

## **Vergleich verschiedener Hybridisierungsgrade von Brennstoffzellenfahrzeugen**

**CES-Seminar**

**Folkert Franzen**

**280337**

Am Lehrstuhl für  
Verbrennungskraftmaschinen  
Aachen

Prof. Dr.- Ing. S. Pischinger  
RWTH Aachen University

Betreuer:

Dipl.- Ing. Marius Walters

Eingereicht am:

28.03.2013

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ALTERNATIVE ANTRIEBSKONZEPTE .....</b>	<b>1</b>
1.1	Batterieelektrisches Fahrzeug (BEV).....	2
1.2	Brennstoffzellenfahrzeug (FCV).....	3
1.3	Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug (FCHEV).....	4
<b>2</b>	<b>VERGLEICH DER KONZEPTE (LITERATUR).....</b>	<b>5</b>
2.1	Umweltfreundlichkeit und Ressourcenschonung .....	5
2.2	Bedienkomfort.....	5
2.3	Wirtschaftlichkeit .....	5
2.3.1	Investitionskosten.....	5
2.3.2	Betriebskosten .....	7
2.3.3	Problematik mit Literaturangaben.....	8
<b>3</b>	<b>BERECHNUNG DER INVESTITIONS- UND BETRIEBSKOSTEN .....</b>	<b>9</b>
3.1	Berechnung der Investitionskosten .....	9
3.2	Berechnung der Betriebskosten .....	10
3.3	Beispiel: Fiat 500.....	11
<b>4</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>14</b>

# 1 Alternative Antriebskonzepte

Die Elektrifizierung des Antriebsstranges eines Fahrzeugs bringt eine Reihe von Vorteilen mit sich. Elektromotoren können – auch unter Berücksichtigung der Verluste in der Leistungselektronik und im Energiespeicher - erheblich höhere Wirkungsgrade als Verbrennungsmotoren vergleichbarer Leistung erreichen. Zudem ermöglicht ein elektrifizierter Antriebsstrang die Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation). Die beim Bremsen des Fahrzeugs auftretende Leistung kann also teilweise durch Generatorbetrieb des Elektromotors in Form von elektrischer Energie in der Batterie gespeichert werden.

Der schädliche Einfluss durch Emission von Kohlenstoffdioxid und weiteren Schadstoffen auf Klima und Umwelt sowie die verkehrsbedingte starke Luftverschmutzung vor allem in Großstädten stellen weitere Motive für die Elektrifizierung dar. Elektrifizierte Antriebsstränge ermöglichen einen zumindest lokal emissionsfreien Betrieb des Fahrzeugs. Des Weiteren kann nahezu jede Energiequelle zur Erzeugung von elektrischer Energie dienen, so dass insbesondere ein Betrieb mit erneuerbaren Energien möglich ist. Auch die Emission von Lärm, die ebenfalls vor allem in Städten Einfluss auf das Wohlbefinden der Anwohner hat, kann durch einen elektrifizierten Antriebsstrang weitgehend reduziert werden. [IEA08],[IEA10]

Derzeit stellt die Batterie eine wesentliche Hürde bei der Entwicklung alternativer Antriebe dar. Aufgrund der relativ geringen Energiedichte fallen Batteriesysteme, die eine vom Kunden geforderte Reichweite ermöglichen, in der Regel relativ groß und schwer aus. Zudem dauert eine Ladung der Batterie aus einer externen Quelle vergleichsweise lang. Daher ist ein Betrieb über die Reichweite der Batterie hinaus nur mit längeren Unterbrechungen möglich.

Eine sinnvolle Möglichkeit, die genannten Einschränkungen der Batteriesysteme zu kompensieren, ist die Integration von Brennstoffzellensystemen in den elektrischen Antriebsstrang. Der Energiespeicher (Wasserstofftank) für ein Brennstoffzellensystem kann höhere Energiedichten erreichen, wodurch eine höhere Reichweite in Relation zum Fahrzeuggesamtgewicht möglich ist. Zudem kann der gasförmige Brennstoff dem Fahrzeug sehr viel schneller zugeführt werden (Größenordnung Minuten im Vergleich zu mehreren Stunden bei Batteriesystemen). [OHC10]

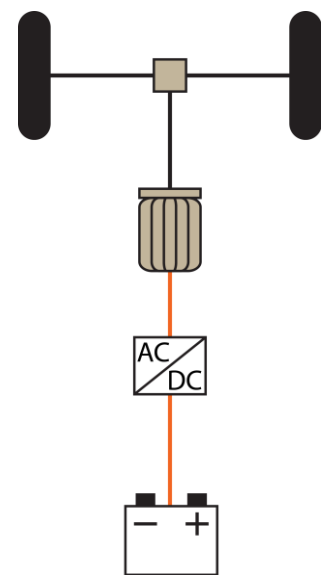
Die Kombination von Brennstoffzellen- mit Batteriesystemen im elektrifizierten Antriebsstrang eines Fahrzeugs ermöglicht die Nutzung von Synergien der beiden Systeme. Kurzzeitig auftretende Leistungsspitzen im Lastprofil (z.B. bei starker Beschleunigung) können durch das Batteriesystem abgepuffert werden. Die Brennstoffzelle kann somit in günstigen, d.h. verbrauchseffizienten Betriebspunkten betrieben werden.

## 1.1 Batterieelektrisches Fahrzeug (BEV)

Der Antriebsstrang eines batterieelektrischen Fahrzeugs besteht im Wesentlichen aus der Batterie, die den Energiespeicher darstellt, einem Stromrichter zur Umwandlung von Wechsel- in Gleichstrom und umgekehrt sowie einem elektromechanischen Wandler (Elektromotor/Generator), der zwischen elektrischer und mechanischer Energie wandelt (siehe Abb. 1-1).

Um dem System Energie zuzuführen, muss die Batterie bei dieser Art von Fahrzeugen extern geladen werden.

Wird der elektromechanische Wandler beim Abbremsen des Fahrzeugs als Generator betrieben, kann zumindest ein Teil der Bremsenergie in Form von elektrischer Energie zurückgewonnen und in die Batterie eingespeist werden. Dieses als Rekuperation bezeichnete Verfahren stellt einen wesentlichen Vorteil im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren dar, bei denen die Bremsenergie komplett als Wärme verloren geht und zudem noch den Verschleiß von Bremsen begünstigt.



**1-1 Schema des Antriebsstrangs eines BEV**

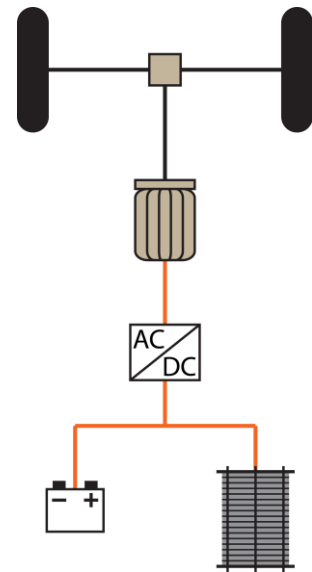
## 1.2 Brennstoffzellenfahrzeug (FCV)

In den Antriebsstrang eines Brennstoffzellenfahrzeugs ist im Vergleich zu dem des batterieelektrischen Fahrzeugs ein Brennstoffzellensystem integriert (Abb. 1-2). Dieses System dient dem Brennstoffzellenfahrzeug als Primärtrieb, d.h. die erforderliche Energie zum Betrieb des Fahrzeugs wird aus dem Energiespeicher des Brennstoffzellensystems (Wasserstofftank) entnommen.

Um die zuvor genannten Synergien auszunutzen, wird in aller Regel auch ein Batteriesystem in den Antriebsstrang eines Brennstoffzellenfahrzeugs integriert.

Dieses Batteriesystem dient allerdings im Wesentlichen als Puffersystem für auftretende Leistungsspitzen. In der Regel werden hohe Leistungen beim Betrieb eines Fahrzeugs nur kurzzeitig benötigt (z.B. beim Beschleunigen). Bedient man diese Leistungsanforderungen durch eine Batterie, kann das Brennstoffzellensystem vergleichsweise klein ausgelegt und in einem effizienteren Betriebspunkt betrieben werden.

Das Batteriesystem wird bezüglich des Energieinhaltes klein ausgelegt, während es vergleichsweise große Leistungen ermöglichen muss. Diese Art von Batterien ist in der Regel kostenintensiver als Batterien mit einem höheren Energieanteil im Vergleich zum Leistungsvermögen. Wegen der geringen Kapazität dieser Batterien und aufgrund der Betriebsstrategie, die Energie im Wesentlichen aus der Brennstoffzelle zu beziehen, ist es nicht sinnvoll, die Batterien extern ladbar zu konzipieren.



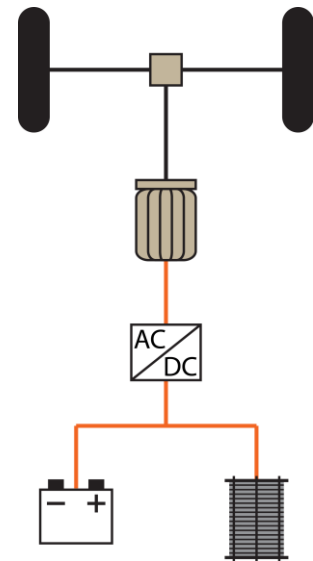
**1-2 Schema des Antriebsstrangs eines FCV**

### 1.3 Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug (FCHEV)

Zwischen den Konzepten des batterieelektrischen Fahrzeugs und des Brennstoffzellenfahrzeugs ist eine Vielzahl von unterschiedlichen Dimensionierungen von Batterie und Brennstoffzelle möglich. Zudem sind sehr unterschiedliche Betriebsstrategien möglich.

Ein mögliches Konzept für Hybridfahrzeuge ist der sogenannte Plug-In-Hybrid. Bei diesem Konzept ist die Batterie extern ladbar. Dies ist in der Regel erst ab einer gewissen Kapazität sinnvoll. Der Antrieb des Fahrzeugs kann ausschließlich durch die Batterie (in der Regel bei geringen Geschwindigkeiten) oder kombiniert mit dem zweiten Antriebsaggregat (in diesem Fall die Brennstoffzelle) erfolgen.

Das Konzept des Range-Extenders sieht ebenfalls neben der primären Energiequelle (Batterie) einen Sekundärtrieb (Brennstoffzelle) vor. Der Sekundärtrieb dient dabei zur Verlängerung der Reichweite des Fahrzeugs, indem er aktiviert wird, sobald die Batterie einen definierten Ladezustand unterschritten hat und um hohe Geschwindigkeiten zu ermöglichen. Somit ist es möglich, die Energie für kürzere Strecken mit geringen Geschwindigkeiten (z.B. Fahrten in der Stadt) ausschließlich aus der Batterie zu beziehen. Dies ist aufgrund der geringeren Energiekosten für elektrische Energie sinnvoll. Außerdem ermöglicht dieses Konzept durch den Sekundärtrieb längere Fahrten bei hohen Geschwindigkeiten (Überland- und Autobahnfahrten).



**1-3 Schema des Antriebsstrangs eines FCV**

## 2 Vergleich der Konzepte (Literatur)

In diesem Abschnitt werden die vorgestellten Konzepte bezüglich unterschiedlicher Eigenschaften verglichen. Auf in der Literatur vorgefundenen Daten basierend wird der Schwerpunkt hierbei auf den Vergleich der Wirtschaftlichkeit - d.h. der Investitions- und Betriebskosten – gelegt.

### 2.1 Umweltfreundlichkeit und Ressourcenschonung

Sowohl der Betrieb mit einem Batteriesystem als auch mit einem Brennstoffzellensystem, das mit reinem Wasserstoff und Umgebungsluft betrieben wird, sind lokal emissionsfrei und äußerst geräuscharm. Die Emissionen und Ressourcenschonung bei der Bereitstellung der Energie sind aufgrund der Vielzahl von Möglichkeiten schwierig zu vergleichen und werden an dieser Stelle nicht näher betrachtet.

### 2.2 Bedienkomfort

Ein wesentlicher Unterschied im Bedienkomfort liegt bei der Ladung bzw. Betankung der Antriebssysteme vor. Während das Laden der Batterie einen Zeitraum in der Größenordnung von Stunden benötigt, lässt sich das Brennstoffzellensystem innerhalb von wenigen Minuten betanken.

Das Laden der Batterie hat wiederum den Vorteil, dass es in der Regel am eigenen Hausanschluss möglich ist. Zudem ist die Infrastruktur für elektrische Energie sehr viel stärker ausgebaut als die für Wasserstoff.

### 2.3 Wirtschaftlichkeit

Beim Vergleich der Wirtschaftlichkeit kann zwischen den Investitionskosten, d.h. den Kosten für die Anschaffung, und den Betriebskosten unterschieden werden.

#### 2.3.1 Investitionskosten

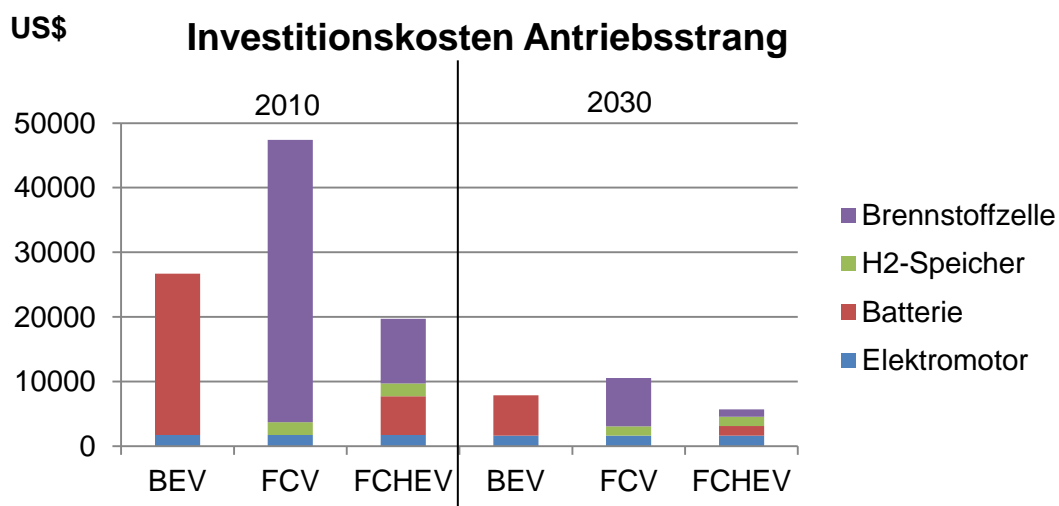
An dieser Stelle werden lediglich die Investitionskosten für den Antriebsstrang verglichen, da angenommen werden kann, dass die übrigen Bauelemente (Karosserie, Fahrwerk etc.) sich bei den unterschiedlichen Antriebskonzepten nicht wesentlich unterscheiden.

Abb. 2-1 zeigt die Investitionskosten für Antriebsstränge verschiedener Fahrzeugkonzepte in den Jahren 2010 und 2030 basierend auf [IEA10].

Hierfür wurden folgende Konzepte betrachtet:

- Batterieelektrisches Fahrzeug (BEV): Batterie (25 kWh)
- Brennstoffzellenfahrzeug (FCV): Wasserstoffspeicher, Brennstoffzelle (80 kW)
- Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug (FCHEV): Wasserstoffspeicher, Brennstoffzelle (20 kW), Batterie (6 kWh)

Für alle Konzepte wurde der gleiche Elektromotor angenommen. Die dargestellte Zukunftsprognose für 2030 stellt die Mittelwerte aus einem pessimistischen und einem optimistischen Szenario dar.



### 2-1 Investitionskosten verschiedener Antriebsstrangkonfigurationen nach [OHC10]

Sowohl für 2010 als auch in der Zukunftsprognose für 2030 sind die höchsten Investitionskosten für das Brennstoffzellenfahrzeug aufzubringen, gefolgt vom Batterieelektrischen Fahrzeug. Für das Konzept des Brennstoffzellen-Hybridfahrzeugs ergeben sich nach dieser Studie die geringsten Investitionskosten.

Insgesamt wird angenommen, dass sich die Investitionskosten durch günstigere Produktion der Komponenten (Massenproduktion) bis 2030 stark verringern.

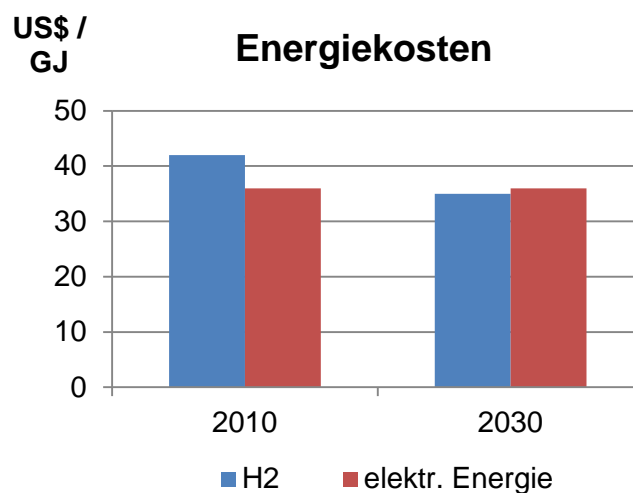
Den wesentlichen Kostenanteil beim Brennstoffzellenfahrzeug macht die Brennstoffzelle aus. Durch Kombination mit einem Batteriesystem beim Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug kann die Brennstoffzelle sehr viel kleiner konzipiert werden und ist entsprechend günstiger. Analog kann die Batterie für das Hybridfahrzeug erheblich kostengünstiger konzipiert werden.



### 2.3.2 Betriebskosten

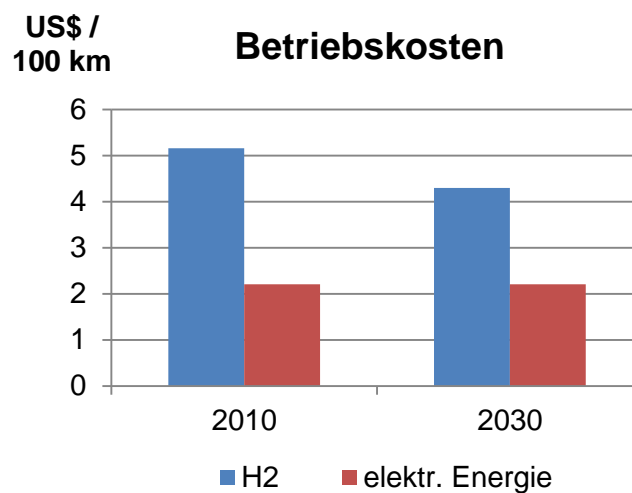
Zum Vergleich der Betriebskosten werden zunächst die Energiekosten für Wasserstoff und elektrische Energie verglichen (s. Abb. 2-2). Dabei wurden die Energiekosten jeweils exklusive Steuern in US-Dollar pro GJ ermittelt.

Nach dieser Studie unterscheiden sich die energiespezifischen Kosten für Wasserstoff und elektrische Energie nur geringfügig. Für 2010 wurden höhere Kosten für Wasserstoff ermittelt, während für 2030 erwartet wird, dass die Kosten für Wasserstoff unter den Wert der elektrischen Energiekosten sinken.



#### 2-2 Energiekosten für Wasserstoff (H2) und elektrische Energie nach [OHC10]

Für die Ermittlung der Betriebskosten für ein Fahrzeug, das mit den betrachteten Energieträgern betrieben wird, müssen zusätzlich die Wirkungsgrade der entsprechenden Systeme betrachtet werden. In der betrachteten Studie wurde der Wirkungsgrad für die Energiewandlung des Wasserstoffs halb so groß angenommen wie der für die Wandlung der elektrischen Energie. Dies spiegelt sich deutlich in den ermittelten Werten der Betriebskosten für 100 km wieder (s. Abb. 2-3). Demnach ist der Betrieb mit elektrischer Energie sowohl zum aktuellen Zeitpunkt (2010) als auch in Zukunft (2030) deutlich kostengünstiger als der Betrieb mit Wasserstoff.



### 2-3 Kosten für Betrieb mit Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und mit elektrische Energie nach [OHC10]

#### 2.3.3 Problematik mit Literaturangaben

Die in der Literatur zu findenden Angaben, insbesondere zu Investitionskosten für alternative Antriebsstränge, lassen sich nur bedingt auf abweichende Konzepte übertragen. Zudem lassen sich Ergebnisse unterschiedlicher Studien kaum miteinander vergleichen. Zum einen basieren sie auf einer Reihe von Annahmen, die zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Zum anderen werden in unterschiedlichen Kostenschätzungen verschiedene Systeme, z.B. Gesamtfahrzeug oder ausschließlich Antriebsstrang, betrachtet. Auch die Projektion der Kosten auf andere Konzepte und in die Zukunft wird mit unterschiedlichen Methoden durchgeführt, die in der Regel nur bedingt nachvollziehbar sind und zu stark abweichenden Prognosen führen können.

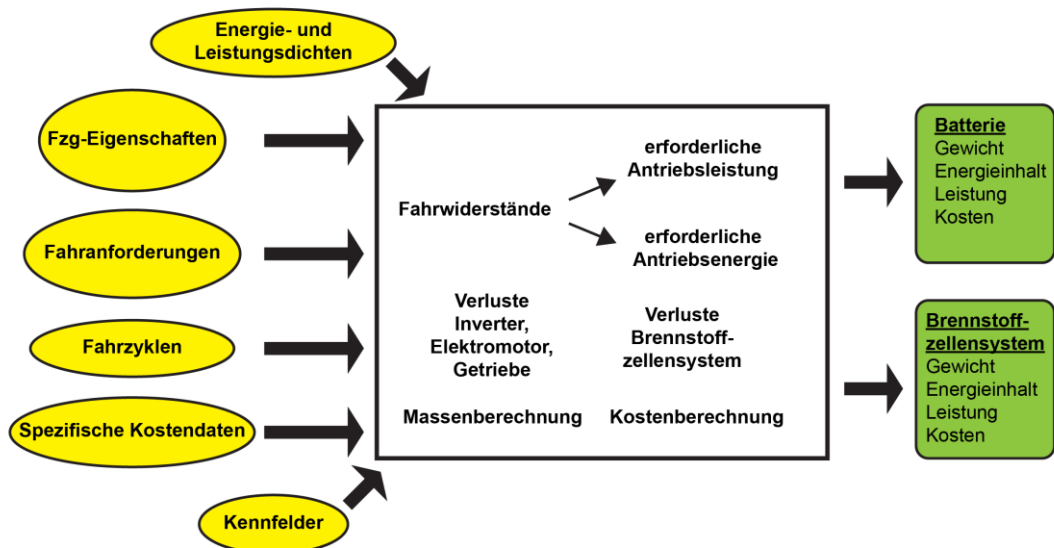
Um einen umfassenden Vergleich verschiedener Konzepte zu ermöglichen, ist zunächst die Auslegung der Antriebskomponenten (in diesem Fall vor allem Batterie und Brennstoffzellensystem) bezüglich der erforderlichen Leistung und des Energieinhaltes notwendig. Zudem muss eine Reihe von Randbedingungen wie Fahranforderungen und grundlegende Fahrzeugeigenschaften festgelegt werden. Kombiniert mit möglichst realistischen Werten für Kosten, mit Kennfeldern bereits existierender Komponenten sowie mit typischen Betriebszuständen lassen sich auf diese Weise Auslegung und Kosten verschiedener Fahrzeugkonzepte ermitteln und vergleichen.

## 3 Berechnung der Investitions- und Betriebskosten

In diesem Abschnitt werden der grundlegende Aufbau sowie die Funktionsweise der entwickelten Berechnungsmethode von Investitions- und Betriebskosten vorgestellt.

### 3.1 Berechnung der Investitionskosten

Die Berechnung der Investitionskosten ist in Abb. 3-1 schematisch dargestellt. Zunächst muss eine Reihe von Randbedingungen (in gelben Ovalen dargestellt) definiert werden. Zum Teil werden diese zur Definition des Fahrzeugtyps (Fahrzeugeigenschaften, Fahranforderungen) benötigt, zum Teil stellen sie Eigenschaften der Fahrzeugkomponenten (Energie- und Leistungsdichte, Kennfelder) dar.



3-1 Schema der Investitionskostenberechnung

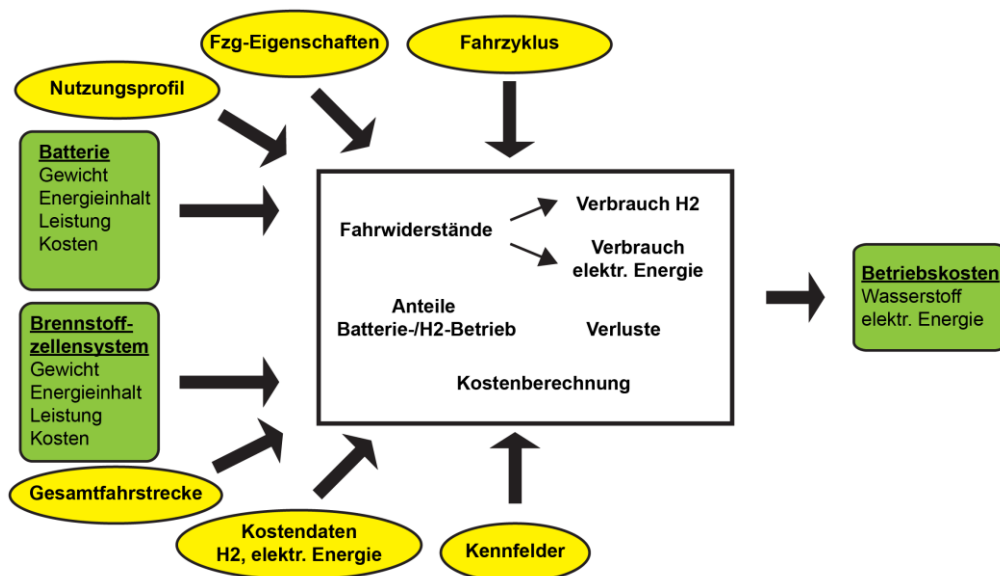
Ausgehend von den Fahranforderungen und vorgegebenen Fahrzyklen werden zunächst die Fahrwiderstände ermittelt. Unter Berücksichtigung von auftretenden Verlusten in unterschiedlichen Antriebskomponenten werden die erforderliche Antriebsleistung und Antriebsenergie ermittelt. Basierend auf diesen Ergebnissen werden wiederum eine Massen- sowie eine Kostenberechnung der notwendigen Komponenten durchgeführt. Somit ergeben sich die Auslegung bezüglich Gewicht,

Energieinhalt und Leistung sowie die Investitionskosten für Batterie und Brennstoffzellensystem.

Zu beachten ist, dass in dieser Berechnung die Begrenzung des Bauvolumens (Packaging) vernachlässigt wurde. Effekte wie Energierückgewinnung (Rekuperation), Leistungsaufnahme der Brennstoffzellen-Peripherie (z.B. Verdichter) sowie die Begrenzung des möglichen Bereichs der Ladezustände der Batterie wurden hingegen berücksichtigt.

### 3.2 Berechnung der Betriebskosten

Für die Berechnung der Betriebskosten werden u.a. die Ergebnisse für die Auslegungen von Batterie und Brennstoffzelle (Leistung, Energieinhalt, Masse) verwendet. Basierend auf einem vorgegebenen Fahrzyklus wird - wiederum unter Berücksichtigung von Verlusten – der durchschnittliche Verbrauch von elektrischer Energie und Wasserstoff pro Strecke ermittelt.



#### 3-2 Schema der Betriebskostenberechnung

Um die Anteile von Batteriebetrieb und Wasserstoffbetrieb abzuschätzen, werden Nutzungsprofile verwendet. Diese geben Häufigkeitsverteilungen von gefahrenen Strecken wieder (z.B. aus Umfragen). Unter der Annahme, dass der Batteriebetrieb bevorzugt wird (geringere Kosten, siehe Abb. 2-3), lassen sich somit die Anteile von Batterie- und Wasserstoffbetrieb ermittelt. Unter Hinzunahme der angenommenen Gesamtfahrstrecke (Nutzungsdauer · jährlich gefahrene Strecke) ergibt sich der Gesamtverbrauch und damit die Betriebskosten für die angenommene Nutzungsdauer.

### 3.3 Beispiel: Fiat 500

Anhand beispielhafter Berechnungen für den Kleinwagen Fiat 500 (neue Auflage von 2007) werden in diesem Abschnitt Ergebnisse der Kostenberechnung dargestellt.

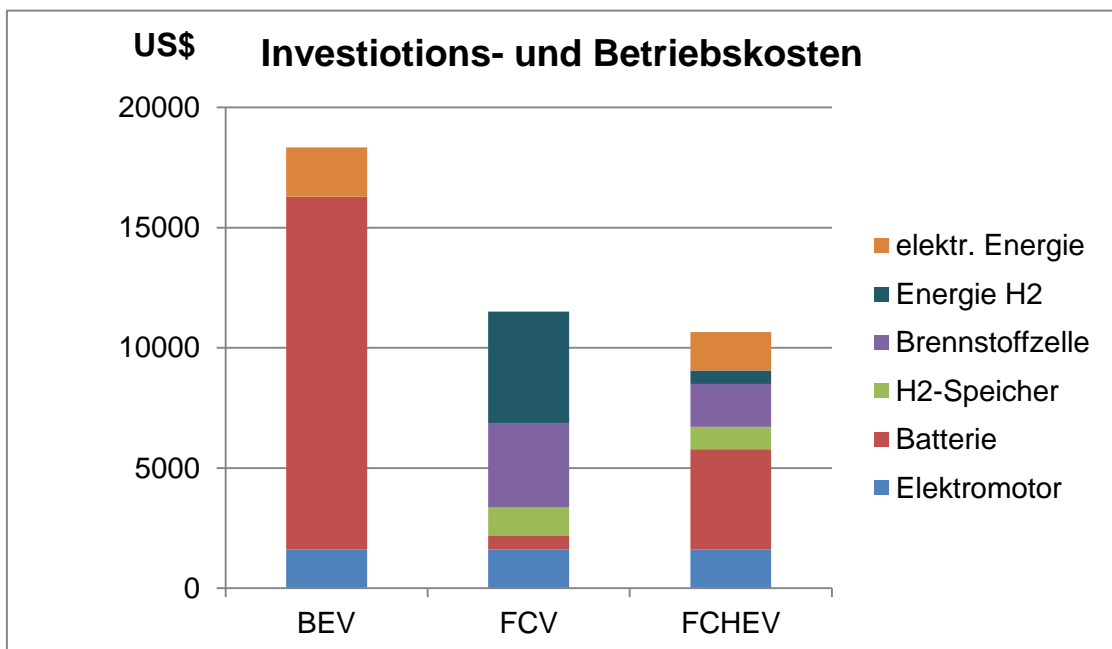
Als Fahrzyklus wurde der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) verwendet. Zudem wurden u.a. folgende Fahranforderungen definiert:

- Reichweite: 300 km
- Beschleunigungsvermögen (0-100 km/h): 12,9 s
- Maximalgeschwindigkeit: 150 km/h

Die Kostenberechnungen wurden für ein batterieelektrisches Fahrzeug, für ein Brennstoffzellenfahrzeug (im reinen Batteriebetrieb: 7 km Reichweite und 50 km/h Maximalgeschwindigkeit) und für ein Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug (im reinen Batteriebetrieb: 70 km Reichweite und 150 km/h Maximalgeschwindigkeit) durchgeführt.

Zur Betriebskostenberechnung wurde eine Gesamtfahrstrecke von 150000 km angenommen. Die verwendeten Energiekosten basieren auf [OHC10].

Die Ergebnisse der Kostenberechnung sind in Abb. 3-32-1 dargestellt. Die verwendeten Kostendaten des Brennstoffzellensystems basieren auf [DoE12], die der Batterie basieren auf [KH07]. Das Nutzungsprofil wurde der Studie "Mobilität in Deutschland" [MiD02] entnommen.



**3-3 Ergebnisse der Berechnung der Investitions- und Betriebskosten für unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen**

## 4 Zusammenfassung

Die Einbindung von Brennstoffzellensystemen in den elektrifizierten Antriebsstrang ermöglicht größere Reichweiten im Vergleich zu reinen batterieelektrischen Fahrzeugen. Der Betrieb des Fahrzeugs bleibt bei der Verwendung von reinem Wasserstoff zudem leise und lokal emissionsfrei.

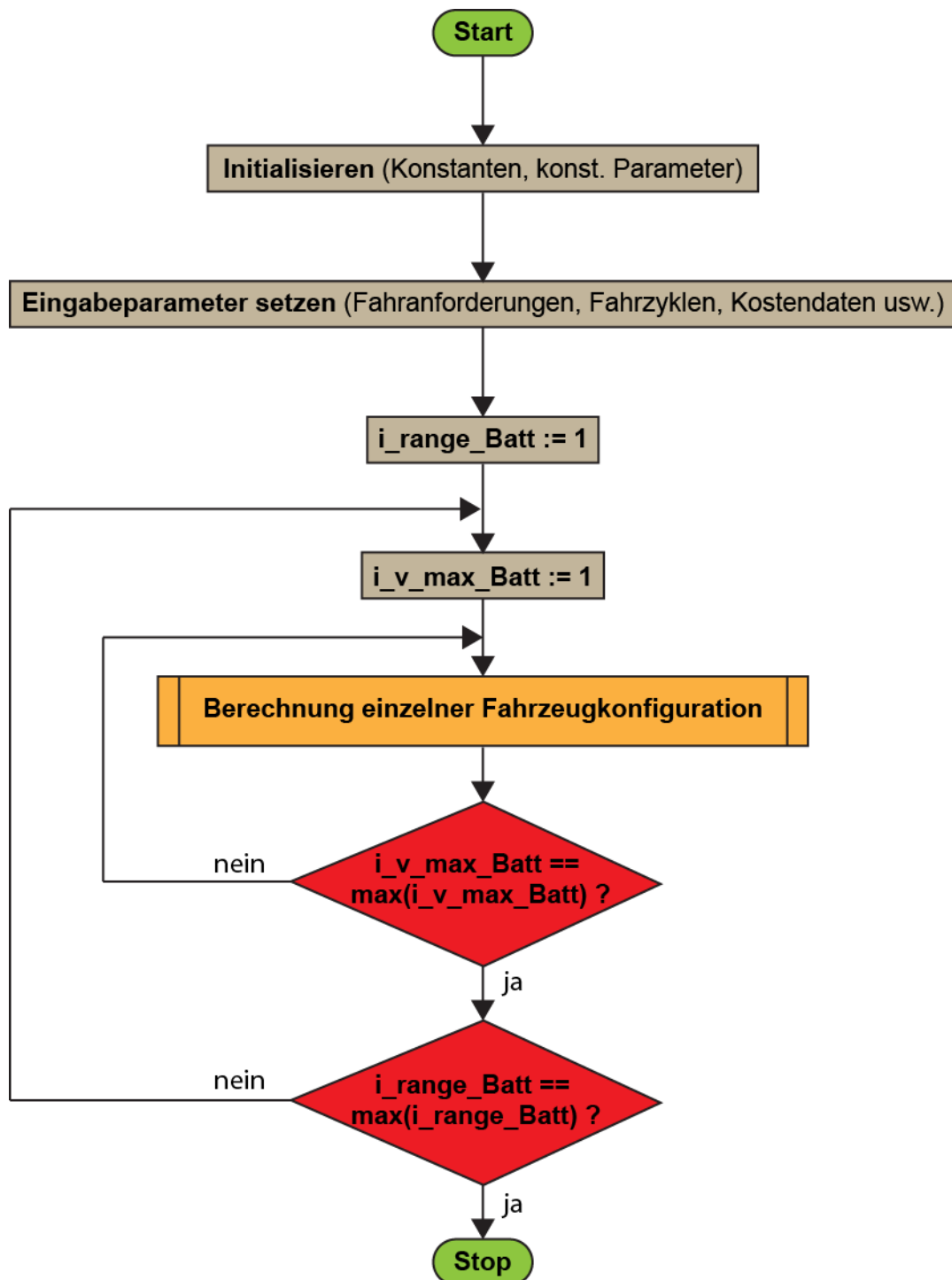
Die Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten hängt von einer Vielzahl von Parametern ab. In der Literatur vorzufindende Angaben sind in der Regel nur bedingt vergleichbar und auf abweichende Fahrzeugkonzepte übertragbar.

Um die Kosten unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte mit vorgegebenen Anforderungen und Rahmenbedingungen zu vergleichen, wurde ein Berechnungsprogramm entwickelt. Dieses ermittelt zunächst aus einer Reihe von Eingangsdaten, die das Fahrzeug, seine Anforderungen und Komponenten näher definieren, die Auslegung der Antriebskomponenten Batterie und Brennstoffzelle. Basierend auf der Auslegung werden unter Hinzunahme u.a. von spezifischen Kostendaten und Nutzungsprofilen die Investitionskosten für den Antriebsstrang sowie die Betriebskosten für einen definierten Zeitraum abgeschätzt. Die Qualität dieser Abschätzung hängt dabei stark von den vorgegebenen Eingangsdaten ab und kann durch realistische Parameter und Kennfelder erhöht werden.

## 5 Literaturverzeichnis

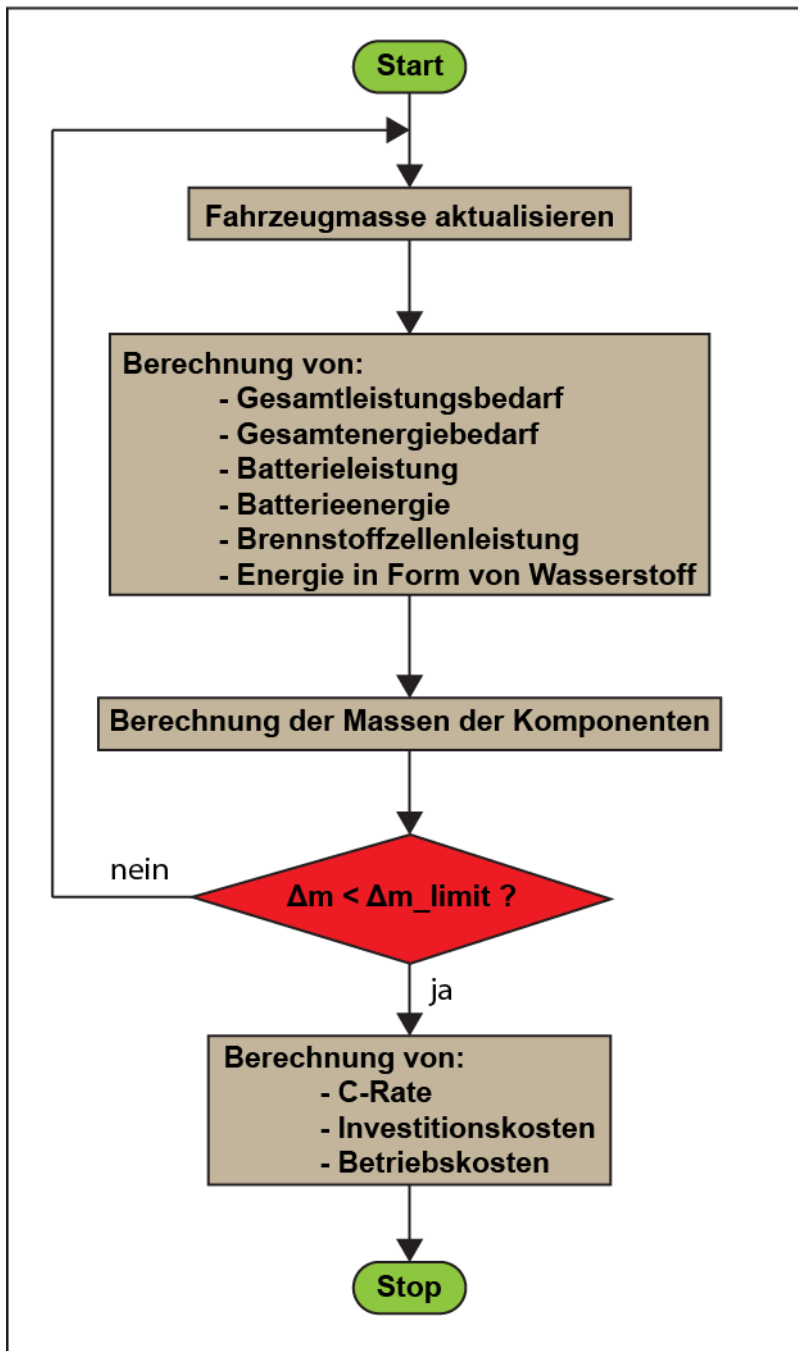
- [DoE12] The U.S. Department of Energy, Fuel cell technologies program, 2012.
- [IEA08] Energy technology perspectives 2010: Scenarios & strategies to 2050. OECD/IEA, Paris, 2008.
- [IEA10] World energy outlook. OECD/IEA, Paris, 2010.
- [KH07] M. A. Kromer, J. B. Heywood. Electric Powertrains: Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet. Hg. v. Automotive Laboratory. Massachusetts Institute of Technology, 2007
- [MiD02] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Mobilität in Deutschland, Studie 2002
- [OHC10] G. J. Offer, D. Howey, M. Contestabile, R. Clague, und N. P. Brandon. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. Energy Policy, 38(1):24–29, 2010.
- [VM11] A. Veziroglu, R. Macario. Fuel cell vehicles: State of the art with economic and environmental concerns, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 36, Issue 1, January 2011, Pages 25-43

## 6 Anhang



6-1 Ablaufdiagramm des Programms zur Berechnung der Investitions- und Betriebskosten verschiedener Brennstoffzellen-Hybridfahrzeuge



**Berechnung einzelner Fahrzeug-Konfiguration**

6-2 Ablaufdiagramm des Unterprogramms zur Berechnung der Investitions- und Betriebskosten einzelner Fahrzeugkonfigurationen