

**About The Cell**



**Machbarkeitsstudie  
zum Einsatz von Hybridfahrzeugen  
mit Hochenergie-Batteriepufferspeichern  
zur wertschöpfenden Nutzung  
von regenerativem Überschussstrom**

**Auftraggeber:**

**SGD Süd Forschungsanstalt für  
Waldökologie und Forstwirtschaft  
Rheinland-Pfalz,  
Abt. D – Arbeitswirtschaft und  
Forstnutzung  
67705 Trippstadt-Schloss**

**Auftragnehmer:**

**Dr. Erhard Schubert  
About The Cell  
Zum Manntal 12  
67728 Münchweiler  
Telefon 06302-4102  
Telefax 06302-609975**

**Datum: 10. April 2006**



## Gliederung

|                                                                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Zusammenfassung</b>                                                                                               | <b>03</b> |
| <b>Einleitung</b>                                                                                                    | <b>05</b> |
| <b>I      Grundlegende Anmerkungen zur Einbindung von Fahrzeugen</b>                                                 | <b>08</b> |
| <b>II     Fahrzeugkonzepte für die Einbindung in das Projekt Bruchmühlbach</b>                                       | <b>12</b> |
| <b>III    Beschreibung von Hybridfahrzeugen verschiedener Hersteller</b>                                             | <b>16</b> |
| <b>IV    Batteriebetriebene Elektrostraßenfahrzeuge</b>                                                              | <b>26</b> |
| <b>V     Funktionserweiterungen in zukünftigen Hybridfahrzeugen</b>                                                  | <b>31</b> |
| <b>VI    Abschätzungen der Funktionserweiterungen zukünftiger Hybridfahrzeuge in Richtung emissionsfreies Fahren</b> | <b>37</b> |
| <b>Literatur- und Quellenverzeichnis</b>                                                                             | <b>45</b> |
| <b>Anhang</b>                                                                                                        | <b>46</b> |



## Zusammenfassung

Hybridfahrzeuge werden sich in nächster Zeit nicht nur in Nordamerika und Japan, sondern auch aufgrund des hohen Kraftstoffverbrauchsvorteils im europäischen Fahrzeugmarkt durchsetzen. Kosten- und Lebensdauergründe zwingen zurzeit die Automobilhersteller die Batteriegröße zu minimieren und den zyklischen Betrieb der Batterie gravierend einzuengen. In der Zukunft werden jedoch die realistisch erwarteten, deutlich verbesserten Batteriewerte bezüglich Energie- und Leistungsdichte dazu führen, dass erstens die Leistungsdefizite bei Full Hybrid – Fahrzeugversionen beim Fahren mit hohem Leistungsbedarf aber ungenügend geladener Batterie signifikant verbessert werden, und dass zweitens dann Hybridfahrzeuge das rein elektrische Fahren ohne Verbrennungsmotorunterstützung und ohne jegliche CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen für wachsende Fahrstrecken erlauben. Die offene, erweiterbare Systemarchitektur von Full Hybrid - Antriebssystemen wird somit mit wachsendem Anteil über die Aufladung der Fahrzeugbatterie aus der elektrischen Netzversorgung den Einsatz von elektrischer Energie aus erneuerbaren Energieträgern anstelle von fossilen Kraftstoffen ermöglichen und dadurch zu deutlich niedrigeren CO<sub>2</sub>-Emissionen bei diesen Plug-In-Hybridfahrzeugen führen.

Die Erschließung dieses Potenzials wird in erster Linie abhängig sein von der Entwicklung des technischen Reifegrades für Lithium-Ionen-Batteriesysteme, speziell bezüglich der Energiedichten, Lebensdauer und des Batteriemanagements, und hauptsächlich vom Grad der Reduzierung der Systemkosten von Lithium-Ionen-Batterien.

Plug-in-Hybridfahrzeugkonzepte mit diesen Lithium-Ionen-Batterien zeigen Möglichkeiten auf, die fahrzeugbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu 90% gegenüber den heutigen durch den direkten verbrennungsmotorischen Antrieb verursachten Emissionen zu vermindern.

Auch die heute schon auf dem Markt erhältlichen Full Hybrid – Fahrzeuge, wie etwa der Toyota Prius, könnten anstelle der Verwendung von fossilen Kraftstoffen stattdessen flüssige Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien („Biokraftstoffe“) verbrauchen. Neben der weiteren Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen hätte dies den zusätzlichen Vorteil, dass über den energieeffizienten Hybridantrieb die mengenmäßige Verfügbarkeit von Biokraftstoffen für mehr Nutzer angehoben werden könnte.

Mit der vermehrten Nutzung von Elektrizität und Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien für den Straßenverkehr erwächst eine



realistische Möglichkeit die Wertschöpfungskette für diese Kraftstoffe von den Rohstoffen Erdöl und Erdgas mit deren zunehmend unsicherer werdenden Versorgungslage total zu entkoppeln, und damit die heimische Infrastruktur entscheidend zu fördern und voranzubringen. Last not least wird die Verbreitung von Hybridfahrzeugen und deren wachsende Kundenakzeptanz auch den Weg zur langfristigen Einführung von Wasserstoff als Kraftstoff für mobile Anwendungen entscheidend unterstützen. Die Funktionsmodifikation eines Hybridfahrzeugs durch eine Brennstoffzelle oder einen Verbrennungsmotor, welcher mit Wasserstoff betrieben wird, ist sehr viel einfacher, als ein komplett neues Antriebssystem auf dem Markt einzuführen. Auch hier würde im Sekundärenergieträger Wasserstoff für die Elektrizität aus erneuerbaren Energien die Lösung existent sein, wenn aus Spitzenleistungsgründen eine Pufferung der Elektrizitätsmenge notwendig werden sollte.



## Einleitung

Erneuerbare Primärenergieträger gewinnen in der Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland und auch in den meisten Staaten der Europäischen Union zunehmend an Bedeutung. Bei weiterem signifikanten Wachstum in den kommenden Jahren, wovon angesichts der weltweit großen Nachfrage nach fossilen Primärenergieträgern und angesichts deren zunehmend knapper werdenden Verfügbarkeit auszugehen ist, werden die großen Energieversorgungsunternehmen sich mit der Aufgabe auseinanderzusetzen haben, wie mit den überwiegend nur intermittierend zur Verfügung stehenden erneuerbaren Energien trotzdem eine stabile Energieversorgung gewährleistet werden kann, was insbesondere für die Versorgung mit elektrischer Energie gilt.

Auf der anderen Seite wird der immens wachsende Aufwand für die Förderung und Produktion von fossilen Primärenergieträgern deren Kostenbild so drastisch verändern, dass die Realisierung von alternativen Energieversorgungskonzepten in den kommenden Jahren eher erleichtert werden dürfte.

Neben den Primärenergieträgern Erdöl und Erdgas und deren Umwandlung in vielfältige Produkte und Sekundärenergieträger, wie zum Beispiel Kraftstoffe für den Verkehr, wird in der Zukunft der Stellenwert der zweiten bedeutenden Sekundärenergie Elektrizität gewaltig zunehmen. Dies auch vor dem Hintergrund, dass der kohlenstofffreie Sekundärenergieträger Wasserstoff trotz aufwändiger Forschungsprogramme – weltweit – noch mindestens 1 bis 2 Dekaden benötigen wird, um einen der Elektrizität oder den fossilen Energieträgern vergleichbaren Rang einzunehmen.

Das Energieverbrauchssegment Verkehr wird heute absolut vom Erdöl und den daraus gewonnenen flüssigen Kraftstoffen dominiert. Straßenfahrzeuge im Erdgasbetrieb haben sich als Nischenprodukte beim Individualverkehr etabliert und vergrößern beständig ihre Marktpräsenz bei kommunalen Flottenbetreibern und anderen privaten Unternehmen im öffentlichen Verkehr. Fahrzeugentwicklungsprojekte der Automobilhersteller für den Kraftstoff Erdgas für die Großserie sind jedoch weltweit nicht bekannt, trotz deutlich verbesserter Erdgastankstelleninfrastruktur, so dass auf mittlere Sicht der erdgasbetriebene Pkw ein Nischenprodukt bleiben wird. Für Nutzfahrzeuge ist Erdgas als Kraftstoff aus Emissions- und Betriebskostengründen eine gute Alternative zu Diesel und Benzin. Da auf mittlere Sicht hin die Preisentwicklung an den Rohstoffmärkten für Erdgas nicht entkoppelt von der des Erdöls erfolgen wird – hier wird nur ein zeitlicher Versatz von einigen Jahren zu beobachten sein –, dürfte das monovalent oder bivalent betriebene Erdgasfahrzeug in der



Zukunft nur ein kleines Segment im Gesamtfahrzeugbestand abbilden. Andere Fahrzeuge mit alternativen Antrieben und/oder Kraftstoffen, speziell Hybridfahrzeuge und Verbrennungsmotorfahrzeuge mit Bio-Kraftstoffen, werden die erdgasbetriebenen Fahrzeuge in der Marktdurchdringung überholen.

In den 90er Jahren ist das batteriebetriebene Elektrofahrzeug die wohl vielversprechendste Alternative zum Fahrzeug mit Verbrennungsmotor gewesen. In Europa wurden Erprobungstests für Elektrofahrzeuge mit der Beteiligung nahezu aller europäischen Automobilhersteller durchgeführt. Beispiele hierfür sind die Feldtests in La Rochelle (F), auf der Insel Rügen (D) oder im Drei-Länder-Gebiet Aachen-Lüttich-Maastricht im Rahmen des EU-Programms „Thermie“. In den USA forderte der Bundesstaat Kalifornien durch den gesetzlichen Rahmen des „Zero Emission Vehicle Mandate“ die Einführung von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen – mangels anderer Alternativen - durch die größten, im kalifornischen Markt vertretenen Automobilhersteller. Das markanteste Beispiel hierzu ist das Elektrofahrzeugentwicklungsprogramm „EV1“ von General Motors gewesen.

Trotz des hohen Aufwandes an Entwicklungsressourcen konnte sich das batteriebetriebene Elektrofahrzeug weder in Europa, noch in Japan und auch nicht in USA am Markt durchsetzen. Hauptursache war die fehlende Funktionalität des Elektrofahrzeuges für den potentiellen Kunden hinsichtlich der Energiedichte und der Kosten der verwendeten Batteriesysteme. Eingesetzte Bleibatteriepakete, wie im EV1 von GM, resultierten zwar in akzeptablen, die gesetzten Anforderungen erfüllenden Komponentenkosten, jedoch war dann die Reichweite der Fahrzeuge pro voller Batterieladung aus Kundensicht ungenügend. Alternativ entwickelte und erprobte neue Batterietechnologien, wie zum Beispiel die Hochtemperatur-Natrium-Nickel-Chlorid-Batterie oder auch die zum damaligen Zeitpunkt neue alkalische Nickel-Metall-Hydrid-Batterie, vergrößerten erheblich die Reichweite pro gespeicherter nutzbarer elektrischer Energie auf akzeptable Werte. Die Kostenstrukturen für diese neuen Batterietechnologien resultierten dann jedoch in etwa in einer Verdopplung der Gesamtfahrzeugkosten, und damit war die potentielle Marktchance nicht mehr gegeben.

Wie in diesem Bericht in den folgenden Kapiteln näher erläutert wird, hat sich die Kosten- und Lebensdauersituation von solchen Batterietechnologien mit erhöhter Speicherenergiedichte in der Zwischenzeit deutlich verbessert.

Nicht zuletzt durch die bevorstehende beziehungsweise bereits erfolgte, Beispiel Toyota, Großserieneinführung von Hybridfahrzeugen wird auch ein enormer Zugewinn an Erfahrungen und Know How in der Automobilhersteller- und Zulieferindustrie bezüglich automobiltechnischer Anforderungen an Batteriesysteme und



Komponenten von elektrischen Antrieben entstehen. Dies ist dann auch ein guter Ausgangspunkt für eine schrittweise Erhöhung der Batteriegröße im Hybridfahrzeug und damit zu einer Erhöhung der Reichweite für den rein elektrischen, emissionsfreien Fahrbetrieb des Hybridfahrzeugs. Kosten, Zyklenfestigkeit und Lebensdauer der eingesetzten Batterie sind dabei die Schlüsselparameter.

Das Angebot der Elektrizitäts-Infrastruktur die Batterien solcher Hybridfahrzeuge dann nicht über die fahrzeugeigene Kombination aus Verbrennungsmotor und Generator, sondern über einen externen Netzanschluss im Fahrzeug mit Überschusselektrizität aus erneuerbaren Energien aufzuladen, wird zu noch größeren Einsparungen beim Verbrauch von konventionellen, fossilen Kraftstoffen in Hybridfahrzeugen führen. Damit wird den Automobilherstellern ein verbessertes, attraktives Produkt zur Verfügung stehen, welches für den Kunden als Hybridfahrzeug das Problem der limitierten Reichweite vermeidet, dennoch aber nach Wunsch entweder für bestimmte Strecken den rein elektrischen Fahrbetrieb erlaubt oder auch das Fahren mit maximal möglicher Antriebsleistung über eine längere Strecke ermöglicht.

Es bleibt abzuwarten, inwieweit sich aus diesem riesigen Erfahrungsgewinn in der Automobilindustrie mit dem Hybridfahrzeug als Großserienprodukt dann noch einmal eine Chance für das rein batteriebetriebene Elektrofahrzeug eröffnet. Entscheidend wird die Korrelation sein zwischen Reichweite pro Batterieladung und dem auf die Lebensdauer des Fahrzeugs bezogenen Wert der "Total Cost of Ownership" (hierzu gehören neben den Kraftstoffkosten auch solche wie Anschaffungskosten, Versicherungsprämien, Restwert des Fahrzeugs) für den Nutzer des Fahrzeugs.

Wie auch die jüngste Studie von McKinsey & Company „DRIVE The Future of Automotive Power“, 2006, bestätigt hat, dürfte aus Kostengesichtspunkten aber am ehesten dem Hybridfahrzeug die Rolle zuteil werden, die klassischen verbrennungsmotorischen Antriebskonzepte mit Benzin und Diesel als Kraftstoffe in ihrer Marktdominanz zu gefährden und langfristig auch zu verdrängen.

Insofern ist auch der von der Landesregierung Rheinland-Pfalz geäußerte Gedanke nachzuvollziehen, wie mit Hilfe der Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen die Funktionalität des Hybridfahrzeugs weiter verbessert werden könnte, und wie gleichzeitig für den Straßenverkehr die entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert als auch die bestehende Elektrizitäts-Infrastruktur besser ausgelastet werden könnte. In einem ersten Schritt werden daher im Folgenden die bestehenden Potenziale und Alternativen aufgezeigt und hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit bewertet.





## I Grundlegende Anmerkungen zur Einbindung von Fahrzeugen

Wie aus den Untersuchungen der Transferstelle Bingen für rationelle und regenerative Energienutzung (TSB) im Institut für Innovation, Transfer und Beratung (ITB) GmbH zum Projekt der autarken Energieversorgung einer Kommune (am Beispiel der VG Bruchmühlbach (Pfalz)) mit Elektrizität und Wärme aus erneuerbaren Energien hervorgeht, kann bei sinnvoller Dimensionierung der Windenergieanlagen dennoch Überschusselektrizität in beachtlicher Größenordnung bis auf wenige Engpässe bereitgestellt werden. Für die Verwendung dieser Überschusselektrizität gibt es, wie in Abbildung 1 veranschaulicht, mehrere Möglichkeiten.



Abbildung 1: Schematische Darstellung der Pufferung von Überschusselektrizität aus erneuerbaren Energiequellen

Am naheliegendsten, und über den bestehenden Netzverbund wohl auch am einfachsten umsetzbar erscheint die Variante, den Überschussstrom in andere Netze einzuspeisen und über bestehende Einspeisevergütungen für elektrische Energie aus erneuerbaren Energiequellen, sowie über den Handel mit CO<sub>2</sub>-Emissions-Zertifikaten die Renditen für die von der VG vorgenommenen Investitionen in Anlagen zu verbessern.





Unter den Aspekten der Verbesserung der Infrastruktur im ländlichen Raum und der Ansiedlung von weiteren Elementen aus der Wertschöpfungskette für die Erzeugung und Verwendung von erneuerbaren Energien erscheint es sinnvoller, die in dieser Abbildung genannten weiteren Möglichkeiten zu verfolgen. Dies ist zum einen die direkte Speicherung der Überschusselektrizität in großen Pufferbatterien. Vorzugsweise sind dies Hochtemperatur-Batterien, die aufgrund ihrer hohen volumetrischen und gravimetrischen Energiedichten hierfür besonders geeignet erscheinen. Auch die elektrischen Leistungsdichten solcher Batterietechnologien – NaS- und NaNiCl-Batterien - für eine schnelle Ladung beziehungsweise Entladung sind in letzter Zeit deutlich verbessert worden, so dass diese sich auch für den Einsatz als so genannte lokale Minutenreserve gut anbieten. Solche Konzepte sind in den in der Einleitung genannten Untersuchungen der TSB ausführlich bewertet worden.

Die zwischengespeicherte erneuerbare elektrische Energie könnte dann im Bedarfsfall entweder direkt zur Aufladung von Hybridfahrzeugbatterien (am Ort der Pufferbatterie) herangezogen werden, oder auch indirekt über die lokale, zurückgeführte Netzeinspeisung (und dann mit zweimaliger Spannungswandlung) zu diesem Zweck genutzt werden. Zu beachten sind dabei die unterschiedlichen Anforderungen für die Fahrzeugbatterieladesysteme (Spannungslage, Ladeleistung) und die Verfügbarkeit eines infrastrukturegekoppelten Batterielademanagementsystems. Hierunter ist zu verstehen, dass der Fahrzeugnutzer über zu erwartende Windausfälle oder unzureichende Pufferbatterieladezustände informiert werden muss, um gegebenenfalls selbst entscheiden zu können die Batterie seines Hybridfahrzeugs auch mit dann möglicherweise teureren Elektrizitätsalternativen aufzuladen. Windprognosemodelle existieren nach meiner Kenntnis schon heute in der für diese Anwendung erforderlichen Güte und wären für eine solche Anwendung dann noch mit Tageszeitenlastmodellen in der Verbandsgemeinde zu koppeln.

Weiterhin ist in dieser Abbildung 1 auch die Möglichkeit der Wandlung von Überschusselektrizität in den anderen, neben der Elektrizität zukünftig bedeutsamen Sekundärenergieträger Wasserstoff aufgezeigt.

Diese beiden Sekundärenergieträger sind über die Elektrolyse beziehungsweise über die Brennstoffzelle leicht ineinander wandelbar, und auch mehr oder weniger „leitungsgebunden“. Beide besitzen den Vorteil, dass sie in ihrer Folgenutzungskette kohlenstofffrei und sauber hinsichtlich Umwelt- und Klimaaspekten sind. Unterschiede zwischen diesen beiden Sekundärenergieträgern bestehen darin, dass über Elektrizität der Transport und die Speicherung von Informationen in hervorragender Weise geschehen, dass Elektrizität aber weniger gut Energiemengen transportieren und speichern kann. Mit H<sub>2</sub> können



dagegen Energiemengen gut transportiert und auch gespeichert werden, für den Transport und die Speicherung von Informationen ist Wasserstoff weniger gut geeignet.

Wasserstoff und Elektrizität ergänzen sich als Energieträger daher sehr gut. Viele Überlegungen in der Automobilindustrie sind zu dem Ergebnis gekommen, dass Mobilität in der Zukunft sowohl den Wasserstoff als auch die Elektrizität benötigen wird. Dies wird auch in der folgenden Abbildung 2 deutlich, die Möglichkeiten der Wandlung von Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen in den Energieträger  $H_2$  und seine Verwendung aufzeigt.



Abbildung 2: Möglichkeiten der Wandlung von Überschuss-Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen in den Sekundärenergieträger  $H_2$  und Möglichkeiten der Verwendung

Hauptelemente eines solchen Modells der Speicherung der Überschusselektrizität in der Form von Wasserstoff ist die Elektrolyse und Speicherung von  $H_2$  als Druckwasserstoff oder in Metallhydriden. Die Elektrolyse kann dabei zentral in einer größeren Einheit oder dezentral verteilt in kleineren Systemen erfolgen, abhängig vom jeweiligen Verwendungsfall für den Energieträger  $H_2$ . Varianten von Elektrolyseuren zur Wasserstoffherstellung werden zurzeit im Rahmen von Erprobungstests von Brennstoffzellenfahrzeugen (ECTOS, CUTE, CEP Berlin und andere) weiterentwickelt und für eine Kommerzialisierungsphase vorbereitet. Der aus der



Überschusselektrizität gewonnene und gespeicherte Wasserstoff könnte dann in stationären Anlagen mit für den Wasserstoffbetrieb modifizierten Gasturbinen oder  $H_2$ -Verbrennungsmotoren zur Gewinnung von Elektrizität und Prozesswärme beziehungsweise zur Erzeugung von Elektrizität und Hausheizungswärme durch kleinere Mikro-BHKWs genutzt werden. Stellvertretend sind hier nur die Firmen GE Jenbacher, Sunmachine und Ford Motor Company genannt, die an entsprechenden Systemen für eine Markteinführung arbeiten.

Pilotprojekte dieser Art existieren bereits weltweit. Deshalb werden an dieser Stelle beispielhaft nur erwähnt das UTSIRA-Projekt zur autarken Versorgung der Bewohner einer norwegischen Insel mit Elektrizität aus Windenergie und das Projekt des Centre for Renewable Energy Sources, Pikermi (Griechenland) zur Belieferung des lokalen Wasserstoffmarktes mit Wasserstoff aus einer Versuchswindanlage und anschließender Elektrolyse (s. Internetadresse im Quellenverzeichnis).



## II Fahrzeugkonzepte für die Einbindung in das Projekt Bruchmühlbach

Der Sekundärenergieträger  $H_2$  ist für das Automobil natürlich auch ein idealer Kraftstoff. Bei seiner Verbrennung in speziell entwickelten Motoren entstehen außer geringen Mengen an Stickoxiden keine weiteren Schadstoffemissionen (siehe auch entsprechende Veröffentlichungen der BMW AG). Die Umsetzung von  $H_2$  in der Brennstoffzelle zu elektrischem Strom geschieht vollkommen ohne Schadstoffemissionen mit zusätzlich deutlich besserem Wirkungsgrad gegenüber dem  $H_2$ -Verbrennungsmotor.  $H_2$ -Brennstoffzellenfahrzeuge befinden sich weltweit in der Erprobungsphase in Feldtests, allerdings werden für die Entwicklung bis zur Serienreife aus Kosten- und Dauerhaltbarkeitsgründen noch mehrere Jahre benötigt, abgesehen davon, dass auch der Aufbau der benötigten Wasserstoffinfrastruktur in mehreren Schritten erfolgen muss. Mit einer ersten Serieneinführung ist nach heutigem Kenntnisstand im Zeitraum 2010 bis 2015 zu rechnen.

In der folgenden Abbildung 3 sind die potentiellen Alternativen des Einsatzes von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebssystemen dargestellt, die für einen Einsatz in einem solchen Projekt mit Elektrizität und Wasserstoff als alternative „Kraftstoffe“ aus erneuerbaren Energiequellen in Frage kommen.

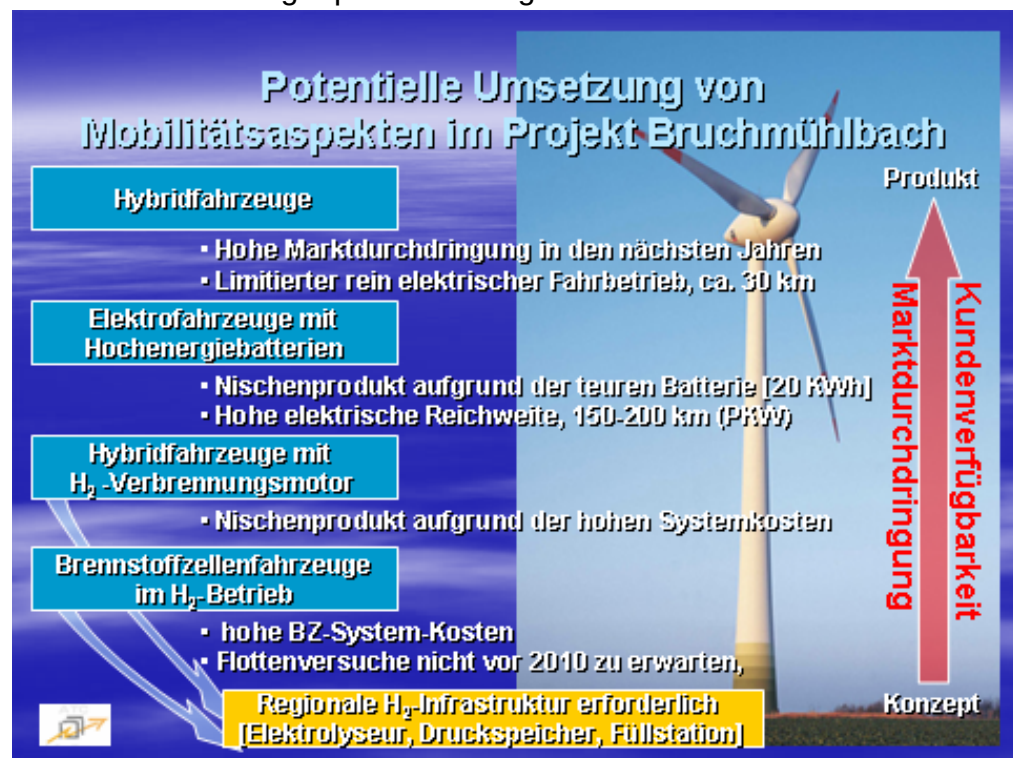


Abbildung 3: Erwartete Verfügbarkeit von Fahrzeugen für die „Kraftstoffe“ Elektrizität und  $H_2$  zum möglichen Einsatz im Projekt Bruchmühlbach



Bei allen in dieser Abbildung genannten Fahrzeugvarianten handelt es sich um Fahrzeuge mit elektrischen Antriebssystemen.

Die Verfügbarkeit für den Kunden beziehungsweise die Marktdurchdringung ist für Brennstoffzellenfahrzeuge im H<sub>2</sub>-Betrieb in den nächsten Jahren am wenigsten gegeben. Der Einsatz von einigen wenigen Flottenversuchsfahrzeugen im Projekt Bruchmühlbach würde auch den Aufbau einer speziellen H<sub>2</sub>-Versorgung erfordern, was wahrscheinlich auch aus der zeitlich limitierten Verfügbarkeit solcher Fahrzeuge, die heute noch nicht käuflich zu erwerben oder zu leasen sind, nicht gerechtfertigt erscheint, wenn nicht für andere Applikationen der Wasserstoff sowieso schon bereitgestellt wird. Neue Erfahrungen aus Sicht der Automobilentwickler wären gegenüber den zurzeit bereits stattfindenden Erprobungstests in einem solchen Projekt Bruchmühlbach auch nicht zu erwarten. Außer der schnelllebigen zusätzlichen Publicity sind für einen Automobilpartner mit H<sub>2</sub>-Brennstoffzellenversuchsfahrzeugen eigentlich keine weiteren Anreize für eine Teilnahme zu erkennen.

Hybridfahrzeuge mit einem kleinen H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor, auf die später noch ausführlicher eingegangen wird, existieren heute ebenfalls nur als Konzeptfahrzeuge. Bei Verfügbarkeit von H<sub>2</sub> als Kraftstoff erscheint jedoch die Realisierung der Serienreife für dieses Konzept etwas weniger aufwändig als für das komplett neue Brennstoffzellenfahrzeug, so dass eine mögliche Serieneinführung etwas früher erfolgen könnte. Nach jetziger Einschätzung dürfte jedoch ein solches Fahrzeug aufgrund der ebenfalls hohen Systemkosten (Kosten des H<sub>2</sub>-Speichers zusätzlich zu den Kosten des konventionellen Hybridantriebs) eher ein Nischenprodukt bleiben.

Gute Chancen für einen Einsatz im Projekt Bruchmühlbach würden die in Abbildung 3 genannten ersten beiden Fahrzeugkategorien besitzen. Elektrofahrzeuge mit Hochenergiebatterien sind heute als Kleinserien auf dem europäischen Markt verfügbar. Mit der in der Batterie gespeicherten elektrischen Energie von etwa 20 kWh lassen sich für einen Mittelklasse-Pkw Reichweiten, je nach Fahrweise, von 150 - 200 km erreichen. Dies führt nach Erfahrungen der Automobilhersteller in früheren Feldversuchen für Elektrofahrzeuge zu guten Akzeptanzwerten der Nutzer. Nach Aussagen des Batterieherstellers werden in den nächsten Jahren die Kosten solcher Batterien noch signifikant reduziert werden können. Selbst bei der Verwendung von nur wenigen Fahrzeugen dieses Typs im Projekt Bruchmühlbach würde aufgrund der, gegenüber Hybridfahrzeugen, relativ großen gespeicherten Elektrizitätsmenge ein noch merklicher Effekt hinsichtlich des Ersatzes von konventionellen Kraftstoffen durch Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen entstehen. Weitere Details zu solchen Elektrofahrzeugen sind in den folgenden Kapiteln aufgeführt.





Für Hybridfahrzeuge wird in den kommenden Jahren weltweit eine hohe Marktdurchdringung erwartet. Für das Projekt Bruchmühlbach mit der Zielvorgabe der Realisierung auf einer mehr oder weniger kommerziellen Basis sind verschiedene Ausführungen von in nächster Zeit erhältlichen Hybridfahrzeugprodukten die beste Variante. Speziell Hybridfahrzeuge nach der Nomenklatur „Strong Hybrid“ oder „Full Hybrid“ bei denen der mechanische Antrieb des Fahrzeugs - mit wenigen Ausnahmen - fast ausschließlich über den eingebauten Elektromotor erfolgt und die sich abzeichnende Funktionalitätserweiterung in ein so genanntes „Plug-In“-Hybridfahrzeug, bei dem die Hybridfahrzeugbatterie auch über einen Ladeanschluss aufgeladen werden kann, erscheinen für den Einsatz in diesem Projekt hervorragend geeignet.

Mit der erwarteten hohen Marktdurchdringung der „Full Hybrid“ Fahrzeugkategorie erscheint das Einsparpotenzial an den fossilen Kraftstoffen Benzin und Diesel überraschend hoch, selbst bei einem in den nächsten Jahren limitierten rein elektrischen Fahrbetrieb pro Batterieladung von maximal 30 km.

In der folgenden Abbildung 4 ist nochmals das Potenzial der Hybridfahrzeugtechnologien anhand der Hauptmerkmale zusammengefasst, im Wesentlichen gelten diese Merkmale für die Full Hybrid-Fahrzeuge.

**Potenzial von Hybridfahrzeugen**

- Vergleichbare Systemkosten gegenüber zukünftigen Dieselmotoren mit Abgasnachbehandlung
- Kraftstoffeinsparung > 30% gegenüber dem konventionellen Antrieb
- Total Cost of Ownership für Kunden günstiger
- Bessere Fahrdynamik
- Emissionsfreies Fahren für kürzere Strecken
- ➔ • Batteriesystemkosten noch teuer (ca. €2000/KWh)

**Marktdurchdringung**

- Toyota: 1 Million verkaufter Fahrzeuge bis 2008
- Bosch: 4 Millionen Fahrzeuge / a in 2025
- Entwicklungsprojekte der Automobil-OEMs weltweit

Abbildung 4: *Kosten- und Funktionsvorteile für den Nutzer führen zu wachsender Nachfrage nach Hybridfahrzeugen*



Die heute noch hohen Batteriesystemkosten, bezogen auf die speicherbare Elektrizitätsmenge, haben zwangsläufig zu einer minimierten Batteriegröße in den am Markt verfügbaren „Full Hybrid“ Fahrzeugen geführt. Gute Fahreigenschaften und die in Abhängigkeit von der Fahrweise unterschiedlich hohe Kraftstoffverbrauchsreduzierung, die sogar mehr als 30% gegenüber dem gleichen konventionellen Verbrennungsmotorfahrzeug betragen kann, haben bei den weltweit hohen Kraftstoffpreisen zu einer vermehrten Nachfrage geführt. Das Unternehmen Toyota, weltweit führend in der Entwicklung von Hybridfahrzeugen, konnte seine gesetzten Marktziele in der Zwischenzeit nochmals anheben auf 1 Million verkaufter Hybridfahrzeuge bis zum Jahr 2008. Bei einer bis heute verkauften Stückzahl von etwa 400 000 Toyota-Hybridfahrzeugen und der weltweit wachsenden Nachfrage erscheint das Erreichen dieses Ziels als absolut realistisch. Nach Presseveröffentlichungen [<http://www.autosieger.de/article8061.html>] plant das Unternehmen Toyota bis zum Jahr 2010 die Produktion von Hybridfahrzeugen auf 1 Million Einheiten pro Jahr zu steigern, für 2006 ist bereits eine Aufstockung der Fertigungskapazität auf 400 000 Fahrzeuge per annum vorgesehen.

Auch das Unternehmen PricewaterhouseCoopers (PwC) schätzt nach neuen eigenen Untersuchungen den Markt für Hybridfahrzeuge noch deutlich größer ein als bisher erwartet. Im Jahr 2010 wird hier weltweit mit mehr als 70 Modellen und einer Gesamtverkaufszahl von etwa 1 Million Fahrzeuge gerechnet (siehe auch im Internet die Pressemitteilung unter [http://www.umweltdialog.de/umweltdialog/mobilitaet/2005-09-09\\_Wettlauf\\_um\\_den\\_Markt\\_fuer\\_Hybridfahrzeuge](http://www.umweltdialog.de/umweltdialog/mobilitaet/2005-09-09_Wettlauf_um_den_Markt_fuer_Hybridfahrzeuge)). Treffen diese Wachstumsprojektionen in den nächsten Jahren zu, dann erscheinen die vom Automobilzulieferer Bosch geschätzten jährlichen Produktionszahlen von 4 Millionen Hybridfahrzeugen im Jahr 2025 als sehr konservativ. Aus der Sicht von PwC wird sich in den Jahren nach 2015 die Hybridtechnologie auf dem europäischen Markt etabliert haben, „die Wachablösung für den Verbrennungsmotor vollzogen sein“.





### III Beschreibung von Hybridfahrzeugen verschiedener Hersteller

Mittlerweile dürfte jeder große Automobilhersteller weltweit entsprechende Hybridfahrzeugentwicklungsprojekte mit dem Ziel der Serieneinführung initiiert haben, zum Teil auch überrascht durch die weltweit sehr große Resonanz auf das wohl bekannteste „Full Hybrid“ Fahrzeug, den Toyota Prius, der nun nochmals deutlich verbessert als 3. Fahrzeuggeneration auch auf dem europäischen Markt erhältlich ist. Die herausragende Position des Toyota Prius wurde auch durch die Auszeichnung als „Car of the Year 2005“ in Europa mit überwältigendem Ergebnis bestätigt (406 Punkte vor Citroen C4 mit 267 Punkten und dem Ford Focus mit 228 Punkten).

Die Hauptmerkmale dieses Hybridfahrzeugs sowie die wichtigsten Kenndaten des Hybridantriebs sind in den folgenden beiden Abbildungen 5 und 6 gezeigt.



Abbildung 5: Wesentliche Fahrzeugdaten des Toyota Prius

Dieses speziell für die Hybridantriebstechnologie von Toyota entwickelte Fahrzeug zeichnet sich in der neuesten Fahrzeuggeneration durch einen hervorragenden Kraftstoffverbrauch von 4.3 l/100 km im europäischen Fahrzyklus nach Werksangaben aus. Entsprechend niedrig liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit 104 g/km. Auch die Abgasemissionen des nach dem Atkinson-Zyklus ausgelegten



Benzinmotors liegen heute schon deutlich unter den zur Zeit geltenden Schadstoffgrenzwerten nach dem EURO IV Standard, und dies bei durchaus guten Fahrleistungen, die nicht hinter den Werten vergleichbarer Mittelklasse-Pkws mit direktem Verbrennungsmotorantrieb zurückstehen.

Diese Fahrleistungen werden durch das von Toyota so bezeichnete Power Splitting des Antriebssystems „Hybrid Synergy Drive“ erreicht, bei der ein Teil der vom Verbrennungsmotor abgegebenen, nicht für das Bewegen des Fahrzeugs benötigten mechanischen Leistung über einen Generator als elektrische Energie in der Fahrzeugbatterie zwischengespeichert wird.

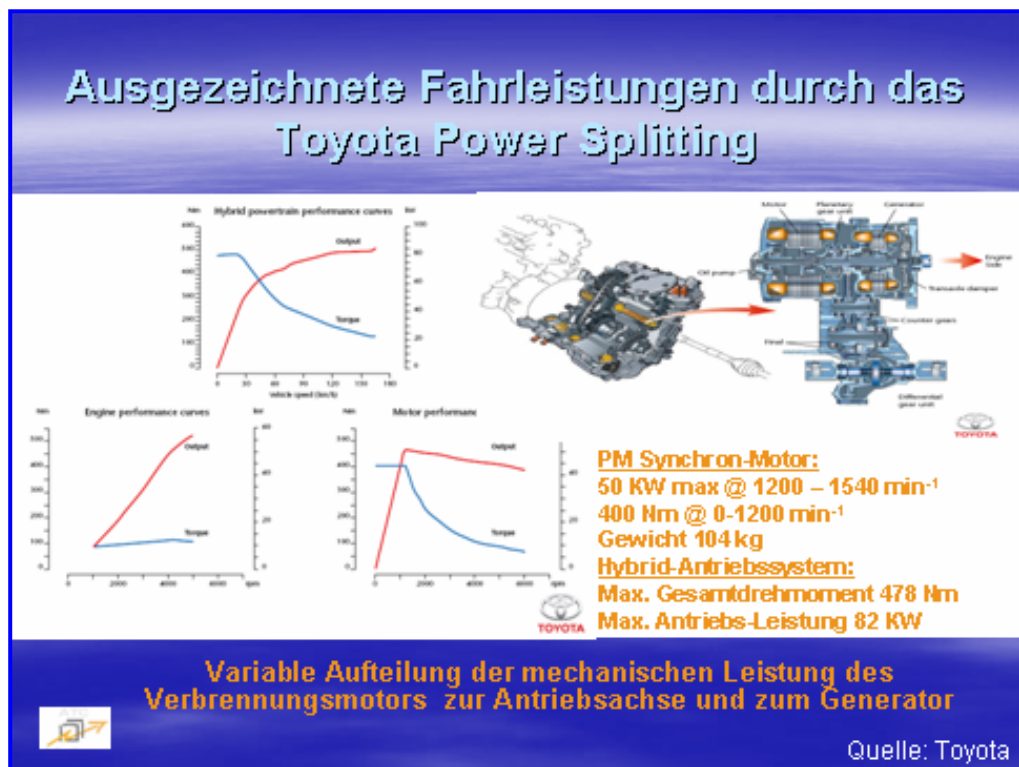


Abbildung 6: Drehmoment- und Leistungscharakteristiken des Hybridantriebssystems „Hybrid Synergy Drive“ im Toyota Prius Modelljahr 2005

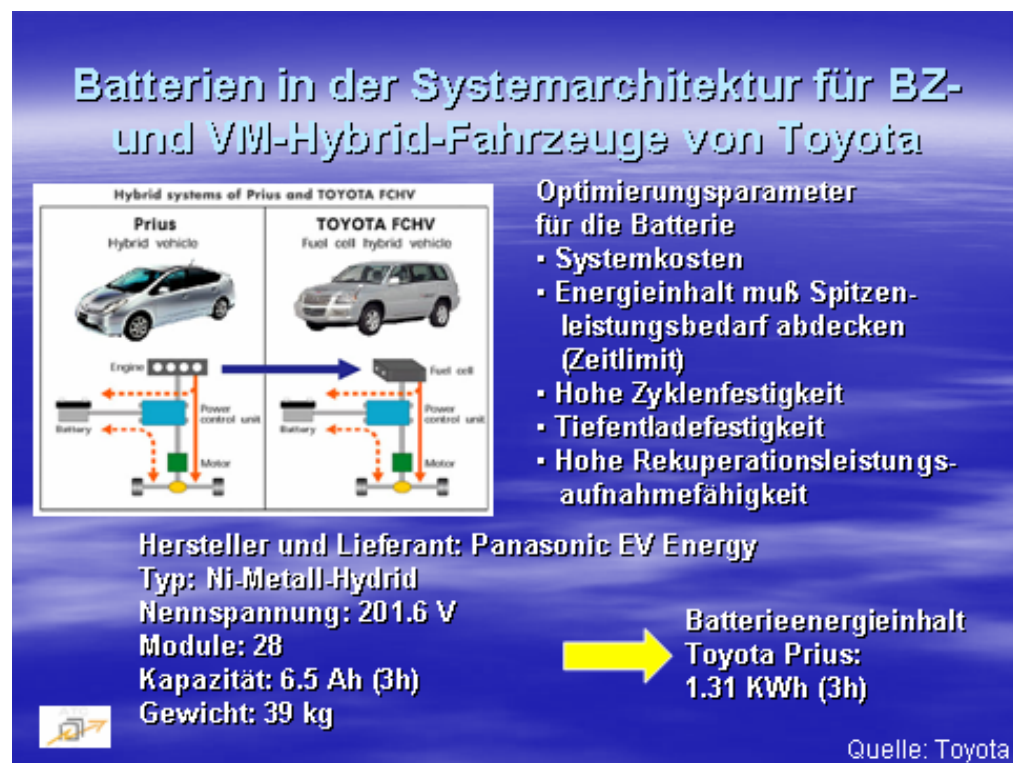
Wie aus der folgenden Abbildung 7 hervorgeht, ist die Batterie neben dem Antriebssystem die zweite strategisch wichtige Hauptkomponente auch für zukünftige Systemstrukturen von Hybridfahrzeugen. Dabei geht das Unternehmen Toyota davon aus, dass langfristig die Brennstoffzelle den Verbrennungsmotor als Leistungsquelle im Fahrzeug zwar ablösen wird, dass aber dennoch die Hybridstruktur mit der Batterie als Pufferspeicher erhalten bleibt, und somit das Brennstoffzellensystem in einem zukünftigen Brennstoffzellenfahrzeug nicht zur Abdeckung der gewünschten maximalen Antriebsleistung und der Dynamik des gesamten Lastgangs ausgelegt werden muss. Nach heutiger Entwicklungserkenntnis ist eine solche Hybridisierung des



Brennstoffzellenantriebssysteme mit Kostenvorteilen verbunden gegenüber einer Systemauslegung ohne elektrischen Pufferspeicher.

Die in der aktuellen Version des Toyota Prius eingesetzte Batterie ist vom Typ Nickel-Metall-Hydrid. Lieferant und Hersteller ist Panasonic EV Energy, ein gemeinsames Unternehmen von Toyota und Matsushita zur Entwicklung und Fertigung von Batterien für Hybridfahrzeuge.

Mit einer Nennspannung von 201.6 V aus 28 Modulen, die eine Kapazität von 6.5 Ah bei einer 3-stündigen Entladung besitzen, ergibt sich für diese Parameter eine gespeicherte elektrische Energiemenge von 1.31 KWh (bezogen auf die 3 h – Entladung). Je nach Fahrweise dürfte dieser relativ geringe Energieinhalt nur zu einer Fahrstrecke von 5 - 10 km für das rein elektrische Fahren ohne zugeschalteten Verbrennungsmotor ausreichen.



**Abbildung 7:** Batterie und elektrisches Antriebssystem sind gemeinsame Bestandteile in zukünftigen Hybridfahrzeugkonzepten von Toyota

Hierbei muss jedoch festgehalten werden, dass die jetzige Batteriegröße das Ergebnis eines System- und Kostenoptimierungsprozesses ist, in dem der erreichte Wert der rein elektrischen Fahrweise offensichtlich nur eine untergeordnete Rolle gespielt hat. Die Hauptentwicklungskriterien für ein Batteriesystem sind für heutige als auch für zukünftige Anwendungen niedrige



Systemkosten sowie eine hohe Zyklenfestigkeit gekoppelt mit einer großen Tiefentladefestigkeit und einer hohen Rekuperationsleistungsaufnahmefähigkeit, d.h. die Batterie sollte auch über gute Schnellladefähigkeitseigenschaften verfügen.

Die aus Kostengründen heute gewünschte minimale Batteriegröße ergibt sich aus der Entladecharakteristik der Batterie, da diese (in der Auslegung des Prius-Systems) neben dem Verbrennungsmotor beim vollen Beschleunigen mehr als 40 KW an elektrischer Leistung abgeben muss; dies entspricht einer elektrischen Leistungsdichte  $> 1$  KW/kg.

Um eine gute Marktakzeptanz für das Hybridfahrzeug zu erreichen, hat Toyota auf die Batterie (und auf alle anderen Komponenten des Hybridantriebssystems) eine Gewährleistung von 8 Jahren beziehungsweise 160 000 km erteilt. Dies ist allerdings nach heutigem technischem Entwicklungsstand nur möglich mit einer Limitierung der Zyklierung der Batterie in einer engen Bandbreite von ca. 60% der Batterienennkapazität. Eine Tiefentladung und eine hohe Ladung beziehungsweise Überladung der Batterie werden über das Batteriemanagement ausgeschlossen. Mittlerweise gibt es viel versprechende Lebensdauerdaten für dieses Batteriesystem aus dem Feld: Prius Fahrzeuge, die als Taxis in New York City eingesetzt werden, haben Laufleistungen von mehr als 250 000 Meilen ohne einen Wechsel der Fahrzeugbatterie erreicht.

Dies bedeutet, dass die nutzbare Kapazität der Fahrzeugbatterie zukünftig erweitert werden dürfte, und damit wird auch die Zeitdauer des Fahrens mit maximaler Antriebsleistung bis zum Erreichen der unteren Entladegrenze - von heute nur wenigen Minuten – nach oben ausgeweitet werden.

Die gleiche Funktionsverbesserung ließe sich natürlich auch erreichen mit einer Vergrößerung der Batterie beziehungsweise Verbesserung der volumetrischen Energiedichte bei gleich bleibender Leistungsdichte. Dies wird jedoch entscheidend davon abhängen inwieweit die Batteriesystemkosten in der Zukunft gesenkt werden können.

Alle genannten Verbesserungen führen jedoch zu dem Ergebnis, dass damit die Fahrstrecke für den möglichen rein elektrischen, emissionsfreien Betrieb verbessert wird. Eine Abschätzung des Verbesserungspotenzials zeigt auf, dass in den nächsten Jahren eine Erhöhung des Wertes für diese Fahrstrecke auf ca. 30 km durchaus realistisch erscheint.

Nach Informationen des Unternehmens Toyota gibt es für den europäischen Markt eine große Kundennachfrage nach der Ausrüstung des Hybrid-Fahrzeugs (nachträglich oder bei der Fahrzeugherstellung)





mit einem externen Ladeanschluss für das 230 V Wechselspannungs-Netz (Ladeleistung ca. 3 KW). Toyota beschäftigt sich intensiv mit dieser Thematik, die natürlich nur dann richtig sinnvoll erscheint, wenn die Batteriegröße zukünftig deutlich mehr als die heutigen 1.31 KWh im Prius Fahrzeug betragen wird.

In der folgenden Abbildung 8 ist die derzeitige Variantenvielfalt von Hybridfahrzeugen der Firma Toyota aufgezeigt. Die Produktionsbasis umfasst zurzeit 9 Fahrzeugmodelle von denen 4 Fahrzeuge ausschließlich in Japan angeboten werden. In Europa sind aus dieser Produktpalette heute nur Prius und Lexus RX 400h (eine ausführlichere Beschreibung erfolgt auf den Seiten 24 und 25 dieses Berichts) erhältlich. Als Sport Utility Vehicle (SUV) steht bei dem Fahrzeug Lexus RX 400h mehr die Fahrdynamik im Vordergrund. Für den Einsatz im geplanten Projekt Bruchmühlbach wären zum Aufzeigen von Einsparungen bei fossilen Kraftstoffen und CO<sub>2</sub>-Emissionen die beiden kommerziellen Hybrid-Nutzfahrzeuge sehr gut geeignet, sie existieren jedoch beide nur in der Rechtslenker-Version für den japanischen Markt. Da jedoch das im Toyota-Konzern für Nutzfahrzeuge zuständige Unternehmen Hino Motors ebenfalls eine globale Marktausrichtung hat, ist davon auszugehen, dass auch für dieses Nutzfahrzeuge - Marktsegment Toyota den Wettbewerbsvorsprung in der Hybridtechnologie nutzen wird um in nächster Zeit Hino mit dessen Palette an Nutzfahrzeugen besser am europäischen Markt zu positionieren.



Abbildung 8: Variantenvielfalt von Hybridfahrzeugen des Unternehmens Toyota



Mit der Zielsetzung von Toyota, dass der Produktionsanteil von Hybridfahrzeugen im Unternehmen bis zum Jahr 2010 bei 10% liegt (Presseerklärung von Toyota anlässlich der Tokio Motorshow 2005, <http://www.autosieger.de/article8061.html>), dürfte sich in den kommenden Jahren generell die Variantenvielfalt dieser Marke für den europäischen Markt deutlich vergrößern, so dass weitere Fahrzeuge für ein dann gestartetes Projekt Bruchmühlbach hinzukommen könnten.

Aufbauend auf einer Lizenz der Hybridtechnologie der ersten Generation des Toyota Prius hat Ford Motor Company ein eigenes Hybridfahrzeug, den Ford Escape (siehe Abbildung 9 untenstehend) mit separaten Hybridkomponenten entwickelt. Dieses Fahrzeug wird seit Herbst 2004 in USA für den nordamerikanischen Markt gefertigt. Die Nickel-Metall-Hydrid-Batterie - Lieferant ist die Firma Sanyo - ist mit einem Energieinhalt von ca. 3.0 KWh (Nennspannung 330 V, 50 Module aus jeweils 5 D-Zellen) und dürfte dem Fahrzeug zu einer abgeschätzten Fahrstrecke für den emissionsfreien rein elektrischen Betrieb von ca. 15 km verhelfen. Es ist nicht bekannt ob Ford Motor Company dieses Fahrzeug oder einen Nachfolger auch auf dem europäischen Markt anbieten will.

**Verbrennungsmotor-Hybridfahrzeug**  
**Ford Escape**



- Hybridtechnologie aufbauend auf Lizenz des Toyota PRIUS I
- Batterie NiMeH ca. 3.0 KWh, 330 V
- 50 Module à 5 D-Zellen
- Garantie 8 Jahre / 100 000 Meilen

➔ **Reichweite für rein elektrischen Fahrbetrieb ca. 15 km**

Quelle: Ford Motor Company

Abbildung 9:

*Hybridfahrzeug Ford Escape, in Produktion seit September 2004*





Bestens geeignet für die Verwendung in einem Projekt wie dem der Verbandsgemeinde Bruchmühlbach ist das von DaimlerChrysler entwickelte und Ende 2004 vorgestellte Sprinter Hybridfahrzeug (siehe Abbildung 10). Das als Parallel-Hybrid ausgelegte Fahrzeug ist als Entwicklungsfahrzeug für Flottentests vorgesehen und dürfte in limitierten Stückzahlen für Erprobungstests demnächst zur Verfügung stehen.

## DaimlerChrysler Hybridfahrzeug Sprinter



- **Entwicklungsfahrzeug für Flottentests**
- **Konzept: Parallel-Hybrid**
- **Antrieb 80 KW Diesel  
70 KW E-Motor**
- **Batterie NiMeH 14 KWh**
- **Systemgewicht 350 kg  
(160 kg für Li-Ion)**

**Reichweite im rein elektrischen Betrieb  
30 km**

**Ladezeit 6h max.**




Quelle: DCX

**Abbildung 10:** *Entwicklungsfahrzeug Hybrid Sprinter des Automobilherstellers DaimlerChrysler, vorgesehen für Flottentests*

Die im Unterboden des Fahrzeugs integrierte NiMeH-Batterie verfügt bei einem Batteriesystemgewicht von 350 kg über einen Speicherinhalt von 14 KWh (ca. 40 KWh/kg). Damit lässt sich nach Angaben von DaimlerChrysler eine Fahrstrecke für den rein elektrischen Betrieb von 30 km erzielen, bei dennoch guten Fahrleistungen durch die maximale Antriebsleistung des Elektromotors von 70 KW. DaimlerChrysler hat in diesem Hybridfahrzeugkonzept bereits einen Ladeanschluss vorgesehen, mit der die Fahrzeugbatterie über das externe Netz bei vorangegangener vollständiger Entladung in maximal 6 Stunden wieder aufgeladen werden kann.

Die Kundenzielgruppe für dieses Fahrzeug ist der kommerzielle Nutzer, der beispielsweise für den innerstädtischen Lieferverkehr über eine größere Fahrstrecke mit emissionsfreiem Betrieb verfügen möchte. Das zukünftige Potenzial dieses Fahrzeugkonzeptes wird zudem



veranschaulicht durch den von DaimlerChrysler in der Zukunft in Aussicht gestellten Einsatz einer Lithium-Ionen-Batterie bei der mit gleichem Batterieenergieinhalt das Batteriesystemgewicht auf 160 kg - zugunsten einer entsprechend erhöhten Nutzladung - reduziert werden könnte.

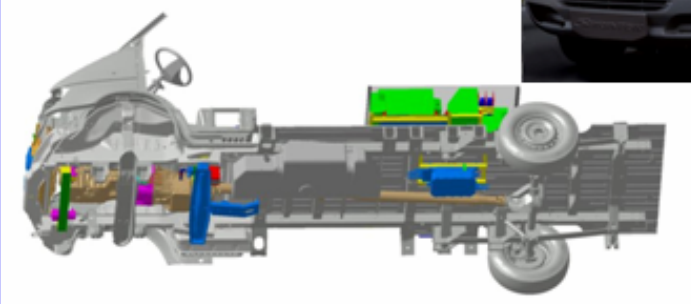
Ende März 2006 hat das Unternehmen DaimlerChrysler ergänzend angekündigt mit dem Dodge Sprinter Van und diesem Hybridantrieb in Flottentests mit kommerziellen Flottenbetreibern gehen zu wollen. Dazu werden zunächst bis zu 40 Fahrzeuge für Flottentests in USA bereitgestellt. Weiterhin werden auch andere Flottenbetreiber weltweit mit weiteren Fahrzeugen an diesem Testprogramm partizipieren können (siehe auch Abbildung 11 hierzu).

## DaimlerChrysler Dodge Sprinter Plug-In Hybridfahrzeug für Flottentests

**Presseankündigung 30.03.2006:**

- Fertigung von bis zu 40 Fahrzeugen für Tests mit Flottenbetreibern in USA
- Weitere Flottentests weltweit

**Elektrische Reichweite: 20 Meilen**




Quelle: DaimlerChrysler



**Abbildung 11:** Flottentestprogramm von DaimlerChrysler



Als weitere Beispiele einer unterschiedlichen Kategorie von Hybridfahrzeugen sind in der untenstehenden Abbildung 12 die Hybridfahrzeuge Lexus RX 400h und das Prototypfahrzeug BMW X5 Efficient Dynamics gezeigt.



**Bild 12:** Sport Utility Fahrzeuge als Hybridvarianten

Das Fahrzeug Lexus RX 400h ist bereits auf dem europäischen Markt erhältlich. Das BMW Fahrzeug wurde auf der Internationalen Automobil Ausstellung 2005 in Frankfurt vorgestellt und das Unternehmen BMW hat in der Präsentation den Eindruck erweckt, dieses Fahrzeug für eine Serieneinführung vorzubereiten.

Im Prototyp BMW X5 Efficient Dynamics ist der Hybridantrieb als Parallel-Antrieb ausgelegt, wobei hier speziell der Asynchronmotor auf der Kurbelwelle zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe integriert ist und auch die Starter-Generator-Funktion mit erfüllt. Als Energiespeicher werden Doppelschichtkondensatoren, auch Supercaps genannt, mit sehr hoher elektrischer Leistungsdichte aber niedriger Energiedichte verwendet. Spezifische Daten hierzu über Energieinhalt oder Spannungslage einer solchen Kondensatorbank sind von BMW nicht offen gelegt worden.

Im Lexus RX 400h verwendet Toyota die gleichen Nickel-Metall-Hybrid-Batteriemodule wie schon zuvor in den Prius Fahrzeugen oder anderen Hybridfahrzeugen des Konzerns. Um den erhöhten Bedarf an elektrischer Leistung für die beiden Elektromotoren an Vorder- und



Hinterachse abzudecken, werden 40 Batteriemodule mit einer Nennspannung von zusammen 288 V eingesetzt. Damit ergibt sich eine gespeicherte maximale Energiemenge von 1.87 KWh, die jedoch zu keiner größeren Fahrstrecke für das rein elektrische Fahren führt als diejenige, die schon vom Prius her bekannt ist. Um für diesen elektrischen Leistungsbereich eine ausreichende Lebensdauer des Batteriesystems zu gewährleisten wurde die Zyklisierung der Fahrzeugbatterie gegenüber dem Prius Fahrzeug nochmals auf den Bereich von ca. 45 % bis 60 % der maximal möglichen Batterieladung eingeschränkt. Zur Beschleunigung des Fahrzeugs dient nur der Antrieb an der Vorderachse nach dem bekannten Power Split Verfahren. Der elektromotorische Antrieb an der Hinterachse dient nur zur Verbesserung von Traktion und Fahrstabilität.

Beide Fahrzeuge zielen auf Kunden im oberen Marktsegment für Sport Utility Fahrzeuge. Mit diesem Fahrzeugkonzept werden die breitbandigen und vielfältigen Möglichkeiten der Hybridtechnologie demonstriert, nicht nur zu effizientesten Energieverbrauchslösungen zu führen, sondern auch Fahrzeugkonzepte mit ausgezeichneter Fahrdynamik darzustellen. Es wäre durchaus überlegenswert aus Marktsegmentüberlegungen und trotz des wahrscheinlich weniger guten Nutzen-Kosten-Verhältnisses, auch diese Fahrzeugkategorie in das Projekt Bruchmühlbach mit einzubinden, und zu eruieren, welche Möglichkeiten der externen Netzanbindung für solche Fahrzeuge bestehen. Beeindruckend ist auf jeden Fall der ausgezeichnete Wert des Kraftstoffverbrauchs beziehungsweise der CO<sub>2</sub>-Emissionen für ein Hybridfahrzeug dieser Kategorie. Toyota nennt für den Lexus RX 400h einen Wert von 192 g CO<sub>2</sub>/km bezogen auf den europäischen Fahrzyklus. Der konventionelle BMW X5, der über vergleichbare Fahrleistungen zum Lexus Hybridfahrzeug verfügt, emittiert im Vergleich dazu mehr als 300 g CO<sub>2</sub>/km.

Beeindruckend ist auch der von Toyota genannte Wert des Leistungsgewichtes von 10.33 kg/KW für dieses Hybridfahrzeug, der um ca. 15% höher liegt als vergleichbare Werte für rein verbrennungsmotorische Antriebe. Sollte sich der in den vergangenen beiden Jahrzehnten auch auf dem europäischen Markt festgestellte Weg hin zu höherer Leistung in den Pkws auch für die Zukunft fortsetzen - davon gehen einige Automobilunternehmen zumindest für das obere Marktsegment aus - so bietet sich anhand der Hybridtechnologie eine exzellente Lösung an, den Kraftstoffverbrauch und damit auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen dennoch signifikant zu senken. Attraktiv wäre, auch für zukünftige Kunden, auch solche Fahrzeuge für den Einsatz von elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen anstelle von fossilen Kraftstoffen zu erschließen.





## IV Batteriebetriebene Elektrostraßenfahrzeuge

Die wohl umfangreichsten Erfahrungen bezüglich des Einsatzes von rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen wurden in dem durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie unterstützten Feldversuch zur Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen gesammelt. Die Auswertung der Daten ist im Abschlußbericht dokumentiert, verfasst von der DAUGmbH 1996. In diesem Feldversuch wurden mehrere Fahrzeugkategorien mit unterschiedlichen Batterie- und Antriebssystemen, Varianten der Bordstromversorgung sowie unterschiedlichen Ladeverfahren untersucht und verglichen. Weiterhin wurde auch eine enge Korrelation zu Nutzerrückmeldungen gebildet, so dass aus diesen Daten sehr gut auf zukünftige Kundenanforderungen beziehungsweise das Einsatzprofil von rein elektrisch betriebenen Straßenfahrzeugen geschlossen werden kann.

Die folgende Abbildung 13 zeigt als Beispiel aus diesem Feldversuch den durchschnittlichen Endenergieverbrauch im Elektro-Pkw für die untersuchten Batteriesysteme in Abhängigkeit von der jeweiligen Tagesfahrleistung. Als moderne Batterietechnologien standen zum damaligen Zeitpunkt die Hochtemperatur-Natrium-Nickel-Chlorid-Batterie ( $\text{NaNiCl}_2$ ) und eine wartungsfreie Nickel-Cadmium-Batterie (NiCd) als Basis für zukünftige Nickel-Metall-Hydrid-Batterien zur Verfügung. Als Referenz wurden Blei-Säure-Traktionsbatteriepakete (Pb) eingesetzt.

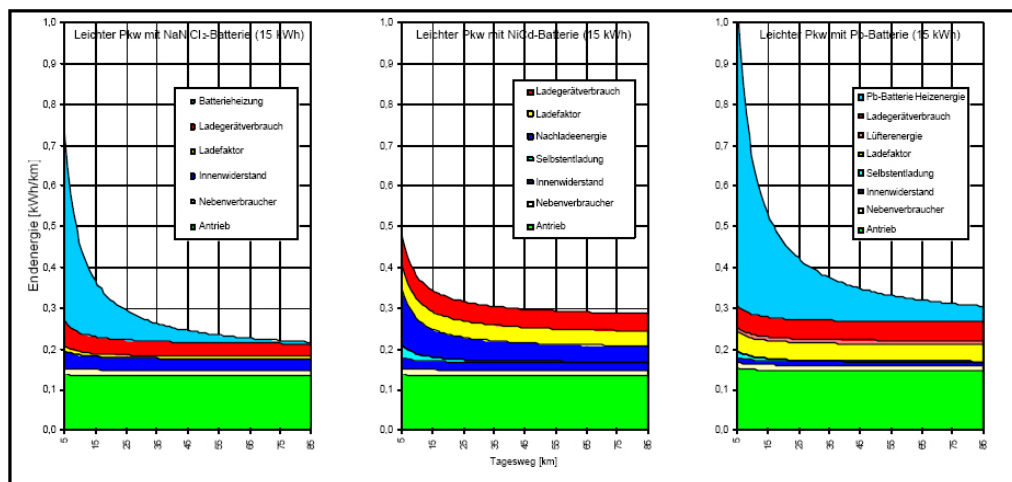


Abbildung 13: *Endenergieverbrauch von Elektro-Pkws im Rügen-Feldversuch*  
*Quelle: Abschlußbericht DAUGmbH 1996*

Diese Vorgehensweise in der Datenanalyse erlaubt damit auch eine sehr realistische Abschätzung des Endenergieverbrauchs heutiger Elektrostraßenfahrzeuge mit bekannten Verbesserungen in den





Systemkomponenten, insbesondere für die heute verfügbaren Batterietechnologien.

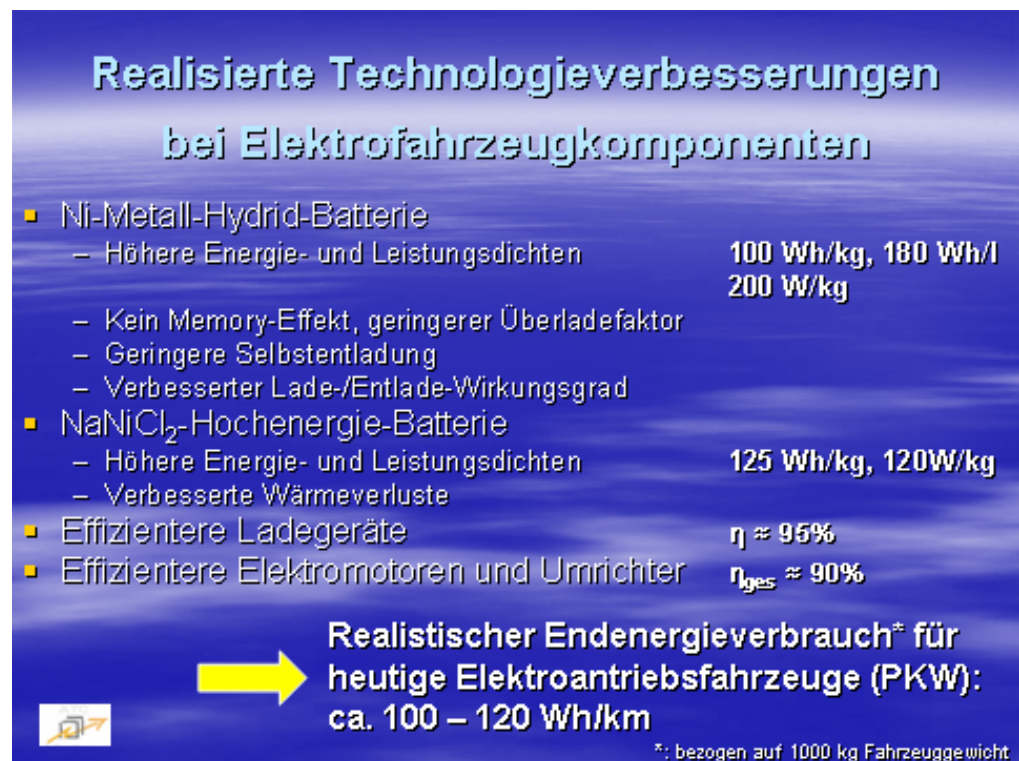


Abbildung 14: Systemparameter heutiger elektrischer Komponenten in Elektrofahrzeugen

Mit den in Abbildung 14 genannten Parametern heutiger Systemkomponenten lässt sich ein realistischer Endenergieverbrauch für einen modernen rein elektrisch betriebenen Pkw von 100 bis 120 Wh/km abschätzen, bezogen auf ein Fahrzeuggewicht von 1000 kg. Dieser Wert korreliert auch sehr gut mit dem Energieverbrauch des Hybridfahrzeugs Toyota Prius, wenn die unterschiedlichen Wirkungsgrade zwischen Elektro- und Verbrennungsmotor mit einbezogen werden.

Dieser Endenergieverbrauchswert von 100 bis 120 Wh/km/1000 kg wird im Folgenden für alle weiteren Überlegungen zum Abschätzen des Potenzials für Fahrstrecken für den rein elektrischen Betrieb von Pkws herangezogen. Dieser Wert bezieht sich damit nicht auf den üblichen europäischen Fahrzyklus (EDC), sondern ist ein angenommener Alltagswert, basierend auf den Erfahrungen und Daten des Rügen-Feldversuchs und Technologiefortschritte berücksichtigend.

Batteriebetriebene Elektrostraßenfahrzeuge existieren heute auf dem europäischen Markt nur als Nischenprodukte. Ein gutes Beispiel solcher Kleinserien ist der in untenstehender Abbildung 15 gezeigte



Renault Twingo Quickshift Elettrica, der in der Schweiz erhältlich ist und über eine akzeptable Funktionalität verfügt.

## Renault Twingo Quickshift Elettrica am Markt




**Fahrzeugreichweite ca. 130 km**

$v_{max} = 120 \text{ km/h}$   
**Fzg-Leergewicht 920 kg**  
**Nutzlast 340 kg**

**Fahrzeugpreis (2005):**  
**30 - 35 KCHF, incl. 7.6% MwSt**  
**[ca. 21 – 24.3 K€, 16% MwSt.]**

**Batterie:**  
**ZEBRA Z39-325-ML6P-60**  
**Kapazität 60 Ah**  
**Nennenergie 19.5 KWh**  
**Leerlaufspannung 325 V**  
**Gewicht 160 kg**  
**ZEBRA Ladegerät 3 KW DC**

Quellen: MES-DEA S.A., Schweiz  
 Schweiz. Verband für Elektrische Straßenfahrzeuge

Abbildung 15: Renault Twingo Quickshift Elettrica mit ZEBRA Batterie

Das Fahrzeug ist ausgestattet mit der vom Automobilzulieferanten MES-DEA S.A. in der Schweiz von der Anglo American Battery Company übernommenen und weiterentwickelten ZEBRA® Batterie, die eine Hochtemperatur-Natrium-Nickel-Chlorid-Technologie beinhaltet. Mit der gespeicherten Energiemenge von 19.5 KWh kann im Alltagsbetrieb eine Reichweite von etwa 130 km erzielt werden. Der Fahrzeugpreis von 30 000 bis 35 000 CHF (einschl. 7.6% MwSt. in der Schweiz) wird sehr stark von den Batteriekosten geprägt. Dieses Batteriesystem hat, wie in der nächsten Abbildung 16 gezeigt, in 2006 noch anwendungs- und größenabhängige Herstellungskosten von 400 bis 550 €/KWh. Nach Informationen von MES-DEA können diese Kosten in einer zukünftigen Serienfertigung noch um den Faktor 3 bis auf € 150/KWh reduziert werden.

ZEBRA®-Batterien haben nach heutigem Entwicklungsstand eine spezifische Energie von 120 Wh/kg und eine spezifische Leistung von mehr als 150 W/kg. Das Einsatzprofil erstreckt sich auf Anwendungen in denen mehr als 2 KWh gespeicherte Energie und eine Entladerate größer als 45 Minuten gefordert werden. ZEBRA-Einzelzellen können in Serie bis hin zu Hochspannungen ausgelegt werden, daher erstreckt sich der potentielle Einsatzbereich bis in den MW-Bereich. Da der



Zellausfall in dieser Technologie niederohmig erfolgt, können Batteriepakete beim Ausfall einzelner Zellen weiterbetrieben werden; die Lebensdauer der Batterie ist somit nur indirekt vom Ausfall einzelner Zellen abhängig. Mit der bisher erreichten Zyklenlebensdauer von mehr als 1000 Lade-/Entlade-Vorgängen könnte schon fast die gesamte Fahrzeuglebensdauer im Bereich von 10 Jahren abgedeckt werden. Einschränkende Faktoren sind heute die eingeschränkte Belastbarkeit durch thermische Zyklen, d.h. die Batterie sollte möglichst dauerhaft im optimalen Betriebstemperaturbereich von 270°C bis 350°C gehalten werden, und die limitierte Belastbarkeit durch hohe elektrische Leistungen bei der Be- und Entladung.

**Entwicklungsstand der ZEBRA-Batterie bei MES-DEA S.A.**

- Kalenderlebensdauer > 10 Jahre
- Zyklenlebensdauer > 1000 Lade-/Entlade-Vorgänge
- keine chemischen Nebenreaktionen, Ah-Wirkungsgrad ist 100 %
- 100 % Material-Recycling
- Erfüllung der Sicherheitstests der europäischen Automobilindustrie und nach USABC
- Intrinsisch wartungsfrei, Zellausfall erfolgt niederohmig
- Überlade- und Überentladetoleranz
- Maximale Entladerate: Gesamte Batteriekapazität (in Ah) in 45 Minuten
- Schnellladung (1h) bis 80 % Ladezustand
- **Kosten: 2006: 400-550 €/KWh, anwendungsspezifisch**  
**Ziel: 150 €/KWh (Großserie)**

Quelle: MES-DEA

Abbildung 16: Charakteristische Merkmale der Hochtemperatur-ZEBRA<sup>®</sup>-Batterie für Anwendungen im Elektro-Straßenfahrzeug und als Pufferspeicher in stationären Anwendungen

Für eine Größe der Batterie wie der im Renault Twingo Quickshift Elettrica liegt die maximale Entladerate bei einer 45-minütigen Entladung, dies sind etwa 24 KW, die maximale Schnellladung liegt bei etwa 16 KW bis zu etwa 80% Ladezustand. Diese Werte sind weniger gut geeignet für die hohen elektrischen Leistungsanforderungen in Full Hybrid Fahrzeugen zum kräftigen Beschleunigen des Fahrzeugs beziehungsweise zur Aufnahme der Rekuperationsleistung.

Abbildung 17 fasst nach Angaben von Dr. C.-H. Dustmann, dem Entwicklungsleiter bei MES-DEA, die geplanten Pilotanwendungen des



Unternehmens MES-DEA für diese Batterietechnologie zusammen. Für das Kalenderjahr 2006 ist die Fertigung von ungefähr 1300 Batterien mit einer Nennenergie von 19.5 KWh vorgesehen, die in den auf dieser Abbildung genannten Pilotprojekten und für die Modifikation des Renault Twingo zum Elektrofahrzeug eingesetzt werden. Auch die für London und Rom geplanten Midihybridbusse wären gute Kandidaten für den Einsatz im öffentlichen Verkehr als Bestandteil des Projektes Bruchmühlbach.

## Geplante Anwendungen der Zebra-Batterie von MES-DEA ab 2006

- **Mobil:**
  - Lieferfahrzeuge, Busse, Hybridbusse
    - London: < 3.5 to Ges.gewicht, no congestion charge
    - Italien: 70-80 Midibusse mit 30 KW Dieseldieselgenerator, emissionsfrei im Stadtzentrum, außerdem 36 ZEV-Elektrobusse für Rom
  - PKW
    - Renault Twingo als Produkt am Markt
- **Stationär:**
  - Backup-Stromversorgung für Telekom-Einrichtungen
  - Load-Levelling-Projekte in Japan und Europa
    - Zebra hat ausgezeichnete 1 – 2h-Peak-Power-Entlade-Eigenschaften
    - Seit Ende 2005 12 KV – Batterie aus Zusammenarbeit mit ABB (0.4 – 0.7 MWh)
    - Pilotprojekt geplant
- **Produktionsplanung für 2006**
  - ca. 1300 Batterien mit der Nennenergie 19.5 KWh,
  - ca. 25 MWh gesamt



Abbildung 17: Das Anwendungsprofil der ZEBRA-Batterie mit geplanten Projekten nach heutigem Entwicklungsstand

Der weitere Markterfolg dieser Batterietechnologie wird entscheidend davon abhängen ob es der Firma MES-DEA gelingt die Produktkosten Schritt für Schritt auf das angestrebte Ziel von €150/KWh zu bringen. Die erreichte kalendarische als auch Zyklenlebensdauer ist bereits heute zufrieden stellend. Die Anzahl der thermischen Zyklen, das heißt Erkalten und wieder Aufheizen der Batterie, erscheint als noch verbesserungswürdig, was insbesondere für Fahrzeuganwendungen als kritischer Parameter anzusehen ist. Zu bemerken ist aber hier, dass, solange die Batterie nicht vollständig entladen ist, beim normalen Abstellen eines Fahrzeugs zunächst die minimale Betriebstemperatur über ein internes Heizsystem gehalten wird. Eine bessere Empfehlung ist, das Fahrzeug beim Parken nach Möglichkeit immer an das elektrische Versorgungsnetz anzuschließen.





## V Funktionserweiterungen in zukünftigen Hybridfahrzeugen

Das Unternehmen Toyota hat sich in den vergangenen Jahren nicht zuletzt durch den Markterfolg des Prius eine ausgezeichnete Wettbewerbsposition geschaffen. Der zeitliche Vorsprung in der Hybridtechnologie für Toyota und in der entsprechenden Serienfertigungserfahrung gegenüber Wettbewerbern wird auf mehr als 5 Jahre geschätzt. Noch bedeutender für die Zukunft könnte allerdings der strategische Vorteil der sehr offenen, flexiblen Systemstruktur werden. Dies wird in den folgenden Abbildungen 18 und 19 anhand von Funktionserweiterungen und Modifikationen des Serienfahrzeuges Prius durch externe, nicht mit Toyota verbundene Entwicklungsgruppen deutlich.

Nahe liegend ist zunächst die im Prius von Toyota verwendete Nickel-Metall-Hybrid-Batterie durch eine größere Version oder durch eine Lithium-Ionen-Batterievariante zu ersetzen (s. Abb. 18), welche dann bevorzugt über eine Anbindung an das elektrische Versorgungsnetz aufgeladen werden sollte.



Abbildung 18: Aufrüstung des Toyota Prius zu einem Plug-In Hybridfahrzeug (PHEV)

Damit würde dann beispielsweise das Hauptkriterium für den bisherigen Misserfolg von Elektrofahrzeugen in Kalifornien – die zu





geringe autarke Reichweite – mit einer Lösung überwunden, die zunächst eine akzeptable Fahrstrecke für den rein elektrischen und emissionsfreien Betrieb erlaubt, und dennoch das Weiterfahren bei leerer Fahrzeugbatterie mit Unterstützung des Verbrennungsmotors zulässt. Ein Liegenbleiben mit leerer Fahrzeugbatterie wäre damit ausgeschlossen. Solche Entwicklungslösungen sind mittlerweile auch durch das Entwicklungskonsortium Amberjac Projects Ltd., EnergyCS und EDrive Systems LLC. für Europa angekündigt worden. Konkret ersetzt hier eine 9 KWh Lithium-Ionen-Batterie (SaphionU) von Valence Technologies die serienmäßige 1.3 KWh NiMeH-Batterie. Ein geändertes Batteriemanagement ist ebenso erforderlich. Die Reichweite für rein elektrisches Fahren wird für dieses Batteriesystem mit etwa 50 km angegeben (für Stadtgeschwindigkeiten bis zu 50 km/h). Kosten und Preise für dieses Produkt sind bisher nicht genau bekannt. Amberjac spricht laut Pressenotizen von einem Aufpreis von £ 7700 zuzüglich MwSt.. Toyota, als Fahrzeughersteller, hat sich bezüglich dieser Fahrzeugmodifikationen bisher anscheinend sehr zurückgehalten, als kritisch einzuschätzen sind sicher Garantie- und Haftungsfragen aufgrund der Modifikationen im Fahrzeug sowie die nicht bekannte Batterielebensdauer.

In der Abbildung 19 ist ein weiteres Hybridfahrzeugkonzept aufbauend auf dem Antriebssystem des Toyota Prius an 2 Beispielen veranschaulicht. Diese Variante geht jetzt nicht mehr von Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen zum CO<sub>2</sub>- und abgasemissionsfreien Fahren aus, sondern benutzt Wasserstoff - natürlich bevorzugt auch hergestellt über die Elektrolyse aus erneuerbaren Energiequellen wie der Windenergie - als Sekundärenergieträger und Kraftstoff. In beiden hier gezeigten Beispielen wird der Benzinverbrennungsmotor auf den Wasserstoffbetrieb umgestellt. Dies betrifft in erster Linie die Wasserstoffeinblasung. Die Firma Quantum Technologies kann auf ausgedehnte Erfahrungen bei der Entwicklung von H<sub>2</sub>-Komponenten für die H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotoren des Unternehmens Ford Motor Company zurückgreifen und hat neben der kanadischen Firma Dynatec selbst die größte Erfahrung in der Entwicklung und Fertigung von Hochdrucktanks für H<sub>2</sub> und Erdgas bis zu Drücken von 70 MPa für mobile Anwendungen. Die eingesetzten Druckspeicher von Quantum Technologies speichern bei 35 MPa eine H<sub>2</sub>-Menge von 1.6 kg beziehungsweise von 2.4 kg in der größeren Tankvariante. Damit lassen sich bei einem Praxisverbrauch von etwa 1 bis 1.5 kg H<sub>2</sub> pro 100 km durchaus akzeptable Reichweiten zwischen 100 km und mehr als 200 km, je nach eingesetzter Tankvariante, erzielen. Nach Angaben der Firma Quantum Technologies werden beginnend in 2006 etwa 40 dieser H<sub>2</sub>-Hybridfahrzeuge in Flottentests in USA im Rahmen der „Hydrogen and Fuel Cell Initiative“ eingesetzt werden. Ab 2008 sollen 15 dieser dann



wohl verbesserten Fahrzeuge auch im von der EU geförderten norwegischen H<sub>2</sub>-Projekt „HyNor“ erprobt werden.

## Konzept Hybridfahrzeug mit H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor

**The H<sub>2</sub> Hybrid**



**Quantum PRIUS mit H<sub>2</sub>-Druckspeicher (350 bar)**



**Ovonic PRIUS mit Metallhydridspeicher**

- Druckspeicher 1.6 kg H<sub>2</sub> bzw. 2.4 kg H<sub>2</sub> (extended range)
- H<sub>2</sub>-Verbrauch
  - 1.05-1.55 kg H<sub>2</sub>/100 km in der Praxis
  - 1.1 kg H<sub>2</sub>/100 km im US-FTP Stadtzyklus
- Flottentests in USA: ca. 40 Fahrzeuge in 2006
- Flottentest in der EU: 15 Fahrzeuge im Projekt HyNor ab 2008

Quellen: HyNor  
OBC  
Quantum

Abbildung 19: Beispiele des Hybridfahrzeugs Toyota Prius mit H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor und H<sub>2</sub>-Speicher

Das Unternehmen Ovonic Battery Company (OBC) verfügt über tief greifendes Wissen und Erfahrungen auf dem Gebiet von Nickel-Metall-Hydrid-Batterien, insbesondere auf der Materialforschung für wasserstoffspeichernde Elektrodenmaterialien. Dieses Wissen wurde in den letzten Jahren ausgeweitet auf die Entwicklung spezieller reversibler Metallhydridspeicher für die sichere Speicherung von Wasserstoff. Die Umrüstung des Prius Hybridfahrzeugs auf H<sub>2</sub>-Betrieb ist damit für OBC natürlich eine hervorragende Möglichkeit um die Entwicklung und Erprobung solcher Speicher und Speichermaterialien entscheidend voranzubringen. Bei Verfügbarkeit eines entsprechenden H<sub>2</sub>-Speichers ergäbe sich für dieses Hybridfahrzeugkonzept dann natürlich direkt ein entsprechendes Marktpotenzial, da diese Hybridkonfiguration unter Umständen aus Kostengründen sogar früher zur Marktreife gebracht werden könnte im Vergleich zu entsprechenden H<sub>2</sub>-Brennstoffzellenkonzepten.

Diese Hybridfahrzeugkonfigurationen mit H<sub>2</sub> als Kraftstoff besitzen gegenüber den durch einen H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor direkt angetriebenen Fahrzeugen den Vorteil, dass Unzulänglichkeiten in der



Effizienz und Leistungsausbeute des  $H_2$ -Verbrennungsmotors durch die Hybridisierung in etwa kompensiert werden könnten. Dadurch könnten für den  $H_2$ -Betrieb dann vergleichbare Fahrleistungen zum Betrieb mit normalem Verbrennungsmotor für fossile Kraftstoffe erzielt werden. Für das Projekt Bruchmühlbach wären diese Varianten interessant, wenn mittelfristig zur Pufferung der Elektrizität aus Windenergie auch der Aufbau einer lokalen  $H_2$ -Infrastruktur in Erwägung gezogen werden sollte.

In den beiden folgenden Abbildungen 20 und 21 sind nun 2 Beispiele für die Erprobung von Brennstoffzellenhybridfahrzeugen mit  $H_2$  als Kraftstoff als Beispiele genannt.



Abbildung 20:  $H_2$  Hybrid-Bus mit Brennstoffzelle und Batterie der Firmen TECNOBUS und Hydrogenics

Während der Fußballweltmeisterschaft 2006 in Deutschland werden in NRW Midibusse mit Brennstoffzellentechnologie zwischen den Stadien der Spielorte verkehren. Die Midibusse vom Typ Gulliver/Oreos 22 des italienischen Herstellers TECNOBUS s.p.a. sind ausgerüstet mit einem 25 KW elektromotorischen Antrieb, der durch eine Brennstoffzelle und eine NiCd-Batterie (72 V, 125 Ah, ca. 9 KWh) versorgt wird. Die Brennstoffzelle bezieht das Brenngas  $H_2$  aus einem 20 MPa-Druckspeicher mit 5.8 kg  $H_2$ . Die Firma Hydrogenics, welche für den Aufbau der Midibusse verantwortlich zeichnet, spricht bei vollständig





geladener Batterie und vollem H<sub>2</sub>-Tanksystem von einer Gesamtreichweite von 200 km. Die Reichweite für das elektrische Fahren allein durch den Strom aus der Batterie soll 80 km betragen. Bei vorhandener lokaler H<sub>2</sub>-Infrastruktur im Projekt Bruchmühlbach wäre auch dieses Fahrzeugkonzept hervorragend dazu geeignet, aufzuzeigen, dass mit H<sub>2</sub> und elektrischer Energie die konventionellen fossilen Kraftstoffe lokal in bestimmten Anwendungen komplett ersetzt werden könnten.

Das zweite Beispiel dieser Kategorie von Fahrzeugen zeigt in Abbildung 21 das Konzeptfahrzeug THINK H<sub>2</sub> Hybrid. Dieses kleine Stadtfahrzeug, ursprünglich mit Beteiligung der Firma Ford Motor Company entwickelt, ist ausgerüstet mit einem elektromotorischen Antrieb, der sowohl von einer Hochtemperatur-ZEBRA<sup>®</sup>-Batterie der Firma MES-DEA (17.6 KWh) als auch von einer 10 KW HyPM Brennstoffzelle der Firma Hydrogenics gespeist wird. Zusammen mit dem gespeicherten H<sub>2</sub> aus dem 70 MPa – Druckspeicher der Firma Raufos führt die in der ZEBRA<sup>®</sup>-Batterie gespeicherte elektrische Energie zu einer für den Stadtverkehr mehr als ausreichenden Reichweite von 300 km. THINK beabsichtigt in 2006 5 Demonstrations-Prototyp-Fahrzeuge für Leasing oder Verkauf aufzubauen. Für 2007 ist eine Kleinserie geplant und 2008 sollen mehrere Fahrzeuge im H<sub>2</sub>-Korridor des EU-H<sub>2</sub>-Projektes HyNor auf kommerzieller Basis eingesetzt werden.

## Konzeptfahrzeug THINK Hydrogen Hybrid



- Batterie 17.6 KWh MES-DEA
- 10 KW HyPM Brennstoffzelle Hydrogenics
- 700 bar H<sub>2</sub>-Speicher Raufoss
- Reichweite 300 km (Batterie und H<sub>2</sub>-Speicher)
- 2006 5 Prototyp-Demo-Fahrzeuge für Leasing/Verkauf
- 2007 Kleinserie
- 2008 EU-H<sub>2</sub>-Projekt HyNor


Quelle: THINK

**Abbildung 21:** THINK H<sub>2</sub> Hybridfahrzeug mit Brennstoffzelle und Batterie



Die Summe der Kosten für den elektromotorischen Antrieb, für den Energiewandler Brennstoffzellensystem und für den elektrochemischen Speicher Batterie als auch für den H<sub>2</sub> Druckspeichertank sind in diesen beiden zuletzt beschriebenen Fahrzeugantriebskonzepten sehr kritisch zu hinterfragen und zu bewerten. Nach heutiger Kenntnis dürften die Kosten für den Antrieb und die Energiespeicher in beiden beschriebenen Beispielen weit über die Kosten der konventionellen Fahrzeugplattformen hinausgehen.





## VI Abschätzungen der Funktionserweiterungen zukünftiger Hybridfahrzeuge in Richtung emissionsfreies Fahren

Von den im vorangehenden Kapitel beschriebenen Modifikationen von Serienhybridfahrzeugen, die im Wesentlichen alle auf dem Konzept und der Systemstruktur des Toyota Prius aufbauen, und den erläuterten neuen Hybridantriebsvarianten besitzen die Alternativen mit Vergrößerung der Batterie oder Verbesserung der Batterietechnologien das größte Potenzial für eine mittelfristige Umsetzung in eine serientaugliche Lösung. Letztendlich wird dann der Markterfolg entscheidend von den Kostenrelationen abhängen, d.h. für den Nutzer ist entscheidend, welche Einsparungen auf der Kraftstoffverbrauchsseite den unter Umständen höheren Fahrzeugkosten aufgrund des Einsatzes einer teureren Batterie gegenüberstehen. Zunächst werden daher nochmals die heute verfügbaren Batterietechnologien betrachtet und verglichen mit den Entwicklungspotenzialen zukünftiger Batteriegenerationen.

In Bild 22 sind als erstes die signifikanten Verbesserungen der Nickel-Metall-Hybrid-Batterie im neuen Prius 2005, eingebaut im Bereich des Unterbodens hinter der Hinterachse, zusammengefasst im Vergleich zur Vorgängerversion in der 2. Generation des Prius.

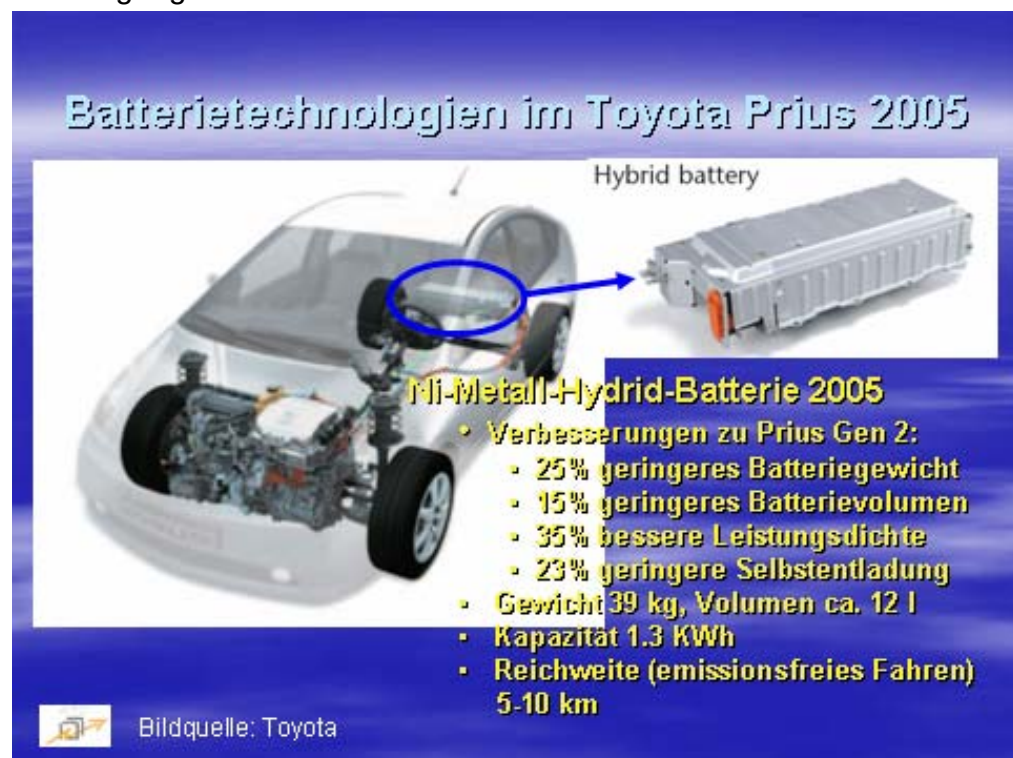


Abbildung 22: Verbesserungen der Nickel-Metall-Hybrid-Batterie im aktuellen Prius gegenüber der Vorgängerversion



Auffallend sind die Verbesserungen von Batteriegewicht und Batterievolumen bezogen auf den gleichen Energieinhalt. Auch die Leistungsdichte konnte um mehr als ein Drittel verbessert werden, was insbesondere auch für die Anwendung im Lexus RX 400h mit höheren Leistungsanforderungen an das elektrische System von großem Vorteil ist. Weitere Verbesserungen sind für diese Parameter der Nickel-Metall-Hydrid-Batterie in den nächsten Jahren zu erwarten, allerdings in ähnlichen Schritten. Über vielfältige Anwendungen, auch für den Bereich Consumer Electronics, erscheint diese Technologie als sehr ausgereift.

Ein sehr großes Anwendungspotenzial für die Zukunft wird in der gesamten Automobilindustrie in der Lithium-Ionen-Batterie gesehen. Am weitesten fortgeschrittenen ist diese Technologie für Automobilanwendungen bei den Unternehmen Matsushita, Saft, Sanyo, Sony, Toshiba und Valence Technologies.

Die abgeschätzten Werte der in Zukunft erreichbaren Energiedichten für komplette Lithium-Ionen-Batteriesysteme liegen bis zu 800 Wh/kg und 500 Wh/l. Dies sind deutlich bessere Werte als die heutiger Nickel-Metall-Hydrid-Batterien von bis zu 50 Wh/kg beziehungsweise etwa 100 Wh/l. Auch die für Lithium-Ionen-Zellen erwarteten erreichbaren Leistungsdichten sind mit Werten bis zu 2 KW/kg hervorragend. Damit ließen sich beim Einsatz in Hybridfahrzeugen die Fahrstrecken für das autonome Fahren im elektrischen Betrieb ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen durchaus auf Werte zwischen 50 km und 100 km steigern in Abhängigkeit von der verwendeten Batteriegröße. Diese Überlegungen werden im Folgenden noch näher betrachtet werden.

Die Entwicklungsrisiken liegen heute für Lithium-Ionen-Batterien zum einen auf der Kostenseite. Hohe Material- und Fertigungskosten von mehr als € 2000/KWh verlangen bei Anwendungen eine optimierte minimale Batteriegröße. Auf der technischen Seite verlangen die Lithium-Ionen-Batterietechnologien einen sehr präzisen Überladeschutz zum Erreichen einer akzeptablen Lebensdauer. Bei der Serienschaltung von Lithium-Ionen-Einzelsellen mit einer Nennspannung von 3.6 V zu Batteriepaketen für automobiler Anwendungen ist nach heutigem Kenntnisstand deshalb eine aufwändige Einzelsellenspannungskontrolle und unter Umständen sogar ein Einzelsellenladungsausgleich erforderlich.

Die Markteinführung dieser Batterietechnologie dürfte daher schrittweise erfolgen um Erfahrungen aus dem Feld in die weitere Entwicklung einfließen zu lassen.



## Potenzial von Li-Ionen-Batterie-Technologien für mobile Anwendungen

- Hohe Energie- und Leistungsdichten
  - bis zu 800 Wh/kg und 500Wh/l
  - Einsatz bei mobilen Anwendungen zuerst in Hybridfahrzeugen, um Fahrstrecken für den rein elektrischen Betrieb zu erhöhen
- Entwicklungsrisiken
  - Hohe Material- und Fertigungskosten >2000 €/kWh
  - Zellen-Überladesicherheit
  - Lebensdauer
- Markteinführungszeitraum
  - Erste Anwendungen in Japan
    - Toyota Vitz mit TIIS (Toyota Intelligent Idling Stop System):  
Li-Ionen-Zellen 3.6V, 12 Ah, >2 kWh/kg, 120 Wh/l, 4 Zellen in Serie
  - 4 - 5 Jahre für Hybridfahrzeuge



Bildquelle: Toyota



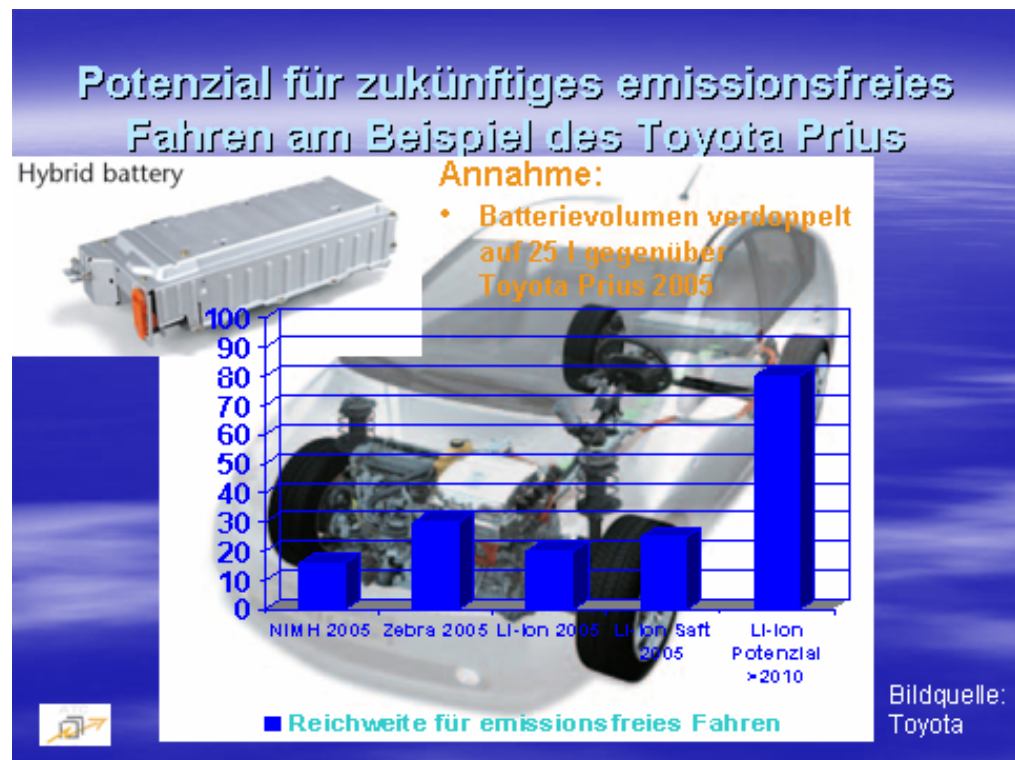
Abbildung 23: Erste Anwendung der Lithium-Ionen-Batterie in Hybridfahrzeugen am Beispiel des Toyota Vitz

Das Unternehmen Toyota hat auf dem japanischen Markt im Subcompact-Fahrzeugmodell Vitz (siehe Abbildung 23), dem Pendant zum europäischen Modell Yaris, im Toyota Intelligent Idling Stop System (TIIS) eine Lithium-Ionen-Batterie zum Einsatz gebracht. Es handelt sich also um ein Hybridfahrzeug der Kategorie „Micro Hybrid“. Für die Nennspannung von 14.4 V werden 4 Einzelzellen à 12 Ah in Serie geschaltet. Die erreichten elektrischen Energie- und Leistungsdichten von 120 Wh/l und mehr als 2 kW/kg sind für diese erste Anwendung schon beeindruckend und viel versprechend. Der Einsatz in Full Hybrid Fahrzeugen dürfte nach einer ersten Einschätzung dennoch einen Zeitraum von 4 bis 5 Jahren erfordern bis die notwendige Systemreife erzielt worden ist.

Die folgenden Ausführungen beinhalten nun eine Darstellung für das Potenzial des emissionsfreien Fahrens mit Hybridfahrzeugen am Beispiel des jetzigen Toyota Prius. In dieser Analyse wird angenommen, dass in diesem Fahrzeug auch eine Batterie mit doppeltem Volumen von etwa 25 Litern gegenüber der Serien-Batterie des Prius integriert werden könnte. Eine solche Annahme erscheint aus Kosten- und Package-Gründen als realistisch. Weiterhin wird angenommen, dass diese Batterie über ein integriertes Ladegerät mit Netzanschluss zusätzlich aufgeladen werden kann, das Fahrzeug wäre also ein „Plug-In Hybrid“. Im Vergleich der heute verfügbaren Batterietechnologien, dargestellt in Abbildung 24, Nickel-Metall-Hydrid (Panasonic EV



Energy), ZEBRA (MES-DEA), Lithium-Ionen (Toyota), Lithium-Ionen (Saft) wird deutlich, dass die Reichweite für das emissionsfreie Fahren für diesen Pkw der Mittelklasse dann bei maximal 30 km liegen würde (mit der Einschränkung, dass der Eigenenergieverbrauch der kleineren ZEBRA-Batterie relativ gesehen größer ist und damit der Batteriewirkungsgrad sinkt). Das Potenzial einer zukünftigen Lithium-Batterie liegt jedoch um etwa den Faktor 3 höher bei ca. 80 km.



**Abbildung 24:** Toyota Prius mit angenommener verdoppelter Batteriegröße und verschiedenen Batterien zum Vergleich der erzielbaren emissionsfreien Reichweite

Im nächsten Schritt wird aus diesen Werten abgeleitet, welcher Anteil der jährlichen durchschnittlichen Fahrleistungen mit einem solchen Hybridantriebssystem dann ohne Abgas- und CO<sub>2</sub>-Emissionen erfolgen könnte. Ausgangsbasis für diese Ableitung sind die Ergebnisse der typischen Tages-Fahrstreckenprofile aus dem Elektrofahrzeug-Feldversuch auf der Insel Rügen, korrigiert bezüglich der in den letzten Jahren gestiegenen durchschnittlichen Jahresfahrleistungen für Pkws. Abbildung 25 zeigt diese Ergebnisse.



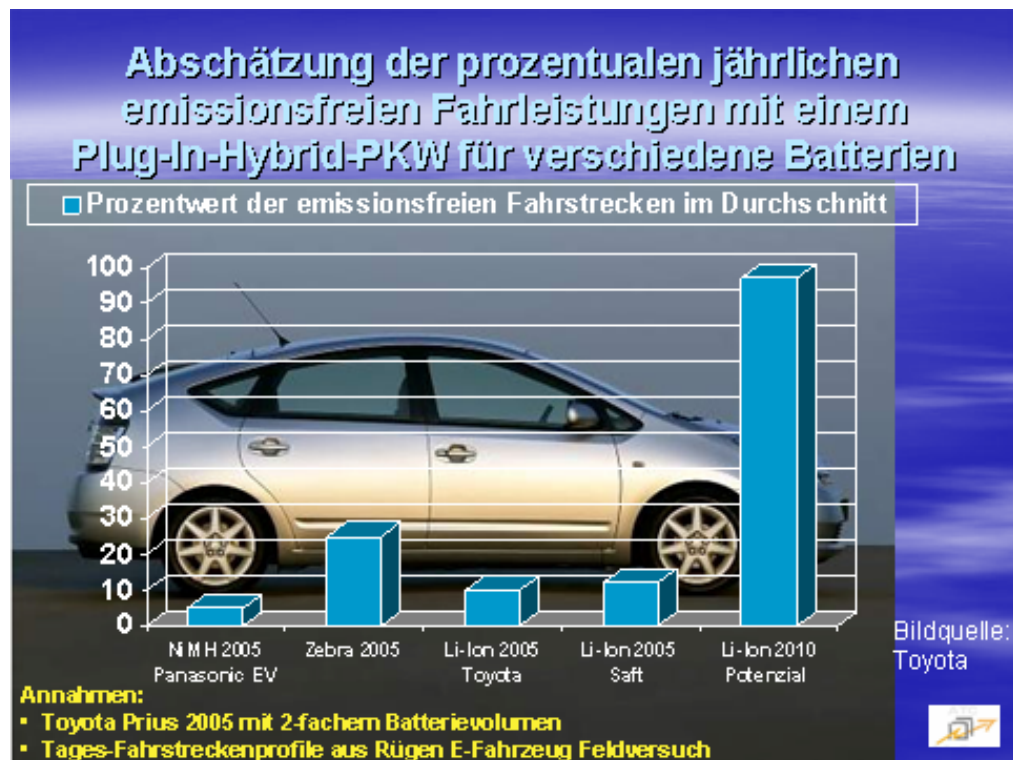


Abbildung 25: Anteil der emissionsfreien Jahresfahrleistung für einen Plug-In-Hybrid-Pkw mit verschiedenen Batterien am Beispiel des Toyota Prius

Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich, dass selbst mit heute verfügbaren Batterietechnologien und einer realistischen Batteriegröße – Volumenverdopplung gegenüber der Batterie im Prius – die Erweiterung der Funktionalität hin zu einem Plug-In-Hybrid dann erlauben würde, einen beträchtlichen Anteil von 5% bis 25% der jährlichen Fahrleistungen im emissionsfreien Betrieb durchzuführen. Dies bedeutet, dass mit solchen Plug-In-Hybridfahrzeugen auch ein entsprechender Anteil an fossilen Kraftstoffen durch CO<sub>2</sub>-freie Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen ersetzt werden könnte. Sollten zukünftige Generationen der Lithium-Ionen-Batterien dann hinsichtlich Kosten, Energiedichten und Leistungsdichten deutlich verbessert werden können bis hin zu den hohen projizierten Werten und in zukünftigen Hybridfahrzeugen zum Einsatz kommen, so ließen sich mit diesem Konzept der Plug-In-Hybridfahrzeuge sogar mehr als 90% der jährlichen Fahrstrecken emissionsfrei zurücklegen und die Kraftstoffwertschöpfungskette für den Automobilbetrieb nahezu vollständig vom Erdöl abkoppeln. Eine solche Entwicklung wird ganz entscheidend von der Kostensituation der Lithium-Ionen-Batterie und dem Anstieg der Kosten konventioneller fossiler Kraftstoffe beeinflusst und geprägt werden.

Die Entwicklung dieser Plug-In-Hybridfahrzeuge zeigt mit der Erhöhung der emissionsfreien Fahrstrecken natürlich auch die gekoppelte





Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen pro km Fahrstrecke des Toyota Prius Modelljahr 2005 sind selbst schon mit 104 g CO<sub>2</sub>/km um etwa ein Drittel niedriger als diejenigen der vergleichbaren Toyota Corolla Plattform mit direktem verbrennungsmotorischen Antrieb der gleichen Leistung (gemessen für den europäischen Fahrzyklus).

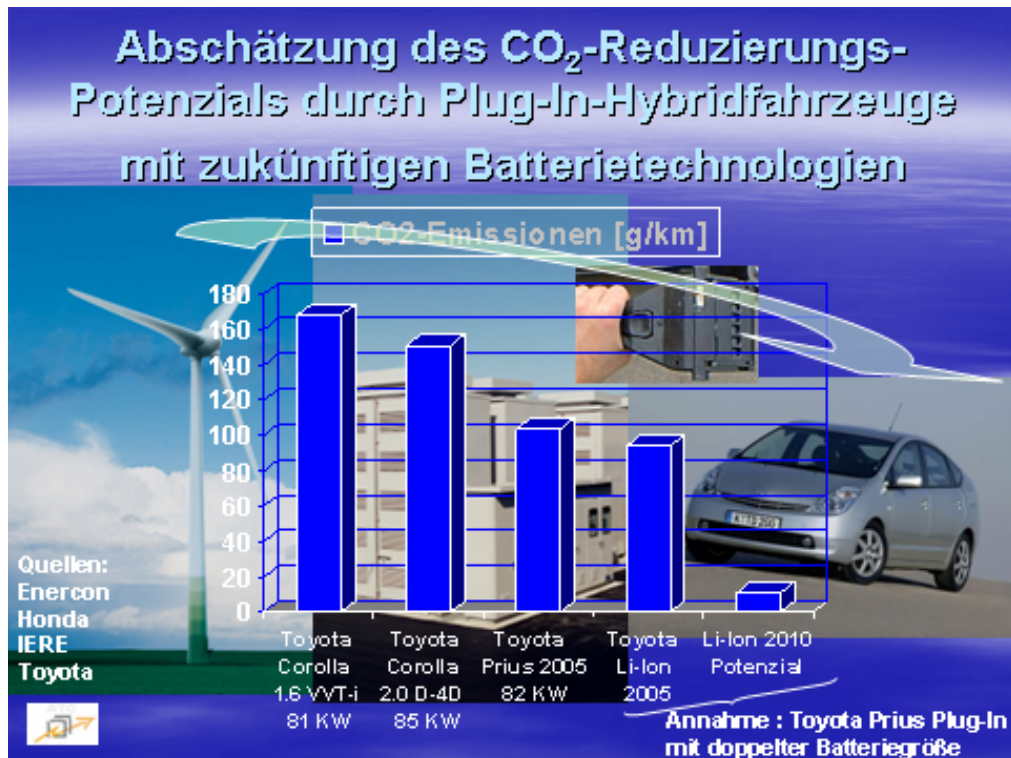


Abbildung 26: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen unterschiedlicher Antriebstechnologien bis hin zum Plug-In-Hybrid-Fahrzeug mit Lithium-Ionen-Batterie am Beispiel des Toyota Prius

Die Funktionalitätsaufwertung zum Plug-In-Hybridfahrzeug mit einem gegenüber dem Prius 2005 verdoppeltem Batterievolumen und der Verwendung der Lithium-Ionen-Batterie und deren schrittweise umgesetzter Speicherdichtenverbesserung zeigt nochmals ein riesiges CO<sub>2</sub>-Reduzierungspotenzial auf bis hin zu Werten von etwa 10 g CO<sub>2</sub>/km. Im Vergleich dazu hat der Verband der europäischen Automobilhersteller ACEA eine Zielsetzung, dass ab dem Jahr 2008 der Durchschnitt aller in einem Jahr neu zugelassenen Pkws eines Automobilherstellers maximal 140 g CO<sub>2</sub>/km betragen darf.

Das abschließende Beispiel, dargestellt in Abbildung 27, zeigt, dass der verbleibende Anteil von CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Umsatz der fossilen Kraftstoffe im Verbrennungsmotor von Hybridantriebssystemen zukünftig durch die Verwendung von CO<sub>2</sub>-neutralen Biokraftstoffen auch noch vermieden werden kann.



In dem gerade auf der Automobilausstellung in Stockholm von Saab/General Motors präsentierten Show Car, einem Saab 9-3 als Hybridfahrzeug, wird Äthanol als Biokraftstoff eingesetzt. Über das Hybridantriebssystem wird somit die aufgrund des niedrigeren Energieinhaltes von Äthanol um etwa ein Drittel geringere Reichweite (pro Tankfüllung) des Fahrzeugs im Vergleich zu der von Benzin oder Diesel kompensiert. Gleichzeitig wird aufgrund des geringeren Verbrauchs an Biokraftstoff auch dessen mengenmäßige Verfügbarkeit für viele Nutzer erweitert.



Abbildung 27: Saab Hybrid Show Car für die Nutzung des Biokraftstoffes E100

Fahrzeuge mit dem Kraftstoff E85 (85% Äthanol, 15% Benzin) und E100 sind in Nordeuropa am Markt zurzeit sehr gefragt. Allein in Schweden sollen bis Ende 2006 600 Äthanoltankstellen in Betrieb sein. Das in diesem Show Car gezeigte Parallel-Hybrid-Konzept mit zusätzlich integriertem Starter/Generator auf der Kurbelwelle verhilft dem Fahrzeug wieder zu dynamischeren Fahrleistungen, die durch die Umstellung von Benzin auf E85 schwächer geworden sind. Insofern ist dieses Konzept mehr unter den Gesichtspunkten Power Boost und Saab Markencharakteristik als unter dem Leitthema Energieeffizienz zu verstehen. Die Gesamtsystemkosten dieser Hybrid-Struktur erschweren mit Sicherheit eine Markteinführung in nächster Zeit. Deshalb ist viel besser vorstellbar, dass heute auf dem Markt schon vorhandene Hybridfahrzeuge viel früher für den Betrieb mit den flüssigen Kraftstoffen aus erneuerbaren Energiequellen vorbereitet und lieferbar



werden. Gerade der in den Toyota Hybridfahrzeugen eingesetzte, nach dem Atkinson Zyklus arbeitende Verbrennungsmotor bietet hier zusammen mit der variablen Ventilverstellung eine hervorragende Ausgangsbasis für den Betrieb mit Äthanolkraftstoffen.



## Literatur- und Quellenverzeichnis

- DAUGmbH, Abschlussbericht „Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen“, 1996
- Dustmann C.-H., Galloway R.C., „ZEBRA<sup>®</sup> Battery Material Cost, Availability and Recycling“; EVS-20, Long Beach, CA, November 2003
- Dustmann C.-H., „Advances in ZEBRA<sup>®</sup> Batteries“, Journal of Power Sources, 2003, Elsevier
- <http://www.autosieger.de/article8061.html>
- <http://www.cres.gr/>
- <http://www.daimlerchrysler.com>
- <http://www.media.daimlerchrysler.com>
- <http://www.e-mobile.ch>
- [http://www.greencarcongress.com/2005/05/commercial\\_retr.html](http://www.greencarcongress.com/2005/05/commercial_retr.html)
- <http://www.plugin-hybrid.com>
- <http://www.quantum.com/>
- [http://www.umweltdialog.de/umweltdialog/mobilitaet/2005-09-09\\_Wettlauf\\_um\\_den\\_Markt\\_fuer\\_Hybridfahrzeuge](http://www.umweltdialog.de/umweltdialog/mobilitaet/2005-09-09_Wettlauf_um_den_Markt_fuer_Hybridfahrzeuge)
- International Energy Agency, „Prospects for Hydrogen and Fuel Cells“, 2005, ISBN 92-64-10957-9  
oder auch unter: <http://www.iea.org/books>
- McKinsey&Company, Studie „DRIVE The Future of Automotive Power“, 2006



## Anhang A

| Vergleich verschiedener Fahrzeuge mit alternativen Antrieben |                                         |                  |                          |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------|--------------------------|
|                                                              | Kraftstoffverbrauch                     | Energieverbrauch | Reichweite emissionsfrei |
| Honda INSIGHT                                                | 3.4l/100km NEFZ                         | 310 Wh/km        | nicht möglich            |
| Toyota PRIUS                                                 | 4.3 l/100 km NEFZ                       | 390 Wh/km        | 5 - 10 km                |
| Lexus RX400h                                                 | 8.1 l/100 km NEFZ                       | 740 Wh/km        | keine Angaben            |
| Ford ESCAPE                                                  | 6.5 l/100 km FTP City                   | 600 Wh/km        | ca. 30 km                |
| Renault Twingo Quickshift Elettrica                          |                                         | 150 Wh/km *      | ca. 130 km               |
| Quantum H <sub>2</sub> PRIUS                                 | 1.1 kg H <sub>2</sub> / 100 km FTP City | 360 Wh/km        | ca. 210 km (ER Package)  |
| THINK H <sub>2</sub> Hybrid                                  | Keine Angaben                           | 120 Wh/km *      | ca. 300 km               |
| DCX Hybrid Sprinter                                          | keine Angaben                           | 460 Wh/km *      | ca. 30 km                |

\* : Energieverbrauch im rein elektrischen Fahrbetrieb

Anhang A:

*Energieverbrauch und emissionsfreie Reichweite für verschiedene Varianten von Hybridfahrzeugen und batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen*





| Amortisation der Prius Plus Aufrüstungskosten       |          | Jahresübersicht |           |           |           |           |           |           |           |           |          |
|-----------------------------------------------------|----------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Parameter                                           |          | 1               | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10       |
| Aufrüstungskosten in l                              | 8150,00  |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |          |
| Jahresfahrstrecke in km                             | 15000,00 |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |          |
| Benzinverbrauch l/100 km                            | 4,30     |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |          |
| Basis-Benzinpreis in l/l (Normalbenzin)             | 1,40     |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |          |
| Elektr.-Verbrauch kWh/100 km                        | 12,50    |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |          |
| Basis-Strompreis in l/kWh                           | 0,20     |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |          |
| Anteil emissionsfreies el. Fahren in %              | 80,00    |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |          |
| Entgangene Verzinsung der Aufrüstkosten in % p.a.   | 5,00     |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |          |
| Benzinpreissteigerung in % p.a.                     | 8,00     |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |          |
| Strompreissteigerung in % p.a.                      | 2,00     |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |          |
| Laufzeit in Jahren                                  |          | 1               | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10       |
| Benzinpreis in l nach n Jahren                      |          | 1,51            | 1,63      | 1,76      | 1,90      | 2,06      | 2,22      | 2,40      | 2,59      | 2,80      | 3,02     |
| Strompreis in l nach n Jahren                       |          | 0,20            | 0,21      | 0,21      | 0,22      | 0,22      | 0,23      | 0,23      | 0,23      | 0,24      | 0,24     |
| Kraftstoffkosteneinsparung p.a. im n-ten Jahr       |          | 447,76          | 501,76    | 560,44    | 624,19    | 693,42    | 768,58    | 850,13    | 938,62    | 1034,59   | 1138,66  |
| Kraftstoffkosteneinsparung nach n-Jahren unverzinst |          | 447,76          | 949,52    | 1509,96   | 2134,16   | 2827,58   | 3596,16   | 4446,29   | 5384,91   | 6419,50   | 7558,16  |
| Kraftstoffkosteneinsparung nach n-Jahren verzinst   |          |                 | 971,91    | 1580,95   | 2284,19   | 3091,82   | 4014,99   | 5065,87   | 6257,78   | 7605,26   | 9124,18  |
| Wert der Aufrüstkosten nach n Jahren                |          | 6457,50         | 6780,38   | 7119,39   | 7475,36   | 7849,13   | 8241,59   | 8653,67   | 9086,35   | 9540,67   | 10017,70 |
| Amortisation der Aufrüstkosten nach n Jahren        |          | -6.009,74       | -5.808,47 | -5.538,45 | -5.191,17 | -4.757,31 | -4.228,60 | -3.587,80 | -2.828,57 | -1.935,41 | -893,52  |

Dr. E. Schubert, About The Cell, 18.07.2006

## Anhang B:

Beispiel für die Amortisation der Prius Aufrüstkosten durch steigende Energie- und Kraftstoffpreise und niedrigeren Kraftstoffverbrauch



## Erläuterung zu Anhang B

Die in Anhang B dargestellte Tabelle zeigt ein Beispiel einer Amortisationsrechnung der für die Aufrüstung des Hybridfahrzeugs Prius von Toyota erforderlichen zusätzlichen Kosten falls der Kunde über eine größere Fahrstrecke für den rein elektrischen Betrieb des Hybridfahrzeugs verfügen möchte. Basis hierfür sind die von der Firma Amberjac (UK) genannten zusätzlichen Kosten für die Integration der Li-Ionen-Batterie von Valence Technologies, eines zusätzlichen Ladeanschlusses und Ladegerätes zur Aufladung der Batterie über das Stromnetz und der zusätzlich erforderlichen Software-Modifikationen. Diese Aufrüstkosten gelten zurzeit mit Sicherheit für kleine Stückzahlen an Fahrzeugumrüstungen, so dass mit der Weiterentwicklung der Li-Ionen-Batterie-Technologien und der wachsenden Nachfrage nach solche Fahrzeugen dieser Kostenblock noch signifikant fallen dürfte. Entscheidend gehen in eine solche Amortisationsrechnung die Jahresfahrleistung und der Anteil der rein elektrischen, emissionsfreien Fahrten ein. Wird das Fahrzeug überwiegend im Kurzstreckenverkehr eingesetzt, so dürfte aufgrund der gespeicherten Menge an elektrischer Energie etwa 80% der Fahrten durch eine rein elektrische Fahrweise abgedeckt werden können. Als Jahresfahrleistung sind hier 15 000 km angenommen.

Für die weitere, in den nächsten Jahren zu erwartende Benzinpreissteigerung wird in diesem Beispiel der durchschnittliche Wert von 8% aus den letzten 5 Jahren eingesetzt. Für die Strompreissteigerung wird für die kommenden Jahre eine etwas geringere Rate von 2% angenommen und verwendet.

Zusätzlich wird für die entgangene Verzinsung der frühen höheren Investitionskosten für ein solches Fahrzeug ein Wert von 5% per annum verwendet, der heute realistisch gesehen unter günstigen Umständen bei Anlage der Mehrinvestitionen hätte wieder erzielt werden können. Der gleiche Wert wird hier für die Verzinsung der eingesparten Kraftstoffkosten eingesetzt.

Für diese angenommenen Werte zeigt dieses Beispiel eine Amortisationszeit des eingesetzten Mehrkapitals von etwas mehr als 10 Jahren.

Bei stärker steigenden Kraftstoffpreisen, wofür durchaus realistische Szenarien bestehen, und bei deutlich fallenden Umrüstkosten sowie höheren elektrischen Energie- und Leistungsdichten der eingesetzten Li-Ionen Batterien, ist jedoch davon auszugehen, dass sich diese Rentabilitätsüberlegungen auf einen wesentlich geringeren Zeitraum von wenigen Jahren mit einer Bandbreite zwischen 3 und 6 Jahren deutlich verbessern werden.