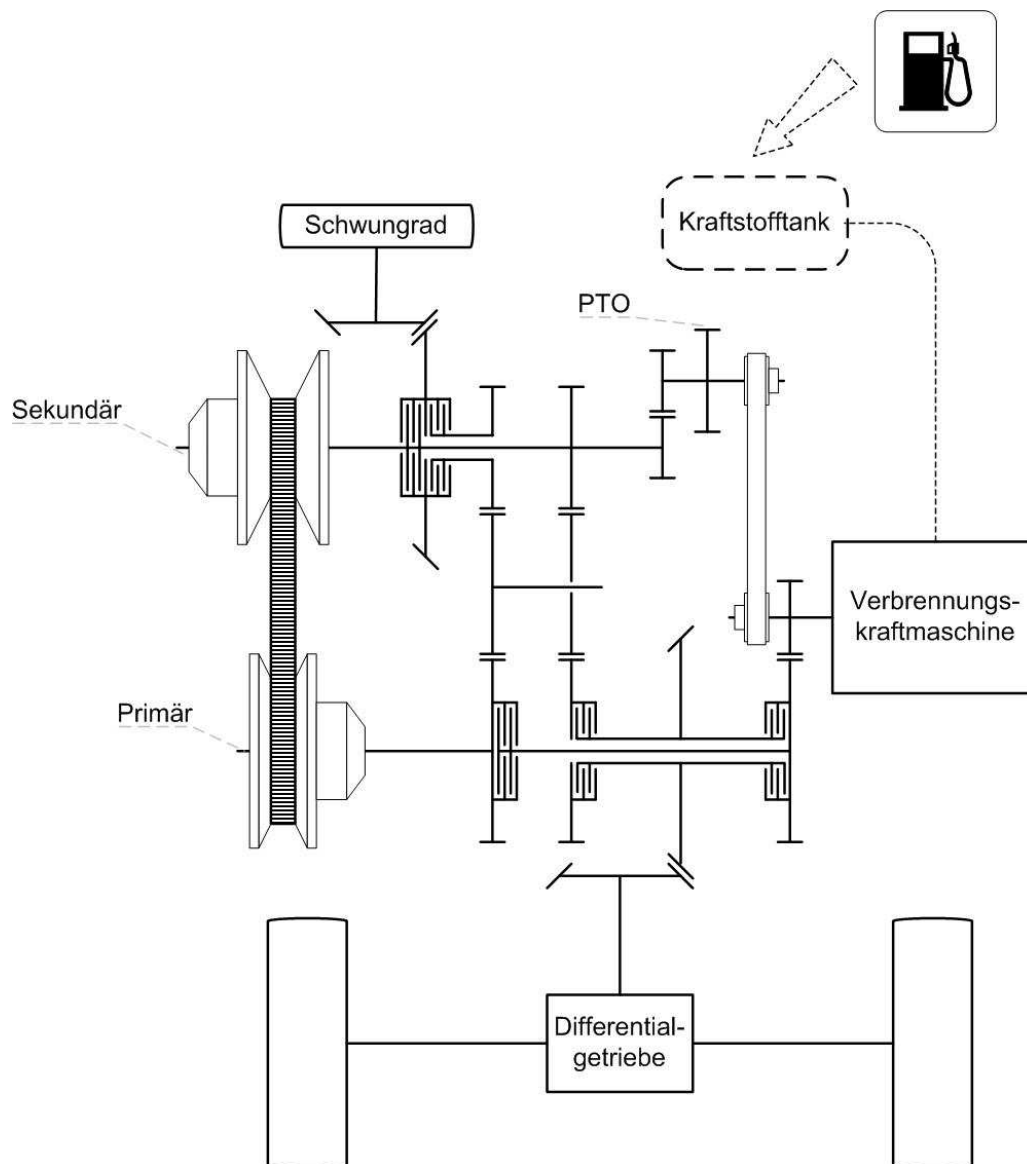


Abbildung 61: Prinzipskizze des Volvo S40 der EUT

10.3 Verlustanalyse des Volvo S40 der EUT Eindhoven

Um den Energiefluss des vorliegenden Systems und die dabei auftretenden Verluste genau analysieren zu können, müssten korrekter Weise 6 unabhängige Verlustanalysen durchgeführt werden und zwar jeweils eine für jeden Betriebsmodus (58):

- Schwungrad-Auflademodus
- Low Speed Hybrid Modus (Motor aus)
- Low Speed Hybrid Modus (Motor ein)
- High Speed Hybrid-Modus
- High Speed VKM-Modus
- Konventioneller CVT Modus

Aus Gründen der besseren Übersicht und Kompaktheit werden zwar alle Elemente, welche zum Verlustmoment beitragen, besprochen, aber nicht in Kontext mit den einzelnen Betriebsmodi gesetzt.

Wie der Abstraktion in Abbildung 61 eindeutig und übersichtlich zu entnehmen ist, liegt nur *eine* (primäre) Leistungs- und Energiequelle vor. Ausgehend von dieser verfolgt die Leistung, je

nachdem welche Kupplungen geschlossen werden, unterschiedliche Pfade. Unabhängig vom Pfad treten in dieser Konfiguration folgende Verluste auf:

- | | |
|---|--|
| 1. Umsetzungsverluste in der VKM | 4. Reibverluste im Riementrieb des PTO |
| 2. Getriebeverluste in den Stirnradstufen | 5. Reibungsverluste des CVT-Getriebes |
| 3. Reibverluste in den Kupplungen (bei Schlupf) | 6. Strömungsverluste des Schwungrades |
| | 7. Reibverluste der Vakuumdurchführung |

Der Einfluss der Nebenaggregate geht aus Abbildung 61 nicht hervor, ist aber dennoch bei der Verlustanalyse nicht zu vernachlässigen. Folgende Verluste haben Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad des Systems:

- | | |
|---|--|
| 8. Verluste des Hochdruck-Ölkreislaufs | 11. Verluste der elektrischen Servopumpe |
| 9. Verluste des Niederdruck-Ölkreislaufs | 12. Verluste des Generators |
| 10. Verluste der elektrischen Vakuumpumpe | |

Die einzelnen Punkte sollen nun vertieft analysiert werden, um ein detailliertes, holistisches Bild des Schwungradhybrides der Technischen Universität Eindhoven zu generieren.

10.3.1 Umsetzungsverluste in der VKM

Das Antriebsaggregat ist ein Ottomotor der Firma *Renault*, Typ *E7J*. Es handelt sich um einen vielfach eingesetzten und weitverbreiteten 4-Zylinder-Reihenmotor mit Saugrohreinjection, der unter anderem auch im Erfolgsmodell *Renault Clio* in einer Großserie zum Einsatz kam.

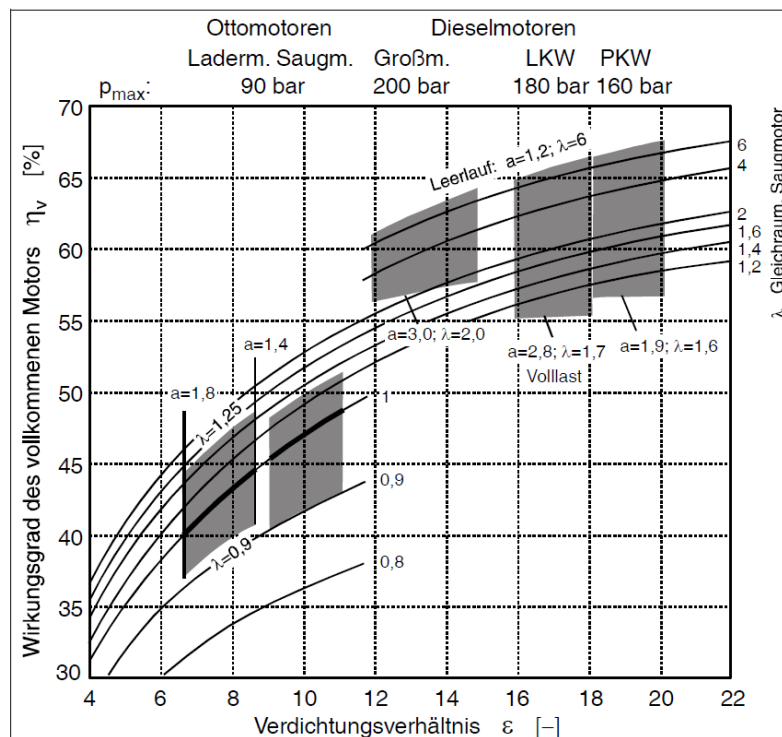


Abbildung 62: Wirkungsgrade des vollkommenen Motors; kombinierte Gleichraum-Gleichdruck-Verbrennung in Abhängigkeit von Verdichtungsverhältnis ϵ , Luftverhältnis λ , Aufladegrad a und Spitzendruck p_{max} (63)

Zwar wurden die in den 1990ern noch sehr populären Ottomotoren vielfach durch Diesel- oder Turbodieselmotoren mit einem etwas höheren Wirkungsgrad abgelöst, aber rein prinzipbedingt kann der Wirkungsgrad der idealen, *vollkommenen VKM* ungefähr 67% nicht überschreiten, wie die folgende Abbildung bestätigt.

Im transienten Betrieb ist der spezifische Verbrauch des *E7J* jedoch deutlich höher als im stationär / intermittierenden, wie auch aus dem Muscheldiagramm des vorliegenden Motortyps hervorgeht.

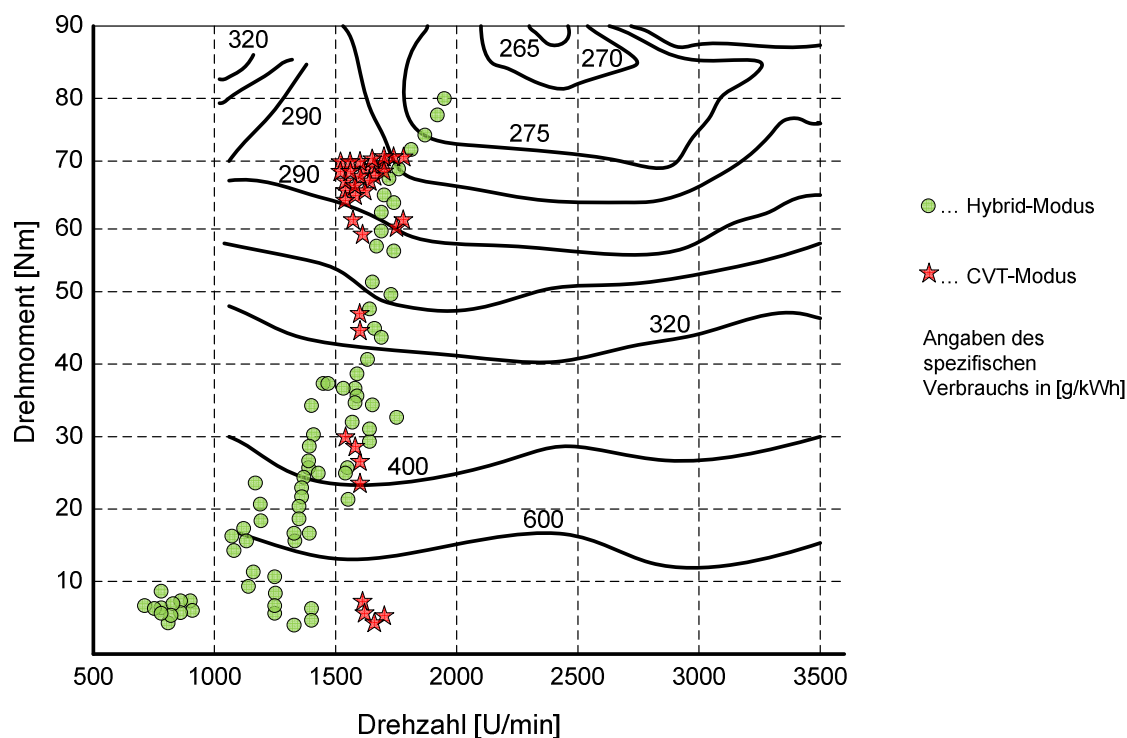


Abbildung 63: Muscheldiagramm des Ottomotors *E7J* mit Betriebspunkten im CVT und Hybridmodus, erstellt aus den Literaturangaben in (58)

10.3.2 Getriebeverluste in den Stirnradstufen

Das durch die Reibung der einzelnen Stirnradstufen eingebrachte Verlustmoment variiert je nach Betriebsmodus. Im reinen, konventionellen CVT-Modus entfallen beispielsweise die Verluste der vorgelagerten Stirnradstufe des Schwungrades. Grundsätzlich sinkt der Wirkungsgrad einer Stirnradstufe bei sinkender Last (vergleiche Abbildung 64) durch das annähernd konstante Verlustmoment und erreicht sein Maximum bei Volllast, was ein weiteres Argument für den *On-Off-Betrieb* der VKM ist.

Demnach lässt sich schlussfolgern, dass der mechanische Wirkungsgrad des Systems keinesfalls eine Konstante ist, sondern je nach Betriebszustand einen Wert zwischen 0 und seinem Maximum annehmen kann. Um eine exakte, quantitative Aussage über die Effizienz machen zu können, wäre es erforderlich, eine Berechnung der *Verlustmomente* durchzuführen.

Nachdem in dieser Arbeit jedoch Fahrzeuge mit elektrischer und Fahrzeuge mit mechanischer Energieübertragung verglichen werden sollen, wird öfters der bestmögliche Gesamtwirkungsgrad als einfache Vergleichsziffer herangezogen.

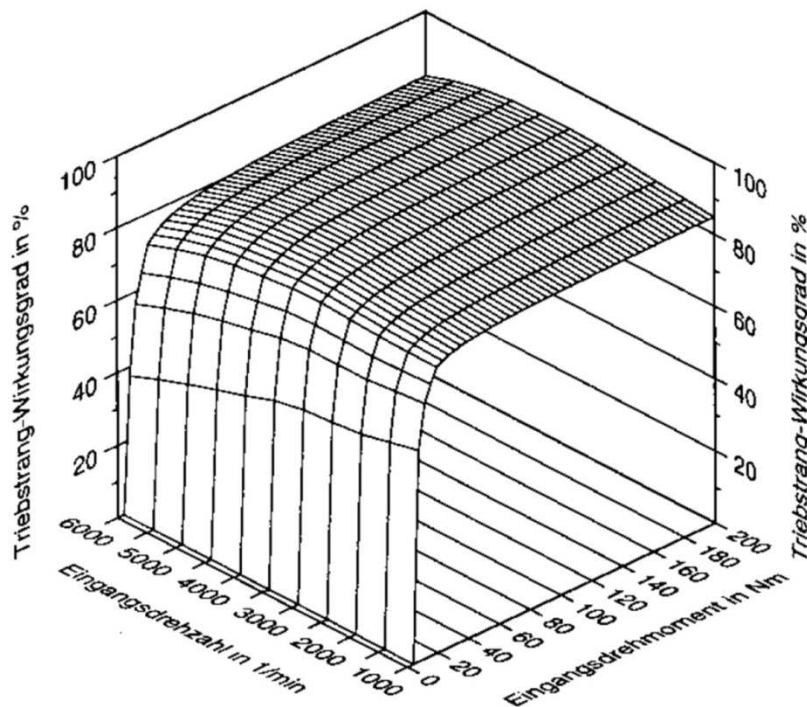


Abbildung 64: Getriebewirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl und der Last am Beispiel eines PKW-Handschaltgetriebes; 4. Gang im Eingriff (61)

10.3.3 Reibungsverluste in den Kupplungen

Diese treten nur während des Anfahrvorgans aus dem Stillstand auf, oder wenn der Betriebsmodus gewechselt wird. Es ist also ein temporäres Phänomen, welches im normalen Fahrbetrieb einen zeitlich nur untergeordneten Anteil aufweist und wird daher nicht näher besprochen.

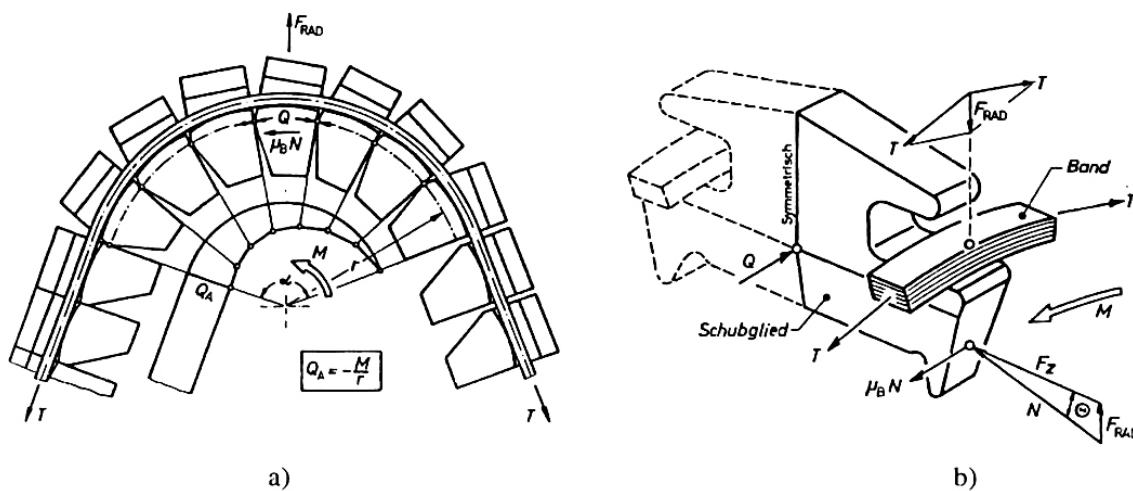
10.3.4 Reibverluste im Zahnriementrieb des PTO

Der Riementrieb ist die etablierte Standardlösung für den Antrieb von Nebenaggregaten einer Verbrennungskraftmaschine, wobei für geringe Leistungen meist ein Keilriemen zum Einsatz kommt. Der Zahnriemen, welcher auch in diesem Fall zum Einsatz kam, hat seine Vorzüge in der übersetzungsgetreuen, synchronen Kraftübertragung und in der geringen erforderlichen Vorspannung, wodurch die Lager deutlich weniger belastet werden und auch ein hoher Wirkungsgrad entsteht. Des Weiteren lassen sich über den Zahnriemen höhere Leistungen übertragen als mit einem Keilriemen, was in diesem Fall durch die erforderliche starke Hydraulikpumpe auch notwendig ist.

10.3.5 Reibungsverluste des CVT-Getriebes

Die Reibverluste dieses Umschlingungsgetriebes treten unweigerlich an Stellen der Relativbewegung zwischen Schubgliedern, dem Endlosstahlband im Kern und den Variatorscheiben auf. (61) Aufgrund der Kräftesituation, die auch in Abbildung 65 dargestellt ist, sind hohe Anpresskräfte erforderlich, um ein entsprechendes Moment zu übertragen. Dadurch ergeben sich zwei für den Wirkungsgrad wesentliche Aussagen:

1. Der Hauptteil der Reibungsverluste kommt von den Klemmstellen der einzelnen Glieder an den Kegelscheiben.
2. Es ist absolut essentiell, ein Überpressen der Variatorscheiben zu vermeiden. Um einen hohen Teillastwirkungsgrad zu erreichen, muss der Anpressdruck der Variatorkegel gerade so groß sein, dass eine sichere Kraftübertragung möglich ist.

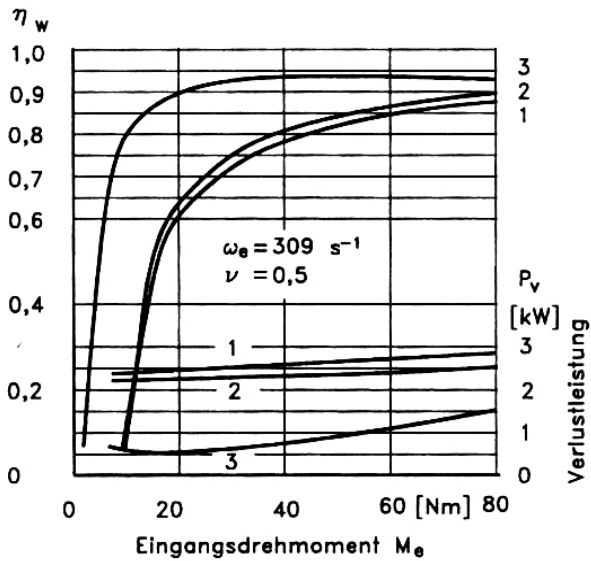


Teilbild a): Seitenansicht: M ...Drehmoment; r ...Radius der gegenseitigen Berührungspunkte der Klemmstücke; F_{rad} ...Radialkräfte; $Q = \mu_B N$...Kräfte, die von den Kegelscheiben auf die Klemmstücke und dann von diesen aufeinander übertragen werden; T ...Zugkräfte im Stahlband; Q_A , Differenz der Zugkräfte T ; α ...Klemmbereich während des Durchlaufs durch die Kegelscheibe.

Teilbild b): Kräfte die am Klemmstück wirken: F_Z ...Anpresskraft; N ...Normalkraft; μ_B ...Reibkoeffizient zwischen Klemmstück und Scheibe; Θ ...halber Keilwinkel

Abbildung 65: Kräftesituation beim Van Doorne Schubgliederband (62)

Da bei zu geringer Bandspannung des Schubgliederbandes die Gefahr des Ausknickens besteht, kann der Anpressdruck nicht beliebig weit abgesenkt werden. Die Zugkette hingegen erlaubt geringere Anpressdrücke und könnte daher eine wirkungsgradoptimierte Alternative darstellen. (62) Siehe Abbildung 66. Rutschgefahr bei zu geringem Druck besteht jedoch in jedem Fall.



M_e ... Eingangsmoment
 ω_e ... Winkelgeschwindigkeit (= 309s^{-1})
 ν ... Drehzahlverhältnis (= 0,5)

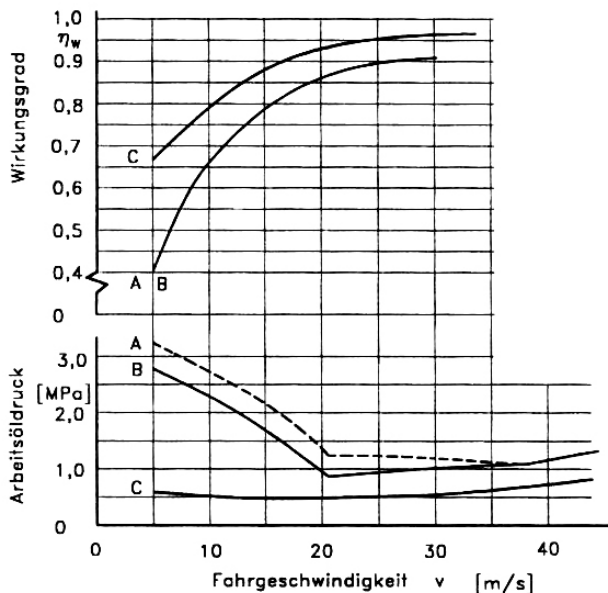
1... Schubgliederband ohne Anpassung des Anpressdrucks an das Drehmoment

2... Zugkette ohne Anpassung des Anpressdrucks

3... Zugkette mit Anpassung des Anpressdrucks

Abbildung 66: Wirkungsgrad und Verlustleistung der Kettentypen nach Dietrich (62)

Unabhängig von der Kettenbauart bietet jedoch die Regelung ein weiteres, großes Optimierungspotential. Es ist daher sinnvoll, eine rein hydraulische Regelung durch einen optimierten, elektronischen Regelungsalgorithmus zu ersetzen. Dadurch kann der Anpressdruck exakt an das erforderliche Moment angepasst werden und erlaubt eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrades selbst bei gleichem Kettentyp. (Vergleiche Abbildung 67.) Durch eine verbesserte Regelung können aber nicht nur die Reibverluste reduziert, sondern es kann auch die Verlustleistung der Ölpumpe verringert werden, wie in Abschnitt 10.3.9 besprochen.



A... Arbeitsöldruck bei Volllast

B... Arbeitsöldruck bei Straßenlast, - mechanisch angepasst

C... Arbeitsöldruck bei Straßenlast, - elektronisch geregelt

Abbildung 67: Verbesserung des Wirkungsgrades von Schubgliederbändern durch Anpassung des Arbeitsdrucks nach Van Doorne (62)

10.3.6 Strömungsverluste des Schwungrades

Obwohl Schwungräder für die kinetische Energiespeicherung meist bei sehr geringen Umgebungsdrücken laufen, erreichen die *Reynoldszahlen* ($Re = \frac{\omega r^2}{\nu}$) aufgrund der extrem hohen Umfangsgeschwindigkeiten ernstzunehmende Werte. Die Verlustleistung eines Schwungrades wurde unter anderem von *Burg* (28) analysiert und er kommt zu folgenden Ergebnissen:

$$P_W = M_W \omega = C_W \pi \rho \omega^3 r^5 \left(1 + \frac{h}{r}\right)$$

mit

$$C_W = \frac{M_W}{\pi r \omega^2 r^5 \left(1 + \frac{h}{r}\right)}$$

Die Widerstände kommen durch die turbulente Grenzschicht zustande. An den Deckflächen eines zylindrischen Rotors entstehen radiale Strömungen, zwischen der Mantelfläche und dem (zylindrischen) Gehäuse bilden sich instabile Wirbel, so genannte *Taylor-Wirbel*, wie in *Abbildung 68* zu sehen ist.

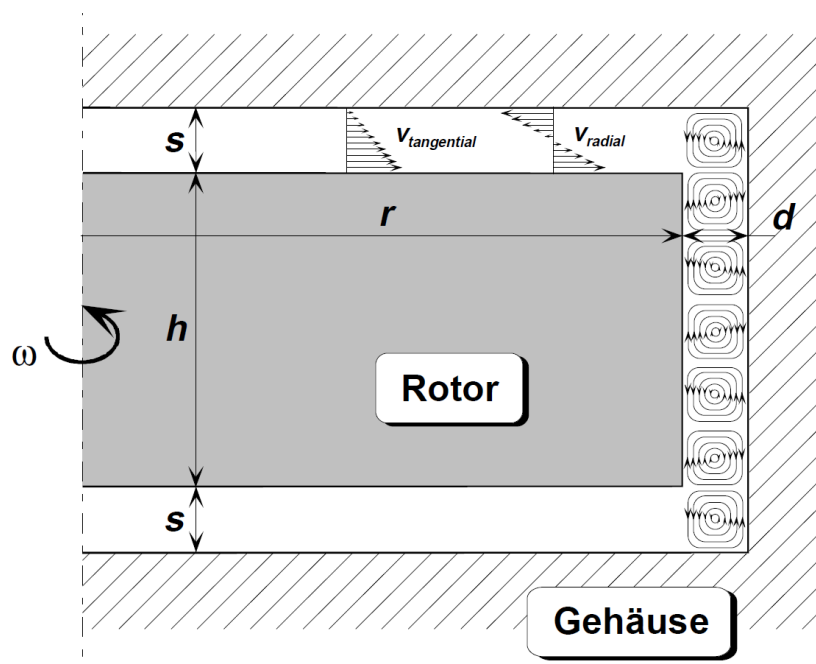


Abbildung 68: Strömungssituation bei einem schnell drehenden Schwungrad (28)

Das Schwungrad des *Volvo S40*, welches sich in einem Drehzahlband von 8000 bis 17000 U/min bewegt, ist in einem Vakuengehäuse untergebracht. Je geringer der Umgebungsdruck gehalten wird, desto geringer sind auch die Strömungsverluste, aber dem entgegen muss auch eine immer größere Pumpleistung aufgebracht werden, um das Hochvakuum aufrecht zu erhalten. Der Sachverhalt wurde von *Kok* und *Van der Graaf* (64) genau evaluiert und ein Druck von etwa 4-5 mbar gewählt.

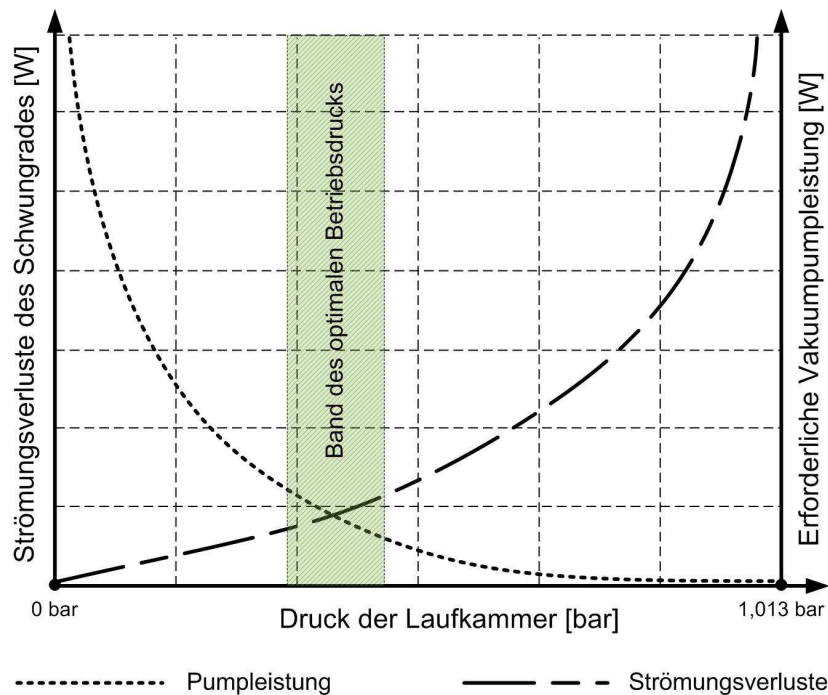


Abbildung 69: Qualitativer Verlauf des Strömungsverlusts und der Pumpleistung über den Druck

Der Schnittpunkt der beiden Kurven in Abbildung 69 ergibt den idealen Betriebsdruck, ist jedoch abhängig von:

- Pumpenwirkungsgrad
- Verhalten des Schmiermittels
- Güte der Vakuumdurchführung
- Genereller Leckage

10.3.7 Reibverluste der Vakuumdurchführung

Ferrofluide haben wesentlich zur Weiterentwicklung und Verbesserung von Durchführungen drehender Teile vom Vakuum in die Atmosphäre beigetragen. (Siehe auch Kapitel 7.1.3) Das primäre Ziel liegt allerdings im Erreichen guter Dichtheit bei hoher Vakuummüte, also großer Druckdifferenz. Das Erreichen eines geringen Losbrech- oder Reibverlustmoments ist bei den meisten Anwendungen von sekundärer Bedeutung. In den technischen Datenblättern der Firma *Ferro Tec*, einem der führenden Hersteller von Ferrofluiddichtungen und Vakuumdurchführungen, findet man für Schaftdicken von 20 bis 30 mm typischerweise Angaben, wie sie in Tabelle 16 dargestellt sind.

Bei größeren Durchmessern steigt das Reibmoment unverhältnismäßig stark an und erreicht beispielsweise bis zu 500 Nmm bei 1000 U/min und einem Durchmesser von 40 mm. Bei steigendem Wellendurchmesser und konstanter Drehzahl nimmt auch die Umfangsgeschwindigkeit zu, wodurch sich die Reynoldszahl der Strömung ändert, analog zu dem in Abbildung 68 geschilderten Fall. Daraus und aus der Tatsache, dass die Bauart der Ferrofluiddichtung vom Durchmesser abhängt, resultiert ein nichtlinearer Anstieg des Reibmoments. Man erkennt schon aus den Werten in Tabelle 16, dass der Einsatz von Ferrofluiddichtungen bei Schwungradhybriden nicht ganz unproblematisch ist. Die beim *Volvo S40* auftretenden Drehzahlen von 17000 U/min übersteigen nicht nur die höchste zulässige Drehzahl der *Ferro Tec* Lösungen, sondern würden selbst im günstigsten Fall Verlustleistungen

von 5 bis 10 kW ergeben, abhängig von der Nichtlinearität des Anstiegs des Verlustmoments mit der Drehzahl. Es muss daher versucht werden, den Durchmesser der Schwungradwelle so gering wie möglich zu halten. Eine weitere Möglichkeit wäre, ein Übersetzungsgetriebe in das Vakuumgehäuse zu inkludieren, was allerdings problematisch für die Schmiersituation der Zahnräder und deren Lager wäre, da nur spezielle, teure Schmierstoffe für den Einsatz bei solch geringen Drücken geeignet sind. Die Lagerlebensdauer würde dadurch dramatisch verkürzt.

Schaftdurchmesser	20 mm	30 mm
Losbrechmoment:	~ 30 Nmm	~ 130 Nmm
Reibmoment bei 100 U/min:	~ 20 Nmm	~ 80 Nmm
Reibmoment bei 1000 U/min:	~ 35 Nmm	~ 120 Nmm
Maximale Drehzahl:	~ 9000 U/min	~ 8300 U/min
Vakuumdruck:	1,33 * 10 ⁻⁷ bar	
Betriebstemperatur:	-6 bis +80 °C	

Tabelle 16: Typische Eckdaten von Ferrofluidichtungen der Firma *Ferro Tec* (65)

In der vorliegenden Konstruktion wurde aufgrund der oben genannten Problematik ein gekühlter und geschmierter Wellendichtring eingesetzt, über den allerdings keine Angaben vorliegen. Es ist daher nicht möglich, das Verlustmoment exakt zu quantifizieren. Grundsätzlich muss jedoch beachtet werden, dass der Dichtring genauso wie das nachgeschaltete Stirnradgetriebe über das Niederdruckölsystem versorgt wird und daher korrekter Weise ein Teil der Pumpverluste mit einbezogen werden muss.

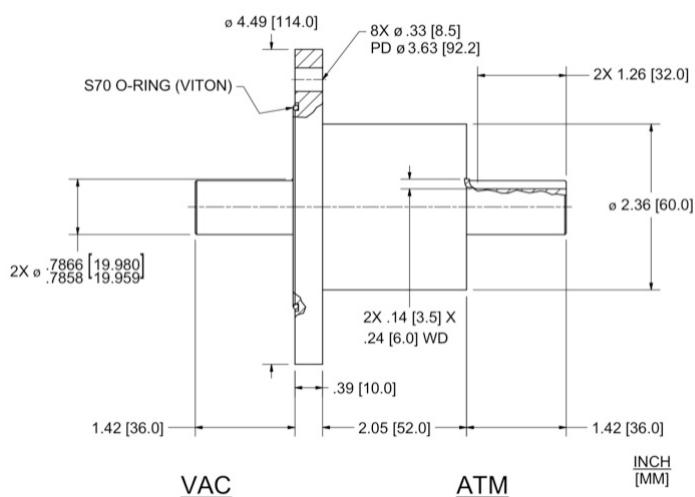


Abbildung 70: Beispiel einer Ferrofluid-Vakuumdurchführung mit 20mm-Schaft der Fa. *Ferro Tec* (65)

10.3.8 Verluste des Niederdruck-Ölkreislaufs

Da das Gesamtfahrzeug Öldruckniveaus von 3, 20 und 60 bar erforderlich macht, wurde der Ölkreislauf in einen Hoch- und einen Niederdruckbereich unterteilt und aus Gründen der

Wirtschaftlichkeit von 2 verschiedenen Pumpen angetrieben. Der Niederdruckbereich ist lediglich für die Schmierung der Lager, Zahnradstufen, Dichtungselemente, des Schubgliederbandes und für den Trockensumpf der VKM zuständig und verlangt je nach Fahrzustand Volumenströme von 6 bis 12 l/min. (58) Es kann davon ausgegangen werden, dass die Erweiterung des konventionellen Ölkreislaufs durch die Hybridisierung nur geringe Verluste mit sich brachte, da die Werte nicht wesentlich über jenen eines konventionellen Schaltgetriebes liegen. (61)

Das Problem ist hier nicht leicht erkennbar und liegt nicht in der Konstruktion an sich, sondern im Betriebsmodus. Durch den intermittierenden Betrieb der VKM kann es zu einer Vielzahl sich immer wiederholender Kaltstarts kommen, welche neben einer Reihe weiterer Probleme eine starke Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Schmiermittlerviskosität mit sich bringen. In den ersten paar Minuten nach dem Start kann es zu einer Steigerung des Kraftstoffverbrauchs von bis zu 25% kommen. Bewegt man sich also im Winter durch einen Fahrzyklus mit einem für dieses System ungünstigen *Dynamikfaktor* (z.B. Stadtverkehr mit geringen Anteilen der Konstantfahrt), so kann es vorkommen, dass die vom Entwickler angegebene mittlere Kraftstoffersparnis von bis zu 25 % völlig zunichte gemacht wird.

Zwar hat die drastische Verschärfung der Abgasnormen eine deutliche Verbesserung der Abgasnachbehandlung mit sich gebracht und es sind mittlerweile Katalysatoren mit äußerst kurzen Vorwärmzeiten und Zusatzheizungen verfügbar, aber das Fahrzeug muss in der Lage sein, die entsprechende elektrische Leistung bereit zu stellen. Das gestaltet sich aber gerade beim *Volvo S40* der EUT als problematisch, da dieser auf Grund der Elektrifizierung der Nebenaggregate bereits einen stärkeren Generator und eine erweiterte Batteriekapazität benötigt.

10.3.9 Verluste des Hochdruck-Ölkreislaufs

Wie aus Tabelle 17 hervorgeht, besteht ein starker Unterschied zwischen den durchschnittlichen und maximal erforderlichen Drücken und Durchflussmengen. Eine Auslegung der Pumpe nach den Maximalanforderungen würde in einer eklatanten Überdimensionierung und hohen Verlusten während des normalen Fahrbetriebes resultieren.

	Durchschnitt			Maximum	
	Druck [bar]	Strom [l/min]	Leistung [W]	Strom [l/min]	Leistung [W]
CVT-Aktuatoren	60	0,8	80	3,4	340
CVT-Servo-Ventile	60	3	300	2,8	280
Kupplungsaktuatoren	20	2,1	70	2,8	90
Kupplungs-Druckminderer	60/20	2,1	140	2,8	185

Tabelle 17: Druck, Durchfluss und Leistung im Hochdrucksystem des *Volvo S40* der EUT Eindhoven. (58)

Da aber aus Gründen der Sicherheit die Maximalwerte ständig verfügbar sein müssen, wurde ein Ölakkumulator vorgesehen. Dies erlaubt zwar ein Downsizing der Hochdruckpumpe, löst aber immer noch nicht das Problem der stark unterschiedlichen Drücke von CVT- und Kupplungsaktuatoren. Die Reduktion des Drucks auf 20 bar impliziert energetische Verluste,

welche in der letzten Zeile von Tabelle 17 angeführt sind. Eine Möglichkeit besteht in einer weiteren Trennung der beiden Kreisläufe durch eine Einführung einer weiteren Pumpe wodurch allerdings die Kosten und die Systemkomplexität gesteigert würden.

10.3.10 Verluste der elektrischen Nebenaggregate

Durch den möglicherweise intermittierenden Betrieb der VKM müssen einige Nebenaggregate, die normalerweise mechanisch über die Kurbelwelle angetrieben werden, elektrisch versorgt werden, um einen dauerhaft sicheren und komfortablen Fahrbetrieb zu ermöglichen. Hierzu gehören:

- Verluste der elektrischen Vakuumpumpe
- Verluste der elektrischen Servolenkungspumpe
- Verluste des Generators

Dadurch steigert sich der elektrische Leistungsbedarf von ungefähr 320 W des konventionellen Fahrzeuges auf rund 500 W. (58) Eine Erweiterung der Batteriekapazität und eine Steigerung des Generatorstromes von den serienmäßigen 80 auf mehr als 150 Ampere ist ebenfalls notwendig. Im Falle der Vakuumpumpe oder des Klimakompressors ist ein direkter, mechanischer Antrieb sicher wirkungsgradgünstiger, da ohnehin mechanische Leistung gefordert ist und die ungünstige, in Abbildung 71 dargestellte Wirkungskette entfällt.

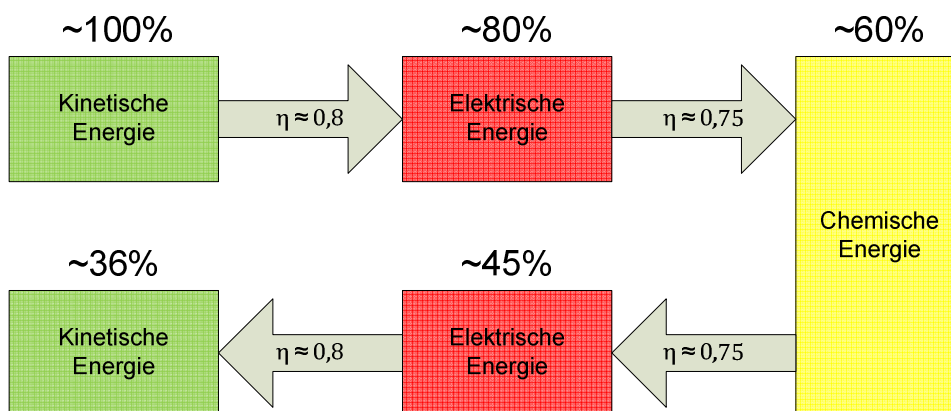


Abbildung 71: Ungünstige Wirkungskette bei zweifacher Energiewandlung. (Basierend auf (66))

Die obige Abbildung kann sicherlich als pessimistische Annahme bezeichnet werden und würde wahrscheinlich von den Verfechtern der elektrischen Energieübertragung zu ihren Gunsten korrigiert werden, aber Fakt ist, dass der mechanische Leistungsfluss über den *PTO* lediglich Verluste von 6% aufweist und daher in jedem Fall kostengünstiger und effizienter ist.

Eine Ausnahme stellt die elektrische Servopumpe dar, welche dank der Elektrifizierung an die Fahrsituation angepasst werden kann. Da die Lenkunterstützung im Überlandbetrieb und bei gerader Fahrt kaum benötigt wird, treten bei herkömmlichen Pumpen permanent große dissipative Verluste auf. Die amerikanische *TRW Automotive Holdings Corp.* gibt an, mit ihrem

EPHS (*Electrically Powered Hydraulic Steering*) den Verbrauch eines leichten Nutzfahrzeuges um 0,3 L/100 km und die CO₂-Emissionen um ca. 7g/100 km reduzieren zu können (67)

10.4 *Erweiterte Camelot Methode Volvo S40 der EUT Eindhoven*

Um möglichst hohe Transparenz und Objektivität zu erreichen, wird bei der Bewertung jedes einzelne Kriterium diskutiert. Die vergebenen Punkte zu den einzelnen Kriterien sowie das Ergebnis der *Camelot*-Bewertung befinden sich am Ende dieses Abschnitts.

1. **Energie und Energiedichte Schwungrad**

Die 0,12 kWh Energieinhalt, welche das Schwungrad zu Verfügung stellt, mögen zwar absolut gesehen gering erscheinen, der Wert muss aber immer unter Berücksichtigung der Betriebsstrategie eingeschätzt werden. Da der Speicher als hochdynamischer Puffer zur Lastpunktverschiebung eingesetzt wird, stehen hohe Leistung und Leistungsdichte im Vordergrund. Durch das Vorhandensein eines CVT-Getriebes kann der Verbrennungsmotor – vorausgesetzt es wurde ein entsprechender Betriebsmodus gewählt - im Bestpunkt arbeiten, um den durchschnittlichen Energiebedarf zu decken. (Vergleiche Abbildung 10). Der Betriebspunkt der VKM ist dabei unabhängig vom Ladezustand des Schwungrades, und unterscheidet sich somit von dem in Abschnitt 9 diskutierten System.

Da das Schwungrad aus einem Verbundwerkstoff hergestellt ist und ein günstiges Berstverhalten aufweist, kann es auch relativ hoch gedreht werden, wodurch die Energiedichte gesteigert werden kann. Nachdem das Schwungrad ohne Weiteres im Motorraum eines Serienfahrzeuges untergebracht werden konnte, kann auch die volumetrische Energiedichte als ausreichend bezeichnet werden.

2. **Leistung und Leistungsdichte des Schwungrades**

Die Leistungsübertragung vom Schwungrad zu den Antriebsrädern und umgekehrt erfolgt rein mechanisch. Komponenten wie Wellen und Stirnradgetriebe sind durch die Dauerfestigkeit der Wellen, die Zahnfußfestigkeit, sowie die zulässige *Hertz'sche Pressung* an den Zahnflanken limitiert, Kupplungen und das Umschlingungsgetriebe in erster Linie durch den maximalen zulässigen Schlupf. Während des Schaltvorgangs wird die übertragbare Leistung bei Kupplungen jedoch durch die maximal zulässige Temperatur begrenzt. Dennoch eignen sich diese mechanischen Elemente bestens, um hohe Leistungen mit gutem Wirkungsgrad zu übertragen.

3. **Einfluss der Kreiselkräfte**

Die Drehachse des Flywheels liegt horizontal und quer zur Fahrtrichtung, was als suboptimal bezeichnet werden kann, da durch die häufig auftretenden Gierbewegungen hohe Lagerkräfte im Schwungrad entstehen können. Andererseits entsteht bei schneller Energieentnahme kein freies Gegenmoment, welches eine Querkraft zu Folge hätte und eine Lenkkorrektur erforderlich machen würde. Als Grundlage für die überschlägige Quantifizierung der gyroskopischen Kräfte gelten die gleichen Überlegungen wie bereits in Kapitel 9.4 unter Punkt 3 besprochen.

Auf Basis der unter Punkt 4.2 erarbeiteten physikalischen Zusammenhänge können diese näherungsweise quantifiziert werden. Es gilt:

$$\vec{M}_k = \vec{L} \times \vec{\omega}_s = I \omega \dot{\omega}_s$$

wobei I das Trägheitsmoment des Schwungrades, ω die Winkelgeschwindigkeit des Schwungrades, und $\dot{\omega}_s$ die Winkelgeschwindigkeit der Änderung der Drehachse ist. Bei normalen Fahrmanövern treten Winkeländerungsraten von etwa 10 °/Sek. auf, wobei jene, die sich in der horizontalen Ebene abspielen, durch die Kontaktkräfte der Reifen limitiert sind (55). Es ergibt sich somit für den konkreten Fall des *Volvo S40* der *EUT*:

$$M_k = 0,35 \frac{10 \cdot 2\pi}{360} 17000 \frac{2\pi}{60} = 85 \text{ Nm}$$

wobei das Trägheitsmoment I auf den Angaben von Tabelle 15 über die Formel

$$E_{kin} = \frac{1}{2} I (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)$$

errechnet wurde und nicht auf einer konkreten Literaturangabe basiert. Wieder gilt, dass der Wert eine Näherung für den normalen Fahrgebrauch repräsentiert und Ausnahmesituationen sowie Missbrauchstests zu deutlich höheren Werten führen können. Außerdem berücksichtigt diese Betrachtung nur eine stationäre Winkeländerung der Drehachse, genügt aber den Anforderungen an eine erste Abschätzung.

Wie „stark“ der Einfluss tatsächlich ist, bleibt der subjektiven Einschätzung des Fahrers überlassen. Die Belastung der Bauteile durch gyroskopische Kräfte stellt zwar ein konstruktives Problem dar, kann aber nicht als unmittelbarer Kundenwunsch gesehen werden und entzieht sich somit der erweiterten *Camelot Methode*.

4. Rekuperation

Das Fahrzeug verfügt einerseits über die Möglichkeit, Energie der VKM in das Schwungrad zu speisen (*Flywheel Load Modus*), andererseits kann Bremsenergie von den Vorderrädern direkt auf mechanischem Wege rekuperiert werden. Diese Konfiguration erlaubt nicht nur einen relativ hohen Wirkungsgrad, sondern ist auch aus fahrdynamischer Sicht günstig, da den Vorderrädern grundsätzlich mehr Bremsleistung zu Verfügung steht. Dennoch erfordert das System eine gute Abstimmung mit der Betriebsbremse, um ein Untersteuern in der gebremsten Kurvenfahrt in jedem Fall zu vermeiden.

5. Selbstentladung des Schwungrades.

Diese wurde bereits in der Verlustanalyse behandelt. Die Selbstentladung ist ihr zufolge zu hoch, um den Großteil des Energieinhaltes länger als 24 Stunden zu speichern. Dadurch kann die rekuperierte Energie nicht von einem zum nächsten Fahrbetrieb (z.B. über Nacht) übernommen werden, und der Schwungradspeicher muss entweder vor Erreichen des Fahrziels „leergefahren“ werden oder die Energie geht verloren. Dies wirkt sich besonders bei sehr kurzen Fahrten fatal auf den Gesamtwirkungsgrad aus. In der Literatur (11) kann die Annahme eines gemittelten Energiebedarfs eines PKWs mit 140 Wattstunden pro Kilometer und Tonne Fahrzeuggewicht gefunden werden, was in etwa dem gesamten Energieinhalt des betrachteten Schwungradspeichers entspricht. Die ein kilometerlange Ausfahrt zum Supermarkt und zurück

gestaltet sich also möglicherweise im Hybridmodus als ineffizienter, da das Schwungrad zwei Mal aufgeladen wird, die Energie aber während der Standzeiten jedes Mal den Verlusten zum Opfer fällt.

6. Berst- und Crashesicherheit

Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass die Gefährlichkeit eines Schwungradversagens mit dem Energieinhalt steigt, wodurch das Konzept der *TU Eindhoven* schon eine gute Ausgangsposition inne hat, um im Bezug auf die Crashesicherheit gut abzuschneiden. Da der Rotor darüber hinaus ein Verbund aus gewickelten Glasfasern in einer Epoxymatrix ist, welche im Falle eines Versagens in kleine Bruchstücke geringer kinetischer Energie „zerstäubt“ werden, ist die dadurch entstehende Hitze wahrscheinlich von größerer Gefahr als die kinetische Energie an sich. Als für den Frontaufprall ungünstig gestaltet sich allerdings die Position des Schwungrades im Motorraum, etwa auf halbem Weg zwischen Stoßstange und Spritzwand. Würde das Gehäuse beschädigt werden, so kann keine hundertprozentige Integrität mehr gewährleistet werden und der Rotor könnte – wenn auch nur unter den ungünstigsten Umständen – aus dem Motorraum austreten.

7. Emissionsfreie Reichweite

Auf emissionsfreie Fahrt wurde bei der Entwicklung kein besonderes Augenmerk gelegt. Je nach Fahrzyklus und Anwendung stünde dem Fahrer eine Reichweite von maximal 1000 m zur Verfügung. Der Batteriespeicher des unter Punkt 7 in Kapitel 9.4 erwähnten *Toyota Prius* ermöglicht bis zu 4 km rein elektrische Fahrt.

8. Kraftstoffverbrauch und Gesamtwirkungsgrad

Die Kraftstoffersparnis liegt laut den Entwicklern bei 20 bis 25% im urbanen Gebiet gegenüber dem herkömmlichen Antriebsstrang mit dem 5-Gang-Schaltgetriebe (58). Über den Kraftstoffverbrauch im Überlandgebiet liegen keine Angaben vor. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Verbrauchersparnis deutlich geringer als im Stadtverkehr ist, wo die Nutzbremmung deutlich besser zum Tragen kommt. Bei stationärer Fahrt spielen im Wesentlichen das Downsizing und der Wirkungsgrad der VKM im Bestpunkt eine Rolle. Abbildung 63 ist ein bester spezifischer Verbrauch von 275 g/kWh zu entnehmen. Moderne hochaufgeladene Diesellaggregate erreichen Werte unter 200 g/kWh.

9. Beschleunigung

Die maximale Beschleunigung und Elastizität des Prototyps entsprechen den Werten des Serienfahrzeuges. Nachdem das Fahrzeug offiziell als Limousine der unteren Mittelklasse bezeichnet wird, sind die Anforderungen an die Beschleunigung moderat.

10. Höchstgeschwindigkeit

Energieinhalt und Leistung des Schwungrades spielen für die langfristig erreichbare Höchstgeschwindigkeit keine Rolle, sodass diese lediglich von der Leistung der VKM limitiert ist. Zwar liegen keine konkreten Angaben über die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeuges vor, aber es kann davon ausgegangen werden, dass diese aufgrund der verfügbaren Dauerleistung von

46 kW deutlich geringer ist als beim Serienfahrzeug. Zwar kann die dauerhaft verfügbare, maximale Geschwindigkeit durch Zuschalten des Schwungrades (*Boosten*) kurzfristig überschritten werden, aber nachdem der Energieinhalt des Flywheels verbraucht wurde, steht dem Fahrer diese Möglichkeit nicht mehr offen, wodurch er sich bei Überholmanövern auf der Autobahn auf die verfügbaren 46 kW beschränken muss.

Der Hersteller des Serienfahrzeuges gibt folgende Angaben, die für eine Überschlagsberechnung der Höchstgeschwindigkeit erforderlich sind:

$$c_w = 0,31, B = 1,71 \text{ m}, H = 1,42 \text{ m und } f_R \cong 0,012.$$

Bei der Berechnung der projizierten Fläche muss allerdings eine Annahme getroffen werden, da die Breite des Fahrzeuges nach oben hin trapezförmig abnimmt und auch die Bodenfreiheit von der Höhe abgezogen werden muss, wodurch geschätzte 25% abgezogen werden. Ebenfalls geschätzt wird der Antriebswirkungsgrad mit $\eta_A = 0,8$ und die Gesamtmasse mit 1500 kg plus 140 kg Zuladung. Mit:

$$\eta_A P_{\max_VKM} = v F_{Bed} = \left(mg (f_R) + \frac{1}{2} c_w A \rho_L v^2 \right) v$$

ergibt sich eine maximale Geschwindigkeit von 43,74 m/s oder 157,5 km/h. Wohlgermerkt ist dies ein Näherungswert, der außerdem nur für die Horizontalfahrt gilt!

11. Gesamtgewicht

Da nur die Angaben des Serienfahrzeuges mit 1330 kg vorliegen, muss hier eine Schätzung gemacht werden. Wie in Abbildung 61 zu erkennen ist, weicht das Schaltgetriebe des Serienfahrzeuges dem CVT-Getriebe für den hybriden Antriebsstrang. Neben dem Zusatzgewicht des Schwungrades und dessen Gehäuse kommen in erster Linie die hydraulischen Komponenten dazu sowie einige Module des Thermomanagements und der Abgasbehandlung, die die Kaltstartproblematik zu mindern versuchen. Nachdem aber keine großen Massen wie z.B. Batteriespeicher dazukommen, wird sich der Einfluss des Mehrgewichts in Grenzen halten und etwa unter 100 kg liegen.

12. Akustisches Verhalten.

Das *Van Doorne* Schubgliederband weist eine sehr feine Teilung auf, wodurch sich das akustische Verhalten günstiger gestaltet als bei anderen Ketten, die bei Umschlingungsgetrieben zum Einsatz kommen.

13. Lebensdauer und Wartung

Der Einsatz des CVT-Getriebes erfordert generell kürzere Wartungsintervalle als ein Handschaltgetriebe, da es wegen der Relativbewegung der Schubglieder zwangsläufig zu einem Abrieb kommt. Ein Ölwechsel wird typischer Weise einmal pro Jahr oder alle 20.000 km durchgeführt. (68)

Bei dem hohen Differenzdruck, der zwischen der Vakuumkammer des Schwungrades und der Umgebung herrscht, ist es fraglich, ob die eingesetzte Gleitringdichtung ihren Zweck wartungsfrei und über die gesamte Fahrzeuglebensdauer gewährleisten kann.

14. Einfluss der Regelung auf den Komfort

Der Fahrer kann zwischen konventionellem CVT-Modus und Flywheel-Hybrid-Modus wählen. Dieser Wahlschalter ist zwar aus Sicht des Kunden durchaus zumutbar, garantiert aber noch keinen effizienten Einsatz des Fahrzeuges bzw. keine Ausschöpfung des Einsparungspotentials. Um die Möglichkeit der Nutzbremmung vollends verwerten zu können, muss auch eine angepasste Fahrweise an den Tag gelegt werden, wie bereits in 9.4, Abbildung 55 erkennbar gemacht wurde.

15. Voraussichtlicher Gesamtpreis

Durch die komplexe Struktur des Hybridantriebes sind definitiv höhere Kosten als beim Serienfahrzeug zu erwarten. Ein beträchtlicher Teil davon ist das CVT-Getriebe, welches verglichen zu einem Handschaltgetriebe einen Mehrkostenfaktor von etwa 2 bis 3 mit sich bringt. Das heißt den Herstellungskosten des konventionellen Getriebes von etwa 400 bis 500 Euro steht das CVT-Getriebe mit mehr als 1000 Euro gegenüber. (69) Jene Kosten, die das Schwungrad verursacht, halten sich für eine noch im Prototypenstadium befindliche Technologie jedoch in Grenzen, da es sich um eine relativ einfache Ausführung handelt, die weder über eine kardanische Aufhängung, noch über aufwändige Leistungselektronik verfügt. Die Bilanz wird abschließend noch durch die 4 Lamellenkupplungen und die erforderlichen Komponenten des Hydraulikkreislaufs belastet.

16. Design und Image

Nachdem High Speed Flywheels in ihrer Geschichte und nach wie vor mit sicherheitstechnischen Problemen zu kämpfen haben, ist es sicherlich ein guter Ansatz, ein Basisfahrzeug zu wählen, dessen Hersteller als einer der sichersten der Welt gilt. Der *Volvo S40* war das erste Fahrzeug überhaupt, das bei einem *Euro NCAP-Test*²⁵ vier Sterne erreichte. Dies garantiert selbstverständlich nicht, dass das Schwungrad äußerst crashtest sicher ist, sondern bezieht sich auf das Image des Herstellers.

Die graphische Auswertung der oben diskutierten Punkte betreffend die erweiterte *Camelot-Methode* gestaltet sich wie in Abbildung 72 ersichtlich.

Nach Mittelwertbildung der einzelnen gegebenen Teilnoten ergibt sich eine durchschnittliche Gesamtnote von 6,19 Punkten von 10. Der Punktevorsprung gegenüber dem *VW T2* der RWTH Aachen, welcher 4,06 Punkte erreicht, ergibt sich in erster Linie durch die deutlich verbesserte Fahrleistung des PKWs sowie die effektivere Nutzbremmung, welche gemeinsam mit dem Design und Image des PKWs die höchsten Punkte in der *modifizierten Camelot-Methode* darstellen.

²⁵ *NCAP* steht für *New Car Assessment Program*, ein Bewertungssystem für die Unfallsicherheit neuer Fahrzeuge

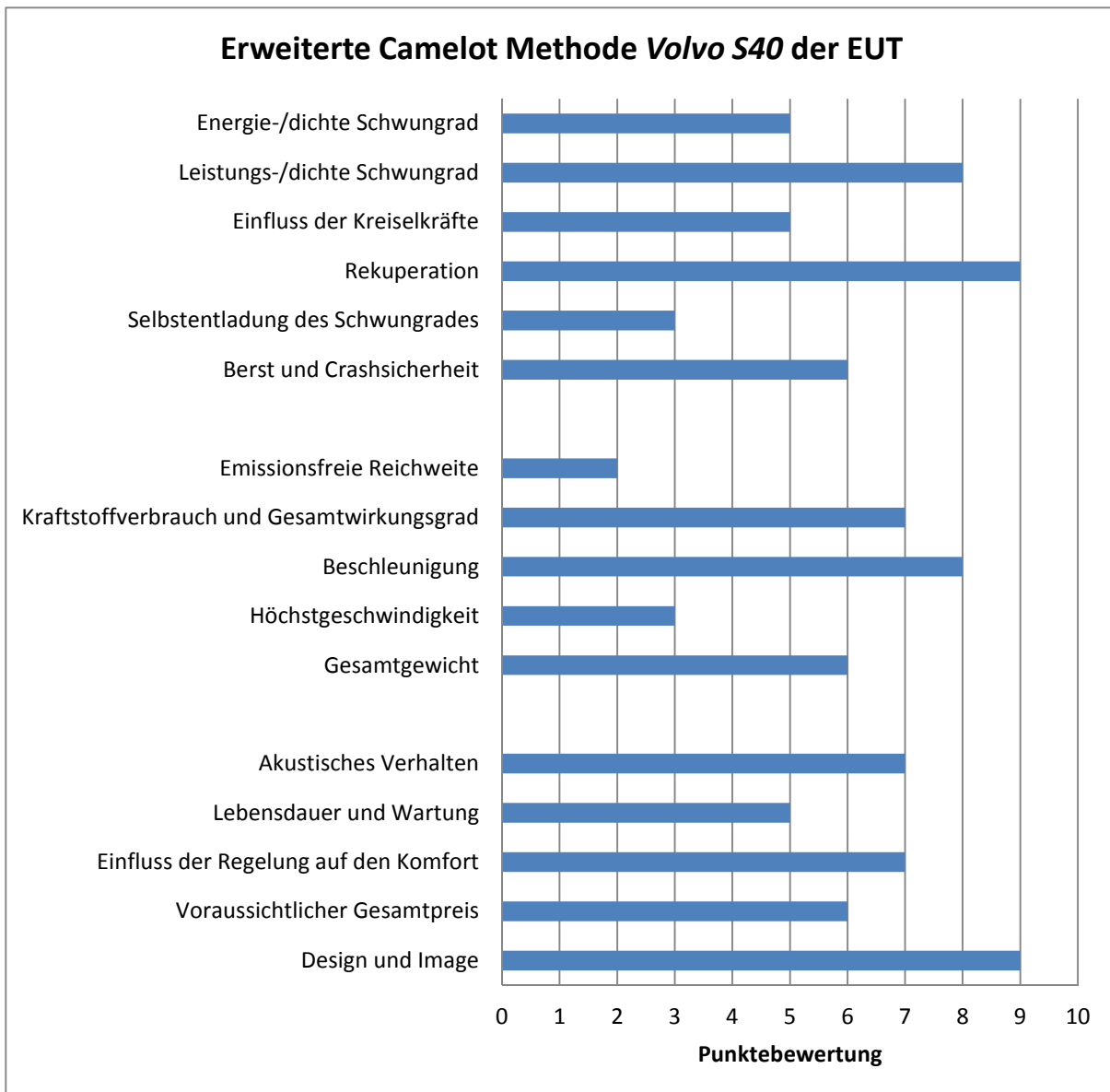


Abbildung 72: *Erweiterte Camelot Methode Volvo S40 der TU Eindhoven*

10.5 Morphologische Matrix *Volvo S40* der EUT Eindhoven

Es gelten die gleichen Überlegungen wie in 9.5. Die im Falle des *Volvo S40* der EUT gewählten Ausführungen sind gelb hinterlegt und in Tabelle 18 angeführt.

Wichtig: Auffällig ist, dass das Schwungrad sowohl die sekundäre Leistungseinheit als auch den sekundären Energiespeicher darstellt. Das System verliert dadurch an Komplexität und kann einen hohen Wirkungsgrad im zweiten Leistungspfad erreichen. Wie im folgenden Abschnitt zu sehen sein wird, wirkt sich dieser Umstand auch positiv auf das Ergebnis der Nutzwertanalyse aus.

Basisfahrzeug						
Fahrzeugart	LKW	PKW	Transporter	Bus	Zug	Motorrad
Antriebsart	Front	Heck	Konv. Allrad	Hybridallrad	Andere	
Hybridtechnologie						
Hybridart	Seriell	Parallel	Mischhybrid	Kein Hybrid		
Hybridklasse	Micro	Mild	Full	Power	Kein Hybrid	
Primäre Leistungseinheit	Ottomotor	Dieselmotor	Wankelmotor	Elektromaschine	Turbine	Schwungrad
Primärer Speicher	Schwungrad	Batterie	Supercap	Fossiler Brennstoff	Erneuerbarer Träger	
Sekundäre Leistungseinheit	Verbrennungskraftmasch	Schwungrad	Elektromaschine	Turbine	keine	
Sekundärer Speicher	Schwungrad	Batterie	Supercap	Fossiler Brennstoff	Erneuerbarer Träger	keiner
Energiemanagement						
Regelungsstrategie	Fahrer, voll manuell	Halbautomatisch	Kennfeldbasierend	Real-time / GPS gekoppelt	keine	
Rekuperation	Elektrisch	Mechanisch	Hydraulisch	Pneumatisch	keine	
Versorgung der Nebenaggregate	Elektrisch	Mechanisch	Hydraulisch	Pneumatisch	konventionell (Basisfzg.)	Gemischt
Schwungrad						
Schwungradform	Scheibe konst. Festigkeit	Scheibe konst. Dicke	dünner Ring	Walzenform	Speichenrad	
Schwungradmaterial	Metall	Kunststoff	Verbundwerkstoff	Organischer Werkstoff	Werkstoffkombination	
Lagerung	Wälzlager	Gleitlager	Magnetische Lagerung	Konv. mit magn. Unterstüt	Supraleitened Magnete	
Energieübertragung	CVT Getriebe Schubglied	CVT Reibtegriebe	Stirnradgetriebe	Elektrisch	Hydraulisch	Pneumatisch
Aufhängung	Starr	biegeelastisch	Teil-Kardanisch	Vollkardanisch		
Kühlung	Wasserkühlung Stator	Konvektion	Strahlung	keine		
Gehäuseart	Berstschutz	Eingriffsschutz	Gasdichtes Gehäuse	keines		
Laufatmosphäre	Umgebung	Leichtes Gas	Schwaches Vakuum	Hochvakuum		

Tabelle 18: Morphologische Matrix des Volvo S40 der EUT

10.6 Nutzwertanalyse des Volvo S40 der EUT Eindhoven

Es gelten die gleichen Überlegungen wie in 9.6. Die vollständige Nutzwertanalyse ist dem Anhang zu entnehmen. In diesem Abschnitt werden nur die Ergebnisse diskutiert bzw. in der folgenden Abbildung nur ein Ausschnitt gezeigt.

Energiemanagement			
Rekuperation	Mechanisch	Parameterbewertung	0,1
	Gewichtung (%)	Punkte	Zwischenwert
Konstruktionsaufwand	0,1	6	0,6
Effizienz	0,6	9	5,4
Raumbedarf	0,1	8	0,8
Kosten	0,2	7	1,4
Summe	1		8,2
Nebenaggregate	Elektrisch	Parameterbewertung	0,05
	Gewichtung (%)	Punkte	Zwischenwert
Mehrwert	0,3	8	2,4
Effizienz	0,4	8	3,2
Kosten	0,1	6	0,6
Notlauf und Ausfallssicherheit	0,2	8	1,6
Summe	1		7,8

Tabelle 19: Auszug aus der Nutzwertanalyse des Volvo S40 der EUT

Die Zwischenwerte für die einzelnen Parameter sowie deren gewichtetes Zwischenergebnis und die Gesamtbewertung sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Kategorie	Parameter	Zwischenwert	Param.Gew.	Kateg.Gewichtung	Gewichteter Kategoriewert
Basisfahrzeug	Fahrzeugart	4,6	0,05	0,1	0,46
	Antriebsart	4,6	0,05		
Hybridtechnologie	Hybridart	6,1	0,05	0,35	2,2475
	Hybridklasse	5,8	0,025		
	Prim. Leistungseinheit	6	0,075		
	Prim. Speicher	5,55	0,1		
	Sek. Leistungseinheit	8,75	0,05		
	Sek. Speicher	7,1	0,05		
Energiemanagement	Regelung	6,3	0,05	0,2	1,525
	Rekuperation	8,2	0,1		
	Nebenaggregate	7,8	0,05		
Schwungrad	Schwungradform	6,9	0,025	0,35	2,375
	Schwungradmaterial	7,6	0,025		
	Schwungradlagerung	6,6	0,025		
	Energieübertragung	7,5	0,1		
	Aufhängung	3,8	0,05		
	Kühlung	6,5	0,05		
	Gehäuseart	8	0,05		
	Atmosphäre	7,3	0,025		
	Kontrollsumme		1	1	
	Gesamtbewertung:				6,6075

Tabelle 20: Ergebnis der Nutzwertanalyse des Volvo S40 der EUT

Da nun bereits ein Vergleichswert, nämlich das Ergebnis des VW T2 der RWTH Aachen aus Kapitel 9.6 vorliegt, gewinnt das Ergebnis des Volvo S40 bereits an Bedeutung. Das Fahrzeug erreicht 6,6075 Punkte von 10 im Vergleich zu 5,53 des VW T2. Das deckt sich auch mit den Ergebnissen der *modifizierten Camelot-Methode* und den subjektiven, aus der Abstraktion und der Verlustanalyse hervorgehenden Erwartungen. Um die systeminternen Schwachstellen zu erfassen, ist es wieder notwendig, die graphische Auswertung der Ergebnisse der NWA zu betrachten, wie in Abbildung 73 dargestellt.

In der Rubrik *Basisfahrzeug* sind keine Auffälligkeiten zu sehen. Die Antriebsart birgt jedoch noch Verbesserungspotential in sich. Der Frontantrieb verfügt zwar über gute Traktion und ein ausgewogenes Fahrverhalten, untergräbt jedoch die Möglichkeit eines temporären Allradantriebes, wodurch der potentielle Mehrwert eines Hybridantriebs im Bezug auf die Traktion nicht genutzt werden kann.

Im Bereich der *Hybridtechnologie* sticht lediglich das Schwungrad als sekundäre Leistungseinheit heraus. Die Vorzüge aufgrund des Entfallens einer langen Wirkungsgradkette wurden bereits in Abschnitt 10.5 erwähnt.

Positiv wirkt sich ebenfalls die Nutzbremmung mit mechanischer Energieübertragung aus, welche für die höchste Punktezahl im Bereich des *Energiemanagements* sorgt. In der Rubrik *Schwungradtechnik* sind auffällig starke Punkteschwankungen zu finden, was bereits andeutet,

dass eine kritische Hinterfragung und aufmerksame Interpretation der NWA notwendig ist. Die relativ niedrige Bewertung der Schwungradaufhängung ist darauf zurückzuführen, dass eine starre Anbindung *prinzipiell* den Nachteil der Beeinflussung des Fahrverhaltens und stark erhöhten Lagerkräften mit sich bringt. Dieser Nachteil ist bei einem sehr großen Drehimpuls des Schwungrades gravierend, bei kleinen, langsam drehenden Schwungrädern allerdings vernachlässigbar.

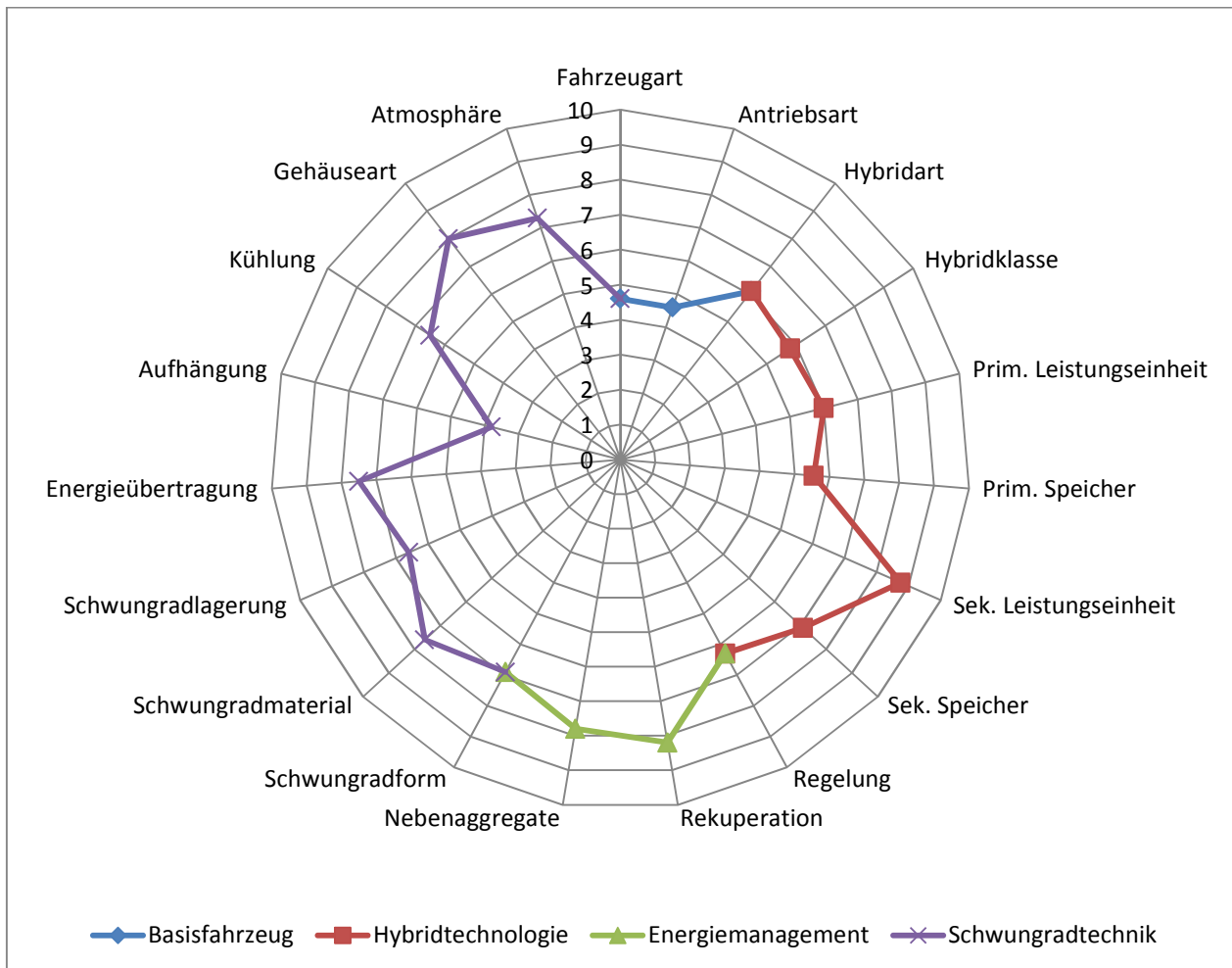


Abbildung 73: Graphische Darstellung der Ergebnisse der NWA des Volvo S40 der EUT.

Ohne exakte Quantifizierung mittels numerischer Simulation oder analytischer Berechnung kann hier kein eindeutiges Urteil gefällt werden. Die Nutzwertanalyse weist jedoch unmissverständlich darauf hin, dass es bei der Aufhängung zu Problemen kommen kann! Dadurch ist es leichter im Vorfeld alle Eventualitäten zu berücksichtigen und ein präziseres Lastenheft zu erstellen, womit die NWA ein weiteres Mal ihre Anwendung rechtfertigt.

10.7 Conclusio Volvo S40 der EUT Eindhoven

Die Kombination eines CVT-Getriebes mit *Van Doorne* Schubgliederband, welches einen Betrieb der VKM im Bestpunkt erlaubt, mit einem Schwungradspeicher ist ein vielversprechendes Konzept, welches durch einen hohen Rekuperationswirkungsgrad und eine Vielzahl unterschiedlicher Betriebsmodi (inklusive lokal emissionsfreiem Betrieb) besticht.

Da der *Volvo S40* der EUT die Verbrennungskraftmaschine im On-Off-Betrieb einsetzt, wurde ein bislang wenig diskutiertes Problem sichtbar, nämlich die Energieversorgung der Nebenaggregate, welche typischerweise über die Kurbelwelle des permanent laufenden Verbrennungsmotors versorgt werden. Die Entwickler des *Volvo S40* haben zwar durch teilweise Elektrifizierung der konventionellen Aggregate wie z.B. Hydraulikpumpe für die Servolenkung oder der Vakuumpumpe für den Bremskraftverstärker eine sichere Funktionsfähigkeit des Fahrzeuges während aller Betriebsmodi gewährleistet, aber noch keinen Schritt in Richtung *Mehrwert* unternommen. Das heißt, es können durch die Unabhängigkeit der Nebenaggregate von der VKM-Drehzahl weitere Vorteile ausgeschöpft werden oder überhaupt neue Technologien eingesetzt werden, deren Funktionalität und Leistungsfähigkeit jene der konventionellen Aggregate bei weitem übersteigt. Beispiele für das Mehrwertpotential seien nun angeführt:

- Statt der herkömmlichen, hydraulischen Bremsanlage könnte – um die Notwendigkeit einer Vakuumpumpe vollends zu umgehen – eine *Electronic Wedge Break (EWB)* (70) eingesetzt werden.
- Die Sensitivität des Bremspedals kann an die Fahrzeuggeschwindigkeit angepasst werden.
- Ein elektrischer Klimakompressor würde selbst im Stadtverkehr oder im Stillstand die gleiche Leistung aufweisen wie bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten.
- Die Leistung der Servopumpe der Lenkung kann an den Fahrzustand angepasst werden, wodurch Verluste im Überlandbetrieb eingespart werden können.²⁶
- Der abschnittsweise emissionsfreie, bzw. auch der intermittierende Betrieb der VKM macht ein modifiziertes Heizungssystem erforderlich. Eine klassische Lösung wie eine Standheizung der Firma *Eberspächer* oder *Webasto* würde unabhängig vom Fahrzustand funktionieren, eine kurze Warmlaufzeit aufweisen und über die Möglichkeit einer Funkzündung zur Vorwärmung der Fahrgastzelle verfügen.

Durch den intermittierenden Betrieb der Verbrennungskraftmaschine durchläuft der Motor aber möglicherweise eine Serie von Kaltstarts, wodurch ein angepasstes motorisches Thermomanagement erforderlich wird, um Emissionen und Reibverluste gering zu halten. Ein Punkt, der in der nun folgenden *SWOT-Analyse* definitiv als Risiko festgehalten werden muss.

Anmerkung: Die Elektrifizierung der Nebenaggregate erfolgte aber nach damaligem Stand der Technik und daher zu einem damals maximal möglichen Grad. Die Verbesserungsvorschläge sind aus heutiger Sicht angeben.

²⁶ Vergleiche Punkt 10.3.10

10.7.1 SWOT-Analyse des Volvo S40 der EUT Eindhoven

SWOT-Analyse		Interne Analyse	
		Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)
E x t e r n e A n a l y s e	Möglichkeiten (Opportunities)	<ul style="list-style-type: none"> • Deutlich gesteigerter Wirkungsgrad gegenüber Serienfahrzeug • Geringes Zusatzgewicht der Hybridkomponenten • Keine zusätzliche Umweltbelastung durch Batteriespeicher • Hoher Wirkungsgrad der Nutzbremmung 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitierte emissionsfreie Reichweite • Geringe Fahrleistung (Überland) • Hohe Anzahl an Kupplungen und mechanischen Elementen • Voraussichtlich hoher Preis • Betriebsmodus muss manuell gewählt werden
	Gefahren (Threats)	<ul style="list-style-type: none"> • Verweigerung der Kunden wegen ungewöhnlichen Fahrverhaltens (Akustik / CVT) • Falsche (manuelle) Wahl des Betriebsmodus möglich • On-Off-Betrieb der VKM möglicherweise thermisch ungünstig • Keine Erfahrungswerte bezüglich Lebensdauer 	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrwert durch Elektrifizierung der Nebenaggregate • Image und Bekanntheitsgrad der Marke Volvo • Fahrzeugtyp und Konzept für kommerziellen Stadtverkehr (Taxi) geeignet

Abbildung 74: SWOT-Analyse des Volvo S40 der EUT

11. *Advanced Technology Transit Bus (ATTB), University of Texas, Center for Elektromechanics. (UT-CEM), 2001*

11.1 **Kurzbeschreibung des Systems**

Der *Advanced Technology Transit Bus (ATTB)* wurde von der Firma *Northrop-Grumman* im Auftrag der Verkehrsbetriebe von Los Angeles²⁷ konstruiert. Die Entwicklung von einzelnen Modulen oder Spezialapplikationen wurde an Dritte weitergegeben, so zum Beispiel an das *Center for Elektromechanics* der *University of Texas* in Austin, welche im Speziellen für den Schwungradspeicher zuständig war. Das Projekt wurde unter anderem vom *U.S. Department of Transportation – Federal Transit Administration* finanziert.

Die Firma *Northrop-Grumman*, welche als Hersteller von Kampfflugzeugen und Informationssystemen internationale Bekanntheit erlangte, ließ ihre Erfahrungen und ihr Wissen im Bezug auf Leichtbau gekonnt in die Konstruktion einfließen, welche bewusst auf niedrigen Energieverbrauch und geringe Emissionen getrimmt wurde.



Abbildung 75: Außenansicht des Northrop-Grumman Advanced Technology Transit Bus (71)

Die Karosserie wurde zur Gänze aus Fieberglas und geschäumten Kunststoffen in Sandwichbauweise hergestellt, verzichtet auf mechanische Verbindungen wie Nieten oder Schrauben und ist – aus den veröffentlichten Daten (71) zu schließen – Crash-sicherer als konventionelle Buskarosserien. Trotz der verbesserten Sicherheit konnte das Gesamtgewicht des Fahrzeuges durch den konsequenten Leichtbau um rund 3300 kg gegenüber Bussen vergleichbarer Größe und Kapazität verringert werden. Laut Angaben des Herstellers, welche in (71) veröffentlicht wurden, betrug die Kraftstoffersparnis alleine auf Grund des geringeren

²⁷ Originale Bezeichnung: *Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority*.

Gewichts schon bis zu 30% im urbanen Fahrzyklus gegenüber Bussen vergleichbarer Größe, welche üblicherweise Werte von 4 mpg²⁸ erreichten.

Als primäre Leistungseinheit im hybriden Antriebssystem kommt ein 157 kW starker V8-Motor zum Einsatz, der mit *Compressed Natural Gas (CNG)* betrieben wird. Die Kolbenmaschine des Typs *Detroit Diesel Series 30G* ist an einen Generator geflanscht, welcher die benötigte elektrische Energie für die Radnabenmotoren und alle Nebenaggregate zu Verfügung stellt.

Das Schwungrad, welches am *Center for Elektromechanics* der *University of Texas* ausführlich getestet, dokumentiert und publiziert wurde, ist parallel zur primären Motorgeneratoreinheit geschaltet und in Abbildung 76 dargestellt.

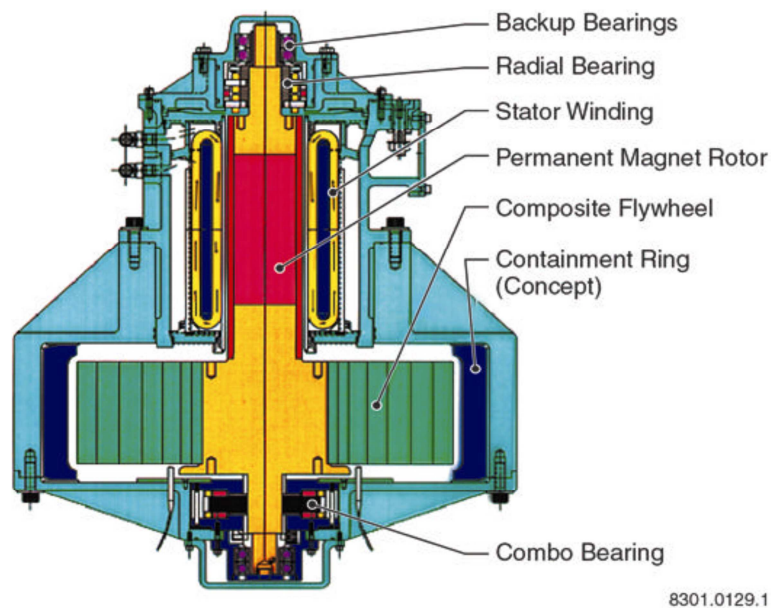


Abbildung 76: Schwungradmodul des ATTB, entwickelt am UT-CEM (55)

Die Bauweise des elektromechanischen Energiespeichers wird vom *UT-CEM* als *teilintegrierte Topologie* bezeichnet und wurde den anderen Bauweisen (in Abbildung 77 dargestellt) vorgezogen, da sie es ermöglichte, einen bestehenden und zuverlässigen Motorgenerator einzusetzen, aber dennoch das Schwungrad auf einer Welle, ohne Vakuumdurchführung im evakuierten Raum zu betreiben.

Links in Abbildung 77 ist ein *nichtintegrierter* Aufbau zu sehen, welcher zwar den einfachsten elektromechanischen Speicher darstellt, aber den größten Bauraum sowie ein Vakuumdurchführung erfordert. Rechts im Bild ist die *vollintegrierte* oder „*inside-out*“ Variante zu sehen. Der Kompaktheit des Systems stehen das nach oben hin begrenzte Leistungsspektrum und ein schwieriges Thermomanagement gegenüber.

Da die eingesetzten Magnetlager nur eine sehr begrenzte Steifigkeit und Tragzahl aufweisen, war es notwendig, den Einfluss der Fahrzeugdynamik und der gyroskopischen Kräfte durch eine kardanische Aufhängung des gesamten Speichers zu minimieren. Für den Fall, dass die Beschleunigungen 3 g überschreiten, wurden Notlauflager mit keramischen Wälzkörpern vorgesehen.

²⁸ 4 “Miles per gallon” entspricht 59 l/100km

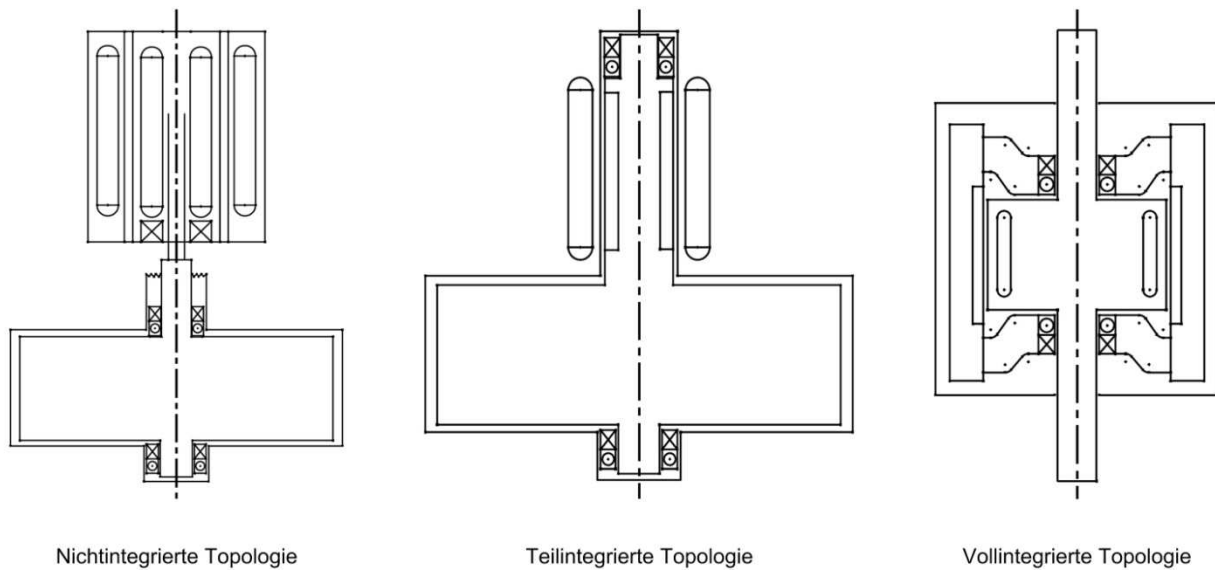


Abbildung 77: Verschiedene Bauweisen eines elektromechanischen Schwungradspeichers (72)

Die Schwungmasse an sich wurde durch konzentrische Ringe aus Kohlefaser, welche auf eine Nabe aus Titan mit hoher Vorspannung aufgebracht wurden, realisiert. Um den hohen Sicherheitsanforderungen an Schwungräder für mobile Applikationen gerecht zu werden, wurden separate Forschungsprojekte von der *DARPA*²⁹ finanziert und in (73), (55) veröffentlicht. Die mechanischen Belastungen wurden einerseits numerisch simuliert, andererseits wurden Testfahrten durchgeführt und die auftretenden Drehraten, Winkel- sowie Longitudinalbeschleunigungen und Wege gemessen. Das Schwungrad wurde in weiterer Folge auf einem Hydropulsprüfstand verifiziert.

Es ist anzumerken, dass die ersten Prototypen des *ATTB*, welche 1999 die ersten praktischen Tests bestanden, ohne Flywheel als Kurzzeitenergiespeicher ausgeführt wurden, und die Bremsenergie über *Dissipatoren*³⁰ auf dem Dach des Fahrzeuges in Form von Wärme abgaben. Besonders im Hinblick auf die ohnehin schon sehr gering dimensionierte Dauerleistung des Fahrzeuges von rund 160 kW war die Implementierung eines Schwungrades als *Surge Power Unit* ein wichtiger Schritt, um die Beschleunigungswerte und damit die Eingliederung des Fahrzeuges in den Stadtverkehr zu verbessern.

²⁹ *Defense Advanced Research Program Agency*

³⁰ Ohm'sche Bremswiderstände

Daten Gesamtfahrzeug	
Entwickler / Hersteller	<i>Northrop Grumman, UT-CEM, Texas</i>
Fahrzeugtyp	<i>Advanced Technology Transit Bus</i>
Baujahr	1997
Fahrzeugart	Bus - Mischhybrid
Fahrzeuggesamtmasse	12.725 kg
Passagiere	43 sitzend + 29 stehend
Länge	12,2 m
Breite	2,6 m
Höhe	3,09 m
Daten Schwungrad	
Energieinhalt	2 kWh
Drehzahl	40000 U/min
Werkstoff	Carbonfaser auf Titan-Nabe
Maximale Leistung	150 kW, 110 permanent
Gewicht d. Schwungrads	-
Durchmesser	440 mm
Form	Scheibe gleicher Dicke
Trägheitsmoment	0,77 kgm ²
Energieübertragung	Elektrisch, permanentmagnetischer Motorgenerator
Aufhängung	Kardanisch
Masse der Einheit	...
Daten Verbrennungskraftmaschine	
Typ	<i>Detroit Diesel Series 30G</i>
Arbeitsprinzip	8-Zylinder, Viertakter
Leistung	157 kW bei 2600 U/min
Treibstoff	CNG
Hubraum	7,3 L
Daten Generator	
Hersteller	Kaman Electric
Typ	AC Permanentmagnet
Leistung	200 KW bei 2600 U/min
Daten Elektromaschinen	
Bezeichnung	<i>2 x Kaman Electric</i>
Typ	3-Phasen, AC, Radnabenmotor mit Planetengetriebe
Drehmoment	700 Nm bei 5600 U/min
Maximale Leistung	120 kW
Masse	-
Leistungselektronik	Glykol und Wassergekühlte IGBT-Invertoren

Tabelle 21: Technische Daten des *Northrop Grumman Advanced Technology Transit Bus* [(55), (71), (74), (75)]

11.2 Abstraktion des *ATTB*

Basierend auf den Informationen aus der Literatur [(55), (71), (74), (75), (76), (77)] und den dadurch verfügbaren Fotos, Flussdiagrammen, Beschreibungen und Skizzen kann die Ausführung auf die wesentlichen Funktionen zurückgeführt werden. Die Publikationen, welche über das Fahrzeug vorliegen, stehen fast ausschließlich im Zusammenhang mit der Entwicklung des Schwungradspeichers per se, wobei das *UT-CEM* keinerlei Beschreibungen über den Fahrzeugaufbau inkludierte. Fotos des Fahrzeuges, wie in Abbildung 78 dargestellt, waren nur über den originalen Prüfbericht des Fahrzeuges (77), welcher im Zuge des Zulassungsprozesses vom Hersteller verfasst wurde, zu bekommen und weisen leider eine äußerst schlechte Bildqualität auf. Konkrete Konstruktionszeichnungen waren bis auf die Struktur der Fahrzeugaußenhaut keine verfügbar, was sich aber durch die freie Anordnung der Funktionsgruppen aufgrund der elektrischen Energieübertragung nicht negativ auf die Abstrahierbarkeit und Analysierbarkeit auswirkte.

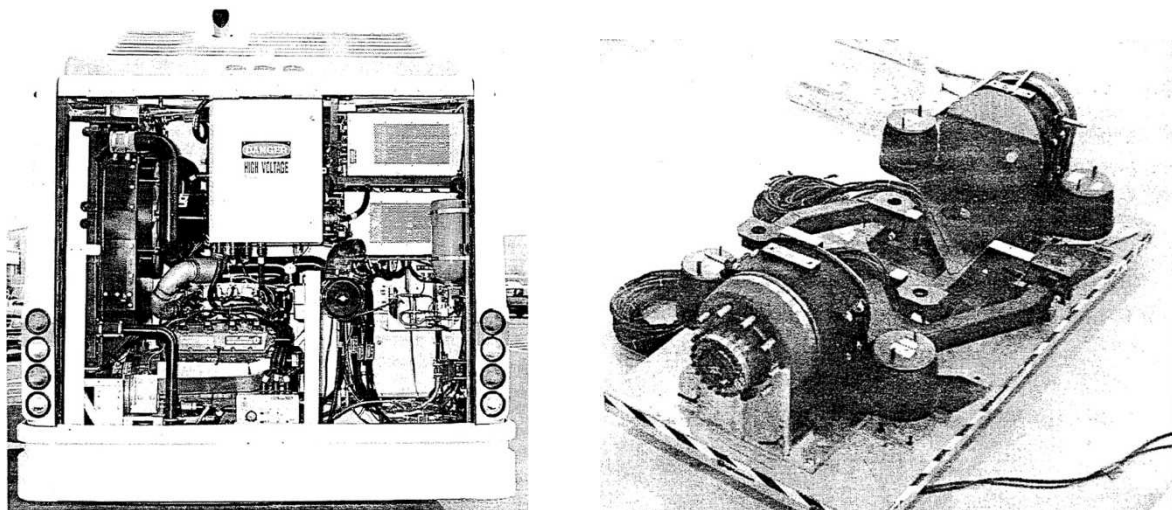


Abbildung 78: Heckansicht des *ATTB* (li.) und Schwingarme mit Nabenmotoren (re.) (77)

Das Inkludieren der Nebenaggregate in die Abstraktion (und konsequenter Weise in die weitere Analyse) ist bei einem Fahrzeug dieser Art von besonderer Bedeutung, da es sich um beachtliche Energieflüsse handelt. Deshalb sind auch die Leistungen – falls Informationen vorhanden – in Abbildung 79 eingetragen. Man erkennt sofort, dass die freie Anordnung der Aggregate bei einem sehr großen Fahrzeug wie diesem von besonderem Vorteil ist, da lange mechanische Übertragungswege entfallen.

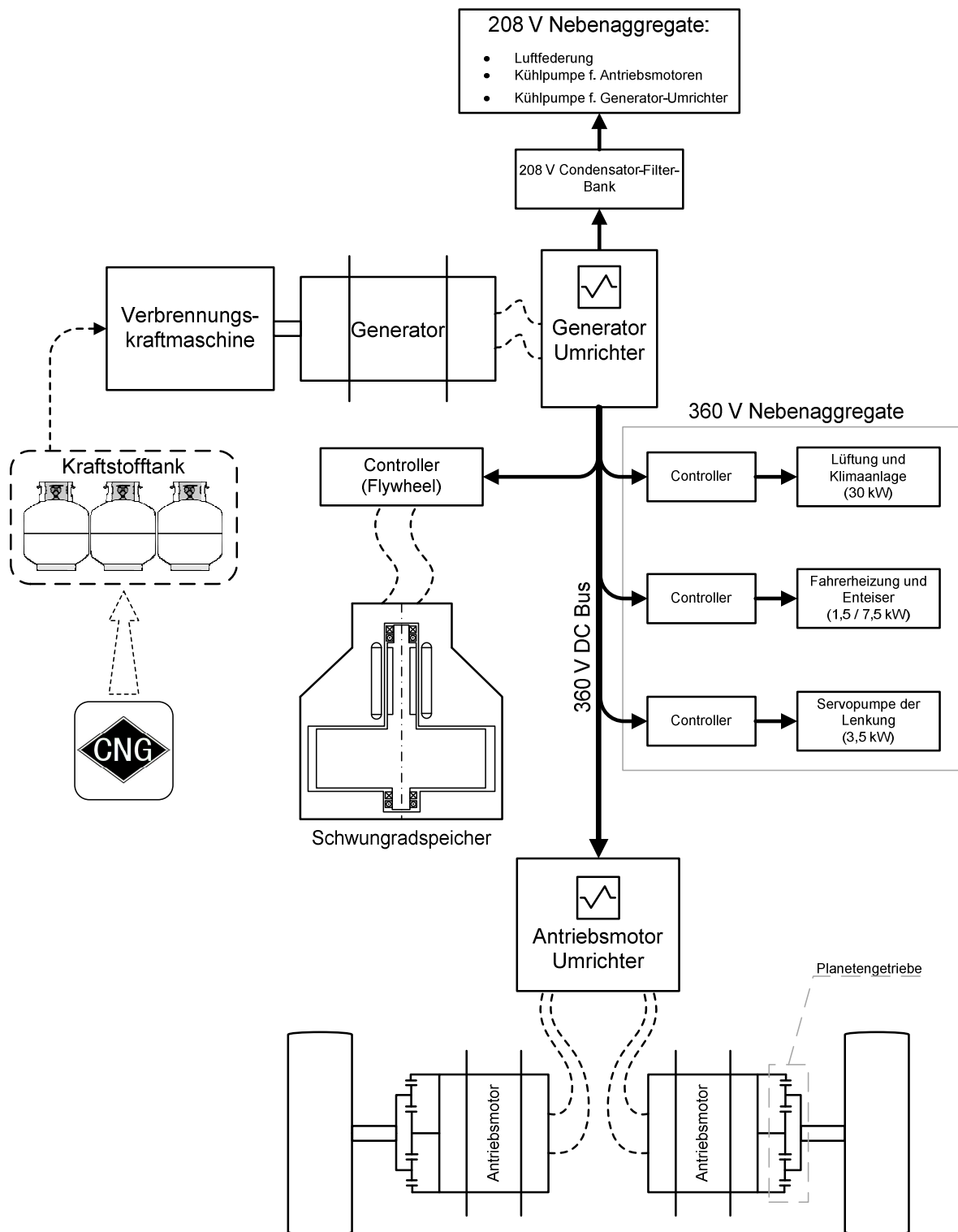


Abbildung 79: Fahrzeugabstraktion des *Advanced Technology Transit Bus*

Die erstellte Abstraktion erlaubt es nun, den Energiefluss des *ATTB* auf übersichtliche Art und Weise zu verfolgen und zu analysieren bzw. die Morphologie in eine für die Nutzwertanalyse brauchbare, tabellarische Form zu übertragen.

11.3 Verlustanalyse des *ATTB*

Die nun folgende Verlustanalyse fällt etwas anders aus als bei den bisherigen Konzepten (vergleiche 9.3 *Verlustanalyse des VW T2 der RWTH Aachen* und 10.3 *Verlustanalyse des Volvo S40 der EUT Eindhoven*), da nur die *prinzipbedingten* Verluste von einem sehr allgemeinen Standpunkt aus diskutiert werden können. Fast alle auftretenden Übertragungs- und Umsetzungsverluste sind elektrischer Natur und ihre Quantifizierung bedarf der Expertise eines ausgebildeten Elektrotechnikers. Auch das Anführen konkreter Lösungsvorschläge für die Wirkungsgradsteigerung in der Umrichtertechnik ist ein eigenes Metier. Nichts desto trotz soll der Energiefluss des *ATTB* aus maschinenbaulicher Sicht holistisch dargestellt und besprochen werden.

Missachtet man die Komprimierungsverluste des *CNG* indem man die Systemgrenze strikt um das Fahrzeug legt, so treten bei der Energieumwandlung des Kraftstoffes bis zur Antriebskraft an den Rädern die nun besprochenen Verluste auf.

11.3.1 Umsetzungsverluste der *VKM*

Aus den wenigen Angaben, die über das primäre Antriebsaggregat, den *Detroit Diesel Series 30 G* Ottomotor vorliegen, geht hervor, dass es sich um keine für den Stationärbetrieb optimierte Maschine handelt. Der Motor basiert auf dem in den USA weit verbreiteten *Typ T444E* der Firma *Navistar* und wurde lediglich für den *CNG*-Betrieb umgerüstet, indem ein elektronischer Gasmixer installiert wurde. Das Aggregat ist für den Magerbetrieb konzipiert.



Abbildung 80: Die *VKM* des *ATTB* – Detroit Diesel Series 30 G (78)

Da die Firma *Detroit Diesel* das im *ATTB* eingesetzte Antriebsaggregat nicht mehr herstellt, konnten selbst nach persönlicher Anfrage beim Hersteller keine technischen Daten ermittelt werden, um über den spezifischen Verbrauch oder den Wirkungsgrad urteilen zu können.

11.3.2 Umwandlungsverluste des Generators

Diese sind rein abhängig vom Maschinentyp, sind bei diesem Fahrzeugkonzept unumgänglich und werden daher nicht näher besprochen. Es wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

11.3.3 Verluste des Generator-Umrichters

Es spricht für sich, dass der Umrichter mit einem eigenen Kühlkreislauf ausgestattet ist, dessen Wärmetauscher sich auf dem Dach des Fahrzeuges befindet. Dies bedeutet, dass nicht nur erhebliche thermische Verluste vorliegen, sondern auch der Antrieb der Kühlpumpe als Verlust mit einberechnet werden muss. Wie aus Abbildung 79 deutlich hervorgeht, gehört die Kühlpumpe des Umrichters, genauso wie jene der Antriebsmotoren, zu den 208V-Nebenaggregaten. Ihnen steht gemeinsam mit dem Kompressor der Luftfedern eine Leistung von 30 kW zu Verfügung! Über jenes Modell, welches *Kaman Electromagnetics* für den *ATTB* konzipiert hat, liegen keine Angaben vor. In den Datenblättern von Umrichtern mit vergleichbaren Spezifikationen findet man Wirkungsgradangaben von 85 bis 93%. (79)

11.3.4 Verluste der 360 V DC Nebenaggregate

Im 360 V Netz des *ATTB* befinden sich Nebenaggregate, die üblicherweise über die Kurbelwelle der VKM mit mechanischer Energie versorgt werden. Lediglich die Gebläse, welche in jedem Fall elektrisch betrieben werden, können als „konventionelle Lösung“ angesehen werden. Aus energetischer Sicht macht die Elektrifizierung des Klimakompressors aufgrund der mehrfachen Energieumwandlung jedoch keinen Sinn. Der direkte Antrieb der Kompressoreingangswelle über einen Riementrieb wäre in jedem Fall effizienter als über eine umständliche Wirkungsgradkette welche sich vom Generator über den Hauptumrichter, einen Controller und einen weiteren Elektromotor erstreckt. Aufgrund der Größe des Fahrzeuges und der absoluten Notwendigkeit, den Fahrgästen ein angenehmes Reiseklima zu bieten, verfügt die Klimaanlage des Herstellers *Thermo King* über eine elektrische Leistung von 30 kW. Der exzessive Energiekonsum des Klimasystems des *ATTB* schlägt sich auch in einer deutlichen Reduktion der Maximalgeschwindigkeit nieder, welche von 54 auf 49,9 mph sinkt. (77)

Eine interessante Lösung der Klimatisierungsproblematik wendet ein anderes Schwungradfahrzeug an, nämlich eine Konzeptstudie der Firma *Ford*, welche im März 1996 in (80) vorgestellt wurde. Am Dach des Fahrzeuges sind Photovoltaik-Zellen angebracht, welche kleine Ventilatoren antreiben und durch die erzwungene Konvektion die Wärme aus dem Fahrzeuginneren abtransportieren. Der *ATTB* würde eine große, ebene Fläche auf dem Dach bieten und – was aus umwelttechnischer Sicht noch wichtiger ist – eine lange Fahrzeuglebensdauer mit hohen täglichen Betriebsstunden, wodurch sich der für die Herstellung der Solarzellen erforderliche Energiebedarf überhaupt erst wieder amortisieren kann. Was die energetische Amortisation betrifft, so schneiden Dünnschichtmodule mit 1,5 Jahren am besten ab, monokristalline Solarzellen benötigen hingegen circa 5 Jahre. (81)

Der nächste Verbraucher im 360V Netz ist die vordere Heizungseinheit, welche aus einem Enteiser (7,5 kW) und der Heizung für die Fahrerzelle (1,5 kW) besteht. Nachdem für das Enteisen eine kurze Warmlaufzeit essentiell ist, besteht hier keine Möglichkeit die Kühlwärme

des CNG-Motors zu nutzen. Eine Alternative, um wieder einmal die mehrfache, elektrische Energiewandlung zu umgehen, ist der Einsatz einer Gasheizung, welche besonders gute Wärmeausbeute bezogen auf die Primärenergie liefert. Als Beispiel sei das Modell *Trumatic E 4000 A* der Firma *Truma* (siehe Abbildung 81) welche bei 3,7 kW Heizleistung einen Propan oder Butan³¹ Verbrauch von 310 g/h aufweist, was einem Wirkungsgrad von etwa 95% entspricht; ein Wert, der über die elektrische Wirkungsgradkette sicherlich nicht erreicht werden kann. Auch die Stromaufnahme von 1,1 A bei 24V ist relativ gering.



Abbildung 81: Flüssiggasheizung Modell *Trumatic E 4000 A* der Firma *Truma* (82)

Die Heizung für den Fahrer könnte aber zumindest aus energetischer Sicht über die Motorabwärme erfolgen, da Busse dieses Typs ohnehin meist in einer Remise untergebracht sind und das Personal daher bei Arbeitsantritt keinen unzumutbaren Temperaturen ausgesetzt wäre. Durch die Anordnung des Antriebsaggregates im Heck müssten jedoch lange Kühlwasserleitungen vorgesehen werden, was nur in Verbindung mit einem Heizungssystem, welches auch die Fahrgastzelle versorgt, rentabel wäre.

Positiv auf die Energiebilanz wirkt sich jedoch die teilweise Elektrifizierung der Lenkung aus. Wie bereits unter Kapitel 10.3.10 erörtert, birgt der Ersatz der herkömmlichen, permanent laufenden Servopumpe durch eine dem Leistungsbedarf anpassbare elektrische ein signifikantes Einsparungspotential.

11.3.5 Verluste der Leistungselektronik der Antriebsmotoren

Bei der für die Antriebsmotoren erforderlichen Stromwandlung von 360 V Gleichstrom auf Wechselspannung finden die in 7.1.3 - 3. bereits erwähnten IGBTs Anwendung. Der Wirkungsgrad von Geräten dieser Ausführung wird in der Literatur (79) mit >90% angegeben.

11.3.6 Umsetzungsverluste der Antriebsmotoren

Da die *Kaman Corporation* offensichtlich aus Datenschutzgründen keine Informationen über ihren Beitrag zum *ATTB* veröffentlicht hat, wird - um einen Überblick zu bekommen - ein vergleichbares Produkt betrachtet.

³¹ CNG weist mit 11,3 (L-Gas) bis 13,0 kWh/kg (H-Gas) einen ähnlichen Heizwert auf wie LPG (dazu gehören Propan und Butan) mit 12,9 kWh/kg (92)

Der Antriebsmotor *PowerPhase*[®] 200 der U.S.-amerikanischen *Firma UQM* wurde im Speziellen für elektrische, oder hybride Antriebsstränge entwickelt und weist ähnliche Eckdaten auf wie der im *ATTB* eingesetzte Motor von *Kaman*. (115 kW Dauerleistung bei 3000 U/min, maximales Drehmoment 900 Nm, nominelle Eingangsspannung 360 bis 430 VDC, maximaler Eingangsstrom 600 A).

Aus den Diagrammen, die in (83) für den 360 VDC-Betrieb – welcher auch im *ATTB* zum Einsatz kam – publiziert wurden, geht hervor, dass das System einen maximalen Wirkungsgrad von 92,5% erreichen kann, wobei der Controller bereits in die Betrachtung mit einbezogen ist.

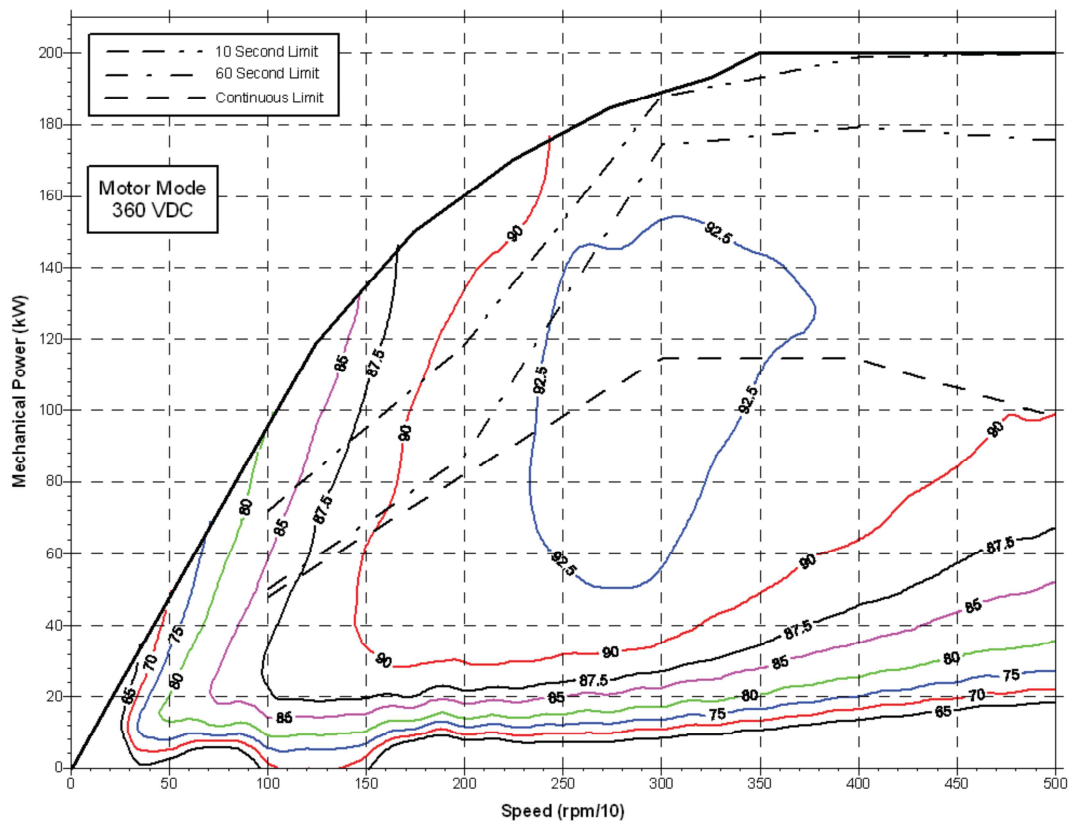


Abbildung 82: Leistungs-Effizienz-Diagramm der E-Maschine *PowerPhase*[®] 200 (83)

Im generatorischen Betrieb erreicht das System sogar beeindruckende 94%. Betrachtet man diese modernen Antriebsmotoren isoliert, so lassen sie einen konventionellen Antriebsstrang bestehend aus VKM und mechanischer Energieübertragung auf den ersten Blick antiquiert erscheinen. Der Sachverhalt relativiert sich aber sofort, wenn man die mehrfache Energiewandlung überschlagsmäßig quantifiziert (Abbildung 83). Des Weiteren muss festgehalten werden, dass die Motoren des *ATTB* um gute 15 Jahre älter sind als das Vergleichsbeispiel der Firma *UQM*.

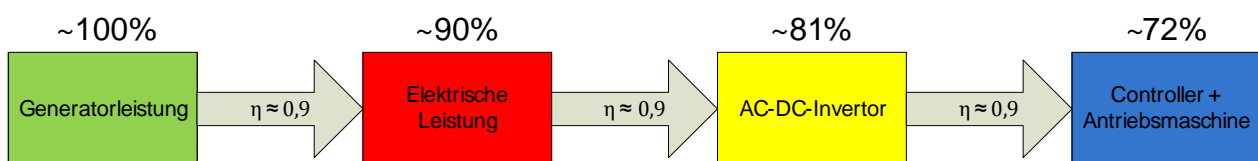


Abbildung 83: Prozesskette der Energiewandlung im Antriebsstrang des *ATTB*

Durch eine Näherungsberechnung lässt sich die soeben getroffene Annahme auf Plausibilität prüfen. Für die energetische Auslegung des Schwungrades wurde am *UT-CEM* eine numerische Simulation durchgeführt, die auf folgenden Fahrzeugdaten basierte (72):

$$c_w = 0,65, A = 6 \text{ m}^2, m = 12750 \text{ kg}, P_{max} = 157 \text{ kW} \text{ und } f_R \cong 0,012.$$

Nimmt man für die Näherung einen Antriebswirkungsgrad mit $\eta_A = 0,8$ an, so ergibt sich mit

$$\eta_A P_{max_VKM} = v F_{Bed} = \left(mg (f_R) + \frac{1}{2} c_w A \rho_L v^2 \right) v$$

eine maximale Geschwindigkeit von 37,28 m/s oder 134,2 km/h. Dieser Wert ist nun jenem der praktischen Tests, welche von *Northrop-Garrett* durchgeführt wurden, gegenüber zu stellen. Der Bus erreicht in der Praxis 57 mp/h, oder 91,2 km/h (=25,33 m/s), also um rund 40 km/h weniger als bei der theoretischen Berechnung mit einem verlustfreien Antriebsstrang. Es kann also nun zurückgerechnet werden, indem $v = 25,33 \text{ m/s}$ in die Gleichung eingesetzt wird und η_A errechnet wird. Es gilt:

$$\eta_A = \frac{\left(mg (f_R) + \frac{1}{2} c_w A \rho_L v^2 \right) v}{P_{max_VKM}}$$

Somit ergibt sich ein ungefährender Antriebswirkungsgrad $\eta_A = 0,44!$ Diese Betrachtung lässt natürlich diverse Nebenaggregate außer Acht, aber es sei angemerkt, dass die Klimatisierung des Fahrzeuges bei der praktischen Ermittlung der Maximalgeschwindigkeit ebenfalls ausgeschaltet war.

11.3.7 Verluste des Schwungradspeichers

Die im *Flywheel Energy Storage System (FESS)* beim Hin- und Rücktransport der Energie auftretenden Verluste können grob in 4 Hauptkategorien unterteilt werden:

- | | |
|---------------------------------|----------------------|
| 1. Verluste des Motorgenerators | 3. Strömungsverluste |
| 2. Lagerverluste | 4. Vakuumpumpe |

Die letzten zwei Punkte, die Strömungs- und Pumpverluste, gleichen in ihrer Ursache und Wirkung beinahe zur Gänze jenen des *Volvo S40* der *EUT Eindhoven* und wurden bereits in 10.3 detailliert beschrieben.

1. Verluste des Motorgenerators

Den Wirkungsgrad des Motorgenerators so hoch wie möglich zu halten ist nicht nur aus energetischer Sicht wünschenswert, sondern bei der im Falle des *ATTB* vorliegenden Konfiguration absolut notwendig. Grund hierfür ist, dass das Abführen der anfallenden Verlustwärme im Vakuum nur über Strahlung und Wärmeleitung erfolgen kann und somit signifikant erschwert wird.

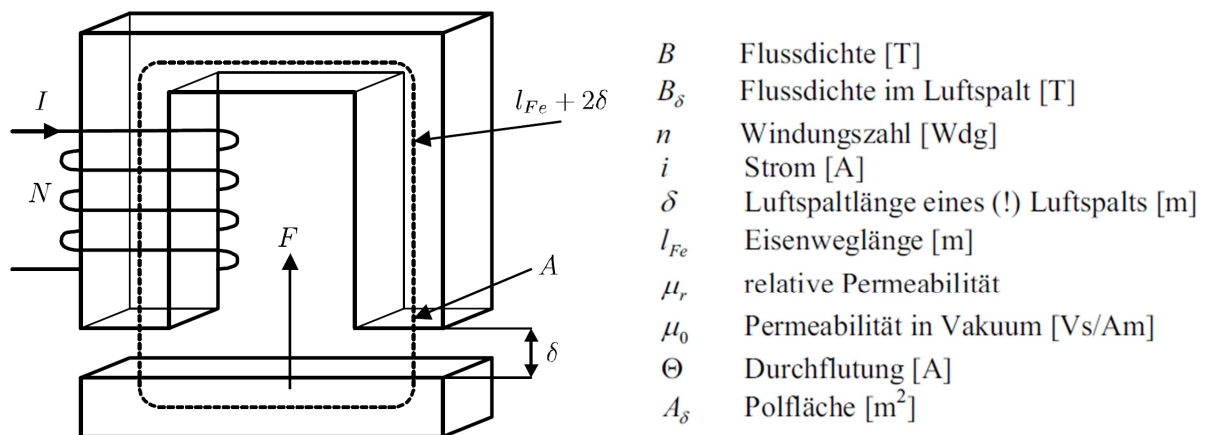
Das Wegfallen der Konvektion wirkt sich negativ auf die Festigkeit und Lebensdauer der ohnehin schon extrem hoch belasteten Bauteile aus. Für das konkrete Beispiel des Titan-Kohlefaserrotors bedeutet dies, dass drei wesentliche Effekte zum Tragen kommen:

- Der unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizient der Bauteile
- Durch die hohe Temperatur beschleunigtes Kriechen der Kunststoffe
- Alterung der magnetischen Eigenschaften der elektrischen Bauteile

Als Richtwert kann angenommen werden, dass eine langsame Entmagnetisierung bei etwa 150°C und eine Beschleunigung des Kriechverhaltens der Kohlefaserbandage bei etwa 100°C beginnt (72). Der zweipolige Permanentmagnet-Motorgenerator wurde von der Firma *AlliedSignal Aerospace Incorporates*³² beigesteuert. Der Stator ist flüssigkeitsgekühlt und am Rotor wurde eine Beryllium-Kupfer-Hülse angebracht, um Eddy-Ströme zu verringern. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass die Temperatur der Permanentmagnete nicht über 93°C steigt, was auf einen hohen Wirkungsgrad schließen lässt, wenn man die maximale Leistung von 150 kW bedenkt. Hinzu kommen jedoch wieder thermische Verluste des IGBT-Umrichters, welcher auf einer wassergekühlten Platte angebracht ist und – genauso wie der Stator – auch Pumpleistung benötigt.

2. Verluste in den Magnetlagern

Zwar arbeiten Magnetlager – wie bereits in Kapitel 7.1.2, Punkt 2 skizziert - berührungslos und daher reibungsfrei, sie weisen aber dennoch Verluste auf. Elektromagnetismus ist nicht verlustfrei, da es immer parasitäre Widerstände in den Spulen und anderen elektrischen Bauteilen gibt.



• **Abbildung 84: Elektromagnetische Kräftesituation in einem Magnetlager (84)**

Hinzu kommt, dass – um ausreichend hohe Auflagerreaktionen erzeugen zu können – große Ströme erforderlich sind. Betrachtet man die Anordnung in Abbildung 77, auf welche sich die meisten Konfigurationen von Magnetlagern reduzieren lassen, und wertet man die elektrischen Beziehungen bezüglich der Kräftesituation aus, so bekommt man folgendes Ergebnis (84):

³² *AlliedSignal* übernahm im Jahr 1999 die Firma *Honeywell* und ist nunmehr unter diesem Namen bekannt.

$$F = \frac{B_{\delta}^2 \cdot 2A_{\delta}}{2\mu_0} \approx 40 \text{ Ncm}^{-2} T^{-2} \cdot 2A_{\delta} \cdot B_{\delta}^2$$

Um eine Lagerkraft von 40 N/cm^2 zu erreichen, ist bereits eine extrem hohe Flussdichte von 1 Tesla notwendig!

Weitere Umformungen, auf die nicht näher eingegangen wird, ergeben:

$$n i = \Theta = B \cdot \left(2\delta + \frac{l_{Fe}}{\mu_r} \right) \cdot 800 \text{ AT}^{-1} \text{ mm}^{-1}$$

Werden die Eisenverluste vernachlässigt, so bedeutet das, dass für eine Flussdichte von 1 Tesla bei 1 mm Luftspalt eine Durchflutung von 800 Amperewindungen erforderlich ist. Dies verdeutlicht, dass selbst bei einer Lagersteifigkeit von nur 40 N/cm^2 hohe Ströme notwendig sind, welche Wärmeverluste in den Leitern hervorrufen.

Der Einsatz von passiven Magnetlagern bietet in diesem Fall auch keine Alternative, weil der Rotor, bis er seine Betriebsdrehzahl von 40000 U/min erreicht, mehrere Eigenformen durchläuft. Um Resonanz zu unterbinden, muss die Steifigkeit der Lager variabel sein.

Hinzu kommt, dass bei mobilen Anwendungen gyroskopische Kräfte auftreten und bestimmte Fahrmanöver Präzessionsbewegungen hervorrufen und verstärken können. Daraus resultiert die Notwendigkeit einer ständigen Überwachung und aktiven Positionierung der Drehachse.

11.4 Erweiterte Camelot Methode des ATTB

Um möglichst hohe Transparenz und Objektivität zu erreichen, wird bei der Bewertung jedes einzelne Kriterium diskutiert. Die vergebenen Punkte zu den einzelnen Kriterien sowie das Ergebnis der *Camelot*-Bewertung befinden sich am Ende dieses Abschnitts.

1. Energie und Energiedichte Schwungrad

Es ist eine leicht überprüfbare Faustregel, dass der Schwungradspeicher mindestens den Energieinhalt des Fahrzeuges bei maximaler, konstanter (Überland-)Reisegeschwindigkeit haben sollte. Dies resultiert im Falle des ATTB in folgender Gleichung:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} 12750 \left(\frac{86}{3,6} \right)^2 = 3,638 \cdot 10^6 \text{ [J]}$$

$3,638 \cdot 10^6 \text{ [J]}$, das entspricht ziemlich genau 1,01 kWh. Das *FESS* des *UT-CEM* sieht den doppelten Energieinhalt vor, was in Anbetracht der Tatsache, dass das Fahrzeug ausschließlich im innerstädtischen Bereich verkehren wird, durchaus sinnvoll ist. Je nach Verkehrssituation kann es vorkommen, dass eine Bremsung des Fahrzeuges in dem für die Nutzbremmung günstigen Verzögerungsbereich nicht möglich ist und die kinetische Energie durch ausrollen „vernichtet“ werden muss. Dieser Sachverhalt wird im Anhang unter 4.3.2 genauer besprochen. An dieser Stelle muss auf Abbildung 55 des Kapitels 9.3 verwiesen werden.

Die Energiedichte bezogen auf das Schwungrad an sich kann in Anbetracht der Tatsache, dass eine Umfangsgeschwindigkeit von 1000 m/s vorliegt, durchaus als hoch bezeichnet werden. Negativ auf die volumetrische Energiedichte des Gesamtsystems wirkt sich nur die kardanische Aufhängung aus, welche ein Raumangebot von etwa 80x80x80 cm voraussetzt.

2. Leistung und Leistungsdichte des Schwungrades

Die maximal übertragbare Leistung ist durch den Controller des Motorgenerators des *FESS* elektronisch limitiert, um eine thermische Überlastung der Bauteile zu unterbinden. Es wird eine Dauerleistung von 110 kW und eine kurzfristige Spitzenlast von 150 kW erreicht, was beinahe einer Verdopplung der Leistung des primären Antriebsaggregates entspricht.

3. Einfluss der Kreiselkräfte

Zwar wurden die Kreiselkräfte im Zuge der Entwicklung tiefgehend analysiert, aus der Sicht des Kunden jedoch spielen sie eine untergeordnete Rolle, da die kardanische Aufhängung im normalen Fahrbetrieb sämtliche Störkräfte, die in Auflagerreaktion größer 3 g resultieren, filtert. Im Hinblick auf die Gesamtmasse des Fahrzeuges von beinahe 13.000 kg kann der Einfluss des *FESS* auf die Fahrdynamik als vernachlässigbar angenommen werden.

4. Rekuperation

Die Rekuperation lässt sich – da signifikant vom Fahrzustand abhängig – nur schwer exakt quantifizieren. Es lässt sich jedoch urteilen, dass die *Round-Trip-Efficiency* des vorliegenden Systems nicht die Werte einer rein mechanischen Energieübertragung erreichen kann. (Siehe auch Abbildung 71 in Kapitel 10.4 Punkt 4)

5. Selbstentladung des Schwungrades.

Leider liegen keine Ergebnisse eines *Spin-down-Tests* vor. Es liegt jedoch auf der Hand, dass der Einsatz von Magnetlagern und der sehr geringe Umgebungsdruck der Laufatmosphäre von 0,13 Pascal in einer deutlich geringeren Selbstentladung resultieren als bei den bisher analysierten Systemen.

6. Berst- und Crashesicherheit

In den Auflagen des Herstellers *Northrop-Grumman*, die der Zertifizierung des Schwungrades gelten, heißt es (frei übersetzt aus dem Englischen):

„Die mechanischen und elektrischen Komponenten des *ATTB* dürfen keinerlei Schaden oder Funktionseinschränkung aufweisen, wenn sie einem Schock von 20 g (11 ms, Halb-Sinus-Puls) in jede Richtung dreier normal aufeinander stehenden Achsen ausgesetzt werden.“

Diese Anforderung reicht auf jeden Fall aus, um das Flywheel einen *Repair-Crash*³³ sicher überstehen zu lassen. Zusätzlich ermöglicht die in Sandwichbauweise gehalten Karosserie eine lokal verstärkte Außenhaut und ein sehr gutes Crashverhalten. (71)

Problematischer könnte das Szenario bei einem Überschlag aussehen, da die Kardanische Aufhängung nur eine Kippbewegung von rund 20° zulässt!

³³ Siehe Anhang, Kapitel 2

Ein Unfallszenario, welches stärkere Beschleunigungen und/oder größere Winkeländerungen impliziert, ist jedoch für ein Fahrzeug dieser Art mit rein urbanem Einsatzgebiet höchst unwahrscheinlich und tritt auch in den Unfallstatistiken nicht auf. (56)

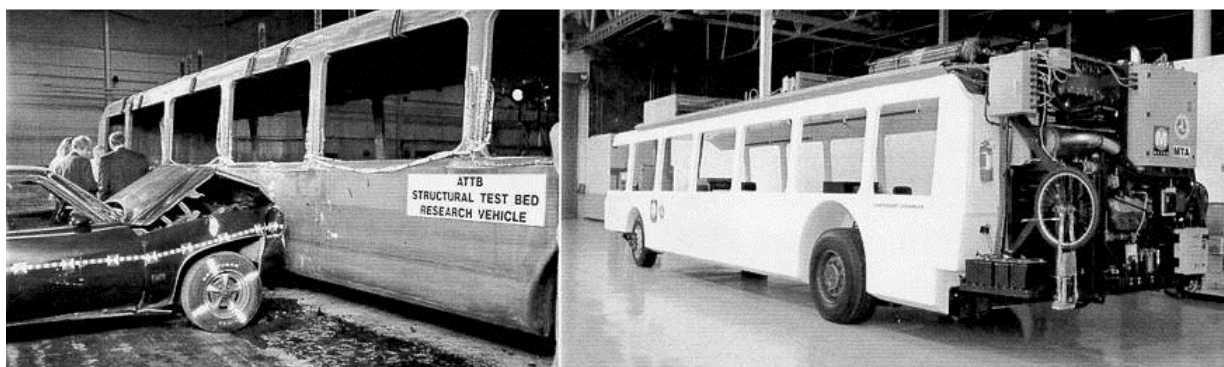


Abbildung 85: Crashtest der Fahrzeugkarosserie des ATTB (71)

7. Emissionsfreie Reichweite

Das emissionsfreie Zurücklegen von Streckenabschnitten ist im Betrieb des ATTB nicht vorgesehen, obwohl der Schwungradspeicher es aus energetischer Sicht zulassen würde. Aufgrund der Fahrzeugtopologie, in Abbildung 79 dargestellt, ist dies auch nicht möglich, da einige wichtige Nebenaggregate nur über das vom CNG-Motor versorgten 208V-Netz betrieben werden. Vollständig geräusch- und emissionsloser Betrieb - zumindest beim Anfahren - wäre aber aus marketingtechnischer Sicht ein effizientes Mittel, um das „grüne“ Image von Verkehrsbetrieben zu festigen.

8. Kraftstoffverbrauch und Gesamtwirkungsgrad

Die Kraftstoffersparnis liegt laut den Entwicklern bei bis zu 30% im urbanen Gebiet gegenüber Bussen vergleichbarer Größe mit herkömmlichem Antriebsstrang. Über den Kraftstoffverbrauch im Überlandgebiet liegen keine Angaben vor, was aufgrund der Tatsache, dass das Fahrzeug ausschließlich für den innerstädtischen Betrieb konzipiert ist, nicht von Relevanz ist. Wie viel Prozent der Ersparnis auf den konsequenten Leichtbau bzw. die Reduktion von 3 auf 2 Achsen und wie viel auf die Implementierung des FESS zurückzuführen ist, kann nicht exakt quantifiziert werden. Tatsache ist, dass die Kombination einer ganzen Reihe von verbrauchsmindernden Maßnahmen auf jeden Fall Sinn macht.

9. Beschleunigung

In (77) sind ausführliche Werte von unterschiedlichen Beschleunigungstests der ersten 6 Prototypen des ATTB, welche allerdings noch kein FESS besaßen, zu finden. Es liegt auf der Hand und geht auch aus den Testergebnissen hervor, dass ein Fahrzeug dieser Größe mit 157 kW Antriebsleistung eher schwach motorisiert ist. Somit dauerte eine Beschleunigung von 0-20 mph etwa 10 Sekunden, von 0-50 mph etwa 60 Sekunden. Aus einer persönlichen Korrespondenz mit Richard Hayes, einem der Entwickler um UT-CEM geht hervor, dass die Implementierung des Flywheels in einem äußerst zufriedenstellenden Fahrverhalten, welches auch auf tatsächlichen Teststrecken verifiziert wurde, resultierte.

10. Höchstgeschwindigkeit

Ähnlich der Beschleunigung sind die Anforderungen an den *ATTB* im Bezug auf die Beschleunigung nicht mit jenen an einen PKW zu vergleichen. Die rund 57 mp/h (= 92 km/h), welche der *ATTB* dauerhaft erreichen kann, können kurzfristig durch die Energie des Flywheels überschritten werden. Für ein Fahrzeug, welches einer urbanen Nahverkehrsflotte angehört, ist dieser Wert ausreichend, verweigert jedoch den Einsatz des *ATTB* z.B. als Shuttlebus zu Flughäfen, welche über die Autobahn erreicht werden müssen, da in diesem Fall eine Reisegeschwindigkeit von 110 km/h angebracht wäre. Generell drängt sich als Schlussfolgerung dieser Überlegungen – wieder einmal - der Gedanke auf, Fahrzeuge speziell an den Einsatzbereich anzupassen. Es wäre daher denkbar, eine zweite Motorisierungsvariante, also einen „City-*ATTB*“ und einen „Highway-*ATTB*“ anzubieten. Ersterer müsste einen Schwungradspeicher mit geringerem Energieinhalt, aber hoher Leistung besitzen, beim „Highway-*ATTB*“ lägen die Prioritäten genau umgekehrt.

11. Gesamtgewicht

Man muss die intensiven Bemühungen um die Gewichtsreduktion des Fahrzeuges in jedem Fall positiv bewerten. Dennoch darf man das Mehrgewicht durch die Hybridkomponenten nicht außer Acht lassen, wodurch die Fahrzeugmasse von 11365 kg wieder auf 12750 kg gestiegen ist.

12. Akustisches Verhalten.

Da der Generator für Drehzahlen von 900 bis 2700 U/min ausgelegt ist, erlaubt er zumindest einen Transientbetrieb des *CNG*-Motors, wodurch die Lärmbelastung wenigstens bei den Haltestellen deutlich reduziert werden kann. Wie bereits erwähnt, wäre aber eine Abschaltung des Motors bei Fahrzeugstillstand und/oder niedrigen Geschwindigkeiten bei gleichzeitiger Energieversorgung der Nebenaggregate und des Antriebes über das *FESS* äußerst vorteilhaft!

13. Lebensdauer und Wartung

Der *ATTB* ist für einen 15-jährigen Lebenszyklus ausgelegt. Durch das gänzliche Wegfallen mechanischer Übertragungselemente im Antriebsstrang können verschleißinduzierte Wartungen quasi vollends reduziert werden. Auch die regenerative Bremsung trägt ihren Teil dazu bei, die Wartungsintervalle zu verlängern, da die Betriebsbremse somit deutlich geschont wird und die Bremsbeläge nicht so oft gewechselt werden müssen. Was bleibt, sind die Öl- und Filterwechselintervalle der VKM.

14. Einfluss der Regelung auf den Komfort

An und für sich sieht der *ATTB* eine vollautomatische, elektronische Regelung des gesamten Antriebes und Energiemanagements inklusive diverser Sicherheitsoperationen wie thermischen Überlastungsschutz vor. Abgesehen davon, kann der Betreiber dem Betriebspersonal hinsichtlich der Steuerung des Fahrzeuges deutlich größere Kompetenzen zumuten als man es einem PKW-Kunden kann. Das heißt, der Fahrer des *ATTB* kann nach erfolgter Schulung das Fahrzeug im effizientesten Geschwindigkeitsbereich bewegen, ohne auf automatisierte Vorgaben der Elektronik angewiesen sein zu müssen.

15. Voraussichtlicher Gesamtpreis

Northrop-Garrett gibt für die Basisversion des Fahrzeuges ohne *FESS* einen voraussichtlichen Gesamtpreis von 300.000 USD an. Die Forschungs- und Entwicklungskosten betreffend den Schwungradspeicher müssen konsequenterweise vernachlässigt werden, da sie über öffentliche Fördergelder gedeckt wurden und somit nicht in den Verkaufspreis einfließen. Durch den Einsatz teurer High-End-Lösungen, wie z.B. aktive Magnetlager, sind aber auch die Produktionskosten des *FESS* im *ATTB* deutlich höher als bei den zwei bisher analysierten Systemen.

16. Design und Image

Der *ATTB* wurde inoffiziellen Angaben zu Folge in den USA auch oft als „Stealth Bus“ bezeichnet, was eine Anspielung auf das eigentliche Betätigungsfeld des Herstellers *Northrop-Grumman* ist, der unter anderem Tarnkappenbomber, so genannte *Stealth-Fighter* herstellte. Ob sich der Kunde der Verkehrsbetriebe dadurch sicherer fühlt oder diesen Gedanken abstoßend findet, ist wohl individuell verschieden. Tatsache ist, dass der Fahrzeughersteller den meisten Passagieren im öffentlichen Verkehr wohl weniger bedeutet als beim eigenen PKW. Was für das Image des Fahrzeuges sehr wohl positive Auswirkungen hätte, wäre die bereits erwähnte temporär emissions- und geräuschfreie Fahrt, sowie die Applikation von Photovoltaikzellen auf der Fahrzeugaußenhaut. Möglicherweise wäre auch ein aerodynamischeres Design (vergleiche Abbildung 75) von Vorteil, welches nicht nur den schlechten c_w -Wert von 0,65 korrigieren könnte³⁴, sondern auch darauf hinweisen könnte, dass es sich bei dem betrachteten Fahrzeug tatsächlich um „advanced technology“ handelt.

Die graphische Auswertung der oben diskutierten Punkte betreffend die erweiterte *Camelot-Methode* gestaltet sich wie auf der nächsten Seite ersichtlich:

³⁴ Bei einer 50 km/h schnellen, horizontalen Konstantfahrt treten laut den unter Punkt 11.3.5 aufgestellten Gleichungen Rollreibungsverluste von etwa 1500 N und ein Luftwiderstand von etwa 450 N auf.

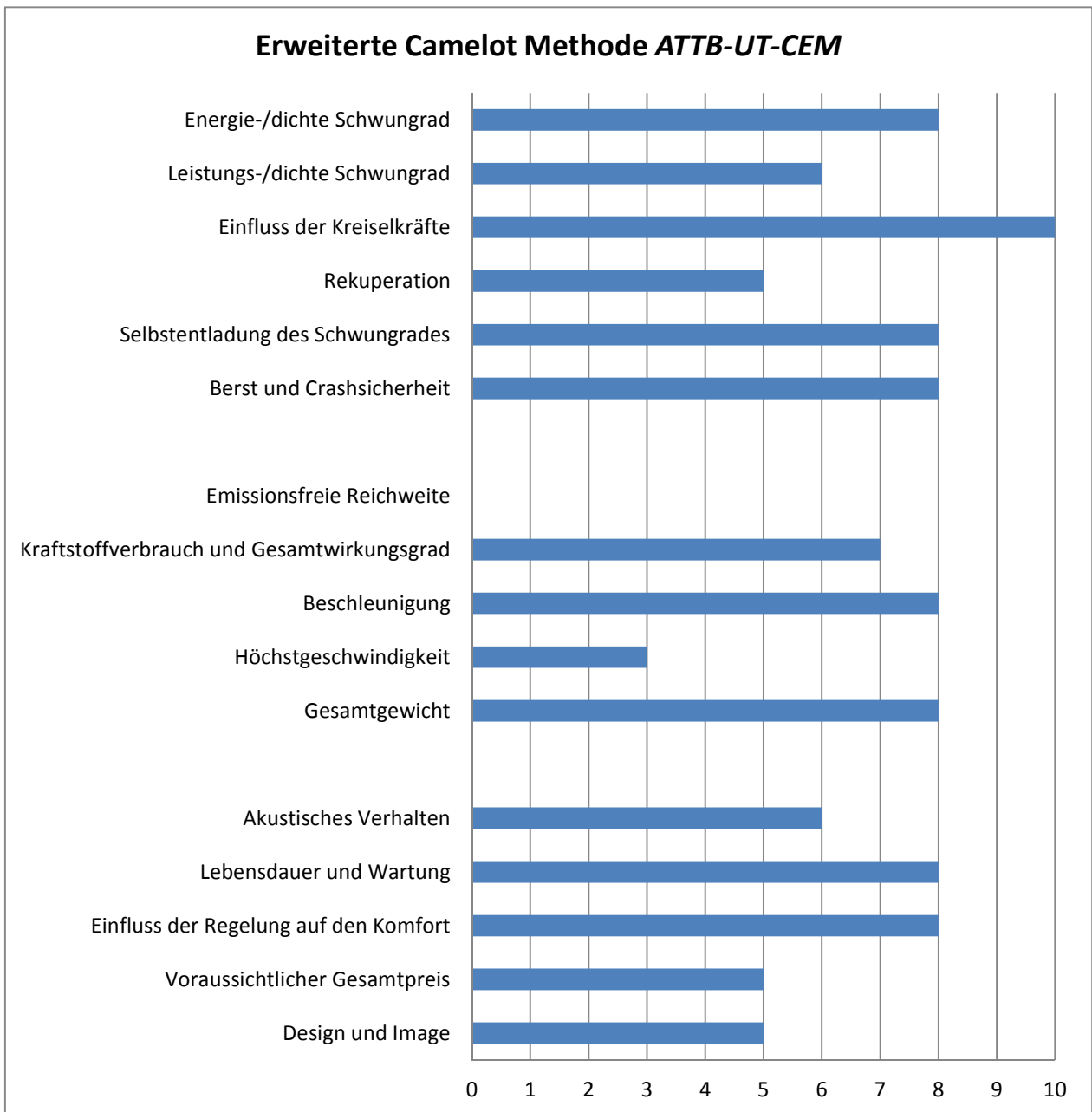


Abbildung 86: Erweiterte Camelot Methode des *ATTB, UT-CEM*

Nach Mittelwertbildung der einzelnen gegebenen Teilnoten ergibt sich eine durchschnittliche Gesamtnote von 6,44 Punkten von 10. Man erkennt, dass sich die Höchstwerte um die Eigenschaften des Schwungradspeichers an sich ansiedeln. Das Ergebnis ist nicht wesentlich besser als jenes des *Volvo S40*, mit 6,02 Punkten, obwohl das Fahrzeug in der Rubrik emissionsfreie Reichweite keine Punkte bekommt. Der Punktevorsprung gegenüber dem *VW T2* der RWTH Aachen, welcher 4,06 Punkte erreicht, ist klar auf die viel geringere Selbstentladung des Schwungrades und den Leichtbau zurückzuführen.

11.5 Morphologische Matrix des *ATTB*

Es gelten die gleichen Überlegungen wie in 9.5. Die im Falle des *ATTB* gewählten Ausführungen sind gelb hinterlegt.

Basisfahrzeug						
Fahrzeugart	LKW	PKW	Transporter	Bus	Zug	Motorrad
Antriebsart	Front	Heck	Konv. Allrad	Hybridallrad	Andere	
Hybridtechnologie						
Hybridart	Seriell	Parallel	Mischhybrid	Kein Hybrid		
Hybridklasse	Micro	Mild	Full	Power	Kein Hybrid	
Primäre Leistungseinheit	Ottomotor	Dieselmotor	Wankelmotor	Elektromaschine	Turbine	Schwungrad
Primärer Speicher	Schwungrad	Batterie	Supercap	Fossiler Brennstoff	Erneuerbarer Träger	
Sekundäre Leistungseinheit	Verbrennungskraftmasch	Schwungrad	Elektromaschine	Turbine	keine	
Sekundärer Speicher	Schwungrad	Batterie	Supercap	Fossiler Brennstoff	Erneuerbarer Träger	keiner
Energiemanagement						
Regelungsstrategie	Fahrer, voll manuell	Halbautomatisch	Kennfeldbasierend	Real-time, elektronisch	GPS gekoppelt	kine
Rekuperation	Elektrisch	Mechanisch	Hydraulisch	Pneumatisch	keine	
Versorgung der Nebenaggregate	Elektrisch	Mechanisch	Hydraulisch	Pneumatisch	konventionell (Basisfzg.)	Gemischt
Schwungrad						
Schwungradform	Scheibe konst. Festigkeit	Scheibe konst. Dicke	dünner Ring	Walzenform	Speichenrad	
Schwungradmaterial	Metall	Kunststoff	Verbundwerkstoff	Organischer Werkstoff	Werkstoffkombination	
Lagerung	Wälzlager	Gleitlager	Magnetische Lagerung	Konv. mit magn. Unterstüt	Supraleitened Magnete	
Energieübertragung	CVT Getriebe Schubglied	CVT Reibtegriebe	Stirnradgetriebe	Elektrisch	Hydraulisch	Pneumatisch
Aufhängung	Starr	biegeelastisch	Teil-Kardanisch	Vollkardanisch		
Kühlung	Wasserkühlung Stator	reine Konvektion	reine Strahlung	keine		
Gehäuseart	Berstschutz	Eingriffsschutz	Gasdichtes Gehäuse	keines		
Laufatmosphäre	Umgebung	Leichtes Gas	Schwaches Vakuum	Hochvakuum		

Tabelle 22: Morphologische Matrix des *ATTB*, *UT-CEM*

Da die Grundkonfiguration des Fahrzeuges einen seriellen Hybrid darstellt, sind die E-Maschinen, obwohl sie die einzigen direkten Antriebsmotoren sind, als *sekundäre Leistungseinheit* in der morphologischen Matrix zu bezeichnen. Dies ist bei einem Parallelhybrid hingegen eindeutig zu definieren, da ja meist zwei völlig autarke, separate Antriebsstränge vorliegen³⁵.

Das parallel zur seriellen Strukturvariante geschaltete Schwungrad macht das Gesamtkonzept zu einem *Mischhybrid*.

³⁵ Die Grundzüge der Hybridtechnologie und die Strukturvarianten der Antriebsstränge wurden im Anhang in Kapitel 1 ausgearbeitet.

11.6 Nutzwertanalyse des *ATTB*

Es gelten die gleichen Überlegungen wie in 9.6. Die vollständige Nutzwertanalyse ist dem Anhang zu entnehmen. In diesem Abschnitt werden nur die Ergebnisse diskutiert bzw. in Tabelle 23 nur ein kleiner Ausschnitt aus der Bewertungskategorie „Schwungrad“ gezeigt.

Schwungrad			
Schwungradmaterial	Verbundwerkstoff	Parametergewichtung	0,025
	Gewichtung (%)	Punkte	Zwischenwert
Herstellungsaufwand	0,1	6	0,6
maximale Energiedichte	0,3	8	2,4
Sicherheit im Berstfall	0,35	9	3,15
Innovationsgrad	0,05	5	0,25
Kosten	0,2	6	1,2
Summe	1		7,6
Schwungradlagerung	Magnetlager (Aktiv)	Parametergewichtung	0,025
	Gewichtung (%)	Punkte	Zwischenwert
Lebensdauer	0,2	10	2
Drehzahllimitierung	0,2	10	2
Verluste	0,3	6	1,8
Kosten	0,2	3	0,6
Adaptionsaufwand für mobile Anwendung	0,1	3	0,3
Summe	1		6,7
Energieübertragung	Elektrisch	Parametergewichtung	0,1
	Gewichtung (%)	Punkte	Zwischenwert
Herstellungsaufwand	0,05	5	0,25
Effizienz	0,4	4	1,6
Wartung	0,1	9	0,9
Einschränkung der Betriebsmodi	0,3	10	3
Kosten	0,15	3	0,45
Summe	1		6,2

Tabelle 23: Auszug aus der Nutzwertanalyse des *ATTB*

Die Zwischenwerte für die einzelnen Parameter sowie deren gewichtete Zwischenergebnisse und die Gesamtbewertung sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Kategorie	Parameter	Zwischenwert	Param.Gew.	Kateg.Gewichtung	Gewichteter Kategoriewert
Basisfahrzeug	Fahrzeugart	5,6	0,05	0,1	0,56
	Antriebsart	5,6	0,05		
Hybridtechnologie	Hybridart	5,9	0,05	0,35	2,125
	Hybridklasse	3	0,025		
	Prim. Leistungseinheit	6	0,075		
	Prim. Speicher	5,55	0,1		
	Sek. Leistungseinheit	7,9	0,05		
	Sek. Speicher	7,1	0,05		
Energiemanagement	Regelung	7	0,05	0,2	1,2
	Rekuperation	5,2	0,1		
	Nebenaggregate	6,6	0,05		
Schwungrad	Schwungradform	6,9	0,025	0,35	2,5075
	Schwungradmaterial	7,6	0,025		
	Schwungradlagerung	6,7	0,025		
	Energieübertragung	6,2	0,1		
	Aufhängung	7,9	0,05		
	Kühlung	7,6	0,05		
	Gehäuseart	8	0,05		
	Atmosphäre	7,3	0,025		
	Kontrollsumme		1	1	
	Gesamtbewertung:				6,3925

Tabelle 24: Ergebnis der Nutzwertanalyse des ATTB

Die Aussagekraft dieser, nunmehr dritten, Analyse eines Schwungradhybrides ist bereits signifikant höher als jene der zwei vorhergehenden (VW T2 der RWTH Aachen, aus Kapitel 9.6 und Volvo S40 aus Kapitel 10.6), da bereits Vergleichswerte verfügbar sind.

Das Ergebnis der NWA des ATTB lässt sich also den beiden bisherigen Werten gegenüberstellen.

Ergebnisse aller Nutzwertanalysen		
ATTB, UT-CEM: 6,39	Volvo S40, EUT: 6,61	VW T2, RWTH: 5,56

Es ist interessant und spricht gleichzeitig für die Objektivität des Bewertungsschemas, dass sich dieses Ergebnis nicht unbedingt mit den subjektiven Vermutungen des Autors deckt, der den ATTB a priori als „beste“ Konzept eingestuft hätte. Das Resultat steht auch im Gegensatz zu den mittels Camelot-Methode eruierten Werten. Es zeigt sich also, dass die Camelot-Methode deutlich intuitiver und endverbraucherorientierter bewertet als die Nutzwertanalyse, was ja auch im Sinne des Konzeptes ist.

Alle Ergebnisse der erweiterten Camelot Methode		
ATTB, UT-CEM: 6,44	Volvo S40, EUT: 6,02	VW T2, RWTH: 4,02

Worauf die Punktedifferenz der NWA zurückzuführen ist, bzw. wo vermutlich die gravierendsten Unterschiede liegen, darauf kann Abbildung 87 Antwort geben.

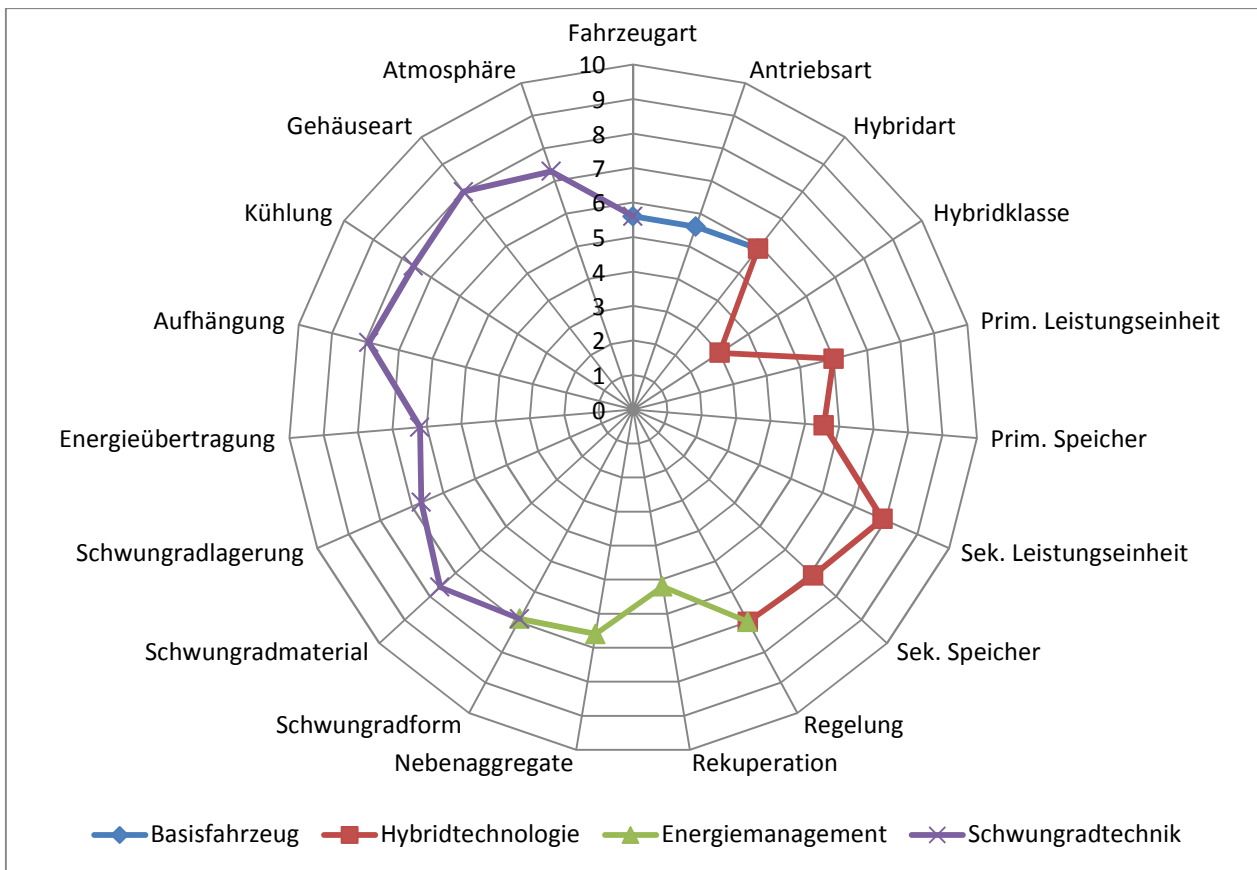


Abbildung 87: Graphische Darstellung der Ergebnisse der NWA des ATTB.

Als absoluter und offensichtlicher Schwachpunkt tritt gleich auf den ersten Blick die Kategorie *Hybridklasse* hervor. Das Ergebnis bedarf jedoch – wie immer – vorsichtiger Interpretation und eines erneuten Blickes in die NWA. Grund für den niedrigen Punktwert ist die nicht vorhandene emissionsfreie Reichweite. Die Hybridklasse an sich, nämlich der *Power Hybrid*, würde jedoch von allen Hybridklassen die größte emissionsfreie Reichweite erlauben, da sie über den Sekundärspeicher mit dem größten Energieinhalt verfügt. Dass der ATTB gar keine emissionslose Fahrt erlaubt, ist ein Problem der *Antriebsstrategie* und nicht der Hybridklasse!

Der Einknick bei der Rekuperation in der Rubrik *Energiemanagement* ist einzig und allein auf den geringen Gesamtwirkungsgrad dieser langen Prozesskette (wie in Abbildung 83 dargestellt) zurückzuführen.

11.7 Conclusio *ATTB*

Der *ATTB* vermag die Vorteile eines Schwungradspeichers besser zu nutzen als die bisher analysierten Systeme. Eine Applikation in einem großen, schweren Fahrzeug, kombiniert mit täglichem Einsatz im urbanen Gebiet macht die Hybridtechnologie mit *FESS* besonders rentabel. Leichtbau und Lastpunktverschiebung zusammen ermöglichen ein drastisches *Down-Sizing* der VKM. Obwohl man sich getrost zu der Aussage hinreißen lassen kann, dass es sich beim *ATTB* um eines der am besten für die Schwungradhybridisierung geeigneten Fahrzeuge handelt, stehen oder standen der erfolgreichen Serienfertigung einige Nachteile im Wege. Die mehrfache Energiewandlung zerstört den Großteil des zweifelsfrei hohen theoretischen Potentials dieser Fahrzeugtopologie, welche ein extrem flexibles Design und lange Wartungsintervalle bei kurzen Standzeiten während des Services ermöglicht. Eigenschaften, die besonders für öffentliche Verkehrsbetriebe wertvoll sein können.

11.7.1 SWOT-Analyse des *ATTB*

Die SWOT-Analyse fasst die wesentlichen Erkenntnisse um den *ATTB* auf übersichtliche Art und Weise zusammen.

SWOT-Analyse		Interne Analyse	
		Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)
E x t e r n e A n a l y s e	Möglichkeiten (Opportunities)	<ul style="list-style-type: none"> • 30% Verbrauchersparnis gegenüber konventionellen Bussen • Extrem geringer Wartungsaufwand und geringere Betriebskosten • Komfortable, elektronische Regelung • Gute Servicefähigkeit durch modularen Aufbau • Sehr gute Eignung für den geplanten Einsatz (innerstädtisch) 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativ geringe Fahrleistungen • Keine lokal emissionsfreie Fahrt • Geringer Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstranges • Hohe Mehrkosten des <i>FESS</i> durch Magnetlager und teure Werkstoffe.
	Gefahren (Threats)	<ul style="list-style-type: none"> • Möglicherweise zu geringe Fahrleistungen für außerstädtischen Betrieb • Kunde nimmt aufgrund der äußeren Erscheinung das technische Niveau des Fahrzeuges nicht wahr • Die Antriebsstruktur könnten den Abnehmern zu „komplex“, unbekannt und fehleranfällig vorkommen 	<ul style="list-style-type: none"> • Betrieb der Nebenaggregate (da rein elektrisch) über Solarstrom möglich • Verkaufszahlen in erster Linie durch die Wirtschaftlichkeit des Fahrzeuges beeinflusst – großer Absatz möglich! • Hohe Flexibilität beim Austausch / Service von Nebenaggregaten

Abbildung 88: SWOT-Analyse des *ATTB*

Conclusio

Wichtige Erkenntnisse betreffend die Bewertungsstrategie

1. Die Erstellung der Bewertungsstrategie ist ein iterativer Prozess, der erst durch wiederholte Anwendung derselben auf unterschiedliche Systeme bei gleichzeitiger Adaption optimiert werden kann. Ist die Strategie jedoch fertiggestellt und ausgereift, so kann sie schnell und effizient für eine erste Konzeptanalyse eingesetzt werden. Besonders die im *Microsoft Excel* automatisierte Nutzwertanalyse liefert rasch vergleichbare, graphische Ergebnisse.
2. Die Bewertungsstrategie kann kein eindeutiges, quantitatives Ergebnis liefern, zeigt jedoch mögliche Schwachstellen und Potentiale gut erkennbar auf und erweist sich somit als adäquate Gedankenhilfe für den Analyse- und den weiter folgenden Entwicklungsprozess. Die Strategie gewinnt besonders durch Anwendung auf mehrere Konzepte mit anschließendem Vergleich der Ergebnisse an Aussagekraft.
3. Eine gute Möglichkeit die Schärfe und Aussagekraft der Bewertung zu steigern wäre, diese von einer Vielzahl unabhängiger Personen auf ein und dasselbe Schwungradfahrzeug anwenden zu lassen und einen Mittelwert der Ergebnisse zu bilden. Allerdings müsste sichergestellt sein, dass alle bewertenden Ingenieure über ein gutes Grundwissen bezüglich der Materie verfügen.

Wesentliche Erkenntnisse betreffend die Schwungradtechnologie

1. Das Schwungrad als Energiespeicher für mobile Anwendungen erweist sich nach Meinung des Autors als geeignete und wichtige Methode für den Schritt in Richtung Fahrzeughybridisierung. Es ist durchaus angebracht, sich dieser Technologie ein weiteres Mal zu widmen, da Hybridfahrzeuge mit der mittlerweile doch recht gut erforschten Batterietechnologie sowie den ebenfalls aufstrebenden Supercaps nur zu mäßigen Erfolgen geführt haben und bislang keine starke Marktdurchdringung erreichen konnten.
2. Der Einfluss der äußeren Umstände auf die Entwicklung der Schwungradfahrzeuge wie in Kapitel 7.1 beschrieben ist eklatant. Die aktuelle wirtschaftliche und umweltpolitische Situation begünstigt die Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Sektor der Hybrid- und vor allem auch Schwungradfahrzeuge.
3. Es ist nicht möglich eine allgemeingültige Aussage darüber zu tätigen, welche Art des Schwungradhybrides absolut gesehen die lohnendste ist. Der scheinbaren Verbesserung einer Lösung durch Veränderung der Topo- und Morphologie des Schwungradspeichers bringt meist weitere, andere Komplikationen mit sich, sodass immer ein Zielkonflikt vorliegt, der es erforderlich macht, einen Kompromiss einzugehen. Ein Beispiel, welches eine Verkettung dreier Zielkonflikte beinhaltet, sei zur Veranschaulichung in Abbildung 89 skizziert und anschließend beschrieben.

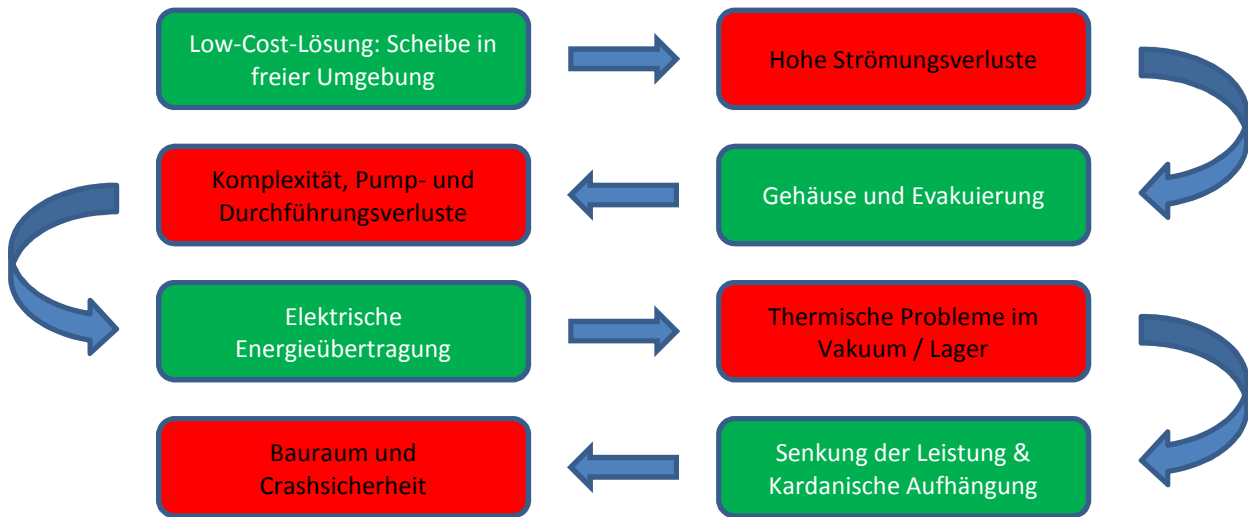


Abbildung 89: Der Schwungradspeicher als multidimensionales Optimierungsproblem

- ➔ Die einfachste Lösung, ein scheibenförmiger Rotor in freier Umgebungsatmosphäre laufend und mit mechanischer Anbindung, erzeugt erhebliche Strömungsverluste. Versucht man diese durch Evakuierung zu umgehen, entstehen neben dem eklatant höheren Konstruktionsaufwand des Vakuumgehäuses weitere Verluste, nämlich jene der Vakuumdurchführung und der Pumpe.
- ➔ Versucht man in weiterer Folge die Durchführungsverluste zu vermeiden, indem man auf elektrische Energieübertragung setzt und einen Motorgenerator integriert, so stößt man auf thermische Probleme, da die Verlustleistung der elektrischen Maschine im Vakuum nur schwer abzuführen ist.
- ➔ Hat man die thermischen Probleme nun gelöst und versucht man die Vorteile der elektrischen Energieübertragung völlig auszuschöpfen, indem man den elektromechanischen Speicher kardanisch aufhängt, um die gyroskopischen Kräfte zu reduzieren, so stellt man fest, dass der für eine Crash-sichere Ausführung benötigte Bauraum eklatant ansteigt.

Diese Kette von „Trade-Offs“ könnte beinahe bis ins Unendliche fortgesetzt werden und durchaus dazu führen, dass man sich gezwungen sieht, das ursprünglich gewählte Konzept zu verwerfen. Die Topologie des Schwungradhybrides muss daher im konkreten Einzelfall quantitativ untersucht und bewertet werden, wobei eine ausführliche numerische Simulation oder analytische Berechnung empfehlenswert ist, um Fragen wie die erforderliche Größe des Energieinhaltes, die auftretenden (Kreisel-)Kräfte, das thermische Verhalten, etc. abschätzen zu können. Die Rentabilität des Gesamtsystems „Schwungradspeicher“ hängt stark von den Teilverlusten ab (58). Die Auslegung eines Schwungradspeichers ist ein multidimensionales Optimierungsproblem.

4. Es ist jedoch möglich, eine Aussage über die Entwicklungstrends zu machen, die zurzeit eine Lösung der Energieübertragung über den elektrischen Weg favorisieren. Grund hierfür ist das theoretische (aber aktuell noch ferne!) Entwicklungspotential dieser Lösung:

- Große Freiheit in der Anordnung der Komponenten.
- Das elektromechanische Flywheel stellt stets hohe elektrische Leistung zu Verfügung. Das führt zu der Lösung des Problems der starken Belastung der Boardelektrik durch Nebenaggregate und „Luxus-Features“ (Sitzheizung, Massagesitze, aktive Sicherheitskomponenten, etc.). – Dadurch ist sogar erheblicher Mehrwert möglich!
- Wird der Wirkungsgrad der elektrischen Maschinen weiterhin gesteigert, so können auch die thermischen Probleme eines komplett im Vakuum laufenden Speichers eliminiert werden und somit kann eine äußerst geringe Selbstentladung erreicht werden.
- Kurze Reaktionszeiten und geringe Trägheit der Regelung des Rekuperationsgrades und somit gute Kompatibilität mit aktiven und passiven Sicherheitssystemen des Fahrzeuges. (Vergleiche Punkt 7 der *Conclusio*)

Auf dem Weg dorthin gilt es noch die Wirkungsgrade der elektrischen Komponenten zu erhöhen sowie deren Kosten zu senken!

5. Zwar können bei mechanischer Energieübertragung aktuell sehr hohe Leistungsdichten und Wirkungsgrade erreicht werden, aber das Entwicklungspotential für die nahe Zukunft bleibt beschränkt, da es nicht möglich sein wird, ohne Vakuumdurchführung auszukommen bzw. den Wirkungsgrad von Stirnradgetrieben, CVT- oder Reibgetrieben weiterhin *signifikant* zu steigern.

6. Besondere Eignung für die Einführung weist aktuell der Nah- und dabei vor Allem der Schienenverkehr auf, da:

- Einsatzbereich und Lastkollektiv bei PKWs deutlich exakter zu definieren sind und üblicherweise auch die auftretenden (Nick-, Gier- und Wank-) Beschleunigungen geringer sind als bei PKWs, wodurch die Lagerkräfte des Schwungradspeichers geringer gehalten werden können oder durch kardanische Aufhängung bis zu beinahe 70% eliminiert werden können. (75)
- Zwar spielt das Gewicht auch bei großen, kommerziell genutzten Fahrzeugen eine entscheidende Rolle, aber das Platzangebot kann generell betrachtet doch als großzügiger als bei den meisten PKWs angesehen werden.
- Der öffentliche Nahverkehr steht oft im medialen Rampenlicht und verstand es seit jeher, sein grünes Image durch das Etablieren neuer, umweltfreundlicher Technologien zu verbessern³⁶ und somit eine Art Vorreiterrolle einzunehmen. Dadurch kann die Gesellschaft mit der neuen Technologie vertraut werden, ohne das Risiko eingehen zu müssen, diese selbst kaufen und testen zu müssen, wodurch der Markteintritt erleichtert werden könnte.

³⁶ Vielerorts sind Wasserstoff-, Erdgas- oder elektrisch betriebene Busse sowie Hybridbusse im Einsatz.

7. Um der Nutzbremmung zum Durchbruch in die Serienfertigung zu verhelfen, ist es nicht nur notwendig, den Gesamtwirkungsgrad der energetischen Umwandlungskette vom Rad zum Flywheelspeicher und wieder retour zu steigern, sondern auch möglichst große Bremsleistungen (bis an die Schlupfgrenze herangehend) vom Rad abzuzweigen. Dies erfordert einerseits eine Änderung des Fahrverhaltens, andererseits eine feine Abstimmung der Nutzbremmung mit aktiven Sicherheitsfeatures wie ABS oder ESP sowie eine Rekuperation über die Vorderräder. In der Literatur konnten keine Publikationen zu diesem Thema gefunden werden.

Zum Abschluss dieser Arbeit seien zwei Zitate angeführt, welche die größten Chance und zugleich größten Risiken der Schwungradtechnologie betreffen.

Im Zuge der Analyse des *Advanced Technology Transit Bus* schrieb *Larry Hawkins* Gründer und *Director of Technology* der Firma *Calnetix* in einer E-Mail-Korrespondenz mit dem Autor:

“The program [of the ATTB] was a technical success, but didn't get follow on funding to commercialize.”

Und die Situation war auch vor 15 Jahren nicht anders. Major Richard Cope, von der *Advanced Research Projects Agency (USA)* sagte 1994 über die Energiespeicherung in Flywheels:

“The vision, the Technology and the payoff are all clear. But three problems stand in the way: Costs, costs and costs!”

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Massenpunkt auf einer Kreisbahn (3).....	6
Abbildung 2: Gedankenexperiment zur dynamischen Grundgleichung (3)	7
Abbildung 3: Umlaufende Vollscheibe mit Volumenelement (6).....	9
Abbildung 4: Spannungsverlauf in der gebohrten, umlaufenden Scheibe (6).....	10
Abbildung 5: Mögliche Welle-Scheibe-Verbindungen zur Reduktion der Spannungen.....	11
Abbildung 6: Scheibe gleicher Festigkeit (6)	11
Abbildung 7: Arten der Energiespeicherung	13
Abbildung 8: Ragone Plot verschiedener Energiequellen, erweitert aus den Daten von(10).....	15
Abbildung 9: Zuwachs der Lithium-Ionen-Batterieindustrie (12).....	18
Abbildung 10: Leistungsbedarf und Geschwindigkeitsprofil des FTP-Zyklus (15).....	21
Abbildung 11: Anzahl der geplanten und tatsächlichen Schwungradfahrzeuge	26
Abbildung 12: Modell von Kulibins Dreirad im technischen Museum in Moskau (16).....	27
Abbildung 13: Der Gyrobus (links) (19) und der britische <i>Gyreacta</i>	28
Abbildung 14: Das <i>Popular Science</i> Magazin von 1970 (li.) und 1994 (re.)	28
Abbildung 15: Schwungradspeicher im Rennfahrzeug: Schnitt durch den Porsche GT3	29
Abbildung 16: Einflüsse auf den Entwicklungsverlauf	30
Abbildung 17: Verlauf des weltweiten Fahrzeugbestandes.....	31
Abbildung 18: Gegenüberstellung Rohölpreis und Entwicklung von Schwungradfahrzeugen	32
Abbildung 19: Verlauf der Verschärfung der Abgasnormen für PKWs mit Dieselmotor	33
Abbildung 20: Stationärer Schwungradspeicher Model <i>T2</i> der Firma <i>Rosseta GmbH</i> (23)	34
Abbildung 21: Der gyroskopisch stabilisierte zweirädrige PKW <i>Ford Gyron</i> von 1961 (25).....	35
Abbildung 22: Preisentwicklung der Kohlenstoffaser, erstellt aus Daten von (28) und (29).....	36
Abbildung 23: Masse an Kohlefaserprodukten nach Sparte und ersichtliches Wachstum (27)	36
Abbildung 24: Schwebender Magnet über gekühltem Supraleiter	37
Abbildung 25: Verlauf der Herstellungskosten pro Transistor auf einem Halbleiter-IC (34).....	38
Abbildung 26: Typischer Aufbau einer Ferrofluidichtung (35)	39
Abbildung 27: Übersicht der Fahrzeugtypen unter den Schwungradfahrzeugen	40
Abbildung 28: Statistischer Trend der Maximaldrehzahl von Schwungradspeichern.....	41
Abbildung 29: <i>CATIA</i> [®] -Darstellung des Chrysler Patriot zu Beginn der 1990er Jahre (36).....	42
Abbildung 30: Statistischer Trend des Energieinhalts von Schwungradspeichern	43
Abbildung 31: Das hybride Antriebssystem der <i>AutoTram</i> (37).....	44
Abbildung 32: Statistischer Trend der Energiedichte von Schwungradspeichern.....	46
Abbildung 33: Zunahme der Eignung für die Schwungradhybridisierung.....	48
Abbildung 34: Einteilung der <i>Flywheel-powered Vehicles</i> nach Fahrzeugart.....	49
Abbildung 35: Einteilung der Schwungradfahrzeuge nach Art der Energieübertragung	50
Abbildung 36: Beispiel eines Blockschaltbildes für ein Hybridfahrzeug (46).....	53
Abbildung 37: <i>Sankey-Diagramm</i> eines elektro-mechanischen Schwungradspeichers (47)	54
Abbildung 38: Beispiel für die Anwendung der <i>modifizierten Camelot-Methode</i> (<i>Auszug</i>).....	56
Abbildung 39: Baumdiagramm zur systematischen Strukturzerlegung des Schwungradhybrides	58
Abbildung 40: Spinnendiagramm zur Visualisierung der NWA mit korrekter Reihenfolge	60
Abbildung 41: Spinnendiagramm zur Visualisierung der NWA mit inkorrektter Reihenfolge	61
Abbildung 42: Systematisches Strukturieren durch das Baumdiagramm für die NWA	62
Abbildung 43: Aufbau der SWOT-Analyse, adaptiert aus (43)	63
Abbildung 44: Veränderung des Teilzielkriteriums <i>Verluste der Schwungradlagerung</i>	65
Abbildung 45: Veränderung aller Teilzielkriterien des Parameters <i>Schwungradlagerung</i>	65
Abbildung 46: Außenansicht des Versuchsfahrzeuges VW T2 der RWTH Aachen (48).....	66
Abbildung 47: Bild des zusammengebauten Hybridantriebes des VW T2 der RWTH Aachen ...	67
Abbildung 48: Horizontalschnitt durch das Umlaufgetriebe des VW T2 der RWTH Aachen	68

Abbildung 49: Prinzipskizze des VW T2 der RWTH Aachen	69
Abbildung 50: Nomogramm des Hybridantriebes des VW T2 der RWTH Aachen (50).....	70
Abbildung 51: Allgemeine Strömungsverluste P_{VR} eines Schwungrades	71
Abbildung 52: Spezifisch kumulierte CO ₂ -Emissionen für einen Mittelklasse PKW	73
Abbildung 53: Gebiete maximalen Wirkungsgrades der unterschiedlichen E-Maschinen	74
Abbildung 54: Muscheldiagramm des Verbrennungsmotors des VW T2 Hybrides	75
Abbildung 55: Rückgewinnbare kinetische Energie über Verzögerung.....	79
Abbildung 56: Erweiterte Camelot Methode VW T2 RWTH Aachen.....	80
Abbildung 57: Graphische Darstellung der Ergebnisse der NWA des VW T2.....	83
Abbildung 58: SWOT-Analyse des VW T2 der RWTH Aachen	84
Abbildung 59: Außenansicht des Versuchsfahrzeuges Volvo S40 der EUT, Eindhoven (58).....	85
Abbildung 60: Querschnitt der Schwungradeinheit des Volvo S40 der EUT	87
Abbildung 61: Prinzipskizze des Volvo S40 der EUT	88
Abbildung 62: Wirkungsgrade des vollkommenen Motors.....	89
Abbildung 63: Muscheldiagramm des Ottomotors E7J mit Betriebspunkten	90
Abbildung 64: Getriebewirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl und der Last.....	91
Abbildung 65: Kräftesituation beim Van Doorne Schubgliederband (62)	92
Abbildung 66: Wirkungsgrad und Verlustleistung der Kettentypen nach <i>Dietrich</i> (62).....	93
Abbildung 67: Verbesserung des Wirkungsgrades von Schubgliederbändern.....	93
Abbildung 68: Strömungssituation bei einem schnelldrehenden Schwungrad (28).....	94
Abbildung 69: Qualitativer Verlauf des Strömungsverlusts und der Pumpleistung.....	95
Abbildung 70: Beispiel einer Ferrofluid-Vakuumdurchführung mit 20mm-Schaft	96
Abbildung 71: Ungünstige Wirkungsgradkette bei zweifacher Energiewandlung.....	98
Abbildung 72: Erweiterte <i>Camelot Methode</i> Volvo S40 der TU Eindhoven	104
Abbildung 73: Graphische Darstellung der Ergebnisse der NWA des Volvo S40 der EUT.....	107
Abbildung 74: SWOT-Analyse des <i>Volvo S40</i> der <i>EUT</i>	109
Abbildung 75: Außenansicht des <i>Northrop-Grumman Advanced Technology Transit Bus</i> (71) 110	
Abbildung 76: Schwungradmodul des <i>ATTB</i> , entwickelt am <i>UT-CEM</i> (55)	111
Abbildung 77: Verschiedene Bauweisen eines elektromechanischen Schwungradspeichers	112
Abbildung 78: Heckansicht des <i>ATTB</i> (li.) und Schwingarme mit Nabenmotoren (re.) (77)	114
Abbildung 79: Fahrzeugabstraktion des <i>Advanced Technology Transit Bus</i>	115
Abbildung 80: Die VKM des <i>ATTB</i> – Detroit Diesel Series 30 G (78).....	116
Abbildung 81: Flüssiggasheizung Modell <i>Trumatic E 4000 A</i> der Firma <i>Truma</i> (82).....	118
Abbildung 82: Leistungs-Effizienz-Diagramm der E-Maschine <i>PowerPhase</i> [®] 200 (83).....	119
Abbildung 83: Prozesskette der Energiewandlung im Antriebsstrang des <i>ATTB</i>	119
Abbildung 84: Elektromagnetische Kräftesituation in einem Magnetlager (84).....	121
Abbildung 85: Crashtest der Fahrzeugkarosserie des <i>ATTB</i> (71)	124
Abbildung 86: Erweiterte <i>Camelot Methode</i> des <i>ATTB-UT-CEM</i>	127
Abbildung 87: Graphische Darstellung der Ergebnisse der NWA des <i>ATTB</i>	131
Abbildung 88: SWOT-Analyse des <i>ATTB</i>	132

Literaturverzeichnis

1. **G. Niemann, H. Winter, B. Höhn.** *Maschinenelemente*. München : Springer Verlag, 1982. Bd. I. ISBN 0387068090.
2. **Jürgens, Gunter.** *Entwicklungsmethodik - Vorlesungsskriptum*. Graz : Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik, 2010.
3. **Jäger, H.** *Experimentalphysik, 25. Auflage*. Graz, Österreich : Institut für Experimentalphysik, TU Graz, 2000.
4. **Hawkins, Lawrence.** [Hrsg.] *Shock and Vibration Testing of an AMB Supported Flywheel*. The 8th Intl. Symp. on Magnetic Bearings. Mito, Japan : s.n., 2002.
5. **Magnus, Kurt.** *Kreisel - Theorie und Anwendungen*. Berlin : Springer, 1971. ISBN 0-387-05198-8 .
6. **Feldhusen, K.-H. Grote und J. Dubbel** - *Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin : Springer Verlag, 22. Auflage, 2007. ISBN 978-3-540-49714-1.
7. **Selke, B. Assmann und P.** *Technische Mechanik - Band 2: Festigkeitslehre*. München : Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH, 16. Auflage, 2006. ISBN 3-486-57721-2.
8. **Strößenreuther, Florian.** *Machbarkeitsstudie und Konzept einer stationären Schwungradanlage zur dezentralen, verbraucherorientierten Energiespeicherung (Diplomarbeit)*. Aachen : Lehrstuhl für Dampf- und Gasturbinen, 1996.
9. **Wollert, Jörg.** *Hybridtechnologie - Auf dem Weg zur Elektromobilität*. Deutschland : Vortrag - Hochschule Bochum, 2009.
10. **Elektropaedia.** *Elektropaedia. Battery and Energy Technologies*. [Online] Woodbank Communications Ltd, 2010. [Zitat vom: 12. Juni 2010.] www.mpoweruk.com.
11. **Naunin, Dietrich.** *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge*. Renningen, Deutschland : Espert Verlag, 4. Auflagen 2007. ISBN-10: 3-8169-2625-2.
12. **IKA RWTH Aachen - Institut für Kraftfahrzeugtechnik.** *Roads2HyCom. Battery and Supercapacitor*. [Online] 2010. [Zitat vom: 18. 12 2010.] http://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/index.php/Battery_and_Supercapacitor#figure1.
13. **G. Fischer, G. Götz und J. Michael.** Anforderungen an die Auslegung von Hybridvarianten. [Buchverf.] Verrein Deutscher Ingenieure. *VDI Berichte 1459*. München : VDI Gesellschaft, 1999.
14. **EnergyProfi.com.** Speicher für mechanische Energie im Nahverkehr . *EnergyProfi.com, Strada Plinio Bolla, 6922 Morcote, Tessin, Schweiz*. [Online] Energyprofi GmbH i.Gr., 2010. [Zitat vom: 18. 12 2010.] <http://www.energyprofi.com/jo/Speicher-fuer-mechanische-Energie-im-Nahverkehr.html>.
15. **G. Fischer, G. Götz, J. Michael.** Anforderungen an die Auslegung von Hybridantrieben. [Buchverf.] Verein Deutscher Ingenieure. *VDI-Berichte Nr. 1459 - Hybridantriebe*. München : s.n., 1999.
16. **Gulia, N.V.** *Der Energiekonserve auf der Spur*. Moskau : Verlag Harri Deutsch, Thun, 1986. ISBN: 3-81-71-1109-6.
17. **Lampe, David.** Flywheel: The "Battery" that Spins. *Popular Mechanics*. 1974, November 1974.
18. **Ruddell, Alan.** *Investigation on Storage Technologiesfor Intermittent Renewable Energies: Evaluation and recommended R&D strategy*. STORAGE TECHNOLOGY REPORT, INVESTIRE Thematic Network. Didcot, England : CCLRC-Rutherford Appleton Laboratory, 2003. THEMATIC NETWORK CONTRACT N° ENK5-CT-2000-20336.
19. **Leutwiler, Ernst B.** Gyrobus. *Tram*. 1991, 1/91. http://www.tram-museum-archiv.ch/Seiten_Zueribus/gyrobus-D.shtml.
20. **Porsche Cars North America, Inc.** 911 GT3 R Hybrid Celebrates World Debut in Geneva. *Current Press Releases*. [Online] Porsche Cars North America, Inc., 2. November 2011. [Zitat

vom: 20. Juni 2011.]

<http://www.porsche.com/usa/aboutporsche/pressreleases/pag/?pool=international-de&id=2010-02-11>.

21. **Fish, Michael.** Where Global Warming Comes From. *GlobalTrees.co.uk*. [Online] 2006. [Zitat vom: 12.. April 2011.] http://www.globaltrees.co.uk/facts_.php.

22. **Renner-Smith, Susan.** Flywheels in Space - Better than Batteries. *Popular Science*. August 1980.

23. **Roseta Technik GmbH.** *Produktbeschreibung Schwungradspeicher T2*. [PDF-Dokument] Roßlau, Deutschland : Roseta Technik GmbH, 2002.

24. **Armagnac, Alden P.** Flywheel Brakes. *Popular Science*. Februar 1974.

25. **Petersen, Robert.** 1961 Ford Gyron. *CAR Styling*. [Online] [Zitat vom: 12.. April 2011.] http://www.carstyling.ru/de/car/1961_ford_gyron/images/6206/.

26. **Renner-Smith, Susan.** Energy Storgae: Search for the Perfect Flywheel. *Popular Science*. Januar 1980.

27. **Leif Ickert, René Henn, Stefan Gies, René Göbbels und Kai Fischer.** CFK-Leichtbauteile für den Einsatz in einem Rennwagen. [Buchverf.] Deutschland RWTH Aachen. 39. *Fachtagung "Prozesskette Karosserie"*. Aachen : s.n., 2008.

28. **von Burg, Peter.** *Schnelldrehendes Schwungrad aus Faserkunststoff*. Zürich : ETH Zürich, 1996. Dissertation.

29. **Hautmann, Daniel.** Kohlefasern dringend gesucht. *WELT Online*. [Online] Axel Springer AG, 17.. September 2006. [Zitat vom: 12.. April 2011.] http://www.welt.de/print-welt/article153220/Kohlefasern_dringend_gesucht.html.

30. **Ries, G. & Werfel F.** In der Schwebel: Supraleitende Magnetlager. *Physik in unserer Zeit*. Volume 35, 2004, Issue 3, S. 134-140.

31. **Werfel, F.N.** Magnetgelagerte Schwungradmassenspeicher. [Buchverf.] Verein Deutscher Ingenieure. *VDI Berichte 2009*. Adelwitz Technologiezentrum GmbH (ATZ), Arzberg - Adelwitz : Verein Deutscher Ingenieure.

32. **FAG Kugelfischer AG.** *FAG Hybrid-Rillenkugellager, Technische Informationen*. [PDF-Dokument] Schweinfurt : FAG Kugelfischer AG, 2003.

33. **Robert Hebner, Joseph Beno, Alan Walls.** Flywheel Batteries Come Around Again. *IEEE Spectrum*. April 2002.

34. **Ross, Philip E.** Semiconductors / Materials. *ieee Spectrum*. [Online] IEEE Headquarters, 3 Park Avenue, New York, Dezember 2003. [Zitat vom: 13.. April 2011.] <http://spectrum.ieee.org/semiconductors/materials/5-commandments/0>.

35. **Flitney, Robert.** *Seals and Sealing Handbook, Fifth Edition*. Fünfte Ausgabe. Burlington : Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 978 1 85617 46 19.

36. **Zatz, David.** The Chrysler Patriot: Turbine-Powered Hybrid Racing Car. *Allpar*. [Online] Allpar LLC, 1998-2002. [Zitat vom: 18.. Juni 2011.] <http://www.allpar.com/model/patriot.html>.

37. **Elek Sähn, Abteilung für Presse und Öffentlichkeitsarbeit.** *AutoTram® - Transportsystem der Zukunft (Presseaussendung)*. [PDF] Dresden, Deutschland, Sachsen : Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme, 2006.

38. **Hilton, Jon.** Flybrid Flywheel Hybrid System Passes First Crash Test; Developing for Road Cars as Well. *Green Car Congress*. [Online] BioAge Group, LLC, 28. Oktober 2007. [Zitat vom: 23. Juni 2011.] <http://www.greencarcongress.com/2007/10/flybrid-flywheel.html>.

39. **Roseta Technik GmbH.** *Energiespeicher für Systeme zur autarken Energieversorgung*. Karl-Liebknecht-Straße 38, 06862 Roßlau / Elbe : Roseta Technik GmbH, 2006.

40. **Lindsley, E.F.** Hybrid Car: Part-Time Engine + Part-Time Flywheel = Full-Time Transportation. *Popular Science*. 1973, August 1973.

41. **Renner-Smith, Susan.** The Coming Era of Flywheel Buses. *Popular Science*. 1981, August 1981, S. 62.

42. **Flybrid Systems LLP.** Flybridsystems Technology. [Online] Flybrid Systems LLP, 2011. [Zitat vom: 08. Juni 2011.] <http://www.flybridsystems.com/Technology.html>.
43. **Wikipedia - Verschiedene Autoren.** SWOT-Analyse. *Wikipedia*. [Online] 2010. [Zitat vom: 9. 1 2010.] <http://de.wikipedia.org/wiki/SWOT-Analyse>.
44. **James M. Higgin, Gerold G. Wiese.** *Innovationsmanagement*. München : Springer Verlag, 1996. 3-540-6057-X.
45. **Steinschaden, Johannes.** *Lehrgang Konstruktionsmethodik*. Kommission der Europäischen Gemeinschaften im Rahmen des Programmes LEONARDO DA VINCI. Dornbirn : Fachhochschul Studiengänge Vorarlberg GmbH, 1999. Skriptum.
46. **M.Schmid, A. Egger und.** Doppelschicht-Kondensator als Kurzzeitspeicher für den Autarken Hybrid. [Buchverf.] Verein Deutscher Ingenieure. *VDI-Berichte Nr. 1459 - Hybridantriebe*. München : Verein Deutscher Ingenieure, 1999.
47. **Allelein, Hans-Josef.** *Systeme zur Speicherung elektrischer Energie*. Aachen : Rheinisch Westfälische Technische Hochschule, 2009.
48. **Biermann, Ralf Bady und Jan-Welm.** *Hybrid-Elektrofahrzeuge - Strukturen und zukünftige Entwicklungen*. Technische Akademie Esslingen : ika Aachen, 2000.
49. **Schreck, Helmut.** *Konzeptuntersuchung, Realisierung und Vergleich eines Hybrid-Antriebes mit Schwungrad mit einem konventionellen Antrieb*. Aachen : Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, 1977. Dissertation.
50. **Schreck, Dipl. Ing. Helmut.** *Konzeptuntersuchung, Realisierung und Vergleich eines Hybrid-Antriebes mit Schwungrad mit einem konventionellen Antrieb*. Aachen : Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, 1977.
51. **Menz, DI Uwe.** *Einsatz von Schwungradmassenspeichern in Straßenbahnnetzen (Dissertation)*. Darmstadt : Technischen Universität Darmstadt, 2002.
52. **Genta, G.** *Kinetic Energy Storage: Theory and Practice of Advanced Flywheel Systems*. Butterworths, London : Dipartimento di Meccanica / Politecnico di Torino, 1985.
53. **Eberle, P. Dietrich und M.K.** Betriebsverhalten des ETH-Hybrid III Antriebes. [Buchverf.] Verein Deutscher Ingenieure. *Hybridantriebe*. Zürich : VDI-Gesellschaft, 1999.
54. **Sirch, Otmar.** *Elektrik / Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen*. Aachen : Expert Verlag, 2009.
55. **Murphy, B. T. et. al.** *Bearing Loads in a Vehicular Flywheel Battery*. Electric and Hybrid Vehicle Design Studies, Proceedings of, Center for Electromechanics, University of Texas at Austin. Detroit, Michigan : Society of Automotive Engineers, 1997. S. 8, SAE Special Publications. v 1243.
56. **Steffan, Hermann.** *Skriptum Vehicle Safety II*. Graz : VSI - Vehicle Safety Institute, TU Graz, 2010.
57. **Toyota Deutschland GmbH.** Der neue Prius. Wegweisend. *TOYOTA*. [Online] Toyota Deutschland GmbH; 2011. [Zitat vom: 30. Juli 2011.] http://www.toyota.de/cars/new_cars/prius/specs.aspx.
58. **R. Van der Graaf, D.B. Kok, E. Spijker.** Integration of Drivesystem, Subsystem and Auxiliary Systems of a Flywheel Hybrid Driveline with Respect to Design Aspects and Fuel Economy. [Buchverf.] Verein Deutscher Ingenieure. *VDI Berichte 1459 - Hybridantriebe*. Helmond, NL : Verein Deutscher Ingenieure, 1999.
59. **R.M. van Druten, P.G van Tilborg, P.C.J.N. Rosielle und M.J.W. Schoutem.** Design and Construction Aspects of a Zero Inertia CVT for Passenger Cars. [Buchverf.] Verschiedene Autoren. *Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress*. Seoul, Korea : s.n., 2000.
60. **Feldpaus, J.J. Kok und F.E.** *Control Issues of Hybrid and Conventional Drive Lines*. eindhoven, NL : Eindhoven University of Technology - Department of Mechanical Engineering - Section Systems and Control, 1997. WFW Report 97028.
61. **Naunheimer, G. Lechner und H.** *Fahrzeuggetriebe - Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*. Berlin : Springer-Verlag, 2007. ISBN 3-540-57423-9.

62. **Förster, Hans Joachim.** *Stufenlose Fahrzeuggetriebe (in mechanischer, hydrostatischer, hydrodynamischer, elektrischer Bauart und in Leistungsverzweigung).* Universität Karlsruhe : TÜV rehinland GmbH, 1996. ISBN 3-8249-0268-0.
63. **Blassnegger, Helmut Eichelseder und Jürgen.** *Der zukünftige Ottomotor – Überlegener Wettbewerber zum Dieselmotor?* 8. Symposium Entwicklungstendenzen bei Ottomotoren, TAE, Leipzig, Deutschland. Graz : Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik / TU Graz, AT, 2006.
64. **D.B. Kok und R. van der Graaf, R. Kriens.** *Energetic Optimization of a Flywheel Hybrid Vehicle.* Eindhoven : World Automotive Congress, Paris, 1998.
65. **Ferrotec GmbH.** *Ferrofluidic Seals and Vacuum Rotary Feedthrough Solutions.* Unterensingen : Ferrotec GmbH, 2010. Standard Products Catalog.
66. **Pullen, K.R.** *Kinetic Energy Storage for Vehicles.* London : Department of Mechanical Engineering, Imperial College, London, SW7 2BX, 2007.
67. **Lubischer, Frank.** TRW Automotive to supply electrically powered hydraulic steering for a range of light commercial vans. *Green Car Congress.* [Online] 18. Januar 2011. [Zitat vom: 2011. Juni 20.] <http://www.greencarcongress.com/2011/01/trw-20110118.html>.
68. **Honda Motor Europe Ltd. - Service Division Training Department.** *Hondo Civic CVT - Daten und Technik (Handbuch).* Brüssel : Honda Motor Europe Ltd., 1995.
69. **Jürgens, Gunter.** *Gespräch.* Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik, TU Graz, 20. Juni 2011.
70. **Gombert, Bernd.** *Electronic Wedge Brake - EWB.* s.l. : Siemens VDO, 2005.
71. **BMP Center of Excellence / Northrop Grumman.** Northrop Grumman, Military Aircraft Systems Division - El Segundo, CA:Advanced Technology Transit Bus. *Best Manufacturing Practices - Center of Excellence.* [Online] 20. Oktober 1997. [Zitat vom: 02. Juli 2011.] http://www.bmpcoe.org/bestpractices/internal/north/north_22.html.
72. **R.J. Hayes, J.P. Kajs, R.C. Thompson, J.H. Beno.** *Design and Testing of a Flywheel Battery for a Transit Bus.* Austin, Texas : Center for Electromechanics, The University of Texas at Austin, PRC, Mail Code R7000, 1999. 1999 SAE International Congress and Exposition, Cobo Center, Detroit, MI.
73. **Pichot, M. et.al.** *The flywheel battery containment problem.* Presentation at the SAE international Congress and Exposition, Detroit MI, Center for Elektromechanics, University of Texas. Detroit, Michigan : Society of Automotive Engineers, 1997. SAE Publication No. 970242.
74. **C.S. Hearn, M.M. Flynn, M.C. Lewis, R.C. Thompson, B.T. Murphy, R.G. Longoria.** *Low Cost Energy Storage for a Fuel Cell Powered Transit Bus.* Vehicle Power and Propulsion Conference Sept. 9-12 2007. s.l. : IEEE Xplore® Digital Library, 2007. Paper. ISBN: 978-0-7803-9760-6.
75. **Hawkins, Lawrence.** Shock and Vibration Testing of an AMB Supported Flywheel. [Hrsg.] University of Texas at Austin, Austin, Texas 78758 USA Center for Electromechanics. *8th Intl. Symp. on Magnetic Bearings.* Mito, Japan : Center for Electromechanics, University of Texas at Austin, Austin, Texas 78758 USA, 2002.
76. **L.A. Hawkins, B.T. Murphy, J. Kajs.** *Analysis and Testing of a Magnetic Bearing Energy Storage Flywheel with Gain-Scheduled, MIMO-Control.* CalNetix Inc. / Senter for Elektromechanics - University of Texas. München, Deutschland : Proceedings of ASME TURBEXPO 2000, 2000. Wissenschaftliche Publikation.
77. **Reutter, H.L.** *Advanced Technology Transit Bus - Final Test Report for the ATTB Prototypes.* Office of Research, Demonstration and Innovation, Northrop Grumman Corporation, Dept 9N10/W10, One Hornet Way, El Segundo, CA 90245-2804. Springfield, VA : U.S. Department of Transit - Federal Transit Administration, September 1999. S. 100, Prüfbericht für Fahrzeuge im öffentlichen Verkehr. PB2000-105146 oder FTA-CA-26-7002-2000-1.

78. **Search Parts Inc.** Engine and Transmission for you - Cars, Truck Engine, Diesel Engines, Boats Engines. *Search Parts*. [Online] [Zitat vom: 08. August 2011.] <http://searchpartsenines.com/pics/navidi6973.gif>.
79. **Probe Corporation.** *Specifications of Commercial Range (Produktdatenblatt)*. [PDF-Dokument] South Africa : Probe Corporation, 2011.
80. **Dunne, Jim.** A Ford in your Future. *Popular Mechanics*. 1996, March `96.
81. **Märtel, Christian.** Amortisation von Photovoltaik. *Solaranlagen-Portal*. [Online] DAA Deutsche Auftragsagentur GmbH, 2011. [Zitat vom: 2011. Juli 05.] <http://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/wirtschaftlichkeit/amortisation>.
82. **Truma Gerätetechnik GmbH & Co. KG.** Flüssiggasheizung Trumatic E 4000 A. *Truma - mehr Komfort für unterwegs*. [Online] EDELWEISS 72 GmbH - Agentur für interaktive Medien, 2011. [Zitat vom: 1. August 2011.] <http://www.truma.com/de/de/kontakt/impressum.php>.
83. **UQM Technologies Inc.** *PowerPhase 200*. Antriebe für Elektro- und Hybridfahrzeuge. 4120 Speciality Pl., Longmotn Colorado 80504 : UQM Technologies Inc., 2011. S. 7, Technisches Datenblatt.
84. **Schöb, Reto.** *Theorie und Praxis der Magnetlagertechnik - Systemkomponenten*. Mechatronik, ETH Zürich. Zürich : s.n., 2007. S. 60, Vorlesungsskriptum.
85. **Berman, Bradley.** Hybrid Cars. *www.hybridcars.com*. [Online] 2009. [Zitat vom: 12. 11 2010.] <http://www.hybridcars.com/history/100th-anniversary-first-us-hybrid-car-patent-25616.html>.
86. **Pieper, Henry.** *Mixed drive for Autovehicles*. 913,846 United States of America, 2. März 1909. Patent.
87. **Wallentowitz, Biermann, Bady, Renner.** Strukturvarianten von Hybridantrieben. [Buchverf.] VDI Gesellschaft. *VDI Berichte 1459*. Aachen : VDI Gesellschaft - Entwicklung, Konstruktion, Vertrieb, 1999.
88. **Berman, Bradley.** Hybrid Market Dashboard. *HybridCars.com*. [Online] 2010. [Zitat vom: 17. 12 2010.] <http://www.hybridcars.com/hybrid-clean-diesel-sales-dashboard/november-2010.html>.
89. **Rhines, Walden.** Semiconductor Input Costs vs Output Prices – Managing the Squeeze. [Hrsg.] Avenue Eugene Plasky 144, 1030 Brussels, Belgium. European Business Press SA. *EETimes Europe*. 2010.
90. **Deutscher Verband Flüssiggas e.V.** Infothek - Flüssiggas. *DVFG - Deutscher Verband Flüssiggas e.V.* [Online] 2011. [Zitat vom: 02. Juli 2011.] <http://www.dvfg.de/de/infothek/fakten/>.
91. **Benger, Ralf.** *Elektrische Energiespeicher für dynamische Anforderungen*. Deutschland : TU Clausthal, 2007.
92. **Nolle, E.** *Elektrische Maschinen - Vorlesungsskriptum*. Esslingen : Fakultät für Mechatronik und Elektrotechnik, Hochschule Esslingen, 2007.
93. **Hofmann, P. Tenberge und W.** Elektromechanisches Hybridgetriebe. *VDI Berichte 1459*. Chemnitz : s.n., 1999.
94. **Jäger, H.** *Experimentalphysik, 25. Auflage*. Graz, Österreich : Institut für Experimentalphysik, TU Graz, 2000.
95. **Hirschberg, Wolfgang und Waser, Helmut.** *Kraftfahrzeugtechnik*. Technische Universität Graz : Institut für Kraftfahrzeugtechnik, 2005.
96. **U.S. Energy Information Administration.** *STEO Table Browser Chart*. [<http://www.eia.doe.gov>] Washington, DC : U.S. Energy Information Administration, 2010.
97. **Guzzella, Lino.** *Technische Optionen für den Individualverkehr der Zukunft*. Zürich : ETH Zürich, 2008.