

METHODISCHE ENTWICKLUNG UND BEWERTUNG NEUARTIGER ANTRIEBSKONFIGURATIONEN FÜR FAHRZEUGE

Markus Rössle, Frank Schwarz, Georg Wachtmeister

Zusammenfassung

Bei der Entwicklung von Fahrzeugen treten hinsichtlich der Erfüllung der verschiedenen Anforderungen vermehrt Zielkonflikte auf. Ihre gesamthafte Lösung wird mit heutigen Standardkonfigurationen von Fahrzeug- und Antriebskonzepten zunehmend schwieriger. In Bezug auf zukünftige Anforderungen erscheint eine Neukonfiguration des Antriebs ein erfolgversprechender Ansatz zu sein.

Der vorliegende Beitrag zeigt ein methodisches Vorgehen auf, mit dem die Aufgabe der Neukonfiguration und zielgerichteten Auswahl einer adäquaten, neuartigen Antriebskonfiguration bewältigt werden kann. Dazu werden sowohl bekannte Methoden auf das zu Grunde liegende Problem angepasst, als auch neue Werkzeuge entwickelt. Basierend auf fundierten Annahmen über das zukünftig zu erwartende Umfeld der automobilen Entwicklung wird eine Vorstellung des zu entwickelnden Fahrzeugs und Aussagen hinsichtlich konkreter Zielwerte generiert. Begleitet von verschiedenen Methoden der Lösungssuche wird der Lösungsraum ausgeschöpft und auf die definierten Zielwerte hin ausgewertet. In einem mehrstufigen Auswahlprozess werden unpassende Lösungen ausgefiltert. Die verbleibende Lösungsmenge wird schließlich mit einem eigens entwickelten Verfahren bewertet. Dieses Vorgehen und ermöglicht schließlich eine begründete Auswahl zielführender Lösungen. Die erzielten Ergebnisse werden momentan anhand detaillierter simulatorischer Untersuchungen verifiziert.

1 Motivation und Ziel

Die Entwicklung von Fahrzeugantrieben bewegt sich im Spannungsfeld der Anforderungen an Fahrleistung, Verbrauch und Emissionen. Auch gewinnen Themen wie Komfort, Kundenerwartungen und gesetzliche Rahmenbedingungen zunehmend an Bedeutung. Durch die gleichzeitige Optimierung dieser teilweise konträren Eigenschaften entstehen Zielkonflikte, die während des Entwicklungsprozesses zu lösen sind. Aufgrund der kontinuierlich steigenden Anforderungen an jedes der beschriebenen Teilziele wird dies mit den heutigen Standardkonfigurationen an Antrieben zunehmend schwieriger.

Die Neukonfiguration des Antriebs erscheint dafür ein erfolgversprechender Ansatz zu sein. Im Gegensatz zu dem gewohnten evolutionären Vorgehen, bei dem ein neuer Antrieb durch die Weiterentwicklung eines bestehenden Systems entsteht, wird ein revolutionärer Ansatz verfolgt. Bestehende Restriktionen aus vorhandenen Fahrzeugstrukturen, Fertigungseinrichtungen oder Technologiebaukästen werden zunächst bewusst außer Acht gelassen. Dadurch wird der zulässige Lösungsrahmen möglichst weit gesteckt und die frühzeitige gedankliche Orientierung an bestehenden Strukturen verhindert. Hinsichtlich einer Realisierung ist bei der Auswahl zielführender Konzepte jedoch die technische Umsetzbarkeit wieder mit einzubeziehen.

Dem methodischen Verfahren kommt bei der Erarbeitung einer technischen Lösung für „den Antriebsstrang von Morgen“ eine besondere Bedeutung zu. Für eine vollständige Durchdrin-

gung des großen und komplexen Lösungsraumes ist eine strukturierte und analytische Vorgehensweise unabdingbar. Dazu werden verschiedene Methoden und Verfahrensweisen auf das vorliegende Beispiel adaptiert und erprobt. Ziel ist es eine durchgängige Methodik für die Definition und Auswahl eines neuartigen Antriebskonzeptes zu entwickeln, die auf vergleichbare Aufgaben übertragbar ist.

2 Definition des Lösungsraumes

Der Einsatzzeitraum für den zu definierenden Antrieb wird auf die Jahre 2020 bis 2050 festgelegt. Dies lässt ausreichend Freiheiten in Bezug auf die beschriebenen Restriktionen, ist aber doch zeitlich so nahe, dass die technische Machbarkeit nicht beliebig wird. Da für den anvisierten Zielzeitraum keine strategischen Vorgaben existieren, werden zunächst relevante Zielwerte und Randbedingungen erarbeitet. Dadurch ist es möglich, eine grundsätzliche Vorstellung über das zu entwickelnde Fahrzeug zu generieren und die primäre Entwicklungsrichtung aufzuzeigen.

2.1 Zielwerte

Für die Erarbeitung der Zielwerte werden verschiedene Szenario-Studien [1, 2, 3, 4] analysiert. Daraus lassen sich elementare Aussagen bezüglich des Wandels des automobilen Umfeldes in der Zukunft extrahieren. Eine der wesentlichen Aussagen ist der anhaltende hersteller- und fahrzeugklassenübergreifende Trend in Richtung emissions- und verbrauchsärmerer Fahrzeuge. Speziell für einen Fahrzeughersteller des Premiumsegments wird die wachsende Bevölkerungsgruppe der Einkommensstarken interessant sein, die exklusive Mobilitätsangebote bevorzugt und auch weiterhin leistungsstarke, komfortable und individualisierte Fahrzeuge erwartet. Um beiden Ansprüchen auch in Zukunft gerecht zu werden, wird eine erhebliche Innovationsleistung notwendig sein.

Ausgehend von diesen allgemeinen Aussagen werden konkrete Zielwerte für den Antriebsstrang der Zukunft im Zielzeitraum systematisch abgeleitet. Dazu werden Vergleichswerte herangezogen, die die gesamte Fahrzeugflotte repräsentieren. Aufgrund der Gewichtsdaten, Leistungswerte und Verkaufszahlen wird der Mittelwert aus dem leistungsstärksten (TOP) und leistungsschwächsten (LOW) Fahrzeug der Mittelklasse gebildet und als Vergleichswert verwendet.

Für die Herleitung des Verbrauchsziels werden die Daten aus der Vergangenheit aufgetragen und in die Zukunft extrapoliert (siehe Bild 1). Wie zu sehen ist, liegen diese Werte jedoch oberhalb der zu erwartenden Anforderungen. Dies sind zum Einen die Zielwerte der ACEA-Selbstverpflichtung und zum Anderen die prognostizierten Werte der German Case Study der OECD [4]. Dem sind die physikalischen Randbedingungen gegenüber zu stellen. Auf der linken Seite des Schaubildes 1 sind deshalb zum Vergleich unterschiedliche Stufen des untersuchten Grenzpotenzials aufgetragen.

Als Minimalziel werden die 130 gCO₂/km als Zielwert der EU im Jahre 2012 vorausgesetzt. Als langfristig erreichbares Ziel erscheinen die 90 gCO₂/km aus der OECD-Studie realistisch. Im sich daraus ergebenden Zielfeld wird für die Mitte des untersuchten Zeitraumes, also für das Jahr 2035 ein Zielwert von 100 gCO₂/km beziehungsweise 4,18 l/100km Benzinverbrauch festgelegt. Dies entspricht einer Verbrauchsreduktion gegenüber dem heutigen Vergleichswert in Höhe von 47%.

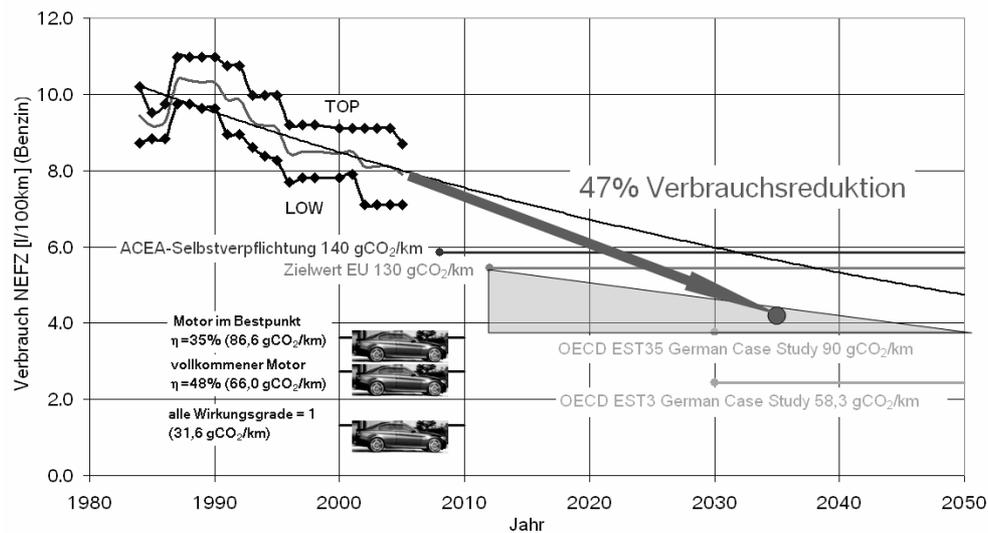


Bild 1: Herleitung des Verbrauchsziels

Auch die Fahrleistungszielwerte für Beschleunigung, Elastizität und Höchstgeschwindigkeit werden bestimmt, in dem Daten aus der Vergangenheit in die Zukunft extrapoliert werden. Grenzen ergeben sich hierbei aus der physikalischen Übertragbarkeit der Antriebsleistung. Das Ergebnis dieses Vorgehens sind Zielwerte, die einer Verbesserung von 20% gegenüber den Vergleichswerten entsprechen. Die dafür benötigte Antriebsleistung beträgt im gewählten Beispiel ungefähr 160kW, was für die in der Bewertung durchgeführte Grobdimensionierung der Komponenten wichtig ist. Aufgrund dieser Daten lässt sich ein aktuelles Fahrzeug der Baureihe als Referenz für die weiteren Untersuchungen heranziehen, da dieses Fahrzeug bereits die benötigte Antriebsleistung zur Verfügung stellt und die geforderten Fahrleistungswerte nahezu erfüllt. Der Verbrauch ist bezogen auf dieses Fahrzeug um mehr als 50% abzusenken.

2.2 Eingrenzung des Lösungsraumes

Neben diesen Zielwerten werden in Expertenrunden logische Randbedingungen erarbeitet, die den Lösungsraum schon im Vorfeld sinnvoll einschränken. Die hierbei vorgenommenen Einschränkungen sind nicht allgemeingültig, sondern speziell auf die durchgeführte Untersuchung zu beziehen. In einem anderen Entwicklungsprojekt können diese „Leitplanken für die Lösungssuche“ auch völlig anderer Natur sein. Exemplarisch für die festgelegten Punkte ist die Wiederverwendbarkeit des Antriebs und der Ausschluss der Kernenergie zur Energiegewinnung an Bord zu nennen. Auch die Forderung nach einer Eignung des Antriebs für aktuell verfügbare Kraftstoffe, wie Benzin oder Diesel, wird festgeschrieben, wobei alternative Kraftstoffe in die Betrachtung mit einzubeziehen sind. Dadurch wird die Verfügbarkeit von Kraftstoffen zu jeder Zeit des betrachteten Zeitraums sichergestellt. Weitere Beispiele sind der Ausschluss rein batteriebetriebener sowie rein solarbetriebener Fahrzeuge. Aufgrund der angestrebten Leistungsklasse und der zu erbringenden Reichweite erscheinen solche Konzepte nicht aussichtsreich. Durch das Aufstellen dieser Anforderungen ist es möglich, die Lösungssuche zielgerichtet zu gestalten. Zudem bieten sich erste Ansätze für eine Vorauswahl.

3 Lösungssuche auf abstrakter Systemebene

Bei einem komplexen und vielschichtigen System, wie dem eines Fahrzeugantriebs, muss für die Lösungssuche eine geeignete Abstraktionsebene gefunden werden, um die Vielfalt

der möglichen Lösungen beherrschbar zu gestalten. Im Sinne einer sich verfeinernden Lösungssuche gilt es zunächst auf Gesamtsystemebene Lösungen zu finden, die das Grundpotenzial aufweisen die Zielwerte zu erfüllen. Erst im Anschluss werden dann ausgewählte Konzepte detailliert betrachtet. In Anlehnung an den Ansatz der „Black-Box“-Modellierung [5] werden die Komponenten des Antriebssystems stark abstrahiert und lediglich bezüglich ihrer ein- und ausgehenden Energieströme abgebildet. Über die Vernetzung der Energieströme lassen sich unterschiedliche Antriebssysteme in Form von Energieflussbildern darstellen. Für die schlüssige Abbildung wird eine eindeutige Nomenklatur definiert. Die Art der Energiewandler bzw. -speicher ist in der Form der Komponenten codiert. Die Energiearten werden durch Farben und die Linienart repräsentiert, Die Pfeile zeigen die möglichen Flussrichtungen der Energieströme an. So kann beispielsweise elektrische Energie in den zugehörigen Speicher hinein und auch wieder hinaus fließen, bei einem chemischen Kraftstofftank ist dies nicht möglich (siehe Bild 2). Die durchgeführte Abstraktion ermöglicht es, den verfügbaren Lösungsraum zu erfassen, ohne Innovationen auf detaillierter Ebene auszuschließen. So fasst die Komponente „Akkumulator“ eine ganze Reihe bekannter sowie neuartiger technischer Lösungen, die elektrische Energie speichern. Die Visualisierung mittels Energieflussbilder ermöglicht eine eindeutige Darstellung von Lösungen auf einem sehr hohen Abstraktionsniveau. Die Schaubilder sind schnell und intuitiv zu verstehen und eignen sich durch ihren modularen Aufbau für den Einstieg in die Lösungssuche.

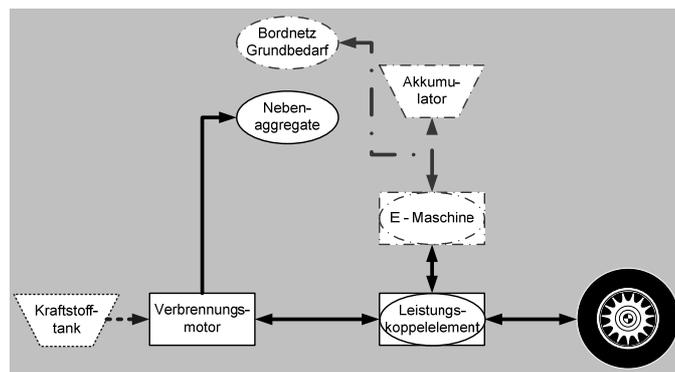


Bild 2: Energieflussbild – Elektrischer paralleler Hybrid

Im Weiteren werden verschiedene bekannte Methoden der Lösungssuche [6] erprobt, angewendet und auf das zu Grunde liegende Problem adaptiert. Die Effektivsten werden im Folgenden vorgestellt.

3.1 Methoden der Lösungssuche

Um zunächst eine möglichst breite Lösungsbasis zu erhalten, werden mehrere Brainstormingsitzungen mit wechselnden Teilnehmern durchgeführt. Ziel ist es, unterschiedliche Energieflussbilder zu generieren und so eine Grundmenge möglicher Lösungen zu erzeugen. Dabei wird wie in [6] beschrieben vorgegangen und auf eine innovationsfördernde und kritikfreie Atmosphäre geachtet. Das Brainstorming wird zweistufig durchgeführt. In einer ersten Phase, die als „stummes Brainpainting“ bezeichnet werden kann, bringt zunächst jeder Teilnehmer für sich seine Ideen zu Papier. Ähnlich der Galeriemethode werden direkt im Anschluss im zweiten Teil die eigenen Ideen vorgestellt, diskutiert und gegebenenfalls weiterentwickelt. Auf diese Weise können viele verschiedene originäre Ideen sowie abgeleitete Varianten generiert werden.

Eine weitere Möglichkeit der Ideengenerierung ist eine umfangreiche Literatur- und Patentrecherche. Hinsichtlich der Literaturrecherche bieten sich insbesondere Tagungsbände an, die sich intensiv mit Fahrzeugantrieben auseinandersetzen [7, 8]. Einen großen Ideenfundus

bieten Patente, die beispielsweise über die Seiten des deutschen Patentamtes recherchiert werden können.

3.2 Methoden der Strukturierung und Analyse

Aus dem vorhandenen Lösungspool lassen sich nun weitere sinnvolle Antriebssysteme erzeugen, um auf diese Weise den gesamten Lösungsraum ausschöpfen zu können. Aus den bisher bekannten Teillösungen wird deshalb ein interaktiver morphologischer Kasten erstellt. Dazu sind geeignete Überbegriffe für eine Gruppe ähnlicher Teillösungen zu finden und als Lösungsmerkmale aufzutragen. Das „Zusatzennergiesystem“ zum Beispiel bezeichnet eine Anordnung aus Wandler und Speicher, mit dem Energie aus dem Fahrtrieb entnommen und wieder zurück gespeist werden kann. In Bild 2 repräsentieren dies die E-Maschine und den Akkumulator. Diesen Merkmalen werden mögliche Ausprägungen zugeordnet. Durch die Auswahl einer Ausprägung je Merkmal wird eine neue Lösung erstellt [9]. Da nicht jede beliebige Kombination der Ausprägungen darstellbar ist, werden durch die Festlegung eines Merkmals die Ausprägungen der anderen Merkmale um die nicht mehr Möglichen reduziert. Auf diese Weise können sehr einfach neue Lösungen erzeugt werden, die dann auch in der Kombination der verwendeten Teillösungen als gültig zu bezeichnen sind. Dies sagt jedoch noch nichts über die Güte der Lösung in Bezug auf die Zielwerte aus. Ziel sollte es auch nicht sein mit Hilfe des morphologischen Kastens alle denkbaren Lösungsmöglichkeiten zu erzeugen, die sich im vorliegenden Fall auf ungefähr 1 Million Möglichkeiten summieren würden. Es wird vielmehr dem Entwickler ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, mit dem ihm der gesamte Lösungsraum zugänglich gemacht wird. Neue Lösungen werden deshalb nicht willkürlich, sondern mit genauer Überlegung und Sachverstand erstellt. Im Fokus steht eine sinnvolle Erweiterung des vorhandenen Lösungspools im Hinblick auf die Erreichung der angepeilten Zielwerte.

4 Bewertung und Auswahl

Die zahlreichen vorhandenen Lösungen werden nun in einem zweistufigen Bewertungsverfahren analysiert und anschließend werden die zielführenden Antriebssysteme für eine weitere Bearbeitung ausgewählt.

4.1 Vorauswahl

In einer Vorauswahl werden funktionale Randbedingungen definiert, die für ein zukünftiges Antriebssystem sinnvoll erscheinen. So ist zum Beispiel die Möglichkeit des emissionsfreien Fahrens eine Funktion, die das zukünftige Antriebssystem unbedingt vorzuhalten hat. Damit bleibt das Fahrzeug auch bei zukünftig zu erwartenden Zufahrtsbeschränkungen einsatzbereit. Als Folge wird ein zusätzliches Energiesystem im Antriebsstrang zwingend, mit dem Energie für den Fahrtrieb zwischengespeichert werden kann.

Auch auf Teillösungsebene werden Einschränkungen getroffen, in dem die Grundeigenschaften der verwendeten Antriebskomponenten analysiert und bewertet werden. So werden etwa pneumatische Antriebselemente oder auch eine Gasturbine als Antriebsaggregat aus technischen Gründen ausgeschlossen [10, 11].

Zusammen mit den in Kapitel 2.2 definierten Anforderungen entsteht damit eine Checkliste, mit der die Lösungsmenge in einer einfachen Bewertung reduziert wird.

4.2 Bewertungsverfahren für die frühe Entwicklungsphase

Die verbleibende Lösungsmenge wird nun mit einem genaueren Bewertungsverfahren bearbeitet, um letztendlich zu einer begründeten Auswahl zu kommen. Aus den in Frage kom-

menden Bewertungskriterien werden deshalb diejenigen ausgewählt, die für das vorliegende Zielsystem die höchste Relevanz aufweisen und die mit den zu diesem Entwicklungszeitpunkt vorliegenden Daten auch ausreichend genau bewertet werden können. Es werden deshalb der Verbrauch und die Fahrleistung als Kriterien für die technische Wertigkeit ausgewählt. Angelehnt an die technisch-wirtschaftliche Bewertung [12] wird diesen der Aufwand als Kriterium für die wirtschaftliche Wertigkeit gegenüber gestellt.

4.2.1 Verbrauch

Für die Bewertung des Verbrauchs wird der Neue europäische Fahrzyklus (NEFZ) als Grundlage herangezogen, der in Europa den Standard für die Ermittlung der Verbrauchswerte darstellt [13]. Der Kerngedanke der Berechnung besteht in der statischen Abbildung des eigentlich dynamisch zu durchfahrenden Verbrauchszyklus. Dazu wird die Energiemenge am Rad ermittelt, die notwendig ist, um das Fahrzeug durch den Zyklus zu bewegen. Aus der jeweiligen Konfiguration des Antriebs lassen sich die möglichen Betriebszustände des Systems bestimmen. Gewissen Anteilen der benötigten Energie wird dann energetisch sinnvoll ein bestimmter Betriebszustand zugeordnet. Die Gesamtheit dieser Zuordnungen entspricht einer ersten vereinfachten Betriebsstrategie für diese Antriebskonfiguration.

Im Folgenden wird ein konkreter Berechnungsdurchlauf am Beispiel eines elektrischen parallelen Hybrids (siehe Bild 2) erläutert. Die für das Durchfahren des Zyklus benötigte Energiemenge wird aus dem vorgegebenen Geschwindigkeitsverlauf unter Anwendung der Formeln für Roll-, Luft- und Translationswiderstand berechnet. Die dafür benötigten Fahrzeugdaten werden vom Referenzfahrzeug übernommen (siehe Bild 3, Schritt 1). Für die Berechnung der in der Translationsenergie des Fahrzeugs gespeicherten und damit potenziell rekuperierbaren Energiemenge wird ebenso vorgegangen. Die Energien sind massenabhängig, können aber über einen linearen Zusammenhang auch für andere Fahrzeugmassen errechnet werden. Aus dem Leistungsgewicht der verwendeten Komponenten wird deshalb zunächst die Massenerhöhung bzw. -minderung des Fahrzeugs aufgrund des geänderten Antriebssystems ermittelt. Die Absolutleistungen werden aus den für die angestrebten Fahrleistungswerte benötigten 160kW Antriebsleistung abgeleitet.

Für die Einteilung des Bedarfs nach Energiemengen, denen ein bestimmter Zustand des Antriebssystems bzw. ein bestimmter Wirkungsgrad zugeordnet werden kann, ist eine vorgeschaltete Analyse des Hauptantriebsaggregates im Referenzfahrzeug notwendig. Ein Antriebsaggregat wie der Verbrennungsmotor weist in unterschiedlichen Lastpunkten teilweise sehr unterschiedliche Wirkungsgrade auf, weshalb es nicht sinnvoll ist, einen pauschalen Wirkungsgrad anzusetzen. Für die Analyse wird für jeden Punkt des Zyklus berechnet, welche Energiemenge momentan am Rad benötigt wird und welchen Wirkungsgrad der Verbrennungsmotor zu diesem Zeitpunkt hat. Die erhaltenen Wirkungsgrade werden dann in Klassen eingeteilt und mit der zugeordneten Energiemenge gewichtet. Daraus ergeben sich der Gesamtwirkungsgrad und die kumulierte Energiemenge für jede Klasse (siehe Bild 3, Schritt 2). Bei neuartigen Antriebssystemen müssen diese Bedarfe aber gerade nicht über die zugeordneten Wirkungsgrade erbracht werden. Kann wie im vorliegenden Beispiel Bremsenergie zurück gewonnen werden, so wird diese dort eingesetzt, wo der Verbrennungsmotor einen niedrigen Wirkungsgrad aufweisen würde. Für die verwendete Rekuperationsenergie wird kein Kraftstoff eingesetzt und deshalb auch kein Verbrauch verursacht. Zusätzlich ist bei einer Hybridkonfiguration der Betriebszustand „Lastpunktanhebung in Verbindung mit emissionsfreiem Fahren“ möglich. Bei dieser Funktionsweise wird zunächst Energie zwischengespeichert, um danach den Fahrantrieb aus dem Zusatzenergiesystem zu bewältigen und das Hauptantriebsaggregat still zu legen. Diese Betriebsart wird in den Bereichen eingesetzt, in denen sie Wirkungsgradvorteile gegenüber dem direkten Antrieb mit dem Verbrennungsmotor hat. Lediglich die restliche Energiemenge ist nun wie gehabt vom Verbrennungsmotor zu erbringen (siehe Bild 3, Schritt 3 und 4). Die auf andere Weise erbrachten Energien verringern den Verbrauch und beziffern so die Vorteile des neuen An-

triebssystems. Schließlich werden zusätzliche Verbräuche für Leerlauf, Bordnetzbedarf oder mitgeschleppte Nebenaggregate addiert und damit der Gesamtverbrauch errechnet.

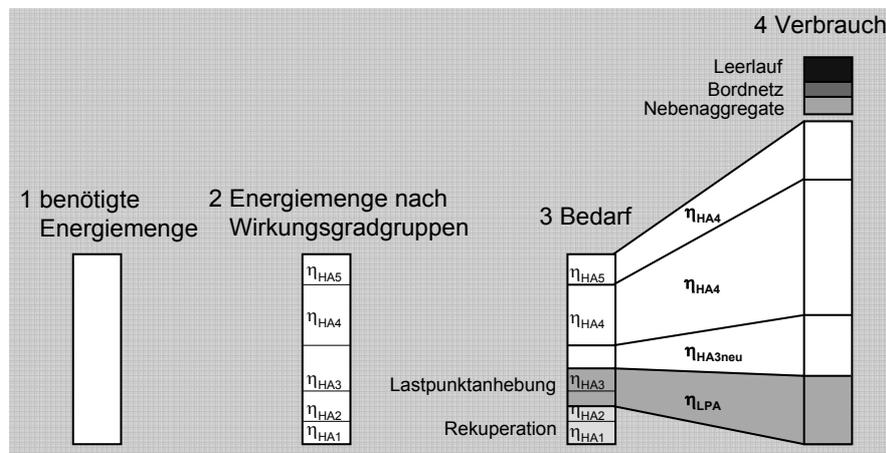


Bild 3: Verbrauchsberechnung

Das vorgestellte Verfahren eignet sich nicht dazu, absolute Verbrauchsaussagen zu generieren. Ein Vergleich verschiedener Antriebskonzepte ist damit aber möglich. Der Abgleich mit einer vollständigen Simulation des Referenzfahrzeugs zeigt lediglich eine Abweichung von 5%. Die für ein paralleles, elektrisches Hybridkonzept errechnete Verbrauchsverbesserung von ca. 30% liegt auch durchaus im Rahmen dessen, was für das Potenzial einer solchen Anordnung in der Literatur ausgewiesen wird [14, 15]. Die Verbrauchsunterschiede ähnlicher Antriebssysteme können direkt mit den spezifischen Daten der verwendeten Komponenten verknüpft werden, weshalb die erzielten Ergebnisse plausibel erscheinen.

4.2.2 Fahrleistung

Die Bewertung der Fahrleistung wird im Sinne einer Nutzwertanalyse [6] strukturiert und setzt sich aus den Kriterien Beschleunigung von 0 bis 100 km/h, Elastizität von 80 bis 120 km/h und kundennahes Anfahren zusammen. Um verschiedene Antriebssysteme vergleichen zu können, werden spezifische Größen der verwendeten Komponenten herangezogen und daraus eine Bewertungszahl auf der Skala -5 bis +5 berechnet. Wie in Bild 4 zu sehen ist, handelt es sich um die Anteile Masseneinfluss, Drehmoment und Eigenverhalten. Bezüglich des Eigenverhaltens werden die einzelnen Antriebselemente mit einer Punktzahl bewertet, die sich je nach Fahrmanöver unterscheiden kann. Eine Elektromaschine erhält beispielsweise eine positive Bewertung, da sie das Drehmoment sehr schnell aufbauen kann. Die Punktzahlen werden je nach Antriebssystem addiert und auf die verwendete Skala umgerechnet. Dazu wird dem Referenzfahrzeug der Wert 0 und dem am weitesten abweichenden Antriebssystem der Wert +5 bzw. -5 zugeordnet. Damit ist die Skala bestimmt und es lassen sich die Bewertungen für alle weiteren Antriebssysteme berechnen. Ebenso wird mit den anderen Größen verfahren. Die verwendeten Gewichtungsfaktoren werden anhand der von BREIING vorgestellten Gewichtungsmatrizen ermittelt [12]. Aus den Bewertungszahlen und den Gewichtungsfaktoren wird schließlich bottom-up die Gesamtbewertungszahl für die Fahrleistung berechnet. Durch eine Sensitivitätsanalyse ist die Zuverlässigkeit der Bewertung sichergestellt. Auch größere Änderungen einzelner Bewertungsgrößen oder Gewichtungen haben nur begrenzten Einfluss auf die gesamte Bewertungszahl.

4.2.3 Aufwand

Auch die Bewertung des Aufwandes besitzt eine Unterstruktur und wird über die Kriterien Kosten, Entwicklungsaufwand und Komplexität berechnet. Die Gesamtgröße wird ermittelt, in dem zunächst Experteneinschätzungen über die Wertigkeit dieser drei Ausgangsfaktoren auf

Einzelkomponentenebene abgegeben werden. Aus der Summation über die bei einem bestimmten Antriebskonzept vorhandenen Elemente und die Skalierung der Bewertungsgröße auf -5 bis +5 erhält man die gewünschte Bewertungszahl. Auch hier zeigt eine Sensitivitätsanalyse die Robustheit der Bewertung auf.

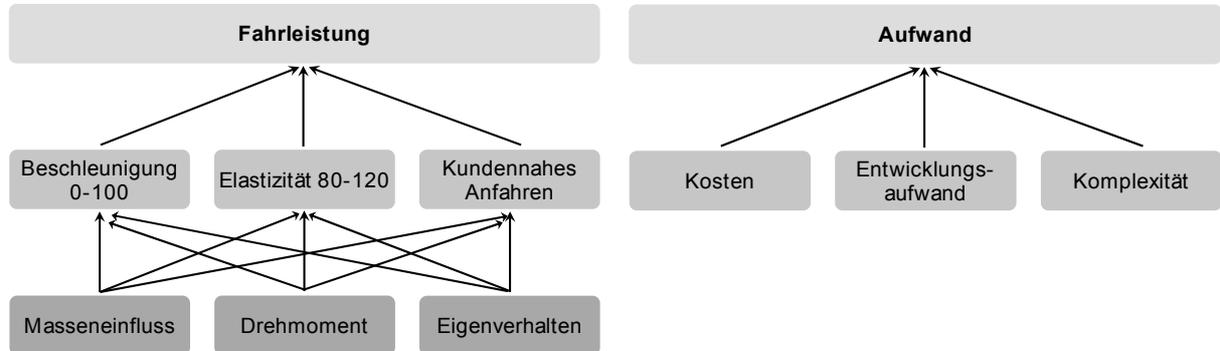


Bild 4: Zusammensetzung von Fahrleistung und Aufwand

4.3 Auswertung

Die so errechneten Bewertungsgrößen für die verschiedenen Antriebssysteme werden nun in einem Diagramm zusammengefasst und ausgewertet (Bild 5). Die Hochachse zeigt die Verbrauchsverbesserung gegenüber dem Referenzmodell an. Auf der Querachse ist die Bewertung der Fahrleistung aufgetragen, Farbe und Form repräsentieren den Aufwand. Jeder Punkt steht für ein bewertetes Antriebskonzept. Die dünnen Linien zeigen einen Unsicherheitsbereich an, der durch Variation der zu Grunde liegenden Werte in einem realistischen Rahmen entsteht. Wie zu sehen ist, unterscheiden sich die Ergebnisse für die einzelnen Antriebssysteme deutlich. Unter Beachtung der technischen Umsetzbarkeit können deshalb auf diese Weise schließlich zielführende Konzepte für die weitere Untersuchung ausgewählt werden.

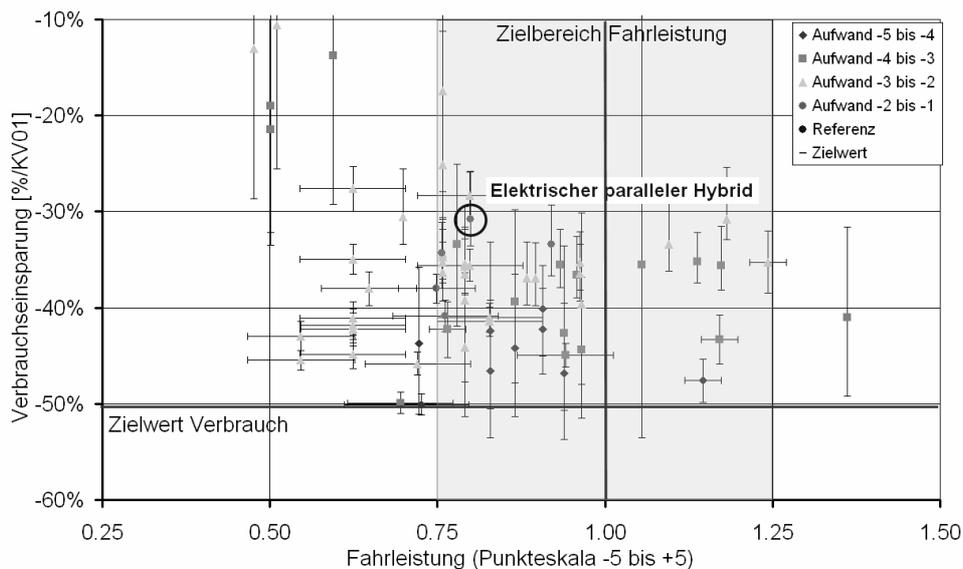


Bild 5: Auswertung

5 Ergebnisse und Ausblick

Mit Hilfe der entwickelten Methodik kann die Aufgabe der Neukonfiguration eines Antriebs zielgerichtet gelöst werden. Innovationen auf Komponentenebene werden zunächst bewusst ausgeblendet, um die Lösungssuche auf die Ebene des gesamten Antriebsstranges zu konzentrieren. Es werden adäquate Hilfsmittel zur Verfügung gestellt, die den Entwickler in jeder Phase der Lösungsfindung und -bewertung unterstützen. Dadurch ist es möglich den gesamten Lösungsraum mit akzeptablem Aufwand zu untersuchen.

Anhand des beschriebenen systematischen Vorgehens wird zunächst der verfügbare Lösungsraum abgegrenzt. Verschiedene Methoden der Lösungssuche ermöglichen es, ungefähr 150 Gesamtlösungen zu erzeugen und circa 1 Million Lösungsmöglichkeiten auszuweisen. Im Folgenden wird diese Menge auf 50 zu bewertende Konzepte reduziert. Das entwickelte Bewertungswerkzeug ermöglicht es schließlich zielführende Konfigurationen auszuwählen. Der Bearbeitungsaufwand pro Lösung steigt bei dieser Vorgehensweise kontinuierlich an (siehe Bild 6). Der stichprobenartige Vergleich der errechneten Verbrauchswerte einzelner Konfigurationen mit einer Vollsimulation, beziehungsweise Werten aus der Literatur, zeigt gute Übereinstimmungen. Durch die flexible Gestaltung des Werkzeugs können mit geringem Aufwand die der Bewertung zu Grunde liegenden Daten abgeändert und so systematische Parameterstudien durchgeführt werden. Auch veränderte Randbedingungen und Zielwerte können problemlos integriert werden. Somit eignet sich dieses Verfahren auch für ähnliche Aufgabenstellungen in der Zukunft.

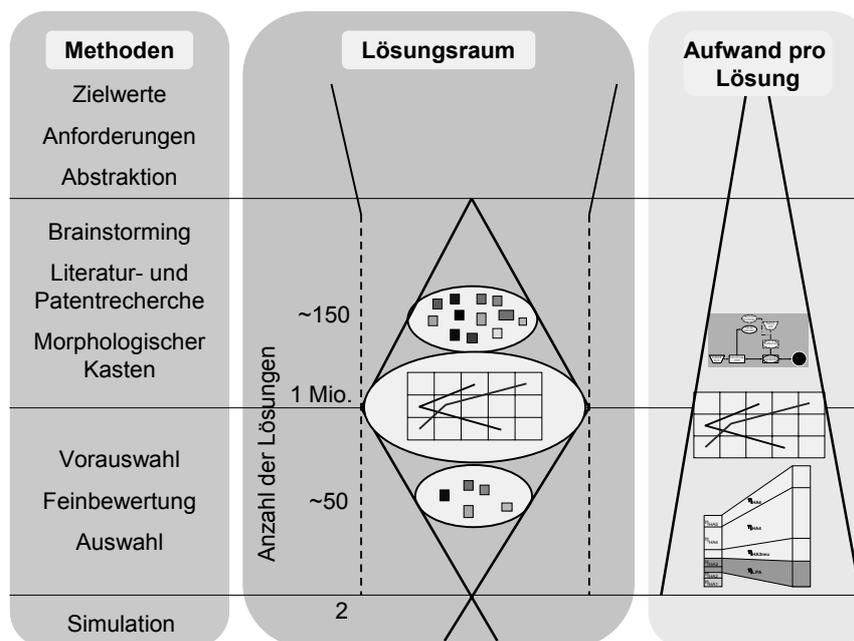


Bild 6: Zusammenfassung des Vorgehens

Momentan wird an der nachhaltigen programmtechnischen Umsetzung des entwickelten Bewertungswerkzeugs gearbeitet. Die ausgewählten Lösungen werden mit Hilfe simulativer Methoden tiefergehend untersucht, um so die bisherigen Ergebnisse zu verifizieren. Erste Resultate zeigen sehr gute Übereinstimmungen zwischen den berechneten und simulierten Werten. Gleichzeitig wird das Betriebsverhalten des Antriebssystems konkretisiert und die verwendeten Komponenten spezifiziert.

6 Literatur

- [1] Institut für Mobilitätsforschung (Hrsg.): Zukunft der Mobilität – Szenarien für das Jahr 2020. BMW AG, Berlin, 2002
- [2] Institut für Mobilitätsforschung (Hrsg.): Zukunft der Mobilität – Szenarien für das Jahr 2025. BMW AG, München, 2005
- [3] Scharioth, J. Huber, M. Schulz, K. Pallas M.: Horizons 2020 – Ein Szenario als Denk-
anstoß für die Zukunft. TNS Infratest Wirtschaftsforschung, München, 2004
- [4] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (Hrsg.): Environ-
mentally Sustainable Report – Individual Project Case Studies for Phase II. OECD,
1999
- [5] Daenzer, W.F. Huber, F. (Hrsg.): Systems Engineering. Verlag industrielle Organisa-
tion, Zürich 2002, S. 8ff
- [6] Ehrlenspiel, K: Integrierte Produktentwicklung – Methoden für Prozeßorganisation,
Produkterstellung und Konstruktion. Hanser, München 1995
- [7] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): 24. Internationales Wiener Motorensymposium.
VDI-Verlag, Düsseldorf 2003
- [8] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Innovative Fahrzeugantriebe. VDI-Verlag, Düs-
seldorf 2006
- [9] Pahl G. Beitz W.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung.
Methoden und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin 2005, S. 136ff
- [10] Walzer, P.: Die Fahrzeug-Gasturbine. VDI-Verlag, Düsseldorf 1991, S. 99+105
- [11] <http://www.vossyline.de/artikel/wissenschaft/druckluftauto.htm> (entnommen am
18.09.2006)
- [12] Breiing, A. Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme. Springer Verlag, Berlin 1997
- [13] Braess, H-H. Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg: Handbuch KrafftFahrzeugtechnik. Vieweg,
Wiesbaden 2005, S. 25f
- [14] Krohm, H. Landsmann, G. Barnbeck, A. Becker, G. Pochner, K.: Der 1.6l Twinport-
Motor mit Easytronic-Getriebe von Opel – Fahrspass und Sparen. 16. Internationaler
AVL Kongress „Motor & Umwelt“, Graz 2004
- [15] Weinowski, R. Rütten, O. Tietze, F. Elsen, O.: Matrixvergleich von Toyota Prius und
Honda Civic mit konventionellen Fahrzeugen. FEV Motorentchnik GmbH, Aachen
2004

Dipl.-Ing. Markus Rössle
Vorentwicklung Antriebe
BMW Group
Hufelandstr. 8a, D-80788 München
Tel: +49-89-382-55101
Fax: +49-89-382-38924
Email: Markus.Roessle@bmw.de
URL: <http://www.bmw.de>