

Energieeffizienz und Nachhaltigkeit in der Automobilität auf der Basis des Elektrofahrzeugs Editha

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Matthias Heinicke ¹⁾, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Kevin Kuhlmann ²⁾,
Dipl.-Ing. Martin Schünemann ³⁾, Dipl.-Ing. Gerd Wagenhaus ⁴⁾

¹⁾Institut für Arbeitswissenschaft, Fabrikautomatisierung und Fabrikbetrieb, Otto-von-Guericke-Universität, Deutschland,
matthias.heinicke@ovgu.de, 0391-67-11827

²⁾Institut für Maschinenkonstruktion, Otto-von-Guericke-Universität, Deutschland, kevin.kuhlmann@ovgu.de, 0391-67-
12054

³⁾Institut für Mobile Systeme, Otto-von-Guericke-Universität, Deutschland, martin.schuenemann@ovgu.de, 0391-67-12952

⁴⁾Institut für Arbeitswissenschaft, Fabrikautomatisierung und Fabrikbetrieb, Otto-von-Guericke-Universität, Deutschland,
gerd.wagenhaus@ovgu.de, 0391-67-18172

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund steigender Kraftstoffpreise, die insbesondere in der Knappheit fossiler Ressourcen begründet sind, erhöht sich die Attraktivität alternativer Antriebskonzepte sowohl im gewerblichen als auch im privaten Mobilitätssektor. In diesem Zusammenhang und auf Grund der Endlichkeit konventioneller Treibstoffe sowie aus ökologischen und zunehmend auch ökonomischen Beweggründen heraus gewinnt die Nutzung von Elektrofahrzeugen insbesondere in der städtischen Umgebung weiter an Bedeutung. Daran knüpft der vorliegende Beitrag an, der darstellt, inwieweit alternative Antriebskonzepte für die zukünftige Mobilität anwendbar sind. Vor dem Hintergrund gleichzeitig stetig steigender Energiepreise wird deren effektiver Einsatz besonders im Bereich der automobilen Anwendung zukünftig ein entscheidender Faktor sein. Ziel dieses Beitrages ist es daher, die Konfiguration eines auf Alltagstauglichkeit, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit fokussierten Elektrofahrzeuges im Kleinwagensegment für die urbane Umgebung im Rahmen des Editha-Projektes vorzustellen. Vor dem Hintergrund von Marktanalysen und Vergleichen mit vorhandenen Serienfahrzeugen in diesem Sektor wird eine geeignete Antriebsstrang-Topologie entwickelt, die die Grundlage für die Erfüllung der gestellten Anforderungen darstellt. Basierend auf verfügbaren Komponenten haben die Wissenschaftler der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg einen konventionellen Kleinwagen prototypisch in ein Elektromobil umgebaut. Mithilfe des Projektes Editha wird ersichtlich, welche technischen Möglichkeiten genutzt werden können, um automobile Elektromobilität aus bereits bestehenden Teilsystemlösungen in die Städte und deren Umgebung zu bringen. Letztlich beweist das Gesamtkonzept Edithas seinen Nachhaltigkeitsanspruch durch die verlängerte Nutzungsdauer, indem ein bestehendes Fahrzeug in einen zweiten Lebenszyklus überführt wird. Infolgedessen stellt das Fahrzeug Editha den ersten Schritt hin zur erhöhten ökologischen Effizienz und Effektivität im Automobilsektor dar. Des Weiteren werden auf Grund der gemachten Erkenntnisse aus dem Projekt Editha mögliche Auswirkungen auf Automobilhersteller und deren Produktionssysteme abgeleitet.

Schlüsselwörter: Elektromobilität, Alltagstauglichkeit, Energieeffizienz, Nachhaltigkeit

1. Einleitung

In Anbetracht begrenzter Ressourcen, vor allem im Bereich der Energiebereitstellung fossiler Energieträger für Individualmobilität (Erdöl, Erdgas) in urban geprägten Siedlungsgebieten, stellt sich die Frage, inwieweit die sich ergebenden Kosten für weite Teile der Bevölkerung zukünftig noch vertretbar sind. Vor dem Hintergrund der sich in den letzten Jahren dramatisch entwickelten Energiekosten, nicht zuletzt begründet in einer weiter fortschreitenden Verknappung von Ressourcen, wird erkennbar, dass die universelle Nutzung und damit der Einsatz von Energie besonders im Bereich urbaner Mobilität ein entscheidender Faktor für die zukünftige Entwicklung ganzer Regionen sein wird. Magdeburger Forscher an der Otto-von-Guericke-Universität haben auf der Basis aktuell zur Verfügung stehender technisch-technologischer Komponenten ein Kleinstfahrzeug auf einen Elektroantrieb umgerüstet, bei dem die Energieeffizienz und Nachhaltigkeit unter dem Gesichtspunkt alternativer Antriebskonzepte im direkten Fokus der Entwicklung stand.

Durch die konsequente Orientierung auf Nachhaltigkeit konnten bisherige Nutzungszeiten und Nutzungsdauern klassischer Fahrzeugkonzepte deutlich überschritten werden. Somit stellt nicht nur der effiziente Einsatz der Antriebsenergie als direkt wirksame Betriebskosten einen signifikanten Vorteil dar, auch über die erweiterte Nutzungsdauer vertritt das Gesamtkonzept des Fahrzeugs einen nachhaltigen Anspruch. Gleichzeitig galt es, dem Anspruch der Alltagstauglichkeit im Vergleich zu herkömmlichen Antriebskonzepten umfassend gerecht zu werden, indem ein etabliertes Serienfahrzeug aus dem Kleinstfahrzeugsegment den Ausgangspunkt der Umrüstung darstellte. Um die Effizienz des Antriebsstrangs zu erhöhen, wurde ein elektrischer Einzelradantrieb mit radnahen Motoren an der Hinterachse konzipiert und umgesetzt.

Durch den Verzicht auf mechanische Übertragungselemente, wie Schaltgetriebe oder Differential, konnte ein *Tank-to-Wheel*-Wirkungsgrad von ca. 80% erreicht werden. Dies begünstigt auch die Dimensionierung der eingesetzten Traktionsbatterie hinsichtlich Kosten und Gewicht bei einer effektiven Reichweite von 130 km. Des Weiteren werden die Ansätze der Ökoeffektivität und –effizienz getragen durch eine vergleichende LCC-Analyse in diesem Rahmen dahingehend diskutiert, welche Auswirkungen sich durch die Nutzung elektrischer Antriebskonzepte sowohl auf die Gesellschaft als auch die Automobilindustrie in ihrer bisherigen Form ergeben. Am Beispiel des entwickelten Forschungsfahrzeuges Editha zeigen die Magdeburger Forscher auf, welche technischen Möglichkeiten sich derzeit aus verfügbaren Komponenten für die Schaffung von nachhaltiger Mobilität im urbanen Umfeld bestehen. Nach dem ersten Erprobungsjahr werden zudem basierend auf den vergleichenden Daten und Erfahrungswerten Ausblicke auf künftige Entwicklungsprojekte gegeben, um im Sinne der Nachhaltigkeit weitere Forschungs- und Entwicklungsthemen rund um die alltagstaugliche Elektromobilität auf zu zeigen.

2. Spezifikation des Editha-Projektes

Innerhalb des Forschungsprojektes Editha wurde eine Systemkonfiguration eines Elektrofahrzeuges, insbesondere dessen mechanischer und mechatronischer Elemente, durchgeführt, um einen langfristig nutzbaren Versuchsträger zur Erforschung der Alltagstauglichkeit von Elektromobilität hervorzubringen. In diesem Zusammenhang standen unterschiedliche Zielstellungen im Fokus der Entwicklung. Zum einen war dies die Forderung nach konsequenter Nachhaltigkeit des Konzeptes im Sinne von ökologischer Effektivität und Effizienz. Zum anderen galt die Alltagstauglichkeit des zu entwickelnden Prototyps als entscheidender Faktor.

2.1 Nachhaltigkeit und Alltagstauglichkeit im automobilen Kontext

„Zero Emission“-Technologien, wie die reine Elektromobilität, versprechen größtmögliche ökonomische Wertschöpfung ohne jegliche negative ökologische Auswirkungen [1]. Jedoch sind ökoeffiziente Technologien und Systeme zumeist „End-of-Pipe“-Lösungen [1], die zwar Ausmaß, Geschwindigkeit und Schädlichkeit von Stoffflüssen minimieren, aber grundsätzlich nicht im Stande sind, deren linearen Verlauf zu verändern. Der Ansatz der Ökoeffizienz fokussiert ausschließlich auf Strategien und Maßnahmen zur Vermeidung von Verschwendung hinsichtlich der Reduktion deren Ausmaßes an Abprodukten, Verringerung des Verbrauchs von Ressourcen während der Herstellung und der Schädlichkeit sowie einer reparatur- und recyclinggerechten sowie langlebigen prozessualen und konstruktiven Produktgestaltung. Insofern werden dadurch inkrementelle Verringerungen der ökologischen Folgen industrieller Produkte und Prozesse unterstützt [2]. Ökoeffizienten Strategien mangelt es an langfristigen Lösungen zur grundsätzlichen Beseitigung der Quelle aktueller umweltrelevanter Probleme. So steigt trotz der Abnahme der eingesetzten Energie für bestimmte Produktionsprozesse der Gesamtverbrauch für den Fall einer gleichzeitig überproportional ansteigender Produktionsintensität. Während sich Ökoeffizienz auf das Schadensmanagement beschränkt [1], bietet sie jedoch kurzfristig auch ökonomische Vorteile durch die Reduktion des Ressourcenverbrauchs. Ökoeffizienz legt weiterhin ein System aus Produktion und Verbrauch zu Grunde, das zwangsläufig Ressourcen im Zeitverlauf bzw. während der Herstellung oder durch Verwendung in Abprodukte verwandelt.

Im Gegensatz zur Ökoeffizienz, die eingesetzte Materialien nach einer Nutzung lediglich für den Gebrauch in minderwertigen Anwendungen aufbereitet, zielt der ökoeffektive Ansatz auf den Erhalt der Ressourcenqualität im Sinne der Weiter- und Wiederverwendbarkeit in kommenden Nutzungszyklen ab. Somit beinhaltet die Ökoeffektivität den Nachhaltigkeitsgedanken selbst bei kurzen Produktlebenszyklen, wenn die eingesetzten Materialien ihre Eigenschaft als produktive, weiterverwendbare Ressourcen dabei beibehalten. Der Ansatz der Ökoeffektivität beabsichtigt die Etablierung eines zyklischen „Cradle-to-Cradle“-Metabolismus, wobei die Materialcharakteristik und Nutzungsfähigkeit fortwährend erhalten bleibt. Somit befasst sich dieses Konzept nicht mit der Menge der Emissionen an sich sondern mit der Qualität der prozessualen und produktbezogenen Ausstöße. In dieser Sichtweise sind Produkte langlebige Güter, die dem Konsumenten durch ihre fortdauernde Funktionserfüllung einen zuverlässigen Dienst erweisen. Dazu ist allerdings eine tiefgreifende Überarbeitung der Gestaltung von Produkten und Produktionssystemen unerlässlich. Effizienz und Effektivität stellen auch im ökologischen Sinne komplementäre Strategien dar. Die fortwährende Reduktion von Materialflüssen pro Produkt

(Ökoeffizienz) ermöglicht erst durch deren langfristige Verknüpfung zu Zyklen (Ökoeffektivität) die konsequente Erfüllung des Nachhaltigkeitsanspruchs.

Hinsichtlich dieser Aspekte erwachsen aus einer automobilen Sichtweise heraus unterschiedliche Anforderungen an die Konzeption eines nachhaltigen Prototyps. Der Gesamtwirkungsgrad herkömmlicher Verbrenner und Brennstoffzellenfahrzeuge liegt lediglich zwischen 13% und 30%. Batterieelektrische Fahrzeuge können theoretisch eine Effizienz von 80% erreichen [3]. Für Klein- und Kleinstwagen kann im städtischen Bereich hierbei ein realistischer Energieverbrauch von 15 kWh/100 km angenommen werden. Bei größeren Fahrzeugen ist eher ein Verbrauch von mehr als 20 kWh/100 km zu erwarten. Darüber hinaus erfüllt die Weiterverwendung eines herkömmlichen Fahrzeuges durch ein Produktrecycling im Zuge einer Umrüstung eines konventionellen Automobils auf E-Antrieb die Nachhaltigkeitsforderungen des Projektes. Somit vollzieht sich eine Überführung des Ausgangsfahrzeuges in einen zweiten Lebenszyklus. Dies erleichtert die Berücksichtigung der Forderung nach Alltagstauglichkeit des Editha-Projektes, da die Ausstattung und der Komfort eines ursprünglichen Fahrzeuges beibehalten werden kann. Die Umrüstung des Versuchsfahrzeuges Editha auf Elektroantrieb basiert auf einem Smart der ersten Generation. Das Basis-Fahrzeug bringt, bedingt durch seine bereits konzeptionellen Abweichungen von allgemeinen Fahrzeugprinzipien, einige Vorteile für eine spätere erhöhte Nutzungsdauer mit sich; erwähnt sei hier beispielsweise die leichte Kunststoffkarosserie und der Verzicht auf einige Servicefunktionen, wie z.B. die Servolenkungen aufgrund geringer Massen und dementsprechend geringer Lenkkräfte. Da der Smart als Kleinstwagen besonders im urbanen Umfeld auf Grund seiner geringen Größe zum Beispiel bei der Parkplatzsuche Vorteile aufweist, sind weiterhin lediglich die Betriebsparameter festzulegen. Diesbezüglich erlaubte die Begleitung der World Advanced Vehicle Expedition, kurz WAVE, durch Mitglieder des Projektteams im Jahr 2011, durch einen technischen Benchmark, unterstützt durch begleitende Marktanalysen, die gesamte Bandbreite aktueller Elektrofahrzeuge auch hinsichtlich ihrer Alltagstauglichkeit zu untersuchen und zu vergleichen. Als Resultat kann eine Reichweite von 130 km bei einer Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h für den städtischen Bereich und das angrenzende Umland als ausreichend betrachtet werden. Im Sinne einer Fokussierung auf ökoeffiziente Aspekte gewinnen eine lange Lebensdauer des Versuchsträgers Editha, die Nutzung regenerativer Energien (hier Strom aus Wind, Sonne oder Gezeiten) sowie ein konsequent auf Energieeffizienz ausgelegter Antriebsstrang an Bedeutung.

2.2 Konzeption des Elektroantriebsstrangs

Auf Grund der geringeren Reichweite heutiger batterieelektrischer Fahrzeuge, wird ihr hauptsächlich Einsatzgebiet im urbanen Umfeld bzw. bei der Überwindung von Kurzstrecken gesehen. Für diesen Markt bieten mittlerweile alle weit verbreiteten Automobilhersteller Fahrzeuge im Klein- und Kleinstwagensegment mit Verbrennungsmotoren an oder haben Varianten mit Elektroantrieb angekündigt. In diesem Zusammenhang bietet die Nutzung eines elektrischen Antriebes viel mehr Möglichkeiten hinsichtlich der Konzeption des Antriebsstrangs im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugkonzepten mit Verbrennungskraftmaschine. Infolgedessen erlaubt die Konfiguration eines elektrischen Antriebsstranges neben üblichen Zentralmotor-Antrieben weitreichende Möglichkeiten bis hin zum Einzelradantrieb. Jedoch besitzen aktuelle Serienfahrzeuge mit batteriegespeisten Elektromotoren zumeist eine herkömmliche Antriebsstrang-Topologie mit Zentralmotor, (Schalt-)Getriebe und Differential. Trotz der zu erwartenden relativ geringen Einzelfahrstrecken würde es eine weitere Erhöhung des Wirkungsgrades im Antriebsstrang ermöglichen, die Traktionsbatterie kleiner und damit leichter und kostengünstiger zu dimensionieren. Durch den Einsatz konstruktiv angepasster Elektromotoren können Einzelradantriebe mit radnah verbauten Motoren oder mit Radnabenmotoren auf Grund des Wegfalls mechanischer Übertragungselemente den Wirkungsgrad *Tank-to-Wheel* verbessern [4]. Dies führt auch zu einem erhöhten Raumangebot in der Fahrgastzelle, da beispielsweise die Mittelkonsole entfallen kann.

Die Energieeffizienz war bei der Entwicklung eines Antriebskonzeptes für das Elektrofahrzeug Editha eines der wichtigsten Kriterien. Eine Reichweite des Fahrzeuges von mindestens 150 km zu realisieren stand dabei im Zielkonflikt mit dem Einhalten des zulässigen Gesamtgewichts des Fahrzeuges, dem vorhandenen Bauraum für die Traktionsbatterie und der Wahl von Lithium-Eisenphosphat als aus Sicherheitsgründen favorisierte Akkumulator-Technologie. Nach intensiver Recherche erhältlicher elektrischer Maschinen, konnte ein Einzelradantrieb an der Hinterachse mit radnahen Motoren umgesetzt werden, wie in Bild 1 schematisch dargestellt ist.

Dies führte nicht nur zu einer entscheidenden Erhöhung des Wirkungsgrades, sondern gab den Bauraum des ursprünglich verwendeten Verbrennungsmotors für weitere Akkumulatoren frei. Eine mechanische Antriebseinheit, bestehend aus einem Gleichstrommotoren mit 15 kW Nennleistung und einem einstufigen Planetengetriebe zur Anpassung an die gewünschte Raddrehzahl, wiegt weniger als 20 kg und weist dabei einen Wirkungsgrad von bis zu 90% auf. Auf Grund der konstruktiven Integration der Antriebseinheiten an der hinteren Radaufhängung des Basisfahrzeuges wird ein Antrieb des Rades ohne weitere Umlenkwellen ermöglicht. Die Wahl einer bürstenkommutierten Gleichstrommaschine als Antrieb stellt hier vor Allem aus Wartungsgründen eine Kompromisslösung dar, da zum damaligen Zeitpunkt kein anderer Elektromotor in der gewünschten Leistungsklasse ohne erheblichen zusätzlichen Entwicklungsaufwand zur Verfügung stand.

Allerdings erleichtert die kompakte und leichte Bauform die Handhabung bei Montage oder Demontage der Antriebseinheit die Wartung der Antriebe, wobei die verwendeten Planetengetriebe als Standardbauteil der Automatisierungstechnik bei einer angenommenen Dauerfahrt von 50 km/h erst nach einer Million Kilometer getauscht werden müssten. Zu den beiden Antriebseinheiten zählen ebenfalls die zur Ansteuerung des jeweiligen Motors benötigten Motorcontroller, die im ehemaligen Motorraum untergebracht sind und laut Angabe des Herstellers einen Wirkungsgrad von 93% erzielen. Komplettiert wird der elektrische Antrieb durch eine Traktionsbatterie mit 15,6 kWh Nennenergie, die über ein effizientes on-board-Ladegerät (93% Wirkungsgrad) aufgeladen wird und neben der Antriebsenergie auch die übrigen herkömmlichen Fahrzeugkomponenten mittels DC/DC-Wandler versorgt. Trotz der geringeren Energiedichte der verwendeten Lithium-Eisenphosphat-Zellen gegenüber anderen Lithium-Ionen-Akkumulatoren überwiegen die Vorteile der hohen Strombelastbarkeit, dem laut Hersteller weiten Temperaturbereich beim Laden und Entladen von -45 bis 85°C und dem Brand- und Explosionsschutz. Gleichzeitig weisen die verwendeten Zellen eine hohe Zyklusfestigkeit von über 3000 Zyklen bei Erhalt von 80% der Nennkapazität auf, was bei vollem Ladungshub einer Fahrstrecke von über 400.000 km entspräche.

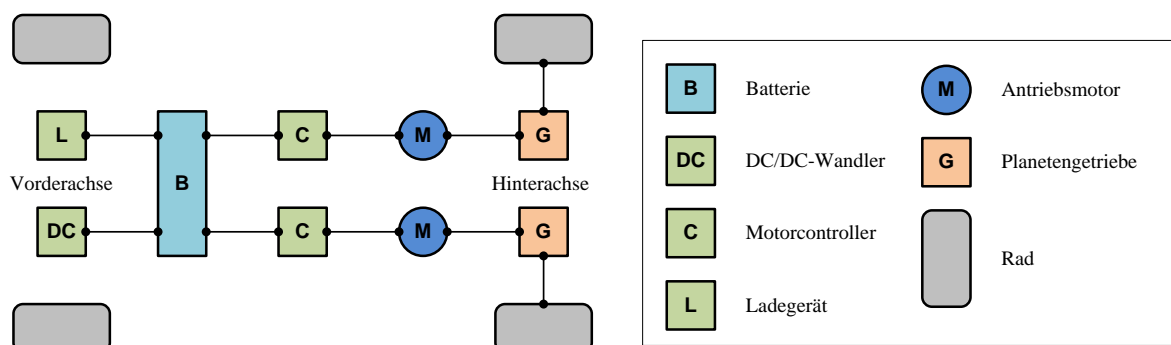


Bild 1: Antriebsstrang-Topologie des Elektrofahrzeugs Editha

Im Rahmen der Zulassung des Fahrzeuges wurden für den Fahrbetrieb auf einem Rollenprüfstand die Leistungsabgabe der Batterie und die mechanische Leistung an den Rädern gemessen. Bild 2 zeigt die sich dabei einstellende Verteilung der Leistung im Antriebsstrang bei Dauerfahrt mit konstanter Geschwindigkeit. Da die Batterie in diesem Fahrzustand innerhalb ihres zulässigen Dauerleistungsbereichs betrieben wird, kann für die Wandlung chemischer in elektrischer Energie ein Wirkungsgrad von etwa 95% angenommen werden kann. Für die gesamte Energieübertragungskette ergibt sich damit ein *Tank-to-Wheel*-Wirkungsgrad des Antriebsstrangs von bis zu 79%, der somit den theoretischen Höchstwert erreicht.

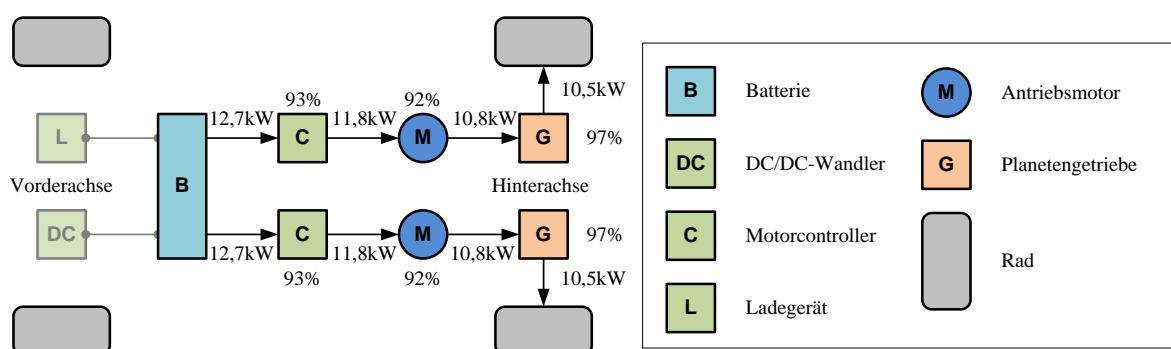


Bild 2: Wirkungsgrad der Antriebsstrangkomponenten und Leistungsverteilung im Fahrbetrieb

Aus Sicht des Fahrzeughalters müssen ebenfalls die Verluste beim Laden des Fahrzeuges einbezogen werden. Das im Fahrzeug verbaute einphasige Ladegerät lädt die Batterie mit einem relativ geringen Strom, sodass ein gesamter Ladewirkungsgrad von 91% angenommen werden kann. Vom Ladestecker zum Rad resultiert ein *Plug-to-Well*-Wirkungsgrad von bis zu 72%, was einem Energieverbrauch von durchschnittlich 12,7 kWh/100 km entspricht und mit einem durchschnittlichen Strompreis von 28,73 ct/kWh einen Fahrpreis 4,15 €/100 km ergibt [5]. Edithas Energieverbrauch liegt im Optimum nach ersten Messungen sogar bei lediglich 11,5 kWh/100 km. Diese Tatsache untermauert die herausragende Effizienz des konzipierten Antriebssystems.

3. Bewertung der Gesamtfahrzeugauslegung mittels LCC-Analyse

Der Life-Cycle-Costing-Ansatz als erweiterte Betrachtung zur Bewertung des wirtschaftlichen Einsatzes von Investitionsgütern erlebt insbesondere in den letzten Jahren eine erhöhte Bedeutung zur alternativen Auswahl von Investitionsentscheidungen. In der Industrie mittlerweile ein durchaus gängiges Bewertungsverfahren unterliegt jedoch die Kauf bzw. die Investitionsentscheidung für ein Automobil vielfach nicht nur wirtschaftlich rationalen Überlegungen sondern häufig auch emotionalen Zugängen zur Umsetzung der Investitionsentscheidung. Hierbei können grundsätzlich zwei sich im Charakter wesentlich unterschiedliche Käuferkreise betrachtet werden, die sich in die private und gewerbliche Nutzung von Automobilen unterscheiden lassen. Füllen private Endkonsumenten die Investitionsentscheidung häufig eher nach käufergruppenspezifischen, emotionalen und leistungsorientierten Aspekten, ergibt sich bei der Betrachtung bzw. Charakterisierung gewerblicher Nutzer eine eher wirtschaftliche Bewertung der Gesamtnutzungsdauer des Investitionsobjektes mit alternativen Bewertungskriterien, wie Zuverlässigkeit und Einsatzflexibilität. Bestehende, klassische Automobilbauer tragen dieser differentiellen Betrachtung häufig insofern Rechnung, dass bestehende Fahrzeugkonzepte dahingehend grundsätzlich unterschiedlich ausgelegt werden.

Im Allgemeinen ist bekannt, dass herkömmliche Automobile in der Regel für eine Laufleistung von ca. 150.000 km ausgelegt werden. Systemlieferanten der großen OEMs dimensionieren deshalb ihrer Bauteilauslegung, um Gewährleistungsansprüchen auszuweichen in der Regel mit einem Sicherheitsfaktor 2, also einer durchschnittlichen Bauteilsicherheit von ca. 300.000 km. Die Folge einer solchen Dimensionierung sind insbesondere bei hohen Nutzungsgraden und damit verbunden hohen Laufleistungen teilweise dramatisch steigende Unterhaltskosten zur Sicherstellung einer hohen Verfügbarkeit des Automobils. Bei der Konzeption des straßentauglichen Prototypen Editha wurden gezielt industriellen Komponenten des Maschinenbaues bzw. Automatisierungskomponenten verwendet, welche zumeist nicht ursprünglich für automotiv Zwecke ausgelegt wurden und dementsprechend anderen - in der Regel höheren - Dimensionierungsanforderungen unterliegen.

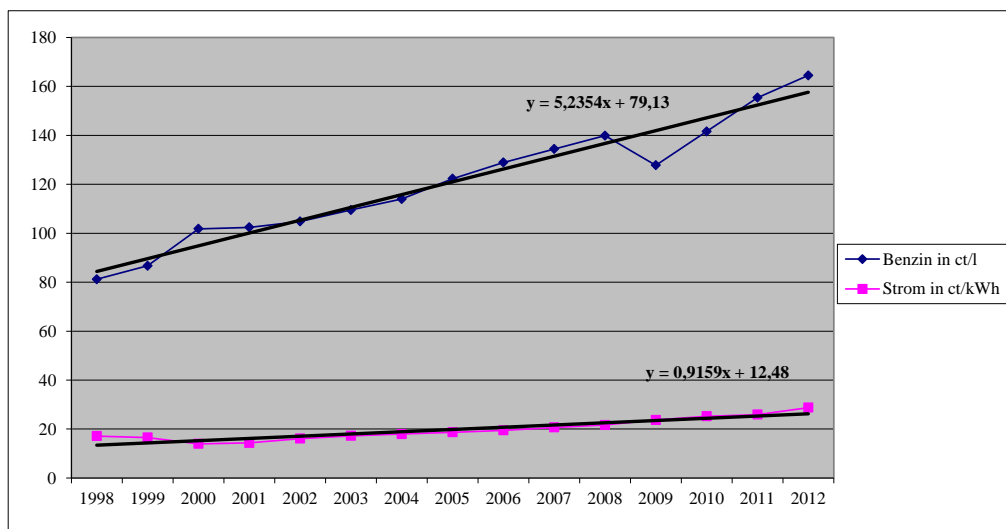


Bild 3: Preisentwicklung für Fahrtriebsenergie [5], [6]

Um eine mögliche Nutzungsdauer des vorliegenden Prototypens als Eingangsgröße zur Abschätzung der Nutzungsdauer für die LCC-Analyse zu ermitteln, dient eine Gegenüberstellung der modifizierten Bauteile zwischen Spenderfahrzeug und Prototypen [7]. Betriebskostenbetrachtungen und der Wechsel der Energiequelle sowie die Erschließung effizienter Antriebstechnik ist nicht zuletzt vor dem Hintergrund der deutlich gestiegenen Preise für Beschaffung im Verhältnis zur Gesamteinkommensentwicklung wichtig [8]. Zur Ermittlung der Betriebskosten als Folge der Entwicklung der Ressourcenpreise wurden lineare Regressionsfunktionen verwendet, da beide Preisentwicklungen einer Reihe von Einflussfaktoren unterliegen, die deren Entwicklung stark beeinflussen und häufig politisch geprägt sind. Die Entwicklung der Kosten ist vergleichend in Bild 3 dargestellt. Für die über die geplante Nutzungsdauer eintretenden Kosten für die Ersatzteilbeschaffung, sowohl für den Elektrobetrieb als auch für den herkömmlichen verbrennungstechnischen Betrieb, werden die vorliegenden Realdaten mit jährlich 1,5% Preissteigerung sowohl auf Arbeits- wie Materialleistung abgezinst. Als Quelle hierfür dienen sowohl Realdaten aus Fahrzeugnutzungen, welche für das Spenderfahrzeug bis zum Umbauzeitpunkt verfügbar waren, als auch eine vergleichende Reparaturkostenaufstellung für ein benzinbetriebenes Fahrzeug mit einer Laufleistung bis 350.000 km und zwei dieselbetriebe Vergleichsfahrzeugen ebenfalls mit einer Laufleistung bis ca. 300.000 km [9].

Für die LCC Analyse werden die direkten, fixen Betriebskosten wie Steuer und Versicherung mit 1,5 % pro Jahr abgezinst. Die anfallende Anfangsinvestition wird linear auf die die ersten 5 Nutzungsjahre abgeschrieben. Dies entspricht den Zahlungsverhalten bei Automobilkauf, sowohl für den privaten als auch gewerblichen Sektor. Basis für die nachfolgenden Betrachtungen sind unter anderem die Einsatz- und Nutzungsbedingungen des Fahrzeugs. Da das vorliegende elektrifizierte Fahrzeug für den urbanen bzw. stadtnahen Einsatz konzipiert wurde, ist ein eben solches durchschnittliches Nutzerverhalten die Grundlage für die Ermittlung der Jahresfahrleistung als Folge der Anfahrt zur Arbeit und darüber hinaus zur sonstigen Nutzung [10]. Tabelle 1 verdeutlicht die sich daraus ergebenden Gesamtkilometerzahl. Für die Ermittlung der Nutzungsdauer des Fahrzeuges wurde die verbaute Batterie als limitierender Faktor herangezogen, da Erfahrungswerte für andere Komponenten kaum vorliegen bzw. die Hersteller dazu keine Angaben machen konnten oder darauf verwiesen, dass es sich um Komponenten mit unlimitierter Nutzungsdauer handelt. Insbesondere beim Einsatz von industriell genutzten Planetengetrieben und Elektromotoren konnten die Angaben zu den Nutzungsdauern durch die Autoren einzelbetreffend nachvollzogen werden. Für die verbauten Batterien werden hinsichtlich des Langzeitverhaltens die Produktdaten bzw. aktuell laufende Erprobungsversuche hinsichtlich Kapazitätsverlust durch Auf- und Entladen sowie feststellbare Restkapazitäten nach definierten Ladungsvorgängen verwendet [11].

Tabelle 1: Konstruktions- und einsatzbedingte Nutzungsdauern

Einsatzbedingungen Prototyp Editha - urbanes Stadtumfeld		
angenommene Jahresfahrleistung	Anzahl	einfache Entfernung in km
Fahrten zur Arbeit	220	15
sonstige Fahrleistung je Woche	53	120
Gesamtfahrleistung im Jahr	12960	
Fahrzeugkonzeption		
	Nutzungsgrenze in km	Lebensdauer des Fahrzeugs
Spenderfahrzeug - Verbrennungsantrieb	150.000	12
Editha - Elektroantrieb aus Batterie bei 3.000 Ladezyklen	375.000	29
Editha - Elektroantrieb aus Batterie bei 13.000 Ladezyklen	1.560.000	120

Die LCC-Analyse betrachtet neben den Anschaffungskosten und den Kosten zum Betreiben des Investitionsgutes auch die Folgekosten für die Außerbetriebnahme und somit die stoffliche und/oder energetische Verwertung des betrachteten Objektes. Bedingt durch die über 120-jährige Geschichte des herkömmlichen Automobilbaues und begründet durch Verordnungen, wie die Alttoverordnung, liegen für die Außerbetriebnahme von herkömmlichen Fahrzeugen sowohl Erfahrungswerte als auch Kostenfunktionen vor. Begründet durch ein sich wandelndes Kundenverhalten (z.B. längere Nutzungsdauern für in Betrieb befindliche Fahrzeuge) und geringen Erfahrungswerten zur Außerbetriebnahme von elektrischen Fahrzeugen, können hier kaum vergleichende Betrachtungen angestellt werden. Auf Grund einiger aktueller Trends ist es zudem sowohl schwer den Zustand als auch den realen Zeitpunkt der Außerbetriebnahme zu bestimmen. Bei der Nutzung von elektrischen Antrieben ist viel mehr davon auszugehen, dass der klassische Produktlebenszyklus zumindest technischer Bauteile erheblich ausgedehnt werden kann. Zudem ist bereits derzeit absehbar, dass es für die kritischen Komponenten des Elektromobiles eine Reihe von Instandsetzungsmöglichkeiten als auch Weiterverwendungen gibt. So ist beispielsweise eine im Fahrzeug nicht mehr verwendungsfähige Batterie mit 90% Restkapazität durchaus in anderen Anwendungsfällen noch einsatztauglich (z.B. maritime Anwendung und oder stationäre Energiespeicherung), so dass derzeit von einem wesentlich höherem Nutzungsgrad verbauter technischer Komponenten ausgegangen wird. Die kumulative Zusammenfassung der entstehenden Kosten über den Nutzungszeitraum zeigt Bild 4. Der monetäre Vorteil von elektrisch betriebenen Fahrzeugen stellt sich, wie hier am Beispiel verdeutlicht, nach 7 Jahren ein. Ein wesentlicher Grund sind die nach wie vor überproportional hohen Anschaffungskosten. Jedoch ergeben sich insbesondere für eine langfristige Nutzung oder hohe Nutzungsintensität (z.B. Gewerbe im urbanen Umfeld), soweit technische Parameter wie z.B. die Mindestteichweite erfüllt sind, auch heute schon wirtschaftliche Nutzungsmöglichkeiten.

Für den privaten Nutzer ist derzeit auf Basis der vorgestellten Untersuchungen ein umfassendes Gesamtkostenverständnis notwendig bei gleichzeitiger Toleranz bezüglich einiger technischer Parameter. Eine Entwicklung der Elektromobilität ist deshalb in den Bereichen vorstellbar, wo gezielt die Stärken elektrischer Antriebe in den Vordergrund treten und/oder wirtschaftlich langlebige Einsatzfälle sinnvoll sind. Hinderlich für die massenhafte Verbreitung solcher Antriebskonzepte sind darüber hinaus vor allem auch Orientierungsmuster als Gewohnheitsfolge der bisherigen Automobilnutzung. Nutzungsdauern oberhalb von 10 Jahren sind kaum vorstellbar, so dass die Ertragswerte aus der Nutzungszeit zum Anschaffungszeitpunkt kaum wirksam werden. Für die weitere Entwicklung ist eine Kombination preiswerter Bestandstechnik zur Überbrückung langer Fahrtstrecken außerhalb der urbanen Ballungsräume vorstellbar, um Nachteile bisheriger Systemlösungen zu kompensieren.

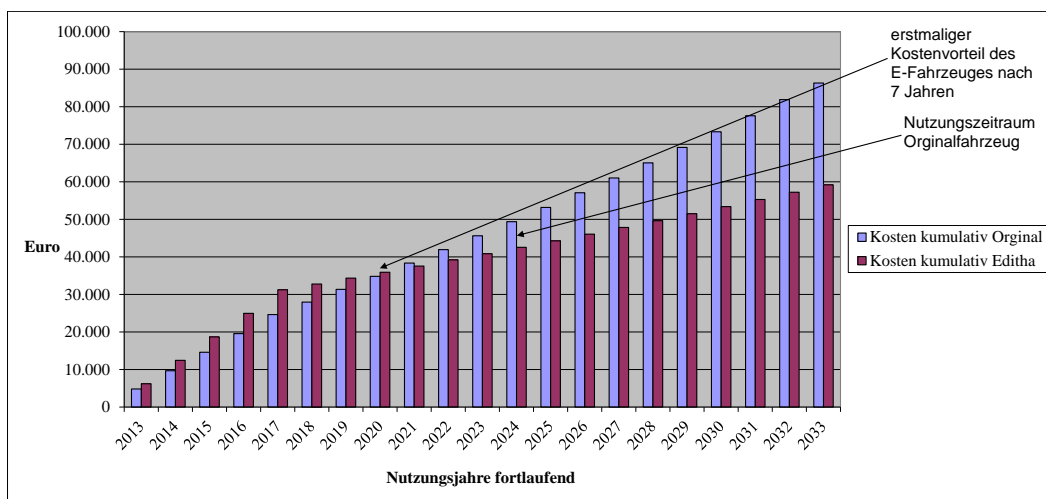


Bild 4: Gesamtkostenbetrachtung über einen Lebenszyklus von 20 Jahren

4. Implikationen für die Gesellschaft und die Automobilindustrie

Der Ansatz der Ökoeffektivität im Bereich der Produktionssysteme und –prozesse sollte konsequenterweise in ökoeffektiven Produkten und Gütern münden. Zudem erfordert die Einführung von Nachhaltigkeitsanforderungen die Berücksichtigung sowohl ökologisch effizienter als auch effektiver Strategien. Auf Grund des langfristigen Charakters der Ökoeffektivität sind ökoeffiziente Aspekte gleichermaßen zu beachten. Kurzfristig mögen inkrementelle Verbesserungen der etablierten Antriebssysteme im Bereich des konventionellen Automobilbaus einen effizienten Antriebsstrang und einen reduzierten Ressourcenverbrauch, insbesondere im Betrieb (hier: Benzin bzw. Diesel), ermöglichen. In Bezug sowohl auf die Antriebstopologie als auch die –technologie ist der Wechsel hin zu elektrischen Antriebskonzepten entscheidend für einen weiteren Fortschritt in diesem Bereich. Demzufolge ist Energieeffizienz eng mit Ökoeffizienz verknüpft. In diesem Zusammenhang ist ein weiterer maßgeblicher Vorteil elektrisch getriebener Fahrzeuge die konsequente Vermeidung von direkten CO₂-Emissionen während der Fahrt.

Darüber hinaus können alternative Strategien zur Reduktion des ökologischen Fingerabdrucks von industriellen Produkten und Prozessen aus dem Cradle-to-Cradle-Konzept entstehen. So sind verschiedene Teams von Forschern, Ingenieuren und Technikern damit beschäftigt, eine neue Generation von elektrifizierten Fahrzeugen für den urbanen Bereich zu entwickeln. Erste Versuchsfahrzeuge und Prototypen zeigen, dass vor allem eine Umrüstung bestehender Fahrzeuge zu elektrisch angetriebenen Automobilen erfolgt. In Anbetracht der Wiederverwendung und Weiternutzung gebrauchter Fahrzeuge ist ein erster Schritt in Richtung ökoeffektiver Stoffflüsse getan. Allerdings bleibt ein grundsätzliches Überdenken der Fahrzeugkonzepte zumeist noch aus. Hinsichtlich der Energiewende, also des Wechsels der flächendeckenden Energieerzeugung weg von fossilen Brennstoffen (Erdöl, Kohle usw.) hin zu erneuerbaren Energiequellen (Wind, Sonne, Gezeiten) wird ein weiterer ökoeffektiver Aspekt allmählich umgesetzt.

Vor dem Hintergrund der Erhaltung der gesamten Funktionalität des Ursprungsfahrzeuges hinsichtlich der Ausstattungsmerkmale erfüllt Editha das Kriterium der Alltagstauglichkeit im urbanen Umfeld diesbezüglich uneingeschränkt. Dennoch bedarf es für den Verkauf eines derartigen Elektrofahrzeuges an potentielle Kunden auf Grund der Gleichwertigkeit bezüglich der Ausstattung und des Komforts des konventionellen Fahrzeuges zusätzlicher Argumente. Einerseits steigt das öffentliche Umweltbewusstsein kontinuierlich. Andererseits stellen wirtschaftliche Aspekte in Form monetärer Anreize in Anbetracht geringer direkter Betriebskosten auf Grund der effizienten Energieausnutzung und des vergleichsweise niedrigen Preises elektrischer Energie einen entscheidenden Faktor als Verkaufskatalysator dar, da die Strompreise trotz ihrer Steigerung lediglich ein Bruchteil der Kosten für Benzin oder Diesel hinsichtlich des Fahrtkostenanteils sind. Insgesamt weisen batterieelektrische Fahrzeuge sowohl geringere Fahrtkosten auf Grund des günstigeren und effizienteren Einsatzes des „Treibstoffs“ als auch einen vernachlässigbaren ökologischen Fußabdruck im Vergleich zu Benzin- oder Dieselfahrzeugen auf. Auf Grund des höheren Wirkungsgrades des Antriebsstranges weisen batteriegespeiste Elektrofahrzeuge in Abhängigkeit der Bereitstellung des elektrischen Stroms zum Laden der Traktionsbatterie ein geringeres CO₂-Äquivalent, also eine niedrigere Umweltbelastung, als konventionelle Automobile auf [3]. Für einen Smart kann nach einer entsprechenden Umrüstung auf E-Antrieb eine Reduktion der äquivalenten CO₂-Emissionen um über 80% nachgewiesen werden [12].

Die veränderte Produktstruktur von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionellen Verbrennern lässt vermuten, dass ein Durchbruch der Elektromobilität gravierende Änderungen innerhalb der Automobilbranche zur Folge hat. Durch den Entfall von Anlasser, Schmiersystem und Abgasanlage sowie des Motorkühlsystems und des Differentials vereinfacht sich der technische Aufbau zukünftiger Automobile grundlegend. Hauptbestandteile der elektrischen Antriebstechnologie sind Elektromotor(en), Traktionsbatterie und Motorcontroller [13], die aus weniger Einzelteilen als konventionelle Antriebsstränge bestehen. Darüber hinaus sind die elektrischen Komponenten wesentlich verschleißärmer und somit nahezu wartungsfrei. Vor dem Hintergrund des effizienten und vergleichsweise günstigen Einsatzes elektrischer Energie und dem geringen Anteil an Verschleißteilen sind Elektrofahrzeuge durch geringere Betriebskosten gekennzeichnet. Unter Berücksichtigung der Weiterverwendung eines bestehenden Fahrzeuges sind die Kosten für einen auf E-Antrieb umgerüstetes Vehikel vergleichbar den Anschaffungskosten eines Original-Smarts. Des Weiteren kann der Produktlebenszyklus herkömmlicher Fahrzeuge auf Grund der Langlebigkeit der technischen Bauteile des Elektrofahrzeugs weit überschritten werden. In Anbetracht von ca. 3000 Ladezyklen, die der in Editha verbauten Traktionsbatterie garantiert werden, behält diese bei wöchentlich 3 Ladungen für 20 Jahre annähernd ihre volle Funktionalität (ca. 80%). Insgesamt bieten Elektrofahrzeuge, insbesondere Editha, einen entscheidenden wirtschaftlichen Vorteil aus Kundensicht. Jedoch ist gleichzeitig absehbar, dass die Umsätze der Automobilhersteller infolge der ausgedehnten Produktlebenszyklen derart konzipierter Produkte ausbleiben werden. Dabei resultiert der merklich längere Nutzungszyklus derartiger Elektrofahrzeuge einerseits aus den entfallenden Verschleißteilen und der simultanen Ausnutzung langlebiger Fahrzeugbestandteile, wie z. B. der Karosserie. Hier bedarf es für die bisherigen Automobilhersteller die Generierung neuer Einnahmequellen. Aktuell wird diesbezüglich zumeist auf ein Leasing der Traktionsbatterien zurückgegriffen.

Auf Grund der Produktvielfalt ergeben sich vor dem Hintergrund des vielversprechenden aber schwer vorherzusagenden Elektromobilitätsmarktes Herausforderungen für Automobilhersteller und Systemlieferanten gleichermaßen. Dies verlangt u. a. nach rekonfigurierbaren Montagelösungen im Rahmen des Produktionsprozesses. Es ist abzusehen, dass sich die Fahrzeugstruktur durch eine zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstranges grundlegend ändern wird [14]. Erweiterungen in der Vielfalt der Produktgestaltung erfordern eine umfangreiche Anpassungsfähigkeit vor allem innerhalb der Fahrzeugmontage [15]. Infolgedessen gewinnen modulare Konstruktionskonzepte und Plattformstrategien zunehmend an Bedeutung. Allerdings sind bei hybrider Montage in der Serienfertigung verschiedener Antriebstechnologien auf einer Linie infolge der unterschiedlichen Produktstruktur mögliche Schwankungen in der Durchlaufzeit zu berücksichtigen. Auf Grund bestehender Crash-Anforderungen sind für einen ausreichenden Schutz der Hochvolt-Komponenten bei anderen Konzepten als Editha mitunter Modifikationen eines Großteils der Strukturteile der Karosserie nötig. Darüber hinaus stellt die Verkabelung der Hochvoltkomponenten eine neuartige Herausforderung im Rahmen des Montageprozesses von Automobilen dar. Insbesondere Konfektionierungen im Bereich der Batteriemontage versprechen hierbei noch enormes Optimierungspotenzial. Bereits im Zuge des Editha-Projektes konnten erste Erfahrungen hinsichtlich der Vorbereitung von Stromlaufschienen zur Vereinfachung der Verkabelung der Batterie gemacht werden. Des Weiteren bedarf es zukünftig einer Standardisierung der Schnittstellen zur peripheren Leistungselektronik (z. B. Motorcontroller).

Ein wirtschaftlicher Vorteil im Rahmen der Umrüstung entsteht durch die Nutzung von Lagerware. So sind alle in Editha verbauten Komponenten kurzfristig verfügbar, was die Flexibilität bei der Fertigung enorm erhöht. Zudem sind die elektronischen Bauteile effizient und ausgereift. Der Wechsel vom Verbrennungsmotor hin zum elektrischen Antriebsstrang verursacht Veränderungen hinsichtlich der Struktur und Zusammenarbeit innerhalb der momentanen Automobilindustrie, was sich verschiedenartig auf die Zulieferkette und die Hersteller auswirkt. Automobilhersteller könnten bisherige Kernkompetenzen verlieren, wie Konstruktion und Fertigung von Verbrennungskraftmaschinen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass die Lieferanten ihre Marktmacht weiter ausbauen. In diesem Zusammenhang ergibt sich ein großes Potenzial für entsprechende Zulieferer infolge des wachsenden Anteils an elektrischen und elektronischen Komponenten. Infolgedessen steht bei einem Durchbruch der Elektromobilität die gesamte automobilen Supply Chain vor einem Umbruch. Vor diesem Hintergrund sind Konsequenzen für Produktionssysteme und Geschäftsbeziehungen bzw. Kooperationen momentan schwierig vorherzusagen. Zusätzlich ist die Standardisierung von besonderer Bedeutung im Rahmen des neuen Mobilitätsparadigmas, insbesondere hinsichtlich der Etablierung einer sinnvollen Ladeinfrastruktur. Allerdings entfällt die Frage nach einer standardisierten Lademöglichkeit für den Fall, dass diesbezüglich eine Orientierung an gewöhnlichen Schukosteckern erfolgt.

5. Schlussfolgerungen

Ausgehend von den Forderungen nach einer alltagstauglichen, nachhaltigen und energieeffizienten Konfiguration eines Fahrzeuges für das urbane Umfeld wurde mit Editha ein Prototyp gebaut, der spezifische Alleinstellungsmerkmale aufweist. Im Rahmen der Bauteilauswahl und -herstellung wurde eine konsequente Gewichtsminimierung des Gesamtfahrzeuges realisiert. Zudem erfolgt die gezielte Konzeption eines

energieeffizienten Antriebsstrangs, der als eigenständiges Antriebssystem mit zwei radnah verbauten Elektromotoren agiert.

Insgesamt entstehen aus dem vorgestellten Fahrzeugkonzept zusätzlich nutzergruppenspezifische ökonomische Vorteile. Zunächst bewirken die Umstellung auf Elektroantrieb und der damit einhergehende Wechsel des „Treibstoffs“ in Kombination mit der nachgewiesenen Energieeffizienz des Antriebsstrangs geringere direkt wirksame Betriebskosten im Vergleich zu herkömmlichen Verbrennern. Der verlängerte Lebenszyklus ermöglicht eine Verteilung der Fixkosten (z. B. Anschaffungskosten) und sorgt je nach Nutzergruppe infolge der niedrigeren variablen Kosten für eine Rentabilität des Konzeptes nach sieben Jahren. Die erhöhte Lebensdauer beruht dabei zum einen auf der Ausnutzung vorhandener langlebiger Bauteile (z. B. Karosserie) sowie der Nutzung von für die automobilen Anwendung großzügig ausgelegten mechatronischen Komponenten. Vor dem Hintergrund der tiefgreifenden Veränderung in der Produktstruktur sowie Herstellung (vordergründig die Montage) derartiger Fahrzeuge steht die Automobilindustrie vor der Herausforderung, sowohl einen möglichen strukturellen Wandel in der Konfiguration der Unternehmenskooperationen über die gesamte Lieferkette zu vollziehen als auch die Produktionssysteme und –prozesse entsprechend anzupassen.

Literaturverzeichnis

- [1] Braungart, M., McDonough, W. und Bollinger, A.: Cradle-to-cradle design - creating healthy emissions - a strategy for eco-effective product and system design. In: Journal of Cleaner Production. 2006, Vol. 15, S. 1337-1348.
- [2] Baumgartner, R. J., Zielowski, C.: Analyzing zero emission strategies regarding impact on organizational culture and contribution to sustainable development. In: Journal of Cleaner Production. 2007, Vol. 15, S. 1321-1327.
- [3] Helmers, E.: Potenzial der Elektromobilität. In: 1. Elektromobilitätstagung. Umweltcampus Birkenfeld, Institut für angewandtes Stoffstrommanagement, FH Trier, 2011.
- [4] Kasper, R.; Schünemann, M.: 5. Elektrische Fahrtriebe - Topologien und Wirkungsgrad. In: Motortechnische Zeitschrift 10/2012, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012, S. 802-807.
- [5] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW): Strompreisanalyse Mai 2013, [http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/\\$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf), abgerufen am 26.07.2013, 10:30 Uhr. BDEW-Strompreisanalyse Mai 2013. BDEW, 27. Mai 2013.
- [6] [http://de.statista.com/themen/66/benzinpreis/Statistisches Bundesamt, Energie-Informationsdienst, MWV, Erhebungszeitraum 1972 bis 2013.](http://de.statista.com/themen/66/benzinpreis/Statistisches_Bundesamt_Energie-Informationsdienst_MWV_Erhebungszeitraum_1972_bis_2013)
- [7] Dokumentationsunterlagen zum Umbau des Fahrzeuges Editha.
- [8] Kühnle, H., Wagenhaus G.: Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion durch innovative Fabrikplanung. In: Jahrbuch Energie aus Mitteldeutschland 2012.
- [9] Bereitgestelltes Datenmaterial Smart Center Leipzig.
- [10] Winkelmann, U.: Manche pendeln weit - Berufspendler im Bundesländervergleich. In: Wirtschaft, Arbeitsmarkt, statistisches Monatsheft, Baden Württemberg, 4/2010.
- [11] <http://www.ev-power.eu>, EV-Power.eu managed by i4wifi a.s. (member of GWL/Power group), Prumyslova 11, CZ-10219 Prague 10, GWL/Power Group Technology Solutions.
- [12] Helmers, E., Marx, P.: Electric cars: technical characteristics and environmental impacts. In: Environmental Sciences Europe. 2012, Vol. 24, No. 14.
- [13] Larminie, J., Lowry, J.: Electric vehicle technology explained. Chichester: John Wiley & Sons. 2003.
- [14] Knödel, U., Stein, F.-J. und Schlenkermann, H.: Variantenvielfalt der Antriebskonzepte für Elektrofahrzeuge. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift. 2011, Vol. 113, No. 07/08, S. 552-557.
- [15] Müller, R., Esser, M. und Eilers, J.: Rekonfigurationsorientierte Modularisierung von Montagesystemen. In wt – Werkstattstechnik. 2011, Vol. 101, No. 9, S. 600-605.