

# 1 Einleitung

Der derzeitige Entwicklungsstand von Serienfahrzeugen in der Automobilbranche ist dadurch gekennzeichnet, dass eine weitere Verbrauchsreduzierung bei gleichzeitiger Erhöhung der Sicherheits- und Komfortfunktionen angestrebt wird. Mit dieser Verbrauchsreduzierung wird auch der Schadstoffausstoß gesenkt, was zur Einhaltung von Abgasvorschriften wie *Euro-4* oder *Euro-5* notwendig ist. Diese zur Einhaltung der Grenzwerte notwendige Verbrauchsreduzierung kann mit aktuell in Serie befindlichen Verbrennungsmotoren nur schwer erreicht werden [1], [2]. Eine Möglichkeit zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs wäre das Abstellen des Verbrennungsmotors im Leerlaufbetrieb. Dazu müsste der Einrückstarter den Verbrennungsmotor häufig anwerfen und die Bordnetzversorgung während des abgestellten Verbrennungsmotors aufrecht erhalten werden. Herkömmliche Systeme mit Klauenpolgenerator (Lichtmaschine) und Einrückstarter können diese Anforderungen nicht erfüllen. Der konventionelle Einrückstarter ist nicht für häufiges Starten des Motors ausgelegt; ebenso ist der z. Zt. in Serie befindliche Generator nicht in der Lage, die notwendige Energie für immer mehr elektrische, bedarfsorientierte Nebenverbraucher bereitzustellen. Wird der Verbrennungsmotor betriebsartbedingt abgestellt, muss die Bordnetzversorgung während dessen gewährleistet sein. Folglich muss nach erneutem Start des Verbrennungsmotors die Batterie mit hohem Wirkungsgrad schnell geladen werden.

Die Entwicklung der Automobile in Richtung erhöhter Sicherheits- und Komfortfunktionen bei gleichzeitiger (durch den Gesetzgeber vorgeschriebener) Emissionsreduktion setzt einen neuartigen Antriebsstrang voraus, welcher das konventionelle System, bestehend aus Verbrennungsmotor, Einrückstarter und Klauenpolgenerator ersetzt. Verschiedene zielführende Lösungsansätze sind Brennstoffzellenfahrzeuge [3], [4], [5], die ihre Energie durch den Brennstoffzellenstack in Form von elektrischer Energie erzeugen und diese durch einen Elektromotor in Vortriebsenergie umsetzen, Elektrofahrzeuge [6], [7], welche durch die begrenzte Energiedichte der Batterie nur eine relativ geringe Reichweite im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen haben und Hybridantriebe [8], [9], die durch die Verwendung verschiedener Energiequellen und -speicher einen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen höheren Gesamtwirkungsgrad erzielen.

Auch wenn auf dem Gebiet der Hybridantriebe in den letzten Jahren beachtliche Erfolge erzielt wurden [10] und Fahrzeuge wie der Toyota Prius, der Honda Civic IMA oder der Lexus Rx400h - sogenannte Full-Hybride<sup>1</sup> - als Serienfahrzeuge in den Markt eingeführt wurden, sind einfache Hybridstrukturen wie der Mild-Hybrid ebenfalls sehr

---

<sup>1</sup>Hybridstrukturen, die auch rein elektrisches Fahren unterstützen

## 1 Einleitung

vielversprechend, da hier bei hoher CO<sub>2</sub>-Reduktion eine schnellere Amortisation der Kosten erreicht werden kann.

Daraus entstand die Motivation zur Untersuchung des Mild-Hybridkonzepts in Verbindung mit einem Dieselmotor, da besonders im europäischen Markt Dieselmotoren eine große Akzeptanz haben. Für diesbezügliche Untersuchungen wurde ein modularer Prüfstand mit den für eine solche Hybridisierung erforderlichen Komponenten aufgebaut. Neben der Auswertung der Messergebnisse bei verschiedenen Fahrzyklen wurde auch das Regelverfahren zur Regelung der Elektromaschine sowie das Bussystem, das zum Datenaustausch zwischen den Komponenten des Prüfstands erforderlich ist, näher betrachtet.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, die für die Mild-Hybridisierung notwendigen Komponenten zu erläutern und in den modularen Hybrid-Prüfstand zu integrieren, um dann durch geeignete Messungen die Vorteile des verwendeten Hybridkonzepts zu belegen.

Die Arbeit ist in acht Kapitel unterteilt. Zunächst wird in Kapitel 2 der Stand der Technik anhand aus der Literatur bekannter Hybridkonzepte erläutert. Dann folgt in Kapitel 3 die Übersicht über die zur Umsetzung der Mild-Hybridisierung erforderlichen Komponenten. Kapitel 4 gibt den Überblick über den Prüfstand. In Kapitel 5 wird das für eine solche EMV-kritische Umgebung entwickelte optische Controller Area Network vorgestellt und mit dem Stand der Technik verglichen. In Kapitel 6 werden die beiden verwendeten Regelverfahren erläutert, ebenfalls mit dem Stand der Technik verglichen und anhand simulativer Ergebnisse einander gegenübergestellt. In Kapitel 7 werden dann die am Prüfstand ermittelten Messergebnisse vorgestellt. Danach folgt in Kapitel 8 die Diskussion und eine Zusammenfassung.

## 2 Stand der Technik

Seit 1978 ist der durchschnittliche Verbrauch der in Deutschland neu zugelassenen Fahrzeugflotte der im VDA<sup>2</sup> zusammengeschlossenen Unternehmen von  $9,8\text{ l}/100\text{-km}$  auf  $7,3\text{ l}/100\text{-km}$  Verbrauch im Normzyklus im Jahre 1996 reduziert worden. Ein wesentlicher Fortschritt war dabei die Entwicklung des 5-Gang-Getriebes und der elektronischen Motorsteuerung. Auf ökologischer Seite haben die in der ACEA<sup>3</sup> zusammengeschlossenen Automobilhersteller im März 1998 darüber hinaus der Europäischen Kommission eine Reduzierung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen ihrer im europäischen Raum zugelassenen Fahrzeugflotte von durchschnittlich ca.  $190\text{ gCO}_2/100\text{-km}$  im Jahr 1995 auf  $140\text{ gCO}_2/100\text{-km}$  bis zum Jahr 2008 versprochen. Das entspricht einer Reduzierung des Kohlendioxidausstoßes um 25 % [11]. Um Emissionen und Verbrauchswerte von Fahrzeugen untereinander vergleichen zu können wurden sogenannte Testzyklen vereinbart, mit denen Fahrzeuge auf dem Prüfstand getestet werden. Da diese Testzyklen nicht den Verbrauch von Nebenaggregaten berücksichtigen, ist der reale Kraftstoffverbrauch etwas höher [12]. Dadurch kommt der Auswahl geeigneter Testzyklen eine wichtige Bedeutung zu.

Die Anforderungen an die elektrische Energieversorgung im Kraftfahrzeug nehmen ständig zu. So ist die erforderliche Generatorleistung allein zwischen 1950 und 1980 etwa um das Fünffache angestiegen und hat sich dann zwischen 1980 und 2000 schon wieder mehr als verdoppelt. Der Bedarf an elektrischer Energie im Kraftfahrzeug wird auch in Zukunft weiter steigen. Der zunehmende Leistungsbedarf ist auf die immer größer werdende Anzahl von elektrischen Verbrauchern zurückzuführen, die für weitere Sicherheits- und Komfortfunktionen benötigt werden [13]. Die Struktur der Nebenaggregate und deren Antrieb hat sich in den letzten Jahrzehnten nicht grundlegend geändert: praktisch alle Nebenaggregate werden über einen Riemen unmittelbar über die auf der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors sitzende Riemenscheibe angetrieben. Um zukünftig den Kraftstoffverbrauch weiter zu reduzieren ist es erforderlich, Nebenverbraucher wie Klimaanlage, Heizung, Hydraulikpumpen und Kühlwasserpumpe elektrisch anzutreiben, um eine bedarfsgesteuerte und wirkungsgradoptimierte Betriebsweise zu ermöglichen und so den Energieverbrauch zu senken [14]. Bedarfsorientierung beim Einsatz von elektro-hydraulischen oder rein elektrisch betriebenen Lenkhilfen birgt ebenfalls ein großes Einsparpotenzial, da die zur Lenkunterstützung erforderliche Hilfsenergie ausschließlich während der Lenkbewegung im Stand und bei kleinen Geschwindigkeiten benötigt wird. Die bei der bisher eingesetzten hydraulischen Lenkhilfe auftretenden Verluste bei Geradeausfahrt werden so vermieden. Diese

---

<sup>2</sup>Verband Deutscher Automobilhersteller

<sup>3</sup>Association des Constructeurs Européens d'Automobiles

## 2 Stand der Technik

Strategie verspricht Erfolg, wenn Verbraucher selten eingesetzt werden oder auf einen bestimmten Betriebspunkt ausgelegt sind und deswegen bei anderen Betriebspunkten einen schlechten Wirkungsgrad erzielen, wie beispielsweise bei der Kühlmittelpumpe, deren Volumenstrom in hohen Drehzahlbereichen den tatsächlichen Bedarf übertrifft [11].

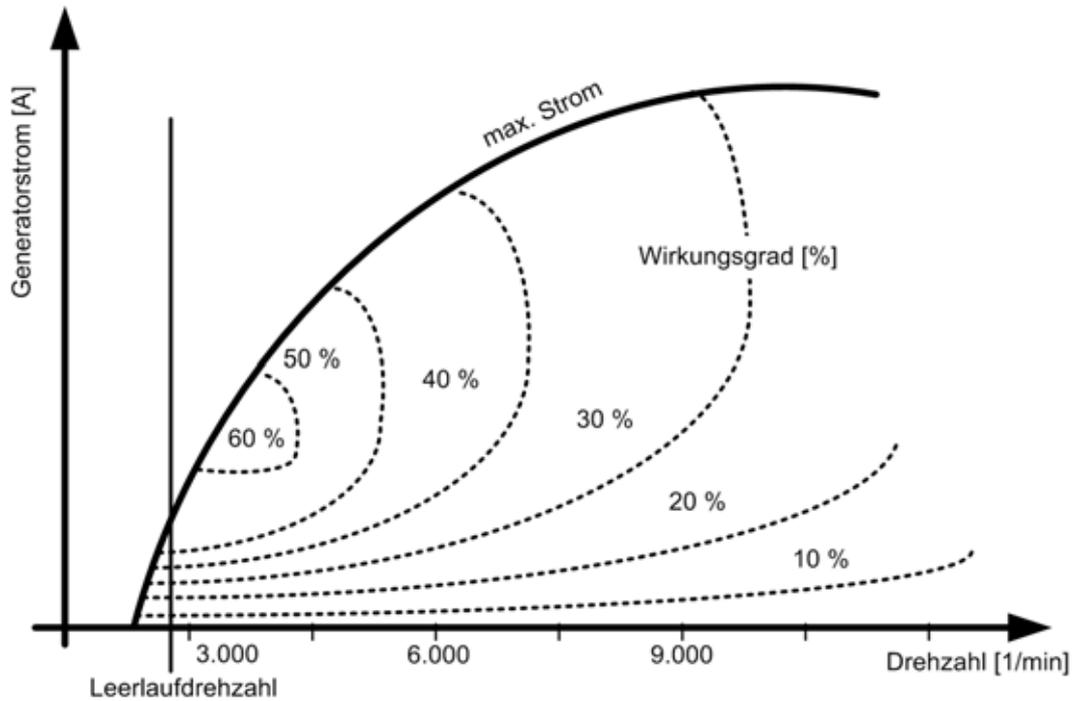
Dem gegenüber steht die aktuelle Bordnetzversorgung, die mittels Klauenpolgenerator<sup>4</sup> realisiert ist [13]. Dieser Generator wurde darauf optimiert, ein Höchstmaß an Leistung bei geringem Materialaufwand und geringen Kosten abzugeben. Da nur in einem begrenzten Drehzahlbereich ein mäßig guter Wirkungsgrad erreicht werden kann, gibt es ungünstige Betriebspunkte, an denen der Klauenpolgenerator nicht genügend Energie erzeugen kann, um die Verbraucher zu versorgen und zusätzlich die Batterie zu laden. So kann es passieren, dass die Batterie zusätzlich Energie bereit stellen muss und dabei weiter entladen wird, wenn leistungsstarke Nebenverbraucher wie Lüftung, Heckscheibenheizung, Scheibenwischer und Abblendlicht eingeschaltet sind. Abb. 1 zeigt das Drehmoment-Drehzahl-Diagramm des Klauenpolgenerators, der mit einer im PKW-Bereich typischen Übersetzung von 1:3 betrieben wird. Es ist ersichtlich, dass der Klauenpolgenerator bei Leerlaufdrehzahl mit gerade noch akzeptablem Wirkungsgrad betrieben wird (vgl. Abb. 1), dieser aber bei höheren Drehzahlen drastisch abnimmt und letztlich mehr Wärme als elektrische Leistung produziert wird.

Zur Umsetzung aktueller Komfortfunktionen sind Generatoren mit Leistungen bis zu 2,5 kW erforderlich. Es ist absehbar, dass ein Leistungsangebot bis zu 6 kW in modernen Fahrzeugen bereitgestellt werden muss [15]. Das konventionelle System, bestehend aus dem Einrückstarter in der Ausführung als Gleichstrommaschine und dem Generator in der Ausführung als Klauenpol-Synchronmaschine, bietet keine weiteren Möglichkeiten, den Wirkungsgrad anzuheben bzw. die verschleißbehafteten Bürsten zu umgehen [16]. Es wurden bereits Untersuchungen durchgeführt, den Wirkungsgrad des Klauenpolgenerators durch die Verwendung von MOSFETs anstatt der herkömmlichen Dioden in der Brückenschaltung zu verbessern [17]. Hier konnte gezeigt werden, dass eine Anhebung des Wirkungsgrads im Leerlaufbetrieb noch möglich ist, die Anhebung allerdings nur wenige Prozentpunkte Verbesserung bringt und dies allein nicht ausreicht, die Bordnetzversorgung sicher zu stellen.

Zur Verringerung der elektrischen Verluste bei gleichzeitiger Erhöhung der Bordnetzleistung muss die aktuelle Bordnetzspannung von 12 V im Bereich der PkW und 24 V im Bereich der NkW angehoben werden. Dazu wurde das 42 V PowerNet diskutiert, das durch die Optimierung der Leistungsausnutzung durch die Verbraucher den bes-

---

<sup>4</sup>der wegen seiner speziellen Bauform des Rotors diesen Namen trägt



**Abbildung 1:** Wirkungsgradkennfeld eines konventionellen Klauenpolgenerators

seren Wirkungsgrad bei der Erzeugung und die geringeren Übertragungsverluste bei der Verteilung der elektrischen Energie, dazu beitragen kann, den Kraftstoffverbrauch zu senken [18].

Aufgrund aktueller Tendenzen, Hybridantriebe mit einer deutlich höheren Betriebsspannung von mehr als 200 V zu betreiben, und aufgrund der höheren Kosten bei der Einführung eines 42 V Bordnetzes mit Umstellung aller Steuergeräte auf dieses Spannungsniveau, sind die Bestrebungen, Fahrzeuge mit einer neuen Bordnetzarchitektur auszustatten, zurück gegangen [19]. Die Kosten, die bei der Umstellung aller Steuergeräte auf eine andere Versorgungsspannung entstehen, würde der Kunde nicht bezahlen, weil für ihn kein unmittelbarer Nutzen daraus ableitbar ist. Mittels Backup-Batterie oder einer höheren Versorgungsspannungsebene nur für die Antriebskomponenten erhofft man sich, die Kosten im Vergleich zu einer Umstellung des gesamten Bordnetzes möglichst gering zu halten [20]. Mittels Gleichspannungsstellern kann ein Energieaustausch zwischen den unterschiedlichen Spannungsebenen ermöglicht werden, wodurch zum einen die Wiederstartfähigkeit und zum anderen auch eine Aufrechterhaltung der Bordnetzversorgung bei abgestelltem Motor [21] gewährleistet werden kann.

Auf mechanischer Seite sind ebenfalls Bestrebungen vorhanden, den Kraftstoffver-

## 2 Stand der Technik

brauch zu senken. Dazu könnte der Verbrennungsmotor mit variablem Ventiltrieb ausgestattet werden. Damit könnten im Schubbetrieb die Schleppverluste reduziert werden, sowie ein aktives Downsizing<sup>5</sup> erfolgen und dadurch der Teillastbereich reduziert werden [22]. Diese Technik setzt eine optimierte Bordnetzversorgung voraus, da hierzu ein elektromechanischer Ventiltrieb erforderlich ist, der hohe Anforderungen an die elektrische Energieversorgung stellt. Eine weitere Möglichkeit, wie sie im Honda Civic IMA verwendet wird, ist eine hydraulische Zylinderabschaltung, die dementsprechend hohe Anforderungen an die mechanischen Komponenten stellt [23]. Automatisierte Schaltgetriebe (AMT) können in modernen Fahrzeugen ebenfalls zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs beitragen, da durch die starre Kopplung der Antriebs- und Abtriebswelle des Getriebes bei eingelegtem Gang die Getriebeverluste geringer ausfallen als bei herkömmlichen Automatikgetrieben [24].

Für die Umsetzung jeglicher Konzepte zur Reduzierung des Emissionsausstoßes ist es zunächst erforderlich, die Bordnetzleistung zu erhöhen. Durch die Verwendung einer optimierten Drehstrommaschine kann dies erreicht werden, da diese mit einem deutlich höheren Maschinenwirkungsgrad über einen größeren Drehzahlbereich arbeitet. Soll nun eine solche optimierte Drehstrommaschine eingeführt werden, so können in diesem Zusammenhang neben dem Start- und Generatorbetrieb weitere Betriebsarten<sup>6</sup> unterstützt werden [25]. Damit entsteht ein neuartiger Antriebsstrang, der sogenannte Hybrid-Antrieb. Für die Einführung des Hybridantriebs ist der Kunde bereit, höhere Kosten zu tragen, da hier der wirtschaftliche Nutzen unmittelbar ersichtlich ist.

Zur Umsetzung eines Hybridantriebs existieren eine Vielzahl von Strukturen hinsichtlich der Anbringung der Elektromaschine(n), der Kombination mit dem Verbrennungsmotor und dem Getriebe und auch der Leistungsauslegung [26]. Die Umsetzung der Hybridstrukturen kann sowohl mittels 42 V Bordnetz [27], [28], [29] als auch durch ein höheres Spannungsniveau erfolgen und ist letztlich ausschlaggebend für die möglichen Betriebsarten [30].

Während die Mehrheit der Automobilhersteller Hybridantriebe in Verbindung mit Ottomotoren herstellt, sind auch Diesel-Hybride interessante Kombinationen, die besonders für den europäischen Markt vielversprechend sind [31].

Eine Übersicht über die Hybridaktivitäten der Automobilindustrie gibt Kap. 2.3. Im folgenden Kapitel werden zunächst die Hybridkonzepte näher erläutert.

---

<sup>5</sup>Verkleinern des Verbrennungsmotors, hier im Zusammenhang mit Zylinderabschaltung gemeint

<sup>6</sup>Betriebsarten wie Start-Stop, rein elektrisches Fahren, Rekuperation, etc.

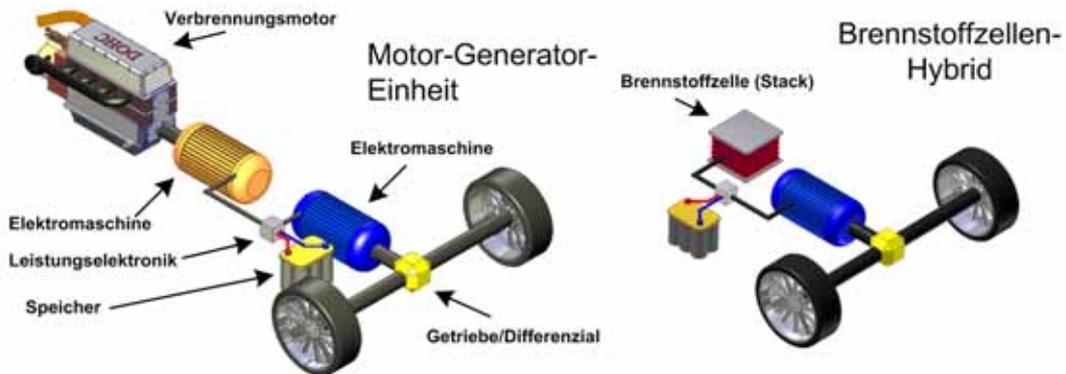
## 2.1 Hybridkonzepte

Als Hybridfahrzeuge bezeichnet man allgemein Fahrzeuge, die ihre Vortriebsenergie nicht aus einer Energiequelle beziehen, sondern mindestens zwei verschiedene Energiequellen verwenden. Die Energie kann dabei mittels einer Quelle oder einem Speicher bereitgestellt werden. Zur uni- als auch bidirektionalen Energieumformung werden Verbrennungsmotoren, Elektromaschinen und Konverter eingesetzt. Ziel bei der Hybridisierung von Antriebssträngen ist es, die Vorteile der unterschiedlichen Antriebssysteme zu kombinieren, d. h. den Teillastbetrieb des Verbrennungsmotors durch gezielten Einsatz einer Elektromaschine durch die sogenannte Bestpunktverschiebung zu reduzieren oder die beim Bremsen freiwerdende Energie teilweise wieder zurück zu gewinnen. Durch die Verluste, die bei der Energiewandlung entstehen, wird ein Teil des Einsparpotenzials wieder vernichtet, weshalb bei allen Hybridfahrzeugen der Einsatzzweck<sup>7</sup> von besonderer Bedeutung ist.

Grundsätzlich lassen sich Hybridstrukturen in zwei große Klassen unterteilen, ohne dabei Varianten und Mischstrukturen zu berücksichtigen (vgl. [32], [33], [34], [35], [36] und [28]). Abb. 2 zeigt Vertreter der parallelen und seriellen Hybridkonzepte. Bei den seriellen Hybridkonzepten erfolgt die Bereitstellung der Vortriebsenergie ausschließlich durch eine Elektromaschine, wodurch eine völlig freie Aufteilung der Energien ermöglicht wird. Bei der Motor-Generator-Einheit besteht das Problem der mehrfachen Energiewandlung, wodurch der Gesamtwirkungsgrad teilweise verschlechtert wird. Dies liegt daran, dass bei der Energiebereitstellung durch den Verbrennungsmotor dieser beim parallelen Hybrid seine Leistung ohne Wandlungsverluste direkt in rotatorischer Form als Traktion abgeben kann, während bei der Motor-Generator-Einheit eine Mehrfachwandlung der Energie (rotatorisch  $\rightarrow$  elektrisch  $\rightarrow$  rotatorisch) erforderlich ist. Bei der Mehrfachwandlung der Energie entstehen zwangsläufig Umwandlungsverluste, wodurch letztlich weniger Energie als beim parallelen Hybrid bereit gestellt werden kann. Im Teillastbetrieb kann dafür durch die freie Lastpunktverschiebung bei der Motor-Generator-Einheit ein höherer Gesamtwirkungsgrad erzielt werden. Bei Verwendung einer Brennstoffzelle kommt man zwangsläufig zu einer seriellen Struktur für eine Hybridisierung, da hier die trägen Eigenschaften der Brennstoffzelle durch den Speicher ausgeglichen werden können und das Brennstoffzellenfahrzeug durch den zusätzlichen Speicher auch Energie zurückgewinnen kann (Rekuperation). In dem Bereich der parallelen Hybride [25] zeigt Abb. 2a eine Drehmomentaddition, bei der die Elektromaschine durch zwei Kupplungen von Antriebsstrang und Verbrennungsmotor getrennt werden kann. Damit kann Segelbetrieb und rein elek-

<sup>7</sup>z. Bsp. bieten Busse, die gleiche, wiederkehrende Strecken zurücklegen oder Kurierdienste mit häufigem Stopanteil ein größeres Hybridisierungspotenzial als NKW mit großem Überlandanteil oder Pkw mit unterschiedlichem Mischanteil

## Serielle Hybridstrukturen



## Parallele Hybridstrukturen

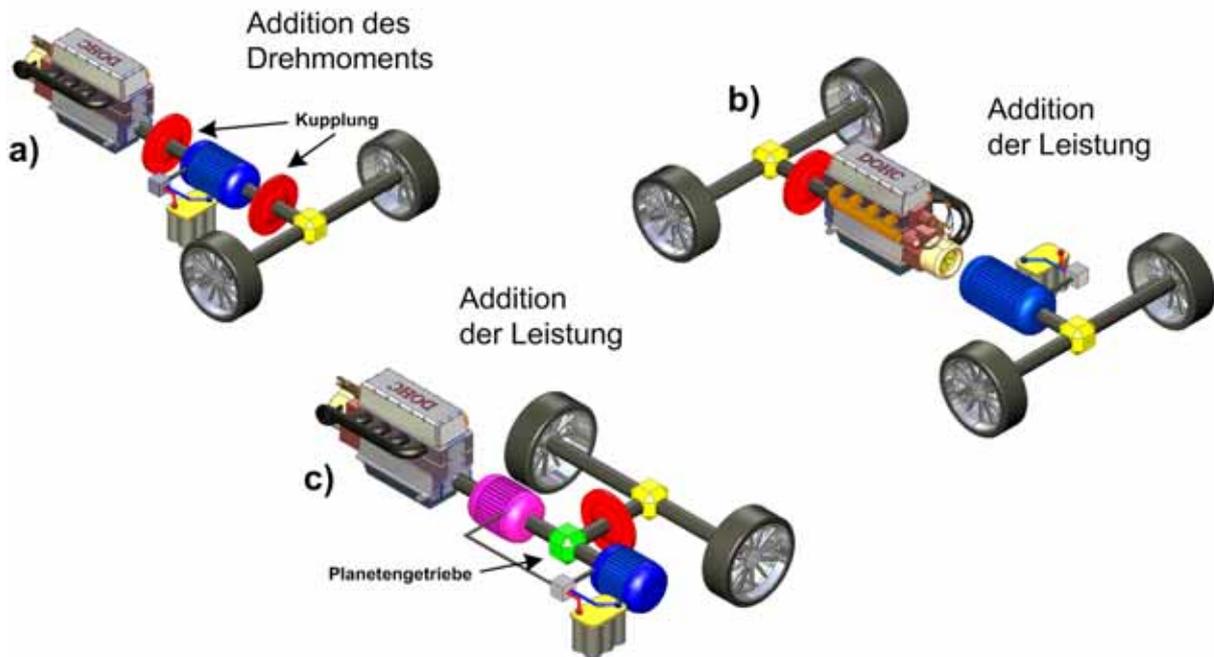
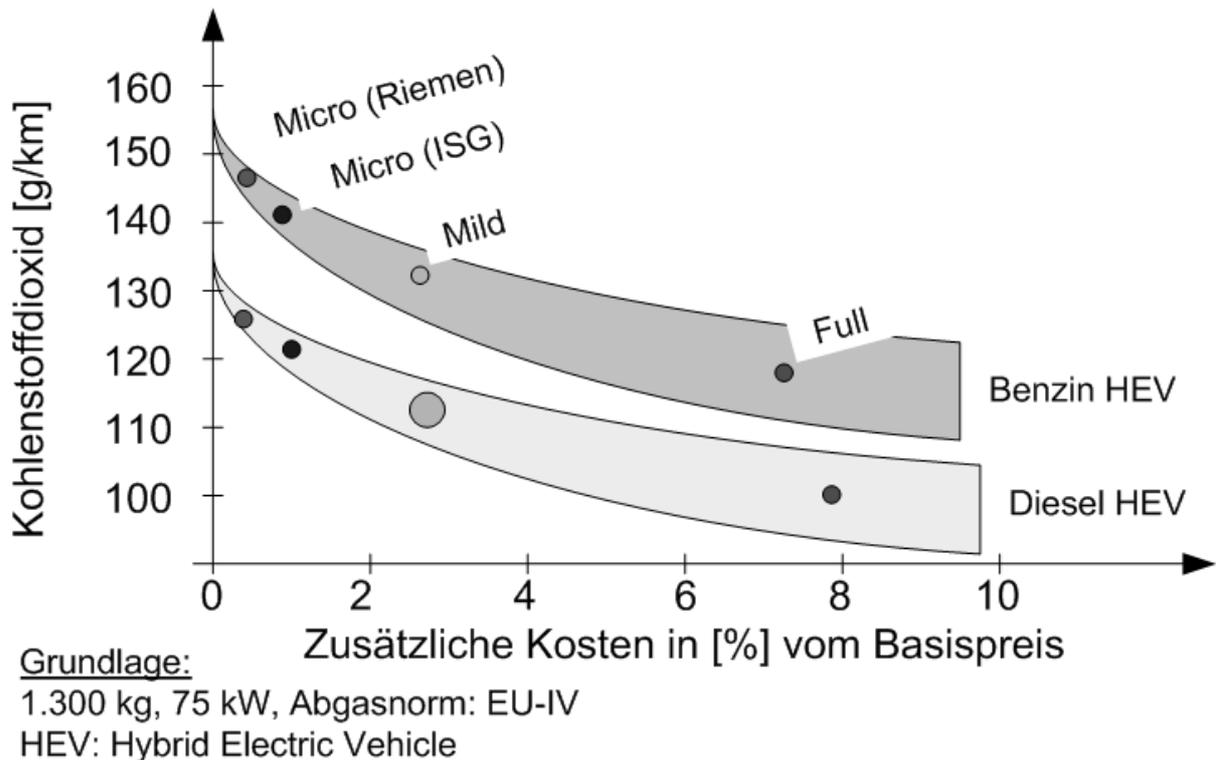


Abbildung 2: Allgemeine Hybridstrukturen

trisches Fahren unterstützt werden. Da die Energieaddition von Verbrennungsmotor und Elektromaschine nur bei gleicher Drehzahl erfolgen kann, spricht man von einer Drehmomentaddition. Abb. 2b zeigt eine Leistungsaddition, bei der Verbrennungsmotor und Elektromaschine auf unterschiedliche Antriebsachsen wirken. Die Drehzahl in Verbindung mit einem Getriebe und das Drehmoment beider Maschinen können unabhängig zueinander gewählt werden, wodurch ein großer Freiheitsgrad hinsichtlich

der Leistungsaufteilung gewonnen wird (vgl. Lexus RX400h). Das Konzept in Abb. 2c zeigt einen leistungsverzweigenden Hybrid, bei dem beide Elektromaschinen und der Verbrennungsmotor über ein Planetengetriebe miteinander verbunden sind. Damit können die Eigenschaften eines seriellen Hybrids sowie eines parallelen Hybrids kombiniert werden (vgl. Toyota Prius). Diese Anordnung setzt ein sehr komplexes Energiemanagement voraus, um eine bestmögliche Energieaufteilung zu erreichen [37], [38].



**Abbildung 3:** CO<sub>2</sub>-Ausstoß aufgetragen über den Kosten [39]

Abb. 3 zeigt eine Einordnung der verschiedenen Hybridkonzepte und damit erreichbare CO<sub>2</sub>-Reduktionen im europäischen Fahrzyklus über den prozentualen Mehrkosten zum Anschaffungspreis aufgetragen [40], [39]. Auch hier gilt das Pareto-Prinzip, denn der Effekt der CO<sub>2</sub>-Reduktion fällt mit zunehmender Komplexität des Antriebsstrangs und damit mit zunehmenden Kosten geringer aus.

Mit der Hybridisierung des Antriebsstrangs erhöhen sich zwangsläufig die Produktionskosten, da hierfür zusätzliche Komponenten benötigt werden. Um einen hybridisierten Antriebsstrang attraktiv zu machen ist es erforderlich, neben der CO<sub>2</sub>-Reduktion auch