ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of

ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Aigle, Thomas; Krstacic-Galic, Ante; Marz, Lutz; Scharnhorst, Andrea

Working Paper

Busse als Wegbereiter: Zu einem frühen Markt für alternative Antriebe

WZB Discussion Paper, No. SP III 2008-102

Provided in Cooperation with:
WZB Berlin Social Science Center

Suggested Citation: Aigle, Thomas; Krstacic-Galic, Ante; Marz, Lutz; Scharnhorst, Andrea (2008) : Busse als Wegbereiter: Zu einem frühen Markt für alternative Antriebe, WZB Discussion Paper, No. SP III 2008-102, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB), Berlin

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/56479

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

WZB – discussion paper

Thomas Aigle*, Ante Krstacic-Galic*,
Lutz Marz*, Andrea Scharnhorst**

Busse als Wegbereiter

Zu einem frühen Markt für alternative Antriebe

SP III 2008-102

*) Wissenschaftszentrum für Sozialforschung Berlin gGmbH
**) Virtual Knowledge Studio, Amsterdam

thomas.aigle@wbzu.de
lutz@wzb.eu
ante.krstacic-galic@uni-bielefeld.de
andrea.scharnhorst@vks.knaw.nl

ZITIERWEISE/CITATION:

Thomas Aigle, Ante Krstacic-Galic, Lutz Marz, Andrea Scharnhorst

Busse als Wegbereiter
Zu einem frühen Markt für alternative Antriebe

Discussion Paper SP III 2008-102
Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (2008)

Forschungsschwerpunkt:
Gesellschaft und wirtschaftliche Dynamik

Research Area:
Society and Economic Dynamics

Abteilung:
Kulturelle Quellen von Neuheit

Research Unit:
Cultural Sources of Newness

Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung gGmbH (WZB)
Reichpietschufer 50, D-10785 Berlin
Telefon: +49 30 25491-201, Fax: +49 30 25491-209
www.wzb.eu/gwd/kneu

Zusammenfassung

Gegenwärtig beginnt sich ein Paradigmenwechsel in der Automobilität zu vollziehen, weg vom Benzin- und Diesel-Verbrennungsmotor hin zu alternativen Antriebs- und Kraftstofftechnologien. Dieser Prozess verläuft widersprüchlich. Einerseits ist die F&E-Arbeit der Automobilindustrie nach wie vor auf die Optimierung des konventionellen Verbrennungsmotors fokussiert. Diese Optimierung bremst den Paradigmenwechsel. Andererseits hat sich im letzten Jahrzehnt ein breitgefächertes Feld antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen entwickelt, die nicht nur eine Optimierung, sondern eine Substitution des Verbrennungsmotors ermöglichen. Diese alternativen Substitutions-Innovationen haben es jedoch schwer, sich gegen die konventionellen Optimierungs-Innovationen durchzusetzen. Im vorliegenden Paper wird untersucht, worin diese Schwierigkeiten bestehen und wie sie bewältigt werden können. Dies geschieht in drei Schritten. Im ersten Schritt werden zunächst auf der Grundlage eines mathematischen Hyperselektionsmodells die Rolle und die Spezifik von Innovations-Nischen und frühen Märkten herausgearbeitet. Aufbauend darauf werden dann in einem zweiten Schritt Busse als mögliche Wegbreiter für die Durchsetzung von Substitutions-Innovationen in Nischen und frühen Märkten identifiziert. Im dritten Schritt erfolgt dann eine detaillierte empirische Analyse der weltweiten Felderprobungen von konventionellen und alternativen Bus-Technologien.

Abstract

A paradigm shift is currently taking place in the automobile industry, challenging it to move away from the fossil fuel motor towards alternative drive and fuel technologies. There is, however, a certain amount of controversy attached to this process. On the one hand, R&D continues to focus on the optimization of the conventional fossil fuel motor, thereby prolongating this paradigm shift. On the other hand, during the past decade, a broad range of alternative drive and fuel technologies have been developed which would not only optimize, but could even provide a substitute for the fossil fuel motor. However, it is not easy for these alternative innovations to win recognition against conventional innovations. In three steps, this paper helps to identify the difficulties the automobile industry is faced with, and to show how they can be overcome. In a first step, the role and special features of innovation niches and primary markets are defined, based on a mathematical hyperselection model. In step two, we describe how buses could be implemented as possible precursors as substitute innovations in niches and primary markets. Finally, in step three, we present an in depth empirical analysis of global field studies of conventional and alternative bus technologies.

Inhalt

1. Ausgangspunkt: Problemfeld, Analyse, Lösungswege 7
1.1 Problemfeld: Automobilität zwischen Konventionssog und Innovationsdruck 7
1.2 Innovations-Raum: Hyperselektion und Attraktor-Landschaft 11
1.3 Analyse-Methode: Innovations-Systematik und Innovations-Matrix 14
1.4 Lösungswege: Nischen und frühe Märkte 19
2. Bus-Markt: Technischer Kern, Marktspezifika und Nischencharakter 36
2.1 Technischer Kern 36
2.2 Marktspezifika 41
2.3 Nischencharakter des Busmarktes 44
3. Bus-Matrix: Ableitung, Cluster, Beispielmodelle 54
3.1 Ableitung der Matrix 54
3.2 Clusterdarstellung der Matrix 56
3.3 Beispielmodell-Matrix 58
4. Bus-Felderprobungen: 5 Innovations-Cluster 60
4.1. Cluster 1: Konventionelle Busse 61
4.2. Cluster 2: Wasserstoff-Busse 77
4.3 Cluster 3: Hybridbusse 83
4.4 Cluster 4: Batteriebusse 97
4.5 Brennstoffzellenbusse 108
5. Fazit: Bilanz und Agenda 126
6. Literatur 137

1. Ausgangspunkt: Problemfeld, Analyse, Lösungswege

1.1 Problemfeld: Automobilität zwischen Konventionssog und Innovationsdruck

Das Automobil ist mit Abstand der Verkehrsträger Nummer 1: Ungefähr 90% aller Personenkilometer, die mit einem Verkehrsmittel zurückgelegt werden, entfallen auf das Auto (PGM 2004: 9). Doch damit nicht genug. Das Auto ist weit mehr als ein bloßes Fortbewegungsmittel. Es ist paradigmatisches Produkt und integraler Bestandteil der fossilen Mobilitätsgesellschaft (Altvater 2006: 175) und gilt als Symbol für Status, Wohlstand, (Bewegungs-)Freiheit, Dynamik und Fortschritt der Moderne (Buhr et al. 1999: 11).

Und genau in dieser Doppeleigenschaft als Paradigma und Symbol wird das Auto auch in den aufstrebenden Wachstumsgesellschaften wahrgenommen, wie etwa in China, wo es sowohl als individuelles Statussymbol als auch als Beweis für die Modernität der Gesellschaft gefeiert wird (SHISD 2005; Knie 2006: 71-97).

Alle Versuche, die Dominanz des Automobils zu brechen, sind bislang mehr oder weniger gescheitert. Dies betrifft nicht nur die akademisch-aufklärerischen Kritiken an der Autogesellschaft und ihren Folgen, sondern auch alltagspraktische Alternativangebote wie »Car Sharing«, »Cash Car« oder »BVGmetrocard«, die sich bisher nicht durchsetzen, sondern bestenfalls in Nischenmärkten etablieren konnten (Canzler/Knie 1998: 9; Knie 2003; PGM 2004).

Konventionssog

Neben seiner tiefen Verankerung im Lebensstil und Mobilitätsroutinen der modernen Gesellschaft (Canzler 1996) liegt einer der Gründe für diese Ultrastabilität des Automobils in dessen hartem technischen Kern. Wir schreiben nunmehr bereits das »Das zweite Jahrhundert des Automobils« (Canzler/Schmidt 2003), aber sein technischer Kern ist bislang unverändert geblieben. Er besteht in einem Verbrennungsmotor (Canzler 1996: 212-220), der zunächst fossile Brennstoffe, vor allem Öl, aus der Natur importiert und dann Schadstoffe und Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Distickstoffoxid (N_20) in die Natur exportiert.

Der erste 4-Takt-Verbrennungsmotor wurde 1876 vom Kaufmann Nikolaus Otto entwickelt (Rödl 2006). Gottlieb Daimler und Carl Benz bauten später 1886 das erste Kraftfahrzeug mit einem benzinbetriebenen Ottomotor (ebd.). Mit der Erfindung der Einspritzpumpe gelang es dann in den 30er Jahren des vergangenen Jahrhunderts auch den selbstzündenden Dieselmotor in Pkw einzusetzen. Seither führt der auf Rohölprodukten basierende Verbrennungsmotor eine Alleinherrschaft. Er stellt bis heute die Konvention in der automobilen Antriebstechnik schlechthin dar. Im Jahre 2000 befanden sich rund 800 Mio. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren weltweit im Einsatz, bis 2030 werden sogar 1,6 Mrd. Fahrzeuge prognostiziert (Schubert 2003: 2).

Die F&E-Arbeit der Automobilindustrie ist nach wie vor auf die Optimierung dieser Konvention fokussiert. In der folgenden Abbildung sind die beiden wesentlichen Entwicklungsziele skizziert, die dabei verfolgt werden.

Entwicklungsziele bei der der Optimierung der Konvention

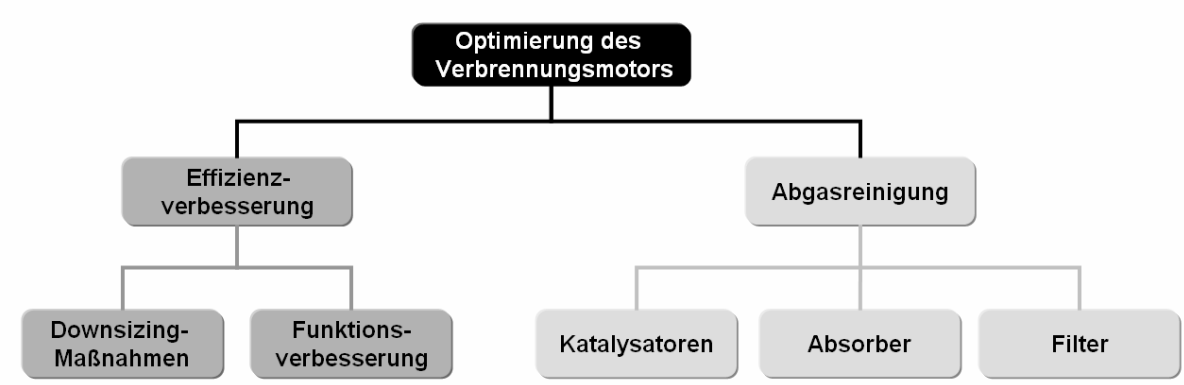


Abbildung 1, Quelle: eigene Darstellung

Die Verbrennung soll zum einen immer effizienter und zum anderen auch immer sauberer werden. Etwas plakativ formuliert lautet damit das Credo der Motorentwickler derzeitig »DiesOtto«, also die Entwicklung eines Motors, der so effizient wie der Diesel und so sauber wie der Otto-Motor arbeitet. Die folgende Abbildung stellt einen detaillierten Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten zur Optimierung eines Hubkolbenmotors dar.

Verbesserung konventioneller Funktionen (links) und
der Prozessführung (rechts) am Kolbenmotor

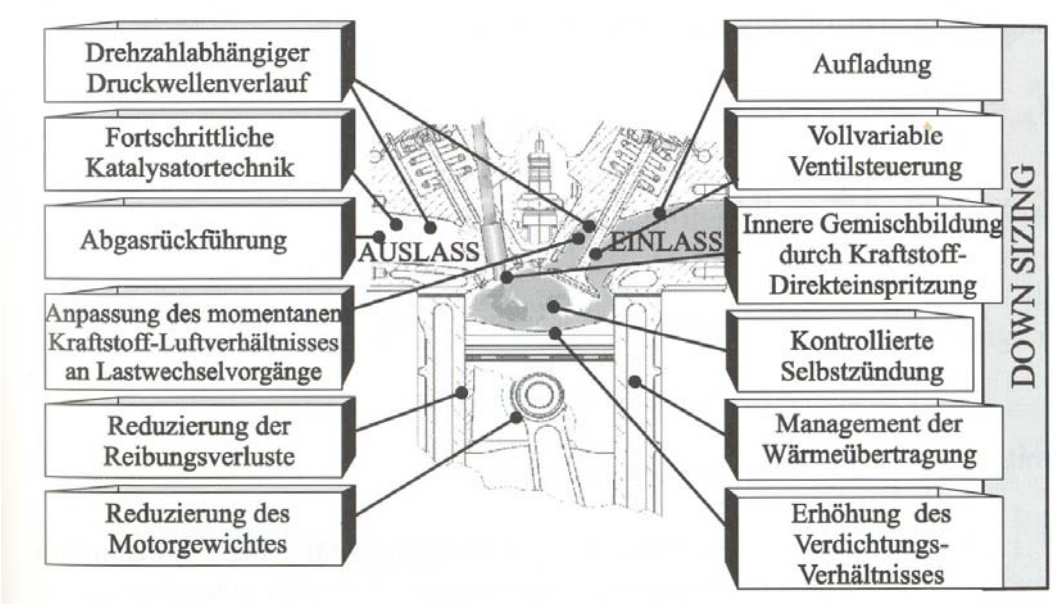


Abbildung 2, Quelle: Stan 2005: 47

In dieser Darstellung wird zwischen Maßnahmen zur Verbesserung konventioneller Funktionen (links) und Downsizing-Maßnahmen für eine verbesserte Prozessführung (rechts) unterschieden. Direkteinspritzung, elektronische Motorsteuerung, Vierventiltechnik, variable Ventilsteuerzeiten oder mechanische Aufladung sind übliche Downsizing-Maßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung des Verbrennungsmotors, vor allem des Benziners.

Zur Verbesserung der Luftqualität, insbesondere in Ballungsräumen ist eine effektive Abgasreinigung notwendig. Die drei wesentlichen Komponenten der Abgasreinigung sind der

Katalysator, der Partikelfilter und der Absorber. Der Drei-Wege-Katalysator kommt beim Ottomotor mit einem stöchiometrischen Kraftstoffgemisch zum Einsatz. Er kann Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC) zu CO_2 plus Wasser oxidieren und gleichzeitig Stickoxide (NOx) zu Stickstoff (N_2) reduzieren. Bei Dieselfahrzeugen sowie bei direkteinspritzenden Benzinern kann der Drei-Wege-Katalysator aufgrund der mageren Gemischbildung, das heißt dem hohen Sauerstoffanteil im Abgas, nicht verwendet werden. Dort kommen Diesel-Oxidationskatalysatoren (DOC) zum Einsatz. Diese können allerdings nur die Kohlenwasserstoff-Anteile an den Rußpartikeln mit Hilfe des Luftsauerstoffs im Dieselabgas reduzieren. Zur Reduktion der NOx-Emissionen auf das Niveau von Ottomotoren sind bei Dieselfahrzeugen NOx-Speicherkatalysatoren oder SCR-Katalysatoren (Selective Catalytic Reaction) notwendig. Partikelfilter kommen vor allem als Rußfilter in Dieselfahrzeugen zum Einsatz.

So ausgeklügelt diese technologisch breit gefächerte »DiesOtto«-Optimierung auch ist, so kann dies nicht darüber hinwegtäuschen, dass all diese Maßnahmen letztlich nicht auf die Substitution, sondern die Stabilisierung des fossilen Verbrennungsmotors ausgerichtet sind. Die Optimierung der Konvention dominiert die Innovationsprozesse in der Automobilindustrie. Sie war und ist Hauptausgangspunkt und -ziel dieser Prozesse.

Die Innovationen der »DiesOtto«-Optimierung sind janusköpfig und besitzen eine fatale Eigenlogik. Sie sind janusköpfig, weil einerseits jeder Schritt bei der Reduktion fossiler Kraftstoffe und Umwelt belastender Schadstoffe dringend notwendig ist, andererseits jedoch diese Optimierung die Dominanz der fossilen Verbrennungstechnologie stabilisiert. Sie besitzen eine fatale Eigenlogik, da auf diesem Entwicklungspfad tendenziell keine technischen Lösungen aus »einem Guss« entstehen, sondern technologische Konglomerate, sich wechselseitig stützender Hilfs- und Teil-Lösungen. Zugespitzt formuliert handelt es sich hier um vor- und nachgelagerte »Prothesen«-Technologien (Aigle/Krien/Marz 2007: 87-89), die die ökologischen Schwächen der fossilen Verbrennungstechnik zwar minimieren, aber nicht beseitigen können.

Um beispielsweise ein modernes Diesel-Fahrzeug der Mittelklasse zukunftstauglich auszurüsten, so dass es die Vorgaben der Euro 6-Norm beziehungsweise kalifornische Standards erfüllt, sind mindestens zwei Hilfslösungen notwendig: Erstens, der Einbau eines Diesel-Partikelfilters zur Reduzierung der Rußpartikel, und zweitens die bisher noch kaum verbreitete Stickoxid-Reinigungstechnologien. Mit diesen beiden Maßnahmen können die Emissionen von Diesel-Fahrzeugen auf das Niveau des Ottomotors reduziert werden. Daimler bietet beispielsweise bereits eine Diesel E-Klasse mit Partikelfilter und NOx-Reinigung unter der Marke »Bluetec« auf dem US-amerikanischen Markt an.

Allerdings sei angemerkt dass diese »Prothesen«-Technologien nicht nur den Preis und die technische Komplexität des Fahrzeuges, sondern auch dessen Gewicht erhöhen. Dies wiederum hat zur Folge, dass der Verbrauch und damit auch die CO_2-Emissionen steigen. Diese Effekte müssen dann durch weitere »Prothesen«-Entwicklungen kompensiert werden.

Innovationsdruck

Die automobile Konvention wird jedoch zunehmend problematisch und gerät in den letzten Jahren in wachsendem Maße unter Innovationsdruck. Stichpunktartig vereinfacht lässt sich dieser Druck folgendermaßen veranschaulichen:

Druck auf die Substitution des konventionellen Verbrennungsmotors

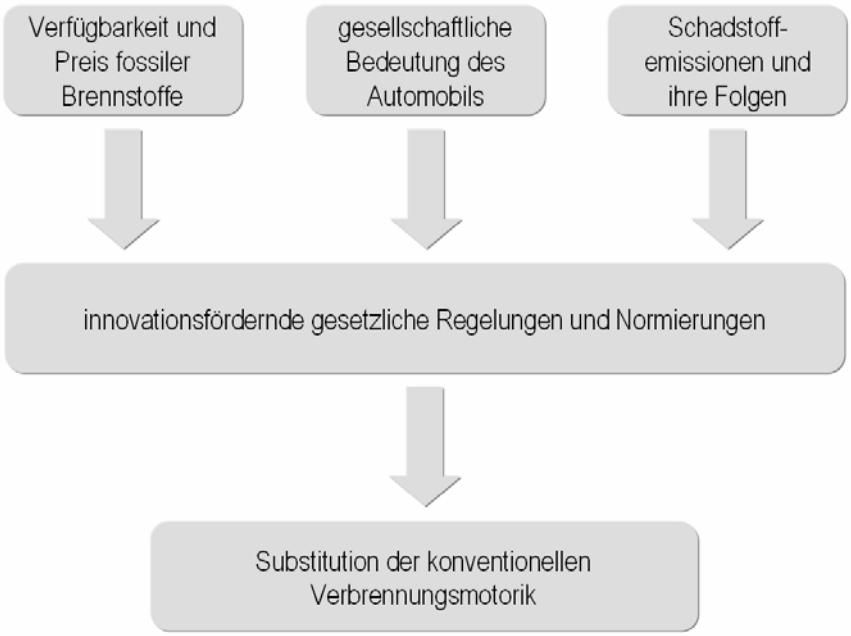


Abbildung 3, Quelle: eigene Darstellung

Der Druck auf die Substitution des konventionellen Verbrennungsmotors erwächst zunächst aus drei großen Problemfeldern (Aigle/Marz 2007: 8-19):

- Verfügbarkeit und Preis fossiler Brennstoffe. Fossile Kraftstoffe werden zunehmend knapper und damit teurer. Von wenigen Ausnahmen abgesehen, gehen die Expertenprognosen davon aus, dass die Erdöl- und Erdgaspreise weiter steigen werden. Strittig ist dabei nicht mehr ob, sondern wie stark die Preise zukünftig anziehen. Um die Verfügbarkeit von Öl längerfristig sichern zu können, ist die Förderung sogenannter nicht-konventioneller Ölreserven notwendig. Hierzu zählen Ölsande, polares Öl, Tiefsee-Öl (unter 500m), Schweröl und Natural Gas Liquids (NGLs). Allerdings ist es fraglich und ungeklärt, ob diese Reserven überhaupt wirtschaftlich gewinnbar sind und eine positive CO_2-Gesamtbilanz aufweisen. Es bleibt festzuhalten: Die Zeiten billigen konventionellen Öls sind unwiderruflich vorbei und die Gewinnung nicht-konventioneller Reserven sind aus ökonomischer und ökologischer Sicht sehr fraglich.
- Gesellschaftliche Bedeutung des Automobils. Die Autoindustrie ist eine der tragenden Säulen der Wirtschaft. Schätzungen zufolge waren 2005 in Deutschland direkt in der Automobilindustrie mehr als 766.000, in den vor- und nachgelagerten Bereichen ca. 1,4 Mio. und indirekt insgesamt 5,3 Mio. Menschen beschäftigt. Wenn die Autoindustrie hustet, dann kränkelt die Volkswirtschaft.
- Schadstoffemissionen und deren Folgen. Es steht heute zweifelsfrei fest, dass die durch die Treibhausgasemissionen verursachte Temperaturerhöhung weltweit zu erheblichen Klimaveränderungen führen wird. Und es ist auch weitgehend unstrittig, dass es zwingend notwendig ist, die Treibhausgasemissionen, insbesondere die CO_2-Emissionen zu senken. Dies betrifft alle Verursacher, auch den konventionellen Verbrennungsmotor. Neben dem Kohlendioxid entstehen bei Verbrennungsprozessen auch die »klassischen« Luftschadstoffe. Zu diesen zählen vor allem Stickoxide und Rußpartikel. Sie haben unmittelbaren Einfluss auf die menschliche Gesund¬heit.

Die Entwicklungen in diesen drei Problemfeldern führten zu gesetzlichen Regelungen und Normierungen, die einen Aufbruch aus der konventionellen Verbrennungstechnologie fördern und erzwingen. Neben den europäischen Normen Euro 5 und Euro 6, die ab September

2009 beziehungsweise September 2014 in Kraft treten sollen, sind dies vor allem die gesetzlichen Regelungen in Kalifornien, die für die gesamte Autoindustrie eine Leitfunktion besitzen.

Der zunehmende Innovationsdruck sowie die gesetzlichen Regelungen und Normierungen, in denen dieser Druck juristisch verarbeitet und verdichtet wurde, führten dazu, dass sich im letzten Jahrzehnt ein breitgefächertes Feld antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen entwickelt hat, und zwar sowohl im Hinblick auf die Substitution des Antriebs als auch in Bezug auf die Substitution des fossilen Kraftstoffs (Braun-Thürmann/Schäfer/Weider 2006).

Was die Substitution des konventionellen Antriebs betrifft, wurden zum Beispiel nicht nur unterschiedliche Brennstoffzellen- und Elektro-Fahrzeuge sowie verschiedene Hybridsysteme entwickelt, sondern auch bivalente Motoren, die sowohl mit fossilen Brennstoffen als auch mit Wasserstoff betrieben werden können. Und was die Kraftstoff-Substitution anbelangt, gibt es unterschiedliche Varianten von synthetischen Kraftstoffen, Bio-Ölen, Alkoholen, Bio-Gasen und Wasserstoff.

Die Vielzahl und die Unterschiedlichkeit dieser Innovationspfade wirft nicht nur in öffentlichen Debatten, sondern auch in Expertendiskussionen immer wieder die Frage auf, ob und wie sich diese verschiedenen Innovationen analysieren und sowohl untereinander als auch im Hinblick auf die »DiesOtto«-Optimierung vergleichen und bewerten lassen. Um diese Frage beantworten zu können, ist es sinnvoll, zunächst die Grundstruktur des zuvor skizzierten Innovations-Raumes etwas eingehender zu betrachten.

1.2 Innovations-Raum: Hyperselektion und Attraktor-Landschaft

Ein grundlegendes Merkmal des Innovations-Raumes besteht in dem oben beschriebenen »Konventionssog«, also darin, dass die Innovationsprozesse auf die Optimierung und Stabilisierung einer Konvention oder eines »herrschenden Standes der Technik« (Knie 1991, 1994: 29-70) gerichtet sind. Dieser herrschende Stand der Technik, der fossile Verbrennungsmotor, dominiert das Innovationsgeschehen und ist der wesentliche Ausgangs- und Zielpunkt der F&E-Arbeit in der Automobilindustrie.

Ein solcher »Konventionssog« ist kein Spezifikum der gegenwärtigen Automobilindustrie. Er ist nicht nur in dieser Branche, sondern auch in anderen Produktionszweigen und zu anderen Zeiten zu beobachten. So untersuchten beispielsweise Foray und Grübler in einer vergleichenden Langzeit-Analyse die Entwicklung verschiedener Eisengusstechnologien in Deutschland und Frankreich (Foray/Grübler 1990) und stießen dabei ebenfalls auf eine herrschende Technologie, von der ein »Konventionssog« ausging und die lange Zeit die Innovationsprozesse in diesem Analyse-Raum dominierte.

Vieles spricht dafür, dass der »Konventionssog« einer herrschenden Technik bei Innovationsprozessen eher den Regel- als den Ausnahmefall darstellt. Von daher kann es nicht erstaunen, dass dieses Phänomen auch zum Gegenstand grundlegender innovationstheoretischer Überlegungen und Analysen wurde. In der Innovationsliteratur wird dabei auch von dominantem Design gesprochen (Sahal 1985). Eine grundlagentheoretisch und interdisziplinär besonders interessante Rolle spielen hierbei jene Modellbildungen, die von naturwissenschaftlich-mathematischen Theorien der nichtlinearen Dynamik, der Evolution und der Selbstorganisation inspiriert sind (Bruckner/Ebeling/Scharnhorst 1998: 362-263). In diesen Modellen werden die Dominanz einer Technologie sowie die Struktur des dadurch aufgespannten Innovationsraumes auf ebenso präzise wie anschauliche Begriffe gebracht (Bruckner/Ebeling/Jiménez Montaño/Scharnhorst 1993; Ebeling/Scharnhorst 2002).

Für die Analyse des Innovationsraums der Automobilität erweisen sich hierbei besonders zwei Perspektiven als heuristisch sehr fruchtbar. Zum einen jene Modellbildungen in denen

der »Konventionssog« als ein Prozess der Hyperselektion beschrieben wird, zum anderen die evolutionstheoretischen Perspektiven, speziell die geometrisch orientierten Evolutionstheorien (Ebeling/Scharnhorst 2006), in der Innovationsprozesse in Landschaftsbildern vorgestellt und modelliert werden. Beide Perspektiven gestatten es, das Phänomen des »Konventionssogs« nicht nur begrifflich exakt, sondern auch allgemein verständlich zu beschreiben.

Hyperselektion

In vielen Modellen werden technische Innovationsprozesse als Substitutionsprozesse verstanden, in denen eine bestehende Technologie durch eine oder mehrere neue Technologien ersetzt wird. Dieser Ansatz wurde bereits ab Beginn der 60er Jahre mathematisch modelliert (Mansfield 1961; Fisher/Pry 1962) und in der Folgezeit systematisch weiterentwickelt und generalisiert (Tingyan 1990). Klassischerweise wird dabei der Substitutionsprozess in Form eines S-kurvenartigen Wachstums modelliert, bei dem der Anteil der neuen Technologie am gemeinsamen Markt steigt.

Obgleich diese klassischen S-Kurven-Modelle bereits wesentliche Einblicke in die Struktur und den Verlauf von Innovationsprozessen gewähren (Bruckner/Ebeling/Scharnhorst 1998: 373-376), besitzen sie im Hinblick auf die Beschreibung und Analyse der Optimierung eines herrschenden Standes der Technik und der daraus erwachsenden Spezifik des Innovations-Raumes zwei gravierende Nachteile: Zum einen gehen sie von einem einfachen Substitutionsprozess basierend auf linearem Wachstum aus. Zum anderen gestatten sie es nicht, die aus der Optimierung der Konvention entstehenden Substitutionsblockaden in den Blick zu bekommen, da stets nur das Wachstum einer Technologie betrachtet wird.

Diese beiden Schwächen des klassischen Ansatzes werden in neueren, nichtlinearen und hyperselektiven Substitutionsmodellen überwunden (Ebeling/Scharnhorst 2002: 68-72). Dabei lassen sich zwei Gruppen von Modellen unterscheiden, und zwar deterministische und stochastische Modelle. Beide Modelle ermöglichen es, die Optimierung eines herrschenden Standes der Technik und die daraus erwachsenden Innovationsblockaden begrifflich exakt zu beschreiben und zu analysieren.

Der zentrale Begriff ist dabei die „Hyperselektion“ (Bruckner/Ebeling/Scharnhorst 1998: 377-380). Dieser Begriff geht zurück auf frühe Modelle der Selbstorganisation, in denen die Wechselwirkung zwischen zwei Gruppen beschrieben wird. Hyperselektion ist eine Situation in der sich auch eine »bessere Variante« nicht durchsetzen kann (Eigen/Schuster 1978: 1979: 141). In der Ökonomie wird dieser Effekt als lock-in beschrieben (Arthur 1989: 99). „Das Charakteristische des Hyperselektionsfalls liegt also gerade darin, dass der einmal stabilisierte Zustand stabil gegenüber allen Störungen ist [...]“ (Ebeling/Scharnhorst 2002: 69). Oder, anders gesagt: Die Optimierung einer dominanten technischen Konvention verstärkt deren Hyperselektivität. Und dies wiederum führt dazu, dass alle anderen vorhandenen und potenziellen Technologien vom herrschenden Stand der Technik ausselektiert werden, bevor sie Fuß fassen und sich entwickeln können.

Dieser Prozess wird in den deterministischen und stochastischen Modellen aus verschiedenen Blickwinkeln und mit unterschiedlicher Akzentsetzung beschrieben. In den deterministischen Modellen werden Aussagen zum Trendverhalten gemacht. Sie erlauben eher prinzipielle Aussagen. In den stochastischen Modellen dagegen werden auch zufällige Ereignisse berücksichtigt. Es zeigt sich, dass die deterministischen Modelle in Hinblick auf die Hyperselektion sehr situativ, die stochastischen hingegen mehr perspektivisch zentriert sind.

In den deterministischen Modellen wird die aktuelle Wirkungs(über)macht einer hyperselektiven Technologie beschrieben und erklärt. Alternative Technologien, auch wenn mit besseren Eigenschaften, haben im Grunde gar keine Chance, sich gegen die Omnipotenz des

herrschenden Standes der Technik zu behaupten oder gar durchzusetzen. Deterministische Modelle beschreiben tendenziell eine „once for ever"-Selektion (Bruckner/Ebeling/Scharnhorst 1998: 378), das heißt, eine dominante Konvention ist und bleibt dominant, womit die Entwicklung abbricht und weitere Substitutions- beziehungsweise Innovationsprozesse ein für alle mal unmöglich gemacht werden (Lock-in-Situation).

In den stochastischen Modellen wird diese sehr rigide Konsequenz der deterministischen Modellbildung relativiert. Die Hyperselektion einer herrschenden Technik ist auch hier mächtig, aber nicht übermächtig. Alternative Technologien, die in deterministischen Modellen keinerlei Durchsetzungschancen haben, besitzen in stochastischen Modellen zwar geringe aber immerhin nennenswerte Realisierungsmöglichkeiten. Ihre Entwicklung ist nicht von vornherein aussichtslos (Ebeling/Scharnhorst 2002: 70). Stochastische Modelle zeigen auf, dass und wie Substitutions- und Innovationsprozesse trotz Hyperselektion unter bestimmten Bedingungen erfolgreich sein können.

Ausgehend von diesen Modellen lässt sich das Phänomen des »Konventionssogs« als Hyperselektion interpretieren und analysieren. Im Hinblick auf den automobilen Innovations-Raum bedeutet dies: Der herrschende Stand der Technik, also der konventionelle Verbrennungsmotor und die »DiesOtto«-Optimierung, ist hyperselektiv und dominiert mit dieser Hyperselektivität den gesamten Innovations-Raum der Automobilität.

Ausgehend von den evolutionstheoretischen Modellen, speziell den geometrisch orientierten Evolutionstheorien, lässt sich diese hyperselektive Strukturierung des Innovations-Raumes nicht nur mathematisch abstrakt, sondern auch anschaulich beschreiben. Dabei ist es hilfreich, zwei Begriffe zu einem Bild zusammenzuführen, nämlich die Begriffe »Attraktor« und »Landschaft«.

Attraktor-Landschaft

Bei dem ersten Begriff, dem des Attraktors, handelt es sich um einen spezifischen Zustand eines Systems, auf den alle Veränderungen im System zulaufen. Bildlich gesprochen zieht ein Attraktor gewissermaßen alle in seiner Nähe liegenden Prozesse an und hält sie gefangen. Er saugt wie ein Malstrom alle Ressourcen seiner Umgebung in sich auf und entwickelt dadurch eine immer größere Anziehungskraft. Im Innovationssystem Automobilität stellt der fossile Verbrennungsmotor als herrschender Stand der Technik einen solchen Attraktor dar, und zwar den stärksten Attraktor des Systems. Der von ihm ausgehende Sog strukturiert und determiniert die Dynamik des Innovationsgeschehens. Attraktoren sind die dominanten Designs in einer Innovations-Landschaft. Einmal in einem Attraktor gefangen besteht im Fall einer Hyperselektion keine Möglichkeit in den Einzugsbereich eines anderen Attraktors (einer innovativen Technologie) zu gelangen.

Der zweite zentrale Begriff ist der der Landschaft, genauer der Evolutions- oder Fitnesslandschaft. Dieser Ansatz geht auf eine Metapher von Wright zurück, der »Evolution als Bergsteigen in Landschaften« betrachtete und zur Veranschaulichung der Auswirkungen von Selektion und Mutation auf die Anpassung einer Population das Bild einer adaptiven oder Fitnesslandschaft einführte (Wright 1932).

Führt man die Attraktor- und die Landschaftsperspektive zusammen, dann lässt sich ein Innovations-Raum als eine Attraktor-Landschaft modellieren, bei der die Gipfel oder Berge Attraktoren darstellen. Dabei sind dann hohe Berge starke und niedrige Berge schwache Attraktoren. Aus einer solchen Sicht ist im Innovations-Raum der Automobilität der konventionelle Verbrennungsmotor der alles überragende und die gesamte Landschaft beherrschende Gipfel. Dieser riesige »Innovations-Berg« wird durch die »Prothesen«-Technologien der »DiesOtto«-Optimierung abgestützt. Um diesen Gipfel herum hat sich eine Innovations-Landschaft mit kleineren »Innovations-Bergen« herausgebildet, die unmittelbar zum Gebirgs-

massiv des konventionellen Verbrennungsmotors gehört. Hierzu zählen beispielsweise die Auto- und Erdgas-Technologien oder der benzinbetriebene Wankelmotor. Jenseits dieses fossilen Innovations-Massivs haben sich in der automobilen Innovations-Landschaft in den letzten Jahrzehnten kleinere »Innovations-Gipfel« entwickelt, wie beispielsweise die Batterie- und Brennstoffzellen-Elektroantriebe, die weder kraftstoff-, noch antriebstechnologisch zu dem Gebirgsmassiv des konventionellen Verbrennungsmotors gehören. Diese neuen »Innovations-Gipfel« sind zwar vergleichsweise noch sehr klein, wuchsen jedoch im letzten Jahrzehnt zunehmend und entfalten eine immer größere Attraktionskraft. Zwischen diesen neuen »Innovations-Gipfeln« und dem fossilen Innovations-Massiv bildeten sich in den vergangenen Jahren Pässe oder Brücken. Hierzu zählen zum Beispiel die Hybridantriebe und die Wasserstoff-Verbrennungsmotoren. Diese Pässe verbinden das zentrale Innovations-Massiv mit den neuen »Innovations-Bergen«.

Wenn der Innovations-Raum der Automobilität als eine hyperselektive Attraktor-Landschaft interpretiert und analysiert werden kann, dann ergeben sich daraus zwei grundlegende Fragen: *Erstens*, lässt sich diese hyperselektive Attraktor-Landschaft nicht nur metaphorisch, sondern auch wissenschaftlich präzise qualitativ und quantitativ beschreiben? *Zweitens*, haben in dieser hyperselektiven Attraktor-Landschaft die neuen »Innovations-Berge« überhaupt eine Chance, das konventionelle »Innovations-Massiv« des fossilen Verbrennungsmotors zu verdrängen, und wenn ja, wie? Diese zwei Fragen werden wir in den folgenden beiden Kapiteln schrittweise beantworten.

1.3 Analyse-Methode: Innovations-Systematik und Innovations-Matrix

Bei dem Versuch, die hyperselektive Attraktor-Landschaft des automobilen Innovations-Raumes nicht nur metaphorisch, sondern auch wissenschaftlich präzise qualitativ und quantitativ zu beschreiben, kristallisieren sich zwei Hauptwege heraus, die sich vielleicht am besten als »modelltreue« und als »holistische« Beschreibungen bezeichnen ließen:

»Modelltreue« Beschreibungen bewegen sich im Rahmen bestimmter Attraktor- und Landschafts-Modelle und bedienen sich dabei der jeweiligen Modell-Begrifflichkeiten. Neben vielen Vorteilen hat dieser Weg zwei entscheidende Nachteile: Zum einen ist es schwierig, wenn nicht gar unmöglich, verschiedene und oft komplementäre Modelle und Modellsprachen zu einer präzisen und einheitlichen Begrifflichkeit zusammenzuführen. Zum anderen sind die Modell-Begrifflichkeiten und noch mehr deren Synthesen mehr oder weniger abstrakt. Dies führt tendenziell zur Herausbildung von Kommunikationsblockaden zwischen den Modell-Experten einerseits und potenziellen Adressaten der Modellierung andererseits. Zumeist bedarf es einer gesonderten Übersetzungsarbeit, um die Ergebnisse der Analyse anderen Wissenschaftsdisziplinen, der Politik und der breiten Öffentlichkeit zu vermitteln.

»Holistische« Beschreibungen sind nicht auf bestimmte Modelle und die ihnen zugrunde liegenden Problemfacetten fokussiert, sondern auf eine möglichst ganzheitliche Sicht des zu analysierenden Problems. Dies schließt sowohl expertenkulturelle als auch alltagsweltliche Sichtweisen ein. Ausgehend davon sind »holistische« Beschreibungen notwendigerweise interdisziplinär strukturiert. Sie liegen gewissermaßen »quer« zu den unterschiedlichen »modelltreuen« Beschreibungen und suchen die verschiedenen Analyseperspektiven so miteinander zu verbinden, dass darunter weder die wissenschaftliche Präzision noch die Anschaulichkeit und Verständlichkeit leiden. Die folgenden Überlegungen verstehen sich als ein Versuch in dieser Richtung.

Um die hyperselektive Attraktor-Landschaft des automobilen Innovations-Raumes zu beschreiben, haben wir ein Matrix-Verfahren entwickelt, mit dem diese Landschaft kartographiert wird. Dabei wird eine Innovations-Matrix aufgestellt, die es ermöglicht, die Innovationen in dieser Landschaft zu systematisieren und zu klassifizieren (Aigle/Marz 2007).

Aus dieser Innovations-Matrix lässt sich eine Evaluations-Matrix ableiten, die es gestattet, die verschiedenen Innovationen und Innovationstypen über Kenngrößen vergleichend miteinander in Beziehung zu setzen und zu evaluieren. Diese Ableitung wurde bereits an anderer Stelle detailliert entwickelt (Aigle/Krien/Marz 2007) und wird hier nicht noch einmal vorgestellt.

Innovations-Systematik

Das Matrix-Verfahren basiert auf einer Innovations-Systematik, die auf einer grundlegenden Unterscheidung und drei Leitdifferenzen beruht.

Die *grundlegende Unterscheidung* geht auf Schumpeter zurück und betrifft die Trennung von »Invention« und »Innovation«. Eine Innovation ist nicht nur mehr als eine Invention, sondern auch etwas qualitativ anderes, also die bloße Erfindung oder Entdeckung. Inventionen sind nur dann Innovationen, wenn sie sich wirtschaftlich durchsetzen (OECD 1997; Debus 2002: 95; Borchert/Goos/Hagenhoff 2003: 14; BMBF 2006). Oder, formelhaft verkürzt formuliert:

- innovation = „commercialization of invention“ (Kirchhoff/Walsh 2000: 328)
- „innovation = invention + exploitation“ (Roberts 1987: 3)

Im Folgenden werden unter Inventionen all jene Entwicklungen verstanden, die noch nicht Prototypen-Niveau erreicht haben. Ausgehend von der Unterscheidung zwischen Invention und Innovation lassen sich nun folgende drei *Leitdifferenzen* entwickeln:

Die *erste Leitdifferenz* betrifft das Innovations-Paradigma. Hierbei wird zwischen *stagnovativen und nicht-stagnovativen Innovationen* unterschieden (Canzler/Marz 1997). Zu den stagnovativen Innovationen gehören all jene Innovationen, die lediglich den technischen Kern der fossilen Automobilität, also die konventionelle Verbrennungstechnik optimieren. Nicht-stagnovative Innovationen sind jene, die das Paradigma des klassischen thermischen Antriebs nicht stabilisieren, sondern entweder kraftstoff- und/oder antriebsseitig auflösen.

Die Unterscheidung zwischen stagnovativen und nicht-stagnovativen Innovationen sagt nichts über das technologische Niveau der Innovationen aus. So können beispielsweise aus einer ingenieurtechnischen Perspektive stagnovative Innovationen durchaus komplexer, wertvoller oder höherrangiger sein als nicht-stagnovative.

Die *zweite Leitdifferenz* betrifft den Innovationsgrad. Hier wird zwischen *inkrementalen und radikalen Innovationen* unterschieden. Diese Unterscheidung stützt sich sowohl auf natur- als auch auf sozialwissenschaftliche Analysen (Ebeling et al. 1999: 462, 464; Scharnhorst 2000; Hauschildt 1993; Billing 2003; Boyer 2001; Leifer 2005).

Während es sich bei inkrementalen Innovationen um kleine, kontinuierlich stattfindende Neuerungen handelt, stellen radikale Innovationen große, diskontinuierlich auftretende Innovationen dar (Mensch 1972; Hauschildt 1993, 12; Becker 2004: 94-97). Inkrementale Innovationen sind Verbesserungs-Innovationen, radikale Innovationen sind signifikante, richtungsändernde Basis-Innovationen (Konrad/Scheer 2003: 2; Debus 2002: 92-93; Kroy 1995; Deutsch 1949: 26;). Oder, zugespitzt formuliert: Inkrementale Innovationen sind „Innovätiönchen“ (Braun/Feige/Sommerlatte 2001), radikale Innovationen sind „Quantensprünge“ (Nill/Konrad 2001: 28; Weider/Marz 2005; Knie 2006: 55-58, 119-207.)

Die *dritte Leitdifferenz* betrifft die Innovations-Reichweite. Hierbei wird auf Arbeiten zu Innovations-Frameworks (Abernathy/Clark 1985; Henderson/Clark 1990) und Systeminnovationen (Konrad/Scheer 2003) zurückgegriffen und zwischen *modularen und systemischen Innovationen* unterschieden. Modulare Innovationen betreffen, antriebs- und/oder kraftstofftechnologisch, lediglich die Verbrennungstechnik des einzelnen Kraftfahrzeugs. Systemische Innovationen reichen darüber hinaus in die gesamten Infrastrukturen der Automobilität.

Die sich aus den drei Leitdifferenzen ergebenden Innovationstypen stehen nicht beziehungslos nebeneinander. Es gibt mindestens vier Verbindungslinien, die eine weitere Differenzierung und Systematisierung der bisher entwickelten Innovations-Typologie gestatten:

Innovationen 1. und 2. Grades

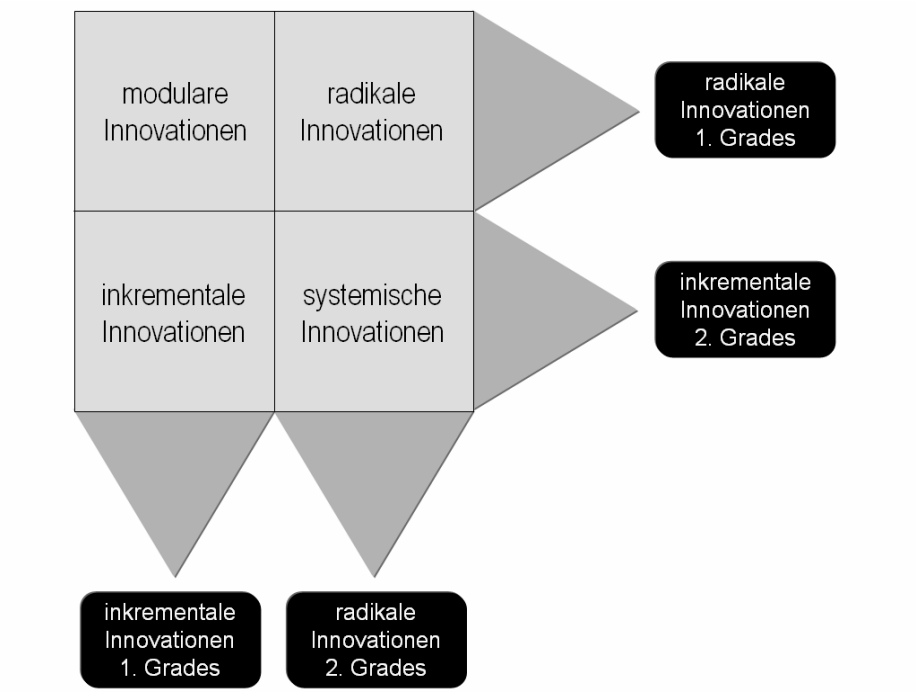


Abbildung 4, Quelle: eigene Darstellung

Diese vier Verbindungslinien zwischen inkrementalen, radikalen, modularen und systemischen Innovationen ermöglichen zweierlei:

Einerseits lassen sich so inkrementale und radikale Innovationen auch im Hinblick auf ihre jeweilige Reichweite unterscheiden. Inkrementale und radikale Innovationen 1. Grades besitzen nur eine begrenzte, nämlich modulare Reichweite. Sie betreffen lediglich die Technologie des einzelnen Fahrzeugs. Inkrementale und radikale Innovation 2. Grades besitzen demgegenüber eine größere, und zwar systemische Reichweite. Sie betreffen nicht nur das einzelne Fahrzeug, sondern darüber hinaus auch die technologischen Input- und Output-Strukturen der gesamten Automobilitäts-Maschine.

Andererseits gestatten es diese vier Verbindungslinien umgekehrt auch, den Innovationsgrad von modularen und systemischen Innovationen zu bestimmen. Sowohl modulare (1. Grad) als auch systemische (2. Grad) Innovationen können jeweils inkremental oder radikal sein.

Innovations-Matrix

Ausgehend von der zuvor skizzierten Systematik lässt sich nun für das breite Feld der antriebs- und kraftstofftechnologischen Innovationen folgende qualitative Innovations-Matrix entwickeln:

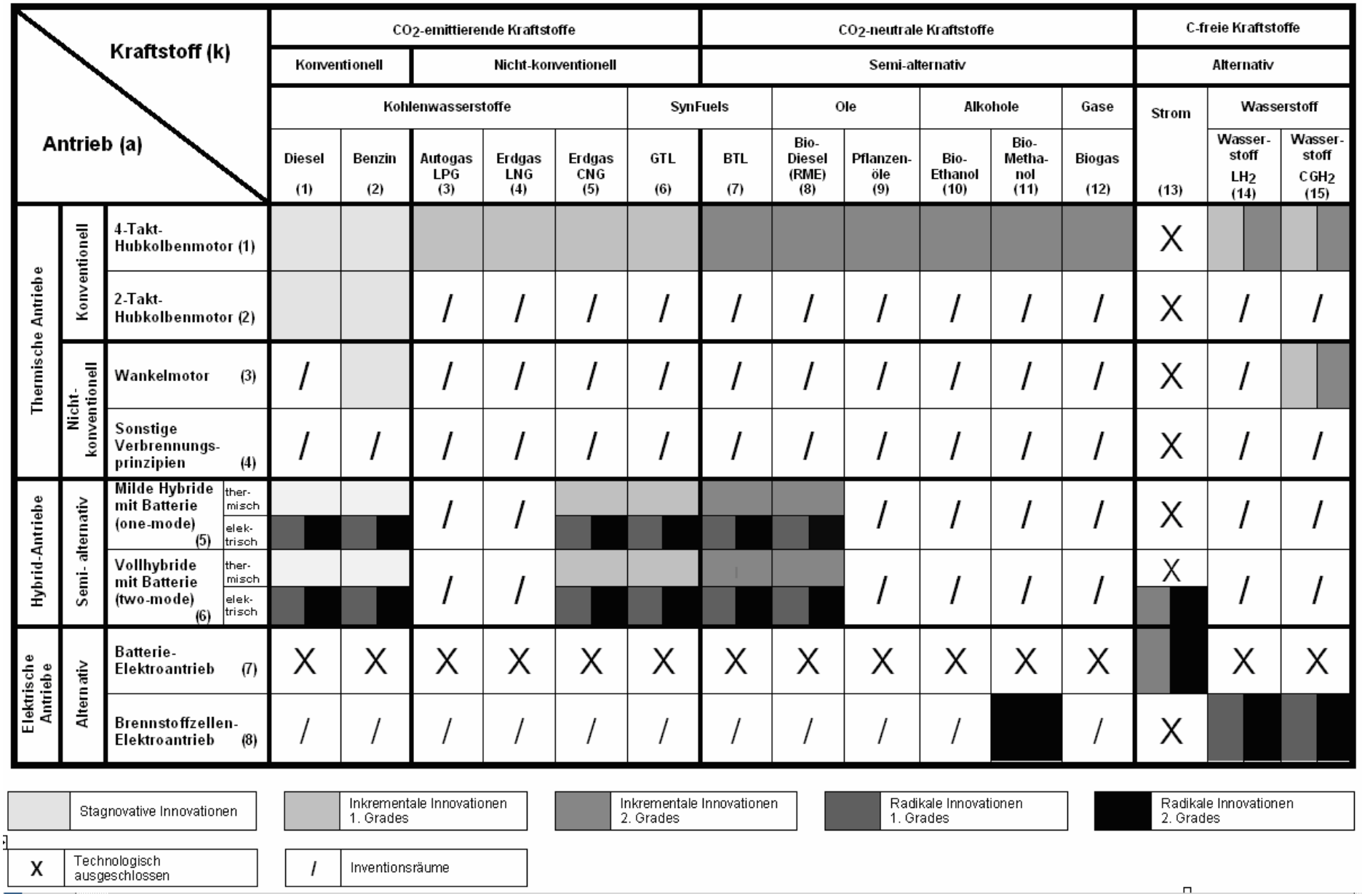


Abbildung 5, Quelle: Aigle/Marz 2007: 32

Diese Innovations-Matrix besitzt zwei Innovations-Dimensionen, eine Antriebs-Dimension a (Zeilen) und eine Kraftstoff-Dimension k (Spalten). Dabei gibt der Index a die Position einer Innovation auf der antriebstechnologischen Achse und der Index k die Position einer Innovation auf der kraftstofftechnologischen Achse an. Der Index a läuft von 1-8 (Zeile 1-8), der Index k von 1-15 (Spalte 1-15). Beide Innovationsachsen sind jeweils so skaliert, dass das Innovationsniveau tendenziell mit steigender Index-Nummer zu- und mit sinkender Index-Nummer abnimmt. Auf der kraftstofftechnologischen Achse ist beispielsweise Diesel (k=1) konventioneller als CGH_2 (k=15) und auf der antriebstechnologischen Achse ist der 4-Takt-Hubkolbenmotor (a=1) konventioneller als der Brennstoffzellen-Elektroantrieb (a=8).

Durch die beiden Innovations-Dimensionen a und k wird eine Fahrzeug-Konfiguration $F_{a/k}$ (Feld) definiert. Dabei gibt der Index a die Position der Konfiguration auf der antriebstechnologischen Achse und der Index k die Position dieser Konfiguration auf der kraftstofftechnologischen Achse an. Die Felder Fa/k laufen von $F_{1/1}$ (Zeile 1/Spalte 1) über $F_{1/15}$ (Zeile 1/Spalte 15) und $F_{8/1}$ (Zeile 8/Spalte 1) bis $F_{8/15}$ (Zeile 8/Spalte 15). Entsprechend den Achsenskalierungen nimmt das Innovationsniveau der Fahrzeug-Konfigurationen mit steigenden Index-Nummern zu und mit sinkenden Index-Nummern ab. So ist zum Beispiel die Konfiguration $F_{1/1}$ (4-Takt-Hubkolbenmotor/Diesel) konventioneller als die Konfiguration $F_{3/2}$ (Wankelmotor/Benzin) und diese wiederum weniger alternativ als die Konfiguration $F_{8/14}$ (Brennstoffzellen-Elektroantrieb/LH_2). Die Innovations-Dimensionen lassen sich auch als Achsen eines Merkmalsraumes (Saviotti 1996) verstehen. In der obigen Matrixdarstellung beschreibt jede Zelle einen (möglichen) Gipfel. Wie diese Gipfel zueinander liegen, wie groß die Innovationsschritte zwischen ihnen sind, ist eine andere Frage. Die Matrix ist nicht bereits eine Landschaft sondern ein Klassifizerungsverfahren in einer gedachten Landschaft.

Ausgehend von dieser matrixförmigen Beschreibung der hyperselektiven Attraktor-Landschaft des automobilen Innovations-Raumes lässt sich nun die zweite eingangs gestellte Frage beantworten, nämlich ob in dieser Landschaft die neuen »Innovations-Berge« überhaupt eine Chance haben, das konventionelle »Innovations-Massiv« des fossilen Verbrennungsmotors zu verdrängen, und wenn ja, wie dies geschehen kann?

1.4 Lösungswege: Nischen und frühe Märkte

Nischen

Eine zentrale Rolle bei der Beantwortung dieser Frage spielen die „Nischen“ (Bruckner/Ebeling/Scharnhorst 1998: 376-380; Ebeling/Scharnhorst 2002: 70-72). Sie bieten alternativen Technologien eine Art Schutz- und Entwicklungsraum, der sie vor der (Über-)Macht einer sich ständig optimierenden hyperselektiven Konvention bewahrt, weil deren Dominanz dort neutralisiert wird. Die mathematischen Analysen zeigen ferner, dass neben der Existenz von Nischen „vor allem auch der Zeitpunkt und die Art und Weise der Einführung einer neuen Technologie entscheidend für ihre Durchsetzung am Markt ist“ (Ebeling/Scharnhorst 2002: 73).

Um die Funktion der Nische in einer hyperselektiven Attraktor-Landschaft besser zu verstehen, empfiehlt es sich zunächst, auf ein vereinfachtes Modell einer solchen Landschaft zurückzugreifen, und zwar auf eine Landschaft mit zwei Gebirgsmassiven, die durch ein Tal getrennt sind. Das eine Attraktor-Gebirge K verkörpert die konventionelle, herrschende Technologie. Im automobilen Innovations-Raum wäre dies der fossile Verbrennungsmotor mit den stagnovativen Innovationen der »DiesOtto«-Optimierung. In der qualitativen Innovations-Matrix sind dies die Felder $F_{1/1}$ und $F_{1/2}$. Das andere Attraktor-Gebirge A verkörpert eine alternative, nichtkonventionelle Technologie. Im automobilen Innovations-Raum könnte dies

beispielsweise ein Brennstoffzellen-Elektroantrieb sein. In der qualitativen Innovations-Matrix wären dies die Felder $F_{8/11}$, $F_{8/14}$ und $F_{8/15}$.

Für die Dynamik dieser, aus zwei Attraktor-Gebirgen bestehenden hyperselektiven Landschaft gibt es nun theoretisch drei mögliche Endzustände: Erstens, das hyperselektive Attraktor-Gebirge K bleibt dominierend und das neue Attraktor-Gebirge A kann sich nicht halten und verschwindet wieder. Zweitens, das Attraktor-Gebirge K und das Attraktor-Gebirge A koexistieren. Drittens, das Attraktor-Gebirge A wächst, gewinnt zunehmend an Stärke und verdrängt das bislang dominierende Attraktor-Gebirge K.

Die Verdrängung zwischen den verschiedenen Gebirgen muss man sich dabei so vorstellen, dass die Besiedlung vom Gebirge K zum Gebirge A übergeht. Das heißt, auch wenn eine Technologie technisch weiter möglich bleibt, wird sie doch nicht mehr benutzt. Die Nutzer sind die Siedler. Wie in allen sozialen Systemen wird dabei die Attraktor-Landschaft von der Besiedlung beeinflusst. Zum Zusammenhang von Besiedlung und Bewertung sei auf Ebeling/Scharnhorst (2006) verwiesen. Koexistenz dagegen entspricht der gleichzeitigen Besiedlung von mehreren Gipfeln. Unter bestimmten Bedingungen ist der zweite Fall, der Koexistenzfall, hochgradig instabil. Er liegt auf der Grenzlinie zwischen den beiden Attraktoren, der so genannten „Separatrix“ (Bruckner/Ebeling/Scharnhorst 1998: 376-377). Diese Instabilität führt dazu, dass sich das System dauerhaft nicht in dieser labilen Koexistenz-Situation halten kann, sondern über kurz oder lang entweder in den ersten oder in den zweiten Zustand kippt. Letztlich geben schließlich kleine und zufällige Ereignisse den Ausschlag dafür, welcher der beiden Fälle eintritt. Ausgehend davon reduziert sich die Dynamik der hyperselektiven Attraktor-Landschaft auf zwei Endzustände, nämlich den ersten und den dritten Fall.

Dass der erste Fall eintritt, dass also das hyperselektive Attraktor-Gebirge K dominierend bleibt und das Attraktor-Gebirge A verschwindet, ist weder erstaunlich noch erklärungsbedürftig, denn die Spezifik des Hyperselektionsfalls besteht ja gerade darin, dass die Hyperselektion stabil gegenüber allen Störungen ist (Ebeling/Scharnhorst 2002: 69). Die entscheidende Frage ist vielmehr, ob und unter welchen Bedingungen der dritte Fall eintreten kann. Oder, anders gefragt: Wie ist es möglich, dass das neue Attraktor-Gebirge A das hyperselektive Attraktor-Gebirge K verdrängen kann?

Entscheidend hierfür ist der Begriff des so genannten »Attraktor-Bassins«. Unter einem Attraktor-Bassin versteht man die Menge aller Anfangsbedingungen. Zwei Anfangsbedingungen sind dabei von zentraler Bedeutung, nämlich die Anfangsgrößen und die Wachstumsraten. Diese Anfangsbedingungen lassen sich wie folgt beschreiben:

Wenn N_k die Anfangsgröße der herrschenden Technologie K (im Sinne aller Nutzer), also die Besiedlung ist, und N_a die Anfangsgröße der neuen innovativen Technologie A, dann beträgt die Gesamtgröße N des Systems in dem sich die Konkurrenz abspielt.

$$N = N_k + N_a \tag{1}$$

Sind ferner W_k die Wachstumsrate der zum Attraktor K gehörenden Technologie und W_a die Wachstumsrate der zum Attraktor A gehörenden Technologie im Attraktor-Bassin, dann ist der Quotient der beiden Wachstumsraten:

$$Q = \frac{W_a}{W_k} \tag{2}$$

Dieser Quotient bestimmt auch die Lage der Grenzlinie zwischen den beiden Attraktor-Bassins. Ausgehend von diesem Ansatz lassen sich Nischen-Simulationen entwickeln, die sehr anschaulich deutlich machen, wie die Durchsetzungswahrscheinlichkeit D des Attraktor-

Gebirges A von den Größen N, N_a und Q abhängt. Diese Simulationen basieren auf der Master-Gleichung eines stochastischen Substitutionsmodells (Bruckner et al. 1996: 18-20; Ebeling et al. 2006: 69-70). Mit diesem Modell lassen sich unterschiedliche Wachstumsformen modellieren, wie beispielsweise lineares und quadratisches Wachstum oder ein Mix aus beiden (ebd.). Für den Fall eines quadratischen Wachstums, den wir hier exemplarisch analysieren wollen, ergibt sich aus dem Mastergleichungs-Modell folgende funktionale Abhängigkeit der Durchsetzungswahrscheinlichkeit D von N, N_a und Q (Bruckner et al. 1996: 23; Ebeling et al. 2006: 70)

$$D(N, N_a, Q) = \frac{1 + \sum_{i=1}^{Na-1} \left(\frac{1}{Q}\right)^i \times \binom{N-1}{i}}{\left(1 + \frac{1}{Q}\right)^{N-1}} \qquad (3)$$

Diese funktionale Abhängigkeit wollen wir nun Schritt für Schritt an Hand von fünf idealtypischen Nischen-Simulationen illustrieren. Im Einzelnen handelt es sich dabei um folgende Fälle:

Nischen-Simulation 1: D = f(Q), N_a = variabel und N = konstant

- Nischen-Simulation 2: D = f(Q), N = variabel und N_a = konstant
- Nischen-Simulation 3: D = f(N_a), Q = variabel und N = konstant
- Nischen-Simulation 4: D = f(N), Q = variabel und N_a = konstant
- Nischen-Simulation 5: D = f(Q), N_a = variabel und N = variabel

Die in Abbildung 6 dargestellte erste Nischen-Simulation zeigt, wie stark die Durchsetzungswahrscheinlichkeit D von der Größe N_a abhängt. Hier wird D als Funktion von Q dargestellt, N konstant gesetzt (N=20) und N_a variiert (N_a=10, N_a=8, N_a=5 und N_a=3). Daraus ergibt sich folgendes Bild:

Nischen-Simulation 1: D = f(Q), N_a = variabel und N = konstant

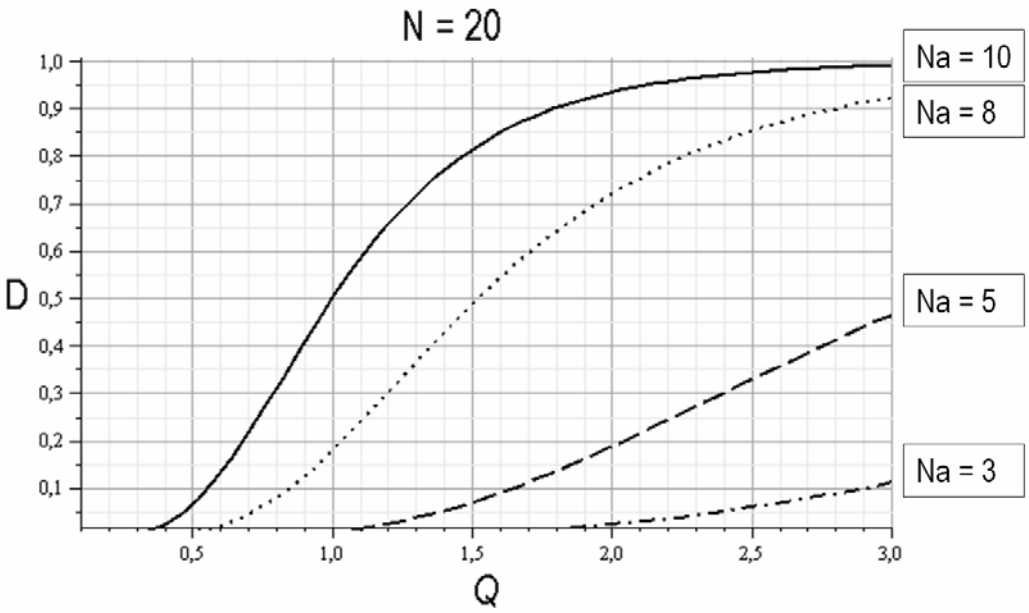


Abbildung 6; Quelle: eigene Darstellung

Je kleiner N_a ist, desto kleiner ist die Durchsetzungswahrscheinlichkeit des Attraktor-Gebirges A. Selbst wenn Q größer 1 ist, wenn also die Wachstumsrate W_a die Wachstumsrate W_k übertrifft, sinkt die Durchsetzungswahrscheinlichkeit mit sinkendem N_a. Wenn beispielsweise W_a doppelt so groß ist wie W_k, dann beträgt die Durchsetzungswahrscheinlichkeit bei N_a=10 über 90%, wogegen sie bei N_a=5 bereits auf 20% und bei N_a=3 auf 1% sinkt. Der in dieser Simulation unterstellte Fall N_a=1 ist in der Grafik gar nicht zu sehen, hier beträgt die Durchsetzungswahrscheinlichkeit nahezu 0%, auch wenn das Wachstum W_a dreimal so groß wäre wie W_k.

Die in Abbildung 7 dargestellte zweite Nischen-Simulation zeigt, wie die Durchsetzungswahrscheinlichkeit D von der Größe N abhängt. Hier wird D ebenfalls als Funktion von Q dargestellt, jedoch N_a konstant gesetzt (N_a=1) und N variiert (N=2, N=10, N=20, N=50 und N=100). Daraus ergibt sich folgendes Bild:

Nischen-Simulation 2: D = f(Q), N = variabel und N_a = konstant

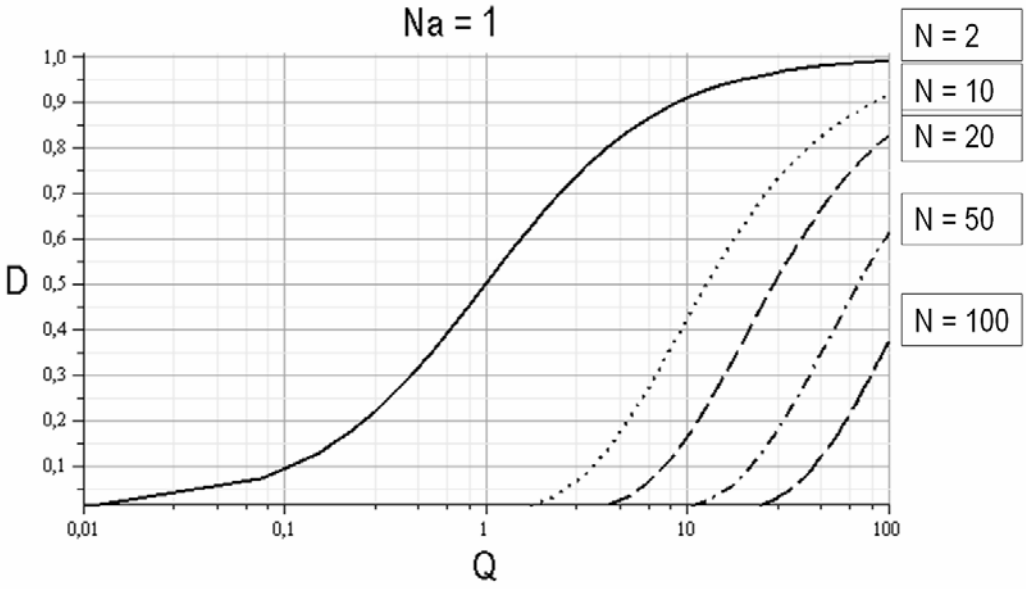


Abbildung 7, Quelle: eigene Darstellung

Je größer N ist, desto geringer ist bei konstantem N_a die Durchsetzungswahrscheinlichkeit des Attraktor-Gebirges A. Selbst wenn Q wesentlich größer als 1 ist, wenn also die Wachstumsrate W_a die Wachstumsrate W_k um ein Vielfaches übertrifft, sinkt die Durchsetzungswahrscheinlichkeit mit wachsendem N. Wenn zum Beispiel W_a zehnmal so groß ist wie W_k, dann beträgt die Durchsetzungswahrscheinlichkeit bei N=2 ungefähr 90%, wogegen sie bei N=10 bereits auf etwas über 40% und bei Werten N≥50 auf nahezu 0% sinkt.

Die in Abbildung 8 dargestellte dritte Nischen-Simulation zeigt, wie die Durchsetzungswahrscheinlichkeit D vom Wachstumsquotienten Q abhängt. Hier wird D als Funktion von N_a dargestellt, N konstant gesetzt (N=20) und Q variiert (Q=5, Q=3, Q=2, Q=1 und Q=0,5). Daraus ergibt sich folgender Kurvenverlauf:

Nischen-Simulation 3: D = f(N_a), Q = variabel und N = konstant

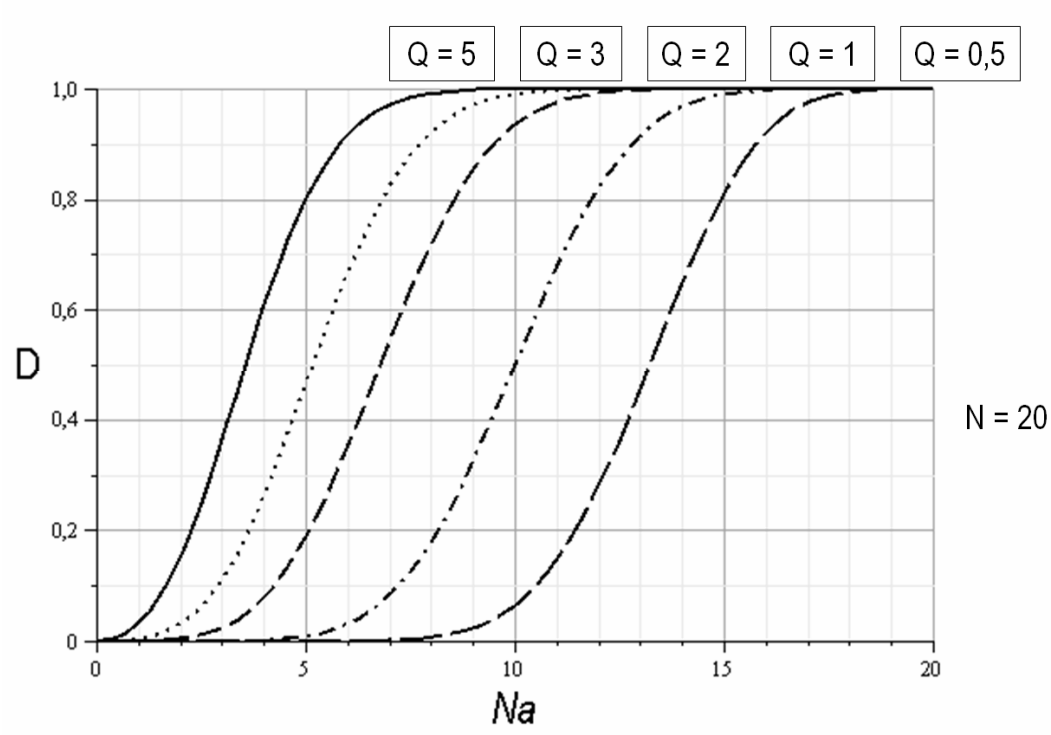


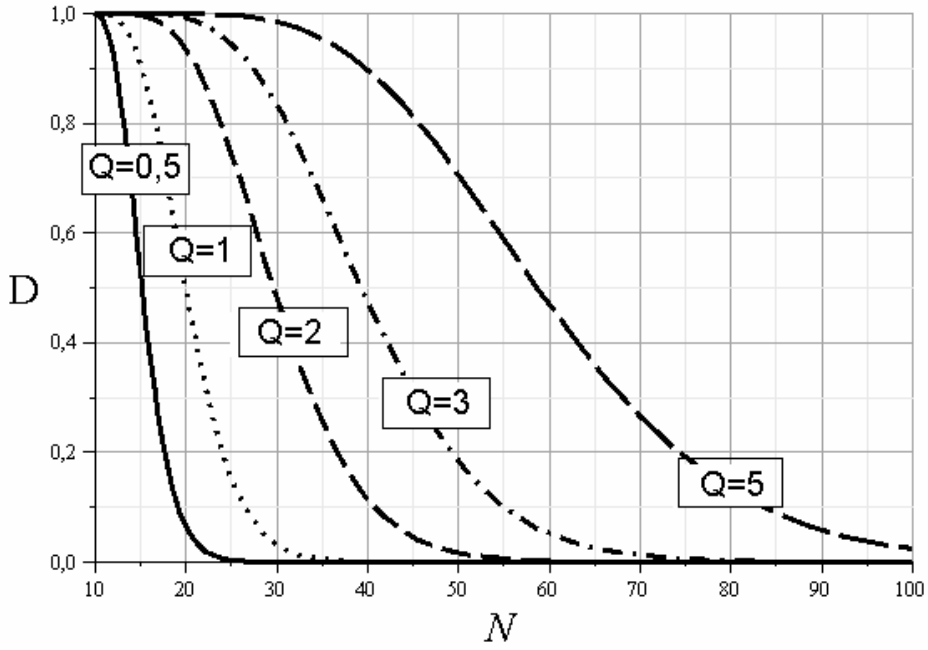
Abbildung 8, Quelle: eigene Darstellung

Je größer Q, je größer also W_a gegenüber W_k, desto größer ist die Durchsetzungswahrscheinlichkeit des Attraktor-Gebirges A und umgekehrt, je kleiner Q ist, desto geringer ist sie. Selbst wenn N_a gegenüber N relativ groß ist, sinkt die Durchsetzungswahrscheinlichkeit mit sinkendem Wachstumsquotienten erheblich. Wenn beispielsweise N_a=5 ist, und Q=5, also wenn W_a fünfmal so groß wie W_k, dann beträgt die Durchsetzungswahrscheinlichkeit 80%. Bei Q=3 beträgt sie noch fast 50%, bei Q=2 noch 20% und bei Q=1 nur noch 1%. Bei Q=0,5 ist D nahezu 0%.

Wenn Q≤1 ist, dann muss N_a gegenüber N vergleichsweise sehr groß sein, damit das Attraktor-Gebirge A eine nennenswerte Durchsetzungswahrscheinlichkeit besitzt. So müsste zum Beispiel bei Q=0,5 N_a≥13 sein, um eine Durchsetzungswahrscheinlichkeit größer als 50% zu erreichen.

Die in Abbildung 9 dargestellte vierte Nischen-Simulation zeigt ebenfalls, wie die Durchsetzungswahrscheinlichkeit D vom Wachstumsquotienten Q abhängt. Hier wird jedoch D als Funktion von N dargestellt, N_a konstant gesetzt (N=10) und Q wieder variiert (Q=5, Q=3, Q=2, Q=1 und Q=0,5). Daraus ergibt sich folgendes Bild:

Nischen-Simulation 4: D = f(N), Q = variabel und N_a = konstant



Na=10

Abbildung 9, Quelle: eigene Darstellung

Je größer Q, je größer also W_a gegenüber W_k, desto größer ist die Durchsetzungswahrscheinlichkeit des Attraktor-Gebirges A und umgekehrt, je kleiner Q ist, desto geringer ist sie. Mit sinkendem Wachstumsquotienten fällt die Durchsetzungswahrscheinlichkeit stark. Wenn zum Beispiel N=40 beträgt und Q=5 ist, wenn also W_a fünfmal so groß ist wie W_k, dann liegt die Durchsetzungswahrscheinlichkeit bei 90%. Bei Q=3 beträgt sie noch 50%, bei Q=2 noch 20% und bei Q=1 und Q=0,5 ist D nahezu Null.

Wenn Q≤1 ist, dann muss N gegenüber N_a vergleichsweise sehr klein sein, damit das Attraktor-Gebirge A eine nennenswerte Durchsetzungswahrscheinlichkeit besitzt. So müsste beispielsweise bei Q=0,5 N≤15 sein, um eine Durchsetzungswahrscheinlichkeit größer als 50% zu erreichen.

Die zuvor entwickelten vier Nischen-Simulationen lassen sich auch so miteinander kombinieren, dass bei einer bestimmten funktionalen Abhängigkeit jeweils nicht nur eine, sondern zwei Größen variiert werden. In Abbildung 10 ist dies einmal exemplarisch für die funktionale Abhängigkeit D = f(Q) dargestellt. Hier variieren sowohl N als auch N_a, und zwar so, dass sie jeweils im gleichen Verhältnis zueinander stehen. Dazu wurden folgende Wertepaare gewählt: $N=100/N_a=50$, $N=50/N_a=25$, $N=20/N_a=10$ und $N=10/N_a=5$. Die sich daraus ergebende fünfte Nischen-Simulation sieht folgendermaßen aus:

Nischen-Simulation 5: D = f(Q), N_a = variabel und N = variabel

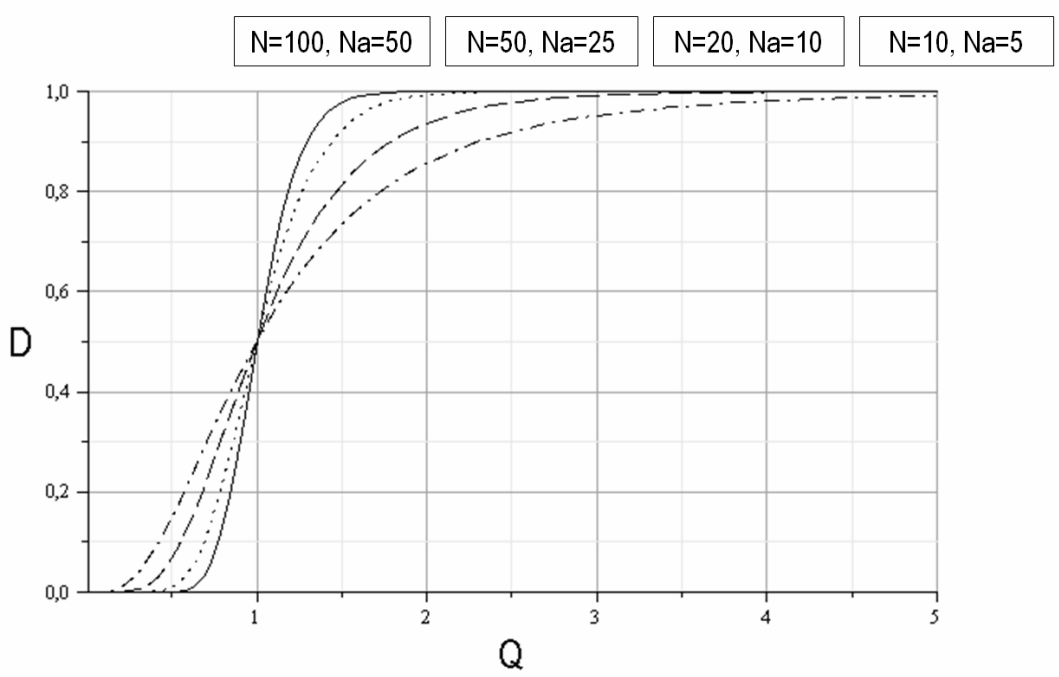


Abbildung 10, Quelle: eigene Darstellung

Diese Simulation verdeutlicht sehr anschaulich, dass die Durchsetzungswahrscheinlichkeit des Attraktor-Gebirges A nicht nur von dem Verhältnis abhängt, in dem N und N_a zueinander stehen, sondern auch von deren absoluten Größen. Wenn Q≤1 ist, wenn als W_a kleiner als W_k ist, dann ist die Durchsetzungswahrscheinlichkeit bei kleineren absoluten Werten höher als bei größeren. Bei einem Wachstumsquotienten von 0,5 beträgt beispielsweise die Durchsetzungswahrscheinlichkeit für den Fall N=10 und N_a=5 immerhin etwa 20%, wogegen sie für den Fall N=100 und N_a=50 auf nahezu 0% sinkt. Ist jedoch Q≥1, ist also W_a größer als W_k, dann kehrt sich die Situation um. Hier ist die Durchsetzungswahrscheinlichkeit bei größeren absoluten Werten höher als bei kleineren. Bei einem Wachstumsquotienten von 1,5 beträgt zum Beispiel die Durchsetzungswahrscheinlichkeit für den Fall N=100 und N_a=50 fast 100%, wogegen sie für den Fall N=10 und N_a=5 etwa 70% beträgt.

Entsprechende kombinierte Simulationen lassen sich auch für die funktionalen Abhängigkeiten D = f(N) und D = f (N_a) entwickeln, worauf hier jedoch verzichtet wird, weil bereits die fünf vorgestellten Simulationen grundlegende Einblicke in die Wachstumsdynamik hyperselektiver Attraktor-Landschaften ermöglicht haben, die nun zusammenfassend resümiert werden sollen.

Die Durchsetzungswahrscheinlichkeit des Attraktor-Gebirges A hängt nicht nur von Q, sondern auch sehr stark von den Anfangsgrößen N_a und N ab. Dies macht die Bedeutung von Nischen in hyperselektiven Attraktor-Landschaften sehr anschaulich deutlich. Wenn ein neues Attraktor-Gebirge A in einer solchen Landschaft überhaupt eine Chance haben soll, sich gegenüber dem konventionellen und tendenziell übermächtigen Attraktor-Gebirge K zu behaupten und es langfristig zu verdrängen, dann besteht eine solche Chance nur, wenn die beiden Attraktor-Gebirge A und K in einer speziellen Art und Weise aufeinandertreffen. Die Konkurrenzbedingung ist umso günstiger für A, je größer Q, je größer N_a und je kleiner N ist. Metaphorisch gesprochen entsteht dadurch ein vergleichsweise kleiner Wettbewerbsraum, in dem A und K auf gleicher Augenhöhe miteinander konkurrieren, weil K in diesem kleinen, eng begrenzten Raum nicht seine volle hyperselektive Macht entfalten kann, während A relativ stark gegenüber K ist. Ein solches Attraktor-Bassin wird als Nische bezeichnet.

Solche Nischen sind eine wesentliche Möglichkeit, hyperselektive Attraktor-Landschaften aufzubrechen. Andere Möglichkeiten sind die Veränderung der Attraktor-Landschaft durch exogone, externe Einflüsse (Leydesdorff/van den Besselaar 1998). Durch die Struktur einer Nische (großes N_a, großes Q, kleines N) sind die hyperselektiven Selektionsregeln in gewisser Weise neutralisiert. Nachdem sich ein neues Attraktor-Gebirge A in einer solchen Nische gegenüber dem konventionellen Attraktor-Gebirge K behauptet hat, kann es dann Zug um Zug durch Nischenerweiterung oder Nischenschaffung größere Bereiche der Attraktor-Landschaft erobern und sich im Gesamtsystem durchsetzen. Nischen sind damit notwendige, wenngleich nicht hinreichende Bedingungen für die Durchsetzung einer neuen Technologie.

Dies gilt auch und gerade für den automobilen Innovations-Raum. Im Unterschied zu dem zuvor diskutierten vereinfachten Modell besitzt diese hyperselektive Attraktor-Landschaft nicht nur ein neues Attraktor-Gebirge, das sich gegen das Gebirgsmassiv K zu behaupten und durchzusetzen sucht, sondern mehrere. Neben dem Brennstoffzellen-Elektroantrieb ($F_{8/11}$, $F_{8/14}$ und $F_{8/15}$) stellen beispielsweise auch der Batterie-Elektroantrieb ($F_{7/13}$), die Hybridantriebe (etwa $F_{5/7}$, $F_{5/8}$, $F_{6/7}$, $F_{6/8}$) oder der Wasserstoffmotor ($F_{1/14}$, $F_{1/15}$) solche neuen Attraktor-Gebirge dar. Jede dieser Technologien hat nur in Nischen eine Chance, sich gegen die Hyperselektivität des fossilen Verbrennungsmotors mit seiner »DiesOtto«-Optimierung zu behaupten.

Nischen als Schutzräume in hyperselektiven Attraktor-Landschaften lassen sich auf sehr unterschiedliche Weise entwickeln, so etwa durch Subventionen, gesetzliche Regelungen, förderpolitische Instrumentarien etc. Solchen Nischenbildungen wohnt jedoch tendenziell ein Moment der Stagnation inne. Es besteht immer die latente Gefahr, dass die Nischenbewohner mehr daran interessiert sind, sich in ihrem Schutzraum dauerhaft häuslich einzurichten, als möglichst schnell aus ihm heraus zu kommen. Um dieser Gefahr zu begegnen, ist es notwendig, von vornherein Nischen als geschützte aber marktförmige Innovations-Räume zu organisieren. Den grundsätzlichen Ansatzpunkt für eine solche Strategie wollen wir im Folgenden skizzieren.

Frühe Märkte

Nischen und frühe Märkte hängen sehr eng miteinander zusammen, sind jedoch nicht identisch. Um beide voneinander abzugrenzen, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. So kann beispielsweise die Marktförmigkeit oder der Marktcharakter als eine besondere Eigenschaft von Nischen verstanden werden, die diese neben anderen Eigenschaften besitzen. Es verhielte sich dann in etwa so, wie mit einem Stein und der Eigenschaft der Schwere. Jeder Teil des Steins besitzt diese Eigenschaft, es gibt kein Stück, das nicht schwer wäre. Zugleich ist jedoch der Stein mehr als nur schwer, er besitzt eine charakteristische Form, hat eine spezifische Farbe, besteht aus einem bestimmten Material usw.

Um Nischen und frühe Märkte zu unterscheiden, schlagen wir hier einen anderen Weg ein und greifen dabei auf den Begriff des »Wendepunktes« zurück. Als Wendepunkt wird gemeinhin ein Punkt auf einem Funktionsgraphen bezeichnet, an welchem dieser Graph sein Krümmungsverhalten verändert. In den zuvor diskutierten Nischen-Simulationen sind solche Wendepunkte sehr leicht erkennbar. Betrachtet man zum Beispiel die in Abbildung 7 dargestellte Nischen-Simulation 2, dann gibt es dort, wie Abbildung 11 zeigt, vier Wendepunkte.

Wendepunkte in der Nischen-Simulation 2

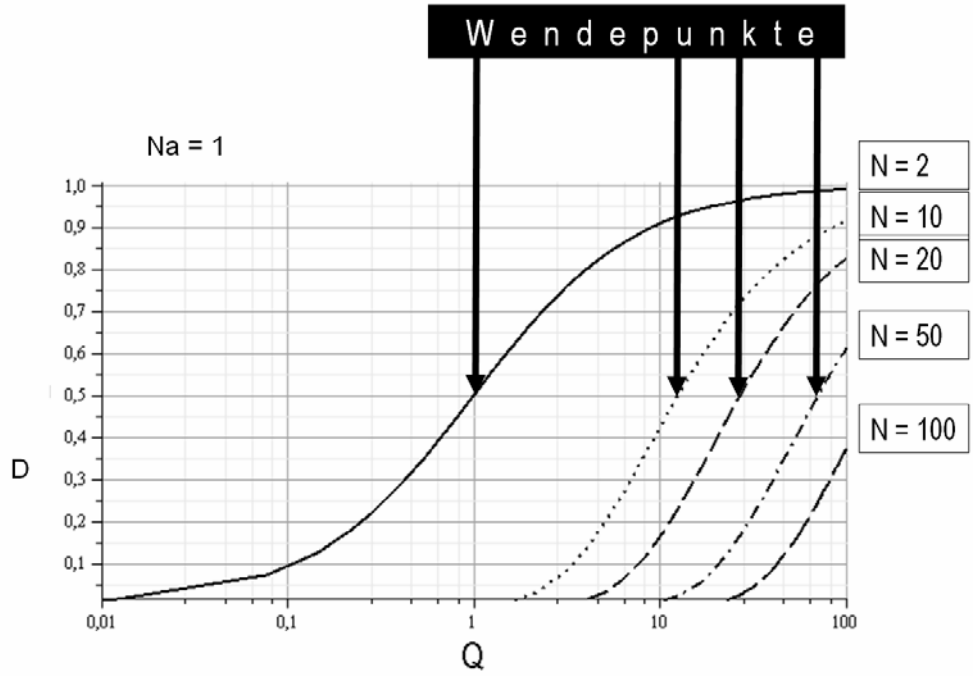


Abbildung 11, Quelle: eigene Darstellung

Jeder dieser vier Wendepunkte besitzt bestimmte Koordinaten D_w und Q_w. Für den Funktionsgraphen N=2 ist beispielsweise D_w=0,5 und Q_w=1. Ausgehend von diesen Wendepunkten und ihren Koordinaten D_w und Q_w lässt sich ein früher Markt als jenes Gebiet innerhalb einer Nische verstehen, in dem die Durchsetzungswahrscheinlichkeit größer ist als Dw, in dem also gilt: $D \geq D_w$. Betrachtet man wieder die Nischen-Simulation 2, dann macht die folgende Abbildung 12 anschaulich deutlich, wo dieses Gebiet innerhalb der Nische liegt.

Wendepunkte und früher Markt in der Nischen-Simulation 2

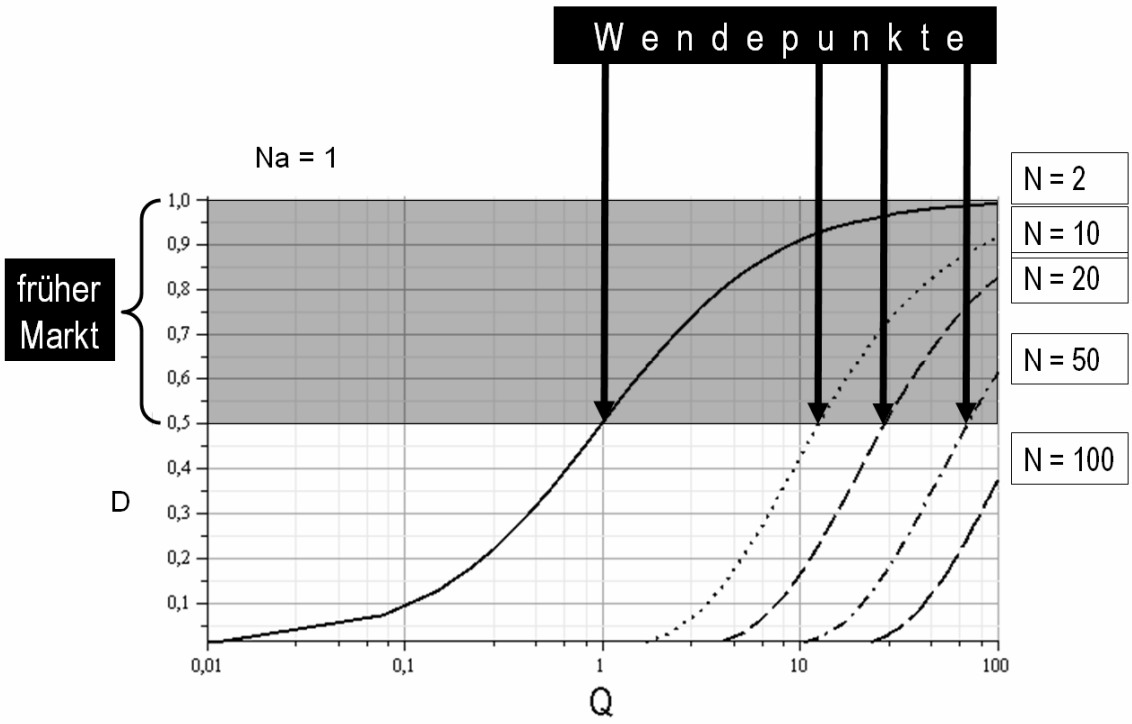


Abbildung 12, Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 12 zeigt, dass Nischen und frühe Märkte nicht einfach identisch sind. Frühe Märkte erwachsen aus Nischen und sind ein bestimmtes Gebiet innerhalb derselben, und zwar jenes Gebiet, in dem sich die Durchsetzungswahrscheinlichkeit »gewendet« hat und größer als 50% ist. Oder, anders gesagt: Ein früher Markt ist jenes Gebiet einer Nische, in dem die durch die Hyperselektion erzeugte Asymmetrie zwischen konventioneller und alternativer Technologie aufgehoben ist und beide »auf gleicher Augenhöhe« miteinander konkurrieren.

Ausgehend von diesem Ansatz werden wir nun den frühen Markt in den oben diskutierten fünf Nischen-Simulationen bestimmen und aus den unterschiedlichen Simulations-Perspektiven diskutieren. Wir beginnen mit der Nischen-Simulation 1, bei der D als Funktion von Q dargestellt, N konstant gesetzt und N_a variiert wird. Hier ergibt sich für den frühen Markt folgendes Bild:

Simulation früher Markt 1: D = f(Q), N_a = variabel und N = konstant

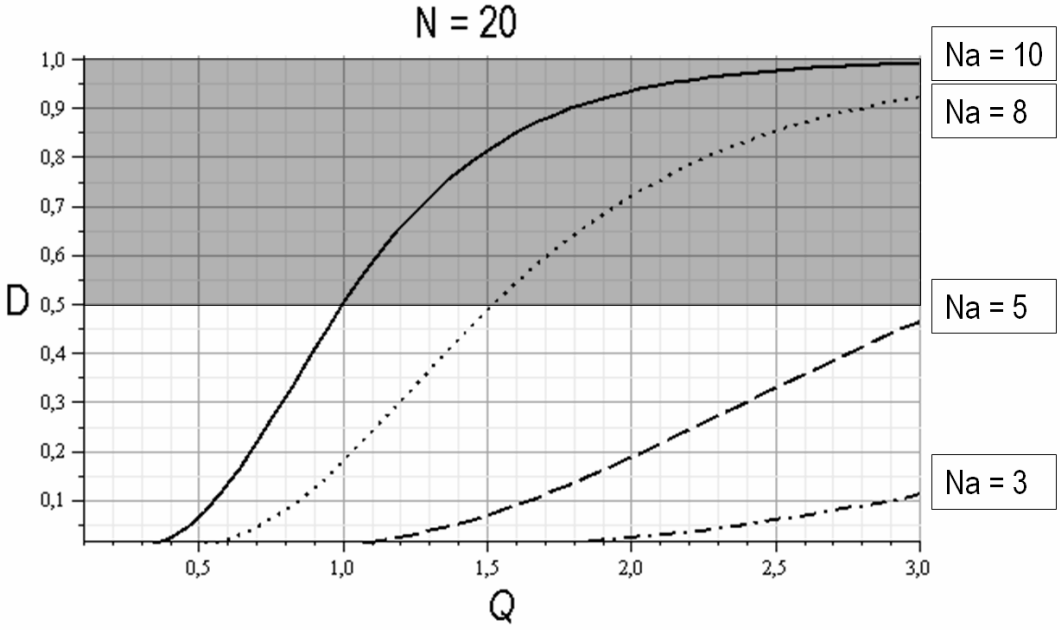


Abbildung 13, Quelle: eigene Darstellung

Je kleiner N_a ist, desto unwahrscheinlicher ist es, dass das Attraktor-Gebirge in einen frühen Markt hineinwächst. Selbst wenn Q größer 1 ist, wenn also die Wachstumsrate W_a die Wachstumsrate W_k übertrifft, wird dies mit sinkendem N_a immer unwahrscheinlicher, ja unmöglich. Wenn zum Beispiel N_a=5 oder N_a=3 ist, dann wird selbst dann nicht das Niveau eines frühen Marktes erreicht, wenn W_a dreimal so groß ist wie W_k. Und wenn N_a=1 ist, wie dies in dieser Simulation auch unterstellt wurde, dann ist diese Annahme in der Grafik überhaupt nicht zu erkennen, weil die Durchsetzungswahrscheinlichkeit nahezu Null ist. Das heißt, realistische Chancen in das Gebiet eines frühen Marktes zu kommen, bestehen nur dann, wenn N_a größer als 5 ist. Mit Werten kleiner 5 ist dieses Gebiet nicht zu erreichen.

Die in Abbildung 14 dargestellte zweite Simulation zeigt, wie der frühe Markt aussieht, wenn die Durchsetzungswahrscheinlichkeit D von der Größe N abhängt. Hier wird D ebenfalls als Funktion von Q dargestellt, jedoch N_a konstant gesetzt und N variiert.

Simulation früher Markt 2: D = f(Q), N = variabel und N_a = konstant

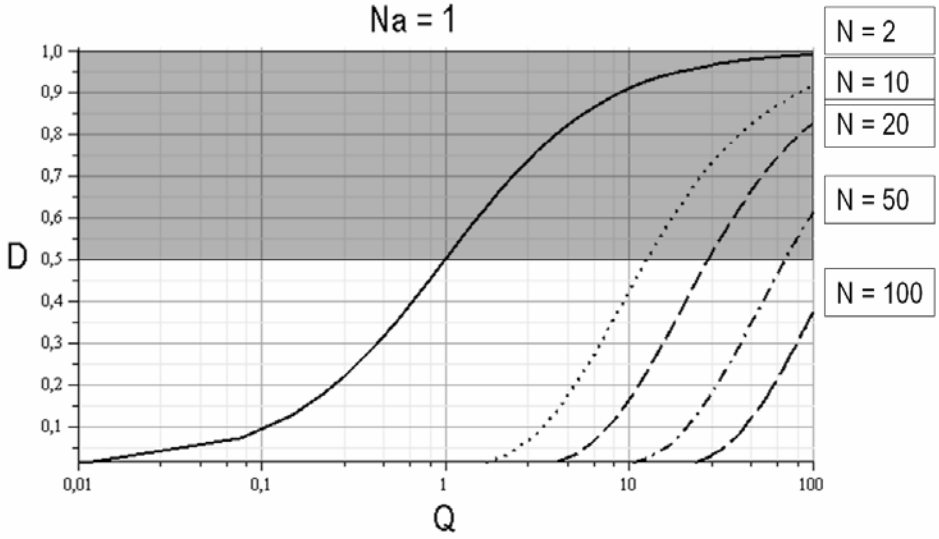


Abbildung 14, Quelle: eigene Darstellung

Je größer N ist, desto geringer ist bei konstantem N_a die Wahrscheinlichkeit, dass das Attraktor-Gebirge A sich zu einem frühen Markt auswächst. Bei N=2 oder N=10 wird das Gebiet des frühen Marktes schon dann erreicht, wenn Q relativ klein ist, wenn also die Wachstumsrate W_a nur geringfügig größer ist als die Wachstumsrate W_k. Wenn N jedoch größer 50 ist, dann bedarf es schon exorbitanter Wachstumsraten W_a, damit das Niveau eines frühen Marktes erreicht wird. So muss beispielsweise im Fall N=50 W_a zehnmal so groß wie W_k sein, um auf ein solches Niveau zu kommen. Und der Fall N=100 zeigt, dass selbst dann, wenn W_a hundertmal so groß wäre wie W_k, das Attraktor-Gebirge A nicht in das Gebiet des frühen Marktes vorstoßen könnte.

Die in Abbildung 15 dargestellte dritte Simulation zeigt, wie der frühe Markt beschaffen ist, wenn die Durchsetzungswahrscheinlichkeit D vom Wachstumsquotienten Q abhängt. Hier wird D als Funktion von N_a dargestellt, N konstant gesetzt und Q variiert.

Simulation früher Markt 3: D = f(N_a), Q = variabel und N = konstant

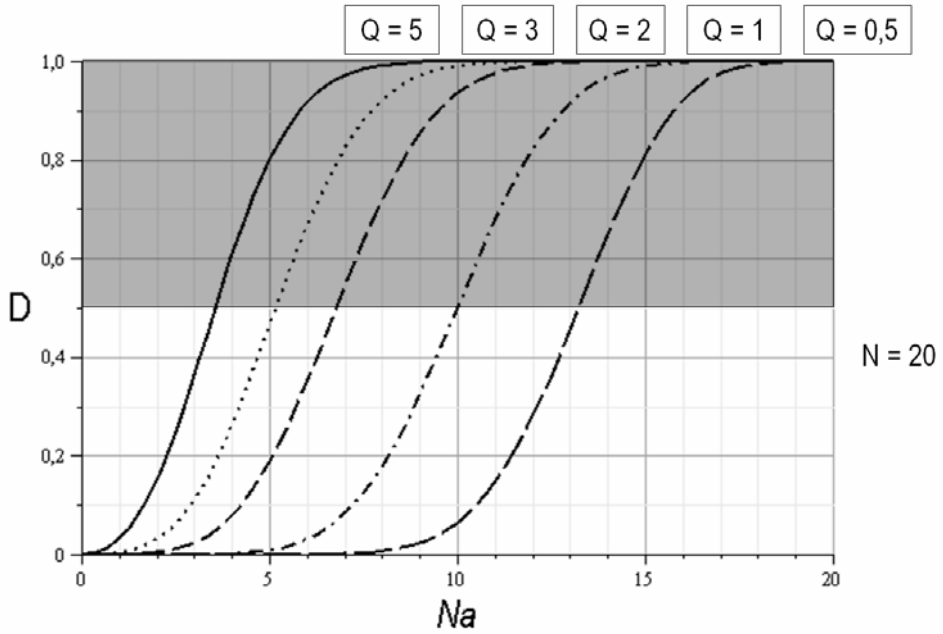


Abbildung 15, Quelle: eigene Darstellung

Je größer Q, je größer also W_a gegenüber W_k, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Attraktor-Gebirge A das Niveau eines frühen Marktes erreicht. Und umgekehrt, je kleiner Q ist, desto geringer ist sie. Wenn zum Beispiel Q=5 ist, wenn also W_a fünfmal so groß ist wie W_k, dann wird der frühe Markt bereits erreicht, wenn N_a größer als 3 ist. Bei Q=3 muss N_a schon größer als 5 und bei Q=1 größer als 10 sein, damit dies gelingt. Und wenn Q=0,5 beträgt, wenn also W_a nur halb so groß ist wie W_k, dann muss N_a bereits größer als 13 sein, um in das Gebiet des frühen Marktes zu kommen.

Die in der Abbildung 16 dargestellte vierte Simulation zeigt ebenfalls, wie der frühe Markt aussieht, wenn die Durchsetzungswahrscheinlichkeit D vom Wachstumsquotienten Q abhängt. Hier wird jedoch D als Funktion von N dargestellt, N_a konstant gesetzt und Q variiert.

Simulation früher Markt 4: D = f(N), Q = variabel und N_a = konstant

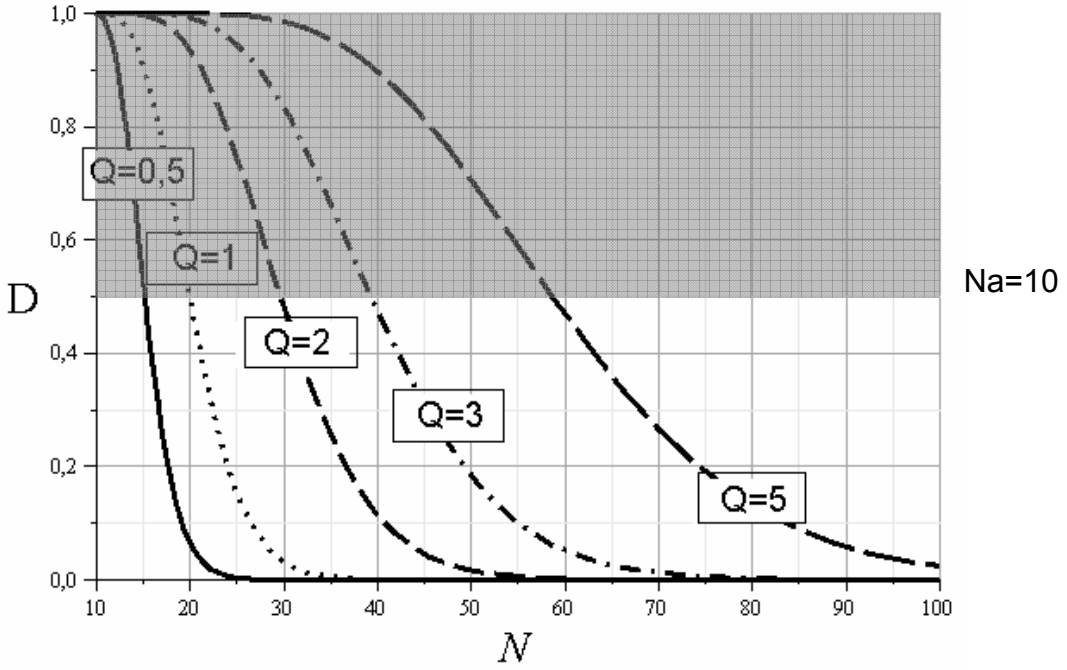


Abbildung 16, Quelle: eigene Darstellung

Je größer Q, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Attraktor-Gebirge A das Niveau eines frühen Marktes erreicht. Und umgekehrt, je kleiner Q ist, desto geringer ist sie. Wenn zum Beispiel Q=5 ist, dann wird der frühe Markt auch bei einem vergleichsweise hohen N, und zwar von ungefähr N=58 erreicht. Bei Q=3 muss N schon auf unter 40 sinken damit dies gelingt. Und bei Q=1 darf N nicht größer als 20 sein, damit das Attraktor-Gebirge in den frühen Markt hineinwachsen kann.

Wie bei den Nischen-Simulationen lassen sich auch die hier vorgestellten vier Simulationen des frühen Marktes so miteinander kombinieren, dass bei einer bestimmten funktionalen Abhängigkeit jeweils nicht nur eine, sondern zwei Größen variiert werden. In Abbildung 17 wird dies, wie bei den Nischen-Simulationen exemplarisch für die funktionale Abhängigkeit D = f(Q) dargestellt. Das heißt, hier variieren wieder sowohl N als auch N_a, und zwar so, dass sie jeweils im gleichen Verhältnis zueinander stehen. Die entsprechenden Wertepaare lauten wieder: $N=100/N_a=50$, $N=50/N_a=25$, $N=20/N_a=10$ und $N=10/N_a=5$.

Simulation früher Markt 5: D = f(Q), N_a = variabel und N = variabel

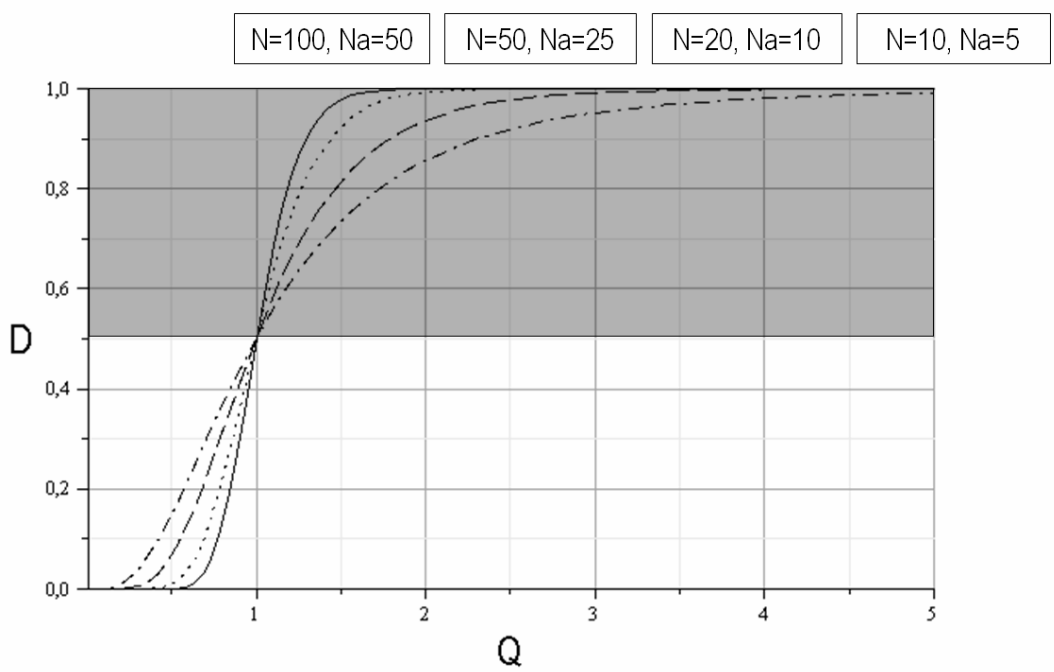


Abbildung 17, Quelle: eigene Darstellung

Diese Simulation fasst vorher getrennte Perspektiven zusammen und macht sehr anschaulich deutlich, dass die Herausbildung eines frühen Marktes nicht nur von dem Verhältnis abhängt, in dem N und N_a zueinander stehen, sondern auch von deren absoluten Größen. Und sie zeigt, dass ein früher Markt eine Entwicklungsdynamik entfaltet, die sich von anderen Gebieten der Nische unterscheidet. Vergleicht man zum Beispiel die beiden Fälle $N=100/N_a=50$ einerseits und $N=10/N_a=5$ andererseits miteinander, dann ergibt sich folgendes Bild:

Im vormarktlichen Bereich, also im Bereich D≤50%, entfaltet der zweite Fall eine größere Dynamik als der erste. Er erreicht bei gleichem Q eine höhere Durchsetzungswahrscheinlichkeit. Während bei Q=0,5 der erste Fall noch eine Durchsetzungswahrscheinlichkeit von nahezu 0% hat, liegt sie beim zweiten bereits bei ungefähr 18%. Bildlich gesprochen strebt der Fall mit den kleinen absoluten Größen schneller dem frühen Markt zu als der Fall mit den großen absoluten Größen. Letzterer läuft sozusagen langsamer an.

Wenn jedoch der frühe Markt erreicht ist, kehrt sich die Situation um. Nun entwickeln die großen Größen eine höhere Dynamik als die kleinen. Der Fall zwei fällt deutlich hinter den Fall eins zurück. Während bei Q=1,5 im ersten Fall die Durchsetzungswahrscheinlichkeit fast 100% beträgt, liegt sie im zweiten Fall bei ungefähr 73%. Und um die gleiche Durchsetzungswahrscheinlichkeit wie die des ersten Falls zu erreichen, müsste Q≥4 sein.

Grob und metaphorisch zusammengefasst ließe sich sagen: Kleine Ensemble-Größen besitzen ihre größte Dynamik im vormarktlichen Bereich, während große Ensemble-Größen ihre Eigendynamik erst voll im frühen Markt entfalten.

Wie bei den Nischen-Simulationen lassen sich natürlich auch hier weitere kombinierte Simulationen für die funktionalen Abhängigkeiten D = f(N) und D = f(N_a) entwickeln.

Lässt man nun noch einmal die zuvor skizzierten Simulationen Revue passieren, dann zeigt sich, dass sich der frühe Markt nicht nur über die Durchsetzungswahrscheinlichkeit D, sondern ergänzend dazu auch über Q, N und N_a definieren lässt. Aufbauend auf den vorherigen Simulationen wird im Folgenden kurz ein mögliches Prinzip einer solchen präziseren Definition skizziert. Das bisher betrachtete Gebiet des frühen Marktes lässt sich nämlich durch die Parameter Q, N und N_a weiter einengen, und zwar auf den Bereich, in dem die

Kurven verlaufen. Dieser Bereich innerhalb des frühen Marktes ist dunkelgrau markiert. Damit ergeben sich dann im Einzelnen folgende Darstellungen:

Präzisierung früher Markt 1: D ≥ 0,5 und Q ≥ 1 (N = 20 und N_a = variabel)

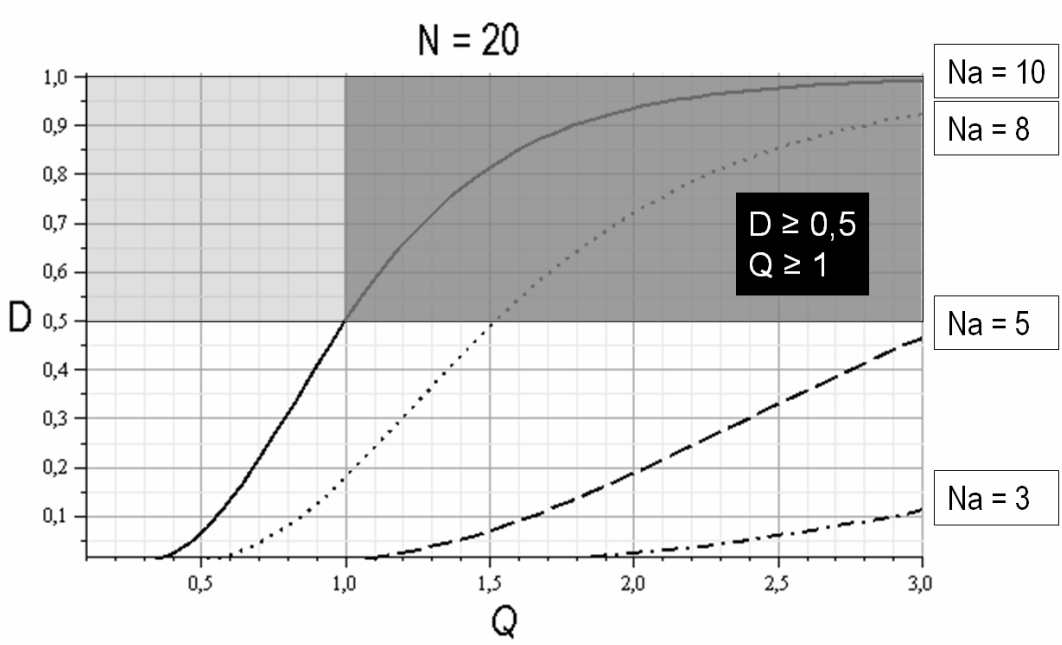


Abbildung 18, Quelle: eigene Darstellung

Präzisierung früher Markt 2: D ≥ 0,5 und Q ≥ 1 (N = variabel und N_a = 1)

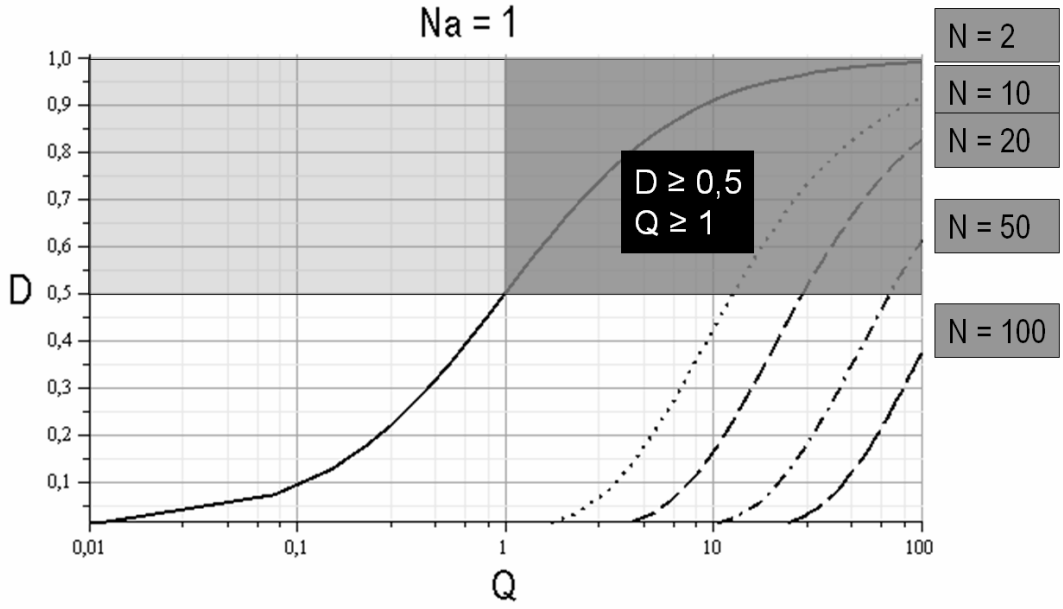


Abbildung 19, Quelle: eigene Darstellung

Präzisierung früher Markt 3: D ≥ 0,5 und N_a ≥ 3 (Q = variabel und N = 20)

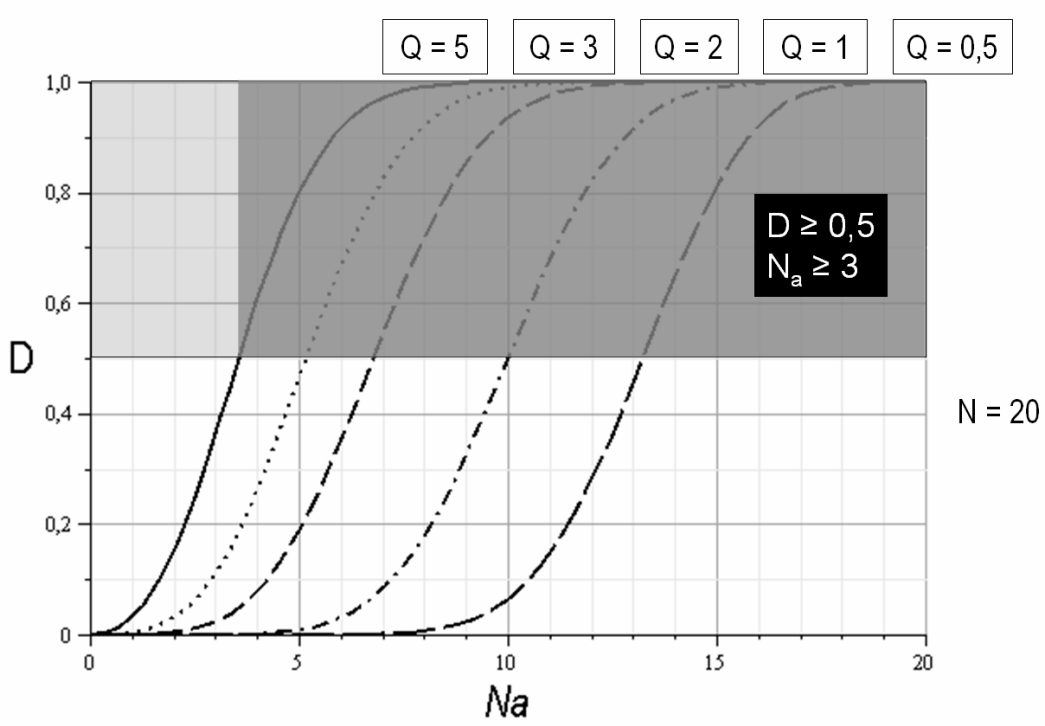


Abbildung 20, Quelle: eigene Darstellung

Präzisierung früher Markt 4: D ≥ 0,5 und N ≤ 58 (Q = variabel und N_a = 10)

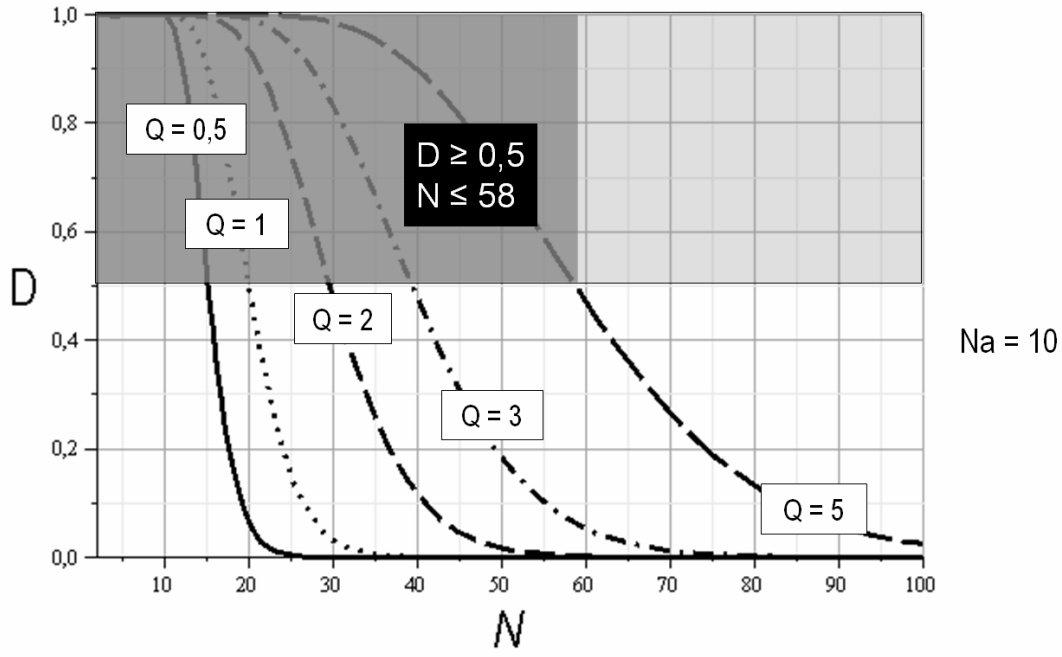


Abbildung 21, Quelle: eigene Darstellung

Soweit das Prinzip einer möglichen Definitions-Präzisierung. Diese Präzisierung des frühen Marktes, die hier nur an Hand der Grafiken illustriert wurde, lässt sich in dreierlei Hinsicht erweitern: Erstens lässt es sich auch auf die kombinierten Fälle (siehe Abbildung 17) anwenden, zweitens kann es formalisiert werden und drittens schließlich lässt es sich durch Plausibilitätsbetrachtungen ergänzen, in denen theoretisch mögliche, aber praktisch hochgradig

unwahrscheinliche Konfigurationen ausgeschlossen werden. Eine solche Erweiterung würde jedoch den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen und bleibt einer gesonderten Untersuchung vorbehalten.

Die hier herausgearbeiteten Charakteristika für Nischen und frühe Märkte können einen Leitfaden für empirische Untersuchungen bilden. Als Faustformel gilt dabei die Annahme, dass N möglichst klein und N_a sowie Q möglichst groß sein muss, damit sich das alternative Attraktor-Gebirge in der hyperselektiven Landschaft behaupten und durchsetzen kann. Im Folgenden werden wir eine spezielle Nische, und zwar die Omnibus-Nische, und den daraus erwachsenden frühen Markt untersuchen. Diese Untersuchung ist darauf fokussiert zu prüfen, ob und inwiefern sich die hier modellhaft entwickelten Annahmen empirisch bestätigen und wie sie gegebenenfalls präzisiert werden müssen.

2. Bus-Markt: Technischer Kern, Marktspezifika und Nischencharakter

Die Schutzfunktion von Nischen für Innovationen wurde in Kapitel 1 dargelegt. Nischen wurden dort als ein spezielles Attraktor-Bassin definiert in dem die hyperselektive Dominanz der Konvention eingeschränkt ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine alternative Technologie (Attraktor A) gegen die existierende Konvention (Attraktor K) durchsetzen kann, wird umso größer je günstiger die Anfangsbedingungen für Attraktor A sind. Nischen mit einer Durchsetzungswahrscheinlichkeit größer 50% wurden als »frühe Märkte« bezeichnet, da sie über das Potenzial verfügen, aus dem Schattendasein der Konvention herauszutreten und diese gar zu verdrängen.

In diesem Kapitel wollen wir ganz praktisch am Beispiel des städtischen Busbetriebs von Verkehrsunternehmen das Hyperselektionsmodell aus Kapitel 1 anwenden und dabei aufzeigen, dass sich nicht-konventionelle und alternative Antriebskonzepte in diesem Bereich leichter gegen die hyperselektive Macht des Verbrennungsmotors behaupten können, als dies im Pkw-Bereich der Fall ist. Dabei stellt der städtische Busbetrieb sogar eine »Doppel-Nische« dar, denn er schützt Innovationen in zweifacher Weise: Einmal stellt die Fokussierung auf Busse eine »Anwendungs-Nische« im Bereich der Mobilität dar und außerdem bilden die Busflotten von Verkehrsbetrieben einen räumlich abgegrenzten Aktionsbereich. Dieser wird im Weiteren als »Raum-Nische« bezeichnet. Es wird sich zeigen, dass bei großen Busflotten sogar eine weitere, dritte Nische innerhalb der Raum-Nische notwendig ist, damit Innovationen überleben können. Wir werden in diesem Kapitel auf diese Begriffe näher eingehen und hierfür die Marktspezifika des Omnibusmarktes betrachten.

Bevor wir uns aber mit dem Busmarkt in Kapitel 2.2 und deren Nischenbedeutung in Kapitel 2.3 beschäftigen, wollen wir zunächst den technologischen Kern des Omnibusses etwas näher betrachten.

2.1 Technischer Kern

Den technologischen Kern jeglicher Art von Kraftfahrzeugen bilden das Antriebs- und das Kraftstoffsystem. Zusammengefasst bilden sie eine das Fahrzeug charakterisierende Fahrzeug-Konfiguration $F_{a/k}$. Die Dimensionierung und die Technologieauswahl für ein Kraftfahrzeug hängen von der Anwendung ab, also davon, ob beispielsweise ein Moped, ein Pkw oder Bus angetrieben werden soll. Jegliche Innovationen in den verschiedenen Anwendungsbereichen werden an dem heutigen Stand der Technik gemessen und in punkto Technologie, Ökonomie und Ökologie mit der Konvention verglichen. Im Gegensatz zum Pkw stellt im Bus-Bereich der Dieselmotor die alleinige Konvention und damit das »Maß der Dinge« dar. Abbildung 22 verdeutlicht, welche Anforderungen an den technologischen Kern eines modernen Stadtbusses gestellt werden. Um langfristig mit dem Dieselmotor konkurrieren zu können, müssen alternative Antriebs- und Kraftstoffkonzepte diesen Anforderungen genügen. Jedes Busmodell hat natürlich »seine« Daten und die Werte bzw. die Intervallgrenzen sind daher keineswegs als fix anzusehen, sondern dienen lediglich als Richtgröße.

Anforderungen an einen modernen Stadt-Omnibus

Bustyp	3-türiger Linienbus
Plätze	ca. 30-40 Sitzplätze ca. 60-70 Stehplätze
Antriebsleistung	150 bis 250 kW
Höchstgeschwindigkeit	80-100 km/h
Beschleunigung	~15-20 sec (0 auf 60 km/h)
Leergewicht	~10.000 bis 12.000 kg
Schadstoffausstoß	EURO 5/EEV
Lebensdauer	~10-12 Jahre
Laufleistung	~1.000.000 bis 1.500.000 km
Kaltstart	bis -20°C
Kosten	~ 250.000 EUR

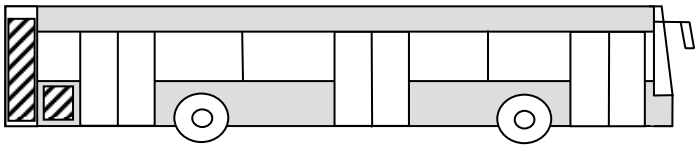


Abbildung 22: Quelle: eigene Darstellung, eigene Schätzungen

Das Antriebs- und das Kraftstoffsystem in Abbildung 22 ist als Blackbox dargestellt. In Kapitel 3 werden wir in Form einer Bus-Innovations-Matrix einen Überblick über mögliche Bus-Konfigurationen zur Ausstattung der Blackbox geben und untersuchen, welche der Möglichkeiten als Innovationen anzusehen sind und welche sich noch im Inventionsstadium bewegen. Anschließend wird geprüft, ob die als Innovationen identifizierten Möglichkeiten auch den dargestellten technischen, ökologischen und ökonomischen Anforderungen an einen Bus genügen, sie übertreffen oder noch das Nachsehen haben. Hierfür werden wir in Kapitel 4 laufende Felderprobungen untersuchen.

Zum weiteren Verständnis der Matrix und der Felderprobungen gibt Abbildung 23 einen ersten Überblick über das Innovationsgeschehen bei Bussen. Die Darstellung zeigt mögliche Antriebsvarianten für Omnibusse und jeweils geeignete Kraftstoffarten. In der »antriebstypologischen« Einteilung wird zwischen thermischen, Hybrid- und Elektroantrieben unterschieden.

Antriebstechnologische Einteilung von Kraftomnibussen

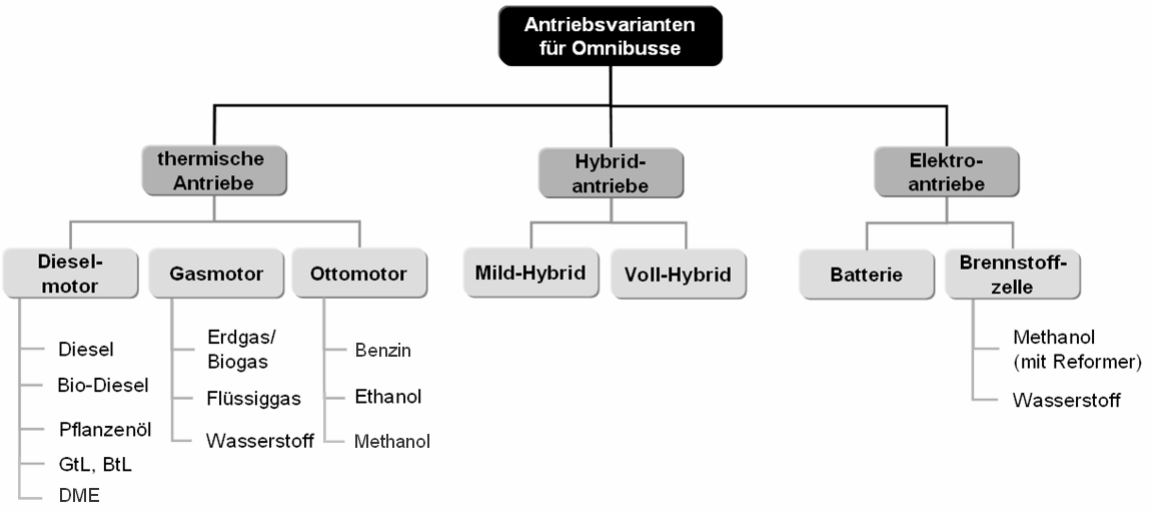


Abbildung 23, Quelle: eigene Darstellung

Der dieselmotorisch angetriebene Omnibus kann als »die« Konvention schlechthin im Bereich der Busantriebe angesehen werden. Der Dieselmotor zeichnet sich gegenüber dem Ottomotor durch seine hohe Laufleistung, Robustheit und aufgrund seines höheren Wirkungsgrades durch geringere Verbrauchswerte aus. Außerdem entfaltet er bereits bei niedrigen Drehzahlen ein höheres Drehmoment. Gerade bei Bussen, welche mehr oder weniger 24 Stunden regelmäßig im Einsatz sind, kommen diese Stärken des Selbstzünders gegenüber dem Ottomotor zum Tragen. MAN nennt beispielsweise Laufleistungen für seine 6-Zylinder-Bus-Dieselmotoren von 1.000.000 bis zu 1.500.000 Kilometern und Service-Intervalle von 120.000 Kilometern (MAN 2007a: 9). Die Lebensdauer eines Busses liegt bei rund 12 Jahren (ebd.). Der Siegeszug des Dieselmotors über den Ottomotor begann im Busbereich bereits in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts. Rudolf Diesel erfand 1890 den nach ihm benannten Motor und entwickelte ihn bei MAN bis zur Anwendungsreife (Mikroökonomie 2007; Knie 1991). MAN präsentierte 1923 seinen ersten Dieselbus (NEOMAN 2005: 14). Heute, im Jahr 2007, registrierte das ZFZR (zentrales Fahrzeugregister) des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) insgesamt 83.549 Busse, davon sind rund 98% mit konventionellen Diesel-Motoren ausgestattet (KBA 2007a: 23). Der Dieselmotor ist in keiner anderen Fahrzeugart so dominant wie bei Omnibussen.

Bei dem Einsatz von gasförmigen Kraftstoffen wie Erdgas oder Wasserstoff spielt das Ottoprinzip allerdings auch bei Bussen eine Rolle, da diese Kraftstoffe eine Fremdzündung benötigen. Diese »Gasmotoren« den Ottomotoren zuzuordnen, wäre allerdings im Busbereich etwas irreführend, da die Entwicklungen auf den Dieselmotoren basieren. Aufgrund der notwendigen Fremdzündung macht es aber auch keinen Sinn, sie als Dieselmotoren zu bezeichnen. Um dieses Dilemma zu lösen, sprechen wir im Weiteren einfach von Gasmotoren. Lediglich 1.429 Kraftomnibusse mit Gasmotor sind im Jahr 2007 durch das KBA registriert (ebd.), eingeschlossen sind dabei alle Arten von Erd- und Flüssiggas sowie Fahrzeuge mit bivalentem Antrieb. Damit liegt der Anteil der Gasmotoren am gesamten Kraftomnibusbestand bei 2%. Die Zahlen verdeutlichen, dass alle von der Diesel-Konvention abweichenden Antriebe im Bereich der Bus-Anwendung gegenwärtig von geringer Bedeutung sind.

Dasselbe Dilemma liegt übrigens auch bei Methanol und Ethanol vor. Für die beiden Alkohole ist eine Fremdzündung notwendig, aber auch hier bildet der Dieselmotor die Entwicklungsbasis. Es handelt sich sozusagen um Dieselmotoren mit Zündkerzen. In Deutsch-

land haben Alkoholmotoren noch keine Bedeutung. Anders ist dies jedoch in Schweden oder Brasilien. So bietet beispielsweise der schwedische Bushersteller Scania Ethanolbusse an (Scania 2007a).

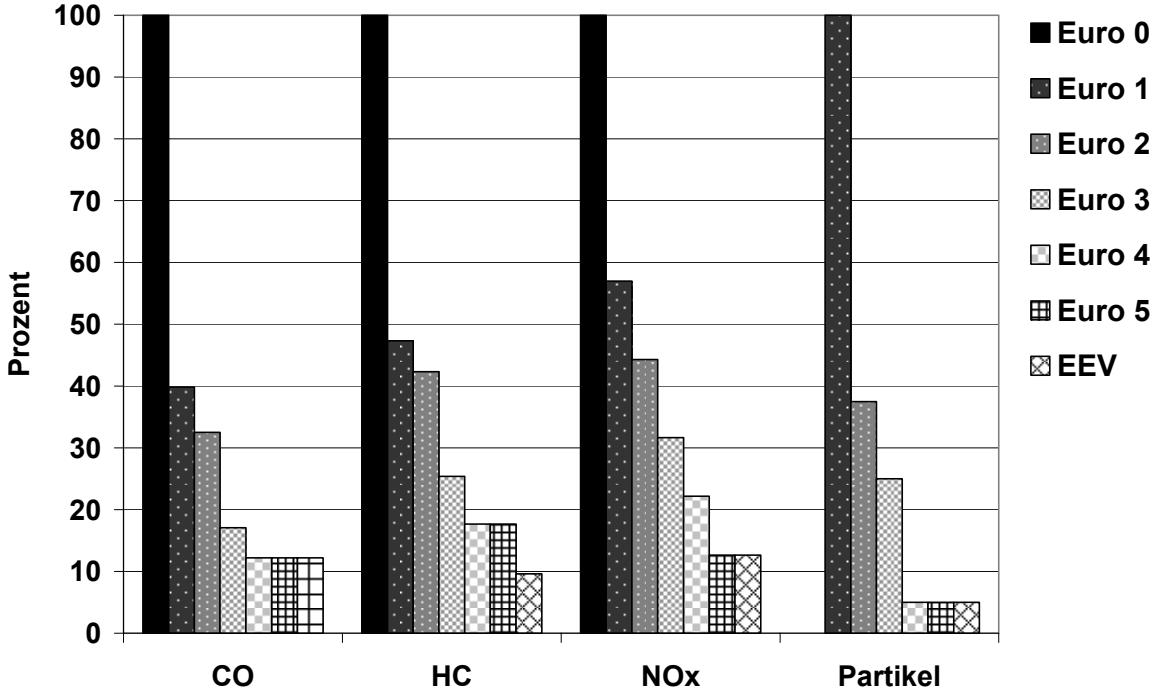
Bei den Hybridbussen wurde auf eine Aufführung von Kraftstoffen verzichtet, da prinzipiell alle thermischen Fahrzeug-Konfigurationen auch hybridisiert werden können. Die dargestellte antriebsseitige Einteilung in Mild- und Vollhybride wurde aus dem Pkw-Bereich übernommen. Auch bei Bussen gibt es unterschiedliche Hybridisierungsausprägungen, allerdings hat sich die begriffliche Unterscheidung noch nicht in der Form wie beim Pkw etabliert.

Batterie- und Brennstoffzellenantriebe stellen rein elektrische Antriebe dar. In Brennstoffzellen kann Strom elektrochemisch direkt aus Wasserstoff oder mit vorgeschaltetem Reformer auch aus Methanol gewonnen werden. In Batterie-Fahrzeugen wird der Strom »getankt« und in Batterien gespeichert. Daher spricht man auch bei Batterien von Energiespeichern und bei Brennstoffzellen von Energiewandlern.

Emissionsgrenzwerte

Als ein wesentlicher Innovationstreiber in der Automobilindustrie wurde in Kapitel 1 bereits die Emissionsgesetzgebung diskutiert. Demzufolge hängt die Zukunftsfähigkeit und Innovationskraft der in Abbildung 23 dargestellten Bus-Antriebsvarianten maßgeblich von deren Emissionsverhalten ab. Ebenso wie für Pkw gibt es auch für Nutzfahrzeuge, also für Lkw und Busse, eine europäische Abgasnorm, welche im Weiteren vorgestellt wird (UBA 2007a: 2007b). Grundlage hierfür sind die Richtlinien 88/77/EWG 91/542/EWG und 1999/96/EG. In der Tabelle in Abbildung 24 ist die Entwicklung der Gesetzgebung von 1988 (Euro 0) bis heute dargestellt. Das Balkendiagramm veranschaulicht die prozentuale Reduktion der einzelnen Schadstoffgrenzwerte. Die Basis von 100% bilden dabei die Euro 0-Werte bzw. bei den Partikelemissionen die Euro 1-Werte, da Euro 0 keine Reglementierung für Partikel vorsah. Auf eine Darstellung der Rauchwerte wurde in dem Balkendiagramm verzichtet. Zusätzlich zu den Euro-Stufen wurden die über Euro 5 hinausgehenden EEV-Werte dargestellt. EEV steht dabei für »Enhanced Environmentally Friendly Vehicle«.

Abgasgrenzwerte für Lkw und Busse



	Gültig ab	CO	HC	NOx	Partikel	Rauch-trübung
		[g/KWh]	[g/KWh]	[g/KWh]	[g/KWh]	[1/m]
Euro 0	1988/90	12,3	2,6	15,8	--	--
Euro 1	1992/93	4,9	1,23	9,0	0,4	--
Euro 2	1995/96	4,0	1,1	7,0	0,15	--
Euro 3	2000	2,1	0,66	5,0	0,1	0,8
Euro 4	2005	1,5	0,46	3,5	0,02	0,5
Euro 5	2008	1,5	0,46	2,0	0,02	0,5
EEV		1,5	0,25	2,0	0,02	0,015

Abbildung 24, Quelle: eigene Darstellung; UBA 2007a, 2007b

Aus der Darstellung geht hervor, dass mit der Stufe Euro 4 gegenüber 1998 alle Emissionswerte um 80 bis 90% reduziert werden konnten. Mit der Einführung von Euro 5 im Jahr 2008 werden nochmals die Stickoxid-Emissionen um 1,5 g/KWh auf 2 g/KWh reduziert. Der EEV-Standart sieht weitere Verschärfungen im Bereich der Kohlenwasserstoffemissionen (HC) und der Rauchtrübung vor. Im Unterschied zu den Pkw-Grenzwerten werden die Werte von Lkw und Bussen nicht in Gramm pro km (g/km) sondern in Gramm pro Kilowattstunde (g/KWh) vorgeschrieben. Das bedeutet, dass der Motor eines Busses pro Kilowatt Antriebsleistung und innerhalb einer Stunde nicht mehr als die jeweilig vorgeschriebenen Grenzwerte ausstoßen darf. Der zulässige Schadstoffausstoß ist also im Gegensatz zum Pkw von der Antriebsleistung und nicht von der Strecke abhängig. Ein direkter Vergleich mit den Pkw-Grenzwerten ist daher nicht möglich. Vergleiche sind nur indirekt möglich indem die relativen Werte (g pro km bzw. g pro KWh) in absolute Wert umgerechnet Werte. Hierfür sind beim Bus Werte für die Motorleistung und Betriebsdauer festzulegen, beim Pkw ist eine Wegstrecke zu definieren.

2.2 Marktspezifika

Bedeutung des Busverkehrs

Der Omnibus ist nach dem Pkw das zweitwichtigste Beförderungsmittel im Personenverkehr (VDA 2005: 87). Jährlich wird der Bus in Deutschland für mehr als 5 Mrd. Fahrten genutzt.

Im ÖPNV (öffentlichen Personennahverkehr) ist er mit etwas mehr als der Hälfte der Fahrten sogar die Nummer 1 (ebd.). Insbesondere in den Randlagen der Metropolen, in mittelgroßen Städten und vor allem auf dem Land bildet der Omnibus die tragende Säule des ÖPNV. Ohne den Bus würden die Menschen ein beträchtliches Stück ihrer Mobilität einbüßen. Einem Bestand von 82.600 ÖPNV-Bussen in Deutschland stehen 9.083 Stadtbahn- und Straßenbahnfahrzeuge gegenüber (ebd.: 88). Der Bus bietet eine Platzkapazität für 6,58 Mio. Personen gegenüber nur 1,17 Mio. Plätzen im restlichen öffentlichen Straßenpersonennahverkehr (ÖSPV). Während Stadt- und Straßenbahn 620 Mio. Fahrzeugkilometer im Jahr leisten, sind es beim Bus 3,18 Mrd., also mehr als fünfmal so viel (ebd.). Für weitere 120 Mio. Fahrgäste pro Jahr stellt der Reisebus zudem die bequeme »Großraumlimousine« für längere Strecken dar.

Derzeit sind auf dem deutschen Markt rund 6.200 Unternehmen im ÖSPV präsent, ein Großteil davon sind Privatbetriebe. Insgesamt beschäftigen alle Verkehrsdienstleister 178.000 Personen, von denen 69% im Fahrdienst tätig sind (Allianz pro Bus 2004: 10). Insgesamt hängen in Deutschland rund 750.000 Arbeitsplätze direkt und indirekt von der Omnibusbranche ab (ebd.).

Die aufgeführten Zahlen verdeutlichen die große wirtschaftliche Bedeutung des Busverkehrs in der Personenbeförderung und erwecken zunächst nicht den Eindruck eines Nischendaseins. Der Nischencharakter der Busanwendung wird erst bei einem Vergleich mit der wirtschaftlichen Bedeutung des Pkw deutlich. Verglichen mit dem motorisierten Individualverkehr (MIV) mittels Pkw spielt dann der ÖPNV nur noch eine untergeordnete Rolle im Verkehrssystem. Während der MIV täglich für über 147 Mio. Fahrten genutzt wird, werden mit dem ÖPNV täglich nur 18,435 Mio. Fahrten abgewickelt (VDA 2004: 107). Weiter liegt die weltweite Pkw-Produktion mit 55,7 Mio. Einheiten im Jahr 2001 (Automobil Produktion 2002b) um das 400-fache über der Busproduktion. Entsprechend Abbildung 25 produzierten die 10 größten Bushersteller in demselben Jahr nur rund 145.000 Busse. Der weltweite Busmarkt wird von Daimler dominiert.

Top Ten der Bushersteller im Jahr 2001

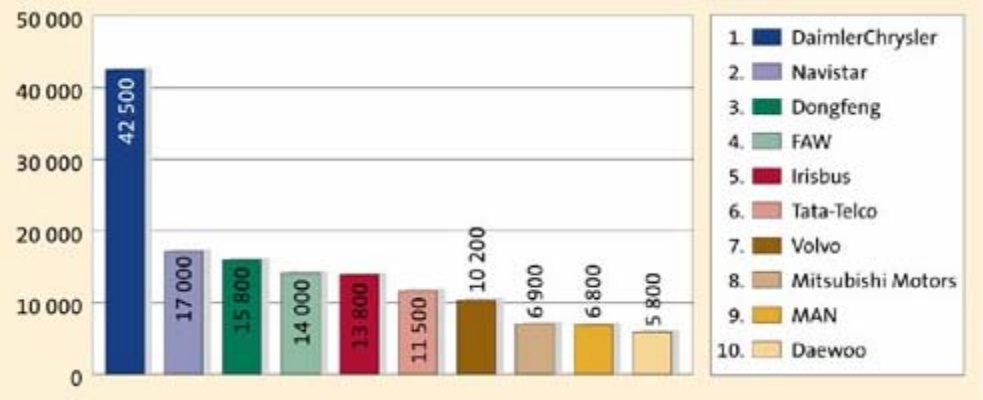


Abbildung 25, Quelle: Automobil Produktion 2002a

Die gesellschaftliche Bedeutung des ÖPNV darf nicht unterschätzt werden. Denn von 38,9 Mio. deutschen Privathaushalten leben immerhin rund acht Mio. ohne eigenen Pkw und die Menschen unternehmen täglich 26 Mio. Fahrten im ÖPNV (DIfU 2005: 5). Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, benötigt der ÖPNV staatliche Subventionen. Mehr als die Hälfte der im deutschen ÖPNV umgesetzten Gelder stammen aus öffentlichen Quellen (ebd.: 11). Dabei hat sich in Deutschland ein kaum verständliches und inkonsistentes Fördersystem herausgebildet. Für Aufgabenträger und die vorhandenen öffentlichen und privaten Unternehmen lohnt es sich oft eher, sich um Zuschussoptimierungen als um ein optimales Angebot zu kümmern (ebd.: 11).

Ein zukunftstauglicher ÖPNV muss jedoch betriebswirtschaftlich denken und handeln und kann sich kann sich nicht mehr auf eine dauerhafte staatliche Subvention verlassen. Um in dem von der EU mit der Verordnung 1370/2007 (Elste 2007: 6) angestrebten Wettbewerb bestehen zu können, sind effiziente Strukturen notwendig. In vielen Verkehrsunternehmen gab es in den letzten Jahren überaus erfolgreiche Restrukturierungsmaßnahmen, die zu teilweise deutlich angestiegenen Kostendeckungsgraden geführt haben (DIfU 2005: 11).

Ein effizienter ÖPNV bietet die Chance, die durch den motorisierten Individualverkehr verursachten gesundheitlichen und gesellschaftlichen Belastungen (Energie- und Ressourcenverzehr, Lärm, Luftschadstoffe, usw.) und deren Folgekosten zu verringern. So liegt der Verbrauch pro Fahrgast im vollbesetzten Gelenkbus bei ca. 0,4 Liter Dieselkraftstoff pro 100km, bei durchschnittlicher Besetzung liegt er bei 2,6 l/100km (Elste 2007: 16).

Der deutsche Markt für Omnibusse

Der deutsche Busmarkt in seiner Gesamtheit kann zunächst als eine Anwendungs-Nische im Bereich der Kraftfahrzeuge aufgefasst werden. In Deutschland waren im Jahr 2006 insgesamt etwa 55,5 Mio. Kraftfahrzeuge (Kfz) zugelassen. Mit knapp 47 Mio. Fahrzeugen stellt der Pkw mit Abstand das größte Segment im Kfz-Bereich dar. Im Bereich der Busse sind lediglich etwa 83.500 Fahrzeuge zugelassen (KBA 2007a: 23). Damit haben die Busse einen Anteil von gerade einmal 0,2% am gesamten Kraftfahrzeugbestand in Deutschland und führen im Vergleich zum Pkw ein Nischendasein.

Der Busmarkt im Einzelnen kann wiederum als eine Ansammlung vieler kleiner Nischen verstanden werden, in welchen Verkehrsunternehmen ihre Busflotten betreiben. Sie stellen unabhängige organisatorische Einheiten dar und agieren in einem räumlich begrenzten Territorium, daher bezeichnen wir sie als eine »Raum-Nische«. Der Busbetrieb eines Verkehrsunternehmens stellt also eine Nische in der Nische dar. Abbildung 26 verdeutlicht die beiden Nischenbegriffe.

Anwendungs- und Raumnischen

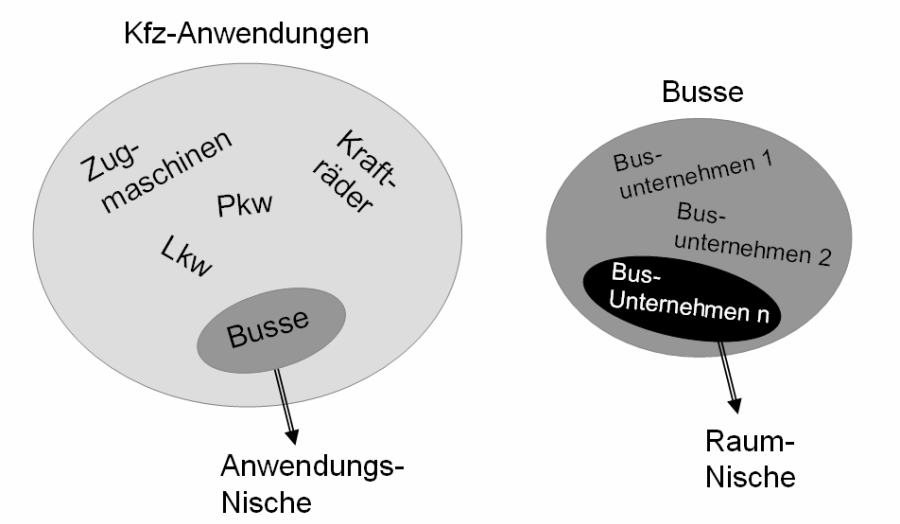


Abbildung 26, Quelle: eigene Darstellung

Im Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) sind die Unternehmen des ÖPNV und des Güterverkehrs in Deutschland organisiert. Die Sparte »Busse« des Verbands zählt 320 Mitgliedsunternehmen mit Busverkehr (VDV 2007). Vor allem sind die großen stadteigenen und privaten Verkehrsgesellschaften Mitglieder in dem Verband und daher für unsere Nischenbetrachtungen von besonderem Interesse. Die zahlreichen kleinen Busunternehmen hingegeben sind im Bundesverband Deutscher Omnibusunternehmer e.V. (BDO) zusammengeschlossen. Insgesamt zählt die Branche aktuell in Deutschland 5.444 private Omnibusunternehmen (BDO 2007).

Die Omnibusunternehmer und insbesondere die Verkehrsgesellschaften bilden die Nachfrage-Seite in dem deutschen Omnibusmarkt. Die Angebots-Seite bilden die Busher-steller. Bei dem deutschen Busmarkt handelt es sich um ein Angebots-Oligopol. Dies bedeutet, dass der deutsche Markt von wenigen Anbietern, genau genommen zwei, dominiert wird und es viele Nachfrager gibt.

Die beiden Hauptanbieter sind die Bushersteller Daimler und MAN bzw. deren Tochterunternehmen EvoBus und NEOMAN. Sie decken dabei 90% (Automobil Produktion 2002a) des deutschen Marktes ab. Die Evobus GmbH, eine 100%ige Tochter des Daimler-Konzerns, wurde 1995 nach der Übernahme der Bussparte der »Käsbohrer Fahrzeugwerke« gegründet und bietet ihre Fahrzeuge unter den Markennamen »Mercedes-Benz« und »Setra« an. MAN übernahm 2001 den Bushersteller NEOPLAN und bündelt seine Aktivitäten im Bereich der Omnibusse in der NEOMAN Bus Gruppe. Ähnlich wie Daimler wird eine Marken-Strategie mit den Marken »Neoplan Omnibusse« und »MAN-Omnibusse« verfolgt. Abbildung 27 fasst die wesentlichen wirtschaftlichen Kennzahlen der beiden Akteure zusammen.

Kennzahlen deutscher Omnibushersteller

Muttergesellschaft **Geschäftsfeld**	Daimler Van, Bus, Other	MAN Nutzfahrzeuge
Töchter	EvoBus GmbH	NEOMAN Bus Gruppe
Marken	Mercedes-Benz, Setra, Orion	NEOPLAN, MAN
Absatz 2006 (weltweit)	36.200 Stck.	7338 Stck.
Mitarbeiter 2006	k. A.	8.903 Mitarbeiter
Umsatz 2006	4,0 Mrd. EUR	1,5 Mrd. EUR
Martkanteil	k. A.	29,1% Deutschland
Produktbeispiel	 Stadtbus Mercedes-Benz Citaro Bild-Quelle: Mercedes-Benz	 Stadtbus MAN Lion's City Bild-Quelle: MAN

Abbildung 27, Quelle: eigene Darstellung, NEOMAN 2007, DaimlerChrysler 2007a: 10

2.3 Nischencharakter des Busmarktes

Nun wollen wir ausgehend von der im Kapitel 1 vorgestellten Nischen-Theorie verdeutlichen, warum und inwiefern der städtische Busverkehr ein »Nischen-Bassin« für alternative Antriebskonzepte darstellt und Schutz vor der hyperselektiven Macht des Dieselmotors bietet. Abbildung 28 soll veranschaulichen, dass sich durch die Wirkung von Anwendungs- und Raum-Nischen die Anfangsbedingungen für alternative Antriebskonzepte im Busbereich im Vergleich zum Pkw verbessern.

Doppel-Nischen als Schutzräume für Innovationen

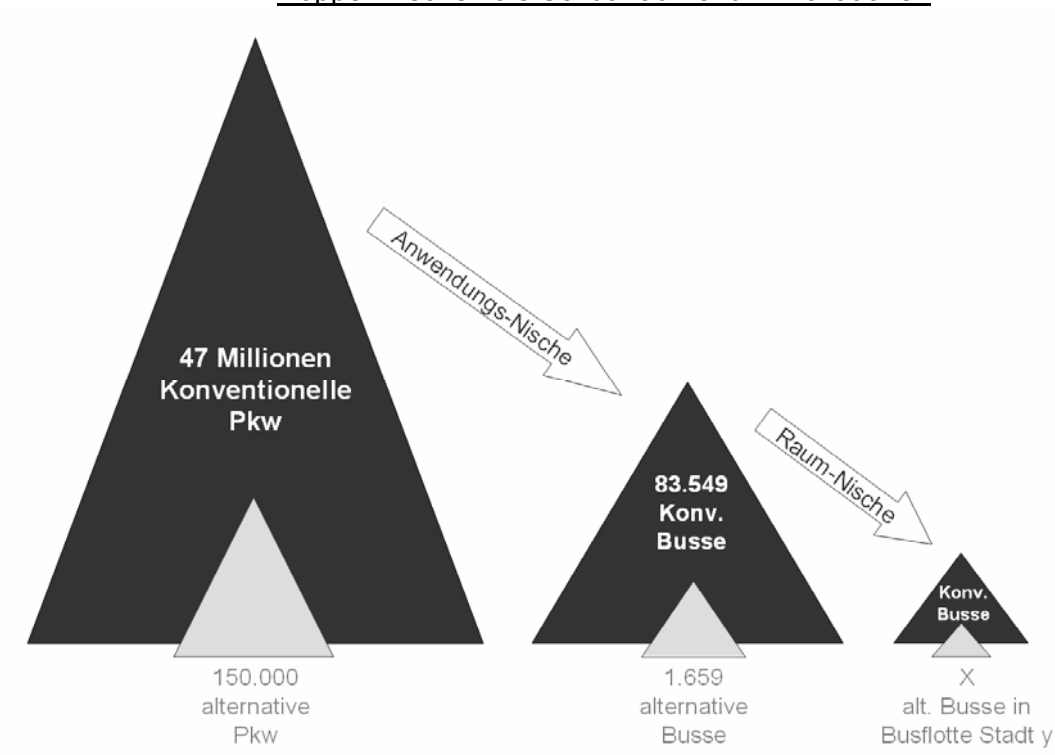


Abbildung 28, Quelle: eigene Darstellung; KBA 2007a: 5

Die Abbildung zeigt eine Gebirgslandschaft mit drei Attraktor-Bassins: Links das Pkw-Bassin, in der Mitte das Bus-Bassin und rechts ein Bassin mit einem Busbetrieb einer einzelnen Stadt. Im Weiteren als »Stadt-Bassin« bezeichnet.

Pkw-Attraktor-Landschaft

In diesem Attraktor-Bassin steht der Attraktor »alternative Pkw« uneingeschränkt dem Attraktor »konventionelle Pkw« gegenüber. Die Anfangsbedingungen sind also denkbar ungünstig, in Deutschland liegt der Pkw-Bestand 2007 bei knapp 47 Mio. Pkw (KBA 2007a: 5). Fasst man zu dem Attraktor »alternative Pkw« alle von der Konvention abweichenden Konzepte zusammen, so liegt der alternative Fahrzeugbestand bei etwas mehr als 150.000 (ebd.). Dies sind nicht einmal 0,3% am Gesamtbestand.

Noch extremer wäre die Situation, wenn man unter »alternative Pkw« nicht jegliche antriebs- und kraftstofftechnologische Innovationen zusammenfasst. Denn die 150.000 alternativen Fahrzeuge teilen sich entsprechend Abbildung 29 auf in Flüssiggas, Erdgas, Elektro-, Hybrid- und sonstige Fahrzeugarten. Die in Deutschland registrierten 11.275 Hybridfahrzeuge bilden beispielsweise nur noch einen verschwindend kleinen Anteil im Promillebereich (0,024%).

Anzahl alternativer Pkw im deutschen Fahrzeugbestand

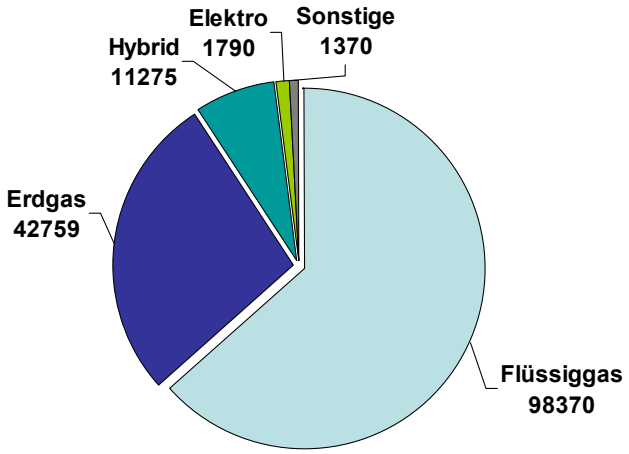


Abbildung 29, Quelle: eigene Darstellung; KBA 2007a: 5

Bus-Attroktorlandschaft

Nun soll die mittlere Gebirgslandschaft – also die Busse – quantifiziert und die Nischenfunktion von Bussen im Bereich der Kraftfahrzeugtechnik betrachtet werden.

Zunächst können Busse in Anlehnung an die DIN-Norm 70010 »Systematik der Straßenfahrzeuge; Begriffe für Kraftfahrzeuge, Fahrzeugkombinationen und Anhängefahrzeuge« (KBA 2007b: 4) in das Umfeld der Kraftfahrzeuge eingeordnet werden. Busse werden in der Norm als »Kraftomnibusse« bezeichnet und stellen, wie bereits erläutert, eine Anwendungs-Nische im Bereich der Kraftfahrzeuge dar. Rechtlich wird als Kraftomnibus ein Nutzfahrzeug zur Beförderung von Personen mit mehr als 8 Fahrgastplätzen (ohne den Fahrer) definiert.

Einteilung von Kraftfahrzeugen

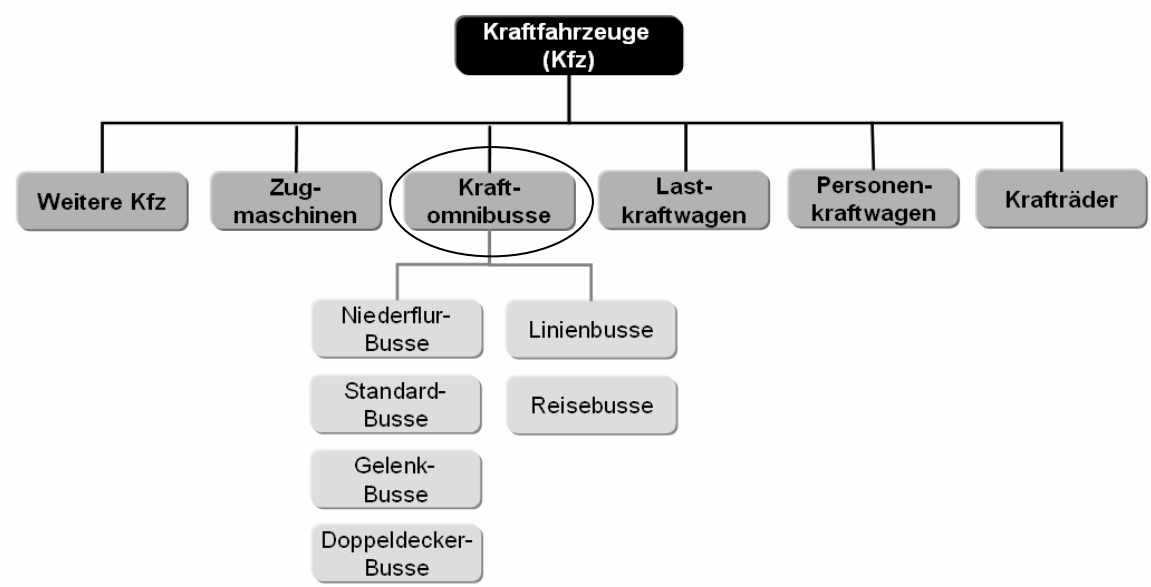


Abbildung 30, Quelle: eigene Darstellung, KBA 2007b: 4

Die weitere Feingliederung der Kraftomnibusse entspricht nicht der genannten Norm und wurde von uns vorgenommen. Der linke Ast stellt eine Einteilung nach der Ausführung der Busse dar, der rechte Ast eine Einteilung nach dem Einsatzgebiet. Unser Focus wird sich vor allem Standard-Bussen des ÖPNV widmen.

Für die Quantifizierung der Bus-Gebirgslandschaft in Deutschland dienen wiederum die Statistiken und Daten des KBA (KBA 2007a). Als Anfangsbedingung für den Attraktor »konventionelle Busse« kann der Busbestand von 83.549 Omnibussen zum 1.1.2007 angesehen werden. Dem gegenüber stehen 1.659 Busse mit »alternativen Fahrzeugkonzepten«. Die »alternativen Busse« setzen sich entsprechend den in Abbildung 31 aufgeführten Technologien zusammen.

Anzahl alternativer Busse im deutschen Omnibusbestand

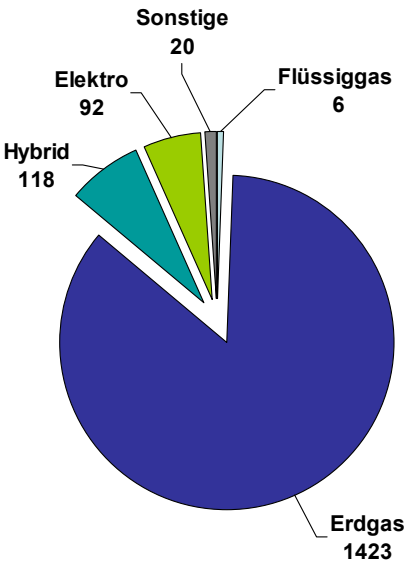


Abbildung 31, Quelle: KBA 2007a: 5; eigene Darstellung

Aus den Zahlen wird deutlich, dass »immerhin« 2% aller Busse eine Alternative zur Konvention darstellen. Bei den Pkw waren es lediglich 0,3%. Die Anfangsgröße für den alternativen Attraktor ist bei Bussen demnach eine Größenordnung besser als im Pkw-Bereich. Neben dieser rein quantitativen Betrachtung gibt es noch weitere Punkte, welche Busse als Nische für alternative Antriebe attraktiv machen, auf die im nächsten Kapitel detaillierter eingegangen wird.

Busflotten in der Attroktorlandschaft

Abschließend soll nun den rechten Gebirgszug in Abbildung 28 skizziert werden. Als Beispiele für die Wirkung von »Raum-Nischen« dienen die Busflotten der Städte Berlin, Frankfurt/Oder und Wien. Unter einer Raum-Nische verstehen wir ein räumlich begrenztes Gebiet in dem für Innovationen günstige Entwicklungsbedingungen herrschen und das sie »territorial« vor der dominierenden Konvention schützt. Die Busflotte einer Verkehrsgesellschaft wurde bereits als eine solche »Raum-Nische« identifiziert. Die Umrüstung einer Flotte bedeutet, dass die neue Technologie in einem größeren Markt (Stadtbusse) mit einer Anfangszahl von Nutzern (Bussen) startet, die wesentlich über einem Prototyp liegt. Metaphorisch gesprochen beginnt die Invasion der neuen Siedler in Gruppenstärke.

Wien stellt beispielsweise ein Erfolgsbeispiel für die Einführung von Flüssiggasbussen dar und präsentiert sich als die umweltfreundlichste Busflotte der Welt (Wiener Umweltbericht 2003: 4). Alle der rund 500 Fahrzeuge umfassenden Wiener Busflotte sind mit Flüssiggasmotoren ausgerüstet (ebd.). Bereits Anfang der 1960er Jahre begann man in Wien Busse mit Flüssiggas zu betrieben. Zwischen 1963 und 1977 wurden rund 300 Busse umgerüstet, damit sie mit einem Diesel-/Flüssiggasgemisch betrieben werden können (Wikipedia 2008a). In der Stadt Wien haben es Flüssiggasbusse also geschafft, sich zu etablieren und sogar den Dieselbus komplett aus der Flotte zu verdrängen. Der Betrieb von Flüssiggasbussen bei den Wiener Linien kann als Doppel-Nische aufgefasst werden, da erstens Busse per se eine Anwendungs-Nische im Bereich der Mobilität darstellen und zweites die territoriale Begrenzung auf die Wiener Linien eine Raum-Nische bildet. Doppel-Nischen stellen also gute Schutzräume für Innovationen dar. Außerhalb der Nische »Wien« sieht das Bild ganz anders aus. Es sei beispielsweise daran erinnert, dass in ganz Deutschland lediglich sechs Flüssiggasbusse zugelassen sind (KBA 2007a: 5).

In Deutschland gilt Frankfurt/Oder als Spitzenreiter in Sachen Erdgasantrieb. Die Stadtverkehrsgesellschaft Frankfurt/Oder (SVF) hatte bereits im Jahr 2004 alle 22 Dieselbusse gegen Erdgasbusse ausgetauscht und besitzt damit die sauberste Busflotte Europas (SVF 2004). Die Erneuerung der Frankfurter Busflotte war Teil eines Pilotprojekts des Bundesumweltministeriums zur Umsetzung von hohen Umweltstandards im Nahverkehr. Die neue Frankfurter Busflotte kostete 6,3 Mio. EUR. Das Bundesumweltministerium vermittelte einen zinslosen Kredit über 3,2 Mio., das Brandenburger Verkehrsministerium steuerte 3,1 Mio. EUR bei (ebd.). Die Ausgangsbedingungen für den neuen Attraktor »Erdgas-Bus« waren in der Oderstadt denkbar gut, da die bestehende Busflotte relativ klein ist (N=22). Über die Förderungen und den zinslosen Kredit konnte in der Nische die Konvention auf einmal verdrängt werden. In einer Großstadt mit einer größeren Busflotte sind die Anfangsbedingungen zunächst ungünstiger und die Einführung eines Attraktors muss stufenweise erfolgen.

Als drittes Beispiel wollen wir die Ausgangslage zur Einführung von wasserstoffbetrieben Bussen in der Stadt Berlin betrachten. Mit mehr als 1.300 Bussen stellen die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) den größten Busbetrieb Deutschlands (BVG 2007) dar. Im Rahmen des seit 2006 laufenden europäischen Projektes HyFleet:Cute sollen bis 2009 vierzehn MAN-Busse mit Wasserstoffverbrennungsmotor im Berliner Linienverkehr fahren. Damit betreibt die BVG die derzeitig weltweit größte Flotte an Wasserstoffbussen (BVG 2006). Die Pläne der Bundeshauptstadt sind ehrgeizig. Weitere 100 Busse sollen über das vor kurzem

gestartete nationale Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellen (kurz NIP H2/BZ) der Bundesregierung beantragt werden (Rösgen 2006: 15). Die BVG ist noch euphorischer und kündigte 2006 sogar eine Ausschreibung über 250 Wasserstoffbusse für das Jahr 2007 an (IWR 2006). Ausschlaggebend für diesen Schritt der BVG seien die bereits heute absehbaren Kostenentwicklungen für Wasserstoff als Kraftstoff gewesen. Steigende Diesel-, Erdgas- und Biodieselpreise stünden lokal sehr günstigen Bezugskonditionen für Wasserstoff gegenüber (ebd.) Nähere Details über die Ausschreibung der BVG waren zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Discussion Papers nicht verfügbar. Die Ausführungen verdeutlichen die große Bedeutung von öffentlich geförderten Demonstrationsprojekten zur Verbesserung der Anfangsbedingungen für Innovation. Sollte es im Rahmen des erwähnten Innovationsprogramms tatsächlich zu einer Aufstockung der Flotte um 100 Busse auf 114 Wasserstoffbusse kommen, so wird die Überlebenswahrscheinlichkeit der Innovation »Wasserstoffbus« deutlich ansteigen. Außerdem wird das Demonstrationsvorhaben die Bushersteller animieren, sich auf die geplante Ausschreibung der BVG zu bewerben. Bis zur Produktion einer größeren Stückzahl werden allerdings MAN und die anderen Bushersteller vermutlich erst einmal die Ergebnisse des HyFleet:Cute-Projekts abwarten. Abbildung 32 fasst die Pläne der Stadt Berlin zum Aufbau eine Wasserstoffbusflotte zusammen.

Pläne zur Einführung von Wasserstoffbussen in Berlin (3-Stufenplan)

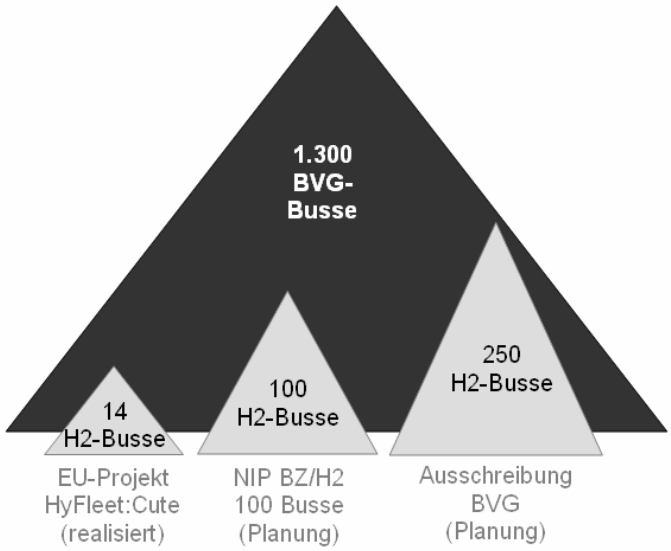


Abbildung 32, Quelle: eigene Darstellung

Das in Kapitel 1 vorgestellte Hyperselektionsmodell wird im Folgenden auf die Stadt Berlin angewendet. Ausgehend davon werden die Durchsetzungswahrscheinlichkeiten der Berliner Wasserstoffbusse ausgerechnet. Die 1.300 Busse umfassende BVG-Busflotte stellt die Gesamtgröße N des Bassins dar. Ausgehend von Abbildung 33 werden die Durchsetzungswahrscheinlichkeiten in den Stufen 1, 2 und 3 berechnet.

BVG-Bestand an Wasserstoff- und Dieselbussen

		Neue H2-Busse	Gesamtanzahl H2-Busse (N_a)	Verbleibende Dieselbusse (N_k)
Stufe 1	HyFleet:Cute	14	14	1286
Stufe 2	NIP	100	114	1186
Stufe 3	BVG-Ausschreibung	250	364	936

Abbildung 33, Quelle: eigene Darstellung

Für die Berechnung nehmen wir einen kummulativen Substitutionsprozess an. Dies bedeutet, dass die Busse der jeweiligen vorigen Stufe weiter betrieben werden und sich damit die Anzahl der H_2-Busse jeweils addieren. Die Flottengröße N bleibt dabei konstant und mit jedem neu beschafften H_2-Bus wird ein Dieselbus ausgemustert. Das Ergebnis der Berechnung ist der folgenden Abbildung 34 zu entnehmen.

Durchsetzungswahrscheinlichkeiten von H_2-Bussen in der BVG-Busflotte
(D=f(Q), N_a=variabel, N=konstant=1300)

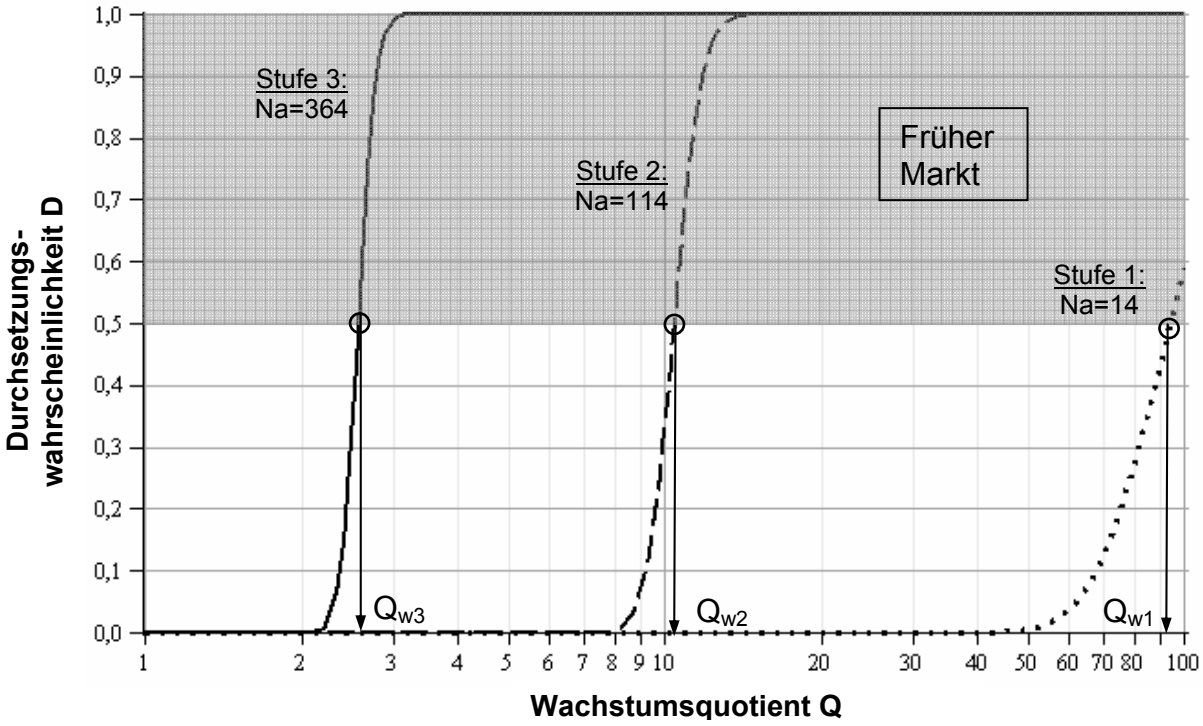


Abbildung 34, Quelle: eigene Darstellung

Die Abbildung zeigt für die Stufen 1, 2 und 3 die von dem Wachstumsquotienten Q abhängigen Durchsetzungswahrscheinlichkeiten D der Wasserstoffbusse. Die mindestens notwendigen Wachstumsquotienten Q_w, um in den Bereich des frühen Marktes zu gelangen, werden durch die Wendepunkte der drei Kurven charakterisiert und sind mit Q_{w1}, Q_{w2} und Q_{w3} bezeichnet. Der frühe Markt ist in der Abbildung an der grauen Fläche zu erkennen, in diesem Bereich haben die Wasserstoffbusse eine Durchsetzungswahrscheinlichkeit von über 50%.

Es überrascht nicht weiter, dass es mit kleiner werdendem N_a immer schwieriger wird, die Wasserstoffbusse in die Flotte zu integrieren. Bemerkenswert und ernüchternd ist allerdings die Erkenntnis, dass die Durchsetzungswahrscheinlichkeit bei einer Einführung einer sehr

kleinen Anzahl an H2-Bussen, wie dies in Stufe 1 der Fall ist, nicht nur gering sondern stochastisch gesehen aussichtslos ist. Die Kurve für N_a=14 verdeutlicht, dass ein Wachstumsquotient von über 90 ($Q_{W1} \geq 90$) notwendig ist, um in den Bereich des frühen Marktes zu gelangen. Auch in Stufe 2, also bei einer Einführung von insgesamt 114 Bussen, muss Q immer noch größer als 10 sein. Erst bei einer Realisierung der Stufe 3 haben die H_2-Busse eine realistische Chance, sich zu einem frühen Markt zu entwickeln. Dieser Vorgang ist keineswegs ein Selbstläufer, denn auch in diesem Fall müssen Wachstumsvorteile für die H_2-Busse eingeräumt werden. Diese Wachstumsvorteile bewegen sich allerdings im Unterschied zu Fall 1 und 2 in einem realisierbaren Rahmen, denn der kritische Wachstumsquotient für einen frühen Markt liegt im Fall 3 in dem Bereich zwischen 2 und 3, genau genommen bei Q_{W3}=2,57.

Abschließend wollen wir verdeutlichen, wie ein solches Wachstum realisiert werden kann. Eine wesentliche Rolle spielt dabei der Zeitraum über welchen die H_2-Busse beschafft werden. Denn umso »schneller« die H_2-Busse beschafft werden, desto größer ist die Wachstumsrate. Es macht beispielsweise einen Unterschied, ob alle 364 Busse der Stufen 1, 2 und 3 innerhalb eines Jahres oder verteilt über 10 Jahre beschafft werden. Um dies zu illustrieren, nehmen wir die folgenden zwei Beschaffungsszenarien an.

Im ersten Szenario wird ein so genannter natürlicher Ausmusterungsprozess unterstellt. Dies bedeutet, dass jeder ausgemusterte Dieselbus durch einen H_2-Bus ersetzt wird und zwar solange, bis Stufe 3 erreicht ist. Geht man weiter davon aus, dass die BVG im Durchschnitt einen Bus 13 Jahre betreibt, so werden jährlich 100 Dieselbusse ausgemustert und durch 100 Wasserstoffbusse ersetzt.

Im zweiten Szenario wird ein passives Ausmustern betrachtet. Dies bedeutet, dass die 100 ausgemusterten Dieselbusse sowohl durch neue Diesel- als auch durch H_2-Busse ersetzt werden.

Je nach Szenario ergeben sich unterschiedliche Wachstumsraten für die Busse und der Quotient der Wachstumsraten (Q) ist unterschiedlich. Als Quotient der Wachstumsraten wurde in Kapitel 1 in Gleichung 2 bereits das Verhältnis der Wachstumsrate der alternativen Technologie zu der Wachstumsrate der konventionellen Technologie definiert. Für das Berlin-Szenario kann dieser Quotient entsprechend der folgenden Gleichung ermittelt werden.

$$Q(t) = \frac{W_{H2}(t)}{W_{Diesel}(t)} \tag{4}$$

Die von der Zeit abhängigen Wachstumsraten können entsprechend folgender Gleichung berechnet werden. Es handelt sich dabei um eine spezielle Wachstumsrate, nämlich die jährliche Wachstumsrate. Diese wird auch als »Compound Annual Growth Rate« (CAGR) bezeichnet:

$$W = \left(\frac{N(t)}{N(t_o)} \right)^{1/\Delta t} \tag{5}$$

$N(t_o)$: Busbestand zum Zeitpunkt t_0
$N(t)$: Busbestand nach t Jahren
Δt: Anzahl Jahre zwischen t und t_o ($\Delta t = t - t_o$)

Zur Berechnung von Q beziehungsweise W für die beiden Szenarien nehmen wir jeweils an, dass die 14 H_2-Busse aus Stufe 1 auf einmal beschafft werden und diese den Anfangsbestand an H_2-Bussen zum Zeitpunkt t_0 darstellen.

Im Falle des natürlichen Ausmusterungsprozess (Szenario 1) werden dann maximal 100 Dieselbusse pro Jahr durch H_2-Busse ersetzt. Dies bedeutet, dass innerhalb von 3,5 Jahren die verbleibenden 350 H_2-Busse beschafft werden, um Stufe 3 zu erreichen. Nach Gleichung (5) beträgt die Wachstumsrate der H_2-Busse:

$$W_{H2} = \left(\frac{364}{14}\right)^{1/3.5} = 26^{0.286} = 2{,}54$$

Entsprechend beträgt die Wachstumsrate der Dieselbusse:

$$W_{Diesel} = \left(\frac{936}{1300}\right)^{1/3.5} = 0.72^{0.274} = 0{,}91$$

Eine Wachstumsrate kleiner 1 bedeutet eine Abnahme des Busbestandes und kann daher als »Schrumpfungsrate« angesehen werden. Der Quotient der beiden Wachstumsraten beträgt für Szenario 1 nach Gleichung (4):

$$Q_{Szenario\,1} = \frac{2.54}{0.91} = 2.8$$

Dieser Wert ist ausreichend, da er größer als der für einen frühen Markt notwendige Wert von Q_{W3}=2.56 ist. Dies bedeutet, dass durch eine natürliche Ausmusterung eine ausreichend hohe Wachstumsrate erreicht wird, um einen frühen Markt zu erreichen.

In dem zweiten Szenario nehmen wir ein passives Ausmustern an. Die 100 auszumusternden Busse werden beispielsweise durch 50 H_2-Busse und 50 Dieselbusse ersetzt. Demnach wird der Bestand an H_2-Bussen aus Stufe 3 erst nach 7 Jahren erreicht. Die Wachstumsraten liegen dann bei:

$$W_{H2} = \left(\frac{364}{14}\right)^{1/7} = 26^{0.143} = 1.59\,,\ W_{Diesel} = \left(\frac{936}{1300}\right)^{1/7} = 0.72^{0.143} = 0.96$$

Und der Wachstumsquotient beträgt:

$$Q_{Szenario\,2} = \frac{1.59}{0.96} = 1.65$$

Dieser Wert ist nicht mehr ausreichend, das heißt die H_2-Busse werden zu »langsam« eingeführt und durch die Dieselbusse verdrängt.

Zusammenfassend zeigt die Berechnung für Berlin: Die Wasserstoffbusse können in der BVG-Flotte nur dann in den Bereich eines frühen Marktes gelangen, wenn ausreichend viele H_2-Busse beschafft werden, so dass realisierbare Wachstumsraten erreicht werden. Eine halbherzige, kurzfristige Einführung weniger Busse ist stochastisch gesehen zum Scheitern verurteilt. Als realisierbar können beispielsweise Wachstumsraten angesehen werden, die durch einen natürlichen Ausmusterungsprozess erreicht werden können. Im Falle der BVG erwies sich bei einer Realisierung von Stufe 3 ein natürlicher Ausmusterungsprozess als hinreichend, um die geforderte Wachstumsrate zu erreichen. Ein passives Ausmustern erwies sich allerdings als unzureichend.

Ein über das natürliche Ausmustern hinausgehendes aktives Ausmustern wurde nicht betrachtet. Eine aktive Ausmusterung bedeutet, dass ein Verkehrsunternehmer zusätzlich zu den natürlich ausgemusterten Bussen noch funktionsfähige Busse »aktiv« aus seiner Flotte

nimmt. Ein solches aktives Ausmustern ist unwirtschaftlich, da natürlich jeder Unternehmer bestrebt ist, mit seinen Bussen möglichst lange Nutzungsdauern zu erzielen. Übrigens, schon die natürliche Ausmusterung stellt eine große Herausforderung für ein Verkehrsunternehmen dar. Die Realisierung von Stufe 3 bei der BVG, also die Anschaffung der 364 Busse, muss als äußerst ehrgeizig beurteilt werden. Es wurde schon erwähnt, dass es sehr fraglich ist, ob auf die Ausschreibung über 250 H_2-Busse derzeitig ein Bushersteller reagieren würde und bereit wäre, über 2,5 Jahre jährlich 100 H_2-Busse an die BVG zu liefern, so dass ein natürlicher Ausmusterungsprozess möglich ist. Außerdem würden für die BVG Mehrkosten im Millionbereich für die Beschaffung von 100 Wasserstoffbussen pro Jahr anfallen. Daher wäre die Einführung einer kleineren Anzahl an H_2-Bussen über einen längeren Zeitraum realistischer und rentabler. Dieses Vorgehen ist allerdings aus den Erkenntnissen der Hyperselektionsberechnung nicht empfehlenswert. Die einzige Chance, aus diesem Dilemma zu entkommen, ist die Nische zu verkleinern und eine weitere Nische in der Nische zu schaffen. Dies kann beispielsweise durch eine Konzentration der H_2-Busse auf bestimmte Stadtbezirke erfolgen. So könnte man beispielsweise zunächst nur diejenigen Bezirke umstellen, welche über eine Wasserstofftankstelle verfügen. Angenommen, es wird eine Nische über 400 Busse innerhalb der BVG-Flotte gebildet, so könnte bereits mit Ausbaustufe 2, also bei 114 H_2-Bussen, das Stadium eines frühen Markts erreicht werden. Die hierfür notwenige Wachstumsrate Q_w läge bei 2.5.

Diese Beobachtung führt uns zu einer verschachtelten Nischen-Theorie, nämlich einer »Nische in der Nische in der Nische«, welche besagt, dass in bestimmten Fällen eine Doppel-Nische, wie sie der städtische Busverkehr bereits darstellt, nicht mehr ausreichend ist. Für die BVG beispielsweise wäre die Bildung einer weiteren Nische sinnvoll, um schon mit weniger H_2-Bussen realistische Wachstumsquotienten zu erreichen.

Bei großen Städten ist also zu prüfen, ob eine Nischenbildung in der Nische notwenig ist, so dass sich Innovationen entfalten können. Für eine solche Prüfung soll der in Abbildung 35 dargestellte Entscheidungsbaum eine Hilfe sein. Er systematisiert das exemplarisch dargestellte Vorgehen aus dem Berlin-Szenario und kann Verkehrsunternehmen als Entscheidungshilfe bei der Anschaffung von Bussen mit alternativen Antriebskonzepten dienen.

Entscheidungsbaum Busanschaffung

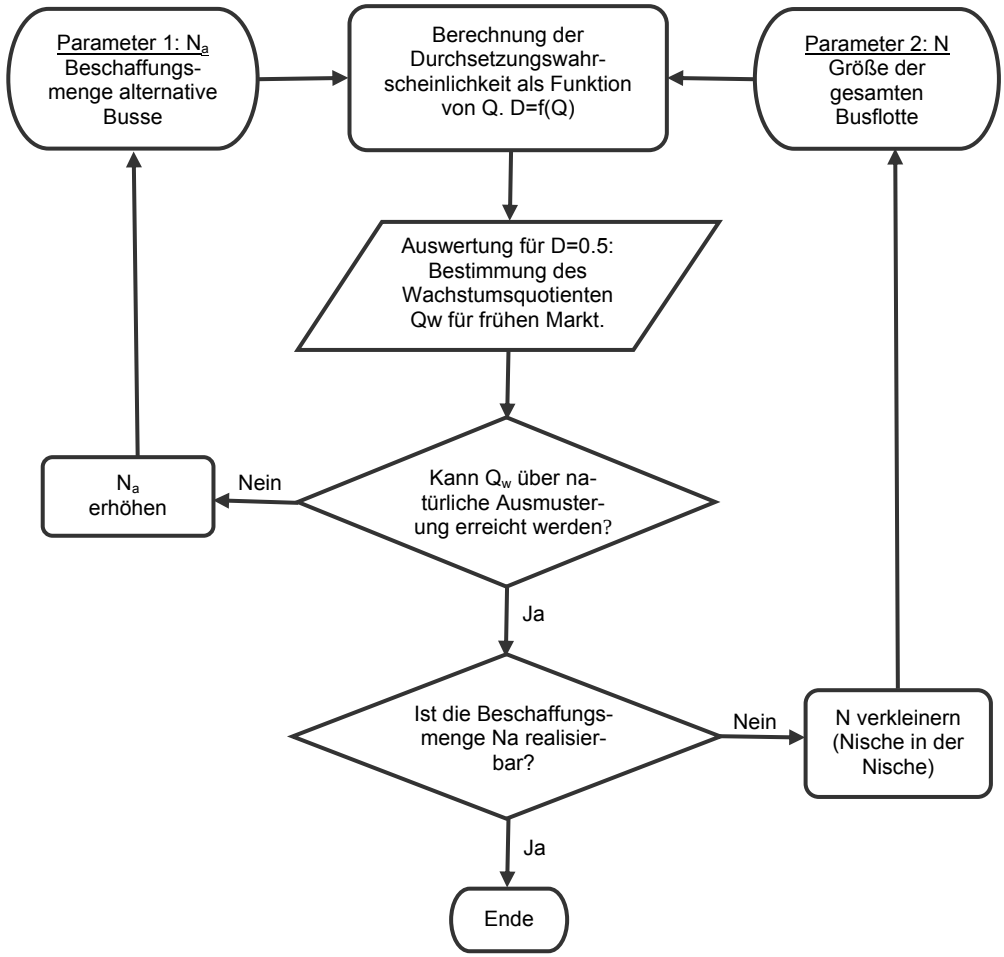


Abbildung 35, Quelle: eigene Darstellung

3. Bus-Matrix: Ableitung, Cluster, Beispielmodelle

Das im Kapitel 1 allgemein vorgestellte Hyperselektionsmodell und die daraus abgeleitete Abgrenzung von Nischen und frühen Märkten wurde in Kapitel 2 auf Busse angewendet. Am Beispiel der BVG-Busflotte konnten mit dem Modell die Marktchancen zur Einführung von Wasserstoffbussen untersucht und anhand des Modells die stochastischen Durchsetzungswahrscheinlichkeiten der Wasserstoffbusse berechnet werden. Dabei zeigte sich, dass die Doppelnischenfunktion des städtischen Busverkehrs ab einer bestimmten Größe der Busflotte alleine nicht mehr ausreichend ist und eine weitere Nische in der Doppelnische zu schaffen ist. Ausgehend von dieser »Dreifachnischen-Theorie« werden im Kapitel 4 verschiedene weltweit laufende Versuche und Felderprobungen zur Einführung alternativer Bustechnologie vorgestellt und dabei aufgezeigt, wie solche Dreifachnischen geschaffen werden können. Vorbereitend hierfür soll zunächst in diesem Kapitel das Innovationsgeschehen im Busbereich in Form einer Bus-Innovations-Matrix systematisiert werden, um anschließend eine Clusterung der Bus-Innovationen vorzunehmen.

3.1 Ableitung der Matrix

Ausgangspunkt für die Bus-Innovationsmatrix ist die in Abbildung 5 vorgestellte Innovationsmatrix für Pkw. Die Systematik und das Vorgehen der Innovationsbetrachtung werden aus dem Pkw-Bereich nun auf die Omnibusse übertragen und führen zu dem in Abbildung 36 dargestellten Ergebnis.

Bei einem Vergleich der Bus-Innovations-Matrix mit der Pkw-Innovations-Matrix fallen zunächst zwei wesentliche Änderungen auf: Erstens sind auf der Antriebsachse weniger Antriebsvarianten aufgeführt und zweitens wird der Begriff des »stillgelegten Innovationsraums« gekennzeichnet durch zwei Querstriche »//« als weiterer Feldeintrag eingeführt.

Unter einem stillgelegten Innovationsraum verstehen wir Innovationen, welche gegenwärtig keine wirtschaftliche Bedeutung mehr haben. Als Beispiel hierfür ist der benzinbetriebene Ottomotor bei Omnibussen zu nennen. Aufgrund der bereits geschilderten Vorteile von Dieselmotoren bei Omnibussen gibt es derzeitig weder technologisch noch ökonomisch gewichtige Gründe, den Dieselmotor durch Ottomotoren zu ersetzen. Daher wurde dieser Technologiepfad im Busbereich nicht weiter verfolgt. Bei geänderten Rahmenbedingungen, z.B. einer technologischen Verbesserung des Ottomotors oder einer neuen Kraftstoffbesteuerung, könnte der benzinbetriebene Ottomotor schnell wieder an Bedeutung gewinnen. Dies ist beispielsweise in den USA der Fall, dort setzt der Bushersteller New Flyer Ottomotoren in Hybridbussen ein (ISE 2007).

Innovations-Matrix für Omnibusse

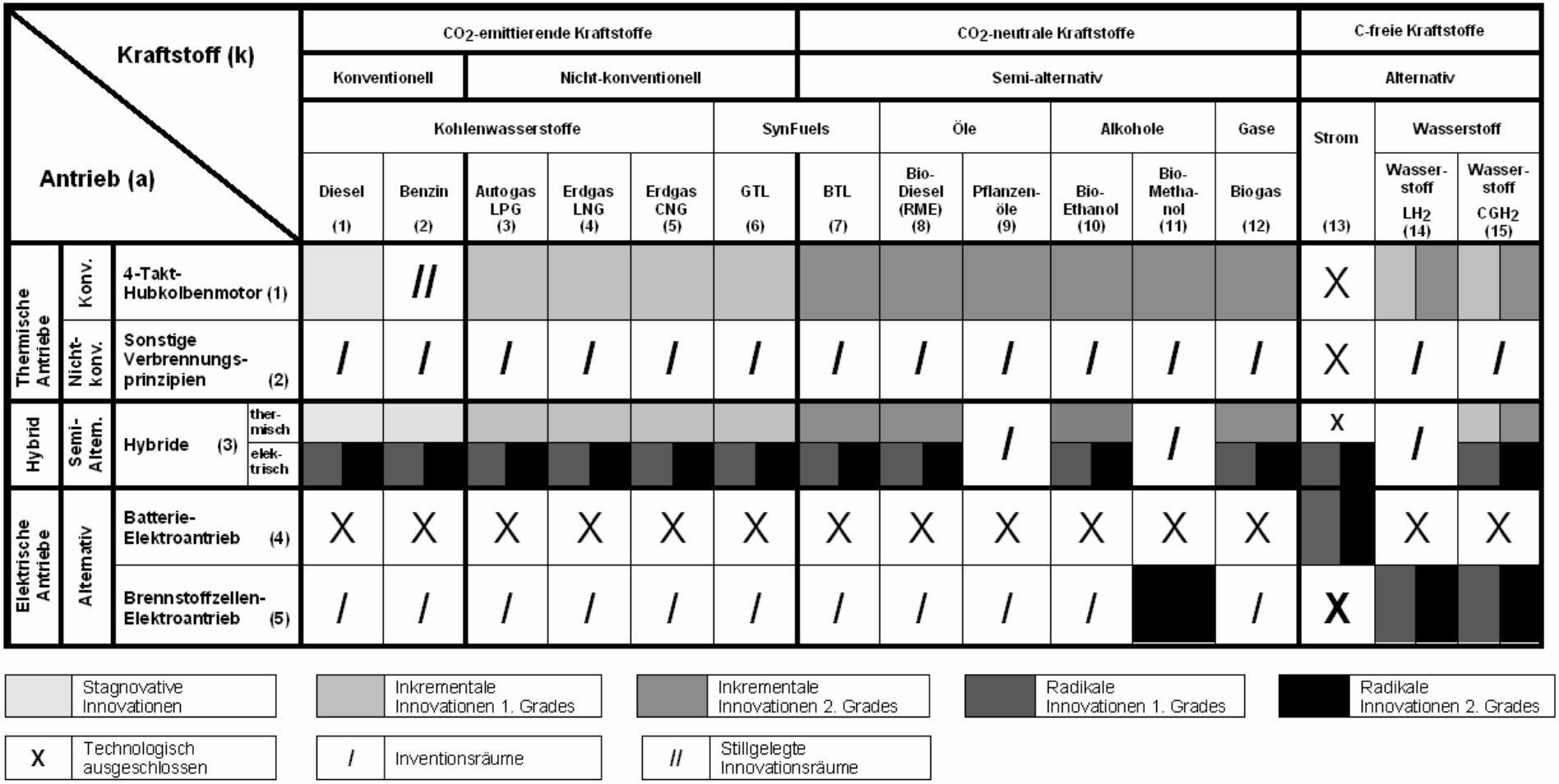


Abbildung 36, Quelle: eigene Darstellung

Weiter ist der Wankelmotor in der Bus-Matrix nicht aufgeführt, da er lediglich im Pkw-Bereich eine Rolle spielt. Die Serienfertigung des 1954 von Felix Wankel entwickelten und nach ihm benannten Wankelmotors wurde in Deutschland mit dem Ro80 von NSU-Audi im Jahr 1977 eingestellt. Derzeitig setzt lediglich Mazda in dem Sportwagen RX-8 den Wankelmotor ein, so dass er im Pkw-Bereich von geringer Bedeutung ist. Im Busbereich ist er unseren Recherchen zur Folge ohne jegliche Bedeutung. Daher wurde auf eine gesonderte Darstellung verzichtet und der Motor den »sonstige Verbrennungsprinzipien« in Zeile a=2 zugeordnet. Ebenso wurde auf die Darstellung des 2-Takter verzichtet.

Die Unterscheidung in Mild- und Vollhybride stammt aus dem Pkw-Bereich und ist in dieser Form bei Bussen nicht üblich. Daher wurden die zwei Hybrid-Zeilen aus der Pkw-Matrix zu der Zeile »Hybride« (a=3) in der Bus-Matrix zusammengeführt.

3.2 Clusterdarstellung der Matrix

Damit sind 29 Felder in der Bus-Matrix mit Innovationen belegt, welche den folgenden fünf Innovations-Clustern zugeordnet werden können. Dies sind:

- Cluster 1: Busse mit thermischen Antrieben
- Cluster 2: Busse mit Wasserstoff-Motoren
- Cluster 3: Hybrid-Busse
- Cluster 4: Batterie-Elektro-Busse
- Cluster 5: Brennstoffzellen-Elektro-Busse

Es handelt sich dabei um eine antriebstechnologisch basierte Clusterbildung. Genau genommen bilden Busse mit Wasserstoff-Motoren eine Teilmenge von Cluster 1, da sie auf 4-Takt-Gasmotoren, also einem thermischen Antrieb basieren. Aufgrund der großen Bedeutung dieser Technologie wurde der Bus-Typ aus Cluster 1 herausgelöst und in Form eines Extra-Clusters behandelt.

Wir möchten erwähnen, dass es selbstverständlich zahlreiche weitere Möglichkeiten gibt, Innovationen und Inventionen zu clustern. Die vorgestellte antriebstechnologische Clusterung stellt dabei nur eine Möglichkeit von vielen dar.

Bezieht man in die Clusterbildung neben den Innovationsfeldern auch die Inventionsräume mit ein, so stellt sich die geclusterte Innovations-Matrix wie folgt dar:

Antriebstechnologisch geclusterte Bus-Innovations-Matrix

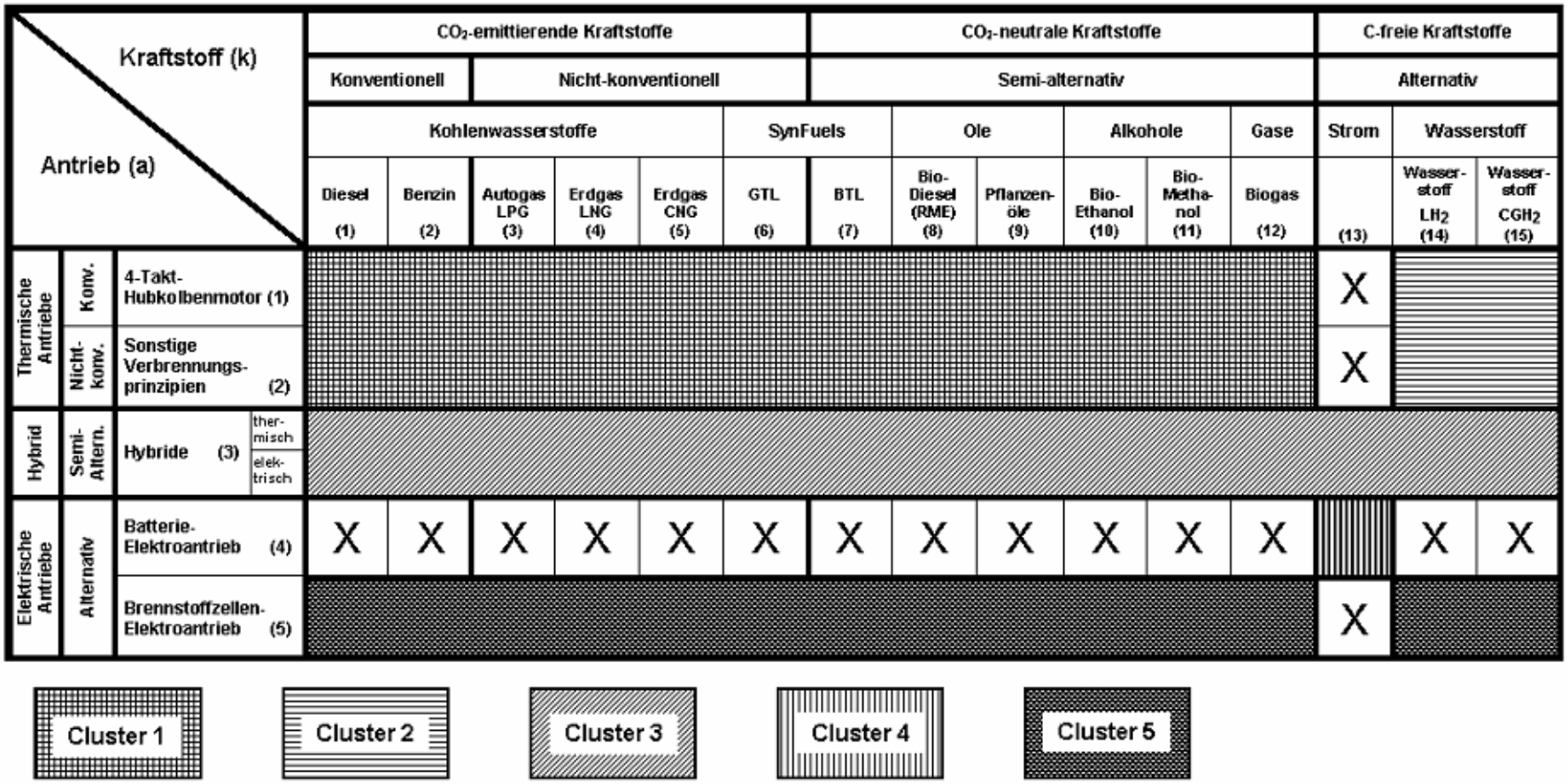


Abbildung 37, Quelle: eigene Darstellung

3.3 Beispielmodell-Matrix

Entsprechend unserem Innovationsverständnisses liegt eine Innovation dann vor, wenn zumindest ein funktionsfähiger Prototyp für eine Fahrzeug-Konfiguration existiert und Anstrengungen unternommen werden, diesen in ein marktfähiges Produkt umzusetzen. Dies bedeutet, dass Funktionsskizzen, Funktionsmuster, Machbarkeitsstudien und Labor-Prototypen noch keine Innovation in diesem Sinn darstellen. Erst die öffentliche Präsentation und Erprobung eines Prototyps in Feldversuchen machen eine Invention zur Innovation. In der folgenden Beispielmodell-Matrix (Abbildung 38) wurde für jedes Innovationsfeld mindestens ein Beispielmodell mit Innovationscharakter ausgewählt, welche dann in Kapitel 4 besprochen werden. Dabei stellen die grau hinterlegten Einträge Busmodelle dar, die in Kapitel 4 ausführlich behandelt werden. Die Beispielmodelle mit weißem Hintergrund werden nur erwähnt.

Die horizontal gestreiften Felder der Matrix sind als »Derivate $F_{a/k}$« gekennzeichnet. Darunter sind Innovationen zu verstehen, welche ohne oder nur mit äußerst geringen antriebstechnologischen Veränderungen aus einem anderen Innovationsfeld hervorgehen. Diejenige Konfiguration, auf welcher ein Derivat beruht, wird als »Basis-Konfiguration« bezeichnet. Als Beispiel für Derivate sind die Felder $F_{1/6}$ (GTL – Gas-to-Liquid), $F_{1/7}$ (BTL – Biomass-to-Liquid) und $F_{1/8}$ (Biodiesel) in der Zeile a=1 zu nennen. Es handelt sich bei den drei Kraftstoffen um Dieselersatzkraftstoffe, welche in normalen Dieselmotoren ($F_{1/1}$) ohne größere Anpassungen und Umbaumaßnahmen eingesetzt werden können. Die Konfiguration $F_{1/1}$ stellt demnach eine Basis-Konfiguration für die genannten Derivate dar. Die Eignung von Biodiesel ist allerdings im Einzelfall zu klären und es können geringfügige motorische Anpassungen notwendig sein. Ebenso kann Biogas ($F_{1/12}$) in normalen Erdgasmotoren ($F_{1/5}$) eingesetzt werden. Analog können auch für die bereits genannten Kraftstoffe in der Hybridzeile (a=3) Derivate gebildet werden.

Dies bedeutet, dass in Derivat-Feldern die Innovation fast ausschließlich im Kraftstoff liegt und die antriebstechnologischen Innovationen von der Basistechnologie übertragen werden können. Es sei darauf hingewiesen, dass in den Derivat-Feldern zum Teil keine öffentliche Erprobung des Beispielmodells stattfindet, so dass streng genommen, unserer Definition folgend, auch keine Innovation vorliegt. Das Feld als Inventionsraum zu kennzeichnen, erscheint allerdings auch nicht sinnvoll, da der prinzipielle Einsatz aller in der Matrix aufgeführten Kraftstoffe möglich ist. Bei einem Derivat liegt also eine »quasi Innovation« vor. Für den Fall, dass uns für ein Derivat eine Felderprobung bekannt ist, wurde diese in die Matrix eingetragen. Beispielsweise erprobt Toyota den Einsatz von BTL in Hybridbussen ($F_{3/7}$).

Bei den Beispielmodellen in der Matrix handelt es sich nicht immer um offizielle Modellbezeichnungen. Vor allem bei Vorserienfahrzeugen gibt es noch keine eindeutige Bezeichnung für ein Fahrzeugmodell und im Entwicklungsprozess kooperieren meist mehrere Unternehmen. In solchen Fällen ist in der Matrix der Hersteller des Gehäuses sowie der Hersteller des Antriebsstrangs genannt. Dieser Fall liegt beispielsweise in Feld $F_{3/15}$ vor. Hier hat New Flyer das Bus-Gehäuse geliefert und ISE baute den Motor und die Hybridisierung ein. Deshalb wurde als Modellbezeichnung »ISE (New Flyer)« in das Feld eingetragen.

Außerdem erschwert die Markenstrategie der Bushersteller eine einheitliche Bezeichnung. So ist beispielsweise der Citaro ein Produkt von Daimler. Ebenso gehören aber auch der Setra aus Feld $F_{1/9}$ und der Orion aus Feld $F_{3/1}$ zu der Daimler-Gruppe. Ein und derselbe Fahrzeughersteller wird somit häufig unter verschiedener Bezeichnung aufgeführt.

Beispielmodelle für die Innovations-Felder der Bus-Innovations-Matrix

Antrieb (a) / Kraftstoff (k)			CO_2-emittierende Kraftstoffe						CO_2-neutrale Kraftstoffe						C-freie Kraftstoffe		
			Konventionell		Nicht-konventionell				Semi-alternativ						Alternativ		
			Kohlenwasserstoffe					SynFuels	Öle			Alkohole		Gase	Strom	Wasserstoff	
			Diesel (1)	Benzin (2)	Autogas LPG (3)	Erdgas LNG (4)	Erdgas CNG (5)	GTL (6)	BTL (7)	Bio-diesel (RME) (8)	Pflanzen-öle (9)	Bio-Ethanol (10)	Bio-Methanol (11)	Biogas (12)	(13)	Wasserstoff LH_2 (14)	Wasserstoff CGH_2 (15)
Thermische Antriebe	Konv.	4-Takt-Hubkolbenmotor (1)	**MB Citaro** LE U (D)	//	MAN NL 273 LPG; Kutsenits; Heuliez	New Flyer	**New Flyer** C40 LF	**Derivat F1/1**	**Derivat F1/1**	**Derivat F1/1**	Setra; MAN	**Scania**	/	**Derivat F 5/1**	X	MAN SL 202 city bus; Van Hool A 120; Zemlius	**MAN** Lion´s City H
	Nicht-konv.	Sonstige Verbrennungs-prinzipien (2)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	X	/	/
Hybrid	Semi-Altern.	Hybride (3) thermisch	Daimler Chrysler Orion VII LF	ISE /New Flyer	Phileas	AVS	Transteq EcoMark LF	**Derivat F3/1**	**Derivat F3/1** (Toyota)	**Derivat F3/1**	/	**Scania**	/	**Derivat F 3/5**	X	/	New Flyer /ISE TB 40 LF
		Hybride (3) elektrisch													Solec-tria		
Elektrische Antriebe	Alternativ	Batterie-Elektroantrieb (4)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Solec-tria Bluebird TC2000	X	X
		Brennstoffzellen-Elektroantrieb (5)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	George-town Univ.	/	X	Elenco „Eureka" Citybus; Ausaldo Citybus	**MB Citaro** FC

Bus Xy	Innovationsfeld (Beispielmodell wird in Kap.4 erwähnt)
X	Technologisch ausgeschlossen
/	Inventionsräume
//	Stillgelegte Innovationsräume
Bus Xy	Innovationsfeld (Beispielmodell wird in Kap.4 ausführlich behandelt)
Derivat Fa/k	Innovationsfeld (Derivate des Basismodells Fa/k)

Abbildung 38, Quelle: eigene Darstellung

4. Bus-Felderprobungen: 5 Innovations-Cluster

Im Folgenden werden ausgewählte Fahrzeuge aus der Beispielmodell-Matrix in Kapitel 3 genauer vorgestellt. Dabei orientieren wir uns an der Clusterdarstellung auf Seite 46. Jedes dieser 5 Cluster soll in einzelnen Unterkapiteln ausführlich erläutert werden. Dies geschieht jeweils nach einem festen Schema, das hier kurz dargestellt werden soll.

Zunächst erfolgt in jedem Kapitel eine Clusterbeschreibung. Für die Beschreibung werden alle Felder eines gleichen Innovationstypus zu einem Innovationsbereich zusammengefasst und erläutert, welchen Grad und welche Reichweite die Innovationen in den unterschiedlichen Bereichen besitzen.

Anschließend wird für jeden Innovationsbereich eines Clusters exemplarisch ein »aussagekräftiges« Busmodell aus der quantitativen Evaluationsmatrix ausgewählt und im Detail vorgestellt. Idealerweise wird angestrebt, für jeden Innovationstyp mindestens ein Beispielmodell vorzustellen. Bei der Auswahl des Beispielmodells spielt neben der Aktualität und Innovativität des Buskonzepts auch die recherchierbare Datenmenge zu dem jeweiligen Modell eine Rolle. Ferner wurde auch Wert darauf gelegt, eine möglichst große Streuung unter den Herstellern zu erreichen. Die verbleibenden, also nicht durch das Beispielmodell abgedeckten Felder, werden nur kurz angesprochen und eventuell vorhandene »Highlights« erwähnt. Wir erheben mit dieser Arbeit keinen Anspruch auf eine vollständige Darstellung aller vorhandenen Busmodelle für jedes Innovations-Cluster. Dies hat zum einen den Grund, dass es in einigen Clustern eine nahezu unendliche Zahl an Herstellern und Typen gibt, sodass eine detaillierte Beschreibung aller vorhandenen Modelle den Rahmen dieser Arbeit bei weitem sprengen würde. Andererseits hat sich auch gezeigt, dass in einem anderen Cluster, selbst nach intensiver Recherche, nur sehr wenige Modelle auffindbar waren. Dennoch kann natürlich nicht ausgeschlossen werden, dass weitere Modelle vorhanden sind, zu denen lediglich keine Dokumentation existiert, bzw. nicht auffindbar war.

Bei der detaillierten Beschreibung der ausgewählten Beispielmodelle setzen wir folgende drei Schwerpunkte: Technologie, Flottenversuche und Marktpotenzial, welche auch in dieser Reihenfolge erläutert werden.

Bei den technologischen Vorstellungen geht es uns vor allem darum, die technologische Tragweite einer Innovation im Vergleich zur Konvention darzustellen. Nach der Darstellung der rein technologischen Innovation eines jeweiligen Modells werden die in Flottenversuchen und im Markt gewonnen Erfahrungen wiedergegeben. Die Kernfrage des Abschnitts lautet: Bewährt sich eine technische Innovation auch im Praxisalltag? Innovationen werden nur dann den Sprung in den Markt schaffen, wenn sich die technische Innovation auch im Alltagseinsatz bewährt und die Erstanwender (early adopters) positive Erfahrungen mit der neuen Technik machen. Wir möchten noch anmerken, dass der Begriff der »Flottenerprobung« für die am Markt bereits verfügbaren Beispielmodelle nicht zutreffend ist, hier ist der Begriff »Markterprobung« besser geeignet. Abschließend werden die Marktchancen des Beispielmodells untersucht und dabei vor allem die Markteinführungsprognosen der Hersteller sowie mögliche Hemmnisse auf dem Weg in den Markt beleuchtet.

Bevor wir nun zu der Beschreibung des ersten Clusters kommen, sollte noch angemerkt werden, dass uns die technischen Daten einzelner Beispielmodelle in Maßeinheiten vorlagen, die in Europa nicht gängig sind. Dies trifft vor allem auf die Modelle der amerikanischen Hersteller zu. Wir entschieden uns dazu, die betreffenden Angaben konsequent von den angloamerikanischen Maßeinheiten in das in Europa übliche metrische System umzurechnen, so dass ein direkter Vergleich der Modelle untereinander möglich ist. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um folgende Umrechnungen (Measurcalc 2007):

US-amerikanische Einheiten	Metrische Einheiten
1 Mile	1,61 km
1 Gallone	3,79 Liter
1 hp (horsepower)	0,746 KW
1 mpg (miles per Gallon)	235 l/100km
2 mpg	117,5 l/100km

Zudem lagen uns einige Angaben in Schwedischen Kronen sowie in US- und kanadischen Dollar vor. Auch diese wurden zur besseren Vergleichbarkeit in EUR umgerechnet. Alle Kursangaben datieren vom 20.12.07

1 USD (US-Dollar)	0,695 EUR
1 CAD (Kanadischer Dollar)	0,694 EUR
1 SEK (schwedische Krone)	0,106 EUR

4.1. Cluster 1: Konventionelle Busse

Clusterbeschreibung

Allen Fahrzeug-Konfigurationen des Clusters 1 der Abbildung 37 ist gemeinsam, dass sie antriebsseitig auf dem Einsatz von Verbrennungsmotoren beruhen und kraftstoffseitig mit kohlenwasserstoffbasierten Kraftstoffen betrieben werden. Damit umfasst das Cluster den 4-Takt-Hubkolbenmotor sowie sonstige Verbrennungsmotoren als Antriebe (a=1, 2). Die kohlenwasserstoffbasierten Kraftstoffe (k=1 bis 12) können aufgeteilt werden in CO_2-emittierende Kraftstoffe (k=1, 2, 3, 4, 5, 6) sowie die CO_2-neutralen Kraftstoffe (k=7, 8, 9, 10, 11, 12).

Cluster 1 der Innovations-Matrix

Antrieb (a) \ Kraftstoff (k)			CO_2-emittierende Kraftstoffe						CO_2-neutrale Kraftstoffe					
			Konventionell		Nicht-konventionell				Semi-alternativ					
			Kohlenwasserstoffe					SynFuels	Öle		Alkohole		Gase	
			Diesel (1)	Benzin (2)	Autogas LPG (3)	Erdgas LNG (4)	Erdgas CNG (5)	GTL (6)	BTL (7)	Bio-Diesel (RME) (8)	Pflanzen-öle (9)	Bio-Ethanol (10)	Bio-Metha-nol (11)	Biogas (12)
Thermische Antriebe	Konv.	4-Takt-Hubkolbenmotor (1)	1	//		2					3			
	Nicht-konv.	Sonstige Verbrennungs-prinzipien (2)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Abbildung 39: eigene Darstellung

Der Ausschnitt zeigt, dass sich das Cluster 1 in drei verschiedene Innovations-Bereiche aufteilen lässt. Jeder dieser Bereiche verfügt über unterschiedliche Innovationstypen, welche sich entsprechend der Legende der Bus-Innovations-Matrix durch unterschiedliche Graustufen voneinander unterscheiden. Dies sind:

Bereich 1: Stagnovative Innovationen
Bereich 2: Inkrementale Innovationen 1. Grades
Bereich 3: Inkrementale Innovationen 2. Grades

Radikale Innovationen liegen im Cluster nicht vor. Die mit »/« gekennzeichneten Felder stellen Inventionsräume dar und es ist leicht ersichtlich, dass der Bereich nicht-konventioneller thermischer Antriebe über ein hohes Innovationspotenzial verfügt. Ernsthafte Innovationsbestrebungen Busse mit Wankelmotoren, Gasturbinen, Stirling-Motoren oder anderen Formen von Wärmekraftmaschinen anzutreiben sind uns unbekannt.

Das Feld $F_{1/2}$ ist mit einem Doppelstrich »//« versehen und bezeichnet einen stillgelegten Innovationsraum. Es gab zwar Busse, die mit Benzin angetrieben wurden, aber aufgrund der geringeren Effizienz gegenüber dem Kraftstoff Diesel wurde ihre Produktion bereits in den 20er Jahren des vorigen Jahrhunderts eingestellt (Mikroökonomie 2007). Seitdem stellt das Feld $F_{1/1}$ der Innovations-Matrix die absolute Konvention auf dem Busmarkt dar. Rund 99% der heute betriebenen Busse verfügen über einen 4-Takt-Hubkolbenmotor, und werden durch den Kraftstoff Diesel angetrieben (Deutscher Bundestag 2002: 10).

Bevor wir das Innovationsgeschehen in den drei vorgestellten Bereichen 1 bis 3 näher untersuchen, werden hierfür Beispielmodelle ausgewählt.

Wahl der Beispielmodelle

Der Innovationsbereich 1 umfasst lediglich das Feld $F_{1/1}$ und repräsentiert, wie bereits erwähnt, die Konvention im Omnibusbau. Als Beispielmodelle kommen für das Feld zahlreiche Busse in Frage und die Wahl eines bestimmten Modells stellt zunächst einmal eine gewisse Willkür dar, und kann selbstverständlich durch ein anderes Modell ersetzt werden.

Unsere Wahl ist letztendlich auf den zu Beginn des Jahres 2006 in den Markt eingeführten Mercedes-Benz Citaro LE Ü (Information 2006) gefallen (wobei LE Ü für low-entry Überland steht). Ausschlaggebend waren dabei vor allem zwei Gründe: Zum einen stellen die Stadt- und Landbusse vom Typ Citaro ein geläufiges Bild in Europas Metropolen dar. Seine Serienfertigung begann 1998 und auf dem UITP-Kongress in Helsinki 2007 stellte Mercedes-Benz den Citaro mit der Seriennummer 17.500 vor (Mercedes-Benz 2007b). Die UITP ist ein Verband für Träger des öffentlichen Verkehrs (UITP 2007). Allein 2006 wurden 3.000 Citaros produziert (Autosieger 2007a). Zum anderen spiegelt er den aktuellen Entwicklungsstand der konventionellen Busentwicklung wieder und kann als die »Speerspitze der Stagnovation« angesehen werden. Im September 2006 wurde der Citaro auf der Internationalen Automobil Ausstellung für Nutzfahrzeuge in Hannover zum „Bus of the year 2007“ gewählt (IAA 2006). Hierfür wurde er im Vorfeld im Mai 2006 eine Woche lang auf regulären Wiener Stadt- und Überlandlinien getestet (Mercedes-Benz 2007c). Fachjournalisten aus 15 europäischen Ländern bewerteten ihn besser als seine Konkurrenten, den Ambassador 200 von VDL und den MAN Lion’s Regio (Busfahrer-Magazin 2006). Auch in Testberichten weiß er zu überzeugen (Bus-Fahrt 2006; Busfahrer-Magazin 2006).

Im zweiten Innovationsbereich konnten für jede Fahrzeugkonfiguration Beispielmodelle recherchiert werden. Das Derivat $F_{1/6}$ ist allerdings vergleichsweise weniger interessant, da jeder konventionelle Dieselbus aus der Konfiguration $F_{1/1}$ ohne weiteren Umbau auch mit GTL angetrieben werden kann. Für das Feld $F_{1/3}$ konnte zwar recherchiert werden, dass über 500 Autogasbusse der Hersteller MAN, Kutsenits und Heuliez im Wiener Linienverkehr unterwegs sind (Wiki 2007; Wiener Umweltbericht 2003: 4). Allerdings stellt die Wiener Busflotte, wie in Kapitel 2.3 bereits erläutert, lediglich eine bemerkenswerte Ausnahme mit Nischencharakter dar. In ganz Deutschland waren am 1. Januar 2007 lediglich sechs Flüssiggasbusse zugelassen (KBA 2007a: 23). Anders hingegen stellt sich die Lage bei dem Feld $F_{1/5}$ dar. Hier ließen sich eine Menge Städte aufzählen, in denen mit Erdgas angetriebene Busse im Linienverkehr eingesetzt werden. Dies trifft insbesondere auf den nordamerikanischen Markt zu, auf dem New Flyer der führende, allerdings bei weitem nicht der einzige, Hersteller ist (New Flyer 2007a). Weitere Hersteller sind MAN mit einem Lion’s City Modell, Mercedes-Benz mit einem Citaro, sowie Daimler mit der amerikanischen Stadtbus-

marke Orion. Die mit Erdgas betriebenen Busse von Orion sind, ebenso wie die von New Flyer, in mehreren amerikanischen Städten im Linienverkehr unterwegs. Im Gegensatz dazu konnten für das Feld $F_{1/4}$ keine im Stadtverkehr eingesetzten Busse recherchiert werden. Mit New Flyer konnte lediglich ein Hersteller gefunden werden, der für flüssiges Erdgas geeignete Busse produziert. Daher erschien es uns am sinnvollsten, ein Beispielmodell aus dem Feld $F_{1/5}$ auszuwählen und vorzustellen. Unsere Entscheidung fiel auf ein Modell von New Flyer. Es hätte jedoch ebenso ein Modell von Orion, Mercedes-Benz oder MAN vorgestellt werden können.

Für den dritten Innovationsbereich wurde ein Beispielmodell aus der Konfiguration $F_{1/10}$ ausgewählt, da uns die anderen Felder vergleichsweise nicht so interessant erschienen. Zunächst stellen die Konfigurationen $F_{1/7}$, $F_{1/8}$ und $F_{1/12}$ Derivate dar und bieten antriebstechnologisch keine Neuerung. Daher gehen wir nicht weiter auf diese Felder ein.

Etwas anders stellt sich die Lage in dem Konfigurationsfeld $F_{1/11}$ dar. Zwar können auch hier gewöhnliche Dieselbusse für den Betrieb mit Methanol umgebaut werden, allerdings konnten für dieses Feld auch Flottenversuche nachgewiesen werden. So liefen z.B. von 1985 bis 1988 insgesamt 14 Methanolbusse in Berlin, jeweils sieben von MAN und Mercedes-Benz (Innovationskongress 2005: 5). In den USA fanden ebenfalls zwei Flottenversuche statt. In den frühen 1990er Jahren liefen in Miami und New York jeweils fünf Methanolbusse (NREL 1996: 1). Allgemein lässt sich festhalten, dass sich der Einsatz von Methanolbussen in den USA auf die 1990er Jahre beschränkte. Während 1992 nur 57 im Einsatz waren, erreichte ihre Anzahl 1994 und 1995 mit 402 Fahrzeugen ihren Höhepunkt (GAO 1999: 5). Danach nahm ihre Verwendung wieder kontinuierlich ab, und 1999 waren lediglich noch 38 im Einsatz. Der letzte Methanolbus in den USA wurde 1996 produziert. Seitdem sind in den USA keine weiteren Pläne zur Anschaffung von Methanolbussen bekannt (ebd., 34).

Ebenso wie bei den anderen Konfigurationen werden auch in der Konfiguration $F_{1/10}$ Dieselbusse für den Antrieb mit Ethanol umgebaut, jedoch konnten für dieses Feld die umfangreichsten Flottenversuche nachgewiesen werden. Zudem konnte hier ein Hersteller recherchiert werden, der die Ethanolbusse serienmäßig produziert. Dies waren für uns die ausschlaggebenden Gründe, unser Beispielmodell aus dem Feld $F_{1/10}$ zu wählen. Wir wählten ein Busmodell von Scania. Schließlich ist Scania der eben erwähnte serienmäßige Hersteller. Hinzu kommt, dass auch kein anderes Unternehmen auffindbar war, das mit Ethanol angetriebene Busse produziert.

Beispielmodell für den Innovationsbereich 1: Mercedes-Benz Citaro LE Ü

Technologie

Der aktuelle Citaro-Bus kann exemplarisch als ein Repräsentant für die Konvention im Omnibusbereich angesehen werden. Der „Bus of the year 2007“ stellt einerseits ein Benchmark für andere konventionelle Bußentwicklungen dar, und legt gleichzeitig auch die Messlatte für alternative Antriebskonzepte fest. Daher stellen wir zunächst einige technische Daten des Citaro LE Ü vor:

Beispielmodell Fahrzeugkonfiguration $F_{1/1}$

Kennwerte		Daimler
Modell		Citaro LE Ü
Fahrzeug-Konfiguration		$F_{1/1}$
Motordaten	Typ	OM 457 LA[a]
	Hubraum[ccm]	11967[a]
	Zylinder/Anordnung	6/Reihe liegend[a]
	Nennleistung [kW]	260[a]
	Nenndrehm. [Nm] bei 1.100/min	1250[a]
Verbrauch	[l/100 km]	35, 1[b]; 33,9[c]
Tankinhalt	Dieselkraftstoff [Liter]	350[a]
	AdBlue [Liter]	46[a]
Reichweite	[km]	keine Angabe
Beschleunigung	0-60 km/h [sec]	19,3[b]; 16,3[c]
Elastizität	80-100 km/h, 6. Gang [sec]	15,8[b]
Leergewicht	[kg]	11.600[b]
Maße	Länge [m]	12,040[a]
	Breite [m]	2,550[a]
	Höhe [m]	3,318[a]
Emissionen	Schadstoffklasse	Euro 4[a]
Kapazität	Sitzplätze	45[a]
	Stehplätze	38[a]
	Gesamt	83[a]
Lärmbelastung	Innen: Front/Mitte/Heck bei 60 km/h [dB(A)]	67,6 / 68,7 / 70,5[b]
	Innen: Front/Mitte/Heck bei 80 km/h [dB(A)]	68,9 / 70,8 / 74,8[b] 69,5 / 69,8 / 75,0[c]
Preis	[EUR] ohne MwSt.	270.000[b;c]

Abbildung 40, Quelle: eigene Darstellung; [a]Mercedes-Benz 2007a; [b]Bus-Fahrt 2006; [c]Busfahrer-Magazin 2006

Die verschiedenen Testergebnisse bei Verbrauch und Beschleunigung dürften auf das jeweilige Testgewicht des Busses zurückzuführen sein. Bei dem ersten Test hatte der Bus ein Gewicht von 17.880 kg (Bus-Fahrt 2006), während er bei dem zweiten nur 15.844 kg auf die Waage brachte (Busfahrer-Magazin 2006). Was den Verbrauch angeht, muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass in beiden Tests ununterbrochen die Klimaanlage bei vollem Einsatz arbeitete und sicherlich zu einem Mehrverbrauch führte. Zusätzlich ist bei den Verbrauchswerten zu berücksichtigen, dass bei den Tests größere Autobahn- und Überlandabschnitte gefahren wurden, die ebenso in die Berechnung der Durchschnittswerte eingeflossen sind. Im reinen Stadtverkehr kam der Citaro LE Ü bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 22,4 km/h auf einen Verbrauch von 53,8 l/100 km (Bus-Fahrt 2006). Im zweiten Test wurden 13,1 km im Stadtverkehr zurückgelegt und der durchschnittliche Verbrauch lag bei 49,8 l/100 km (Busfahrer-Magazin 2006).

Der Citaro LE Ü erfüllt, trotz konventionellem Antrieb und Kraftstoff, dank der BlueTec Technologie auf SCR-Basis (Selective Catalyc Reduction) die seit 2005 geltende Euro 4-Norm. Ein nachgeschalteter Keramik-Katalysator zerlegt einen Großteil der im Abgasstrom enthaltenen Stickstoffverbindungen in harmlose Luftbestandteile. Dies geschieht mithilfe einer wässrigen Harnstofflösung, AdBlue, die in einem separaten Tank mitgeführt wird (Mercedes-Benz 2007a). Damit ist der Citaro LE Ü mit den derzeitig modernsten Technologien zur Reduktion des Schadstoffausstoßes ausgestattet, die im Bereich der stagnovativen Innovationen möglich sind. Es muss allerdings noch angemerkt werden, dass AdBlue nicht bei den Angaben des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauches berücksichtigt wurde. Die benötigte Menge richtet sich nach dem Dieselverbrauch, ungefähr 5 bis 6% des Dieselverbrauchs sind an AdBlue zu addieren (Bus-Fahrt 2006). Wenn der Citaro LE Ü also beispielsweise einen Verbrauch von 50 Litern pro 100 km im Stadtverkehr hätte, müssen darüber hinaus noch 2,5 bis 3 Liter AdBlue hinzugezählt werden. Der Citaro LE Ü ist auf Wunsch auch gemäß der Euro 5-Norm oder der noch schärferen Abgasstufe EEV (Enhanced Environmental Friendly Vehicle) lieferbar (Autosieger 2007a).

In den beiden uns vorliegenden Testberichten erhält der Citaro LE Ü sehr positive Bewertungen. Beide bescheinigen ihm einen sehr hohen Fahrkomfort, sowohl für den Fahrgast, als auch für den Fahrer. Mit einer ausgezeichneten Federung dämpft er selbst größere Bodenunebenheiten so stark ab, dass die Businsassen sie kaum bemerken. Ebenso positiv bewertet wird die Beschleunigung des Citaro LE Ü (Bus-Fahrt 2006; Busfahrer-Magazin 2006). Durch zügiges Anfahren kam er problemlos aus den angefahrenen Haltestelleneinbuchtungen, selbst wenn er dabei Steigungen meistern musste (Busfahrer-Magazin 2006). Bei 1.000 Umdrehungen erzielt der Citaro LE Ü ein Drehmoment von über 1250 Nm (Bus-Fahrt 2006). Das Serviceintervall beläuft sich auf 60.000 km und sorgt somit für vergleichsweise niedrige Wartungskosten (Busfahrer-Magazin 2006).

Bemängelt werden an dem Citaro LE Ü die Lärmbelastung im Heck und sein mit 270.00 EUR relativ hoher Preis (Bus-Fahrt 2006). Schließlich ist der Ambassador, sein direkter Konkurrent, der über eine vergleichbare technische Ausstattung verfügt und ebenso die Euro 4-Norm erfüllt, für nur 195.000 EUR zu haben. Die Testberichte wurden von zwei Fachzeitschriften im März (Busfahrer-Magazin 2006) und im Oktober 2006 (Bus-Fahrt 2006) angefertigt. Insgesamt wurden bei den Testfahrten 212,4 km (Bus-Fahrt 2006), bzw. 150,7 km zurückgelegt (Busfahrer-Magazin 2006).

Felderprobungen

Da es sich bei den Bussen mit der Fahrzeugkonfiguration $F_{1/1}$ um die Konvention im Busbereich handelt, kann hier eigentlich nicht von Felderprobungen oder Flottenversuchen gesprochen werden. Diese Busse werden direkt nach ihrer Entwicklung serienmäßig hergestellt. Sie unterlaufen lediglich unternehmensinternen Tests der Hersteller selbst. Diese werden aber selbstverständlich nicht im öffentlichen Stadtverkehr vollzogen. Nur in einem der recherchierten Fälle lässt sich wirklich von einer Felderprobung sprechen. In Nürnberg lief bereits 2005 ein Bus nach EEV Standard im Rahmen eines gemeinsamen Projektes (VAG 2007). Hierbei handelt es sich aber, wie bereits gesagt, um eine Ausnahme. Zumal die großen Bushersteller, wie z.B. MAN oder Mercedes-Benz, ihre ersten Busse, die den EEV Standard erfüllen, erst in den Jahren 2006 und 2007 auf den Markt brachten (Neoplan 2007; Duemotori 2006).

Aufgrund der in diesem Feld also eigentlich nicht vorhandenen Flottenversuche, entschieden wir uns dazu, den Einsatz der Busmodelle im Linienverkehr zu beschreiben. Dabei beziehen wir uns allerdings nur auf die mit Diesel betriebenen Busse, die den EEV Standard erfüllen. Um diesem zu genügen, müssen die Busse mit dem höchstmöglichen technischen

Niveau im Bereich der stagnovativen Innovationen ausgerüstet sein. Es handelt sich also um die aus ökologischer Sicht fortschrittlichsten Busse, die nach dem heutigen Stand im ersten Innovationsbereich möglich sind.

Dass es bei diesen Busmodellen keine Felderprobungen oder Flottenversuche gibt, sondern sie direkt in Serie hergestellt werden, bedeutet allerdings nicht, dass sie auch direkt in Serie gekauft werden. Zwar gibt MAN an, bereits 100 dieser Busse verkauft zu haben (Neoplan 2007), im Allgemeinen verläuft die Umstellung in den Städten aber eher langsam. So fährt z.B. ein Citaro auf Basis der SCR-Technologie in der Schweiz (Maagbus 2007). Sechs weitere dieses Modells sind in Wuppertal im Einsatz (Lifepr 2007) und sieben fahren im Offenbacher Linienverkehr (Omnibusrevue 2007). In Paderborn sind seit Anfang 2007 zwei Busse von MAN im Linienverkehr unterwegs. Diese erfüllen den EEV Standard ohne SCR-Technologie. Stattdessen setzt MAN auf Common-Rail-Einspritzung, Abgasrückführung und Partikelfilter. So kommen die Busse ohne ein zusätzliches Additiv, wie z.B. AdBlue aus (Padersprinter 2007). In Berlin sind 25 Busse im Einsatz, die den EEV Standard erfüllen (Berlin 2007: 9).

In Stuttgart hat man andere Wege eingeschlagen. Hier versucht man ein Fahrzeug bereits älteren Baujahres, das über einen Partikelfilter verfügt, zusätzlich mit der SCR-Technologie auszustatten. Dadurch soll das Fahrzeug den EEV Standard erfüllen. Der gleiche Versuch wird auch in Düsseldorf, Wiesbaden und Hagen durchgeführt (SSB-AG 2007). Noch einmal anders stellt sich die Lage in Leipzig dar. Es wurden 20 Busse vom Typ Urbino des Herstellers Solaris gekauft, die bei Auslieferung die Euro 5-Norm erfüllten. Diese sollen mit einem zusätzlichen Partikel nachgerüstet werden, damit die Emissionen unter den EEV Standard gesenkt werden (Inar 2007).

Diese Darstellung der Einsätze der Busse, die den EEV Standard erfüllen, muss keineswegs vollständig sein. Sie ist es sogar mit Sicherheit nicht. Dennoch dient sie dazu, sich einen Überblick über die gegenwärtige Lage dieser Busmodelle verschaffen zu können. Es wird deutlich, dass der Einsatz dieser Busse im Linienverkehr sich noch im Anfangstadium befindet. Außerdem wird ersichtlich, dass einige Städte sich nach anderen Möglichkeiten umsehen, wie z.B. ältere Busmodelle nachzurüsten.

Marktpotenziale

Die Marktchancen der den EEV-Standard erfüllenden Busmodelle können lediglich mittelfristig als gut angesehen werden. EEV-Busse erfüllen zwar die ab dem 01.01.2009 gültige Euro 5-Norm und sind daher zunächst als zukunftstauglich einzustufen. Allerdings ist es aus heutiger Sicht fraglich, ob über stagnovative Innovationen der Schadstoffausstoß noch weiter gesenkt werden kann, so dass auch kommende Euro 6- oder Euro 7-Normen erfüllt werden.

Aus den Darlegungen im Bereich der »Felderprobungen« haben die Städte in Deutschland bereits damit angefangen ihre Busflotten auf den EEV Standard einzustellen. Entweder werden neue Busse bestellt, die diesen Standard durch SCR-Technologie oder Abgasrückführung erfüllen, oder es werden alte Busbestände nachgerüstet. Am 01. Januar 2007 waren 511 Busse der Schadstoffklasse EEV in Deutschland zugelassen (KBA 2007a: 21).

Weiterführende Pläne der Städte Berlin und Potsdam lassen ebenso gute Marktpotenziale für die Busse nach EEV Standard vermuten. In Berlin ist vorgesehen, bis 2010 insgesamt 600 ältere Busmodelle durch Busse zu ersetzen, die der Euro 5-Norm und dem EEV Standard entsprechen (Berlin 2007: 9). In Potsdam sollen bis zum Jahr 2015 135 neue Busse beschafft werden, die der Euro 5-Norm entsprechen. Mindestens 20 davon sollen auch den EEV Standard erfüllen (MLVU 2007: 38).

Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass in beiden Städten nicht erwähnt wird, ob es sich bei den Neuanschaffungen um Bustypen aus dem Konfigurationsfeld $F_{1/1}$ handeln

wird. Angesichts der stetig steigenden Rohölpreise wäre es ebenfalls vorstellbar, dass sie auf innovativere Fahrzeugkonfigurationen mit anderen Kraftstoffen zurückgreifen, womit wir bei dem zweiten Innovationsbereich dieses Clusters angelangt wären.

Beispielmodell für den Innovationsbereich 2: New Flyer C40LF

Technologie

Um noch einmal zu verdeutlichen, welchen Stellenwert New Flyer bei den mit Erdgas angetriebenen Bussen in Nordamerika hat, sei erwähnt, dass im Jahr 2000 insgesamt 3.500 mit LNG und CNG betriebene Busse in den USA unterwegs wahren (Cleanairnet 2007a). 1.000 davon wurden von New Flyer hergestellt, von denen wiederum 950 mit CNG angetrieben wurden (CTCase 2001). In Deutschland sind zum Vergleich 1.423 Erdgas-Busse am 01. Januar 2007 zugelassen (KBA 2007a: 23). Bei der Auswahl des konkreten Modells von New Flyer haben wir uns für den C40LF entschieden (LF bedeutet low floor). Ausschlaggebend waren seine, dem Citaro LE Ü vergleichbaren Größen- und Gewichtsangaben. In der folgenden Tabelle sind die weiteren technischen Daten dargestellt:

Beispielmodell Fahrzeugkonfiguration $F_{1/5}$

Kennwerte		New Flyer
Modell		New Flyer C40LF
Fahrzeug-Konfiguration		$F_{1/5}$
Motordaten	Typ	Cummins ISL C-Gas+250/280 HP[a]
	Hubraum[ccm]	8, 3 Liter[b]
	Zylinder	6[a]
	Nennleistung [kW]	keine Angabe
	Nenndrehzahl	2.400[b]
	Drehm. [Nm] bei 1.400/min	1.152[d]
Verbrauch	[l/100 km]	78,4[b]
Tankinhalt	CNG	6-7 Tanks, jeder bei 3.600 psi[a] (248,2 bar)
Beschleunigung	0-60 km/h [sec]	keine Angabe
Elastizität	80-100 km/h, 6. Gang [sec]	keine Angabe
Reichweite	[km]	563[c]
Leergewicht	[kg]	13.100[a]
Maße	Länge [m]	12,500[a]
	Breite [m]	2,600[a]
	Höhe [m]	3,100[a]
Emissionen	CO [g/km]	0,34[b]
	NO_x [g/km]	11,78[b]
	NO [g/km]	9,73[b]
	CH_4 [g/km]	10,73[b]
	NMHC [g/km]	0,68[b]
	PM [g/km]	0,006[b]
	CO_2 [g/km]	1,40[b]
Emissionen	Schadstoffklasse	keine Angabe
Kapazität	Sitzplätze	40[a]
	Stehplätze	43[a]
	Gesamt	83[a]
Preis	[US-Dollar] ohne MwSt.	340.000[d] (236.614 EUR)

Abbildung 41, Quelle: eigene Darstellung: [a]New Flyer 2007b; [b]NREL 2005: 16; [c]U.S. Department 2001: 26; [d]NREL 2006a: 10

Bei den Angaben zu den Emissionen greifen wir auf eine Studie des NREL (National Renewable Energy Laboratory, das dem Department of Energy angehört) zurück. In der Untersuchung werden die Emissionen von CNG angetriebenen Bussen mit denen von Dieselbussen verglichen. Die Studie wurde 2004 durchgeführt und bezieht sich auf Fahrzeuge die im Washingtoner Linienverkehr unterwegs waren (NREL 2005: 1). Es wurden unter anderem vier Busse des Typs New Flyer C40LF untersucht.

Der Schadstoffausstoß wurde im Durchschnitt auf einer Strecke von 7,11 km gemessen. Auch bei den Emissionsangaben und bei der Verbrauchsangabe handelt es sich um Durchschnittswerte (ebd.: 14).

Bei den Verbrauchsangaben muss zusätzlich das Gewicht des Fahrzeugs berücksichtigt werden. Der in den Tests eingesetzte Bus hatte ein Leergewicht von 14.424 kg (ebd.: 6).

Felderprobungen

Das Modell C40LF von New Flyer wurde eigentlich keinen wirklichen Felderprobungen unterzogen. Es wird direkt serienmäßig hergestellt und verkauft. Die in den USA im Linienverkehr befindlichen Busse werden allerdings sehr ausführlich evaluiert. Das National Renewable Energy Laboratory führt im Auftrag des Department of Energy regelmäßig Untersuchungen zum Einsatz von innovativen Kraftstoffen im amerikanischen Stadtverkehr durch. Auf die Ergebnisse einer dieser Studien haben wir bereits Bezug genommen, als es darum ging, die Verbrauchs- und Emissionswerte des C40LF vorzustellen. Im Folgenden wollen wir auf eine weitere Untersuchung näher eingehen, die sich mehr auf die gesamten Erfahrungen mit diesem Modell im Linienverkehr bezieht.

Seit 2002 laufen 164 dieser Busse im Washingtoner Stadtverkehr. Fünf davon wurden von Anfang Juni 2003 bis Ende Mai 2004 12 Monate lang untersucht. Sie wurden von der WMATA (Washington Metropolitan Area Transit Authority) betrieben und liefen auf zufällig ausgewählten Linien (NREL 2006a: vii), allerdings nur auf solchen, die vom Betriebshof in Bladensburg geführt wurden, da nur dieser über eine Tankanlage mit CNG verfügte (ebd.: 4).

Insgesamt verfügt die WMATA über zehn Betriebshöfe mit 1.460 Bussen und zählt damit zu den größten Nahverkehrbetrieben in den USA (ebd.: 3). Es wurden jedoch nur vier der zehn Betriebshöfe als für den Betrieb von mit CNG angetriebenen Bussen geeignet betrachtet. Die anderen sechs zieht man auf Grund des Alters der Gebäude und der nicht verfügbaren Anlagen, die im Umkreis des Geländes notwendig wären, als nicht geeignet in Erwägung (ebd.: 4). Der Betriebshof Bladensburg verfügt im Ganzen über 232 Busse, davon werden 164 mit CNG angetrieben (ebd.: 14).

Für die Anschaffung der mit CNG betriebenen Busse entschied man sich bereits im Jahr 2000. Die WMATA hatte ohnehin geplant, eine neue Busflotte in Auftrag zu geben, sie war lediglich im Unklaren darüber, welchen Antrieb und Kraftstoff die neuen Busse haben sollten. Letztendlich entschied man sich gegen Brennstoffzellen- und Hybridbusse, und für mit CNG betriebene Busse, da diese sich bereits an anderen Einsatzorten bewährt hatten (ebd.: 11). An dem gesamten Projekt waren viele Akteure beteiligt, die Hauptpartner von WMATA waren aber die Natural Gas Company, das Fire Department, das Department of Energy, das National Renewable Energy Laboratory, New Flyer, sowie die beiden Motorenhersteller Cummins Westport und John Deere (ebd.: 13).

Seit 2002 liefen alle 164 Busse des Typs C40LF im Durchschnitt 154.600 km pro Woche und das in 8.262 Stunden. Sie hatten dabei eine Durchschnittsgeschwindigkeit von knapp 19 km/h. An Wochentagen fuhren die Busse durchschnittlich 26.736 km, während sie an Samstagen nur 11.626 und an Sonntagen 10.686 km im Einsatz waren (ebd.: 14). Innerhalb der 12 Monate der Evaluation liefen die fünf untersuchten Busse im Durchschnitt 46.256 km und insgesamt 231.280 km. Pro Bus fielen Wartungskosten von 2.229 US-Dollar (1.551 EUR) an, so dass die Wartung der fünf Busse insgesamt 11.143 US-Dollar (7.755 EUR) kostete. Pro Kilometer, die einer dieser fünf Busse zurücklegte, fielen also durchschnittliche Wartungskosten von 0,32 $ (0,22 EUR) an (ebd.: 20).

Die mit CNG angetriebenen Busse liefen in fast allen Monaten mehr als 8.047 km ohne einen Betriebsausfall. Das Zeitintervall zwischen antriebs- oder kraftstoffbedingten Betriebsausfällen belief sich im kleinsten Fall auf 22.531 km und im größten Fall auf 56.327 km (ebd.: 27).

Probleme gab es bei der Wartung der Busse. Das Methanerkennungssystem funktionierte nicht einwandfrei. Zudem mussten des Öfteren Schweißarbeiten durchgeführt werden. Auch bei der Tankanlage kam es zu einer Panne. Während der Evaluation war zu Anfang lediglich eine Tankanlage für die mit CNG angetriebenen Busse vorhanden. Nach deren einmaligem Ausfall und den damit verbundenen Schwierigkeiten beim Auftanken der Busse wurde sie mit Notfall-Generatoren ausgestattet (ebd.: 14).

Insgesamt bewertet die WMATA das Projekt allerdings sehr positiv. Bei den Fahrern, den Mechanikern und auch den restlichen Mitarbeitern von WMATA waren die mit CNG angetriebenen Busse sehr beliebt. Ihre Zuverlässigkeit war letztendlich höher, als man zunächst angenommen hatte. Zudem waren sie leiser und hatten einen geringeren Schadstoffausstoß als Dieselbusse (ebd.: 13-14).

Marktpotenziale

Gemäß der als Erfolg eingestuften ersten Anschaffung der mit CNG betriebenen Bussen, bestellte die WMATA 250 weitere CNG-Busse. Der Auftrag ging an Orion und die Busse werden seit 2005 kontinuierlich ausgeliefert. Bis Ende 2006 sollte die Auslieferung vollständig abgeschlossen sein. Seit 2005 laufen die CNG-Busse auch von einem zweiten Betriebshof aus, Four Mile Run. Langfristig sollen die beiden Betriebshöfe Bladensburg und Four Mile Run nahezu ausschließlich über Busse verfügen, die mit CNG angetrieben werden. Dieselbusse sollen nur noch für spezielle Einsätze zur Verfügung stehen (ebd.: 4).

Das Vorgehen in Washington zur Einführung der CNG-Busse ist ein Musterbeispiel für eine Dreifachnische. Denn den Nischen-Überlegungen aus Kapitel 1 und 2 folgend, stellen die Betriebshöfe Bladenburg und Four Mile Run Nischen innerhalb des Washingtoner Stadtverkehrs dar. In den beiden Nischen konnten sich die CNG-Busse jeweils behaupten, bei einer gleichmäßigen Aufteilung der Busse über das gesamte Washingtoner Stadtgebiet wären sie nach dem Hyperselektionsmodell aus Kapitel 1 mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit untergegangen – trotz der positiven Betriebserfahrung mit den Bussen. Durch eine sukzessive Umstellung der beiden weiteren als geeignet eingestuften Betriebshöfe, könnten weitere Nischen entstehen und damit der Anteil der CNG-Busse am gesamten Busbestand ausgebaut werden. Spätestens bei der Umrüstung eines fünften Betriebshofes würden die CNG-Busse in den Bereich eines frühen Marktes gelangen und gute Chancen haben, die Dieselbusse komplett zu verdrängen.

Nach der Auslieferung der 250 mit CNG angetriebenen Busse, soll allerdings wieder eine Flotte von Dieselbussen angeschafft werden, um alte Dieselbusse ausmustern zu können. Denn die CNG-Busse sind, wie bereits erwähnt, aus infrastrukturellen Gründen nur an 4 der insgesamt 10 Betriebshöfe einsetzbar. Zudem ist die Bestellung von Hybridbussen geplant (ebd.: 29).

Ein ähnliches Bild ergibt sich in New York. Hier wurden 260 mit CNG angetriebene Busse, die seit 2003 im Einsatz sind, und 125 seit 2004 eingesetzte Diesel-Hybridbusse evaluiert (ebd.: v). Alle Busse wurden von Orion geliefert. Nach Abschluss des Projektes entschloss man sich 200 zusätzliche Diesel-Hybridbusse von Orion zu bestellen. Nur wenig später vergab man einen weiteren Auftrag von 500 Diesel-Hybridbussen an Orion, mit der Option diesen auf 889 auszuweiten. Eine weitere Anschaffung von mit CNG betriebenen Bussen ist hingegen vorerst nicht geplant. Dennoch betont die New Yorker Verkehrgesellschaft, dass die Bestellung von CNG-Bussen in der Zukunft durchaus vorstellbar sei (ebd.: 39).

Andere Pläne wiederum bestehen in Palm Springs in Kalifornien. Die Verkehrgesellschaft SunLine betreibt hier seit 1994 die erste vollständige Busflotte in den USA, die nur mit CNG angetrieben wird (NREL 2006c: vii). Es handelt sich um ein relativ kleines Unternehmen, das

lediglich über 48 Busse in voller Größe verfügt (NREL 2007a: 9). SunLine will, zumindest in der nahen Zukunft, auch weiterhin auf CNG als Kraftstoff setzen. 2009 ist geplant, die gesamte bestehende Flotte durch neue CNG-Busse zu ersetzen. Gleichzeitig werden allerdings bereits wasserstoffbetriebene Busse, sowohl mit internem Verbrennungsmotor, als auch mit Brennstoffzellen getestet (NREL 2006c: 26).

In Los Angeles werden von 2.500 Bussen insgesamt, 90% mit Erdgas angetrieben. Für 2008 wurden weitere 100 mit CNG betriebene Busse in Auftrag gegeben (NGVglobal 2007a). In Spanien wurden für Ende 2007 50 CNG-Busse für Madrid und 30 für Sevilla bestellt. In Madrid werden somit 350 mit CNG betriebene Busse im Einsatz sein. Beide Aufträge gingen an Irisbus Iveco. Insgesamt sind zurzeit 3.900 CNG-Busse von Irisbus Iveco in Europa im Betrieb (NGVglobal 2007b). In Norwegen wurden 35 mit CNG angetriebene Busse bestellt, die im Frühjahr 2008 ausgeliefert werden sollen. Der Auftrag ging an Volvo Bus. Insgesamt werden danach 112 CNG-Busse in Norwegen im Einsatz sein (NGVglobal 2007c). In Deutschland waren am 01. Januar 2007 1.423 CNG-Busse gemeldet. Ein Jahr zuvor waren es noch 1.277 (KBA 2007a: 23). Dies entspricht einem Zuwachs von 11,4%.

Aber auch außerhalb von Nordamerika und Europa werden CNG-Busse nachgefragt. So werden z.B. bereits 40% aller Busse in der südkoreanischen Hauptstadt Seoul mit CNG angetrieben. Die Flotte soll noch weiter ausgebaut werden. Bis 2010 sollen 7.766 CNG-Busse in Seoul unterwegs sein (NGVglobal 2007e). In der indischen Stadt Thane ist geplant 87 CNG-Busse zu bestellen. Bisher sind 50 dieser Busse bereits in Thane im Einsatz (NGVglobal 2007d). Swede Bus wird 15 mit CNG angetriebene Busse an die Stadt Karachi in Pakistan liefern. Karachi plant weitere 250 zu bestellen (NGVglobal 2007f).

Dies waren nur einige ausgewählte Beispiele, die zeigen sollten, dass die Marktaussichten für CNG-Busse gegenüber konventionellen Dieselbussen vergleichsweise gut aussehen. Es hätten noch viele weitere Aufträge vorgestellt werden können. Die Auswahl bezog sich vor allem auf möglichst aktuelle Bestellungen. Obwohl einige Städte in den USA gleichzeitig auf Hybridbusse setzen, bzw. noch innovativere Konzepte austesten, besteht weltweit eine große Nachfrage für mit CNG angetriebene Fahrzeuge. Hauptgrund hierfür sind der geringere Schadstoff- und Kohlendioxidausstoß. Außerdem liegen die Erdgasvorräte über den Ölvorräten, so dass Erdgas noch länger zu Verfügung stehen wird. Als Hauptkonkurrent für Erdgasbusse sind Dieselhybride anzusehen. Mit einer entsprechenden Abgasnachbehandlung kann der EEV-Standard erreicht werden und über die Hybridisierung der Verbrauch und damit der CO_2-Ausstoß gesenkt werden. Wir werden auf die Dieselhybride in Kapitel 4.3 näher eingehen.

Beispielmodell für den Innovationsbereich 3: Scania

Technologie

Scania produziert bereits seit 18 Jahren Ethanolbusse (Scania 2007a). Die meisten von ihnen sind in Stockholm im Einsatz (PFI 2007: 31). In der schwedischen Hauptstadt werden zwei unterschiedliche Modelle eingesetzt (SL 2007). Bei der Auswahl des Beispielmodells waren die vergleichbaren Größen- und Gewichtsangaben mit den bisher vorgestellten Modellen ausschlaggebend.

Beispielmodell Fahrzeugkonfiguration $F_{1/10}$

Kennwerte		Scania
Modell		DC9 E02 270[c]
Fahrzeug-Konfiguration		$F_{1/10}$
Motordaten	Typ	DC9 E02 270[c]
	Hubraum[ccm]	8.900[a]
	Zylinder/Anordnung	5/Reihe[a]
	Nennleistung [kW]	198[c]
	Nenndrehm. [Nm] bei 1.100-1.400/min	1.200[a]
Verbrauch	[l/ 100 km]	keine Angabe
Tankinhalt	Ethanol [Liter]	keine Angabe
Beschleunigung	0-60 km/h [sec]	keine Angabe
Elastizität	80-100 km/h, 6. Gang [sec]	keine Angabe
Reichweite	[km]	keine Angabe
Leergewicht	[kg]	16.700[b]
Maße	Länge [m]	12,00[b]
	Breite [m]	2,50[b]
	Höhe [m]	keine Angabe
Emissionen	Schadstoffklasse	Euro 5 und EEV[a]
Kapazität	Sitzplätze	38[b]
	Stehplätze	27-32[b]
	Gesamt	65-70[b]
Preis	[EUR] ohne MwSt.	keine Angabe

Abbildung 42, Quelle: eigene Darstellung; [a] Scania 2007a; [b] SL 2007; [c] Scania 2007d: 2

Die Motorenangaben beziehen sich auf die neu entwickelte, dritte Generation von Ethanol-Motoren, die ab 2007 verfügbar sein soll (Scania 2007a). Erst diese neuen Motoren erfüllen die Schadstoffklassen Euro 5 und EEV. Die zurzeit in Stockholm laufenden Modelle erfüllen die Euro 4-Norm (Greencarcongress 2006). Sie stammen noch aus der zweiten Generation der Ethanol-Motoren, die 1996 vorgestellt wurde (Scania 2007a). Die erste Generation wurde 1989 fertig gestellt. Sie erfüllte damals die Euro 3-Norm, die erst 2001 in Kraft trat (ebd.).

Die neuen Ethanol-Motoren sollen bei Volllast einen Wirkungsgrad von bis zu 44% erreichen, genauso viel wie ein vergleichbarer Diesel-Motor. Bei Teillast soll der Wirkungsgrad immer noch über 30% liegen. Der neue Ethanol-Motor ist eine Modifikation des 9-Liter-Diesel-Motors mit Ladeluftkühlung nach dem Luft-zu-Luft-Prinzip und Abgasrückführung (ebd.). Die Abwandlung umfasst eine höhere Verdichtung, revidierte Materialien, größere Kraftstofftanks und angepasste Wartungspläne. Der Motor wird durch reines Ethanol mit einem 5%igen Zündverbesserer angetrieben (Scania 2007b).

Verbrauchsangaben sind für die neuen Motoren noch nicht verfügbar. Deswegen wird hier auf »alte« Werte zurückgegriffen. Die Busse, die im Stockholmer Stadtverkehr eingesetzt werden, haben ungefähr einen Verbrauch von 80 l/100 km (Stockholm 2007: 4).

Felderprobungen

Seit 1989 hat Scania 600 Ethanolbusse ausgeliefert. 560 von ihnen sind an schwedische Städte gegangen, allein 380 in die Hauptstadt Stockholm (PFI 2007: 31). 1990 hatten sie ihren ersten Einsatz im Stockholmer Linienverkehr. 32 Ethanolbusse liefen im Rahmen eines 4-jährigen Demonstrationsprojektes der Stockholmer Verkehrsgesellschaft SL (CADDET 1997: 4). Ziel des Projektes war es, den Schadstoffausstoß der Busse möglichst gering zu halten (ebd.: 2).

Eingesetzt wurde der Scania Stadtbus CN113. Der Diesel-Motor wurde für den Ethanol-Gebrauch entsprechend umgebaut. Die Verdichtungsrate wurde von 18:1 auf 24:1 erhöht, die Einspritzöffnungen wurden vergrößert, das Einspritz-Timing angepasst, die Kraftstoffpumpe vergrößert und die vorhandenen Dichtungen und Filter wurden durch alkoholresistente ersetzt. Der Motor wurde durch 95%iges Ethanol angetrieben, das man aus Forstabfällen herstellte. Dem Ethanol mischte man 2%igen Zündungsverbesserer und Vergällungsmittel bei. Die Busse erhielten einen zusätzlichen Kraftstofftank von 115 Litern Fassungsvermögen. Damit erhöhte sich das gesamte Tankvolumen auf 395 Liter. In der Praxis wurde der zusätzliche Tank jedoch nicht benötigt. Die Ethanolbusse verbrauchten nie mehr als 150 Liter pro Tag (ebd.: 2-3).

Insgesamt legten die Busse in dem Projekt eine Strecke von 4 Mio. km zurück. An einigen der Fahrzeuge wurden Abgasmessungen gemäß dem ECE-R49-Testzyklus durchgeführt (ebd.: 2). Es handelt sich dabei um einen europäischen Normtestzyklus für Dieselmotoren in Nutzfahrzeugen. Die Messwerte sind in Abbildung 43 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die in dem Projekt gesetzten Zielwerte erreicht wurden und gegenüber einem Dieselbus aus dem Jahr 1994 eine erhebliche Emissionsminderung möglich ist. Allerdings ist einschränkend anzumerken, dass die Messung gemäß dem ECE-Fahrzyklus im eingefahrenen Zustand erfolgt und ein »kalter Motor« höhere Emissionswerte aufzeigt. Daher sind im alltäglichen Stadtverkehr höhere Emissionswerte zu erwarten. Außerdem wurde festgestellt, dass gegen Ende des Projektes der CO-Ausstoß bei den Bussen zugenommen hatte. Der NO-Ausstoß hingegen blieb konstant, während bei den HC-Emissionen keine eindeutige Entwicklung beobachtet werden konnte (ebd.: 3).

Emissionswerte Ethanolbus

Schadstoff	Gemessene Emissionen nach ECE-R49 [g/kWh]	Angestrebte Werte des Projektes [g/kWh]	Langfristig angestrebte Werte [g/kWh]	Dieselbus 1994 [g/kWh]
NO	3,8	4,5	2-3	9,0
CO	0,05	0,1	0,05	5,0
HC	0,16	0,2	0,1	1,2
PM	keine Angabe	0,05	keine Angabe	0,4

Abbildung 43, Quelle: eigene Darstellung; CADDET 1997: 2

Die Fahrer konnten bei der Bedienung der Ethanolbusse keinen Unterschied zu der von Dieselbussen ausmachen. Die aufgetretenen Schwierigkeiten waren die gleichen wie bei Dieselbussen, und die Zuverlässigkeit war auch dieselbe. Sowohl die Fahrer als auch die Mechaniker mussten keine zusätzlichen Schulungen für den Umgang mit den Bussen absolvieren. Ein spezifisches Problem der Ethanolbusse trat dennoch auf. Die Abgase der Busse rochen gelegentlich nach Essigsäure, was allerdings nicht gesundheitsgefährdend ist. Hervorgerufen wurde der unangenehme Geruch durch nicht verbranntes Ethanol, das im Katalysator zu Essigsäure wurde. Am stärksten war der Geruch während der Beschleunigungsphase bei der Weiterfahrt nach den Haltestellen (ebd.: 3).

Während des Projektes waren die Kosten für das Betreiben und Warten eines Ethanolbusses höher, als die für einen vergleichbaren Dieselbus. Die zusätzlichen Wartungskosten beliefen sich pro Bus auf 3.500 Schwedische Kronen (370,2 EUR) pro Jahr. Diese wurden durch das Schmieröl für die Einspritzpumpe, das Ersetzen der Dichtungen und Filter und die häufiger anfallenden Reinigungen der Einspritzventile verursacht (ebd.: 3). Seit diesem Demonstrationsprojekt hat die Stockholmer Verkehrsgesellschaft SL ihre Ethanolbussflotte kontinuierlich ausgedehnt und zurzeit sind, wie bereits erwähnt, 380 Ethanolbusse in der Stadt in Betrieb. Kleinere Flotten laufen zudem in den schwedischen Städten Umeå, Gävle, Örnsköldsvik, Falun und Sundsvall (BEST 2007a).

Weitere Felderprobungen der Ethanolbusse von Scania finden in Australien (Scania 2007a), China und in Ungarn statt (Scania 2007c). Zu diesen konnten jedoch keine ausführlicheren Informationen recherchiert werden. In Großbritannien wurden die Busse im August 2006 zwei Wochen lang in Liverpool, Barnsley, Sheffield, Newcastle und Manchester getestet (Greencarcongress 2006). Seit Oktober 2006 läuft ein Ethanolbus im polnischen Slupsk im Linienverkehr (Infobus 2007). Im Rahmen des BEST-Projektes (BioEthanol for Sustainable Transport), das von der Europäischen Union gefördert wird, sollen 160 Ethanolbusse in sieben Städten erprobt werden (BEST 2007a). Dazu zählen Rotterdam in den Niederlanden, La Spezia in Italien, Madrid in Spanien, São Paulo in Brasilien, Nanyang in China, und Stockholm, sowie die BioFuel Region in Schweden (BEST 2007b). In Italien, Spanien, China und Stockholm hat der Einsatz der Busse bereits begonnen (Scania 2007c).

Ein anderes Projekt fand in den USA statt. Das National Renewable Energy Laboratory (NREL) untersuchte in einer Studie Busse, die durch alternative Kraftstoffe angetrieben werden. Darunter befanden sich auch 10 Ethanolbusse. 5 davon liefen in Peoria in Illinois, die anderen 5 waren in Minneapolis in Minnesota im Einsatz. In beiden Städten wurden die Busse von der jeweiligen lokalen Verkehrsgesellschaft betrieben. Alle 10 Busse waren mit einem DDC 6V92TA (Detroit Diesel Corporation) Motor ausgestattet, und wurden durch 95%iges Ethanol angetrieben, welchem 5% bleifreies Benzin beigemischt wurde. In Preoria stieg man allerdings aus Kostengründen später auf 93%iges Ethanol um. Diesem wurde 5% Methanol und 2% Kerosin beigemischt (NREL 1996: 5-6). Die Studie wurde 1996 veröffentlicht, in welchem Zeitraum die Daten erhoben wurden, ist leider nicht angegeben. Es wird lediglich betont, dass versucht wurde, möglichst aktuelle Daten von den Verkehrgesellschaften zu erhalten (ebd.: 4).

Der Preis für einen Ethanolbus betrug 235.000 US-Dollar (163.541,1 EUR), womit er 20.000 US-Dollar (13.918,4 EUR) teurer war, als ein vergleichbarer Dieselbus (ebd.: 18). Die Betriebskosten eines Ethanolbusses auf 1.000 km lagen in Peoria bei 188 US-Dollar (Ethanol95) (130,8 EUR), bzw. später bei 283 US-Dollar (Ethanol93) (196,95 EUR). In Minneapolis betrugen sie 242 US-Dollar (168,4 EUR) (ebd.: 31). Auf Basis der erhaltenen Daten von den Verkehrsgesellschaften berechnete man zur Illustration die zusätzlichen Kosten, die für den Betrieb einer Flotte von 160 Ethanolbussen in die Infrastruktur investiert werden müssten. Diese würden 100.000 US-Dollar (69.586 EUR) betragen und entstünden ausschließlich durch den notwendigen Umbau der Tankanlage (ebd.: 20).

In Peoria legten die Busse insgesamt 522.500 km und in Minneapolis 194.640 km zurück. In Peoria gab es auf 1.000 zurückgelegte Kilometer im Durchschnitt 0,11 Betriebsausfälle, von denen 0,04 kraftstoff- oder antriebsbedingt waren. In Minneapolis kamen im Durchschnitt 0,18 Betriebsausfälle auf 1.000 km vor. Davon waren allerdings 0,09 kraftstoff- oder antriebsbedingt (ebd.: 31). In beiden Städten hatten die Ethanolbusse mehr kraftstoff- und antriebsbedingte Betriebsausfälle, als vergleichbare Dieselbusse. Dies wurde vor allem auf den Kraftstoff Ethanol zurückgeführt. In 5 von 61 Betriebsausfällen in Peoria und in 4 von 21 in Minneapolis waren verstopfte Kraftstofffilter der Auslöser (ebd.: 9-10).

Der Verbrauch entsprach ungefähr dem vergleichbarer Dieselbusse, obwohl die Ethanolbusse je nach der Größe des Tanks zwischen 453 und 680 kg schwerer waren, (ebd.: 12). Die Wartungskosten der Busse in Peoria beliefen sich auf 106 US-Dollar (73,77 EUR) pro 1.000 km. Davon waren 20 US-Dollar (13,92 EUR) kraftstoff- oder antriebsbedingte Wartungskosten. In Minneapolis betrugen die Wartungskosten 112 US-Dollar (77,94 EUR) auf 1.000 km, wobei 18 US-Dollar (12,53 EUR) davon antriebs- oder kraftstoffbedingt waren (ebd.: 31). Insgesamt hatten die Ethanolbusse damit im Durchschnitt höhere Wartungskosten als vergleichbare Dieselbusse. Ausschlaggebend hierfür waren vor allem die bis zu 75% höheren antriebs- und kraftstoffbedingten Wartungskosten. Diese wurden wiederum verursacht von den um bis zu 15-mal höheren Kosten für Ethanol-Kraftstofffilter, welche zudem auch noch häufiger ausgewechselt werden mussten, als bei Dieselbussen (ebd.: 16).

Die Emissionen der Busse wurden 1994 und 1995 gemessen. Die Ergebnisse können der folgenden Tabelle entnommen werden:

Emissionswerte

Stadt	Kraftstoff	Anzahl der Busse	Anzahl der Tests	Kilometerstand		PM [g/km]	NO_x [g/km]	HC [g/km]	CO [g/km]
				Minimum	Maximum				
Peoria	Ethanol93	5	8	96.561	167.370	0,39	8,31	5,52	23,00
Minneapolis	Ethanol95	5	8	45.062	69.202	0,30	13,64	9,55	25,98

Abbildung 44, Quelle: eigene Darstellung; alle Angaben entstammen NREL 1996: 24

Allgemein lässt sich festhalten, dass Projekte mit Ethanolbussen sich in den USA in den 1990er Jahren vollzogen. 1992 fuhren lediglich fünf Ethanolbusse in den gesamten USA. Die Zahl steigerte sich und erreichte ihren Höhepunkt im Jahr 1996 mit 347 (GAO 1999: 5). Danach nahm sie kontinuierlich ab und sank auf 51 im Jahr 1999. Ursache dafür waren die hohen Betriebskosten gegenüber einem vergleichbaren Dieselbus. So tauschte z.B. Los Angeles 1998 seine komplette Flotte von Ethanolbussen gegen Dieselbusse aus. 1996 wurde der letzte Ethanolbus in der USA produziert, seitdem sind keine weiteren Aufträge bekannt (ebd.: 32).

Marktpotenziale

Die Erfahrungen aus dem Stockholmer Demonstrationsprojekt zeigen, dass die zukünftigen Marktchancen der Ethanolbusse unter anderem von der Preisentwicklung des Ethanols abhängen. So kostete das Betreiben eines Ethanolbusses 1996 in Stockholm im Durchschnitt 95.000 Schwedische Kronen (10.052 EUR) mehr, als das eines vergleichbaren Dieselbusses. Diese Extrakosten waren nahezu komplett auf einen höheren Ethanolpreis

zurückzuführen (CADDET 1997: 3). Der größere Verbrauch der Ethanolbusse verstärkt diesen Effekt zusätzlich (Stockholm 2007). Dennoch hängen die zukünftigen Marktchancen der Ethanolbusse aber nicht nur von der Preisentwicklung des Ethanols ab. Von großer Bedeutung ist sicherlich auch, wie sehr der Schadstoffausstoß durch die Ethanolbusse gesenkt werden kann. Zudem arbeitet man daran, den Verbrauch der Busse zu senken. Eine mögliche Option besteht z.B. darin, einen Hybrid-Motor über Ethanol laufen zu lassen. Hierauf wird in Kapitel 5.3 näher eingegangen.

In einigen Ländern wurden längerfristige Projekte zur Herstellung von Biokraftstoffen gestartet. In Europa ist hier vor allem Schweden zu nennen, wo pro Jahr 63 Mio. Liter Ethanol produziert werden. Bis 2010 will man dies auf 700 Mio. steigern (Biofuelregion 2007a). Hergestellt wird das Ethanol in der BioFuel Region im Norden des Landes, die die Vision hat, bis 2020 die weltweit führende Region im Bereich der Zellulose basierten Produktion von Biokraftstoff zu sein (Biofuelregion 2007b). Sie wird im Rahmen des BEST-Projektes von der EU unterstützt (BEST 2007b).

Insgesamt hat man sich in Schweden zum Ziel gesetzt bis 2020 unabhängig von Erdöl zu sein, und bis 2030 durch Biodiesel und Ethanol Autarkie zu erreichen. Dafür werden in Zukunft zwei neue Fabriken für die Herstellung von Ethanol in Betrieb gehen (Automotive 2007). Dementsprechend kann auch davon ausgegangen werden, dass die Ethanolbusse in Schweden weiter an Bedeutung gewinnen werden. In Östersund sollte z.B. im Sommer 2007 ein Ethanolbus in Betrieb genommen werden. Bis 2011 ist geplant die komplette Flotte auszutauschen (SR 2006).

Ein weiteres Land, das ebenfalls in der Zukunft auf die Produktion von Ethanol setzt, ist Brasilien. Dort wird der Biokraftstoff bereits seit dem 18. Jahrhundert hergestellt. Das Land ist mit 15 Mrd. Litern pro Jahr der weltweit führende Produzent von Ethanol (Biofuelregion 2007a) und zweidrittel aller neu zugelassenen Fahrzeuge können mit Ethanol betankt werden (Tagesschau 2006). Im Rahmen des BEST-Projektes sollen drei Ethanolbusse in São Paulo zum Einsatz kommen. Von den insgesamt 160 Bussen des BEST-Projektes sind 145 bereits im Einsatz, 136 davon in Stockholm. Ein Bus läuft im chinesischen Nanyang, fünf in Madrid und drei in La Spezia in Italien (Jannsen 2006: 15).

In der Ethanol-Herstellung sind unterdessen noch weitere Länder engagiert. In China wurde 2003 die weltweit größte Produktionsanlage eingeweiht. Sie fertigt zurzeit 300 Mio. Liter Ethanol pro Jahr, ist aber auch darauf vorbereitet, die doppelte Menge herzustellen. In den USA versucht man ein System zu entwickeln, mit dem man Ethanol aus Zellulose gewinnen kann. Dies geschieht allerdings vorerst nur aus Gründen der Energieversorgung (Biofuelregion 2007b). Als Kraftstoff hat Ethanol in den USA keine nennenswerte Bedeutung, der letzte Ethanolbus in den USA wurde 1996 produziert. Weitere Aufträge sind bislang nicht geplant (GAO 1999: 32). In Norwegen stellt sich die Lage anders dar. 18 Ethanolbusse wurden von Scania bestellt und sollen ab März 2008 im Osloer Linienverkehr unterwegs sein (Scania 2007c).

Alles in allem ist es zurzeit noch nicht möglich, einen allgemeinen Trend auf dem Markt der Ethanolbusse auszumachen. In ihrem »Heimatland« Schweden haben sie wahrscheinlich eine große Zukunft. Das skandinavische Land setzt mit der BioFuel Region auf Biokraftstoffe wie Ethanol. Die schwedischen Städte werden wohl vorerst auch weiterhin die größten Nachfrager bleiben. Je nachdem, welche Erfahrungen man in Oslo mit den ersten 18 Bussen macht, könnte auch das Nachbarland Norwegen als Markt erschlossen werden.

Ein gewaltiges Nachfragepotenzial hat sicherlich der weltweit größte Ethanol-Produzent Brasilien. In dem südamerikanischen Land können bereits die meisten der neu zugelassenen Fahrzeuge mit Ethanol betankt werden. Es müsste weder die Infrastruktur verändert, noch Kraftstoff importiert werden. Wie sich die Marktlage in Brasilien entwickelt, wird mitunter von dem Verlauf des BEST-Projektes abhängen. Das gleiche gilt für die daran teilnehmenden europäischen Länder sowie für China.

4.2. Cluster 2: Wasserstoff-Busse

Clusterbeschreibung

Das Cluster 2 der Abbildung 37 umfasst konventionelle (a=1) und nicht-konventionelle thermische Antriebe (a=2). Kraftstoffseitig werden hier die kohlenstofffreien Kraftstoffe (k=13, 14, 15) betrachtet. Da der Einsatz von Strom (k=13) in thermischen Antrieben technologisch ausgeschlossen ist, reduzieren sich die kohlenstofffreien Kraftstoffe auf Wasserstoff. Dieser kann entweder flüssig (Liquid Hydrogen, kurz LH2, k=14) oder in hochverdichteter gasförmiger Form (Compressed Gaseous Hydrogen, kurz CHG, k=15) getankt werden. Der folgende Ausschnitt aus der Innovations-Matrix in Abbildung 45 bildet die Konfigurationsfelder des Clusters 2 ab.

Cluster 2 der Innovations-Matrix

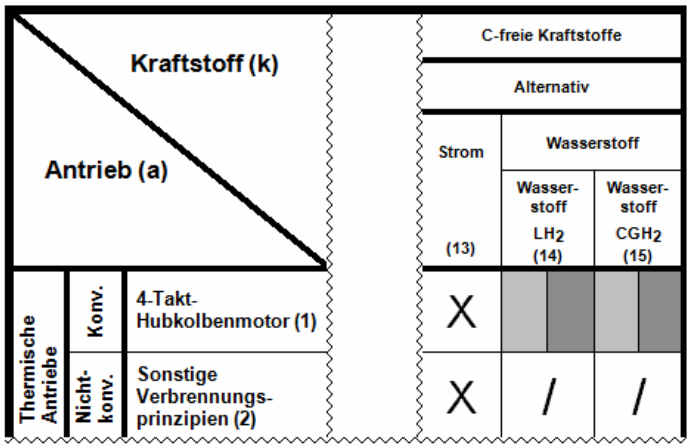


Abbildung 45; Quelle: eigene Darstellung

Im Vergleich zu Cluster 1 ist hier keine Einteilung in Innovationsbereiche notwendig. Innovationen liegen ausschließlich bei konventionellen Verbrennungsmotoren vor. Hier konnten die Konfigurationsfelder $F_{1/14}$ und $F_{1/15}$ besetzt werden. Es wurden sowohl für den Antrieb mit flüssigem, als auch für den mit gasförmigem Wasserstoff, Beispielmodelle recherchiert. Für die Konfigurationsfelder $F_{2/14}$ und $F_{2/15}$ hingegen konnten keine Beispielmodelle recherchiert werden. Im Bereich der nicht-konventionellen mit Wasserstoff angetriebenen Verbrennungsmotoren liegen also Inventionsräume vor.

Betrachten wir nun nach derselben Methodik wie in Kapitel 5.1, die in Cluster 2 vorhandenen Innovationstypen. Zunächst fällt auf, dass die beiden mit einer Innovation belegten Felder zweigeteilt sind, und entweder eine inkrementale Innovation 1. Grades oder eine inkrementale Innovation 2. Grades darstellen. Der Grad der Innovation hängt von der Erzeugung des Wasserstoffs ab. Basiert die Erzeugung auf regenerativen Energieträgern, handelt es sich um eine Innovation 2. Grades. Erfolgt die Erzeugung unter Einsatz von Kohlenwasserstoffen, liegt eine Innovation 1. Grades vor. Innovationen 2. Grades sind systematisch, Innovationen 1. Grades modular.

Es bleibt also festzuhalten, dass bisher nur für die Kombination eines konventionellen Antriebs mit dem Kraftstoff Wasserstoff Innovationen vorliegen. Strom als Kraftstoff ist technologisch ausgeschlossen und bei den nicht-konventionellen Antrieben besteht noch Raum für Inventionen.

Wahl des Beispielmodells

In Cluster 2 liegt also nur ein Innovationsbereich vor, somit wird auch nur ein Beispielmodell ausgewählt und näher vorgestellt. Zunächst muss aber entschieden werden, aus welchem der beiden mit Innovationen besetzten Konfigurationsfelder wir unser Beispielmodell auswählen. Betrachten wir dazu die Entwicklung der LH_2- und CHG- Busse etwas genauer.

LH_2 wurde vor allem in den bis 2000 entwickelten Busmodellen eingesetzt. Einer der ersten Wasserstoff-Busse wurde 1994 der Öffentlichkeit präsentiert (H2Cars 2007). Es handelte sich um ein Modell von Van Hool, dass mit LH_2 angetrieben wurde. Der Bus wurde jedoch nie im öffentlichen Verkehr eingesetzt. Sein Nachfolger ist der im Jahr 2000 entwickelte »Zembus«. Er sollte noch im selben Jahr in Belgien getestet werden. Es konnten jedoch keine Daten recherchiert werden, die belegen, dass dieses Projekt wirklich zustande kam. Zwischenzeitlich wurde 1997 von dem Savannah River Technology Center in den USA ein Bus der Blue Bird Bus Company mit einem LH_2-Motor ausgestattet (ebd.). Hinweise über Erprobungen des Busses im öffentlichen Verkehr liegen uns allerdings auch hier nicht vor.

Die nach dem Jahr 2000 entwickelten Wasserstoff-Busse werden allesamt durch CHG angetrieben. Als Marktführer kann eindeutig MAN angesehen werden. MAN hat in den letzten zehn Jahren vier Protoyen eines CHG-Busses mit Verbrennungsmotor entwickelten und diese, bis auf einen, auch im öffentlichen Stadtverkehr eingesetzt (ebd.). Das aktuellste Modell ist zurzeit im Rahmen des HyFLEET: CUTE Projektes in Berlin im Einsatz. Zwei etwas ältere Modelle liefen im Rahmen des H2Argemuc-Projektes von 1999 bis 2006 auf dem Münchener Flughafen und teilweise auch im Münchener Linienverkehr (H2Argemuc 2007a: 2-5). Ebenfalls im Münchener Linienverkehr unterwegs, war der erste von MAN fertig gestellte Wasserstoff-Bus. Er wurde 1996 entwickelt und kam, neben München, auch im öffentlichen Stadtverkehr Erlangens zum Einsatz. Es ist der erste und einzige Wasserstoff-Bus von MAN, der durch LH2 angetrieben wird (H2Cars 2007).

Die Entwicklung der Wasserstoff-Busse bei MAN zeigt eindeutig weg von LH_2, hin zu CHG. Aber auch die anderen Hersteller haben seit dem Zembus aus dem Jahr 2000 keinen Wasserstoff-Bus mit LH2 als Kraftstoff mehr entwickelt. Ford stellte zwar 2004 einen mit CHG betriebenen Shuttle-Bus fertig. Dieser sollte 2005 auf der North American International Auto Show eingesetzt werden (ebd.). Es konnten jedoch keine Daten ermittelt werden, die belegen, dass dies auch geschehen ist.

Bevor wir nun aber zur eigentlichen Auswahl des Beispielmodells kommen, muss der Vollständigkeit halber an dieser Stelle noch ein weiteres Modell erwähnt werden, das 1995 von Novabus entwickelte wurde. Es wird weder durch LH2, noch durch CHG angetrieben, sondern durch Hythane, einem Gemisch aus 15-20% Wasserstoff und 80-85% Erdgas. Zwei dieser Busse wurden im öffentlichen Verkehr der Stadt Montreal in Kanada demonstriert, erlangen darüber hinaus aber nicht weiter an Bedeutung (ebd.).

Diese kurze Einführung in die Geschichte der Wasserstoff-Busse verdeutlicht, warum wir uns dazu entschieden haben, unser Beispielmodell aus dem Konfigurationsfeld $F_{1/15}$ zu wählen. Die zukünftige Entwicklung im Bereich der Wasserstoff-Busse scheint in Richtung CHG zu gehen. Zudem wird das aktuelle Busmodell von MAN durch CHG angetrieben. Es handelt sich dabei um den Lion's City. Diesem stehen in seinem Konfigurationsfeld lediglich das Modell von Ford, und einige ältere Modelle aus dem eigenen Lager von MAN gegenüber. Bei dem Modell von Ford handelt es sich um einen Shuttle-Bus, zu dem keine weiteren Daten recherchiert werden konnten. Der Lion's City ist zurzeit in dem bisher größten Projekt zur Erprobung von Wasserstoff-Bussen im Einsatz, dem HyFLEET: CUTE Projekt (ebd.). Zu diesem Projekt steht uns eine große und zugleich sehr zuverlässige Datenmenge zur Verfügung. All dies sind gute Gründe, die uns dazu bewegt haben, den MAN Lion's City als Beispielmodell für das Cluster 2 auszuwählen, und im Folgenden genauer vorzustellen.

Beispielmodell für das Cluster 2: MAN Lion's City H

Technologie

Seit 2006 sind vier Wasserstoff-Busse der ersten Generation von MAN im Rahmen des HyFLEET: CUTE Projektes in Berlin im Einsatz. Sie verfügen über einen Saugmotor mit einer Nennleistung von 150 kW. Auf ihrer Basis wurde die zweite Generation mit aufgeladenem Turbomotor entwickelt, der die Nennleistung auf 200 kW hebt (Alternativ Fahren 2006). Dies wird vor allem durch spezielle Ventile erreicht, die die Einblasung des Wasserstoffs unmittelbar in den Brennraum bei einem niedrigen Druckniveau von ungefähr 10 bar erlauben, so dass Rückzündungen nicht möglich sind (Saarbahn 2006). Im Sommer 2007 soll die Lieferung der neuen Busse an die Berliner Verkehrsgesellschaft BVG beginnen (Alternativ Fahren 2006). Die im Folgenden dargestellten technischen Daten beziehen sich auf das Modell der zweiten Generation.

Beispielmodell Fahrzeugkonfiguration $F_{1/15}$

Kennwerte		**MAN**
Modell		Lion's City H
Fahrzeug-Konfiguration		$F_{1/15}$
Motordaten	Typ	MAN 2876 LUH01[b]
	Hubraum[ccm]	12.816[d]
	Zylinder/Anordnung	6/Reihe liegend[b]
	Nennleistung [kW]	200[b]
	Nenndrehm. [Nm] bei 1.000/min	1.000[d]
Verbrauch	[l/100 km]	keine Angabe
Tankinhalt	Wasserstoff [Liter]	10 Tanks mit jeweils 50 kg H_2 bei 350 bar[b]; insgesamt: 2050 Liter[a]
Beschleunigung	0-60 km/h [sec]	keine Angabe
Elastizität	80-100 km/h, 6. Gang [sec]	keine Angabe
Reichweite	[km]	220[b]
Leergewicht	[kg]	12.600[b]
Maße	Länge [m]	12[b]
	Breite [m]	2,5[b]
	Höhe [m]	3,37[b]
Emissionen	Schadstoffklasse	EEV[c]
Kapazität	Sitzplätze	36[a]
	Stehplätze	44[a]; 47[b]
	Gesamt	80[a]; 83[b]
Preis	[EUR] ohne MwSt.	keine Angabe

Abbildung 46, Quelle: eigene Darstellung; [a] H2Cars 2007; [b] GHBP 2007a; [c] MAN 2007b; [d] Bayern Innovativ 2005

Im Laufe des HyFLEET: CUTE Projektes soll noch eine dritte Generation der Wasserstoff-Busse entwickelt werden. Diese wird auch über einen aufgeladenen Turbomotor mit 200 kW verfügen und zusätzlich noch über eine Brennstoffzelle zur Bordstromversorgung verfügen (GHBP 2007b). Die Busse aus allen drei Generationen erfüllen die EEV-Norm (Alternativ Fahren 2006). Die Stickstoffoxidemissionen werden dabei durch einen nachgeschalteten Katalysator minimiert (Saarbahn 2006). Dass der Motor überhaupt Stickstoffoxide, Kohlenwasserstoffverbinden, Kohlenmonoxide und Partikel emittiert, liegt an dem beim Verbrennungsmotor unvermeidlichen Ölverbrauch. Hinzu kommt die Verbrennung mit der Umgebungsluft. Der Wasserstoff selbst enthält keine Kohlenstoffatome (TU-Berlin 2007: 30).

Der Motor der Wasserstoff-Busse beruht auf bereits bewährter Technologie. Er wurde vom MAN-Erdgasmotor abgeleitet, der schon seit mehreren Jahren serienmäßig produziert wird (Alternativ Fahren 2006), und weltweit über 4.000 Mal im Einsatz ist (Saarbahn 2006). Auch wenn die Arbeitsweise des Motors auf dem Ottoprinzip beruht, so sind doch mehrere Komponenten (beispielsweise das Motorgehäuse) mit denen der Dieselbusse identisch (Saarbahn 2006). So hält MAN die Mehrkosten im Vergleich zum konventionellen Diesel-Motor niedriger.

Weitere Eigenschaften des Wasserstoffmotors sind die äußere Gemischbildung, die Quantitätsregelung mittels Drosselklappe, und die Fremdzündung durch Zündkerzen. Aufgrund seiner hohen Zündwilligkeit kann es in Wasserstoffmotoren leichter zu Fehlzündungen kommen als in Dieselmotoren. Um ein Wasserstoff-Luft-Gemisch zu zünden, wird nur etwa ein Zwölftel der Energie benötigt, die für das Zünden eines Benzin-Luft-Gemisches notwendig wäre. Daher sind entsprechende Abhilfemaßnahmen zu treffen, beispielsweise das Einspritzen von Wasser, ein Magerbetrieb des Motors oder konstruktive Maßnahmen zur Vermeidung von Spitzen und Kanten.

Felderprobungen

Bei den Felderprobungen steht natürlich das HyFLEET: CUTE Projekt im Vordergrund. Es ist der bisher größte Flottenversuch mit Wasserstoff-Bussen weltweit. Dennoch sollen andere Felderprobungen nicht unbeachtet bleiben. So kommen wir zunächst auf einen anderen Einsatz der Busse zu sprechen, der Ende der 90er Jahre in Bayern begann.

Das erste langfristige Projekt zur Erprobung der mit gasförmigem Wasserstoff angetriebenen Busse von MAN lief unter dem Namen »H2Argemuc« und fand von 1999 bis 2006 in München statt. Zwei Busse wurden auf dem Münchener Flughafen eingesetzt und legten mehr als 400.000 km ohne Zwischenfall zurück. Seit 2005 läuft im Rahmen von H2Argemuc noch ein zusätzlicher Wasserstoff-Bus von MAN im Münchener Linienverkehr (H2Argemuc 2007a: 25, 2007b: 6). Auch er absolvierte seinen Einsatz ohne einen sicherheitstechnischen Zwischenfall. Die Verfügbarkeit der drei Fahrzeuge war hoch, und das Projekt wurde insgesamt positiv bewertet. Ihre tägliche Bedienung und Betankung durch die Fahrer verlief zuverlässig und problemlos (H2Argemuc 2007a: 7).

Dieses Beispiel aus München verdeutlicht zugleich die Bedeutung von Nischen bei der Einführung neuer Technologien. Zu der Anwendungs-Nische Bus-Markt und der Raum-Nische München tritt der Münchner Flughafen als weitere Nische in der Raum-Nische hinzu. Die Wasserstoff-Busse stehen nicht mehr in direkter Konkurrenz mit den restlichen Bussen des Münchener Linienverkehrs und werden vor der Hyperselektivität der Konvention geschützt. Dieser Schutzraum bietet ihnen die Möglichkeit, sich als neue Technologie zu bewähren und auf weitere Bereiche außerhalb der Nische überzugreifen. So wird, aufgrund des erfolgreichen Projektes am Flughafen, seit 2005 auch im Linienverkehr Münchens ein Wasserstoff-Bus eingesetzt. Der erste Schritt auf dem Weg aus der Nische ist damit getan.

Eine wesentlich kürzere Erprobung fand 2004 in Berlin statt. MAN, TOTAL und die Berliner Verkehrsgesellschaft BVG sammelten ihre ersten Erfahrungen mit dem Betrieb der Wasserstoff-Busse (Alternativ Fahren 2006). Von Ende April bis Juni 2004 lief ein Bus auf unterschiedlichen Berliner Linien. Anschließend wurde er von MAN einer zwischenzeitlichen Überprüfung unterzogen, bevor er im Herbst desselben Jahres seinen zweiten Testeinsatz in Berlin hatte. Die Mitfahrt war kostenlos, denn der Bus sollte von möglichst vielen Fahrgästen genutzt werden. Einer der ersten Fahrgäste war Berlins Wirtschaftssenator Harald Wolf (Energieportal24 2004).

Im Rahmen der Fußballweltmeisterschaft 2006 startete die FIFA (Federal International Football Association) in Unterstützung des Bundesumweltministeriums das Green Goal Projekt. Das Ziel war eine umweltfreundliche Gestaltung der Fußball WM (Energieportal24 2006b). Dafür wurden in Anwesenheit des Bundesumweltministers Sigmar Gabriel im Juni 2006 zwei Wasserstoff-Busse an die Berliner Verkehrgesellschaft BVG übergeben. Im Rahmen des Projektes liefen sie während der Fußball WM 2006 als Shuttleservice (Energieportal24 2006a) und beförderten in diesem Zeitraum über 10.000 Fahrgäste im Pendelverkehr vom Flughafen Tegel zum Olympiastadion (Alternativ Fahren 2006; Energieportal24 2006b). Insgesamt legten sie während der WM eine Strecke von 10.000 km zurück.

Betrieben wurden die Busse von der BVG in Zusammenarbeit mit dem Mineralölunternehmen TOTAL (ebd.). Die Betankung erfolgte an Europas größter Wasserstoff-Tankstelle in Spandau, die erst kurz zuvor errichtet wurde (Energieportal24 2006a). Während des Projektes traten keine technischen Probleme mit den Fahrzeugen auf. Es erwies sich jedoch als sinnvoll, bei hohen Temperaturen die Kühlleistung etwas zu steigern (Energieportal24 2006b). Deshalb wurden die Busse mit einem zusätzlichen Kühler ausgerüstet. So konnte man den Verbrennungsbrennungstemperaturen im Motor gerecht werden, die im Vergleich zu Dieselbussen relativ hoch sind (Alternativ Fahren 2006).

Das Green Goal Projekt ist erneut ein Beispiel für eine Dreifachnische. Zu der Anwendungs-Nische des Bus-Marktes und der Raum-Nische Berlins tritt noch die Nische des Shuttle-Services hinzu. In diesem Fall war die geschaffene Nische allerdings zeitlich auf den Rahmen der Fußballweltmeisterschaft 2006 begrenzt. Dies verhinderte von vornherein eine mögliche Stagnation in der Nische und zwang die neue Technologie, entweder aus ihrem Schutzraum herauszubrechen oder wieder vom Markt zu verschwinden.

Die Wasserstoff-Busse konnten sich aber durchsetzen und im Anschluss an Green Goal, wurden sie im Rahmen des HyFLEET: CUTE Projektes im Berliner Linienverkehr eingesetzt (Energieportal24 2006a). Am 30. Oktober 2006, bei der Vorstellung des „Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ von Bundesverkehrsminister Wolfgang Tiefensee, wurden zwei weitere Wasserstoff-Busse an die BVG übergeben (Alternativ Fahren 2006). Bis Ende 2007 sollen noch zehn Fahrzeuge hinzukommen, womit die geplanten 14 Wasserstoff-Busse vollzählig wären (Energieportal24 2006a). Die Wasserstoffflotte der BVG soll dann bis 2009 im Berliner Linienverkehr eingesetzt werden. Die langfristigen Pläne der BVG zum Aufbau eine Wasserstoffbusflotte wurden bereit in Kapitel 2.3 vorgestellt.

Neben der Demonstration der MAN Wasserstoff-Busse in Berlin wird im HyFLEET: CUTE Projekt auch der Einsatz von Brennstoffzellenbussen untersucht werden. Während aber die Erprobung der Brennstoffzellenbusse in zehn Städten auf drei Kontinenten vollzogen wird, beschränkt sich der Betrieb der Wasserstoff-Busse auf die Stadt Berlin (Alternativ Fahren 2006). Im Folgenden wird nur der Abschnitt des Projektes näher beschrieben, der sich auf den Einsatz der Busse mit Wasserstoffmotoren bezieht. Auf die Brennstoffzellenbusse kommen wir in Kapitel 5.5 zurück.

Das Projekt wird von der EU gefördert (ebd.). Weitere Unterstützer sind die Technische Universität Berlin, BVG, MAN, TOTAL und Vattenfall (TU-Berlin 2007: 29). Alles in allem kooperieren bei dem Projekt 31 Organisationen aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik

(GHBP 2007e). Übergeordnetes Projektziel ist dabei die öffentliche Demonstration der Wasserstoff-Busse. Konkret geht es darum, den Energieoutput von Wasserstoff-Motoren zu verbessern, die Zuverlässigkeit zu erhöhen und dabei gleichzeitig nachzuweisen, dass es sich um eine kosteneffiziente Technologie handelt. Die Betriebskosten sollen möglichst nah bei denen der restlichen Stadtbusse liegen. In Punkto Zuverlässigkeit wird eine Zuverlässigkeitsrate von 90% angestrebt (GHBP 2007c).

Etwas mehr als drei Jahre nach dem Einsatz des ersten Wasserstoff-Busses in Berlin, passierten am 6. Juli 2007 die Busse des HyFLEET: CUTE Projektes die 100.000 km Marke (GHBP 2007d). Anschließend sollen ausführliche Evaluationen durchgeführt werden (GHBP 2007f). Abgesehen von den hier bereits präsentierten Ergebnissen sind bisher allerdings keine weiteren Zwischenstände verfügbar.

Marktpotenziale

Die zukünftigen Marktchancen der Wasserstoff-Busse werden unter anderem von dem Erfolg des HyFLEET: CUTE Projektes abhängen. Sie müssen nicht nur ihre Praxistauglichkeit unter Beweis stellen, dies haben sie bereits in München getan, sondern vor allem ihre Energie- und Kosteneffizienz. Die Erkenntnisse aus dem Projekt sollen die Busse einen weiteren Schritt auf ihrem Weg zur Serienreife voranbringen. MAN erwartet diese bereits in wenigen Jahren (Alternativ Fahren 2006).

Das größte Hindernis für größere Aufträge sind bisher die im Vergleich zu Dieselbussen höheren Produktions- und Betriebskosten. So liegt der Stückpreis eines Wasserstoff-Busses bei 360.000 EUR (Energie-infoportal 2006). Damit kostet der Bus ungefähr 80.000 EUR mehr als ein vergleichbares Diesel-Modell. Im Rahmen des HyFLEET: CUTE Projektes wurden diese zusätzlichen Kosten von der EU gedeckt (ebd.).

Der zurzeit noch recht hohe Preisunterschied könnte aber in den kommenden Jahren beträchtlich sinken. Dies hat vor allem zwei Gründe. Zum einen werden die Wasserstoff-Busse bisher für jeden Auftrag einzeln gefertigt. Eine serienmäßige Herstellung birgt ein hohes Einsparpotenzial bei den Produktionskosten, was sich letztendlich auch im Verkaufspreis äußern würde. Zum anderen könnte sich die Anschaffung eines Wasserstoff-Busses langfristig rentieren. Abhängig von der Entwicklung des Dieselpreises könnten die Betriebskosten eines Wasserstoff-Busses unter die eines vergleichbaren Diesel-Modells sinken.

Damit rechnet z.B. die Berliner Verkehrsgesellschaft BVG. Wie bereits erwähnt wurde, plant die BVG 2007 einen Auftrag über 250 Busse zu vergeben. Dabei sollen Angebote für Diesel- und Wasserstoff-Busse eingeholt werden. Sollte der Dieselpreis weiter steigen, schätzt die BVG die Antriebstechnik der Wasserstoff-Busse betriebswirtschaftlich günstiger ein, als die eines Diesel-Motors (Berlinonline 2006). Steigenden Dieselpreisen stünden lokal sehr günstige Bezugsmöglichkeiten für Wasserstoff gegenüber. Zudem erwartet die BVG, dass die Stückpreisdifferenz zwischen einem Wasserstoff- und einem Dieselbus in den kommenden Jahren auf 15.000 bis 20.000 EUR sinken wird (Energie-infoportal 2006).

Dessen ungeachtet sind aber auch schon andere Städte an den Wasserstoff-Bussen interessiert. In der Stadt Bozen in Südtirol ist seit Februar 2007 ein Wasserstoff-Bus im Linienverkehr im Einsatz (Bozen 2007). Pläne über weitere Aufträge konnten nicht recherchiert werden. Die niederländische Stadt Rotterdam hat ebenfalls Wasserstoff-Busse bestellt, die bis 2009 ausgeliefert sein sollen (MO87-V5 2007). Die genaue Anzahl der Busse konnte allerdings nicht ermittelt werden.

Zuverlässige Aussagen über die Marktchancen der Wasserstoff-Busse sind derzeit noch schwierig. Es bleibt vorerst nichts anderes übrig, als auf den weiteren Verlauf des HyFLEET: CUTE Projektes zu verweisen. Je nach Erfolg des Projekts ist mit der Serienfertigung der Busse zu rechnen.

Erfolg oder Misserfolg der Wasserstoffmotoren wird auch stark von der weiteren Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie abhängen. Brennstoffzellen bieten den Vorteil, dass Sie Wasserstoff effizienter wandeln können als ein Motor dies kann. Der Wirkungsgrad von Brennstoffzellenantrieben liegt beispielsweise im Pkw-Bereich bei über 40% und damit deutlich über den Werten von Verbrennungsmotoren. Hinzu kommt, dass sich Hybridisierungskonzepte bei Brennstoffzellenfahrzeugen leichter realisieren lassen, da Elektromotor und Batterie ohnehin schon an Bord sind. Außerdem emittieren Brennstoffzellenantriebe keinerlei Emissionen, auch keine Stickoxide, und sind leiser als Verbrennungsmotoren. Unter der Annahme, dass Brennstoffzellenbusse eine ähnliche Zuverlässigkeit und ein ähnliches Kostenniveau wie Busse mit H2-Motoren erreichen, ist die Brennstoffzelle dem Viertakter überlegen. In Kapitel 4.5 werden wir auf den Entwicklungsstand und die Marktchancen der Brennstoffzellenbusse weiter eingehen.

Aus innovationstheoretischer Sicht muss der Wasserstoffmotor also ambivalent betrachtet werden. Einerseits ist er zukunftsweisend, weil er mit dem alternaiven Kraftstoff Wasserstoff betrieben wird und daher auch als »Wegbereiter« oder »Brückentechnologie« für die Brennstoffzelle aufgefasst werden kann. Andererseits wirkt er wiederum zutiefst stagnovativ, da er einen radikalen Paradigmenwechsel vom thermischen zum elektrischen Antrieb bremst und hemmt. Kraftstoffseitig ist der H_2-Motor also »radikal«, antriebsseitig jedoch »stagnovativ«, in seiner Gesamtheit stellt er daher eine »inkrementelle« Innovation dar, da er eben ausschließlich über den Kraftstoffpfad schrittweise die Konvention verlässt.

4.3 Cluster 3: Hybridbusse

Clusterbeschreibung

Hybridantriebe bilden das Cluster 3 der Innovations-Matrix. Die UNO definierte 2003 den Begriff »Hybridfahrzeug« wie folgt: „Ein Hybridfahrzeug bezeichnet ein Fahrzeug, in dem mindestens zwei Energieumwandler und zwei Energiespeichersysteme vorhanden sind, um das Fahrzeug anzutreiben“ (Toyota 2006a). Diese Definition ist sehr allgemein gehalten und lässt Raum für viele mögliche Hybridvarianten. Im Normalfall wird unter einem Hybriden ein Fahrzeug mit einem 4-Takt-Verbrennungsmotor und einem Elektromotor als Energieumwandler, sowie dem Kraftstofftank und der Batterie als Energiespeicher verstanden. Stillschweigend wird in der Hybrid-Diskussion meist dieser Normalfall angenommen.

Gemäß der UNO-Definition sind jedoch auch andere Hybridvarianten möglich. So können z.B. auch batteriegepufferte Brennstoffzellenfahrzeuge als Hybride angesehen werden. Die Batterie und der Wasserstofftank würden dabei als Energiespeicher fungieren und die Umwandler wären die Brennstoffzelle und der Elektromotor. In diesem Kapitel wird unter einem Hybridantrieb jedoch der zuvor beschriebene Normalfall verstanden.

Hybridantriebe zählen zu den semi-alternativen Antrieben, da sie sowohl über einen konventionellen Verbrennungsmotor als auch einen alternativen Elektromotor verfügen. Kraftstoffseitig verfügen Hybride über einen Tank für den Treibstoff des Verbrennungsmotors und eine Batterie zur Speicherung der elektrischen Energie für den Elektromotor. Mit den entsprechenden Anpassungen des Tank- und Antriebssystems an die spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Kraftstoffes kann der Verbrennungsmotor eines Hybriden prinzipiell mit allen technologisch möglichen Kraftstoffen betrieben werden (k=1 bis 12, 14 und 15). Je nach Kraftstoff sind mehr oder weniger große Umbaumaßnahmen im Tanksystem und/oder am Verbrennungsmotor notwendig.

Bei der Beurteilung der Innovativität von Hybridkonzepten liegt generell das Problem vor, dass Hybride nicht gleich Hybride ist. Die Konzepte reichen von sogenannten Mikrohybriden

mit einem kleinen Elektromotor zur Antriebsunterstützung bis hin zu Vollhybriden mit der Möglichkeit eines rein elektrischen Antriebs des Fahrzeugs. Im Pkw-Bereich hat sich bereits eine Art Hybrid-Nomenklatur stillschweigend durchgesetzt und es wird zwischen Mikro-, Mild- und Vollhybriden unterschieden. Allerdings gibt es bisher keine verbindliche Norm zur Klassifikation von Hybridfahrzeugen und die Grenzen für die Zuordnung in die Hybridklassen sind fließend (Aigle/Marz 2007: 68). Noch komplizierter und verschachtelter ist der Sprachgebrauch bei den Hybridbussen. Obwohl es auch bei den Bussen verschiedene Hybridkonzepte gibt, zeichnet sich noch keine Klassifizierung ab. Wie schon erwähnt, haben wir in der Bus-Innovations-Matrix daher auch auf eine Unterscheidung in Mild- und Vollhybride verzichtet.

Obwohl die Hybridtechnologie im Pkw-Bereich serienreif verfügbar ist und vor allem über den Toyota Prius und den Honda Civic auch bereits eine beachtliche Diffusion erfahren hat, kann der Busmarkt in gewisser Hinsicht trotzdem als »innovationsfreundlicher« bezeichnet werden. Diese Innovationsfreundlichkeit zeigt sich auch bei einem Vergleich der Pkw- mit der Bus-Innovations-Matrix. Bei den Bussen sind in der Hybridzeile fast alle Konfigurationsfelder belegt, während bei den Pkw an verschiedener Stelle Inventionsräume vorliegen. Der Grund hierfür ist, dass Hybridbusse sowohl in technischer als auch in ökonomischer Hinsicht Vorteile bei einem Einsatz alternativer Kraftstoffe gegenüber dem Pkw bieten.

Aus ökonomischer Sicht führt der Betrieb von Hybridfahrzeugen mit alternativen Kraftstoffen in zweifacher Weise zu Mehrosten: Neben den Kosten für die Hybridisierung kommen noch eventuelle Kosten für die Anpassung des Motors und des Tanksystems an den alternativen Kraftstoff hinzu. Allerdings fallen diese Mehrkosten beim Pkw im Vergleich zu Bussen mehr ins Gewicht, da der relative Kostenanteil für die Antriebstechnik im Pkw höher ist als bei Bussen. Außerdem können über die höhere Laufleistung bei Bussen Mehrkosten leichter amortisiert werden.

Wir wollen die Mehrkostenproblematik exemplarisch verdeutlichen und die Mehrkosten eines hybridisierten Erdgas-Pkw mit denen einen Busses vergleichen. Die Anschaffungskosten für einen vollhybridisierten Erdgas-Pkw liegen je nach Dimensionierung und Fahrzeugtyp etwa 5.700 bis 7.700 EUR über dem Wert der konventionellen Ausführung mit normalem Ottomotor. Die Mehrkosten setzen sich dabei zusammen aus etwa 4.200 EUR für den Hybridmotor (McKinsey 2006: 39) und 1.500 bis 3.500 EUR für den Erdgasbetrieb (Erdgasfahrzeuge 2006). Bei den Hybridbussen kommen durch die notwendigen Umbaumaßnahmen selbstverständlich auch Mehrkosten zustande. Diese fallen aber auf Grund des beträchtlich höheren Gesamtpreises eines Busses nicht so sehr ins Gewicht. Daher sind aus ökonomischer Sicht die Hemmschwellen für die Markteinführung eines Hybridbusses mit alternativen Kraftstoffen im Vergleich zu denen bei Pkw niedriger.

Ein ähnliches Bild ergibt sich in technischer Hinsicht. Die Verwendung alternativer Kraftstoffe in Hybridautos bereitet Probleme im Hinblick auf die Realisierung bivalenter Kraftstofflösungen. Bei dem ohnehin schon mit zwei Antrieben dicht gepackten Hybriden ist wenig Platz für ein zweites Betankungssystem. Bei Hybridbussen hingegen tritt dieses Problem aus zwei Gründen nicht auf. Einerseits werden Stadtbusse meist nicht bivalent hergestellt, sondern monovalent auf den alternativen Kraftstoff optimiert. Ein Diesel-Reservetank ist nicht notwenig, da der Bus sich nur in einem begrenzten Raum im Einsatz befindet und abends direkt auf dem Betriebshof oder einer nahe gelegenen Tankstelle betankt werden kann. Außerdem ist das Packaging in Bussen nicht so schwierig wie im Pkw, zum Beispiel können in Erdgas- oder Wasserstoffbussen die Kraftstoffspeicher mehr oder weniger problemlos auf dem Dach der Busse untergebracht werden. Bei Autos wäre eine Dachkonstruktion zwar auch denkbar, würde aber den Luftwiderstand und damit den Verbrauch erhöhen.

Diese Unterschiede zwischen Bussen und Pkw geben einen Hinweis, warum in der Hybrid-Zeile der Innovations-Matrix für Busse mehr Felder mit Innovationen besetzt werden

konnten, als in der Hybrid-Zeile der Pkw-Innovations-Matrix. In der folgenden Abbildung ist der für Hybride relevante Ausschnitt aus der Bus-Innovations-Matrix dargestellt.

Cluster 3 der Innovations-Matrix

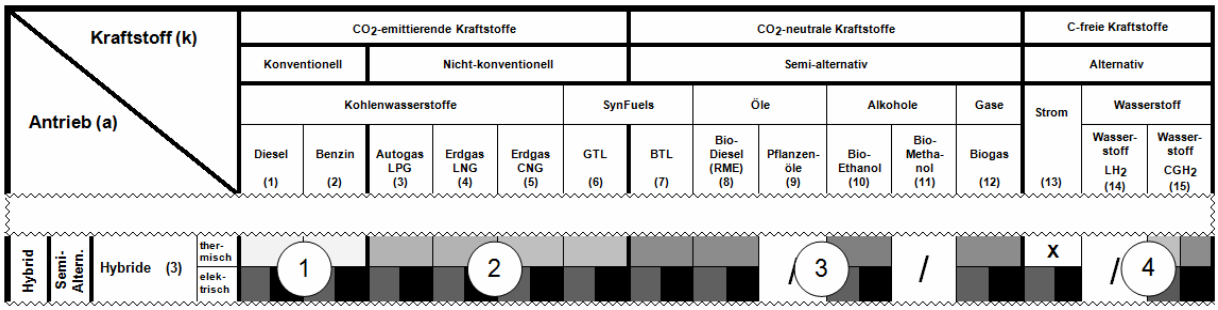


Abbildung 47, Quelle: eigene Darstellung

Cluster 3 zerfällt in die Innovationsbereiche 1 bis 4. Jedes Innovationsfeld ist »polyinnovativ«, was bedeutet, dass mehrere Innovationstypen einer Fahrzeug-Konfiguration zuzuordnen sind. Dies kann auch nicht verwundern, denn schließlich findet sich im Hybriden sowohl thermische als auch elektrische Antriebstechnik wieder. Entsprechend sind auch die beiden zum Hybrid-Cluster gehörigen Zeilen aufgeteilt: Der obere, mit »thermisch« gekennzeichnete Zeilenanteil spiegelt den Hubkolbenmotor als die konventionelle Seite des Hybriden wider. Die untere, mit »elektrisch« gekennzeichnete Zeilenhälfte stellt mit dem batteriebetriebenen Elektromotor die alternative Seite des Antriebs dar.

Da der Innovationsgrad des Elektromotors ausschließlich von der Qualität der eingesetzten Primärenergieträger des Stroms abhängt, ist diese über alle vier Innovationsbereiche unverändert. In der elektrischen Zeilenhälfte der Hybridantriebe liegen damit entweder radikale Innovationen 1. Grades oder 2. Grades vor, je nachdem, ob fossile oder regenerative Primärenergieträger zur Stromerzeugung eingesetzt wurden. Die Fahrzeug-Konfiguration $F_{6/13}$ im Innovationsbereich 4 stellt eine Besonderheit dar. Sie repräsentiert die so genannten Plug-in-Hybride, im englischen als Plug-in Hybrid Vehicles, kurz PHEV, bezeichnet. Während beim »normalen« Hybrid die Batterie über Energierückgewinnung und über den vom Verbrennungsmotor betriebenen Generator geladen wird, kann eine Zusatzbatterie im Plug-in-Hybrid auch direkt mit Netzstrom aufgeladen werden. Etwas salopp formuliert kann der Plug-in-Hybrid also Strom »tanken« und ist deshalb auch dem »Kraftstoff« Strom (k=13) zugeordnet. Das »X« in dem thermischen Feldanteil der Plug-in-Hybrid Konfiguration bedeutet, dass dieser »getankte« Strom nicht den Verbrennungsmotor antreiben kann.

Bei der thermischen Antriebskomponente stellt sich die Lage etwas anders dar. Dort ist die Innovativität von der Wahl des Kraftstoffs abhängig und in jedem Innovationsbereich verschieden. Eine Ausnahme bildet lediglich die Konfiguration $F_{3/15}$. Hier hängt der Grad der Innovation zusätzlich von der Erzeugung des Wasserstoffs ab. Basiert die Erzeugung auf regenerativen Energieträgern, handelt es sich um eine inkrementale Innovation 2. Grades. Erfolgt die Erzeugung unter Einsatz von Kohlenwasserstoffen, liegt eine inkrementale Innovation 1. Grades vor. Innovationen 2. Grades sind systemisch, Innovationen 1. Grades hingegen modular, wie in Kapitel 1.3 bereits erläutert. Da der Grad der Innovativität der Konfiguration $F_{3/15}$ zusätzlich auch von der Art der Stromerzeugung abhängt, ist dieses Feld als einziges viergeteilt.

Im Unterschied zu Cluster 1 tritt im Hybrid-Cluster der vierte Innovationsbereich hinzu, da hier auf eine gesonderte Clusterung der kohlenstofffreien Kraftstoffe verzichtet wurde. Aus

Gründen der Übersichtlichkeit und der noch vergleichsweise geringen Bedeutung der Konfiguration $F_{3/15}$, entschieden wir uns aber dazu, auf eine extra Clusterung der Wasserstoff-Hybridbusse zu verzichten. Dennoch soll diese Konfiguration nicht übergangen werden und es konnte ein Beispielmodell des amerikanischen Herstellers NewFlyer gefunden werden.

Wahl der Beispielmodelle

Im Folgenden werden zunächst die vorliegenden Innovationsbereiche etwas genauer betrachtet. Der erste Innovationsbereich besteht aus den Konfigurationen $F_{3/1}$ und $F_{3/2}$. Das Konfigurationsfeld $F_{3/1}$ repräsentiert den Diesel-Hybridbus und stellt die gebräuchlichste Variante im Bereich der Hybridbusse dar. Wir entschieden uns dazu, als Beispielmodell einen Hybridbus von Orion vorzustellen. Es hätte ebenso ein Modell von Solectria, Solaris oder New Flyer vorgestellt werden können. Eine Besonderheit ist bei Hybridbussen mit Ottomotoren festzustellen. Für die Bus-Konfiguration $F_{3/2}$ liegt interessanterweise eine Innovation vor und es handelt sich nicht wie bei den konventionellen Bussen mit Ottomotoren um einen stillgelegten Innovationsraum. In Kalifornien beispielsweise sind bereits über hundert benzinbetriebene Hybridbusse vom Typ »ThunderVolt™« im Einsatz (ISE 2007a). Bei dem Bus arbeitet der Ottomotor ausschließlich als Stromgenerator und es handelt sich um ein so genanntes serielles Hybridkonzept. Als Energiespeicher werden Supercaps eingesetzt. (ISE 2005). Die Nachteile des nichthybriden Ottomotors sind sein niedriges Drehmoment und hohe Verbrauchswerte. Diese können im seriellen Hybridkonzept des ThunderVolt wettgemacht werden, da der Elektromotor bereits bei geringen Drehzahlen ein hohes Drehmoment hat und der Verbrauch über die Speicherung von Bremsenergie in Supercaps deutlich verringert werden kann. Aus diesen Gründen stellen hybridisierte Ottomotoren bei Bussen eine Konkurrenz zu konventionellen Diesel- und Erdgasmotoren dar. Und nicht zu vergessen ist, dass Ottomotoren im Vergleich zu Dieselmotoren deutlich geringere NOx und Partikel-Emissionen aufweisen.

Im zweiten Innovationsbereich liegen für alle Konfigurationen $F_{3/3}$, $F_{3/4}$, $F_{3/5}$ und $F_{3/6}$ Innovationen vor. Für das Konfigurationsfeld $F_{3/3}$ konnten Autogas-Hybridbusse recherchiert werden, die in der niederländischen Stadt Eindhoven im Linienverkehr unterwegs sind (CALSTART 2003: 15). Eindhoven stellt jedoch eher einen Ausnahmefall dar, weitere Aktivitäten sind uns nicht bekannt. Auch für Hybridbusse mit flüssigem Erdgas konnte ein Beispielmodell gefunden werden. Es handelt sich um Kleinbusse mit 6,7 m Länge, die in Tempe im Bundesstaat Arizona im Shuttle-Service eingesetzt werden (NREL 2002b: 1). Bereits etwas verbreiterter sind Erdgas-Hybridbusse ($F_{3/5}$). 36 sind beispielsweise in der amerikanischen Stadt Denver im Einsatz (Valleycleancities 2001). Bei der Konfiguration $F_{3/6}$ handelt es sich um Hybridbusse, die mit GTL (Gas to liquid) angetrieben werden. Diese stellen ein Derivat des Diesel-Hybridbusses dar.

Wir entschieden uns dafür, einen Bus aus dem Konfigurationsfeld $F_{3/5}$ als Beispielmodell für den zweiten Innovationsbereich auszuwählen. Diese Konfiguration ist am weitesten verbreitet und über sie konnten die meisten Informationen ermittelt werden. Das gilt sowohl für die technischen Daten, als auch für die Felderprobungen. Es handelt sich dabei um das Modell EcoMark des Herstellers Transteq.

Der dritte Innovationsbereich umfasst die Konfigurationsfelder $F_{3/7}$ bis $F_{3/12}$. Davon sind die Konfigurationen $F_{3/7}$, $F_{3/8}$ und $F_{3/12}$ relativ »uninteressant«, da es sich um Derivate handelt. Sowohl BTL (k=7), als auch Biodiesel (k=8) können in einem gewöhnlichen Diesel-Hybrid eingesetzt werden. Der Mineralölkonzern Shell hat beispielsweise zusammen mit Toyota und einigen weiteren Unternehmen im Jahr 2005 den BTL-Betrieb von Dieselbussen in drei japanischen Städten zwei Monate lang demonstriert (Toyota 2005). Ebenso ist Biogas ohne weitere Umbaumaßnahmen in einem Erdgas-Hybriden einsetzbar.

Der Betrieb des Verbrennungsmotors mit Alkoholen (k=10 und 11) gestaltet sich demgegenüber schon etwas komplizierter und erfordert bestimmte Umbaumaßnahmen am Motor und am Kraftstoffsystem. Dennoch findet sich mit Scania ein Hersteller, der im Mai 2007 in Helsinki einen Hybridbus mit Ethanol-Motor vorstellte. Das Modell wird 2007 noch einigen Tests unterzogen, bevor die ersten Busse ausgeliefert werden. 2008 und 2009 sollen 12 Busse im Stockholmer Linienverkehr unterwegs sein (Scania 2007e: 1). Sie sollen einen Verbrauch von weniger als 60 l/100 km erreichen (Stockholm 2007: 4). Weitere technische Daten zu dem Bus liegen uns heute allerdings nicht vor. Für den anderen »Alkohol-Kraftstoff« Biomethanol konnte hingegen keine Innovation recherchiert werden. Das gleiche gilt auch für den Kraftstoff Pflanzenöl. In den Konfigurationen $F_{3/9}$ und $F_{3/11}$ liegen also Inventionsräume vor. Aufgrund des dargestellten Sachverhalts und der mangelnden Datenlage haben wir uns dafür entschieden, kein Beispielmodell aus dem Bereich 3 auszuwählen und näher vorzustellen.

Das vierte Innovations-Cluster erstreckt sich über die Konfigurationen $F_{3/13}$ bis $F_{3/15}$, wobei für das Feld $F_{3/14}$ keine Innovation ermittelt wurde und hier somit ein Inventionsraum vorliegt. Bei der Konfiguration $F_{3/13}$ handelt es sich um die bereits angesprochenen Plug-in-Hybride. Diese laufen z.B. seit 2002 in den USA als Schulbusse. Obwohl diese Busse über einen Verbrennungsmotor verfügen, der mit Diesel angetrieben wird, werden sie als Plug-in-Hybride bezeichnet, da sie Strom direkt »tanken« können (Hybridschoolbus 2007).

Die Konfiguration $F_{3/15}$ stellt einen Wasserstoff-Hybriden dar. Für dieses Feld konnte ein Modell von New Flyer recherchiert werden, das mit einem Hybrid-Motor von ISE Corporation ausgestattet ist (NREL 2007a: 22-23). Über den Bus liegen uns sowohl technische Daten als auch vorläufige Evaluationsergebnisse einer Felderprobung vor. Aus diesen Gründen entschieden wir uns dazu, den Wasserstoff-Hybriden als Beispielmodell für den vierten Innovationsbereich auszuwählen, zumal beim Wasserstoff-Hybrid, im Vergleich zum Plug-in-Hybrid nicht die Möglichkeit vorhanden ist, den Motor mit Diesel anzutreiben. Kraftstoffseitig kann somit der Bus aus dem Konfigurationsfeld $F_{3/15}$ eindeutig als innovativer bezeichnet werden.

Zusammenfassend wurden folgende Beispielmodelle ausgewählt:

Konfiguration $F_{3/1}$ (Diesel-Hybridbus): Orion VII
Konfiguration $F_{3/5}$ (Erdgas-Hybridbus): Transteq eco-Mark LF N
Konfiguration $F_{3/15}$ (Wasserstoff-Hybridbus): New Flyer ISE

Beispielmodell für den Innovationsbereich 1: Diesel-Hybridbus Orion VII

Technologie

Mehr als 1.000 Diesel-Hybridbusse des Modells VII von Orion befinden sich zurzeit in Kanada und den USA im Einsatz (Orionbus 2007b). Das Unternehmen gehört zu Daimler und produziert Busse für den nordamerikanischen Markt.

Beispielmodell Fahrzeugkonfiguration $F_{3/1}$

Kennwerte		Orion
Modell		VII LF
Fahrzeug-Konfiguration		$F_{3/1}$
Motordaten	Typ	Cummuns ISB[a]
	Hubraum[ccm]	8.300[b]
	Zylinder	keine Angabe
	Nennleistung [kW]	186
	Nenndrehm. [Nm] bei 1.600/min	894[a]
E-Motor	Typ	AC Induction[a]
	Nennleistung [kW]	184[a]
Batterie	Typ	Blei-Batterien mit jeweils 23 Blöcken[a]
	Nennleistung [kW]	119[a]
Generator	Nennleistung [kW]	118[a]
Verbrauch	[Liter pro 100 km]	73,7[c]
Tankinhalt	Diesel [Liter]	378,5[a]
Elastizität	80-100 km/h, 6. Gang [sec]	keine Angabe
Beschleunigung	0-60 km/h [sec]	keine Angabe
Reichweite	[km]	keine Angabe
Leergewicht	[kg]	14.442[a]
Maße	Länge [m]	12,19[a b]
	Breite [m]	2,59[a b]
	Höhe [m]	3,35[a b]
Emissionen	Schadstoffklasse	keine Angabe
Kapazität	Sitzplätze	38[a]
	Stehplätze	32[a]
	Gesamt	70[a]
Preis	[US-Dollar] ohne Mwst.	385.000[a] (267.931 EUR)

Abbildung 48, Quelle: eigene Darstellung; [a]NREL 2006b: 7-8; [b]Orionbus 2007a; [c]NREL 2006b: viii

Der Orion VII ist in verschiedenen Größen erhältlich. Wir stellen das Modell vor, dass am ehesten mit den bisher vorgestellten Bespielfahrzeugen vergleichbar ist. Die Angaben entstammen größtenteils einer Studie des National Renewable Energy Laboratory (NREL 2006b). Auf die Studie wird bei der Beschreibung der Felderprobungen noch genauer eingegangen.

Die Busse von Orion verfügen über einen seriellen Hybridantrieb mit der Möglichkeit der Bremsenergierückgewinnung. In einem seriellen Hybridkonzept treibt der Dieselmotor einen Generator an, der die mechanische Leistung in elektrische Leistung umwandelt, und damit die Batterien und den elektrischen Motor versorgt. Der Elektromotor ist der eigentliche Antriebsmotor des Fahrzeugs. Beim Bremsen und im Leerlauf kann er als Generator arbeiten und die Batterien des Hybridfahrzeugs laden. Die in den Batterien gespeicherte Energie steht dann bei hoher Lastanforderung zu Verfügung, beispielsweise beim Beschleunigen oder Bergauffahren. So wird, im Vergleich zu lediglich mechanischen Bremsen, Energie ein-

gespart, was sich positiv auf den Verbrauch der Hybride auswirkt (NREL 2006b: xi). Der Orion Hybridbus ist mit zwei Batterieanlagen ausgestattet. Jede beinhaltet 23 Batterien, so dass insgesamt 46 vorhanden sind (NREL 2006b: xi). Ein Optimierungssystem regelt das Aufladen jeder einzelnen Batterie.

Felderprobung

Das National Renewable Energy Laboratory führt im Auftrag des Departments of Energy regelmäßig Studien über in den USA eingesetzte Hybridbusse durch. Die aktuellste von uns recherchierte Evaluation bezieht sich auf den Zeitraum von Anfang Oktober 2004 bis Ende September 2005. Aus einem Auftrag von 125 gelieferten Bussen des Typs VII von Orion, wurden 10 zufällig für die Untersuchung ausgewählt. Alle Busse wurden von einer lokalen, in dem Report nicht weiter spezifizierten Verkehrsgesellschaft im New Yorker Linienverkehr betrieben. (NREL 2006b: 1-2).

Die Hybridbusse sollten in New York als Alternative zu CNG-Bussen getestet werden. Denn der Betrieb von CNG-Bussen erfordert eine komplette Umstellung der Infrastruktur auf CNG, die sich nicht bei jedem New Yorker Betriebshof finanziell rentiert (ebd.: 2). Für den Betrieb der Hybridbusse waren nur zwei zusätzliche Kühlstationen für die Batterien notwendig. Diese kosteten jeweils 70.000 US-Dollar (48.707 EUR). Die kompletten Kosten für den Umbau eines Betriebshofes auf CNG betrugen dagegen 7,4 Mio. US-Dollar (5.149.838 EUR) (ebd.: vi). Der Kaufpreis eines Hybridbusses belief sich auf 385.000 US-Dollar (267.931 EUR). Damit war der Hybrid um 72.000 US-Dollar (50.106 EUR) teurer als ein CNG-Bus und um 95.000 US-Dollar (66.112 EUR) teurer als ein konventioneller Dieselbus (ebd.: 7).

Insgesamt legten die Hybridbusse während des Untersuchungszeitraums 457.770 km zurück. Im Durchschnitt brachten sie es auf 3.814 km pro Monat (ebd.: 20). In den Untersuchungsmonaten des Jahres 2004 hatten die Hybridbusse eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 10,5 km/h, im Untersuchungszeitraum des Jahres 2005 betrug diese 9,8 km/h. Die Hybridbusse schnitten bei den Verbrauchswerten relativ gut ab. Sie erreichten eine Kraftstoffeffizienz von 3,19 mpg (miles per gallons), dies entspricht einem Verbrauch von 73,74 l/100 km. Die nicht-hybridisierten Dieselbusse hatten einen durchschnittlichen Verbrauch von 2,38 mpg oder 98,83 l/100 km. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde in der Studie auch für die CNG-Busse ein dieseläquivalenter Verbrauchswert errechnet. Dieser betrug 1,7 mpg oder 138,36 l/100 km (ebd.: vii-viii).

In den einzelnen Monaten waren die Hybridbusse zwischen 60% bis 120% sparsamer als die CNG-Busse und zwischen 26% bis 52% sparsamer als die konventionellen Dieselbusse. Auffallend dabei ist, dass sich ihr Verbrauch in den Sommermonaten erheblich erhöhte. Die Streuung in den durchschnittlichen monatlichen Verbrauchswerten war um einiges größer als bei den Diesel- und CNG-Bussen. Der höhere Verbrauch in der Sommerzeit wurde auf die Verwendung der Klimaanlage zurückgeführt. Zwar waren alle untersuchten Busse mit einem ähnlich Klimasystem ausgestattet, die Benutzung fiel aber bei den sonst sehr niedrigen Verbrauchswerten der Hybridbusse stärker ins Gewicht, als bei den Diesel- und CNG-Bussen (ebd.: viii).

Die Wartungskosten der Hybridbusse betrugen 0,80 US-Dollar (0,56 EUR) pro Kilometer und waren damit um 5% höher als die der CNG-Busse, welche 0,76 US-Dollar (0,53 EUR) pro Kilometer ausmachten. Bei den antriebsbedingten Wartungskosten waren jedoch die CNG-Busse mit 0,22 US-Dollar (0,15 EUR) pro Kilometer um 5% günstiger als die Hybridbusse mit 0,23 US-Dollar (0,16 EUR) pro Kilometer. Dies lag vor allem an dem elektrischen Antrieb, der bei den Hybridbussen den größten Teil der antriebsbedingten Wartungskosten ausmachte. Die Dieselbusse wurden bei dem Vergleich der Wartungskosten nicht beachtet, da sie allesamt aus älteren Baujahren stammten (ebd.: x).

Die lokale New Yorker Verkehrsgesellschaft hat den Anspruch, dass neu bestellte Busse im Durchschnitt mindestens 6.437 Kilometer ohne einen Betriebsausfall fahren. Die Hybridbusse schafften ungefähr 8.046, die CNG-Busse etwa 9.656 Kilometer. Wenn nur die antriebsbedingten Betriebsausfälle beachtet werden, kommen die Hybridbusse auf 12.875 Kilometer und die CNG-Busse auf 14.484. Trotz ihres älteren Baujahres schnitten jedoch die Dieselbusse am besten ab. Sie schafften 16.093 Kilometer ohne einen antriebsbedingten Betriebsausfall (ebd.: xi).

Antriebsbedingte Betriebsausfälle bedeuten aber nicht unbedingt, dass Reparaturmaßnahmen am Antrieb vorgenommen werden mussten. Probleme in anderen Funktionsbereichen des Busses werden auch oft als Antriebsprobleme erfasst. Einige spezifisch auf die Hybridbusse bezogene Schwierigkeiten traten allerdings dennoch auf. Dazu zählen das Überlaufen des Motorkühlers und eines Zwischenbehälters, das Auftreten von Wasser in Anschlüssen und Verbindungen, das Eindringen von Wasser durch den Lufteinlauf in den Motor, das Auftreten von Problemen mit der dreifachen Einspritzpumpe und das Vorkommen von Lecks im Kühlsystem des Antriebs. Auf Grund dieser aufgetretenen Schwierigkeiten wurden einige Verbesserungsmaßnahmen getroffen. Bei zukünftigen Aufträgen wurde auf den Einbau der dreifachen Einspritzpumpe verzichtet. Zudem wurden Verbesserungen am Kühlsystem vorgenommen und die Software erneuert. (ebd.: 17).

Marktpotenzial

Die Idee der Hybridisierung mit dem Grundgedanken der elektrischen Energierückgewinnung kann prinzipiell in jedem Fahrzeugkonzept angewendet werden und den Kraftstoffverbrauch senken. Die Grundidee ist innovativ und stets sinnvoll. Darum hängen die Marktchancen einer Hybrid-Konfiguration vor allem von der Innovationskraft des Kraftstoffes ab.

Unter diesem Gesichtspunkt stellen Diesel-Hybride langfristig keine zukunftstaugliche Lösung dar, da Diesel als fossiler Kraftstoff nur begrenzt zur Verfügung steht und gegenüber anderen Kraftstoffen ökologisch schlechter abschneidet. Für einen sauberen Diesel-Hybridbus sind wie beim normalen Dieselbus ein Partikelfilter und eine NOx-Nachbehandlung notwendig, um die Vorgaben der Abgasgesetzgebung zu erfüllen. Kurzfristig kann natürlich über Diesel-Hybridbusse der Dieselverbrauch und damit die Betriebskosten gesenkt werden. Außerdem kann die bisher vorhandene Betankungsinfrastruktur weiterverwendet werden, so dass außer den Anschaffungskosten keine weiteren Kosten für einen Verkehrsbetrieb anfallen. So gesehen stellen Diesel-Hybridbusse eine konservative Lösung mit relativ geringem Risiko dar. Langfristig und nachhaltig gestaltet sich der Betrieb von Diesel-Hybridbusen mit sauberen Dieselersatzkraftstoffen, wie zum Beispiel Biodiesel, Planzenöl oder BTL.

In den USA und Kanada besteht bereits ein vergleichsweise großer Betrieb von Diesel-Hybridbussen im Linienverkehr. Allein von Orion sind 1.000 Busse unterwegs und 1.500 werden noch ausgeliefert (Orionbus 2007b). Davon gehen 500 nach New York, 150 nach Toronto und 56 nach San Francisco (DaimlerChrysler 2007b). In Nordamerika sieht die gegenwärtige Marktlage für die Diesel-Hybridbusse also relativ gut aus und die Technologie hat bereits Fuß gefasst. Ein vollkommen anderes Bild ergibt sich jedoch in Europa. In Deutschland beispielsweise waren zum 01. Januar 2007 insgesamt nur 118 Hybridbusse zugelassen. Diese Zahl nahm im Vergleich zum Vorjahr sogar leicht ab. Zum 01. Januar 2006 waren noch 122 Hybridbusse zugelassen (KBA 2007a: 23). Auch in den anderen europäischen Ländern und in Asien konnten von uns keine größeren Bestände oder Aufträge an Diesel-Hybridbussen recherchiert werden.

Beispielmodell für den Innovationsbereich 2: EcoMark von Transteq

Technologie

Das Modell EcoMark von Transportation Techniques (Transteq) basiert antriebsseitig auf bereits in Pkw bewährter Technik. Der Erdgas-Hybridbus verfügt über den gleichen Motor wie der Toyota Prius und der Honda Insight (Valleycleancities 2001). Um eine größtmögliche Kraftstoffeffizienz zu erreichen, läuft er konstant bei einer Drehzahl von 2.200 pro Minute (Haight 2001: 2). Der folgenden Tabelle können weitere technische Daten entnommen werden.

Beispielmodell Fahrzeugkonfiguration $F_{3/5}$

Kennwerte		**Transportation Techniques**
Modell		EcoMark LF a
Fahrzeug-Konfiguration		$F_{3/5}$
Motordaten	Typ	Ford LRG-425[c]
	Hubraum[ccm]	2.500[c]
	Zylinder	4[b]
	Nennleistung [kW]	52,199[b]
	Nenndrehm. [Nm] bei 1.400/min	keine Angabe
E-Motor	Typ	keine Angabe
	Nennleistung [kW]	323,62 (2 x 161,81)[b]
Batterie	Typ	26 geschlossene Blei-Batterien[b]
	Nennleistung [kW]	keine Angabe
Generator	Nennleistung [kW]	keine Angabe
Verbrauch	[l/100 km]	keine Angabe
Tankinhalt	CNG [Liter]	2 Tanks; insgesamt 84.950 Liter bei 3.600 psi[b] (248,21 bar)
Beschleunigung	0-60 km/h [sec]	keine Angabe
Elastizität	80-100 km/h, 6. Gang [sec]	keine Angabe
Reichweite	[km]	keine Angabe
Leergewicht	[kg]	11.818[a]
Maße	Länge [m]	13,7[a]
	Breite [m]	2,6[a]
	Höhe [m]	3,6[a]
Emissionen	CO [g/km]	0,12[c]
	NO_x [g/km]	0,25[c]
	PM [g/km]	0,0006[c]
Emissionen	Schadstoffklasse	keine Angabe
Kapazität	Sitzplätze	18[a]
	Stehplätze	98[a]
	Gesamt	116[a]
Preis	[US-Dollar] ohne MwSt.	585.000[d] (407.111 EUR)

Abbildung 49, Quelle: eigene Darstellung: [a] CALSTART 2003: 12; [b] Haight 2001: 1; [c] Hill 2001: 17-18; [d] Transteq 2001

Der EcoMark verfügt ebenso wie der bereits vorgestellt Orion Diesel-Hybridbus über einen seriellen Hybridantrieb. Der vierzylindrige Motor treibt auch hier einen Generator an, der 26 Bleibatterien mit Energie beliefert. Zusätzlich werden die Batterien über die beim Bremsen und im Leerlauf rückgewonnene Energie wieder aufgeladen. Die Batterien wiederum versorgen zwei elektrische Motoren (Haight 2001: 1). Auf Grund des seriellen Hybridantriebs können die elektrischen Motoren auch ausschließlich über die Batterien und den Energiespeicher betrieben werden. Sobald die gespeicherte Energie allerdings aufgebraucht ist, müssen der mechanische Motor und der Generator wieder eingesetzt werden. Dennoch erlaubt diese Option gewisse Streckenabschnitte zu fahren, ohne jegliche Schadstoffe zu emittieren (ebd.: 2).

Felderprobungen

Der Erdgas-Hybrid von Transteq ist seit Juli 1999 als Shuttle-Service (Transteq 2001) in der amerikanischen Stadt Denver unterwegs (NGV 2007). Seit 2001 laufen 36 EcoMark's auf der Haupttrasse des regionalen Denver Transportsystems, der 16th Mall Street (Valleycleancities 2001). Sie transportieren täglich 60.000 Fahrgäste (NGV 2007) und verbinden das Straßenbahnnetz mit dem Busbahnhof in Denvers Innenstadt (Valleycleancities 2001). Im Jahr 2001 wurden außerdem vier Busse für den Flughafen in Los Angeles angefertigt (Transteq 2001), und anschließend auf diesem eingesetzt (CALSTART 2003: 12).

Sowohl der Einsatz des Erdgas-Hybriden als Shuttle-Service in Denver, als auch der Betrieb auf dem Flughafen in Los Angeles sind wiederum ein Beispiel für eine Dreifachnische. In beiden Fällen wird durch eine aktive Nischenbildung auch hier ein immer kleinerer Wettbewerbsraum geschaffen, in dem sich die neue Technologie gegen die Konvention behaupten muss. Der Erdgas-Hybrid tritt also bei vergleichsweise günstigen Ausgangsbedingungen in die Konkurrenzsituation mit anderen Konfigurationen. Um eine Stagnation innerhalb der Nische zu verhindern, muss er allerdings früher oder später aus seinem Schutzraum herausbrechen und sich in weiteren Bereichen etablieren.

Damit der Kauf des Busses mit Fördergeldern unterstützt werden konnte, musste sich der EcoMark einem Test der Federal Transit Administration Altoona (FTA) unterziehen (Valleycleancities 2001). Dabei wurde er auf Wartungsfreundlichkeit, Zuverlässigkeit, Sicherheit, Fahrverhalten, Verarbeitung, Lärmbelastung und Verbrauch geprüft. Der Erdgas-Hybrid absolvierte den Test erfolgreich (Hill 2001: 25). So wurde ermöglicht, dass beim Kauf eines EcoMark 83% des Kaufpreises von der FTA übernommen wurden (Valleycleancities 2001).

Weitere Einsätze des EcoMark von Transteq konnten wir nicht ermitteln. Allerdings können als weiterer Produzenten von Erdgas-Hybridbussen New Flyer/ISE benannt werden. Geplant war, dass im Juni 2007 ein Bus an eine Verkehrsgesellschaft in San Diego ausgeliefert wird (AFVI 2007: 1; 12). Ob dieser Zeitplan eingehalten wurde, ist nicht bekannt.

Marktpotenzial

Die Marktchancen des Erdgas-Hybriden hängen vor allem von der Preisdifferenz zwischen Diesel und Erdgas ab. Ein rentabler Betrieb der Busse gestaltet sich nur dann als möglich, wenn Erdgas günstiger angeboten wird als Diesel, so dass sich die höheren Anschaffungskosten der Erdgas-Hybridbussen über die Laufleistung amortisieren können. Die Hybrid-Variante des EcoMark liegt mit 585.000 US-Dollar (407.116 EUR) (Transteq 2001) deutlich über den Kosten einen des nicht-hybridisierten Erdgas-Busses. Dieser kostet rund 340.000 EUR (NREL 2006a: 10).

Wenn es bei dem derzeitigen Kaufpreis bleibt, wird der Erdgas-Hybridbus sicherlich keine größeren Aufträge erzielen können. Außerdem stellt sich die Frage, ob nicht andere

innovative Konzepte günstiger zu erwerben sind. Ein vergleichbarer Wasserstoff-Bus von MAN kostet beispielsweise nur 360.000 EUR (Energie-infoportal 2006). Dieser stellt gleichzeitig eine langfristigere Lösung dar, da Wasserstoff gemeinhin aufgrund seiner vielfältigen Erzeugungsmöglichkeiten und Synergien mit der Brennstoffzellentechnologie als langfristig nachhaltiger eingestuft wird.

Alles in allem müssen die zukünftigen Marktchancen des Erdgas-Hybridbusses als eher fraglich beurteilt werden. Seit 2001 konnte nur ein Auftrag für lediglich einen Bus recherchiert werden. Selbst die Hersteller des EcoMark betonen, dass die Produktion des Busses so konzipiert wurde, dass man ihn problemlos auch als Diesel-Hybrid oder Brennstoffzellenbus anfertigen könnte. Andere alternative Kraftstoffe wären ebenso möglich (Haight 2001: 1-2).

Es kann natürlich nicht ausgeschlossen werden, dass innerhalb der nächsten Jahre weitere Aufträge für Erdgas-Hybridbusse vergeben werden. Solange ihr Kaufpreis aber nicht beträchtlich sinkt, wird diese Konfiguration wahrscheinlich eher eine Randerscheinung bleiben.

Beispielmodell für den Innovationsbereich 4: New Flyer/ISE

Technologie

Der einzige Wasserstoff-Hybridbus, der von uns recherchiert werden konnte, wird von New Flyer und ISE hergestellt. New Flyer liefert dabei das Busgehäuse, während ISE den Hybrid-Motor einbaut. Bei dem Motor selbst handelt es sich um ein Produkt von Ford. Vor dem Einbau stattete ISE den Motor mit seiner serienmäßigen Hybrid-Technologie aus und optimierte ihn auf den Einsatz mit Wasserstoff (NREL 2007a: 24). Der Prototyp erschien 2003 (ISE 2007b). Der folgenden Tabelle können die technischen Daten des aktuellen Modells entnommen werden.

Beispielmodell Fahrzeugkonfiguration $F_{3/15}$

Kennwerte		New Flyer/ISE
Modell		TB 40 LF
Fahrzeug-Konfiguration		$F_{3/15}$
Motordaten	Typ	Ford V10 H_2 ICE[b]
	Hubraum[ccm]	6.800[b]
	Zylinder/Anordnung	10[b]
	Nennleistung [kW]	150[a]
	Nenndrehm. [Nm] bei 3.250/min	542[a]
E-Motor	Typ	Dual AC Induction[a]
	Nennleistung [kW]	2 x 85[a]
Supercaps (Kondensator)	Typ	2 Anlagen mit jeweils 144 Modulen; Maxwell[a]
	Kapazität [kWh]	0,6[a]
Generator	Nennleistung [kW]	200[b]
Verbrauch	[l/100 km]	47 bis 52,2[b]
Tankinhalt	Wasserstoff [Liter]	58 kg; 8 Tanks; 5.000 psi[a] (344,74 bar)
Beschleunigung	0-30 km/h [sec]	< 20[b]
Elastizität	80-100 km/h, 6. Gang [sec]	keine Angabe
Reichweite	[km]	362[b]
Leergewicht	[kg]	14.529[a]
Maße	Länge [m]	12,19[a]
	Breite [m]	2,59[a]
	Höhe [m]	3,48[a]
Emissionen	Schadstoffklasse	keine Angabe
Kapazität	Sitzplätze	33/39[a]
	Stehplätze	13[a]
	Gesamt	46 / 52[a]
Preis	[US-Dollar] ohne Mwst.	1 - 2 Mio.

Abbildung 50, Quelle: eigene Darstellung; [a] NREL 2007a: 22-23; [b] ISE 2007a: 2

Auch das Modell von New Flyer/ISE verfügt über einen seriellen Hybridantrieb und arbeitet ähnlich wie die beiden vorgestellten Beispielmodelle. Unterschiedlich ist jedoch der Einsatz von Kondensatoren anstatt Bleibatterien als Energiespeicher. Es handelt sich um zwei Superkondensatorensysteme mit jeweils 144 Modulen von der Firma Maxwell (NREL 2007a: 22-23). Der Vorteil von Kondensatoren gegenüber Batterien besteht in der schnelleren Speicher- und Abrufbarkeit der Energie. Der Nachteil ist, dass für eine effiziente Nutzung des Energiespeichersystems stets eine hohe Energiedichte vorhanden sein muss (ebd.: 24).

Die Preisangabe entstammt einer Studie des National Renewable Energy Laboratory, die bei den Felderprobungen genauer vorgestellt wird. Ein neuer Bus kostet demnach zwischen

einer und zwei Mio. Dollar, je nachdem, wie viele Busse insgesamt bestellt werden (ebd.: 22). Der in der Studie untersuchte Bus wurde für 1,2 Mio. US-Dollar (835.109 EUR) erworben (ebd.: 1).

Felderprobungen

Seinen ersten öffentlichen Einsatz hatte der Wasserstoff-Hybridbus in Thousand Palms in Kalifornien. Hier wurde er im Dezember 2004 von der lokalen Verkehrsgesellschaft SunLine Transit Agency in Betrieb genommen. Der Bus blieb jedoch nicht lange in Kalifornien, sondern wurde im Januar 2005 nach Winnipeg in Kanada verschifft. Hier lief er im Februar und März 2005 im regulären Linienverkehr (NREL 2007a: 4), und meisterte erfolgreich Temperaturen um bis zu -30 Grad Celsius (ISE 2007b). Dabei konnte stets eine für die Fahrgäste angenehme Temperatur im Bus sichergestellt werden, und er verursachte weniger Lärm als ein vergleichbarer Dieselbus. Insgesamt legte er in Kanada mehr als 2.897 km zurück (NREL 2007a: 28).

Aus der Erprobung in Kanada resultierten einige Verbesserungsvorschläge für zukünftige Projekte. Diese umfassen zunächst den Aufbau einer dauerhaften Infrastruktur für die Speicherung und Betankung von Wasserstoff sowie für Wartungsaufgaben an den Bussen. Weiter wird angestrebt, die Versicherungskosten durch weitere Erfahrungen mit dem Betrieb von Wasserstoff-Fahrzeugen zu reduzieren. Ebenso sollten Sicherheits-Trainings für den Umgang mit Wasserstoff konzipiert werden. Des Weiteren wurde geplant, die Systeme für die Messung und Kontrolle des Wasserdampfes im Wasserstoff zu verbessert (ebd.).

Nach der Erprobung in Kanada absolvierte der Wasserstoff-Hybridbus eine Demonstrationstour durch den Nordosten der USA. Dabei hielt er für Vorführungszwecke in den Städten Cleveland, Buffalo, Albany, Montclair, Newark NJ und Washington D.C. (ISE 2007b).

Im April 2005 kehrte er nach Kalifornien zurück und wurde ab Mai 2005 wieder im Linienverkehr von Thousand Palms eingesetzt. Während der Monate Oktober und November des Jahres 2005 wies der Motor des Busses jedoch signifikante Funktionsstörungen auf. Diese waren jedoch nicht antriebsbedingt, sondern wurden durch einen falsch eingebauten Kurbelstangenstoßdämpfer verursacht. Im Dezember 2005 wurde der Bus daraufhin mit einem neuen Motor ausgestattet und nahm den Einsatz im Linienverkehr wieder auf (NREL 2007a: 4). Die Ergebnisse der nachfolgend vorgestellten Evaluation beziehen sich auf einen 11-monatigen Untersuchungszeitraum von Januar 2006 bis November 2006 und erfassen somit nur den Betrieb mit dem neu eingebauten Motor (ebd.: 2).

Die Studie wurde vom National Renewable Energy Laboratory im Auftrag des U.S. Department of Energy durchgeführt und im Februar 2007 veröffentlicht. Ziel des Projektes war es, die Nachfrage von Wasserstoff zu erhöhen und so eine kosteneffiziente örtliche Produktion zu ermöglichen. Gleichzeitig diente das Projekt aber auch der öffentlichen Demonstration eines Wasserstoff-Hybridbusses und eines Brennstoffzellenbusses und sollte die technische Entwicklung in diesem Bereich fördern. Die beiden Busse wurden im Vergleich zu 5 CNG-Bussen untersucht (ebd.: 1). Wie bereits oben erwähnt, betreibt die Verkehrsgesellschaft SunLine ihre komplette Bus-Flotte mit CNG. Sie verfügt insgesamt über 48 Busse in voller Größe, inklusive des Wasserstoff-Hybriden und des Brennstoffzellenbusses (ebd.: 9). Im Folgenden sollen jedoch vor allem die Evaluationsergebnisse für den Wasserstoff-Hybriden vorgestellt werden. Auf den Brennstoffzellenbus wird in Kapitel 5.4. näher eingegangen.

SunLine verfügt über eine eigene Betriebsanlage speziell für wasserstoffbetriebene Busse. Diese befindet sich direkt hinter dem Betriebshof der CNG-Busse. Der Wasserstoff wird durch einen Erdgas-Reformer lokal hergestellt (ebd.: 1-2).

Insgesamt legte der Wasserstoff-Hybridbus bei dem Projekt eine Strecke von 38.269 Kilometern zurück. Pro Monat absolvierte er im Durchschnitt 3.479 Kilometer und damit um

50% weniger als ein durchschnittlicher CNG-Bus, der es pro Monat auf 6.987,8 Kilometer brachte (ebd.: 31-32). Der Wasserstoff-Hybridbus fuhr während des Untersuchungszeitraums mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 22,5 km/h (ebd.: 30).

Für den effektiven Betrieb eines Busses im Linienverkehr ist laut SunLine eine Verfügbarkeitsrate von 85% erforderlich. Der Wasserstoff-Hybrid erfüllte diesen Anspruch während des kompletten Untersuchungszeitraums, abgesehen von den Monaten Juli und August. In dieser Zeit war der Bus nicht im Betrieb, weil durch den Einbau eines neuen Erdgas-Reformers ein Mangel an Wasserstoff entstand. Wenn man diese beiden Monate dennoch bei der Berechnung berücksichtigt, hatte der Hybrid noch eine Verfügbarkeitsrate von 80%. Die CNG-Busse hatten eine durchschnittliche Verfügbarkeitsrate von 86% (ebd.: 31-33).

Von 284 geplanten Betriebstagen war der Wasserstoff-Hybrid an 228 Tagen einsatzbereit und an 56 nicht verfügbar. 43% der nicht verfügbaren Tage wurden durch den Wasserstoffmangel verschuldet. 55% wurden durch antriebsbedingte Probleme verursacht und 2% gingen auf Kosten von allgemeinen Wartungen. Die CNG-Busse waren an 590 von 690 geplanten Betriebstagen im Einsatz. Von den 100 Tagen, an denen sie nicht verfügbar waren, gingen 94 auf Kosten von allgemeinen Wartungen und sechs nicht verfügbare Tage wurden durch die Klimaanlage verschuldet (ebd.: 33).

Alles in allem verbrauchte der Wasserstoff-Hybridbus 5.514 kg Wasserstoff. Mit einem kg Wasserstoff schaffte er im Durchschnitt 4.29 Meilen bzw. 6,90 Kilometer. Der dieseläquivalente Verbrauch lag bei 4,85 mpg oder 48,50 l/100 km. Ein CNG-Bus verbrauchte im Durchschnitt Dieseläquivalent von 70,85 l/100 km (ebd.: 33-34). Der Verbrauch des Wasserstoff-Hybriden war damit um 32% niedriger als der eines CNG-Busses.

Die durchschnittlichen Wartungskosten für den Wasserstoff-Hybridbus betrugen 0,34 US-Dollar (0,27 EUR) pro Kilometer, und waren damit um 120% höher als die für einen CNG-Bus, die 0,16 US-Dollar (0,11 EUR) pro Kilometer ausmachten (ebd.: 2). Mit 60% hatten antriebsbedingte Probleme den mit Abstand größten Anteil an den Wartungskosten der Wasserstoff-Hybride. Bei den CNG-Bussen machten antriebsbedingte Probleme nur ein Viertel der gesamten Wartungskosten aus. Jeweils ein Drittel wurde durch Reparaturen am Busgehäuse oder präventive Inspektionen verursacht (ebd.: 36).

Der Wasserstoff-Hybridbus lief im Durchschnitt 3.827 Kilometer ohne Betriebsausfall. Absolut gesehen wurden bei ihm zehn Betriebsausfälle verzeichnet, acht davon waren antriebsbedingt. Wenn man nur die antriebsbedingten Ausfälle betrachtet, schaffte er im Durchschnitt 4.783 Kilometer. Von den fünf CNG-Bussen hatten nur drei überhaupt Betriebsausfälle zu verzeichnen. Sie liefen zwischen 13.467 und 24.443 Kilometer ohne Betriebsausfall. Bei allen fünf CNG-Bussen traten insgesamt sechs Betriebsausfälle auf. Davon war nur ein Ausfall antriebsbedingt. Wenn man diesen nicht berücksichtigt, absolvierten alle fünf CNG-Busse die volle Laufzeit ohne einen Ausfall (ebd.: 39).

Der Gebrauch von Wasserstoff als Kraftstoff bereitete in dem Projekt keine Probleme. Seit Beginn des Einsatzes des speziellen Betriebshofes für die mit Wasserstoff angetriebenen Busse trat keine undichte Stelle in der Anlage auf. Es wurde kein einziges mal Alarm durch entweichenden Wasserstoff ausgelöst. Das Warnsystem und seine Sensoren wurden zweimal pro Jahr überprüft und neu kalibriert (ebd.: 21). Auch den Mechanikern von SunLine bereitete die Umstellung auf den Kraftstoff Wasserstoff vergleichsweise geringe Probleme, da sie bereits über eine 12-jährige Erfahrung mit dem ebenfalls gasförmigen Kraftstoff CNG verfügten (ebd.: 26).

Marktpotenziale

Die Chancen des Wasserstoffbusses sind eine Frage des Betrachtungswinkels. Aus Sicht der Hybridtechnologie stellt er eine Möglichkeit dar, Wasserstoff effizienter als im Vergleich

zum normalen H_2-Motor zu nutzen. Aus Sicht der Brennstoffzelle ist allerdings der H_2-Hybridbus einem Brennstoffzellenbus deutlich unterlegen. Der Brennstoffzellenbus von SunLine erreichte beispielsweise eine Reichweite von 8,28 mpg Dieseläquivalent, das entspricht einem Verbrauch von nur 28,4 l/100 km (ebd.: 33). Daher ist genau zu prüfen, ob der hohe technologische Aufwand für einen H2-Hybridbus rechtzufertigen ist und ob der Brennstoffzellenbus nicht nur die ökologischere sondern auch die ökonomischere Variante darstellt. Die Anschaffungskosten für den Brennstoffzellenbus von SunLight lagen bei beispielsweise bei 3,1 Mio. US-Dollar, beim Hybridbus liegen sie zwischen 1 bis 2 Mio. US-Dollar (ebd.: 22). Die Aussagen über Anschaffungskosten sind allerdings mühselig, da es sich bei beiden Buskonzepten um Einzelanfertigungen handelt und Skalierungseffekte nicht eingerechnet sind. Daher ist ein Vergleich mit den Anschaffungskosten für massenproduzierte Dieselbusse nicht möglich.

Auch ein Kostenvergleich mit dem Wasserstoff-Bus von MAN mit Verbrennungsmotor hinkt, denn dieser beruht auf den in Serie gefertigten MAN-Dieselmotoren. Die Mehrkosten entstehen ausschließlich durch wasserstoffspezifische Anpassungen am Motor selbst sowie am Kraftstoffsystem. Daher überrascht es auch nicht, dass der Wasserstoffbus von MAN lediglich 360.000 EUR kostet und damit nur um 80.000 EUR teurer als ein konventioneller Dieselbus (Energie-Infoportal 2006) ist.

Obwohl derzeit noch keine zuverlässigen Marktprognosen für den Wasserstoff-Hybriden möglich sind, bleibt dennoch festzuhalten: Je länger es dauert, den Kaufpreis für den Wasserstoff-Hybridbus zu senken, desto unwahrscheinlicher wird ein Marktdurchbruch dieser Konfiguration und ein direkter Umstieg auf die Brennstoffzellen-Technologie kann sich als lukrativer erweisen.

4.4 Cluster 4: Batteriebusse

Clusterbeschreibung

Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb sind keine neue Erfindung. Noch bevor Daimler und Benz ihre »Motorkutschen« im Jahr 1885 vorstellten, waren in Paris bereits 1881 Elektrofahrzeuge unterwegs. Vermutlich wurde das erste Elektroauto von Gustave Trouvé in Frankreich gebaut. Er benutzte bereits einen wiederaufladbaren Blei-Akkumulator, womit seine dreirädrige Konstruktion Geschwindigkeiten von bis zu 12 km/h erreichte (Elektroauto-Tipp 2006).

Erstes Elektroauto mit Akkumulatoren von Gustave Trouvé
(Frankreich, 1881)

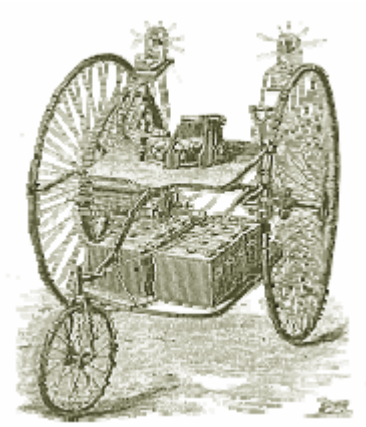


Abbildung 51, Quelle: Elektroauto-Tipp 2006

Um die Jahrhundertwende hatten in den USA Elektroautos sogar einen größeren Marktanteil als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ebd.). 1899 war es ein Elektroauto, das als erstes die Grenze von 100 km/h durchbrach (Gerl 2002: 41). Erst mit der Erfindung des elektrischen Anlassers veränderten sich die Wettbewerbsbedingungen schlagartig und der Verbrennungsmotor trat seinen Siegeszug an.

Im Vergleich zu den Elektroautos stellt sich die Geschichte der Elektrobusse etwas anders dar. Zwar wurde auch hier der erste Elektrobus noch vor einem Bus mit Verbrennungsmotor entwickelt. Dieser wurde aber nicht von einer internen Batterie mit Strom versorgt, sondern von einer externen Oberleitung. Es handelt sich um den »Elektromote«, der 1882 von Werner von Siemens erbaut wurde, und als Versuchsfahrzeug in Berlin unterwegs war. Es war der erste Oberleitungsbus der Welt (Wikipedia 2007c). Dank seiner acht Sitze (Wikipedia 2007d) erfüllt er unsere Definition aus Kapitel 2 und kann somit als Omnibus bezeichnet werden. Optisch ähnelt er jedoch eher einer Kutsche, wie der folgenden Abbildung entnommen werden kann.

Erster Oberleitungsbus von Werner von Siemens
(Berlin, 1882)

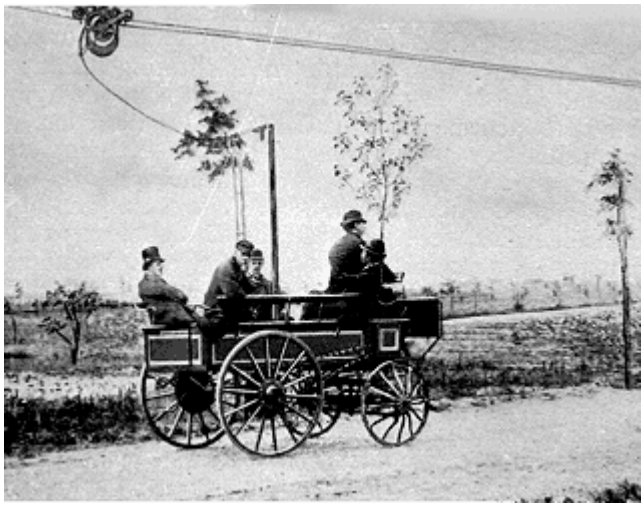


Abbildung 52, Quelle: Wikipedia 2007c

Der erste Bus mit Verbrennungsmotor wurde 1895 von Carl Benz gebaut. Zuvor fuhren in England bereits Dampfomnibusse (Wikipedia 2007b). Bevor sich allerdings motorisierte Busse, bzw. Oberleitungsbusse durchsetzen konnten, wurden in vielen Städten Pferde als Busantrieb eingesetzt. In Berlin beispielsweise wurden erst nach dem Ende des ersten Weltkrieges die pferdebespannten Busse abgeschafft (Berliner-Verkehr 2004; Berliner-Verkehrsseiten 2004). Auf die Oberleitungsbusse werden wir bei den Marktpotenzialen näher eingehen.

Ein weiterer Elektrobus, der insbesondere im Hinblick auf die Hybrid-Technologie von Interesse ist, wurde in den 50er Jahren in der Schweiz getestet. Der sogenannte Gyrobus zeichnete sich dadurch aus, dass er seinen Strom weder aus einer internen Batterie, noch aus einer externen Oberleitung bezog. Er wurde mit Hilfe eines eingebauten Schwungrades angetrieben. Über die Schwungmasse konnte Energie für den Antrieb gewonnen werden. Zudem konnte, ähnlich wie bei einem Hybridfahrzeug, die Bremsenergie zurückgewonnen und auf das Schwungrad übertragen werden. Weitere Parallelen zu einem Hybridbus stellen der eingebaute Elektromotor und Generator dar. An den Endhaltestellen wurde der Gyrobus an das Stromnetz angeschlossen und das Schwungrad wieder beschleunigt. Auf Grund seiner vergleichsweise geringen Energieeffizienz, wurde der Betrieb 1960 eingestellt (Wikipedia 2007a).

Im Gegensatz zu den Elektroautos, wurden die ersten Elektrobusse also nicht über eine interne Batterie, sondern aus externen Quellen mit Strom versorgt. Dies ist auf ihren höheren Energiebedarf zurückzuführen, der mit den damaligen Batterien nicht realisiert werden konnte. Selbst heute noch stellt dies ein zentrales Problem dar, was bei den Felderprobungen in diesem Kapitel noch zu sehen sein wird. Der erste Batteriebus wurde unseren Recherchen zufolge 1975 im öffentlichen Verkehr eingesetzt (Users 2007).

Aus innovationstheoretischer Sicht liegt die technische Innovation demnach nicht in dem altbewährten Elektromotor, sondern vielmehr in der Adoption der Technologie an die Anforderungen eines Fahrzeugs für das 21. Jahrhundert. Dabei sind vor allem intelligente Energiespeicher in Form von Hochleistungsbatterien oder Supercaps notwendig, um mit Elektrofahrzeugen akzeptable Reichweiten zu erzielen. Um die Innovation einer Technologie zu beurteilen, ist neben der technologischen Neuartigkeit vor allem auch ihre Substitutionskraft entscheidend. Diese ist bei Batterie-Elektrofahrzeugen gegeben, denn rein elektrische Antriebstechnik führt zu einer völligen Substitution des thermischen Verbrennungsmotors. Damit stellen sie eine vollwertige Alternative dar und zählen zu den radikalen Innovationen. Bei sauber erzeugtem Batterieladestrom stellen die Batterie-Elektrofahrzeuge auch eine ökologisch-nachhaltige Antriebsalternative dar und verfügen daher über das Potenzial einer systemischen Innovation.

In der Clusterdarstellung der Innovations-Matrix in Abbildung 37 wurden die Batterie-Elektroantriebe dem Cluster 4 zugeordnet. Auf der Antriebsachse sind sie in der Zeile a=4 zu finden. Als Kraftstoff kommt für den Elektro-Bus nur Strom (k=13) zur Ladung der Batterien oder zum Antrieb über Oberleitungen in Frage. Damit umfasst das Cluster 4 lediglich die Fahrzeug-Konfiguration $F_{4/13}$.

Cluster 4 der Innovations-Matrix

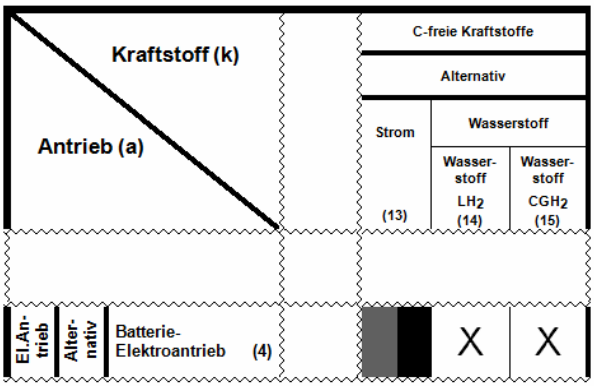


Abbildung 53, Quelle: eigene Darstellung

Im Gegensatz zu den Hybriden ist das Innovationsmuster beim reinen Batterie-Elektroantrieb weniger komplex. Eine Einteilung in Innovationsbereiche ist hier nicht notwendig, da lediglich Strom als Kraftstoff in Frage kommt.

Die Batteriebusse stellen sowohl antriebs- als auch kraftstoffseitig eine radikale Innovation dar. Ebenso wie Wasserstoff ist auch Strom ein Sekundärenergieträger und damit nur so sauber, wie die zu seiner Erzeugung eingesetzten Primärenergieträger. Sind diese regenerativ, so liegt eine radikale Innovation 2. Grades vor. Handelt es sich um fossile Primärenergieträger, so ist dies eine Innovation 1. Grades.

Wahl der Beispielmodelle

Insgesamt konnte nur ein dutzend Batteriebusse von uns recherchiert werden. Wie bereits angedeutet, sind die meisten von ihnen in der Größe und Fahrgastkapazität nicht mit den bisher vorgestellten Beispielmodellen vergleichbar. Wir werden zunächst einige in Europa erhältliche Busse vorstellen.

Das Modell Zeus vom italienischen Hersteller Bredamenarinibus hat eine Länge von weniger als sechs Metern und bietet maximal 34 Personen Platz. Serienmäßig verfügt es über sieben Sitzplätze und hat ein zugelassenes Maximalgewicht von 7.000 kg. Der Bus wird über eine Bleibatterie mit 96 Volt angetrieben und erreicht damit eine Leistung von 31 kW (Bredamenarinibus 2007). Ähnliche Daten weist der Minibus Daily Micro-Vett von Iveco auf. Er verfügt serienmäßig über eine Leistung von 30 kW und bietet bis zu 40 Personen Platz. Sein Gesamtgewicht beträgt 6.500 kg. Der Bus ist mit einer 51 KWh Natrium-Nickel-Batterien ausgestattet und schafft damit eine Reichweite von 100 km (Mirco-Vett 2007). Das Unternehmen Iveco bietet mit dem Midibus Europolis einen weiteren Batteriebus an. Dieser hat eine Länge von 7,4 Metern und bietet 40 Fahrgästen Platz. Fünf dieser Busse sind im französischen Lyon im Einsatz. Weitere Daten über den Midibus existieren nicht (Transbus 2007a).

Das französische Unternehmen Gépébus ist ebenfalls mit zwei Modellen vertreten. Es bietet den Oréos 22 und den Oréos 55 an, welche nach ihrer Fahrgastkapazität benannt wurden. Mehr als zwanzig Oréos 22 sind in einigen französischen Städten im Einsatz, darunter in Bordeaux und Toulouse. Der Oréos 22 kostet 150.000 EUR. Dieser Betrag kann in Frankreich mit 80.000 EUR Fördergeld bezuschusst werden (Transbus 2007b). Der Oréos 55 ist in den französischen Städten Paris und Saint-Nazaire im Einsatz (Transbus 2007c).

In den USA konnten wir nur einen Batteriebus recherchieren, zu dem sowohl Herstellerangaben als auch eine vergleichsweise große Datenmenge vorhanden sind. Deshalb sollen im Folgenden zunächst die technischen Daten dieses Modells vorgestellt werden. Bei den

Felderprobungen können wir auf diesen Bus jedoch nicht zurückgreifen. Eine detaillierte Evaluation dieses Modells war nicht auffindbar. Aus diesem Grund werden wir bei den Felderprobungen auf einen Bericht über Flottenversuche mit Batteriebussen in den USA zurückgreifen. Von welchen Unternehmen diese Busse hergestellt wurden, geht aus dem Bericht nicht hervor und konnte auch in weiteren Nachforschungen nicht ermittelt werden.

Beispielmodell für das Cluster 4: Solectria TC2000

Technologie
Bei dem Beispielmodell handelt es sich um den Bluebird TC2000, der von Solectria mit einem elektrischen Antrieb ausgerüstet wurde. Es gibt in den USA aber auch noch weitere Unternehmen, die anbieten, den Bluebird TC2000 mit einem Elektroantrieb zu versehen (siehe beispielsweise SMUD 2007: 2; 7). Aufgrund seiner guten Datenlage kann der Bluebird von Solectria aber als repräsentativ für andere Modelle angesehen werden. Ausschlaggebend für unsere Entscheidung war lediglich die ausführlichere Datenlage bei dem Bus von Solectria. Der Prototyp dieses Modells wurde 2000 in New York getestet. Die folgende Tabelle beinhaltet einige technische Daten.

Beispielmodell Fahrzeugkonfiguration $F_{4/13}$

Kennwerte		**Solectria**
Modell		TC2000[a]
Fahrzeug-Konfiguration		$F_{4/13}$
E-Motor	Typ	Tandem AC Induction Motor[a]
	Nennleistung [kW]	220[a]
Batterie	Typ	Bleibatterie[a]
	Nennleistung [kW]	keine Angabe
	Aufladezeit [h]	8-10[a]
	Eingebautes Ladegerät [kW]	12[a]
Generator	Nennleistung [kW]	DC-DC; 100A @ 13.6 VDC continous[a]
Beschleunigung	0-30 km/h [sec]	keine Angabe
Elastizität	80-100 km/h, 6. Gang [sec]	keine Angabe
Reichweite	[km]	96, 56[a]
Leergewicht	[kg]	keine Angabe
Maße	Länge [m]	keine Angabe
	Breite [m]	keine Angabe
	Höhe [m]	keine Angabe
Emissionen	Schadstoffklasse	Lokal keine Emissionen
Kapazität	Sitzplätze	keine Angabe
	Stehplätze	keine Angabe
	Gesamt	66[a]
Preis	[EUR] ohne Mwst.	keine Angabe

Abbildung 54, Quelle: eigene Darstellung; [a]Bluebird-electric 2005

Der Bluebird schafft bei niedriger Geschwindigkeit eine maximale Steigung von 12%. Das volle Aufladen der Batterie dauert 8-10 Stunden. Dafür muss der Bus an eine externe Stromquelle angeschlossen werden. Zwischenzeitlich kann die Batterie über ein in den Bus integriertes Aufladegerät teilweise wieder aufgeladen werden (E-driveonline 2001). Dies ist allerdings nur möglich, wenn der Bus sich nicht im Einsatz befindet (Bluebird-electric 2005).

Felderprobungen

Im Folgenden sollen die Ergebnisse einer Studie des Advanced Transportation Technology Institutes (ATTI) vorgestellt werden. Diese enthält eine Übersicht der Flottenversuche mit Batteriebussen in den USA. Hier wurden die Batteriebusse in den 80er Jahren eingeführt (Griffith 2007: 1). Die meisten Erprobungen fanden mit Shuttle-Bussen statt, die eine Länge von 6,7 m hatten. Sie sind damit fast um die Hälfte kürzer als gewöhnliche Linienbusse und nur schwer mit den bisher vorgestellten Beispielmodellen vergleichbar. Deshalb sollen zunächst die Erprobungen mit den größeren Batteriebussen vorgestellt werden. Anschließend werden die Projekte mit den Shuttle-Bussen zusammengefasst dargestellt.

1982 wurden in Denver sechs Batteriebusse in voller Größe (12,2 m Länge) in Betrieb genommen. Ihre Bestellung wurde vor dem Hintergrund der Ölkrise in der 1970er Jahren aufgegeben. Auf Wunsch der Verkehrsgesellschaft wurde die Höchstgeschwindigkeit der Busse auf 40 km/h begrenzt. Die Busse beinhalteten vier Bleibatterie-Anlagen mit einem Gesamtgewicht von 4.500 kg. Mit vollständig aufgeladenen Batterien erreichten die Busse eine Laufzeit von drei Stunden. Sie wurden dabei primär als Unterstützung in der Hauptverkehrszeit eingesetzt. Im Durchschnitt waren sie täglich von 7-9 Uhr, 11-13 Uhr und 16-18 Uhr im Einsatz. In der Zwischenzeit, sowie über Nacht, wurden die Batterien wieder aufgeladen (ebd.: 2).

Die Batteriebusse liefen insgesamt fast 20 Jahre in Denver. 2001 wurden sie jedoch durch Hybridbusse ersetzt (ebd.). Wir gehen davon aus, dass es sich dabei um den in Kapitel 5.3 vorgestellten CNG-Hybrid handelt. Schließlich wurden 36 dieser Hybridbusse im Jahr 2001 auf der Strecke, die zuvor die Batteriebusse befuhren, in Betrieb genommen (ebd.).

Die einzige erfolgreichere Erprobung mit einem etwas größeren Batteriebus in den USA fand in Santa Barbara und in Channel Islands an der California State University statt. Der Bus hatte eine Länge von 9,1 m, und wurde durch Natrium-Nickel-Chlorid-Batterien angetrieben. Er legte mehr als 160 km pro Tag zurück und erreichte eine Zuverlässigkeitsrate von 89% (ebd.: 6). Ob weitere Einsätze des Busses erfolgten, konnte nicht ermittelt werden.

Um die Jahrtausendwende gab es in den USA außerdem Felderprobungen mit Batterie betriebenen Schulbussen, wie dem vorgestellten Bluebird TC2000. Diese Busse hatten eine Länge von 9,1 m. Die Versuche wurden jedoch eingestellt, nachdem die eingesetzten Batterien weder die gewünschte Lebensdauer noch die Zuverlässigkeit erbringen konnten (ebd.: 6).

Auch alle restlichen Erprobungen mit Bussen, die länger als 6,7 m sind, verliefen nicht erfolgreich. Ausschlaggebend hierfür war die zu niedrige Leistung der Batterien. Die Busse konnten so nicht die geforderte Reichweite und Zuverlässigkeit erzielen (ebd.). Die gleichen Schwierigkeiten traten selbst bei den Erprobungen mit den um fast die Hälfte kleineren Shuttle-Bussen auf. Es gab unterschiedliche Strategien diese zu beheben. Im Folgenden sollen Erfolge und Misserfolge bei den Erprobungen der Shuttle-Busse erläutert werden.

In den 1990er Jahren und zu Beginn des neuen Jahrhunderts begannen in zahlreichen Städten der USA Projekte mit batteriebetriebenen Shuttle-Bussen, die allesamt eine Länge von 6,7 m aufwiesen. Dieser Shuttle-Service wurde jeweils von lokalen Verkehrsgesellschaften angeboten. Die längste Erprobung mit der größten Anzahl von 30 Bussen begann im Januar 1991 in Santa Barbara. Eines der kürzeren Projekte mit nur vier Bussen lief ab 2001 in Mobile (Alabama). Sie unterlagen damit relativ günstigen Bedingungen, denn Shut-

tle-Linien erfordern vergleichsweise kleine Reichweiten im Vergleich zu gewöhnlichen Stadtlinien (ebd.: 5).

In einer der größten Felderprobungen in Chattanooga liefen die Busse an 363 Tagen pro Jahr von 6-22 Uhr und beförderten nahezu 13 Mio. Fahrgäste seit Beginn des Projekts. Dabei legten sie ungefähr sieben Mio. km zurück und liefen im Durchschnitt jeweils ca. 161 km pro Tag (ebd.: 3). Mit voll aufgeladenen Batterien erzielten die Busse eine Betriebsdauer von 2 ½ bis 8 Stunden, abhängig von Fahrverhalten, Temperatur und dem Gebrauch der Klimaanlage (ebd.: 4, 5). Die Reichweite lag dabei zwischen 60 km in Mobile und 129 km in Santa Barbara (ebd.: 2-5). In allen Erprobungen wurden die entladenen Batterien über Nacht vollständig wiederaufgeladen. Während des täglichen Betriebs jedoch wurden unterschiedliche Strategien zur Erhöhung der Laufzeit, und somit auch der Reichweite angewandt.

In Mobile beispielsweise wurden die Fahrzeuge in der Mittagszeit aus dem Betrieb genommen, um ein zwischenzeitliches Wiederaufladen der Batterien zu ermöglichen. Das heiße Klima im Bundesstaat Alabama führte jedoch bei zu schnellem Aufladen zu Überhitzungen. Daher wurden die zunächst eingebauten luftgekühlten Batterieanlagen, durch Batterien ersetzt, die ein effektiveres thermisches Kühlungssystem erlaubten. Allerdings wiesen die neuen Batterien geringere Energiespeicherkapazitäten auf, wodurch die Reichweite der Fahrzeuge von 60-90 km auf 35 km sank (ebd.: 4, 5).

In Miami, Norfolk und Chattanooga wurden die Busse zwar auch in der Mittagszeit aus dem Betrieb genommen, die Batterien in der Zwischenzeit jedoch nicht wieder aufgeladen. Stattdessen tauschte man die entladenen Batterien durch aufgeladene aus, was zwischen drei und 20 Minuten in Anspruch nahm (ebd.: 2-5).

Insgesamt wurden in allen amerikanischen Felderprobungen eine zu geringe Reichweite und Zuverlässigkeit der Batteriebusse bemängelt. So kam es in Mobile beispielsweise zu Schwierigkeiten mit den Batterien, den Aufladegeräten, der Batterie-Kühlung, der Klimaanlage, den Bremsen und der Federung. Dies waren jedoch nicht die einzigen aufgetretenen Schwierigkeiten. In Norfolk traten insbesondere Probleme mit dem Antriebsregler, der Lenkung, der Federung und dem Bremssystem auf (ebd.: 4, 5).

In einigen Städten kamen spezifische lokale Probleme hinzu. In Miami beispielsweise wurde der Einsatz der Busse drei bis vier Mal pro Jahr durch Hurricanes und starke Regenfälle unterbrochen. Hierbei verhinderten Stromausfälle, dass die Batterien wiederaufgeladen werden konnten. Zudem machten die häufig auftretenden Überschwemmungen eine Kürzung der elektrischen Komponenten der Busse erforderlich (ebd.: 4).

In allen Felderprobungen waren die Betriebskosten für die Batteriebusse höher als die für gewöhnliche Dieselbusse. Dies lag vor allem an den vergleichsweise hohen Wartungskosten für die Batteriebusse. In der folgenden Tabelle sind exemplarisch die Betriebskosten aus der Erprobung in Santa Barbara dargestellt. Diese beinhalten allerdings nur Ausgaben, die für den täglichen Betrieb unerlässlich sind, wie beispielsweise Kraftstoff, Ersatzteile, Wartungsarbeit usw. Nicht enthalten sind die eher langfristig angelegten Ausgaben, wie neue Batterieanlagen, Motoren, Getriebe usw. (ebd.: 9, 10).

Betriebskosten von Diesel- und Batteriebussen

Geschäfts-jahr	Konfiguration	Anzahl der Busse	Durchschnitts-alter (Jahre)	Betriebskosten pro km [US-Dollar]
2005	Dieselbus	70	5	0,40 (0,28 EUR)
	Batteriebus	10	4	0,53 (0,37 EUR)
		10	13	0,97 (0,68 EUR)
2006	Dieselbus	70	6	0,52 (0,36 EUR)
	Batteriebus	10	5	0,48 (0,33 EUR)
		10	14	1,21 (0,84 EUR)

Abbildung 55, Quelle: eigene Darstellung; alle Daten entstammen Griffith 2007: 10

Im Geschäftsjahr 2006 waren die Betriebskosten für die neueren Batteriebusse zwar niedriger als die für die Dieselbusse, jedoch sollte dies nicht überbewertet werden, da bei der Berechnung die Größe der Busse unberücksichtigt blieb (ebd.: 10). Ein gewöhnlicher Dieselbus mit einer Länge von ungefähr 12 m wäre bereits fast doppelt so lang wie ein Batteriebus mit einer Länge von 6,7 m. Allein dies führt schon zu einem völlig unterschiedlichen Kraftstoffverbrauch.

Obwohl die in den Erprobungen aufgetretenen Probleme behoben werden konnten, entschieden sich alle Städte, außer Chattanooga und Santa Barbara dazu, den Einsatz der Busse einzustellen. Die Batteriebusse wurden aus dem Betrieb genommen und durch Diesel- oder Hybridbusse ersetzt. Ausschlaggebend hierfür waren die zu geringen Reichweiten, die geringe Zuverlässigkeit und die hohen Betriebskosten der Batteriebusse. Anders in Chattanooga und Santa Barbara, dort existieren sogar Pläne zur Erweiterung der bestehenden Busflotten (ebd.: 2-5). Die Gründe für diesen Erfolg der Batteriebusse sollen im Folgenden erläutert werden.

Die Felderprobungen in den beiden Städten waren die mit Abstand größten Projekte mit Batteriebussen in den USA. In Chattanooga begann der Einsatz im April 1992. Insgesamt wurden bei dem Projekt 25 Busse getestet. In Santa Barbara wurden die ersten zwei Batteriebusse im Januar 1991 in Betrieb genommen. Weitere Bestellungen folgten und insgesamt waren später 30 verschiedene Busse im Einsatz (ebd.: 2-4). In beiden Städten waren die Batteriebusse sehr beliebt unter den Fahrgästen. Sie trugen sogar dazu bei, die allgemeine Nutzung des öffentlichen Busverkehrs zu steigern. Die Passagiere schätzten die geringe Lärmbelastung und das stabile Fahrverhalten im Vergleich zu gewöhnlichen Dieselbussen (ebd.: 7, 8).

Die Gründe für den Erfolg der beiden Erprobungen sieht man in der Langfristigkeit der Projekte. Diese machte es erforderlich, ausführliche Daten zu sammeln und auszuwerten (ebd.: 3). So konnten beispielsweise in Santa Barbara die Betriebsbedingungen an die neue Technologie angepasst werden, und ungefähr drei Jahre nach Beginn der Erprobung sank die Zahl der Betriebsausfälle der Batteriebusse auf das Niveau der Dieselbusse (ebd.: 9). Hinzu kommt, dass durch den getätigten finanziellen und politischen Einsatz ein großer Druck auf den Verkehrsbetrieben lastete, die Projekte zu einem Erfolg zu machen (ebd.: 12, 13).

Alle Erprobungen mit Shuttle-Bussen wiesen zudem den Charakter einer Nische in der Nische in der Nische auf. Auch wenn die Batteriebusse sich in den meisten Fällen nicht durchsetzen konnten, so wurden sie dennoch unter vergleichsweise günstigen Ausgangsbedingungen in einem kleinen Wettbewerbsraum eingeführt. Um zu zeigen, wie die speziellen Bedingungen in einer Dreifachnische relativ günstige Ausgangsbedingungen für eine neue Technologie schaffen, werden wir in Kapitel 5 näher auf die erfolgreiche Erprobung in Chattanooga eingehen.

In der vorgestellten Studie wird außerdem ein Emissionsvergleich zwischen einem 6,7 m langen Batteriebus und einem vergleichbaren Dieselbus im Shuttleverkehr vorgenommen. Grundlage für die Berechnung der Emissionen der Dieselbusse sind repräsentative Emissionsraten für Diesel-Shuttlebusse im Leistungsbereich von 136 bis 169 kW sowie ein Verbrauch von 11 mpg oder 21,4 l/100 km (ebd.: 6). Die weiteren notwendigen Rechengrößen und das Rechenverfahren selbst sind der Untersuchung von Grifith zu entnehmen (ebd.: 6-7). Die Ergebnisse zeigt Abbildung 56.

Da ein Batteriebus im Einsatz selbst keine Emissionen aufweist, wurden in der Untersuchung die Emissionen, die bei der Erzeugung des Stroms auftraten, berücksichtigt. Es wurde davon ausgegangen, dass der Strom nicht durch regenerative Energien erzeugt wurde und US-amerikanische Emissionsfaktoren für Strom außerhalb von Spitzenlastzeiten zugrunde gelegt. Die folgende Tabelle veranschaulicht, dass die Emissionen der Stromerzeugung die Abgasemissionen eines Dieselbusses bei weitem unterschreiten. Die Werte wurden von g/mile in g/km umgerechnet.

Schadstoffausstoß [g/km]

Emissionen	NOx	NMOG	PM10	CO	CO2
Dieselbus	2,05	0,075	0,093	1,07	565,45
Batteriebus	0,61	0,021	keine Angabe	keine Angabe	355,42

Abbildung 56, Quelle: eigene Darstellung; Griffith 2007: 6

Marktpotenzial

Nach den erfolglosen Flottenversuchen tauschten ab dem Jahr 2000 viele Verkehrsbetriebe in den USA ihre Batteriebusse gegen Hybridbusse aus (Griffith 2007: 1). Mehr als die Hälfte der in den 90er Jahren in den USA produzierten Busse befinden sich nicht mehr im Einsatz (ebd.: 14). Aktuelle Aufträge konnten ausschließlich für Chattanooga und Santa Barbara recherchiert werden. In Chattanooga ist geplant 2008 weitere Batteriebusse zu bestellen. In Santa Barbara sollen 13 neue Batteriebusse in Auftrag gegeben werden (ebd.: 3). In beiden Fällen handelt es sich um die vergleichsweise kleinen Shuttle-Busse. Ansonsten konnten weder in Nordamerika, noch in Asien oder Europa aktuelle Aufträge für Batteriebusse ermittelt werden.

Auch wenn beachtliche Fortschritte in der Batterieentwicklung erreicht wurden, können die Hersteller von batteriebetriebenen Elektrobussen kaum den primären Interessen der Verkehrsgesellschaften gerecht werden. Etwas pauschal formuliert, sind die Verkehrsunternehmen bestrebt, möglichst viele Fahrgäste befördern zu können und dabei die Busse möglichst gut auszulasten. Hohe Betriebsdauern, große Fahrgastkapazitäten und kurze Stillstandszeiten machen den Busbetrieb wirtschaftlich. Die Felderprobungen der Batteriebusse haben gezeigt, dass die Batterien den Flaschenhals für einen wirtschaftlichen Busbetrieb darstellen: Die Lebensdauer, Energiedichte, Zuverlässigkeit und Ladezeiten der Batterien waren nicht ausreichend und erschwerten einen wirtschaftlichen Busbetrieb. Lediglich in bestimmten Nischen, wie zum Beispiel bei den Shuttlebussen von Chattanooga oder Santa Barbara, kann die Technologie überleben. In diesen Nischen ist nicht primär die monetäre Vorteilhaftigkeit ausschlaggebend, sondern Prestigewirkung und Umweltvorteile können von größerem Interesse sein. Die zukünftigen Marktchancen der Batteriebusse für einen breiteren Einsatz hängen unmittelbar von den Fortschritten in der Batterieentwicklung ab. Die Potenziale sollen kurz erläutert werden.

Gegenwärtig existieren drei kommerziell verfügbare Batterie-Varianten, die in Batteriebussen erprobt wurden. Bleibatterien sind derzeit die günstigste Option. Sie wurden von Anfang an in Batteriebussen eingesetzt. Nickel-Cadmium-Batterien wurden ab 1994 und Natrium-Nickel-Chlorid-Batterien ab 2000 in Batteriebussen in Nordamerika verwendet. Weitere technisch mögliche Optionen stellen Nickel-Metall-Hybrid und Lithium-basierte Batterien dar. Nickel-Metall-Hybrid-Batterien kommen bereits in Hybridbussen zum Einsatz (ebd.: 11). Lithium-Ion-Batterien werden zurzeit in den ersten Konzept-Pkw getestet (Autosieger 2007b). Aus Kostengründen verwendet man beide Varianten bisher allerdings nicht in Batteriebussen (Griffith 2007: 11).

In der folgenden Tabelle werden die spezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen Batterie-Varianten verglichen. Der Lebenszyklus einer Batterie gibt an, wie oft diese entladen und wieder aufgeladen werden kann.

Batterie-Varianten

Batterie	**Energie-dichte** [Wh/kg]	**Anschaffungs-kosten** [US-Dollar/kWh]	**Lebens-zyklen**	**Lebenszyklus-Kosten** [US-Dollar/km]
Blei	~ 35	~ 120 (83 EUR)	~ 500	~ 0,15 (0,10 EUR)
Nickel-Cadmium	~ 50	~ 740 (515 EUR)	~ 1.200	~ 0,39 (0,27 EUR)
Natrium-Nickel-Chlorid	~ 107	~ 700 (487EUR)	~ 1.000	~ 0,43 (0,30 EUR)
Lithium-Ion	~ 110	Ziel: ~ 1.000 (696 EUR)	~ 1.000	Ziel: ~ 0,62 (0,43 EUR)

Abbildung 57, Quelle: eigene Darstellung; Griffith 2007: 11

Bei den Anschaffungskosten und den Lebenszykluskosten der Lithium-Ion-Batterie handelt es sich nicht um gemessene Angaben aus Buserprobungen, sondern um Zielwerte. Wie aus der Tabelle hervorgeht, können Lithium-Ion-Batterien im Vergleich zu Bleibatterien zu einer erheblichen Leistungssteigerung bei gleichzeitiger Gewichtabnahme führen. Dies birgt das Potenzial, die Größe der Batteriebusse zu erweitern und zugleich ihre Reichweite zu erhöhen. Wenn dies gelingt, könnten Batteriebusse durchaus Marktreife erlangen und für Verkehrsbetriebe eine interessante Option darstellen. Für die letztendliche Auswahl der richtigen Batterie-Variante müssen jedoch zusätzliche Faktoren, wie z.B. lokale Klimabedingungen berücksichtigt werden (Griffith 2007: 11).

Aus den dargelegten Erprobungen ging hervor, dass es neben der Verbesserung der Energiedichte von Batterien noch weitere Möglichkeiten gibt, um die Reichweite der Busse zu verbessern. Beispielsweise kann der Linienverkehrsplan so angepasst werden, dass an Endhaltestellen genügend Zeit besteht, um die Batterien zumindest teilweise wiederaufzuladen. Diese Methode hat gleichzeitig den Vorteil, dass die Busse stets in den oberen Ladezuständen fahren können, bei denen die Batterien am effektivsten sind. In einem Demonstrationsprojekt konnte bei planmäßigen Aufenthalten die Batterien jede Stunde sechs Minuten lang aufgeladen werden. Dadurch konnte der Batteriebus mit einer Nennkapazität von nur 50 kWh über den Tag verteilt 122 kWh an Energie liefern. Bei dem periodischen, schnellen Wiederaufladen werden die Batterien stark erhitzt und ein thermisches Management zur Kühlung der Batterien ist notwendig (ebd.: 11, 12).

Der Betrieb von Batteriebussen erfordert große Umbaumaßnahmen in der bestehenden Infrastruktur. Wenn die Möglichkeit bestehen soll, zwischenzeitlich die Batterien der Busse

an einzelnen Haltestellen schnell wieder aufzuladen, sind zusätzliche Umbaumaßnahmen notwendig. Zudem müsste natürlich bei der gegenwärtigen Reichweite der Busse der gesamte Linienplan auf diese angepasst werden. Wie außerdem aus den Felderprobungen hervorgeht, ist der erfolgreiche Betrieb der Batteriebusse sehr stark von weiteren lokalen Bedingungen, wie dem Klima, der Steigung, bzw. dem Gefälle der Straßen und der Haltestellendichte abhängig (ebd.: 13). Strecken mit einer hohen Dichte an Haltestellen senken die Reichweite der Busse zusätzlich, da für das Anfahren viel Energie benötigt wird.

Anhand der gegenwärtigen Auftragslage wird schnell ersichtlich, dass die Verkehrsgesellschaften nicht dazu bereit sind, die beträchtlichen zusätzlichen Investitionen für den Einsatz von Batteriebussen zu tragen. Dies wird voraussichtlich auch innerhalb der nächsten Jahre so bleiben. Erst durch die weitere technische Entwicklung im Batterie-Bereich könnte diese Konfiguration wieder attraktiver werden. Zurzeit werden große Hoffnungen in die Lithium-Ion-Batterie gesetzt.

Wenn es gelingt, die Batteriebusse mit ausreichender Reichweite zu einem marktfähigen Preis anzubieten, könnten diese sicherlich eine reizvolle Option für die Verkehrgesellschaften darstellen. Vor allem, wenn der notwendige Strom über regenerative Energien gewonnen werden kann. In diesem Fall bergen die Batteriebusse das Potenzial eines völlig emissionsfreien Busverkehrs. Aber auch bei konventionell erzeugtem Strom bieten die Batteriebusse Umweltvorteile, wie in Abbildung 56 erläutert wurde. Gegenwärtig aber können zuverlässige Aussagen über die zukünftige Entwicklung noch nicht getroffen werden.

Zusätzlich zu den Marktpotenzialen der Batteriebusse soll an dieser Stelle kurz die bisherige Entwicklung der Oberleitungsbusse zusammengefasst werden. Wie bereits erwähnt, wurde der erste Oberleitungsbus 1882 gebaut (Wikipedia 2007c). Seitdem stieg der weltweite Bestand an Oberleitungsbussen stetig an, bis zu einer Trendwende gegen Ende der 1950er Jahre. Vor allem nach dem ersten Weltkrieg war der Oberleitungsbus sehr gefragt. Er profitierte dabei von einem allgemeinen Mangel an Diesel, so dass er gegenüber Dieselbussen eine zuverlässige Alternative darstellte. Der benötigte Strom konnte in vielen Ländern problemlos über Kohlekraftwerke bereitgestellt werden (Trolleymotion 2007).

Gegen Ende der 1950er Jahre änderte sich diese Situation jedoch. Die Transportwege stabilisierten sich und der Kraftstoff Diesel war nicht mehr knapp. Zudem gab es große technische Fortschritte im Bereich der Dieselbusse, welche schließlich dazu führten, dass diese bis zu den 1970er Jahren kostengünstiger und streckenunabhängiger als die Oberleitungsbusse waren (ebd.).

Seitdem bietet sich ein sehr ambivalentes Bild auf dem Markt der Oberleitungsbusse. Einerseits werden zwar in vielen Städten alte Oberleitungsbuslinien abgebaut, andererseits werden aber in anderen Städten komplett neue Linien erbaut. So entstand beispielsweise 2003 im schwedischen Landskrona eine neue Oberleitungsbuslinie auf der drei Busse verkehren. Für die Olympischen Sommerspiele 2004 vergab die griechische Hauptstadt Athen einen Auftrag über 366 Oberleitungsbusse an die Unternehmen Neoplan und Van Hool (ebd.). Auch in der Schweiz sind Trolleybusse populär und in 14 Städten im Einsatz. Allein die Züricher Verkehrsbetriebe haben im Jahr 2006 insgesamt 33 Trolleybusse, davon 16 normale Gelenkbusse und 15 Doppelgelenkbusse bei dem Schweizer Hersteller Hess bestellt. Die Kosten für die Doppelgelenk-Trolleybusse liegen bei 1,6 Mio. CHF oder ca. 970.000 EUR (VBZ 2006)

Gegenwärtig befinden sich ungefähr 40.000 Oberleitungsbusse weltweit im Einsatz. Russland verfügt mit einer Anzahl von 14.000 über die weltweit größte Flotte (ebd.). In Deutschland werden lediglich in drei Städten Oberleitungsbusse eingesetzt, in Esslingen, Eberswalde und Solingen (Obus 2007).

Es ist davon auszugehen, dass mit fortschreitender Entwicklung und Kostenreduktion bei Batterie- und Brennstoffzellenbussen die Oberleitungsbusse ganz von der Bildfläche verschwinden werden. Ebenso wie der Oberleitungsbus bieten Batterie- und Brennstoffzellen-

busse die Möglichkeit eines emissionsfreien Busverkehrs. Sie sind darüber hinaus flexibel einsetzbar, da sie nicht an eine Oberleitung gebunden sind. Dadurch entfallen auch die Kosten für Aufbau und Wartung der Oberleitungen.

4.5 Brennstoffzellenbusse

Clusterbeschreibung

Brennstoffzellenbusse zählen ebenso wie batteriebetriebene Fahrzeuge zu den Elektrofahrzeugen. Allerdings mit dem Unterschied, dass die elektrische Energie nicht in Batterien gespeichert, sondern in der Brennstoffzelle elektrochemisch aus Wasserstoff gewonnen wird. Im Gegensatz zu Batterien sind Brennstoffzellen also keine Energiespeicher sondern Energiewandler. Nach ihrer Invention im Jahr 1838 galt die Brennstoffzelle lange Zeit aufgrund zu geringer Leistungsdichten als unattraktiv für die hohen Anforderungen im Fahrzeugbau. Erst die Entwicklung von Hochleistungspolymermembranen machte die Technologie für den Einsatz in der Automobilindustrie interessant.

Ein Durchbruch hinsichtlich der Lebensdauer und Leistungsdichte gelang Mitte der 1980er Jahre mit dem Einsatz fluorierter Polymere. Eine herausragende Rolle spielte hierbei die von der Firma DuPont entwickelte Nafion©-Membran (Jörissen/Garche 2000: 24). Hochleitungsmembranen ermöglichten es der kanadischen Firma Ballard automobiltaugliche Stacks zu entwickeln. Ballard ereichte Mitte der 1990er Jahre erstmals automobiltaugliche Leistungsdichten von 1.000 W pro Liter Stackvolumen (Gerl 2002).

Ebenso wie die Batteriebusse haben wasserstoffgetriebene Brennstoffzellen-Fahrzeuge einen substituierenden Charakter und können das Marktgeschehen auf dem Busmarkt radikal verändern. Sie stellen sowohl antriebs- als auch kraftstoffseitig eine Alternative zum Verbrennungsmotor dar und zählen daher zu den radikalen Innovationen. Die Beschreibung des Brennstoffzellen-Clusters erweist sich allerdings als etwas diffizil, da zwei Strukturvarianten von Brennstoffzellen-Fahrzeugen zu unterscheiden sind. Dies sind zum einen Fahrzeuge, welche Wasserstoff direkt tanken können (Strukturvariante 1), zum anderen Fahrzeuge mit der Möglichkeit der Wasserstoffgewinnung direkt im Fahrzeug mittels eines so genannten On-Board-Reformers (Strukturvariante 2). Dieser chemische Minireaktor kann den Wasserstoff aus wasserstoffhaltigen Verbindungen gewinnen.

Beide Varianten haben gemein, dass die für mobile Anwendungen am besten geeignete Polymer-Membran-Brennstoffzelle, kurz PEFC (Polymer Elektrolyt Fuel Cell) eingesetzt wird. Dieser Zelltyp hat die Eigenschaft, dass er ausschließlich mit hochreinem Wasserstoff mit einer Reinheit von mindestens 99,99% betrieben werden sollte. Insbesondere bei Wasserstoff aus Reformierungsprozessen ist darauf zu achten, dass er diesen Anforderungen entspricht.

Die Brennstoffzellen-Fahrzeuge sind in der Innovations-Matrix in der letzten Zeile mit dem Index a=5 aufgeführt. Wir verstehen unter einem Brennstoffzellenfahrzeug entweder ein direkt wasserstofftankendes Fahrzeug der Strukturvariante 1 oder ein Fahrzeug mit On-Board-Reformer der Strukturvariante 2. Entsprechend zerfällt das Brennstoffzellencluster in die zwei Strukturbereiche:

- In Strukturbereich 1 fallen die beiden Fahrzeugkonfigurationen $F_{5/14}$ und $F_{5/15}$. Sie repräsentieren Brennstoffzellen-Fahrzeuge mit der Möglichkeit Druckwasserstoff (k=14) oder Flüssigwasserstoff (k=15) direkt zu tanken. Beide Konzepte wurden erfolgreich von verschiedenen Busherstellern in Feldversuchen demonstriert, so dass für beide Felder Innovationen vorliegen.

- Im Strukturbereich 2 liegen die Fahrzeug-Konfigurationen $F_{5/k}$ mit den Kraftstoffen k=1 bis 12 und stellen Brennstoffzellen-Fahrzeuge mit On-Board Reformertechnologie dar. Die Innovationsbetrachtung erweist sich hier schwieriger, da sich die Entwicklung von Kraftstoffreformern für Fahrzeuge meist noch im Inventionsstadium befindet. Eine Ausnahme bildet die Methanol-Reformierung. An der Georgetown University in den USA wurde 1994 der erste Bus mit einem Methanolreformer hergestellt, so dass für die Fahrzeug-Konfiguration $F_{5/11}$ eine Innovation vorliegt (Fuelcellbus 2007a). Bei der Konfiguration $F_{5/10}$ bestanden bereits 1999 Pläne für die Produktion eines Busses mit Ethanolreformer (Carbohydrateeconomy 1999). Bisher wurde dieser allerdings nicht gebaut. Die Ursachen hierfür sind unbekannt. Technisch steht der Produktion zwar nichts im Wege (DOE 2000: 3), dennoch liegt nach unserem Verständnis in diesem Fall keine Innovation vor, da noch kein Prototyp der Konfiguration $F_{5/10}$ existiert.

Rein technologisch gesehen kann aus jeglichen Kohlenwasserstoffen C_mH_n und Alkoholen C_mH_nOH über Reformierungsprozesse Wasserstoff gewonnen werden. Daher sind auch keine prinzipiell technologisch ausgeschlossenen und mit »x« gekennzeichneten Felder im Strukturbereich 2 zu finden. Jedoch ist nicht jeder Kraftstoff für die On-Board Reformierung in einem Fahrzeug geeignet. Die großtechnische Reformierung von Erdgas und anderen kohlenstoffbasierten Rohstoffen ist in der Petrochemie ein gängiges chemische Verfahren, daher liegt die Herausforderung vor allem in der Miniaturisierung der Technologie.

Interessant für die Reformierung in Kfz-Anwendungen sind aufgrund hoher Energiedichten flüssige Kraftstoffe wie Benzin, (Bio-)Diesel, (Bio-)Methanol oder (Bio-) Ethanol. Besonders geeignet ist dabei Methanol mit der Strukturformel CH_3OH, da der Alkohol in einem Dampfreformer bereits bei 250°C bis 300°C reformiert werden kann. Außerdem verfügt Methanol über ein sehr gutes C-H-Verhältnis und das Produktgas besteht zu 75% aus Wasserstoff. Die Methanolreformierung wurde in dem auf der A-Klasse basierenden Versuchsfahrzeug NECAR V von Daimler erfolgreich demonstriert.

Die Reformierung höherer Alkohole und Kohlenwasserstoffe ist komplexer und erfordert deutlich höhere Prozesstemperaturen von etwa 700 bis 1.000°C. Durch die hohen Temperaturen wird der Reformer insgesamt komplizierter, schwerer und teurer und die Materialauswahl anspruchsvoller. Außerdem müssen energetisch ungünstigere Reformierungsverfahren mit einer geringeren Wasserstoffausbeute in Kauf genommen werden. Diese sind die partielle Oxidation und die autotherme Reformierung. Bei der autothermen Reformierung handelt es sich um eine Kombination aus Dampfreformierung und partieller Oxidation. An der reinen Dampfreformierung von Benzin unter Kfz-kompatiblen Bedingungen wird derzeitig geforscht. Durchbrüche hinsichtlich der Aktivität und Standzeiten der Katalysatoren sind hier aber noch erforderlich (ConNeCat 2006, 16).

Trotz dieser Nachteile befinden sich mineralöltaugliche Reformer für Diesel und Benzin in der Entwicklung. Im Laborbetrieb wird die authotherme Dampfreformierung von entschwefeltem Benzin bereits erfolgreich erprobt, zum Beispiel am Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme in Freiburg (ISE 2002). Eine vollwertige Integration in einen Bus mit Prototypencharakter ist uns jedoch nicht bekannt, so dass wir diese und andere Bestrebungen auf dem Gebiet der Reformierung noch eher in der Phase der Invention sehen. Eine Ausnahme bildet die an der Georgetown University erfolgreich demonstrierte Methanolreformierung in einem Testbus der ersten Generation (Fuelcellbus 2007a).

Abbildung 58 zeigt das Brennstoffzellen-Cluster der Innovations-Matrix. In der Clusterbeschreibung wurde bereits dargestellt, dass über Reformertechnologie Wasserstoff prinzipiell aus jeglichen Kohlenwasserstoffverbindungen (k=1 bis 12) gewonnen werden kann. Daher umspannt dieses Cluster ebenso wie das Hybrid-Cluster vier Bereiche. Es sollte allerdings beachtet werden, dass bei dem Hybrid-Cluster vier Innovationsbereiche vorliegen, während sich im Brennstoffzellen-Cluster lediglich zwei Innovationsbereiche befinden. Die

Bereiche 1 und 2 beinhalten ausschließlich Inventions-Räume und stellen somit keine Innovationsbereiche dar.

Die Bereiche 1 bis 3 zählen zur Strukturvariante 2 und repräsentieren die Fahrzeuge mit On-board-Reformierung. Im Bereich 4 liegen die direkt wasserstofftankenden Fahrzeuge der Strukturvariante 2.

Cluster 5 der Innovations-Matrix

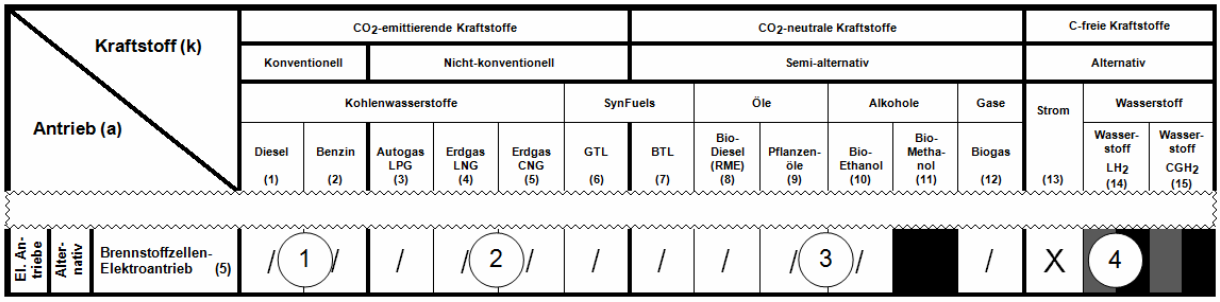


Abbildung 58, Quelle: eigene Darstellung

Das Innovationsmuster im Brennstoffzellen-Cluster hängt von der Kraftstoffwahl ab. Der Brennstoffzellen-Antrieb selbst stellt eine radikale Innovation dar, so dass die Innovativität der gesamten Fahrzeug-Konfiguration vom Kraftstoff abhängig ist. Folgende Innovationsmuster liegen in den vier Bereichen vor.

- Bereich 1: Inventions-Raum
- Bereich 2: Inventions-Raum
- Bereich 3: Radikale Innovationen 2. Grades
- Bereich 4: Radikale Innovationen 1. oder 2. Grades

Bereich 1 stellt heute noch einen Inventions-Bereich dar. Eventuelle Innovationen in diesem Bereich würden zu inkrementalen Innovationen 1. Grades führen, da ein konventioneller Kraftstoff mit dem alternativen Brennstoffzellenantrieb »gepaart« wird. Die On-Board-Benzinreformierung wäre hierfür ein Beispiel.

Die Entwicklungen im Bereich 2 bewegen sich ebenfalls noch im Inventionsbereich. Im Unterschied zu Bereich 1 würden aber zukünftige Innovationen bereits zu radikalen Innovationen 1. Grades führen, da in Bereich 2 von der heutigen Konvention abweichende Kraftstoffe Einsatz finden.

Innovationen im Bereich 3 stellen radikale Innovationen 2. Grades dar, da in diesem Bereich CO_2-neutrale Kraftstoffe vorliegen. Die Fahrzeug-Konfiguration $F_{5/11}$ stellt die On-Board-Reformierung von Bio-Methanol dar. Wie bereits dargestellt wurde, ist die Methanolreformierung als Innovation anzusehen, und wurde in einem Testbus der Georgetown University auch erfolgreich demonstriert (Fuelcellbus 2007a).

Der Wasserstoff liegt im Bereich 4 und führt zu den beiden radikalen Fahrzeugkonfigurationen $F_{5/14}$ und $F_{5/15}$. Sie können als radikale Innovation 1. oder 2. Grades vorliegen. Wie auch bei den anderen Clustern gibt der Grad Auskunft über die ökologische Qualität des Wasserstoffs. Wird die Brennstoffzelle mit Strom (k=12) betrieben, wird der Brennstoffzellenprozess quasi umgedreht und die Brennstoffzelle arbeitet als Elektrolysezelle und produziert Wasserstoff. Technologisch ist dies bei geeigneter Membranwahl im weiteren Sinne denkbar. Für den Antrieb eines Elektromotors macht aber der Umkehrprozess technologisch keinerlei Sinn und daher ist das Feld mit einem »x« gekennzeichnet.

Auch die verschiedenen Konzepte in den vier Innovationsbereichen des Brennstoffzellen-Clusters unterliegen einem Anpassungsdruck. Dieser resultiert einerseits aus der Komplexität von Onboard-Reformierung und andererseits mit dem Vereinheitlichungsdruck im Bereich der Antriebssysteme. Es zeigt sich derzeitig ein Trend zu Bus-Konzepten mit direkter Druckwasserstoffspeicherung (Strukturvariante 2, Feld $F_{5/15}$)

Wahl der Bespielmodelle

In den Bereichen 1 und 2 ist noch vergleichsweise viel Spielraum für Inventionen gegeben. Für die Konfigurationsfelder $F_{5/1}$ bis $F_{5/6}$ konnten keine Innovationen recherchiert werden. Somit steht in den Bereichen 1 und 2 auch kein Beispielmodell zur Verfügung, das näher vorgestellt werden könnte.

In Bereich 3 liegt der bereits angesprochene Bus mit einem Methanol-Reformer der Georgetown University vor. Für die Konfiguration $F_{5/10}$ konnte ebenfalls eine Innovation verbucht werden. Zwar wurde, trotz vorhandener Pläne, bisher noch kein Bus mit einem Ethanol-Reformer gebaut, seine Herstellung wäre technisch aber durchaus möglich (DOE 2000: 3). In den anderen Feldern des Bereichs liegen Inventionsräume vor und es demnach nur der Bus mit dem Methanol-Reformer zur genaueren Vorstellung zur Verfügung.

Der vierte Bereich besteht nur aus drei Konfigurationen, von denen eine ($F_{5/13}$) technologisch ausgeschlossen ist. Bei den Konfigurationen $F_{5/14}$ und $F_{5/15}$ konnten für beide Felder mehrere Beispielmodelle recherchiert werden. Ähnlich jedoch wie bei den Wasserstoff-Bussen mit Verbrennungsmotor, werden bei den Brennstoffzellenbussen, die neusten Modelle zumeist mit gasförmigem Wasserstoff angetrieben (H2Cars 2007). Zudem stellt sich die Datenlage bei den mit gasförmigem Wasserstoff angetriebenen Brennstoffzellenbussen um einiges besser dar. Diese wurden in einigen der bisher größten Projekte mit Brennstoffzellenbussen eingesetzt, wie beispielsweise dem CUTE-, HyFLEET: CUTE-, ECTOS- oder dem STEP-Projekt (GHBP 2007b, 2007g; ECTOS 2007; DPI 2007).

In all diesen Projekten wurde ein Citaro Brennstoffzellenbus von Mercedes-Benz eingesetzt. Wir entschieden uns unter anderem deshalb dazu, diesen als Beispielmodell für den vierten Bereich vorzustellen, weil für dieses Modell sehr ausführliche Evaluationen vorliegen. Wir hätten aber ebenso einen Brennstoffzellenbus von MAN, Scania, Iveco, Hyundai, Toyota oder Van Hool vorstellen können (H2Cars 2007).

Beispielmodell für den Innovationsbereich 4: Mercedes-Benz Citaro

Technologie

Der Citaro mit Brennstoffzellen-Technologie wurde 2002 der Öffentlichkeit präsentiert. Er ist eine Weiterentwicklung des 1997 präsentierten NEBUS (H2Cars 2007). Der Citaro ist der bisher meistgebaute Brennstoffzellenbus. Bereits 36 Citaros liefen in längeren Projekten mit einer Laufzeit von mindestens zwei Jahren. Bis zum Jahresende 2005 hatten die Citaros insgesamt rund 1,1 Mio. Kilometer zurückgelegt. Gegenwärtig befinden sich noch 33 auf drei verschiedenen Kontinenten im Einsatz (DaimlerChrysler 2006). Die folgende Tabelle fasst die technischen Daten des Citaro zusammen.

Beispielmodell Fahrzeugkonfiguration $F_{5/15}$

Kennwerte		Daimler
Modell		Citaro[a]
Fahrzeug-Konfiguration		$F_{5/15}$
Brennstoffzelle	Typ	HY-205 P5-1[b]
	Maximale Leistung	250 kW[a] (2 Stacks je 125 kW[b])
	Ausgangsleistung	205 kW[a]
	Nennleistung [kW]	keine Angabe
	Nenndrehm. [Nm] bei 800/min	1050[c]
E-Motor	Typ	keine Angabe
	Nennleistung [kW]	205[a]
Batterie	Typ	keine Angabe
	Nennleistung [kW]	keine Angabe
Generator	Nennleistung [kW]	keine Angabe
Verbrauch	[l/100 km]	keine Angabe
Tankinhalt	Wasserstoff [Liter]	9 Tanks; insgesamt 40 kg bei 350 bar[a]
Beschleunigung	0-50 km/h [sec]	16-20[b]
Elastizität	80-100 km/h, 6. Gang [sec]	keine Angabe
Reichweite	[km]	200[a]
Leergewicht	[kg]	14.200[a]
Maße	Länge [m]	12,00[a]
	Breite [m]	2,55[a]
	Höhe [m]	3,67[a]
Emissionen	Schadstoffklasse	Lokal kein Schadstoffausstoß[b]
Kapazität	Sitzplätze	30[c]
	Stehplätze	40[c]
	Gesamt	70[a]
Preis	[EUR] ohne MwSt.	1, 25 Mio. EUR[d]

Abbildung 59, Quelle: eigene Darstellung; [a] GHBP 2007a; [b] CUTE 2006a: 54, 55; [c] CUTE 2006b: 49-57; [d] Die Zeit 2003

Im Rahmen des HyFLEET: CUTE-Projektes will Daimler bis 2008 auf Basis der bisherigen Erfahrungen einen neuen Citaro Brennstoffzellenbus entwickeln. In dem Bus sollen adaptierte Brennstoffzellensysteme, die auch für die B-Klasse F-Cell vorgesehen sind, verwendet werden. Bei den bisherigen Brennstoffzellen der Busse handelt es sich um Eigenentwicklungen, die im Pkw-Bereich gegenwärtig keine Verwendung finden, und dementsprechend nur in niedrigen Stückzahlen produziert werden. Durch den Umstieg auf die Brennstoffzellensysteme der Pkw erhofft man sich schneller von Skalierungseffekten profitieren zu können. Die neuen Brennstoffzellenmodule werden insgesamt maximal eine Leistung von 90 kW liefern (DaimlerChrysler 2006).

Damit der neue Bus jedoch wie sein Vorgänger eine Gesamtleistung von 200 kW erreicht, soll zudem eine »Hybridisierung« des Antriebsstrangs erfolgen. Es wird eine Hochleistungsbatterie eingebaut, welche die benötigte Stackleistung um mehr als ein Drittel senkt. Trotz der teuren Batterie soll dabei insgesamt ein Kostenvorteil entstehen. Außerdem rechnet man mit einer Gewichteinsparung von bis zu einer Tonne (ebd.).

Der neue Antrieb soll den Leistungsanforderungen des Busses besser entsprechen. Dieser schöpft bisher lediglich bei Steigungen oder beim starken Beschleunigen sein ganzes Potenzial aus. Diese Leistungsspitzen sollen zukünftig durch die zusätzliche Energie aus dem Batteriespeicher abgedeckt werden. In den restlichen Fahrsituationen ist der Leistungsbedarf erheblich geringer und kann allein durch die neuen Brennstoffzellen bewältigt werden. Im normalen Fahrbetrieb unter Teillast verfügt die Brennstoffzelle sogar noch über weitere Energie, die für das Wiederaufladen der Batterie benutzt wird. Diese wird außerdem beim Abbremsen wieder aufgeladen. Hier arbeiten die Elektromotoren als Generatoren und führen die erzeugte Energie der Batterie zu (ebd.). Insgesamt verspricht man sich von der Hybridisierung und den weiteren Optimierungen eine Senkung des Verbrauchs um mehr als 25% (CUTE 2006a: 58).

Zusammenfassend kann die Hybridisierung von Brennstoffzellenbussen als eine folgerichtige Antwort auf den maßgeblichen Betriebszyklus, die erforderliche Verbrauchsreduzierung, und die Erhöhung der Robustheit und Lebensdauer des Antriebssystems angesehen werden.

Abschließen sei nochmals darauf hingewiesen, dass es mittlerweile üblich ist, den Begriff der Hybridisierung nicht nur bei Verbrennungsmotoren zu verwenden, sondern auch von einem hybridisierten Brennstoffzellenbus zu sprechen. Der Begriff bezeichnet hier einen kombinierten Brennstoffzellen- und Batterieantrieb. Die Batterie erlaubt die für eine »Hybridisierung« typische Bremsenergierückgewinnung.

Felderprobungen

Zu Flottenversuchen mit Brennstoffzellenbussen sind zahlreiche ausführliche Evaluationen vorhanden. Die folgende Tabelle soll einen kleinen Überblick bieten. Ihre Daten entstammen, soweit nicht anders angegeben aus Fuelcells 2006. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden Abkürzungen verwendet. PEFC steht dabei für Polymer-Membran-Brennstoffzelle (Polymer Elektrolyt Fuel Cell), PAFC für Phosphorsäure (Phosphoric Acid Fuel Cell), BZ für Brennstoffzelle, LH für flüssigen Wasserstoff (Liquid Hydrogen) und CHG steht für gasförmigen Wasserstoff (Compressed Hydrogen).

Jahr	Projekt	Busge-häuse (Hersteller)	Modell (Länge)	Antrieb	BZ-Typ [kW]	BZ Hersteller	Reichweite [km]	Max. Geschw. [km/h]	Treib-Stoff	Foto
1993	Demonstrationsbus	New Flyer Industries Ltd.	P1 Stadtbus Niederflur 12m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 90	Ballard	400	95	CHG	
1994; 1995	Georgetown University Generation 1; Einsatz von 3 Bussen an unterschiedlichen Orten	Bus Manu-facturing U.S.A. Inc.	Stadtbus 9 m	BZ/ Batterie Hybrid	PAFC 50	Fuji Electric	402	90	Methanol	
1995	Demonstrationsbus	k. A.	P2 12 m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 205	Ballard	400	k. A.	CHG	
1995	Keine Erprobung EUREKA	Van Hool	Stadtbus 18 m	BZ/ Batterie Hybrid	PAFC 78	Elenco	300	k. A.	LH 700 l	
1997	Lief 1997 über 540 Stunden in einer Erprobung; 2-wöchiger Einsatz in Norwegen und Deutschland 1999	EvoBus (Daimler)	Nebus 405 Niederflur Stadtbus 12m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 205	Ballard	250	80	CHG	
1997	Unternehmensintern getestet; Teil des EU Projekts EQHHPP	Macchi-Ansaldo	Stadtbus 12m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 45	Nuvera	400	k. A.	LH 600 l	
1998	Georgetown Universität Generation 2; Einsatz an unterschiedlichen Orten[a]	NovaBus Corporation (Volvo)	Stadtbus 12m	BZ/ Batterie Hybrid	PAFC 100	UTC	563	106	Methanol	
1998	2-jähriger Einsatz von 3 Bussen in Chicago (1997) und Vancouver (1998)	New Flyer Industries Ltd.	P3 Stadtbus Niederflur 12m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 205	Ballard	k. A.	k. A.	CHG	
1999	Erprobt von SunLine Transit (1 Jahr lang), AC Transit und CaFCP	EvoBus (Daimler)	P4 Zebus 12 m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 205	Ballard	k. A.	k. A.	CHG	
1999	2-jähriger aus Steuern bezahlter Einsatz im öffentlichen Verkehr Oberstdorf; finanziert vom Bundesland Bayern	Neoplan (MAN)	Midi Bus N 8008	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 40	Nuvera	600	50	CHG	
1999	Einsatz in New York, NV und DC; die Fort-führung der Erprobung finanzierte die FTA	NovaBus Corporation (Volvo)	Stadtbus 12 m	Zink-Luft BZ mit Batterie	Zink-Luft	Aro-tech	k. A.	105	Zink	

2000	Käuflich erwerbbar	Neoplan (MAN)	N8012 33 Sitzplätze	BZ/100 kW Schwungrad Hybrid	PEFC 80	Proton Motor	250	80	CHG	
2000	Eingesetzt in Nürnberg und Erlangen; zu 50% vom Bundesland Bayern finanziert	MAN	Bavaria I NL263 Stadt-bus Niederflur 12 m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 68	Ballard	300	80	CHG 1548 l	
2000	CityCell: Einsatz von 2000 bis 2003 in Madrid (Spanien)[a]	k. A.	k. A.	BZ/ Hybrid[a]	60[a]	UTC[a]	k. A.	k. A.	k. A.	keine Angabe
2001	Georgetown Universität Generation 2; für nationale Demonstrationszwecke genutzt	NovaBus Corporation (Volvo)	Stadtbus 12 m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 100	Ballard	563	106	Methanol	
2001	Ab 2002 in Turin (Italien) eingesetzt; noch im Betrieb[a]	Irisbus (Renault und Iveco)	12 m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 60	UTC	k. A.	k. A.	CHG	
2001	RTC (Nevada Transit Agency) plant den Einsatz von 2-5 Bussen in	NovaBus Corporation (Volvo)	Stadtbus 12 m	Zink-Luft BZ mit Super-caps	Zink-Luft	Aro-tech	k. A.	k. A.	Zink	
2001	Soll 2002 6 Monate lang von SunLine Transit getestet werden (seit 6. Nov. im öffentlichen Einsatz bei SunLine)	Thor Industries (Thunder Power LLC)	El Dorado National E-Z Rider Nieder-flur 9m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 75	UTC	322	90	CHG	
2001	Unternehmensintern von Toyota getestet	Hino Motors Ltd. (Toyota)	FCHV-BUS1 Stadtbus Niederflur 12m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 160	Toyota	300	80	CHG @ 5.000 psi	
2002	1-jähriger Einsatz ab Sommer 2003 in Tokio; seit 2003 sind 8 Busse in Tokio im Betrieb[a] ; ab 2005 zweites Modell	Hino Motors Ltd. (Toyota)	FCHV-BUS2	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 180 (2 x 90)	Toyota	300	80	CHG@ 5.000 psi	
2002	Einsatz von 2002 bis 2003 in Thousand Palms und Oakland (Kalifornien)[a]	Thunder Power[a]	9 m[a]	BZ/ Hybrid (ISE)[a]	PEFC 60[a]	UTC[a]	k.A.	k. A.	k. A.	keine Angabe
2003	CUTE, ECTOS, STEP (insgesamt 33 Busse); Kosten pro Bus (nicht subventioniert): 3 Mio. US-Dollar	EvoBus (Daimler)	Citaro 12 m[a]	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 205	Ballard	200	80	CHG@ 5.000 psi (345 bar)	
2004	VTA, San Metro Transportation District, CaFCP & CARB – geplanter Einsatz von 3 Bussen bei der VTA in San Jose (CA); befinden sich noch im Betrieb[a]	Gillig Corporation	k. A.	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 205	Ballard	k. A.	k. A.	Wasser-stoff	

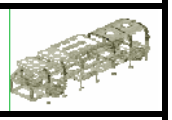
2004	U.S. Air Force; State of Hawaii's High Technology Development Corporation und Hydrogenics partnership; noch im Betrieb[c]	Enova Systems	k. A.	BZ/ Batterie Hybrid	20	Hydro-genics	k. A.	k. A.	Wasserstoff	
2005	3 Busse sind in Oakland und einer in Thousand Palms im Betrieb (Kalifornien)[c]	Van Hool	12 m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 120	UTC	400	105	CHG@ 5.000 psi (345 bar)	
2006	Einsatz von 3 Bussen von 2004 bis 2006 in Peking (von UNDP-GEF finanziert)[b]; noch im Betrieb[a]	Daimler[b]	Citaro Niederflur 12m[b]	BZ[b]	PEFC 205[b]	Ballard[b]	150-250[b]	70[b]	CHG	
2006	HyFLEET: CUTE: Fortführung des CUTE-Projektes bis Februar 2007[d]	Daimler[d]	Citaro Niederflur 12m[d]	BZ[d]	PEFC 205[b]	Ballard[b]	150-250[b]	70[b]	CHG	
2006	Geplante Auslieferung an Delijn (Belgien) für einen 6-monatigen Einsatz, vor der Vermietung an weitere Verkehrsgesell-schaften in Europa; befindet sich im Betrieb[a]	Van Hool	12m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 120	UTC	400	105	CHG	keine Angabe
Geplant 2006	Natural Resources Canada (1,9 Mio. US $) und Hydrogenics planen Einsatz in Winnipeg (Manitoba), Kanada	New Flyer Industries Ltd.	12m	Anreihung von 25 kW Modulen/ Supercaps	PEFC 180	Hydro-genics	k. A.	k. A.	CHG	
Beginn 2006	Georgetown Universität Generation 3; das Team beinhaltet: EPRI, ZSW, NuCellSys	k. A.	Niederflur 12m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC 240	NuCellSys	k. A.	k. A.	Methanol	
2007	5 Busse befinden sich in Sao Paulo (Brasilien) im Betrieb; von der UNDP-GEF gefördert[a]	k. A.	k. A.	BZ/ Hybrid[a]	k. A.	Ballard[a]	k. A.	k. A.	k. A.	keine Angabe
2007	Befindet sich bei Connecticut Transit Hartford im Einsatz[a]	Van Hool[c]	12 m[a]	BZ/ Hybrid (ISE)[c]	120[a]	UTC[c]	k. A.	k. A.	k. A.	Nicht verfügbar
Geplant	Geplanter Einsatz beim EU Projekt THERMIE in Berlin, Kopenhagen, Lissabon	MAN	NL 223 Niederflur12 m	BZ/ Supercaps Hybrid	PEFC5 x 30 kW	Nuvera	k. A.	k. A.	LH2 700 l @ -253 Grad	
Geplant	Geplanter Einsatz eines Busses im Rahmen des Wasserstoff-Projektes am Münchener Flughafen	MAN	Niederflur12 m	BZ/ Batterie Hybrid	PEFC	Ballard	k. A.	k. A.	CGH2 @; 5.000 psi (345 bar)	keine Angabe
Geplant	BVG (Berlin) plant 2 Prototypen zu kaufen	NovaBus Corporation (Volvo)	Doppeldecker 15,3 m	k. A.	k. A.	Proton Motor	k. A.	k. A.	Wasserstoff	

Abbildung 60, Quelle: eigene Darstellung; [a] NREL 2007b: 2; [b] Jingguang 2006: 7, 8; [c] NREL 2007b: 4; [d] DaimlerChrysler 2006

Aus Gründen der Übersichtlichkeit beschränken wir uns aber im Folgenden vor allem auf die Darstellung des bisher größten Busprojektes. Hierbei handelt es sich um das CUTE-Projekt (Clean Urban Transport for Europe), bei dem insgesamt 27 Citaro Brennstoffzellenbusse in neun europäischen Städten unterwegs waren (CUTE 2006b: 4). Die Busse liefen von Mai 2003 bis Dezember 2005 (CUTE 2006a: 15).

Parallel dazu fanden assoziierte Projekte in Australien und Island statt. Im australischen Perth liefen drei Citaros im Rahmen des STEP-Projektes (Sustainable Transport Energy Project) (DPI 2007). In der isländischen Hauptstadt Reykjavik waren während des ECTOS-Projektes (Ecological City TranspOrt System) ebenso drei Citaros im Einsatz (ECTOS 2007). Etwas später wurden drei weitere Citaros in China in Betrieb genommen. Der Einsatz der Busse begann Ende 2005 in Peking und ist bis Oktober 2007 befristet (Energieportal24 2005a).

Das CUTE-Projekt wurde im Jahr 2000 von den Verkehrsgesellschaften der Städte Amsterdam, Barcelona, Hamburg, London, Luxemburg, Madrid, Porto, Reykjavik, Stockholm und Stuttgart in Zusammenarbeit mit den Unternehmen BP, Norsk Hydro, Shell, Vattenfall und Daimler gegründet. Im Jahr 2001 entschloss sich die Europäische Kommission dazu, CUTE finanziell zu fördern. Das Ziel des Projektes war die öffentliche Demonstration eines emissionsfreien Verkehrssystems mit geringer Lärmbelastung. Dem einbegriffen war die Vorführung einer Wasserstoff-Produktions- und Betankungs-Infrastruktur (CUTE 2006a: 3).

Die Kosten des gesamten Projekts wurden im Voraus auf 52,5 Mio. EUR berechnet. Sie resultierten vor allem aus dem Aufbau der Wasserstoff-Infrastruktur, der Errichtung der Betriebsanlagen für die Busse und letztendlich natürlich auch aus der Herstellung der Busse selbst. Jede teilnehmende Stadt musste somit zwischen 4 und 6 Mio. EUR aufbringen. Die Städte wurden dabei allerdings mit nationalen und lokalen Fördergeldern unterstützt. Außerdem bezuschusste die Europäische Kommission das Projekt mit 18,5 Mio. EUR. Die tatsächlich anfallenden Kosten übertrafen die zuvor berechnete Summe. Zusammen mit dem ECTOS-Projekt kostete CUTE mehr als 100 Mio. EUR (CUTE 2006a: 24, 25).

Von den insgesamt 27 Bussen des Projektes liefen jeweils drei in den teilnehmenden Städten. Sie wurden so unter denkbar verschiedenen klimatischen und topologischen Bedingungen getestet (DaimlerChrysler 2006). Die Zulassung wurde ihnen vom Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) in Deutschland gewährt. Die anderen Länder akzeptierten diesen Bescheid ohne Einschränkungen (CUTE 2006a: 51).

Innerhalb des ungefähr zweijährigen Einsatzes legten die Busse eine Strecke von insgesamt 865.000 km zurück und verbrauchten mehr als 192.000 kg Wasserstoff. Der Betrieb in den einzelnen Städten reichte von 37.655 km in Barcelona bis 142.068 km in Luxemburg (ebd.: 5, 6). Pro Monat legten sie im Durchschnitt in allen neun Städten 38.500 km zurück (CUTE 2006b: 64). Insgesamt waren die Busse damit 64.000 Stunden im Einsatz (CUTE 2006a: 5, 6). Pro Monat waren sie im Durchschnitt 2.680 Stunden im Betrieb.

Sowohl bei den zurückgelegten Strecken, als auch bei der absolvierten Betriebszeit steigerten sich die Busse im Verlauf des Projektes erheblich. Während sie zu Beginn weniger als 20.000 km, bzw. zwischen 1.200 bis 1.500 Stunden pro Monat unterwegs waren, erhöhte sich dies gegen Ende des Projektes auf 48.000 km, bzw. ungefähr 3.340 Stunden pro Monat (CUTE 2006b: 64, 65). Über das gesamte Projekt war die Durchschnittsgeschwindigkeit in den einzelnen Städten sehr unterschiedlich. Sie lag zwischen 9 bis 10 km/h in Stockholm und Porto und 18 km/h in Amsterdam und Luxemburg (ebd.: 67).

Die Brennstoffzellenbusse liefen bei Temperaturen von -16 bis 39 Grad. Die Luftfeuchtigkeit variierte zwischen 13% und 100%. Dabei hatten lediglich Temperaturen unter 0 oder über 18 Grad Einfluss auf den Verbrauch der Busse. Dies wurde durch das notwendige Beheizen bzw. Kühlen des Innenraums bedingt, da die Energie hierfür von den Brennstoffzellen geliefert wurde. Die Busse waren bei Höhenunterschieden von 150 m und einer Steigung von bis zu 8,5% im Einsatz. Unterschiede im Verbrauch konnten dabei nicht festgestellt

werden, was allerdings auf unterschiedliches Fahrverhalten und unterschiedliche Fahrgastanzahlen zurückgeführt wird. Generell wurde festgehalten, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit und die Fahrgastanzahl den größten Einfluss auf den Verbrauch hatten (CUTE 2006a: 57).

Der durchschnittliche Verbrauch der Brennstoffzellenbusse betrug 20-30 kg Wasserstoff auf 100 km und war damit höher als der eines vergleichbaren Dieselbusses. 20-30 kg Wasserstoff entsprechen einem Verbrauch von 65-100 l Diesel auf 100 km. Ein 12 m langer Dieselbus verbraucht 45-60 l/100 km. Allerdings schätzt man das zukünftige Potenzial der Verringerung des Verbrauchs bei den Brennstoffzellenbussen sehr hoch ein. Der hohe Verbrauch wurde unter anderem durch die Konstruktion des Antriebssystems verschuldet (ebd.: 57, 58). Dieses war mehr auf Zuverlässigkeit als auf Sparsamkeit angelegt (ebd.: 70).

So lieferte die Brennstoffzelle kontinuierlich ein Minimum an Energie, was dazu führte, dass der Bus im Leerlauf oder bei Bremsvorgängen einen vergleichweise hohen Verbrauch hatte (ebd.: 58, 58). Im Leerlauf beispielsweise leistete die Brennstoffzelle 40 kW. Ein vergleichbarer Diesel-Motor leistet im Leerlauf lediglich 4 kW (VDL 2007). Die Ergebnisse aus Simulationen zeigen aber, dass der Gesamtverbrauch auf einer innerstädtischen Linie in Stockholm um mehr als 15% gesenkt werden könnte, wenn die konstante Energiezufuhr abgestellt wird (CUTE 2006a: 57, 58). Dies wird nun im HyFLEET: CUTE Projekt durch die Entwicklung eines hybridisierten Prototypen angestrebt.

In den Bussen wurden Polymer-Membran-Brennstoffzellen (PEFC) verwendet (CUTE 2006b: 9). Vor dem Projekt ging man dabei von einer Lebensdauer der Stacks von maximal 1.000 Betriebsstunden aus. Mehrere Stacks absolvierten aber zwischen 2.500 und 3.000 Betriebsstunden und gewährleisteten dennoch einen einwandfreien Betrieb (DaimlerChrysler 2006). Die längste Lebensdauer eines Stacks betrug 3.200 Betriebsstunden (CUTE 2006a: 6). Insgesamt traten keine größeren brennstoffzellenbedingten Betriebsausfälle auf und die Busse waren zuverlässiger als erwartet (ebd.: 53).

Für die Betankung der Busse wurden in allen neun Städten Tankstellen errichtet, die täglich zwischen 100 und 200 kg Wasserstoff lieferten. Dieser wurde entweder zentral hergestellt und mit Lkw an die Tankstellen geliefert, oder er wurde direkt vor Ort durch Erdgas-Reformer oder Wasserelektrolyse produziert (CUTE 2006b: 5). Die Kosten für die örtliche Herstellung des Wasserstoffs betrugen zwischen 5 und 9 EUR/kg bei der Wasserelektrolyse und zwischen 7 und 10 EUR/kg bei der Verwendung der Erdgas-Reformer (CUTE 2006a: 44). Mehr als 120.000 kg Wasserstoff wurden örtlich produziert, 56% davon durch erneuerbare Energien (ebd.: 40). Für die gesamte Wasserstoffzufuhr wurden 40% erneuerbare Energien verwendet (ebd.: 7).

Insgesamt waren die Kosten der Wasserstoffproduktion sehr stark von regionalen Bedingungen, wie den Energiekosten und dem Energieverbrauch, abhängig (ebd.: 44). Daher kann auf Basis der Ergebnisse auch keine generelle Empfehlung für eine Produktionsvariante ausgesprochen werden (ebd.: 46). Die Zuverlässigkeitsrate der Busse und der Infrastruktur betrug 80% (ebd.: 5). Probleme traten dabei eher im Bereich der Infrastruktur auf, denn die Zuverlässigekteit der Busse lag sogar bei 90% (ebd.: 9). Während des gesamten Projekts trat kein einziger wasserstoffbedingter Unfall auf (CUTE 2006b: 5).

Allerdings verursachte unreiner Wasserstoff, der die Tanks der Busse kontaminierte, einen monatelangen Betriebsausfall in Barcelona. Deshalb soll in zukünftigen Projekten der Effekt von unreinem Wasserstoff minimiert werden (CUTE 2006a: 58). Zusätzlich zeigte sich, dass der Verdichter und der Tankanschluss weiterer Entwicklung bedürfen. Außerdem wurde ersichtlich, dass die vergleichweise kleinen Dampf-Reformer, die bei der Wasserstoffherstellung vor Ort genutzt wurden, weiter verbessert werden müssen. Bei dem ebenfalls örtlichen Elektrolyseverfahren, oder auch bei der tankstellenfernen Wasserstoffproduktion mit großen Dampf-Reformern traten keine Probleme auf (ebd.: 6).

Die Energieeffizienz der Wasserstoffherstellung war während des gesamten Projekts eher gering. Dies beeinträchtigte letztendlich auch die Umweltfreundlichkeit der Brennstoffzellenbusse, welche während des Betriebs selbst natürlich keine Schadstoffe emeritieren. Gleichzeitig zeigt dies die Wichtigkeit der Verwendung erneuerbarer Energien bei der Wasserstoffproduktion. Die Ziele den Wasserstoffpreis auf 2,5 bis 3 EUR/kg zu reduzieren, konnten mit der verwendeten Technologie nicht erreicht werden (ebd.: 7).

Die Mechaniker wurden für den Umgang mit den Brennstoffzellenbussen geschult. Sie kamen mit der neuen Technologie ohne größere Schwierigkeiten zurecht. Auch die über 4 Mio. beförderten Fahrgäste zeigten sich begeistert. Die Fahrer konnten die Busse problemlos bedienen (ebd.: 18). Eine Umfrage unter den Fahrern in Hamburg, London, Luxemburg und Stockholm ergab, dass die meisten Eigenschaften der Brennstoffzellenbusse als ebenso gut oder sogar besser als die von gewöhnlichen Bussen bewertet wurden. Lediglich bei der Beschleunigung sah die Mehrheit Nachteile. Dies wurde auf das hohe Gewicht der Busse zurückgeführt. Bei den Bremsen und der Geschwindigkeit sah ungefähr ein Drittel gewöhnliche Busse im Vorteil. Beides sollte bei zukünftigen Brennstoffzellenbussen verbessert werden (CUTE 2006b: 65, 66).

Die Erfahrungen aus dem Projekt zeigen, dass vor einem flächendeckenden Einsatz von wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenbussen weiterer technischer Fortschritt erforderlich ist. Vor allem aber müssen sowohl die Brennstoffzellenbusse als auch die Wasserstoffproduktion kosteneffizienter werden. Verbesserungswürdig sind ebenso die Energiedichte der Brennstoffzellen und das Wasserstofflagersystem, das noch zu komplex und zu teuer ist. Außerdem muss der komplette Antriebsstrang der Brennstoffzellenbusse weiter verbessert werden, besonders im Hinblick auf die elektrischen Komponenten, wie den Elektromotor und das Batteriesystem (CUTE 2006a: 7). Zugleich muss das Gewicht der Busse reduziert werden und die Lebensdauer der Brennstoffzellen muss sich erhöhen (ebd.: 70).

Letztendlich kam man zu dem Ergebnis, dass die neue Technologie innerhalb der nächsten fünf Jahre noch keine Marktreife erlangen wird. Um diesen Prozess aber generell zu beschleunigen, bedarf es vor allem stärkerem politischen Engagement und einer größeren Nachfrage der Verkehrsbetriebe nach den neuen Bussen (ebd.: 7). Um die unterschiedlichen weltweiten Brennstoffzellenbusse vergleichbar zu machen, wurde während des Projektes die Entwicklung von internationalen Standards bei der Zulassung der Busse angeregt (ebd.: 70).

Das CUTE-Projekt ist als großer Erfolg beurteilt worden und die Brennstoffzellen-Antriebe haben ihr technisches Potential unter Alltagsbedingungen nachweisen können. Aufgrund dieses Erfolges wurde direkt im Anschluss das Folgeprojekt HyFLEET: CUTE initiiert. Der Betrieb der bereits verwendeten Busse wurde fortgesetzt, um weitere Erfahrungen zu sammeln. Auf Basis dieser Ergebnisse soll der oben beschriebene Prototyp entwickelt werden, der leiser, leichter und energieeffizienter als die bisherigen Brennstoffzellenbusse sein soll (CUTE 2006b: 103).

Die Citaro Brennstoffzellenbusse wurden auch in Australien (Perth) und Asien (Peking) eingesetzt. In Nordamerika wurden sie bisher nicht verwendet, was allerdings nicht heißt, dass dort keine Versuche mit Brennstoffzellenbussen unternommen wurden. Ende September 2007 erschien ein Bericht des National Renewable Energy Laboratory (NREL), der die bisherigen Projekte mit Brennstoffzellenbussen in den USA zusammenfasst. Im Folgenden werden einige Auszüge aus dem Bericht dargestellt.

Insgesamt 20 Brennstoffzellenbusse kamen bislang in den USA zum Einsatz. Zehn davon befinden sich zurzeit noch im Betrieb, 15 weitere Busse sollen innerhalb der nächsten vier Jahre zum Einsatz kommen. Die Projekte mit Brennstoffzellenbussen werden in den USA unter anderem von der Federal Transit Administration (FTA) gefördert. Im Rahmen des National Fuel Cell Bus Program (NFCBP) will diese zwischen 2006 und 2009 acht verschie-

dene Felderprobungen von Brennstoffzellenbussen mit insgesamt 49 Mio. US-Dollar (3.410.028 EUR) fördern (NREL 2007b: 8).

Drei von der FTA geförderte und von NREL evaluierte Felderprobungen werden im Folgenden genauer betrachtet. Sie finden in den Städten San Jose, Thousand Palms und Oakland statt. Alle drei Einsatzorte liegen im Bundesstaat Kalifornien, der in den USA eine Vorreiterrolle im Bereich der Schadstoffreduktion von Verkehrsmitteln einnimmt. Während in San Jose und Oakland drei Busse im Einsatz sind, ist in Thousand Palms nur einer im Betrieb. Alle drei Projekte haben eine Laufzeit von zwei Jahren. In Thousand Palms läuft die Felderprobung bis Dezember 2007, in Oakland bis März 2008. In San Jose wurde die Untersuchung im Juli 2006 abgeschlossen, die drei Brennstoffzellenbusse befinden sich aber weiterhin im Einsatz (NREL 2007b: 13, 14).

In San Jose und Thousand Palms wurden für den Einsatz der Busse neue Betriebshöfe errichtet. Die komplette Anlage, samt Tankstelle und Waschstation, kostete in San Jose 4,4 Mio. US-Dollar (3.062.065 EUR). Der neue Betriebshof in Thousand Palms war im Wesentlichen ein Zelt und kostete 50.000 US-Dollar (34.796 EUR). In Oakland wurde ein schon vorhandener Betriebshof umgebaut, was insgesamt 1,5 Mio. US-Dollar (1.043.886 EUR) in Anspruch nahm. In San Jose wurde die Tankstelle von Lkw mit Wasserstoff beliefert, während in Thousand Palms und Oakland der Wasserstoff vor Ort durch einen Erdgas-Reformer erzeugt wurde (ebd.: 14-16).

Bei allen Bussen handelt es sich um 12 m lange Niederflurmodelle (ebd.: 18), welche von den beiden amerikanischen Busherstellern Gillig und Van Hool produziert werden.

Die drei Busse in San Jose wurden von Gillig gebaut und von Ballard mit zwei Brennstoffzellen-Modulen ausgestattet. Jedes Modul hat eine Nennleistung von 150 kW, so dass die Gesamtleistung des Antriebs 300 kW beträgt. Die Busse haben ein Leergewicht von 15.468 kg und bieten insgesamt ungefähr 44 Fahrgästen Platz. Sie verfügen über eine Tankkapazität von 55 kg und kosten jeweils 3,5 Mio. US-Dollar (2.435.734 EUR) (ebd.: 17, 18).

In Thousand Palms und Oakland wurden die Busse von Van Hool gebaut und von UTC Power mit einem 120kW-Brennstoffzellensystem ausgestattet. Zusätzlich erfolgte durch ISE Corporations eine Hybridisierung zur Bremsenergierückgewinnung. Als Energiespeicher wurden 53 KWh Natrium-Nickel-Chlorid-Batterien eingebaut. Die Busse verfügen über zwei konstant laufende Elektromotoren mit einer Gesamtleistung von 170 kW. Sie bieten insgesamt 47 Personen Platz und haben eine Tankkapazität von 50 kg. Ihr Leergewicht beträgt 16.329 kg und der Kaufpreis liegt zwischen 3,1 und 3,2 Mio. US Dollar (ca. 2.2 Mio. EUR) (ebd.: 17, 18).

Die Busse in San Jose befanden sich zum Zeitpunkt der Datenerhebung bereits seit 32 Monaten im Einsatz und haben eine Strecke von 105.620 Kilometern zurückgelegt. Sie hatten dabei eine Durchschnittsgeschwindigkeit von etwas mehr als 18 km/h. Der Bus in Thousand Palms lief seit 18 Monaten und hat 59.554 Kilometer mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 21,1 km/h absolviert. Die Busse in Oakland haben mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 18,2 km/h in 15 Monaten 76.935 Kilometer zurückgelegt (ebd.: 18).

Die Angaben bezüglich der Verfügbarkeit der Busse beziehen sich auf einen etwas kürzeren Untersuchungszeitraum. Als Richtwert dienen hier vergleichbare Diesel- oder CNG-Busse, die zwischen 6.437,4 und 8.046,7 Kilometer pro Monat laufen und eine Verfügbarkeitsrate von mindestens 85% haben. Die Busse in San Jose legten in 17 Monaten 65.064 Kilometer zurück. Pro Monat absolvierten sie 1.276,2 Kilometer und waren in 58% der geforderten Fälle verfügbar. Sie verbrauchten insgesamt 14.024 kg Wasserstoff. Pro Betankungsvorgang wurden ihnen 30,9 kg Wasserstoff mit einer durchschnittlichen Tankgeschwindigkeit von 1,93 kg pro Minute zugeführt. Ein Tankvorgang dauerte somit im Durchschnitt 16 Minuten (ebd.: 19, 20).

Der Bus in Thousand Palms fuhr in 11 Monaten eine Strecke von 30.912 Kilometern. Im Durchschnitt legte er pro Monat 2.809,9 Kilometer zurück und wies eine Verfügbarkeitsrate

von 61% auf. Insgesamt verbrauchte der Bus 2.649 kg Wasserstoff. Im Durchschnitt wurden ihm bei einem Tankvorgang 21,8 kg Wasserstoff zugeführt, was 20 Minuten in Anspruch nahm. Die durchschnittliche Tankgeschwindigkeit war zum Zeitpunkt der Datenerhebung nicht verfügbar (ebd.: 19, 20).

In Oakland fuhren die drei Busse 43.557 Kilometer in 8 Monaten. Pro Monat absolvierten sie 1.815,3 Kilometer und hatten eine Verfügbarkeitsrate von 77%. Insgesamt verbrauchten sie in den acht untersuchten Monaten 4.693 kg Wasserstoff. Pro Tankvorgang bekamen sie im Durchschnitt 21,8 kg Wasserstoff zugeführt, was bei einer Tankgeschwindigkeit von 1,35 kg pro Minute insgesamt 16 Minuten dauerte (ebd.:19, 20)

Die Verbrauchswerte der Brennstoffzellenbusse wurden in Dieseläquivalent-Verbrauchsangaben umgerechnet. Dabei zeigten sich, bedingt durch die Hybridisierung, beträchtliche Unterschiede zwischen den beiden Brennstoffzellenbussen. Die nicht-hybridisierten Brennstoffzellenbusse in San Jose verbrauchten 66,8 l/100 km Dieseläquivalent und hatten damit einen um 12% höheren Verbrauch als vergleichbare Dieselbusse mit 59,1 l/100 km. Der hybridisierte Brennstoffzellenbus in Thousand Palms benötigte lediglich 28,4 l/100 km und war damit um 149% sparsamer als vergleichbare CNG-Busse mit 70,9 l/100 km. In Oakland hatten die hybridisierten Brennstoffzellenbusse einen Verbrauch von 35,3 l/100 km und waren um 67% effizienter als vergleichbare Dieselbusse mit 58,8 l/100 km (ebd.: 19, 20 (Alle Werte umgerechnet von mpg auf l/100 km).

Bei dem Vergleich der Zuverlässigkeit der Brennstoffzellenbusse wurden nur antriebsbedingte Betriebsausfälle beachtet. In San Jose fuhren die Busse 1.479 Kilometer ohne einen antriebsbedingten Betriebsausfall. Der Bus in Thousand Palms schaffte 1.819 Kilometer und die Busse in Oakland 1.980 Kilometer. Vergleichbare Diesel- oder CNG-Busse absolvieren ungefähr 18.520 Kilometer ohne einen abtriebsbedingten Betriebsausfall (ebd.: 20).

Die Brennstoffzellenbusse sind, aufgrund der Wasserstoff-Tanks in ihrem Dach, um ungefähr 0,61 m höher als vergleichbare Dieselbusse. Dies muss beim Einsatz in bereits bestehender Infrastruktur berücksichtigt werden. Auf einigen Strecken kam es durch niedrig hängende Äste zu Problemen. Zudem berichteten einige Fahrer über Unterschiede beim Fahrverhalten im Vergleich zu Dieselbussen (ebd.: 24).

Bei den geschilderten drei Felderprobungen handelt es sich, außer in San Jose, um vorläufige Evaluationsergebnisse. Die Projekte in Oakland und Thousand Palms sind noch nicht abgeschlossen und über anschließende Erprobungen ist noch nichts bekannt. In San Jose ist der Betrieb des Brennstoffzellenbusses, auch nach dem Abschluss der Felderprobung beibehalten worden.

Für zukünftige Flottenversuche hat man sich in den USA vor allem das Ziel gesetzt, die Kosten sowohl für die Brennstoffzellenbusse, als auch für die notwendige Infrastruktur erheblich zu senken. Zudem soll die Zuverlässigkeit der Busse erhöht werden und weiteres Personal auf den Umgang mit den Bussen geschult werden. Die bisher vorhandene Datenmenge zu den Felderprobungen soll durch weitere Evaluation ergänzt werden (ebd.: 29).

Marktpotenzial

Die Perspektiven für Brennstoffzellenbusse sind auf längere Sicht als sehr gut zu beurteilen. In mehreren Ländern auf unterschiedlichen Kontinenten sind Bestellungen für Brennstoffzellenbusse aufgegeben worden, bzw. ist deren eigene Entwicklung geplant. Allerdings darf nicht übersehen werden, dass es sich dabei um Demonstrationsprojekte handelt. Brennstoffzellenbusse sind noch nicht serienreif. Das sollte vor allem auch bei Preisvergleichen beachtet werden. Der Kaufpreis eines Brennstoffzellenbusses wird gegenwärtig auf etwas über 3 Mio. US-Dollar (knapp 2,1 Mio. EUR) für die in den USA erprobten Hybrid-Brennstoffzellenbusse von VanHool/ISE (ebd.: 17, 18) und auf 1,25 Mio. EUR (Die Zeit 2003) für die

Cute-Busse beziffert. Damit liegen die Anschaffungskosten noch um ein mehrfaches über dem Kaufpreis eines vergleichbaren Dieselbusses aus. Diese vorläufigen Mehrkosten sind jedoch kein brennstoffzellenspezifisches Problem, sie sind lediglich auf die geringen Stückzahlen zurückzuführen. Erst in einer Serienproduktion greifen Skalierungseffekte und die Kosten werden nochmals deutlich sinken.

Dabei muss jedoch angemerkt werden, dass es sich bei den Brennstoffzellenbussen um Einzelproduktionen handelt. Sobald die Brennstoffzellenbusse serienreif sind und in weitaus größeren Stückzahlen produziert werden, wird sich ihr Kaufpreis auch beträchtlich senken. Einschätzungen zufolge könnte die Serienproduktion von Brennstoffzellenbussen bereits 2013 (SWR 2003), bzw. 2015 (Wasserstoffverband 2005) beginnen. Allerdings existieren hierzu unterschiedliche Prognosen und ein wirklich zuverlässiges Datum kann derzeit noch nicht genannt werden. Unabhängig von der Serienreife der Brennstoffzellenbusse hat sich die Federal Transit Administration in den USA zum Ziel gesetzt, den Kaufpreis eines Brennstoffzellenbusses bis 2012 auf das Fünffache eines gewöhnlichen Busses zu senken (NREL 2007b: 9).

Der genaue Zeitpunkt der Serienreife wird von dem Verlauf der zukünftigen Demonstrationsprojekte abhängen. Die bisherigen Felderprobungen haben gezeigt, welches große Potenzial, beispielsweise in der Reduktion von Emissionen, die neue Technologie birgt. Zugleich wurde aber ersichtlich, dass bis zur tatsächlichen Marktreife weiterer technischer Fortschritt erforderlich ist. Im Folgenden soll dargestellt werden, welche Erkenntnisse aus den bisherigen Erprobungen für die zukünftige Entwicklung gewonnen werden konnten, und welche weiteren Flottenversuche sich gegenwärtig in Planung befinden.

In dem an das CUTE-Projekt anschließendem Projekt HyFLEET: CUTE, wird der Betrieb der Brennstoffzellenbusse in den einzelnen bei CUTE teilnehmenden Städten, mit Ausnahme von Porto, Stockholm und Stuttgart fortgesetzt. Die Busse aus Stockholm und Stuttgart wurden für den weiteren Betrieb nach Hamburg überführt, wo somit insgesamt neun Brennstoffzellenbusse im Einsatz sind. Im Vergleich zum CUTE Projekt soll in HyFLEET: CUTE die Verfügbarkeit der Busse von acht auf 12 Stunden pro Tag ausgedehnt werden. Zudem sollen die Busse an mehr als fünf Tagen pro Woche im Einsatz sein. (DaimlerChrysler 2006). Konkrete Ziele des neuen Projektes sind es, die Lebensdauer der Brennstoffzellen auf 4.000 Stunden zu erhöhen, und den Verbrauch der Busse möglichst stark zu senken (GHBP 2007b). Dafür soll der auf den Seiten 98 und 99 beschriebene hybridisierte Prototyp entwickelt werden.

Ein hybridisierter Brennstoffzellenbus von MAN wurde bereits im Laufe des H2Argemuc ab 2004 auf dem Münchener Flughafen erprobt (Wasserstoffverband 2005). Verbrauchswerte zu diesem Bus sind allerdings nicht verfügbar. Auch in den USA befinden sich vier hybridisierte Brennstoffzellenbusse im Einsatz, welche im Abschnitt Felderprobungen bereits genauer beschrieben wurden. Durch die Hybridisierung konnte bei den US-Bussen eine beachtliche Kraftstoffersparnis erreicht werden.

Den nächsten großen Schritt auf dem Weg zur Serienreife sieht man in den USA in Felderprobungen mit insgesamt 50 bis 100 Bussen von verschiedenen Herstellern mit unterschiedlicheren Brennstoffzellensystemen. Hierfür müssten allerdings weit mehr als die bis 2009 vorgesehen 49 Mio. US-Dollar in die Entwicklung investiert werden (NREL 2007b: 30). Gegenwärtig ist geplant, 15 weitere Brennstoffzellenbusse innerhalb der nächsten vier Jahre zu erproben (ebd.: 8).

Bis 2012 hat sich die FTA konkrete Ziele in der weiteren Entwicklung im Bereich der Brennstoffzellenbusse gesetzt. Der Kaufpreis eines Brennstoffzellenbusses soll auf das Fünffache eines gewöhnlichen Busses gesenkt werden. Die Lebensdauer des Brennstoffzellensystems soll auf vier bis sechs Jahre, bzw. 20.000 bis 30.000 Stunden steigen. Den Verbrauch will man auf die Hälfte eines gewöhnlichen Busses senken. In Beschleunigung, Steigfähigkeit, Reichweite und Bremsweite sollen die Brennstoffzellenbusse mindestens so

gut abschneiden wie gewöhnliche Busse und dabei die Emissionsgrenzwerte für Busse im Jahr 2010 unterschreiten. Des Weiteren sollen die Wettbewerbsfähigkeit der Brennstoffzellenbusse und ihre öffentliche Akzeptanz gefördert werden (ebd.: 9).

Im Bundesstaat British Columbia in Kanada, wurde ein Auftrag zum Bau von 20 hybridisierten Brennstoffzellenbussen an New Flyer vergeben. Das gesamte Auftragsvolumen umfasst 46,4 Mio. kanadische Dollar (32.179.096 EUR). Die Hybridisierung wird von ISE Corporation durchgeführt, die Brennstoffzellen werden von Ballard installiert. Die Busse sollen eine Lebensdauer von 20 Jahren und eine Reichweite von 500 km erreichen. Sie sollen Ende 2009 ausgeliefert werden und in der Stadt Whistler zum Einsatz kommen. Geplant ist ebenfalls, sie während der Winterolympiade 2010 einzusetzen (Ministry of Transportation 2007).

In Peking wurden am 20 Juni 2006 drei Citaro Brennstoffzellenbusse in Betrieb genommen (Jingguang 2006: 7). Im Rahmen eines von der Global Environment Facility (GEF) der UN geförderten Projektes sollen zudem drei bis sechs weitere Brennstoffzellenbusse bis Oktober 2008 an Shanghai ausgeliefert werden. Dort ist geplant, sie bis zur Expo 2010 im Stadtverkehr einzusetzen (ebd.: 20, 21). Die GEF fördert weitere Projekte mit Brennstoffzellenbussen in Ägypten, Brasilien, Indien und Mexico (Cleanairnet 2007b).

Shanghai hat ehrgeizige Ziele: Die Stadt plant, bis zum Jahr 2010 über 1.000 Brennstoffzellenfahrzeuge zu verfügen. Bis zum Jahr 2012 sollen es sogar 10.000 sein (Hyweb 2006). Ob diese Zahlen wirklich realisiert werden, darf man jedoch bezweifeln. Allerdings wurde 2006 in Shanghai der erste chinesische Brennstoffzellenbus fertig gestellt (ebd.).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Zukunft der Brennstoffzellenbusse vom Erfolg der gegenwärtigen Flottenversuche abhängt. Je nachdem, welche weiteren Erkenntnisse gewonnen werden, wird auch die Serienproduktion der Brennstoffzellenbusse entweder näher, oder weiter in die Ferne rücken. Nur diese kann aber letztendlich den Kaufpreis der Busse so weit senken, dass sie gegenüber anderen Konfigurationen wirtschaftlich rentabel werden. Vom technischen Standpunkt aus sind die Busse bereits heute in vielen Bereichen so weit, dass sie bei gegebener Infrastruktur, Dieselbusse durchaus gleichwertig ersetzen können und verfügen über das Potenzial eines emissionsfreien öffentlichen Nahverkehrs. Zudem ging aus den Felderprobungen hervor, dass sie in hybridisierter Version sparsamer sind als vergleichbare Diesel- und CNG-Busse. Wenn also der Kaufpreis der Brennstoffzellenbusse in Zukunft beträchtlich sinken sollte, spricht vieles dafür, dass sie eine ökonomisch und ökologisch reizvolle Alternative zu den anderen Konfigurationen darstellen.

Beispielmodell für den Innovationsbereich 3: Georgetown University Methanol Fuel Cell Bus

An der Georgetown University im US-Bundesstaat Washington läuft bereits seit 1983 ein Forschungsprogramm zur Entwicklung von Brennstoffzellenbussen (Fuelcellbus 2007a). Es wird von dem Department of Energy, dem Department of Transportation, sowie der Federal Transit Administration finanziert (Fuelcellbus 2006b). Das besondere an dem Forschungsprogramm in Georgetown ist, dass hier die weltweit einzigen Brennstoffzellenbusse mit einem On-Board-Methanol-Reformer entwickelt werden. Die technischen Daten der Tabelle beziehen sich auf das 2001 hergestellte X1 Modell (Fuelcellbus 2007c).

Beispielmodell Fahrzeugkonfiguration $F_{5/11}$

Kennwerte		Georgetown University
Modell		Nova Bus[c]
Fahrzeug-Konfiguration		$F_{5/11}$
Brennstoffzelle	Hersteller	Ballard Mark 7[a]
	Maximale Stackleistung	115 kW[b]
	Nutzleistung	100 kW[a]
E-Motor	Typ	AC Induktion[a]
	Leistung [kW]	186,5 kW[a]
Batterie	Typ	Bleibatterie[a]
	Spannung	600 Volt[a]
Generator	Nennleistung [kW]	keine Angabe
Verbrauch	[l/100 km]	keine Angabe
Tankinhalt	Methanol [Liter]	586 (150 Gallonen) [a]
Beschleunigung	0-30 mph/h [sec]	14,5[c]
Beschleunigung	0-50 mph/h [sec]	45,5[c]
Elastizität	80-100 km/h, 6. Gang [sec]	keine Angabe
Reichweite	[km]	560[d]
Gesamtgewicht	[kg]	17.917
Maße	Länge [m]	12[d]
	Breite [m]	keine Angabe
	Höhe [m]	keine Angabe
Emissionen	Schadstoffklasse	keine Angabe
Kapazität	Sitzplätze	keine Angabe
	Stehplätze	keine Angabe
	Gesamt	40[a]
Preis	[EUR] ohne MwSt.	keine Angabe

Abbildung 61, Quelle: eigene Darstellung; [a] Fuelcellbus 2006a; [b] Fuelcellbus 2007b; [c] Fuelcellbus 2007c; [d] H2Cars 2007

Der X1 ist ein Modell der zweiten Generation. Die Busse der ersten Generation wurden 1994 und 1995 gebaut (Fuelcellbus 2007a). Sie sind die weltweit ersten Brennstoffzellenbusse mit Methanol-Reformer und können direkt Methanol tanken (DOE 2007: 3). Es handelt sich um drei Demonstrationsbusse, die jeweils eine Länge von 9 m hatten. Sie wurden von einer 50 kW Phosporsäure-Brennstoffzelle (PAFC) und einer 40 kW Nickel-Kadmium-Batterie angetrieben (Fuelcellbus 2006b).

Die Busse der zweiten Generation basieren auf den Erfahrungen mit den Modellen aus der ersten Generation. Es handelt sich um zwei 12 m lange Busse, deren Antriebssystem in ein Busgehäuse der Firma Nova Bus integriert wurde. Die beiden Busse unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Brennstoffzellen und Batterien. Der erste wurde 1998 gebaut und mit einer Phosphorsäure-Brennstoffzelle von UTC, sowie einer 50 kW Bleibatterie ausgestattet. Bei dem zweiten Bus handelt es sich um den 2001 angefertigten und in Abbildung 61 ausführlich vorgestellten Bus. Er verfügt über eine Polymer-Membran-Brennstoffzelle (PEFC) von Ballard und eine 30 kW Bleibatterie. Die Nutzleistung der Brennstoffzellen liegt in beiden Bussen bei 100 kW und das Gewicht bei 1.814,4 kg. Sie unterscheiden sich aber erheblich in ihrer Größe. Die Brennstoffzelle von UTC misst 6,09 m³, während die von Ballard nur

4,25 m³ in Anspruch nimmt. Bei beiden Bussen wurde der Antriebsstrang von BAE Systems hybridisiert (ebd.: 2).

Die Entwicklung der dritten Generation an Brennstoffzellenbussen mit On-Board-Methanol-Reformer begann im Jahr 2006. Die Georgetown University arbeitet hier mit NuCellSys, einem Joint Venture von Daimler und Ford, dem EPRI (Electric Power Research Institute), einem Institut für Energie- und Umweltforschung, und dem ZSW (Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung) in Baden-Württemberg zusammen. Das Antriebssystem der neuen Busse soll im Jahr 2008 fertig gestellt werden. Es baut auf den Erfahrungen mit den bisherigen Modellen auf. Geplant ist eine Polymer-Membran-Brennstoffzelle (PEFC) mit 60 kW. Damit wäre ihre Leistung zwar niedriger als in den bisherigen Modellen, dafür aber sollen das Gewicht und der Umfang der Brennstoffzelle erheblich reduziert werden. Das neue Brennstoffzellensystem soll noch lediglich 454 kg wiegen und eine Größe von 0,57 m³ haben (ebd.: 2).

Bei allen an der Georgetown University gebauten Bussen handelt es sich um Demonstrationsobjekte. Sie werden zwar öffentlich erprobt, ausführliche Evaluationen sind aber noch nicht verfügbar. Daher wurde auf eine Beschreibung von Felderprobungen und Marktpotenzialen für diesen Bustyp verzichtet.

5. Fazit: Bilanz und Agenda

In der vorliegenden Arbeit wurde der Versuch unternommen, die Rolle von Bussen als Wegbereiter für frühe Märkte antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen aus einer interdisziplinären Perspektive zu systematisieren und zu analysieren. Dabei war die Analyse auf drei Ziele fokussiert, und zwar erstens, die Entwicklung eines theoretischen Modells für frühe Märkte (Kapitel 1), zweitens, eine Spezifizierung dieses Modells für Omnibusse (Kapitel 2 und 3) und drittens schließlich eine detaillierte empirische Untersuchung antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen bei Omnibussen auf der Basis dieser Modelle (Kapitel 4).

Das Fazit dieser Analyse wird nun in diesem abschließenden Kapitel in zwei Schritten gezogen: In einem ersten Schritt werden zunächst die Hauptergebnisse der Untersuchung in komprimierter Form bilanziert. Ausgehend davon wird dann in einem zweiten Schritt eine stichpunktartige Agenda für weiterführende Modellbildungen für frühe Märkte skizziert.

Bilanz

Das Automobil ist mit Abstand der Verkehrsträger Nummer 1. Doch das Auto ist weit mehr als ein bloßes Fortbewegungsmittel. Es ist paradigmatisches Produkt und integraler Bestandteil der fossilen Mobilitätsgesellschaft. Das Automobil gilt als Symbol für Status, Wohlstand, (Bewegungs-)Freiheit, Dynamik und Fortschritt der Moderne.

Alle Versuche, die Dominanz des Automobils zu brechen, sind bislang mehr oder weniger gescheitert. Einer der Gründe für diese Ultrastabilität des Automobils liegt in dessen hartem technischen Kern. Dieser besteht in einem Verbrennungsmotor, der zunächst fossile Brennstoffe, vor allem Öl, aus der Natur importiert und dann Schadstoffe und Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Distickstoffoxid (N_20) in die Natur exportiert.

Der Verbrennungsmotor stellt bis heute die Konvention in der automobilen Antriebstechnik schlechthin dar. Im Jahre 2000 befanden sich rund 800 Mio. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren weltweit im Einsatz, bis 2030 werden sogar 1,6 Mrd. Fahrzeuge prognostiziert (Schubert 2003: 2). Die F&E-Arbeit der Automobilindustrie ist nach wie vor auf die Optimierung dieser Konvention fokussiert. Diese permanente Verbesserung und Stabilisierung des konventionellen Verbrennungsmotors führt zu einem Konventionssog, der alle Innovationsprozesse in der Automobilindustrie dominiert.

Aus innovationstheoretischer Perspektive handelt es sich hierbei um eine Hyperselektion: Der fossile Verbrennungsmotor bildet den herrschenden Stand der automobilen Technik. Er dominiert die antriebs- und kraftstofftechnologischen Innovationsprozesse. Seine Optimierung stabilisiert und verstärkt diese Dominanz, was wiederum dazu führt, dass alle anderen vorhandenen und potenziellen Alternativtechnologien im Keim erstickt, blockiert oder verzögert werden. Es entsteht ein sich selbst verstärkender Konventionssog.

Diese Hyperselektion der konventionellen Verbrennungsmotorik wird jedoch zunehmend problematisch und gerät in wachsendem Maße unter Innovationsdruck. Dieser Druck erwächst zunächst aus drei Problemfeldern, und zwar der Verfügbarkeit und dem Preis fossiler Brennstoffe, der gesellschaftlichen Bedeutung des Automobils sowie den Schadstoffemissionen und deren Folgen. Die Entwicklungen in diesen drei Problemfeldern führten in Europa und den USA, speziell in Kalifornien zu innovationsfördernden gesetzlichen Regelungen und Normierungen, die eine antriebs- und kraftstofftechnologische Substitution der konventionellen Verbrennungsmotorik begünstigen und strategisch erzwingen können.

Der Innovationsdruck und die gesetzlichen Regelungen und Normierungen, in denen dieser Druck juristisch verarbeitet und verdichtet wurde, führten dazu, dass im letzten Jahrzehnt weltweit eine Vielzahl von Wegen beschritten wurden, um den fossilen Verbrennungsmotor

nicht nur zu optimieren, sondern auch zu substituieren. Dabei entstand ein breit gefächertes Feld antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen.

Dieser hyperselektive Innovations-Raum der Automobilität kann als eine Attraktor-Landschaft vorgestellt und modelliert werden. Bei einem Attraktor handelt es sich um einen spezifischen Zustand eines Systems, auf den alle Veränderungen im System zulaufen. Bildlich gesprochen zieht ein Attraktor gewissermaßen alle in seiner Nähe liegenden Prozesse an und hält sie gefangen. Er saugt wie ein Malstrom alle Ressourcen seiner Umgebung in sich auf und entwickelt dadurch eine immer größere Anziehungskraft. Ausgehend davon lässt sich der automobile Innovations-Raum als eine Landschaft interpretieren, in der die Gipfel oder Berge Attraktoren darstellen. Dabei sind dann hohe Berge starke und niedrige Berge schwache Attraktoren. Aus einer solchen Sicht ist im hyperselektiven Innovations-Raum der Automobilität der konventionelle Verbrennungsmotor der alles überragende und die gesamte Landschaft beherrschende Gipfel.

Angesichts dieser alles überragenden Stellung des hyperselektiven Verbrennungsmotors stellt sich die Frage, ob die neuen »Innovations-Berge« überhaupt eine Chance haben, das konventionelle »Innovations-Massiv« des fossilen Verbrennungsmotors zu verdrängen, und wenn ja, wie dies geschehen kann? Eine zentrale Rolle bei der Beantwortung dieser Frage spielen »Nischen« und »frühe Märkte«.

Nischen bieten alternativen Technologien eine Art Schutz- und Entwicklungsraum, der sie vor der (Über-)Macht einer sich ständig optimierenden hyperselektiven Konvention bewahrt, weil deren Dominanz dort neutralisiert wird. Entscheidend für die Überlebenschance der Alternative sind die Bedingungen, unter welchen der hyperselektive Attraktor K und der alternative Attraktor A in Konkurrenz miteinander treten. Dabei sind zwei Bedingungen von zentraler Bedeutung, nämlich die Anfangsgrößen und die Wachstumsraten. Diese Parameter lassen sich wie folgt beschreiben:

Wenn N_k die Anfangsgröße der zum Attraktor K gehörenden Technologie und N_a die Anfangsgröße der zum Attraktor A gehörenden Technologie in der Attraktor-Landschaft sind, dann berechnet sich die Gesamtgröße N wie folgt:

$$N = N_k + N_a$$

Sind ferner W_k die Wachstumsrate des Attraktors K und W_a die Wachstumsrate des Attraktors A im Attraktor-Bassin, dann ist der Quotient der beiden Wachstumsraten:

$$Q = \frac{W_a}{W_k}$$

Ausgehend von diesem Ansatz lassen sich Nischen-Simulationen entwickeln, die sehr anschaulich deutlich machen, wie die Durchsetzungswahrscheinlichkeit D des Attraktor-Gebirges A von den Größen N, N_a und Q abhängt. Diese Simulationen basieren auf der Mastergleichung eines stochastischen Substitutionsmodells. Mit diesem Modell lassen sich unterschiedliche Wachstumsformen modellieren, wie beispielsweise lineares und quadratisches Wachstum oder ein Mix aus beiden. Für den Fall eines quadratischen Wachstums, den wir hier exemplarisch analysiert haben, ergab sich aus dem Mastergleichungsmodell folgende funktionale Abhängigkeit der Durchsetzungswahrscheinlichkeit D von N, N_a und Q:

$$D(N, N_a, Q) = \frac{1 + \sum_{i=1}^{Na-1} \left(\frac{1}{Q}\right)^i \times \binom{N-1}{i}}{\left(1 + \frac{1}{Q}\right)^{N-1}}$$

Die auf Basis dieser Gleichung durchgeführten Simulationen erbrachten, vereinfacht gesagt, folgende Ergebnisse:

Wenn ein neues Attraktor-Gebirge A in einer hyperselektiven Attraktor-Landschaft überhaupt eine Chance haben soll, sich gegenüber dem konventionellen und tendenziell übermächtigen Attraktor-Gebirge K zu behaupten und es langfristig zu verdrängen, dann besteht eine solche Chance nur, wenn der Bereich in dem beide Attraktoren aufeinandertreffen und die Lage des Systems in diesem Bereich speziellen Bedingungen genügen. Das Konkurrenzgebiet ist umso günstiger für A, je größer Q, je größer N_a und je kleiner N ist. Metaphorisch gesprochen entsteht dadurch ein vergleichsweise kleiner Wettbewerbsraum, in dem A und K auf gleicher Augenhöhe miteinander konkurrieren, weil K in diesem kleinen, eng begrenzten Raum nicht seine volle hyperselektive Macht entfalten kann, während A relativ stark gegenüber K ist. Ein solches Attraktor-Bassin wird als Nische bezeichnet.

Die Nischen-Simulationen ermöglichen es auch, Nischen und frühe Märkte voneinander zu unterscheiden. Beide hängen zwar sehr eng miteinander zusammen, sind aber nicht einfach identisch. Frühe Märkte erwachsen aus Nischen und sind ein bestimmtes Gebiet innerhalb derselben, und zwar jenes Gebiet, in dem die Durchsetzungswahrscheinlichkeit des alternativen Attraktors größer als 50% ist.

Je günstiger die Nischenbedingungen, je größer also Q, je größer N_a und je kleiner N sind, desto günstiger sind auch die Chancen für die Herausbildung früher Märkte. Sowohl die Spezifizierung des theoretischen Modells als auch die empirische Analyse der Busflottenversuche zeigten, dass solche günstigen Bedingungen durch systematische Mehrfach-Nischenbildungen erreicht werden können.

Zunächst bilden Busse eine Nische, und zwar eine Anwendungs-Nische. Omnibusse sind zwar nach dem Pkw das zweitwichtigste Beförderungsmittel, am gesamten Kraftfahrzeugbestand haben sie jedoch gerade einmal einen Anteil von 0,2%. In dieser Anwendungs-Nische gibt es weitere Nischen, die räumlich voneinander getrennt sind, denn die verschiedenen städtischen und regionalen Verkehrsunternehmen betreiben ihre Busflotten als unabhängige organisatorische Einheiten, die in einem räumlich begrenzten Territorium agieren. Insofern lassen sich diese Nischen in der (Anwendungs-)Nische als »Raum-Nische« bezeichnen. Innerhalb einer solchen Nische sind weitere Nischenbildungen denkbar, so beispielsweise eine weitere räumliche Segmentierung oder funktionale Segmentierungen wie etwa Shuttle-Verkehre oder Sightseeing-Tours. Solche Nischen wären dann Dreifach-Nischen, also Nischen in einer (Raum-)Nische, die sich wiederum in einer (Anwendungs-)Nische befindet.

Diese Bildung von Nischen in Nischen in Nischen … ist eine Strategie, die sowohl die Nischen-Simulationen nahe legen als auch die Innovatoren des Busverkehrs, die solche Strategien oft intuitiv entwickeln. Dass und wie in solchen Mehrfach-Nischen die oben genannten Durchsetzungsbedingungen für alternative Technologien (großes Q, großes N_a, kleines N) systematisch erzeugt werden, machen die folgenden zwei Beispiele geradezu paradigmatisch deutlich.

Das erste Beispiel ist die Verkehrsgesellschaft SunLine Transit, die ihren Hauptsitz in Thousand Palms in Kalifornien hat (Encyclopedia 2001). SunLine begann den Betrieb 1977 mit 22 Fahrzeugen und einem Liniennetz, das sich über 2.849 km² in der kalifornischen Coachella Valley erstreckt. 1992 beschloss SunLine seine komplette Dieselbusflotte gegen

CNG-Busse auszutauschen. Ziel war es, die führende Verkehrsgesellschaft in der Reduktion von Emissionen zu werden. Durch den vollständigen Umstieg auf eine neue Technologie, übersprang SunLine das vormarktliche Stadium und schuf direkt einen frühen Markt für CNG-Busse. Durch diesen Komplettaustausch wird W_k, die Wachstumsrate der konventionellen Technologie auf Null gesetzt und N ist gleich N_a. Die hyperselektive Konvention wird somit vollständig ausgeschaltet.

Möglich war dies nur auf Grund der vergleichsweise kleinen Busflotte. Bei einer großen Busflotte wird eine solche Umstellung eher stufenweise erfolgen müssen. Bedingt durch die Anwendungs-Nische des Busmarktes und die Raum-Nische der Verkehrsgesellschaft SunLine war in diesem Fall aber die Gesamtgröße N vergleichsweise klein und die neue Technologie konnte die Konvention auf einmal verdrängen. Dank der speziellen Eigenschaften einer Doppel-Nische konnte also die Übermacht einer hyperselektiven Konvention gebrochen werden.

Die Innovativität dieser Umstellung kann aus heutiger Sicht nicht hoch genug eingeschätzt werden. Schließlich befanden sich zum damaligen Zeitpunkt insgesamt lediglich 25 CNG-Busse in voller Größe in den USA im Betrieb und man hatte noch relativ wenig Erfahrung mit der neuen Technologie (NREL 2006c: vii). So wurde beispielsweise 1993 ein neues Schulungszentrum für den Umgang mit alternativen Kraftstoffen errichtet, um alle Mitarbeiter von SunLine auf den Betrieb mit den neuen Bussen vorzubereiten (ebd.).

1994 wurden dann die neuen CNG-Busse geliefert und SunLine war die erste Verkehrsgesellschaft in den USA, die über eine komplette CNG-Bus-Flotte verfügte. Die obligatorischen Anlaufschwierigkeiten konnten durch eine enge Zusammenarbeit mit dem Motorenhersteller und anderen Verkehrsgesellschaften, wie der Los Angeles County Metropolitan Transit Authority (ebd.: 4), schnell überwunden werden.

Insgesamt besitzt SunLine zurzeit über 46 CNG-Busse in voller Größe (SunLine 2007). Der Umstieg auf den Kraftstoff CNG wird als Erfolg beurteilt. Dementsprechend plant SunLine 2009 seine komplette Bus-Flotte wiederum durch neue CNG-Busse zu ersetzen (ebd.: ix). Dies verdeutlicht noch einmal, dass es sich hierbei um einen frühen Markt handelt. Denn obwohl mittlerweile die komplette Flotte aus CNG-Bussen besteht, müssen diese sich nach wie vor gegen die Konvention behaupten, um einen Wechsel zurück zu den Dieselbussen zu vermeiden. In Zukunft sind daher mehrere Szenarien vorstellbar. Zum einen könnten sich natürlich die CNG-Busse langfristig durchsetzten und SunLine bleibt weiter bei dem Betrieb seiner Busse durch Erdgas. Eine Rückkehr zu Diesel wäre allerdings auch möglich. Denkbar wäre aber ebenso die langsame Ablösung der CNG-Busse durch eine noch innovativere Konfiguration.

Ausgehend davon werden bei SunLine bereits weitere Antriebs- und Kraftstofftechnologien getestet. Die Verkehrsgesellschaft ist beispielsweise in einige Wasserstoff-Projekte involviert. 2001 wurde ein wasserstoffbetriebener Brennstoffzellenbus getestet. Von 2002 bis 2003 war ein weiterer Brennstoffzellenbus bei SunLine im Betrieb. Gleichzeitig werden Busse erprobt, die über ein Gemisch aus Wasserstoff und Erdgas angetrieben werden. Ziel ist es, die Stickstoffoxid-Emissionen der Busse weiter zu reduzieren und eine zuverlässige »Brücke« auf dem Weg zum reinen Wasserstoffantrieb zu testen (ebd.: ix).

Im Dezember 2004 wurde ein hybridisierter Wasserstoff-Bus mit Verbrennungsmotor in Betrieb genommen. Seit 2005 befindet sich auch ein hybridisierter Brennstoffzellenbus im Einsatz. SunLine äußerte zudem den Wunsch, weitere Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Busse zu testen, insofern die notwendigen Fördergelder bereitgestellt werden (NREL 2007a: 11).

Die Verkehrsgesellschaft kann als Vorreiter im Bereich der CNG-Busse in den USA angesehen werden. Unter den günstigen Anfangsbedingungen einer Doppel-Nische gelang es, einen frühen Markt für CNG-Busse zu schaffen. Dieses Beispiel strahlte aus und die Anzahl der mit LNG und CNG betriebenen Busse in den USA stieg von 25 im Jahre 1993 auf insgesamt 3.500 im Jahr 2000 (Cleanairnet 2007a). Diese Entwicklung wäre anders verlau-

fen, wenn die neue Technologie nicht die Möglichkeit gehabt hätte, sich im Schutze einer relativ kleinen Raum-Nische gegen die Dominanz einer hyperselektiven Konvention zu bewähren. In Thousand Palms wurde also für die CNG-Busse der Grundstein dafür gelegt, dass sie immer größere Gebiete der Attraktor-Landschaft des automobilen Innovations-Raums erobern konnten.

Das zweite Beispiel betrifft eine Dreifach-Nische, also eine Nische in der Nische in der Nische. Diese Nischenbildung gelang in Chattanooga, einer Stadt im Bundesstaat Tennessee in den USA, mit 153.431 Einwohnern (Smartcommunities 2007). Aufgrund einer hohen Automobildichte (ebd.) und viel Industrie war die Luftverschmutzung in der Stadt extrem hoch. 1969 wurde Chattanooga sogar die zweifelhafte Ehre zuteil, die Stadt mit der größten Russpartikelverschmutzung in den USA zu sein. Die Stadt reagierte und erließ ein Gesetz zur Reduktion der Luftverschmutzung durch die Industrie. Die Unternehmen hielten sich an die neuen Standards, was zu einer deutlichen Verbesserung der Luftqualität führte (Hess 2005: 1). Dennoch blieb das Problem der hohen Automobildichte und Chattanooga galt bis 1989 als eine der am meisten verschmutzten Städte der USA (USmayors 2007).

Um den Verkehr in der Innenstadt zu reduzieren, schlug die Verkehrsgesellschaft Chattanooga Area Regional Transport Authority (CARTA) vor, einen Shuttle-Bus-Service zwischen dem Süden und dem Norden des Stadtkerns zu errichten. An den beiden Endhaltestellen sollten sich Parkplätze befinden, damit man dort den Pkw stehen lassen und auf den Bus umsteigen kann. Um den Schadstoffausstoß zusätzlich zu senken, sollten emissionsfreie Batteriebusse auf dem Shuttle-Service eingesetzt werden (DOE 1997: 1-2). Dieser stellt damit eine dritte Nische in der Anwendungs- und der Raum-Nische dar. Die Gesamtgröße N, also das Attraktor-Bassin, in dem die zwei Attraktoren aufeinander treffen, wird dadurch immer kleiner. Die zusätzliche Nische wurde in diesem Fall über Subventionen realisiert.

15,7 Mio. US-Dollar der Federal Transit Administration, 2 Mio. US-Dollar der Tennessee Valley Authority und 2 Mio. US-Dollar des Tennessee Department of Transportation sorgten dafür, dass die Pläne in die Tat umgesetzt, und die Parkplätze, sowie die ersten Batteriebusse komplett über Fördergelder finanziert werden konnten (DOE 1997: 2-3). Zugleich wurde das private nicht-kommerzielle Electric Transit Vehicle Institute (ETVI) gegründet, das durch Forschungs- und Entwicklungsarbeit den Einsatz der neuen Technologie begleiten sollte (Smartcommunities 2007).

1992 wurden die ersten zwei Batteriebusse von einem Hersteller in Kalifornien an CARTA ausgeliefert. Noch im gleichen Jahr wurde der Bus-Hersteller Advanced Vehicle Systems (AVS) in Chattanooga ins Leben gerufen (Hess 2005: 1). Kurz darauf vergab CARTA einen Auftrag von 12 Batteriebussen an AVS, welche mit Unterstützung des kalifornischen Bus-Herstellers entwickelt wurden (DOE 1997: 3).

Trotz anfänglicher Probleme befinden sich die Batteriebusse in Chattanooga auch heute noch im Einsatz. Es ist sogar geplant, 2008 weitere Batteriebusse zu bestellen (Griffith 2007: 3). Insgesamt waren mittlerweile 25 Batteriebusse in Chattanooga im Betrieb. Das Projekt wird als großer Erfolg beurteilt (ebd.: 2-4). Die Busse trugen dazu bei, die allgemeine Nutzung des öffentlichen Busverkehrs zu steigern. Die Passagiere schätzten die geringe Lärmbelastung und das stabile Fahrverhalten im Vergleich zu gewöhnlichen Dieselbussen (ebd.: 7, 8).

Aus der Nische der Shuttle-Busse konnte also in Chattanooga ein früher Markt für Batteriebusse erwachsen. Diese mussten sich zwar immer noch unter Marktmechanismen gegen die Dieselbusse durchsetzten, aber eben nur innerhalb der Konditionen des Shuttle-Services. Die Hyperselektivität der Konvention wurde damit außer Kraft gesetzt und die neue Technologie konnte sich im Schutzraum einer Nische etablieren. Dabei weist dieser Schutzraum in Form des Shuttle-Services einige spezielle Eigenschaften auf, die für den Erfolg des Projektes von erheblicher Bedeutung sind. Dazu gehörten insbesondere die folgenden:

Die Batteriebusse unterlagen bei ihrem Einsatz relativ günstigen Bedingungen, denn Shuttle-Linien erfordern vergleichsweise kleine Reichweiten im Vergleich zu gewöhnlichen Stadtlinien (ebd.: 5). Der Shuttle-Service in Chattanooga bedient lediglich den Stadtkern, welcher sich über eine Länge von 3,2 km erstreckt (DOE 1997: 1). Zudem ist der Bereich der Innenstadt sehr flach, so dass die Busse keine großen Steigungen bewältigen müssen (Smartcommunities 2007).

1994 wurde für 4,2 Mio. US-Dollar ein neuer Betriebshof an der südlichen Endhaltestelle der Shuttle-Linien errichtet. Dieser beinhaltet 550 neue Parkplätze, eine Batterie-Austauschstation und Batterie-Aufladegeräte (DOE 1997: 4). Nachdem um sechs Uhr Morgens der Betrieb begonnen hat, kehren die Busse in der Mittagszeit in den Betriebshof zurück, und ihre entleerten Batterien werden gegen neue, aufgeladene ausgetauscht. Ein Batteriebus bewältigt damit im Durchschnitt pro Tag eine Strecke von 161 km (Hess 2005: 2).

Für den Erfolg des Projektes spricht auch die gestiegene Nutzung des öffentlichen Personennahverkehrs. Dies dürfte unter anderem daran liegen, dass der Shuttle-Service kostenlos angeboten wird. Der Betrieb der Busse wird ausschließlich durch die Einnahmen finanziert, die über die Parkplätze an den Endhaltestellen realisiert werden (DOE 1997: 1, 5).

Sowohl die kleinen Reichweiten und die geringen Steigungen in der Innenstadt, als auch das Betriebshof-Regime und die Finanzierung über die Parkplätze zeigen, wie durch die Schaffung einer Nische ein Schutzraum für neue Technologien entstehen kann. Die Batteriebusse konkurrieren nur unter ganz bestimmten Bedingungen mit den Dieselbussen. Durch eine Nische in der Nische in der Nische wurden also relativ günstige Einsatzbedingungen für die Batteriebusse geschaffen.

Lässt man beide Beispiele, Thousand Palms und Chattanooga, noch einmal Revue passieren, dann wird folgendes deutlich: In beiden Fällen tragen Nischen dazu bei, eine möglichst kleine Gesamtgröße N zu schaffen. In Thousand Palms geschieht dies über die Anwendungs-Nische des Bus-Marktes und die Raum-Nische der Verkehrsgesellschaft SunLine. In Chattanooga wird die Gesamtgröße N zusätzlich durch die Nische des Shuttle-Services eingegrenzt. Die Nischen führen in beiden Fällen also dazu, dass die neuen Technologien in einem für sie sehr günstigen Attraktor-Bassin auf die Konvention treffen.

In Thousand Palms ermöglichte die vergleichsweise kleine Busflotte einen kompletten Austausch der Fahrzeuge auf einmal. Die Übermacht einer hyperselektiven Konvention konnte so umgangen werden und es wurde direkt ein früher Markt für CNG-Busse geschaffen. Diese mussten sich unter Marktmechanismen bewähren und taten das auch. Durch neue Nischen-Schaffungen und -Erweiterungen konnten sich die CNG-Busse stärker ausbreiten und erobern seitdem einen immer größeren Teil des automobilen Innovations-Raums.

Die speziellen Eigenschaften der Nische in Thousand Palms schufen ihnen also eine solide Grundlage, von der aus sie sich auf andere Gebiete ausdehnen konnten. So wurden sie nach den positiven Erfahrungen bei SunLine auch in Los Angeles eingeführt und konnten dort Schritt für Schritt die Konvention weiter verdrängen. 2008 sollen die restlichen Dieselbusse in Los Angeles ausgetauscht werden (Wikipedia 2008b).

In Chattanooga wurde ebenso ein Attraktor-Bassin mit vergleichsweise günstigen Anfangsbedingungen für eine alternative Technologie geschaffen. Durch die Einrichtung der Nische eines Shuttle-Services wurde der Wettbewerbsraum noch weiter eingegrenzt. Die Gesamtgröße N wurde also zusätzlich reduziert. Die Batteriebusse konkurrierten nur innerhalb der spezifischen Konditionen des Shuttle-Services gegen die Dieselbusse.

Sowohl die Erfahrungen in Thousand Palms, als auch die in Chattanooga spiegeln also die zuvor zusammengefassten Ergebnisse der Modellbildung in Kapitel 1 plastisch wider. In beiden Fällen wird durch eine Doppel- oder Mehrfach-Nische der Wettbewerbsraum der beiden Attraktoren stark verkleinert. Innerhalb des Schutzraums dieser Nischen wird die Dominanz der hyperselektiven Konvention neutralisiert und die alternative Technologie hat realis-

tische Chancen, sich durchsetzen. Zudem erwächst aus den Nischen ein früher Markt, in dem sich die CNG- beziehungsweise Batteriebusse unter Marktmechanismen gegen die Konvention behaupten.

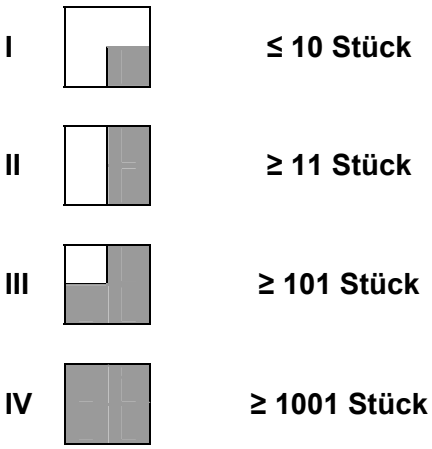
Agenda

In der vorliegenden Untersuchung wurde an den verschiedensten Stellen explizit und implizit immer wieder deutlich, dass die in Kapitel 1 entwickelte analyseleitende Modellbildung sowohl vertieft als auch erweitert werden kann. Diese Vertiefung und Erweiterung betrifft insbesondere folgende drei Schwerpunkte:

Erstens, die *Visualisierung der hyperselektiven Attraktor-Landschaft*. Ausgehend von den Innovations-Matrizen in Kapitel 1 (Autos) und 3 (Omnibusse) sowie den in Kapitel 4 Schritt für Schritt vorgestellten und analysierten Fahrzeug-Konfigurationen lässt sich die hyperselektive Landschaft der automobilen Innovationen visualisieren. Ausgangspunkt dafür ist eine Größenklassen-Matrix, die angibt, wie viele Fahrzeuge einer bestimmten Konfiguration bereits gebaut und im Einsatz sind.

Greift man zunächst auf die Symbolik der Auto- und Busmatrix zurück, so steht auch hier wieder ein »/« für einen Inventionsraum, ein »//« für einen stillgelegten Inventionsraum und ein »x« für eine Konfiguration, die technologisch ausgeschlossen ist. Des Weiteren sind einige Felder der Größenklassen-Matrix mit einem »D« oder einem »E« versehen. Ein »D« steht für Derivat und bedeutet, dass der Kraftstoff dieser Konfiguration ohne größere Umbaumaßnahmen in einem Diesel- oder Diesel-Hybridbus verwendet werden könnte. Ein »E« bedeutet analog dazu, dass der Kraftstoff der jeweiligen Konfiguration ohne Umbaumaßnahmen in einem Erdgas- oder Erdgas-Hybridbus verwendet werden könnte.

Auf Basis der in Kapitel 4 untersuchten Flottenversuche lassen sich nun Größenklassen bilden, die die Anzahl der gebauten Fahrzeuge einer Konfiguration angeben. Wir wählen folgende vier Größenklassen:



Die Stückzahlen beziehen sich auf den Zeitraum von 1990 bis 2007. Sie geben für jede Konfiguration die Anzahl der Fahrzeuge an, die in diesen 17 Jahren gebaut wurde, auch wenn sich einige dieser Konfigurationen nicht mehr im Einsatz befinden. Auch wenn in einigen Bereichen, wie beispielsweise bei den Methanolbussen, die Produktion mittlerweile wieder komplett eingestellt wurde, so zeigt dies dennoch, dass bereits Strukturen für eine Serienproduktion bestanden und diese bei bestehendem Interesse wieder geschaffen werden könnten.

Ausgehend davon ergibt sich dann folgende Größenklassen-Matrix:

Größenklassen-Matrix-Bus

Antrieb (a)			Kraftstoff (k)	CO_2-emittierende Kraftstoffe						CO_2-neutrale Kraftstoffe						C-freie Kraftstoffe		
				Konventionell		Nicht-konventionell				Semi-alternativ						Alternativ		
				Kohlenwasserstoffe					SynFuels	Ole		Alkohole		Gase		Strom	Wasserstoff	
				Diesel (1)	Benzin (2)	Autogas LPG (3)	Erdgas LNG (4)	Erdgas CNG (5)	GTL (6)	BTL (7)	Bio-Diesel (RME) (8)	Pflanzenöle (9)	Bio-Ethanol (10)	Bio-Methanol (11)	Biogas (12)	(13)	Wasserstoff LH_2 (14)	Wasserstoff CGH_2 (15)
Thermische Antriebe	konv.	4-Takt-Hubkolbenmotor (1)		a	//	b	c	c	Derivat F1/1	Derivat F1/1	Derivat F1/1	d	e	f	Derivat F 1/5	X	g	h
	nicht-konv.	Sonstige Verbrennungsprinzipien (2)		/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	X	/	/
Hybrid-Antrieb	semi-altern.	Hybride (3)	thermisch	i	j	k	l	m	Derivat F3/1	Derivat F3/1	Derivat F3/1	/	n	/	Derivat F3/5	X	/	p
			elektrisch													o		
Elektrische Antriebe	alternativ	Batterie-Elektroantrieb (4)		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	q	X	X
		Brennstoffzellen-Elektroantrieb (5)		/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	r	/	X	s	t

Abbildung 62, Quelle: eigene Darstellung; [a] KBA 2007a: 23; [b] Wiener Umweltbericht 2003: 4; [c] NREL 2002a: 204; [d] Energieportal24 2005b; [e] PFI 2007: 31; [f] GAO 1999: 5; [g] H2Cars 2007; [h] Energieportal24 2006a; [i] Orionbus 2007b; [j] ISE 2007; [k] APTS-Phileas 2007; [l] NREL 2002b: 1; [m] Valleycleancities 2001; [n] Scania 2007e: 1; [o] Advanced Energy 2003: 4, 6; [p] NREL 2007a: 1; [q] Griffith 2007: 3; [r] Fuelcellbus 2007a; [s] H2Cars 2007;
[t] DaimlerChrysler 2006

Beim Betrachten der Größenklassen-Matrix fällt auf, dass sich die meistgebauten Konfigurationen links oben befinden und damit eine gewisse Nähe zur Konvention des Dieselbusses aufweisen. Je weiter man sich hingegen diagonal nach rechts unten bewegt, desto weniger Fahrzeuge wurden in den jeweiligen Konfigurationen produziert. Lediglich die bereits im zweistelligen Bereich gefertigten Brennstoffzellenbusse des Feldes $F_{5/15}$ machen hier eine Ausnahme.

Abgesehen davon, deutet aber alles darauf hin, dass zunächst Antriebs- und Kraftstoff-Technologien in der Nähe der Konvention in größerem Umfang entwickelt und eingesetzt werden. Dies zeigen beispielsweise die Erdgas- oder Diesel-Hybridbusse, die bereits im vierstelligen Bereich produziert wurden. Dies ist allerdings auch nicht überraschend. Schließlich ist es technisch gesehen einfacher, einen konventionellen 4-Takt-Hubkolbenmotor auf den Betrieb mit Erdgas umzustellen, oder den altbewährten Kraftstoff Diesel in einem Hybridbus einzusetzen, als sowohl antriebs- als auch kraftstoffseitig eine radikale Innovation einzuführen. Zudem werden durch einen schrittweisen Übergang die Risiken minimiert, die bei der Erprobung neuer Technologien immer bestehen.

Auf Basis einer solchen Größenklassen-Matrix ließe sich nun die hyperselektive Landschaft der automobilen Innovationen in einem dreidimensionalen Bild visualisieren, wobei auf der x-Achse die Spalten der Matrix, auf der z-Achse deren Zeilen und auf der y-Achse die Größenklassen aufgetragen werden. Je nachdem, wie die Klassifizierungen der Matrizen und die Größenklassen ausdifferenziert oder zusammengefasst werden, ergibt sich dann ein detaillierteres oder komprimierteres Bild dieser Landschaft. Bei Verwendung entsprechender Glättungskurven entsteht dann eine Attraktor-Landschaft mit Bergmassiven, Höhenzügen, Tälern und Hügeln, die nicht nur metaphorisch gebildet, sondern empirisch kartographiert ist.

Zweitens, die *Verallgemeinerung der Modellbildung*. Die im Kapitel 2 entwickelte Modellbildung basierte auf zwei wesentlichen Einschränkungen. Zum einen wurde sowohl bei der Modellierung und Simulation der Nischen als auch der frühen Märkte jeweils ein Spezialfall untersucht, nämlich der Fall, dass der hyperselektive Attraktor K und ein alternativer Attraktor A in einem bestimmten Attraktor-Bassin aufeinander treffen. Zum anderen wurde bei der Modellbildung der Fall eines quadratischen Wachstums unterstellt.

Was zunächst die erste Einschränkung betrifft, so haben die empirischen Analysen der Flottenversuche im Kapitel 4 gezeigt, dass nicht nur ein alternativer Attraktor A, sondern auch mehrere zeitgleich mit dem Attraktor K und zugleich untereinander in einem Attraktor-Bassin konkurrieren können. Dieser allgemeinere Fall sollte weiter untersucht werden, insbesondere weil man hierbei auch das Zusammenspiel der alternativen Attraktoren untereinander in den Blick bekommt. Dabei kann dieses Zusammenspiel sehr unterschiedliche Folgen haben. Die alternativen Attraktoren können sich wechselseitig gegen den hyperselektiven Attraktor stärken, sie können sich jedoch auch gegenseitig blockieren.

Im allgemeinen Fall liegt hier eine Art »N-Körper-Problem« vor, bei dem die Veränderung eines Attraktors vom aktuellen Zustand aller N-1 anderen Attraktoren abhängt. Eine solche Modellierung gestaltet sich nicht nur schwierig, sondern besitzt wegen der vielen möglichen Lösungen auch eine beschränkte Aussagekraft im Hinblick auf praktische Problemstellungen. Leichter und sinnvoll wäre es indessen, das Modell von dem hier behandelten »2-Körper-Problem« zunächst auf ein »3-Körper-Problem« zu erweitern, bei dem simuliert wird, was passiert, wenn in einem Attraktor-Bassin der hyperselektive Attraktor K und zwei alternative Attraktoren A_1 und A_2 aufeinander treffen.

Im Unterschied zu der zuvor skizzierten Verallgemeinerung ist eine Verallgemeinerung im Hinblick auf die Wachstumsform erheblich einfacher. Hier liegen bereits entsprechende Ansätze vor, die eine solche Modellerweiterung ermöglichen. So ließe sich beispielsweise die Simulation eines linearen Wachstums an Hand folgender Gleichung durchführen (Bruckner et al. 1996: 23):

$$D_{Linear}(N, N_a, Q^*) = \frac{1-\left(\frac{1}{Q^*}\right)^{N_a}}{1-\left(\frac{1}{Q^*}\right)^{N}} = \frac{1-\left(\frac{W_k^*}{W_a^*}\right)^{N_a}}{1-\left(\frac{W_k^*}{W_a^*}\right)^{N}}$$

Ein Mix von linearem und quadratischem Wachstum kann durch folgende Gleichung abgebildet werden (ebd.):

$$D_{Mix}(N, N_a, W_a, W_k, W_k^*, W_a^*, V) = \frac{1+\sum_{j=1}^{Na-1}\prod_{i=1}^{j}\frac{W_k^* + W_k\frac{N-i}{V}}{W_a^* + W_a\frac{i}{V}}}{1+\sum_{j=1}^{N-1}\prod_{i=1}^{j}\frac{W_k^* + W_k\frac{N-i}{V}}{W_a^* + W_a\frac{i}{V}}}$$

Zur Unterscheidung der Wachstumsraten aus dem linearen Modell von den Wachstumsraten aus dem in diesem Paper angewendeten quadratischen Ansatz, wurden die linearen Werte mit einem Sternchen gekennzeichnet. Über den Paramter V ist eine Gewichtung des quadratischen Wachstums gegenüber dem linearen möglich.

Drittens, *die Präzisierung der frühen Märkte*. In der vorliegenden Arbeit wurde der Begriff des »frühen Marktes« zunächst ausgehend von Nischen-Simulationen für ein quadratisches Wachstum entwickelt (Kapitel 1) und dann in den folgenden Kapiteln als heuristische Kategorie genutzt. Dabei zeigten sowohl die theoretische Modellbildung als auch die empirische Analyse, dass Nischen und frühe Märkte weder beziehungslos auseinander fallen noch einfach identisch sind. Um beide voneinander abzugrenzen, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. So ließen sich beispielsweise frühe Märkte als eine bestimmte Eigenschaft von Nischen verstehen. Wir gingen hier einen anderen Weg und unterbreiteten den Vorschlag, frühe Märkte als ein bestimmtes Gebiet innerhalb von Nischen zu interpretieren. Im Falle der vorliegenden Simulationen war dies jenes Gebiet, in dem die Durchsetzungswahrscheinlichkeit des alternativen Attraktors mehr als 50% betrug. Oder, allgemeiner gesagt, frühe Märkte lassen sich als ein Gebiet verstehen, in dem die durch die Hyperselektion erzeugte Asymmetrie zwischen konventioneller und alternativer Technologie aufgehoben ist und beide »auf gleicher Augenhöhe« miteinander konkurrieren. Dieser hier entwickelte Ansatz zur trennscharfen Unterscheidung von Nischen und frühen Märkten bedarf in dreierlei Hinsicht einer weiteren Präzisierung.

Zum einen ist es möglich und notwendig, die Definition des frühen Marktes nicht nur im Hinblick auf die Durchsetzungswahrscheinlichkeit D, sondern auch in Bezug auf die anderen Parameter N, N_a und Q zu präzisieren. Dies geschah in Kapitel 1 lediglich ansatzweise und illustrativ, indem das Gebiet des frühen Marktes innerhalb der jeweiligen Nischen-Simulation verbal beschrieben wurde. Durch eine Systematisierung und Formalisierung dieser verbalen Beschreibungen lassen sich die Parameter als Grenzen des frühen Marktes in einem mehrdimensionalen Raum exakt ermitteln und quantifizieren.

Zum anderen kann und muss der Begriff des frühen Marktes nicht nur für den Fall des quadratischen Wachstums, sondern auch für andere, wie beispielsweise die zuvor beschriebenen Wachstumsformen präzisiert werden. Dies ist insbesondere dann von Interesse, wenn die Wendepunkte nicht bei einer Durchsetzungswahrscheinlichkeit von D = 50%, sondern darüber oder darunter liegen. Zu der entsprechenden Wendepunkt-Koordinate D_w müssen dann die jeweils dazugehörigen Wendepunkt-Koordinaten Q_w, N_w und N_{aw} ermittelt werden.

Und schließlich ist es ratsam, die zuvor skizzierten theoretischen Modellbildungen des frühen Marktes durch Parameter-Abschätzungen zu präzisieren, die auf empirischen Analysen basieren. Die Simulationen in Kapitel 1 haben nämlich gezeigt, dass es Werte für Q, N_a und N gibt, die zwar theoretisch denkbar, praktisch jedoch hochgradig unwahrscheinlich sind. Durch den Ausschluss solcher Werte kann das Gebiet des frühen Marktes innerhalb einer Nische weiter präzisiert und eingeengt werden. Dadurch lässt sich die Modellbildung genauer auf die Belange der Praxis justieren.

6. Literatur

Abernathy, William J.; Clark, Kim B. (1985): Innovation: Mapping the Winds of Creative Destruction, In: Research Policy, Vol. 14, Heft 1, S. 3-22

Advanced Energy (2003): Plug-In Hybrid Electric Bus Study. Hybrid Bus Fact Sheets. Internet: www.advancedenergy.org/corporate/initiatives/heb/pdfs/HEB_results.pdf. Zugriff: 09.11.2007

AFVI (2007): A CNG Hybrid-Electric 40-Foot Transit Bus for San Diego MTS. Conference Presentation. Internet: http://www.afvi.org/2007ConferencePresentations/presentations/03apr07/Presentation_Clean_Cities_AFVI_2007.pdf. Zugriff: 20.09.2007

Aigle, Thomas; Krien, Philipp; Marz, Lutz (2007): Die Evaluations-Matrix. Ein Tool zur Bewertung antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen in der Automobilindustrie. Discussion Paper SP III 2007-105, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung

Aigle, Thomas; Marz, Lutz (2007): Automobilität und Innovationen. Versuch einer interdisziplinären Systematisierung. Discussion Paper SP III 2007-102, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung

Allianz pro Bus (2004): Busse verbinden. Herausgeber: Verband der Automobilindsutrie (VDA), Frankfurt/Main

Alternativ Fahren (2006): Vier Busse mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren von MAN im regulären Linieneinsatz in Berlin. Internet: http://www.alternativ-fahren.de/Wasserstoff/News/MAN_Wasserstoff_Linienbusse.shtml. Zugriff: 11.09.2007

Altvater, Elmar (2006): Das Ende des Kapitalismus. In: Blätter für deutsche und internationale Politik, Heft 2/2006, S. 171-182

APTS-Phileas (2007): Projects. Eindhoven (The Eindhoven project in The Netherlands)/Douai (The Douai project in France). Internet: http://www.apts-phileas.com/. Zugriff: 09.11.2007

Arthur, B. W. (1989) Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-in by Historical Events. In: Economic Journal, Vol. 99, S. 116-131

Automobil Produktion (2002a): OEM – TOP 10 der Bushersteller. Internet: www.automobil-produktion.de/themen/00449/index.php. Zugriff: 23.09.2007

Automobil Produktion (2002b): OEM – Die Top Ten der OEMs 2001 und 2002. Internet: www.automobil-produktion.de/themen/00276/index.php. Zugriff: 23.09.2007

Automotive (2007). Alternative Anriebe – Das nordische Vorbild. Internet: http://www.automotive.co.at/ireds-39764.html. Zugriff: 06.09.2007

Autosieger (2007a): Mercedes-Benz Citaro Jubiläum auf dem UITP-Kongress 2007 in Helsinki. Internet: http://www.autosieger.de/article12403.html. Zugriff: 28.08.2007

Autosieger (2007b): IAA: Konzeptfahrzeug mit Lithium-Ionen-Plug-In-Hybrid-Batterie. Internet: http://www.autosieger.de/article13357.html. Zugriff: 28.09.2007

Bayern Innovativ (2005): Trends in der Motorentechnologie 2005. Wasserstoff-Verbrennungsmotoren von MAN: der zeitnahe Einstieg in die Zukunft der Mobilität. Internet: http://www.bayern-innovativ.de/C7B8AB84-50CC-11DA-AE49-00034709FE0C. Zugriff: 11.09.2007

BDO (Bundesverband Deutscher Omnibusunternehmer e.V.) (2007): Zahlen&Fakten. Branchendaten. Internet: http://www.bdo-online.de/cms/index.html. Zugriff: 01.02.2008

Becker, Kai (2004): Innovation und Biotechnologie. Eine Betrachtung zyklischer Entwicklungen mit der Theorie der langen Wellen. Internet: www.zhb-flensburg.de/dissert/becker/becker.pdf. Zugriff: 24.07.2006

Berlin (2007): Luftreinhalteplan. Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität. Internet: http://www.berlin.de/sen/umwelt/luftqualitaet/de/luftreinhalteplan/download/Anhang-Luftreinhalteplan-Berlin_68ff.pdf. Zugriff: 31.08.2007

Berliner-Verkehr (2004): Bus Geschichte, Zahlen der BVG. Internet: http://www.berliner-verkehr.de/bdaten.htm. Zugriff: 24.09.2007

Berliner-Verkehrsseiten (2004): Omnibus Berlin. Die Obus Geschichte. Internet: http://www.berliner-verkehrsseiten.de/bus/Obus/OHistory/ohistory.html. Zugriff: 24.09.2007

Berlinonline (2006): Berliner Zeitung. BVG will bis zu 250 Wasserstoffbusse kaufen. Internet: http://www.berlinonline.de/berliner-zeitung/archiv/.bin/dump.fcgi/2006/0718/politik/0071/index.html. Zugriff: 12.09.2007

BEST (2007a): Bioethanol for sustainable Transport. 160 Buses to 7 cities. Internet: http://www.best-europe.org/Pages/ContentPage.aspx?id=113. Zugriff: 05.09.2007

BEST (2007b): Bioethanol for sustainable Transport. Tasks in BEST – Buses. Internet: http://www.best-europe.org/Pages/ContentPage.aspx?id=115. Zugriff: 04.09.2007

Billing, Fabian (2003): Koordination in radikalen Innovationsvorhaben, Wiesbaden: Universitäts-Verlag

Biofuelregion (2007a): BRF, Sverige och världen. Internet: http://www.biofuelregion.se/sv_varlden/index.cfm?open=sv_varlden. Zugriff: 06.09.2007

Biofuelregion (2007b): BioFuel Region – a region that leads the world in biofuel. Internet: http://www.biofuelregion.se/english.cfm?open=eng. Zugriff: 06.09.2007

Bluebird-electric (2005): Blue Bird – Hybrid Electric School Bus. Internet: http://www.bluebird-electric.net/blue_bird_electric_school_bus.htm. Zugriff: 25.09.2007

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2006): Innovation – mehr als technischer Fortschritt. Internet: www.bmbf.de/ de/1316php. Zugriff: 26.07.2006

Borchert, Jan; Goos, Philipp; Hagenhoff, Svenja (2003): Innovations- und Technologiemanagement: Eine Bestandsaufnahme. Institut für Wirtschaftsinformatik. Georg-August-Universität Göttingen. Arbeitsbericht Nr. 4/2003

Boyer, Robert (2001): The Economist Confronted by Epochal Innovations: The Relationships between History and Theory, BRIE Working Paper 150, University of California

Bozen (2007): Autonome Provinz Bozen. Archiv der Pressemitteilungen. Internet: http://www.provinz.bz.it/Lpa/news/news_d.asp?art=161221&HLM=1. Zugriff: 12.09.2007

Braun, Michael; Feige, Andreas; Sommerlatte, Tom (Hg.) (2001): Business Innovation: Quantensprung statt „Innovatiönchen“. Ein Wegweiser zur zielgerichteten Geschäftserneuerung. Frankfurt/Main: F.A.Z.-Institut

Braun-Thürmann, Holger; Schäfer, Kerstin; Weider, Marc (2006): Was treibt die Autos der Zukunft an? In: Frankfurter Rundschau, 24.04.2006, S. 7

Bredamenarinibus (2007): Products. Technical Features. Internet: http://www.bredamenarinibus.it/system/be/documentViewer.stub.php?xfile=7002b966f3974f2438f93bdf99dcb2cd6572e96da56633e28d2e74f1a1c5e59849bfbe2318c887442ee0b03e88d77442fa3fbb66f8403a0c4a280a428c095462b584b7a1c62bcbf83d43b6c5a032. Zugriff: 25.09.2007

Bruckner, Eberhard; Ebeling, Werner; Jiménez Montaño, Miguel A.; Scharnhorst, Andrea (1993): Technological Innovations – A Self-Organisation Approach. Discussion Paper FS II 93-302, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung

Bruckner, Eberhard; Ebeling, Werner; Jiménez Montaño, Miguel A.; Scharnhorst, Andrea (1996): Nonlinear stochastic effects of substitution – an evolutionary approach, In: Journal of Evolutionary Economics, Vol. 6, No. 1, S. 1-30

Bruckner, Eberhard; Ebeling, Werner; Scharnhorst, Andrea (1998): Technologischer Wandel und Innovation – Stochastische Modelle für innovativer Veränderungen in der Ökonomie, In: Pohlmann, Ludwig (Hg.) (1998): Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Berlin: Duncker & Humblot, S. 361-382

Buhr, Regina; Canzler, Weert; Knie, Andreas; Rammler, Stephan (Hg.) (1999): Bewegende Moderne. Fahrzeugverkehr als soziale Praxis. Berlin: edition sigma

Busfahrer-Magazin (2006): Testbericht Mercedes-Benz Citaro LE Ü. Internet: http://www.busfahrer-magazin.de/fm/2348/BF0306_14-21_LNS.pdf. Zugriff: 24.08.2007

Bus-Fahrt (2006): Mercedes-Benz Citaro LE Ü. Der Stadt-Land-Bus. Internet: http://www.bus-ahrt.com/index.php?option=com_content&view=article&id=57&Itemid=10. Zugriff: 24.08.2007

BVG (2006): Wasserstoffbusse bei der BVG. Pressemitteilung BVG, 1.6.2006. Internet: www.bvg.de/index.php/de/Bvg/Detail/folder/301/rewindaction/Index/archive/1/id/104837/name/Wasserstoffbusse+bei+der+BVG. Zugriff: 09.09.2007

BVG (2007): Verkehrsmittel und Linien. Internet: www.bvg.de/index.php/de/Bvg/Index/folder/205. Zugriff: 09.09.2007

CADDET (1997): Ethanol-powered Buses Reduce Vehicle Emissions in Stockholm. Internet: http://www.cleanairnet.org/infopool/1411/articles-35650_ethanol_powered.pdf. Zugriff: 05.09.2007

CALSTART (2003): Vehicle Catalog. A Compendium of Vehicles for Bus Rapid Transit Service. Internet: http://www.gobrt.org/vehiclecatalog.pdf. Zugriff: 21.09.2007

Canzler, Weert (1996): Das Zauberlehrlings-Syndrom. Entstehung und Stabilität des Automobil-Leitbildes. Berlin: edition sigma

Canzler, Weert; Knie, Andreas (1998): Möglichkeitsräume. Grundrisse einer modernen Mobilitäts- und Verkehrspolitik. Wien/Köln/Weimar: Böhlau

Canzler, Weert; Marz, Lutz (1997): Stagnovation. Der Automobilpakt und die gedopte Arbeitsgesellschaft. In: Universitas, 52. Jg., H. 4, S. 359-371

Canzler, Weert; Schmidt, Gert (Hg.) (2003): Das zweite Jahrhundert des Automobils. Technische Innovationen, ökonomische Dynamik und kulturelle Aspekte. Berlin: edition sigma

Carbohydrateeconomy (1999): Ethanol Becoming a Viable Choice in Fuel Cell Technology. Internet: http://www.carbohydrateeconomy.org/News/news.cfm?News_ID=98. Zugriff: 01.10.2007

Cleanairnet (2007a): New Buses. CNG Bus. Internet: http://www.cleanairnet.org/infopool/1411/propertyvalue-17731.html. Zugriff: 31.08.2007

Cleanairnet (2007b): Fuel Cell Bus Programs Worldwide. Internet: http://www.cleanairnet.org/infopool/1411/propertyvalue-19516.html. Zugriff: 08.10.2007

ConNeCat (Competence Network Catalysis) (2006): Katalyse – eine Schlüsseltechnologie für nachhaltiges Wirtschaftswachstum, Roadmap der deutschen Katalyseforschung. 2. Auflage, Frankfurt

CTCase (2001): The Connecticut Academy of Science and Engineering: A Study of Bus Propulsion Technologies Applicable in Connecticut. Internet: http://www.ctcase.org/reports/bus_propulsion.pdf. Zugriff: 31.08.2007

CUTE (Clean Urban Transport for Europe) (2006a): Deliverable No. 8. Final Report. Internet: http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_D8_Final_Report.pdf. Zugriff: 02.10.2007

CUTE (Clean Urban Transport for Europe) (2006b): Detailed Summary of Achievements. Internet: http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/DETAILED_SCREEN.pdf. Zugriff: 02.10.2007

DaimlerChrysler (2006): Hightechreport. Faszination Forschung und Technik 1/2006. Praxis – Reloaded. Mit dem Projekt HyFLEET:CUTE in die zweite Runde. Internet: http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0-5-7179-49-627589-1-0-0-0-0-0-8668-7165-0-0-0-0-0-0-0.html. Zugriff: 02.10.2007

DaimlerChrysler (2007a): DaimlerChrysler im Überblick, Ausgabe 2007. Internet: www.daimlerchrysler.com/Projects/c2c/channel/documents/1014170_zahlen_fakten_dt_060307.pdf

DaimlerChrysler (2007b): Hightechreport. Faszination Forschung und Technik 1/2006. Orion VII-Hybridbus. Gewinner in drei Disziplinen. Internet: http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0-5-7179-49-627681-1-0-0-0-0-0-8668-7165-0-0-0-0-0-0-0.html. Zugriff: 18.09.2007

Debus, Christian (2002): Routine und Innovation. Management langfristigen Wachstums etablierter Unternehmungen. Marburg Förderzentrum für Existenzgründer aus der Universität (Mafex), Band 4. Marburg: Mafex

Deutsch, Karl (1949): Innovation, Entrepreneurship and the Learning Process, In: A. H. Cole (Hg.): Change and the Entrepreneur, Cambridge: Harvard University Press, S. 24-29

Deutscher Bundestag (2002): Der Dieselabtrieb im Personen- und Güterverkehr und die umwelthygienische Relevanz seiner Emissionen. Drucksache 14/9872. Internet: http://193.159.218.145/btd/14/098/1409872.pdf. Zugriff: 13.07.2007

Die Zeit (2003): Wikinger auf sauberem Kurs. In: Die Zeit Nr. 21 vom 15.05.2003. Interent: http://zeus.zeit.de/text/2003/21/Island_2fWasserstoff. Zugriff: 16.01.2008

DIfU (Deutsches Institut für Urbanistik) (2005): Umweltfreundlicher, attraktiver und leistungsfähiger ÖPNV – ein Handbuch. Internet: www.umweltdaten.de/publikationen/ fpdf-k/koepnv-kf.pdf. Zugrif: 06.03.2008

DOE (Department of Energy) (1997): Case Study. Electric Buses Energize Downtown Chattanooga. Internet: http://www.eere.energy.gov/afdc/pdfs/chatt_cs.pdf. Zugriff: 09.11.2007

DOE (Department of Energy) (2000): Ethanol as a Renewable Fuel Source for Fuel Cells. Internet: http://www.fuelandfiber.com/Athena/Fuel_Cells.doc. Zugriff: 01.10.2007

DOE (Department of Energy) (2007): The Department of Energy. Fuel Cell Bus. Internet: http://www.eere.energy.gov/afdc/pdfs/0179.pdf. Zugriff: 01.10.07

DPI (Department for Planning and Infrastructure) (2007): Project outline. Internet: http://www.dpi.wa.gov.au/ecobus/1715.asp. Zugriff: 01.10.2007

Duemotori (2006): Nachrichten automobil. Mercedes-Benz Citaro: neue Generation, neuer Kompakt-Niederflurbus Citaro K. Internet: http://www.duemotori.com/news/nachrichten_automobil/7775_Mercedes-Benz_Citaro_neue_Generation_neuer_Kompakt-Niederflurbus_Citaro_K.php. Zugriff: 30.08.2007

Ebeling, Werner; Feistel, Rainer; Hatmann-Sonntag, Ingrid; Schmansky-Geier, Lutz; Scharnhorst, Andrea (2006): New Species in Evolving Networks – stochastic theory of sensitive networks and applications on the metaphorical level. In: BiosSystems, Vol. 85, Issue 1, S. 65-71

Ebeling, Werner; Scharnhorst, Andrea (2002): Technische Evolution aus der Sicht der Theorie der Selbstorganisation. In: Parthey, Heinrich; Spur, Günter (Hg.) (2002): Wissenschaftsforschung. Jahrbuch 2001. Wissenschaft und Innovation, S. 59-73

Ebeling, Werner; Scharnhorst, Andrea (2006): Metakompetenzen und Kompetenzentwicklung in Evolutions- und Selbstorganisationsmodellen. In: QUEM report Metakompetenzen und Kompetenzentwicklung, Heft 95/Teil I, Berlin, S. 15-113

Ebeling, Werner; Scharnhorst, Andrea; Jiménez Montaño, Miguel A.; Karmeshu (1999): Evolutions- und Innovationsdynamik als Suchprozeß in komplexen adaptiven Landschaften. In: Mainzer, Klaus (Hg.) (1999): Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Komplexitätsforschung in Deutschland auf dem Weg ins nächste Jahrhundert, Berlin: Springer, S. 446-473

ECTOS (2007): Ecological City Transport System. Internet: http://www.ectos.is/en/projects/finished%5Fprojects/ectos/. Zugriff: 01.10.2007

E-driveonline (2001): E-Drive. Solectria Develops an All Electric Version of the Blue Bird TC2000. Internet: http://www.e-driveonline.com/articles/dec00-3.htm. Zugriff: 25.09.2007

Eigen, Manfred; Schuster, Peter (1978): The hypercycle – a principle of natural self-organization, part A. In: Naturwissenschaften, Vol. 64, S 541-565

Eigen, Manfred; Schuster, Peter (1979): The hypercycle – a principle of natural self-organization, part C. In: Naturwissenschaften, Vol. 65, S. 341–369

Elektroauto-Tipp (2006): Elektroauto-Geschichte – Elektroautos vor 1900. Internet: http://www.elektroauto-tipp.de/modules.php?name=Eautogeschichte&file=eautog1. Zugriff: 01.11.2006

Elste, Günter (2007): Gesellschaftspolitische Bedeutung des ÖPNV. Mobilität, Ökonomie und Ökologie. Vortrag, Railtec 2007. Internet: www.fachportal.nahverkehr.nrw.de/info_kontakte/publik_pdf/publikationen_57_PDF_d.pdf. Zugriff: 08.03.2007

Encyclopedia (2001): From the lab to the street: California's SunLine Transit a pioneer in applying advanced technology in the real world; CNG, fuel cells and hydrogen engine vehicles all part of fleet. (Industry News). Internet: http://www.encyclopedia.com/doc/1G1-92586551.html. Zugriff: 09.11.2007

Energie-infoportal (2006): Berliner Verkehrsbetriebe macht Ausschreibung für 250 Wasserstoffbusse. Internet: http://www.energie-infoportal.de/verkehr/2006-07/berliner-verkehrsbetriebe-macht-ausschreibung-fuer-250-wasserstoffbusse.html. Zugriff: 12.09.2007

Energieportal24 (2004): In Berlin fährt erster mit Wasserstoff betriebener Bus. Internet: http://www.energieportal24.de/artikel_956.htm. Zugriff: 12.09.2007

Energieportal24 (2005a): DaimlerChrysler liefert Brennstoffzellenbusse nach Peking/China. Internet: http://www.energieportal24.de/artikel_1408.htm. Zugriff: 02.10.2007

Energieportal24 (2005b): Thema Bioenergie/Biomasse. 420 Busse der Autokraft tanken zukünftig Pflanzenöl. Internet: http://www.energieportal24.de/artikel_1348.htm. Zugriff: 09.11.2007

Energieportal24 (2006a): Zwei wasserstoffbetriebene MAN-Stadtbusse fahren zur WM. Internet: http://www.energieportal24.de/artikel_1649.htm. Zugriff: 12.09.2007

Energieportal24 (2006b): Umweltminister besichtigt Wasserstoffbusse. Internet: http://www.energieportal24.de/artikel_1702.htm. Zugriff: 12.09.2007

Erdgasfahrzeuge (2006): Das Erdgasfahrzeug. FAQ. Internet: www.erdgasfahrzeuge.de/verkaufsboerse.html. Zugriff: 08.03.2007

Fisher, John C.; Prey, Robert H. (1971): A Simple Substitution Model of Technological Change. In: Technological Forecasting and Social Change, Vol. 3, S. 75-88

Foray, Dominique; Grübler, Arnulf (1990): Morphological Analysis. Diffusion and Lock-Out of Technologies: Ferrous in France and the FRG. In: Research Policy, Vol. 19, S. 535-550

Fuel Cell Bus Club (2004): Background Information/Fuel Cell Technology/New Generation of Buses: The Citaro Fuel Cell Bus. Internet: www.fuel-cell-bus-club.com/index.php?module=pagesetter&func=viewpub&tid=1&pid=116. Zugriff: 18.07.2007

Fuelcellbus (2006a): Georgetown University. A Federal Transit Administration Project. The Georgetown X-1 Fuel Cell Bus. Internet: http://fuelcellbus.georgetown.edu/files/x1brochure052006.pdf. Zugriff: 09.10.2007

Fuelcellbus (2006b): Georgetown University. A Federal Transit Administration Project. Advanced Vehicle Development. The Fuel Cell Bus Program. Internet: http://fuelcellbus.georgetown.edu/files/guavdbrochure042006.pdf. Zugriff: 09.10.2007

Fuelcellbus (2007a): Georgetown University. Generation One Buses. TBB Technical Details. Internet: http://fuelcellbus.georgetown.edu/gen1.cfm. Zugriff: 01.10.2007

Fuelcellbus (2007b): Georgetown University. Generation Two Buses. X1 Bus General Information. Internet: http://fuelcellbus.georgetown.edu/x1tech.cfm. Zugriff: 09.10.2007

Fuelcellbus (2007c): Georgetown University. Generation Two Buses. X1 Bus Technical Details. Internet: http://fuelcellbus.georgetown.edu/x1desc.cfm. Zugriff: 09.10.2007

Fuelcells (2006): Fuel Cells 2000. Fuel Cell Buses. Internet: http://www.fuelcells.org/info/charts/buses.pdf. Zugriff: 11.10.2007

GAO (United States General Accounting Office) (1999): Mass Transit. Use of Alternative Fuels in Transit Buses. Internet: http://www.cleanairnet.org/infopool/1411/articles-35679_mass_transit.pdf. Zugriff: 07.09.2007

Gerl, Bernhard (2002): Innovative Automobilantriebe – Konzepte auf der Basis von Brennstoffzellen, Traktionsbatterien und alternativen Kraftstoffen, Landsber/Lech: Verlag moderne Industrie

GHBP (Global Hydrogen Bus Platform) (2007a): Technical Details of HyFLEET:CUTE Buses. Internet: http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/Technology/Buses. Zugriff: 10.09.2007

GHBP (Global Hydrogen Bus Platform) (2007b): Description of Project. Buses. Internet: http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/About/DescriptionOfProject/Buses. Zugriff: 11.09.2007

GHBP (Global Hydrogen Bus Platform) (2007c): Scientific and Technical Objectives of the HYFleet:CUTE Project. Internet: http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/Technology/ScientificandTechnicalObjectives. Zugriff: 12.09.2007

GHBP (Global Hydrogen Bus Platform) (2007d): News. Berlin Bus Passes 100,000 Kms. Internet: http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/news/item/62/. Zugriff: 12.09.2007

GHBP (Global Hydrogen Bus Platform) (2007e): What is HyFLEET: CUTE? Internet: http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/Home. Zugriff: 12.09.2007

GHBP (Global Hydrogen Bus Platform) (2007f): Description of Project. Evaluation studies. Internet: http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/About/DescriptionOfProject/EvaluationStudies. Zugriff: 12.09.2007

GHBP (Global Hydrogen Bus Platform) (2007g): History. CUTE. Clean Urban Transport for Europe. Internet: http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/About/History/CUTE. Zugriff: 01.10.2007

Greencarcongress (2006): Energy, Technologies, Issues and Policies for Sustainable Mobility. Stagecoach to Trial Scania Ethanol Bus in UK. Internet: http://www.greencarcongress.com/2006/08/stagecoach_to_t.html <cid:part1.02010603.07030005@uni-bielefeld.de>. Zugriff: 12.09.2007

Griffith, Paul (2007): Status of U.S. Battery-Electric Bus Programms. Internet: http://www.atti-info.org/P10260-001Griffith.pdf. Zugriff: 25.09.2007

H2Argemuc (2007a): Wasserstoffprojekt am Flughafen Müchen. Eine erfolgreiche Bilanz. Internet: http://www.argemuc.com/download/H2argemuc_Deutsch.pdf. Zugriff: 10.09.2007

H2Argemuc (2007b): Wasserstoffprojekt am Flughafen München. Eintauchen in die Zukunft. Internet: http://www.argemuc.com/download/flyer/H2_Flyer_D_int.pdf. Zugriff: 11.09.2007

H2Cars (2007): Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH. Buses. Internet: http://www.h2cars.de/. Zugriff: 10.09.2007

Haight, Brent (2001): The Best of Both World's? compressed natural gas-powered hybrid electric bus. Internet: http://findarticles.com/p/articles/mi_m0FZX/is_4_67/ai_74013115/pg_1. Zugriff: 21.09.2007

Hauschildt, Jürgen (1993): Innovationsmanagement. München: Vahlen

Henderson, Rebecca M.; Clark, Kim B. (1990): Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms. In: Administrative Quarterly, Vol. 35, Heft 1, S. 9-30

Hess, David (2005): Case Studies of the Greening of Urban Transit. Chattanooga Area Regional Transportation Authority. Internet: http://www.davidjhess.org/CARTA.pdf. Zugriff: 09.11.2007

Hill, Dale (2001): Denver's Solution to Congestion. 7th National Clean Cities Conference and Expo. Internet: http://www.eere.energy.gov/cleancities/conference/2001/pdfs/Dale_Hill.pdf. Zugriff: 21.09.2007

Hybridschoolbus (2007): Plug-in Hybrid Electric School Bus Welcome to the Plug-in Hybrid. Electric School Bus Project. Internet: http://www.hybridschoolbus.org/. Zugriff: 14.09.2007

Hyweb (2006): Schwerpunkt Shanghai. Erster chinesischer Brennstoffzellenbus geht nach Shanghai. Internet: http://www.hyweb.de/Neuigkeiten/archv306.html#ErsterChinesischerBZBusShanghai060719. Zugriff: 08.10.2007

IAA (Internationale Automobilausstellung) (2006): Offizielle Messezeitung 2006. Internet: http://www.iaa.de/archiv/2006/fileadmin/user_upload/2006/iaa_aktuell/iaadaily06_0921.pdf. Zugriff: 24.08.2007

Inar (2007): LVB: Neue Busse mit höchstem Umweltstandard. Internet: http://www.inar.de/blog/wirtschaft/20070308/lvb-neue-busse-mit-hoechstem-umweltstandard.html. Zugriff: 31.08.2007

Infobus (2007): Słupsk: Scania OmniLink na Etanol już na linii. Internet: http://www.infobus.com.pl/text.php?from=tag&id=8694#maintext. Zugriff: 06.09.2007

Information (2006): Newsarchiv. DaimlerChrysler Truck Group will Profitabilität weiter steigern. Internet: http://www.information.de/newsarchiv/248508/DaimlerChrysler_Truck_Group_will_Profitabilit_t_weiter_steigern.html. Zugriff: 27.08.2007

Innovationskongress (2005): Saubere Luft mit Dieselbussen. Die Strategie der Berliner Verkehrsbetriebe. Internet: http://innovationskongress-bw.de/documents/Vortrag_Hr_Eberwein.pdf. Zugriff: 10.09.2007

ISE (2005): ISE Corporation. Gasoline Hybrid Drive System. Internet: http://www.isecorp.com/ise_products_services/gasoline_hybrid_drive_system/ <cid:part1.05090000.08000206@uni-bielefeld.de>. Zugriff: 17.09.2007

ISE (2007): Press Releases. ISE ThunderVolt Gasoline Hybrid Drive Systems To Power New Buses For California's Montebello Bus Lines. Internet: http://www.isecorp.com/ise_news/ise_press_releases/may-25-2007-montebello-gasoline-hybrids.php. Zugriff: 09.11.2007

ISE (2007a): ISE THUNDERVOLT® TB40-HICE. Hydrogen ICE Hybrid-Electric Drive System. Internet: http://www.isecorp.com/ise_products_services/hydrogen_ice_drive_systems/pdf/TB40-HICE.pdf. Zugriff: 17.09.2007

ISE (2007b): Hydrogen ICE Drive System. Internet: http://www.isecorp.com/ise_products_services/hydrogen_ice_drive_systems. Zugriff: 18.09.2007

ISE (Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme) (2002): Fraunhofer ISE entwickelt autotherme Benzinreformierung für Brennstoffzellen. Internet:

www.diebrennstoffzelle.de/nachrichten/FraunhoferISEentwickeltautothermeBenzinreformierungfrBrennstoffzellen.shtml. Zugriff: 04.11.2006

IWR (Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien) (2006): Berliner Verkehrsbetriebe – Ausschreibung für 250 Wasserstoffbusse. Mitteilung vom 24.07.2006, 10:36 Uhr. Internet: www.iwr.de/news.php?id=9007. Zugriff: 9.9.2007

Janssen, Rainer (2006): Markteinführungsstrategien für Bioethanol in Europa. Das EU Projekt BEST. Internet: http://www.bioenergie.de/BKK/2006/Presentations/janssen.pdf. Zugriff: 06.09.2007

Jingguang, Lun (2006): Progress of GEF-UNDP-China Fuel Cell Bus Demonstration Project. Internet: http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/data/File/Downloads%20-%20Public/International%20FCB%20Workshop/Lun_Progress%20of%20GEF-UNDP-China%20Fuel%20Cell%20Bus%20Demonstration%20Project.pdf. Zugriff: 08.10.2007

Jörissen, Ludwig; Garche, Jürgen (2000): Brennstoffzellen für den Fahrzeugantrieb. In: Wengel, Jürgen; Schirmeister, Elna (Hg.): Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle – Chancen und Risiken für die baden-württembergische Industrie. Abschlussbericht. Karlsruhe, Februar 2000, S. 13-48

KBA (Kraftfahrtbundesamt) (2007a): Statistische Mitteilungen. Fahrzeugzulassungen. Bestand, Emissionen, Kraftstoffe am 1. Januar 2007. Internet: www.kba.de/Abt3_neu/FZ/Bestand/Themen_jaehrlich_pdf/b_emissionen_kraftstoffe_2007.pdf. Zugriff: 23.09.2007

KBA (Kraftfahrtbundesamt) (2007b): Methodische Erläuterungen zur Fahrzeugstatistik. Internet: www.kba.de/Abt3_neu/FZ/Meth_Erlaeuterungen_Begriffsbestimmungen_Fahrzeugstatistik.pdf. Zugriff: 06.06.2007

Kirchhoff, Bruce A.; Walsh, Steven T. (2000): Entrepreneurship's Role in Commercialization of Disruptive Technologies, In: Brauchlin, Emil A.; Pichler, Johann H. (Hg.) (2000): Unternehmer und Unternehmensperspektiven für Klein- und Mittelunternehmen: Festschrift für Hans Jobst Pleitner. Berlin: Duncker&Humblot, S. 323-331

Knie, Andreas (1991): Diesel – Karriere einer Technik. Genese und Formierungsprozesse im Motorenbau. Berlin: edition sigma

Knie, Andreas (1994): Wankel-Mut in der Autoindustrie. Anfang und Ende einer Antriebsalternative. Berlin: edition sigma

Knie, Andreas (2003): Die Auto-Bahn: Intermodale Verkehrsdienstleistungen der Deutschen Bahn. In: Canzler, Weert; Schmidt, Gert (Hg.) (2003): Das zweite Jahrhudert des Automobils. Technische Innovationen, ökonomische Dynamik und kulturelle Aspekte. Berlin: edition sigma, S. 141-155

Knie, Andreas (Hg.) (2006): Zukunft 2020. Perspektiven für Chinas Motorisierung. (unveröffentlichte Studie), Berlin: WZB

Konrad, Wilfried; Scheer, Dirk (2003): Systeminnovationen: Begriff, Fallbeispiele, Nachhaltigkeitspotentiale. Internet: www.ioew.de/dienstleistung/publikationen/ Vortrag Wilfried Konrad und Dirk Scheer.pdf. Zugriff: 27.06.2006

Kroy, Walter (1995): Technologiemanagement für grundlegende Innovationen. In: Zahn, Erich (Hg.) (1995): Handbuch Technologiemanagement, Stuttgart: Schäffer-Poeschel, S. 57-80

Leifer, Richard (2005): Radical Innovation and BSAC: Increasing the Chances of Tech Transfer. BSAC Spring 2005 IAB Meeting. Internet: www-bsac.eecs.berkeley.edu/publications/iab_2005_3.ph, Zugriff: 21.08.2006

Leydesdorff, Loet; van den Besselaar, Peter (1998): Competing Technologies: Lock-ins and Lock-outs. In: Dubois, Daniel M. (Hg.): Computing Anticipatory Systems, Proceedings of the American Institute of Physics 437. Woodbury, New York. American Institute of Physics, S. 309-323. Internet: www.leydesdorff.net/casys97/1997liege.pdf

Lifepr (2007): SSB. Stuttgarter Straßenbahnen AG. Bus-Probebetrieb: Den Stickoxiden an den Kragen. Internet: http://www.ssb-ag.de/de/projekte/pr_heute/bus_stickoxide.html. Zugriff: 31.08.2007

Maagbus (2007): Maag Busbetrieb AG. Sauberster Dieselstadtbus im ZVV. Internet: http://www.maagbus.ch/html/pdf/Sauberster%20Dieselstadtbus%20im%20ZVV.pdf. Zugriff: 31.08.2007

MAN (2007a): Kraft und Leistung. MAN Motoren für Fahrzeuge. Internet: http://www.man-engines.com/datapool/mediapool/400/kraft_leistung_d.pdf. Zugriff: 20.6.2007

MAN (2007b): MAN Nutzfahrzeuge Gruppe. HyFLEET: CUTE Wasserstoffprojekt. Internet: http://www.man-mn.com/de/innovationundkompetenz/Umwelt/Alternative_Antriebe/Wasserstoffantrieb/HyFLEET_CUTE_.jsp. Zugriff: 10.09.2007

Mansfield, Edwin (1961): Technical Change and the Rate of Imitation. In: Econometria, Vol. 29, S. 741-766

McKinsey (2006): Drive. The Future of Automotive Poxer. https://autoassembly.mckinsey.com/login.asp?cookies=True&script_name/html/resources/publication/b_DRIVE.asp&reason=denied_empty&Resolution=1024x768. Zugriff: 25.07.2006

Measurcalc (2007): Measurecalc V2.2. – Metrische, englische und amerikanische Maße ineinander umwandeln. Internet: http://jumk.de/calc. Zugriff: 03.08.2008

Mensch, Gerhard (1972): „Basisinnovationen und Verbesserungsinnovationen.“ In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 42: 291-297

Mercedes-Benz (2007a): Der Citaro LE Ü. Die Evolution. Citaro LE Ü, technische Daten. Internet: http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/buses/home/products/new_buses/citaro_le_ue.html. Zugriff: 24.08.2007

Mercedes-Benz (2007b): Bus world, news. UITP-Kongress 2007 in Helsinki. Jubiläum nach nur zehn Jahren: der Citaro Nummer 17 500. Internet: http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/buses/home/bus_world/whats_new/News_2007/UITP_2007.html. Zugriff: 28.08.2007

Mercedes-Benz (2007c): Bus world, news. Citaro LE Ü ist “Bus of the Year 2007”. Preisübergabe auf der IAA-Nutzfahrzeuge 2006 in Hannover. Internet: http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/buses/home/bus_world/whats_new/Omnibus_news_2006/bus_of_the_year.html. Zugriff: 28.08.2007

Micro-Vett (2007): Daily Electric – People Transportation. Technical Data. Internet: http://www.micro-vett.it/english/people2.html. Zugriff: 25.09.2007

Mikroökonomie (2007): Suchbegriff: Rudolf Diesel. Internet: www.xn--mikrokonomie-8ib.de/Rudolf_Diesel.html. Zugriff: 22.06.2007

Ministry of Transportation (2007): News Release. Hydrogen Bus Fleet Contract Awarded. Internet: http://hyfleetcute.com/data/BC_Transit_FC_Bus_Contract_Release.pdf. Zugriff: 08.10.2007

MLVU (Ministerium für ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg) (2007): Luftreinhalte- und Aktionsplan für die Landeshauptstadt Potsdam nach § 47 BImSchG. Potsdam. Internet: http://www.mluv.brandenburg.de/cms/media.php/2328/lrp_pdm.pdf. Zugriff: 31.08.2007

MO87-V5 (2007): MAN Busse mit Wasserstoffverbrennungsmotor. Internet: http://www.mo87.de/?site=1&val=twa&cont=004&sty=2. Zugriff: 12.09.2007

NEOMAN (2005): Fakten 2005. Internet: www.man-mn.com/mn-prod/man2/master/datapool/mediapool/700/Neoman_Fact_Sheet_D_06_72.PDF. Zugriff: 20.07.2007

NEOMAN (2007): Unternehmenspräsentation. Internet: www.man-mn.com/mn-prod/man2/master/datapool/mediapool/700/NEOMAN_Bus_050407_dt.pdf. Zugriff: 12.07.2007

Neoplan (2007): Umweltfreundliche und innovative Stadtbusse von MAN und NEOPLAN. Premiere von neuem Hybrid- und Großraumkonzept auf dem UITP-Kongress in Helsinki. Internet: /www.neoplan.de/de/Media/Press_releases/show_press.jsp?key=6074&print=. Zugriff: 30.08.3007

New Flyer (2007a): Recent News. New Flyer Awarded BC Transit Fuel Cell Bus Order. Internet: http://www.newflyer.com/index/news-app/story.49. Zugriff: 30.08.2007

New Flyer (2007b): Natural Gas Product Specifications. Internet: http://www.newflyer.com/index/natural_gas. Zugriff: 31.08.2007

NGV (2007): TransTeq Transit Bus. Denver 16th Street Mall Bus Rapid Transit. Internet: http://ngv.org/ngv/ngvorg01.nsf/bytitle/TransTeqTransitBus.htm. Zugriff: 21.09.2007

NGVglobal (2007a): Natural Gas Vehicles Global. LAMTA Buy Another 100 Natural Gas Buses. Internet: http://www.ngvglobal.com/market-developments/lamta-buy-another-100-natural-gas-buses-2.html. Zugriff: 04.09.2007

NGVglobal (2007b): Natural Gas Vehicles Global. IVECO Irisbus Scores 60 Bus Deal with Madrid. 30 for Seville & 2 for Burgos too. Internet: http://www.ngvglobal.com/market-developments/iveco-irisbus-scores-60-bus-deal-with-madrid-2.html. Zugriff: 04.09.2007

NGVglobal (2007c): Natural Gas Vehicles Global. Volvo Bus Order to Increase Norwegian CNG Bus Fleet by Almost 50%. Internet: http://www.ngvglobal.com/market-developments/volvo-bus-order-to-increase-norwegian-cng-bus-fleet-by-almos-2.html. Zugriff: 04.09.2007

NGVglobal (2007d): Natural Gas Vehicles Global. Thane Municipal Transport Considering More CNG Buses. Internet: http://www.ngvglobal.com/market-developments/thane-municipal-transport-considering-more-cng-2.html. Zugriff: 04.09.2007

NGVglobal (2007e): Natural Gas Vehicles Global. Compressed Natural Gas Station Inaugurated at Seoul City Hall Under "Clean Seoul 2010" Plan. Internet: http://www.ngvglobal.com/market-developments/compressed-natural-gas-station-inaugurated-at-seoul-city-hall-under-clean-seoul-2010-2.html. Zugriff: 04.09.2007

NGVglobal (2007f): Natural Gas Vehicles Global. First CNG OEM Buses For Pakistan. Internet: http://www.ngvglobal.com/market-developments/first-cng-oem-buses-for-pakistan-2.html. Zugriff: 04.09.2007

Nill, Jan; Konrad, Wilfried (2001): Innovationen für Nachhaltigkeit: ein interdisziplinärer Beitrag zur konzeptionellen Klärung aus wirtschafts- und sozialwissenschaftlicher Perspektive, Berlin: IÖW

NREL (National Renewable Energy Laboratory) (1996): Alternative Fuel Transit Buses. Final Results from the National Renewable Energy Laboratory Vehicle Evaluation Program. Internet: http://www.cleanairnet.org/infopool/1411/articles-35608_altfuel_finalresults.pdf. Zugriff: 07.09.2007

NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2002a). Natural Gas In Transit Fleets. A Review Of The Transit Experience. Internet: http://www.apta.com/research/info/briefings/documents/af_eudy.pdf. Zugriff: 09.11.2007

NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2002b): LNG Turbine Hybrid Electric Buses. Internet: http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/fleettest/pdfs/lng_hybrid_bus.pdf. Zugriff: 23.10.2007

NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2005): Emission Testing of Washington Metropolitan Area Authority (WMATA) Natural Gas and Diesel Transit Buses. Internet: http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/36355.pdf. Zugriff: 31.08.2007

NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2006a): Compressed Natural Gas Transit Bus Evalutaion. Internet: http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/ngvtf/pdfs/37626.pdf. Zugriff: 03.09.2007

NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2006b): New York City Transit. Hybrid and CNG Transit Buses. Internet: http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/fleettest/pdfs/40125.pdf. Zugriff: 03.09.2007

NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2006c): Ten Years of Compressed Natural Gas (CNG) Operations at SunLine Transit Agency. Internet: http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/ngvtf/pdfs/39180.pdf. Zugriff: 04.09.2007

NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2007a): SunLine Transit Agency Hydrogen-Powered Transit Buses: Preliminary Evaluation Results. Internet: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/41001.pdf. Zugriff: 12.09.2007

NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2007b): Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets. Summary of Experiences and Current Status. Internet: http://www.nrel.gov/hydrogen/pdfs/41967.pdf. Zugriff: 02.10.2007

Obus (2007): Öffentlicher Personen Nahverkehr in Deutschland. Der Oberleitungsbus (Obus). Internet: http://www.obus.info/obus/index.htm. Zugriff: 24.09.2007

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (1997): Oslo manual: proposed guidelines for collecting and interpreting technological innovation data. Paris, Washington, D.C.: Organisation for Economic Co-operation and Development/OECD Washington Center Distributor

Omnibusrevue (2007): Omnibusrevue. Sieben Citaros für OVB. Internet: http://www.omnibusrevue.de/sixcms/detail.php?utm_medium=NL&utm_term=OR&utm_content=OR_20070830&utm_campaign=OR&utm_source=NL&id=564829. Zugriff: 31.08.2007

Orionbus (2007a): Products. Orion VII Next Generation. Specifications Orion VII Low Floor. Internet: http://www.orionbus.com/orion/0-867-584131-1-10945-1-0-0-0-0-1-10595-584008-0-0-0-0-0-0-0.html. Zugriff: 17.09.2007

Orionbus (2007b): Products. Orion VII Next Generation. Welcome Aboard the Orion VII Next Generation Hybrid Electric Bus. Internet: http://www.orionbus.com/orion/0-867-892370-1-892386-1-0-0-0-0-1-10595-584008-0-0-0-0-0-0-0.html. Zugriff: 17.09.2007

Padersprinter (2007): Padersprinter. Unternehmen. Umweltschutz. Internet: http://www.padersprinter.de/index.php?navID=49. Zugriff: 31.08.2007

PFI (2007): Papir- og Fiberinstituttet AS: Workshop vid Transportøkonomisk instittut. Internet: http://www.pfi.no/biodrivstoff/2/Foredragene/SEKAB.pdf. Zugriff: 04.09.2007

PGM (Projektgruppe Mobilität) (2004): Die Mobilitätsmaschine. Versuche zur Umdeutung des Autos. Berlin: edition sigma

Roberts, Edward B. (1987): Introduction: Managing Technological Innovation – A Search for Generalizations. In: Roberts, Edward B. (Hg.): Generating Technological Innovation, New York/Oxford: Oxford University Press, S. 3-21

Rödl, Ernst (2006): Nikolaus August Otto legt den Grundstein für die Motorentechnik. Internet: www.deutsches-museum.de/ausstell/meister/otto.htm. Zugriff 08.09.2006

Rösgen, Hans-Jürgen (2006): H2 Berlin 2006-2016 – Der Ausbau laufender Aktivitäten zum nationalen Leuchtturm für Wasserstoff- und Brennstoffzellenapplikationen im Verkehrsbereich. Vortrag, 20.10.2006 in Berlin. Internet: www.nkj-ptj.de/index.php?index=81&print=1&cmd=download&filename=Laendertreffen_Berlin.ppt. Zugriff: 23.09.2007

Saarbahn (2006): Pressemeldungen. Modernste Wasserstofftechnologie für den Verkehrsbereich. Internet: http://www.saarbahn.de/php/presse/pressemeldungen/pressemeldung_view.php?id=983&from=0701&until=0930&year=2006. Zugriff: 11.09.2007

Sahal, D. (1985): Technological guidepost and innovation avenues. In: Research Policy, Vol. 14, S. 61-82

Saviotti P. P. (1996): Technological evolution, variety and the economy. Cheltenham, UK, Brookfield, US: Edward Elgar.

Scania (2007a): Press Info. Scania setzt auch künftig auf erneuerbare Kraftstoffe. Neuer hoch effizienter Diesel-Ethanol-Motor – bereit zur Senkung der fossilen CO2-Emissionen um 90 %. Internet: http://www.scania.de/Images/P07503DE%20Neuer%20Diesel-Ethanol-Motor_tcm125-164153.pdf. Zugriff: 04.09.2007

Scania (2007b): Press Info. Scania zu alternativen Kraftstoffen. Ethanol die beste Alternative für den Stadtverkehr. Internet: http://www.scania.com/Images/P06603DE%20%20Ethanol%20the%20best%20alternative%20fuel_tcm10-130771.pdf. Zugriff: 05.09.2007

Scania (2007c). Press releases 2007, Q2. Scania ethanol buses to improve Oslo environment. Internet: /www.scania.com/news/press_releases/2007/q2/n07043en.asp. Zugriff: 05.09.2007

Scania (2007d): Scania Lkw-, Stadt- und Reisebusmotoren, September 2007. Internet: http://www.scania.com/Images/P07910DE%20Truck%20bus%20coach%20engines%20Sep%202007_tcm10-170469.pdf. Zugriff: 11.09.2007

Scania (2007e): Världspremiär för Scanias etanolhybridbuss. Internet: http://www.scania.se/Images/s.10-13_Elhybriden_tcm136-157119.pdf. Zugriff. 14.09.2007

Scharnhorst, Andrea (2000): Zum Verhältnis von sprunghafter und gradueller Entwicklung, In: Greif, Siegfried; Wölfling, Manfred (Hg.) (2000): Wissenschaft und Innovation. Wissenschaftsforschung Jahrbuch 1999, Berlin: Gesellschaft für Wissenschaftsforschung, S. 81-100

Schubert, Erhard (2003): Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus der Sicht eines Industrieunternehmens. Vortrag. Düsseldorf, 30.09.2003. Internet: http://www.wz.nrw.de/Brennstoffzellen/Schubert%20Pr%E4sentation.pdf#search=%22Vereinte%20Nationen%20Bestand%20an%20Fahrzeugen%22. Zugriff. 27.09.2006

SHISD (Shanghai Huaxia Institute of Social Development) (2005): The Status Quo and its Development of Chinese Automobile Society, Modernization Research Center, (unveröffentlichte Untersuchung)

SL (2007): AB Storstockholms Lokaltrafik. Tekniska fakta – bussar. Internet: http://www.sl.se/templates/Page.aspx?id=1629. Zugriff: 04.09.2007

Smartcommunities (2007): Success Stories. Chattanooga/Hamilton-County, Tennessee. Internet: http://www.smartcommunities.ncat.org/success/chattano.shtml. Zugriff: 09.11.2007

SMUD (Sacramenta Municipal Utility District) (2007): Testing of Electric Busses. SMUD's Program Goals. Internet: http://www.electricdrive.org/index.php?tg=fileman&idx=get&id=3&gr=Y&path=Workshops%2FFlorida+Workshop&file=warf.PDF. Zugriff: 25.09.2007

SR (2006): Sveriges Radio P4 Jämtland. Sprit i tanken ska inte göra bussresan dyrare. Internet: http://www.sr.se/cgi-bin/jamtland/nyheter/artikel.asp?artikel=882738. Zugriff: 06.09.2007

SSB-AG (Stuttgarter Straßenbahnen AG) (2007): Bus-Probebetrieb: Den Stickoxiden an den Kragen. Internet: http://www.ssb-ag.de/de/projekte/pr_heute/bus_stickoxide.html. Zugriff: 31.08.2007

Stan, Cornel (2005): Alternative Antriebe für Automobile: Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger. Berlin u.a.: Fachbuch Springer-Verlag

Stockholm (2007): Miljöbilar i Stockholm. Europa vill köra grönt – efter svenskt exempel. Internet: http://www.stockholm.se/pages/395876/miljobilar_1_2007.pdf. Zugriff: 05.09.2007

SunLine (2007): About SunLine. Agency Overview. Fleet Composition. Internet: http://www.sunline.org/home/index.asp?page=78. Zugriff: 09.11.2007

SVF (Stadtverkehrsgesellschaft Frankfurt/Oder) (2004): Sauberste Busflotte Europas, Nahverkehr tankt nur noch Erdgas / Beispiel für Umweltarbeit. Mitteilung vom 14.12.2004. In: Der Prignitzer, Brandenburger Allgemeine Ausgabe vom 07.04.2003. Internet: www.svf-ffo.de/wir_ueber_uns/content_wir.php. Zugriff.12.9.2007

SWR (Südwestrundfunk) (2003): Umwelt & Verkehr. Brennstoffzellenbusse. Abgasfrei und geräuscharm im Linienverkehr unterwegs. Internet: http://www.swr.de/rasthaus/archiv/2003/11/08/beitrag2.html. Zugriff: 18.09.2007

Tagesschau (2006): Wirtschaft. Alkohol statt Benzin. Billiger Fusel befeuert brasilianische Autos. Internet:

www.tagesschau.de/aktuell/meldungen/0,1185,OID4746454_REF1,00.html. Zugriff: 06.09.2007

Tingyan, Xiao (1990): A Combined Growth Model for Trend Forecasting, In: Technological Forecasting and Social Change, Vol. 38, S. 175-186

Toyota (2005): Toyota Tsusho Corporation. Shell GTL Fuel powers hybrid diesel bus at Aichi Expo, Japan. Internet:www.toyota-tsusho.com/press/en/20050727_2pasttoyotsu.cfm. Zugriff: 14.09.2007

Toyota (2006a): Hybridfahrzeug – Die Definition der UNO. Internet: www.hybridsynergydrive.com/de/un_definition.html. Zugriff: 22.10.2006

Transbus (2007a): Constructeurs. Irisbus/Iveco EuroPolis. Internet: http://www.transbus.org/construc/iveco_europolis.html. Zugriff: 25.09.2007

Transbus (2007b): Constructeurs. Gépébus Oréos 22. Internet: http://www.transbus.org/construc/gepebus_oreos22.html. Zugriff: 25.09.2007

Transbus (2007c): Constructeurs. Gépébus Oréos 55. Internet: http://www.transbus.org/construc/gepebus_oreos55.html. Zugriff: 25.09.2007

Transteq (2001): Fleets and Fuels. Transteq Buses for LAX. Internet: http://www.transteq.com/press_release.asp. Zugriff: 21.09.2007

Trolleymotion (2007): Entwicklung. Geschichte. Internet: http://trolleymotion.com/de/. Zugriff: 28.09.2007

TU-Berlin (2007): HyFLETT: CUTE. Wasserstoffbusse im Berliner Personennahverkehr. Internet: http://www2.tu-berlin.de/foreign-relations/archiv/tui_60/eberwein_tui_60.pdf. Zugriff: 12.09.2007

U.S. Department (2001): Department of Energy. Office of Transportation Technologies: Heavy Vehicle and Engine Resource Guide 2001. Internet: http://www.p2pays.org/ref/38/37599.pdf. Zugriff: 31.08.2007

UBA (Umweltbundesamt) (2007a): Abgasgrenzwerte für Lkw und Busse. Internet: http://www.umweltdaten.de/verkehr/downloads/gwlkzbus.pdf. Zugriff: 04.01.2008

UBA (Umweltbundesamt) (2007b): Abgasgrenzwerte für LKW und Busse (Grenzwerte für die Typprüfung). Internet: www.env-it.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do;jsessionid=CE3793F7341AFCB2899E751D50CD7730?ident=7071). Zugriff: 04.01.2008

UITP (2007): International Association of Public Transport. Homepage. Internet: http://www.uitp.org/index.cfm. Zugriff: 30.08.2007

Users (2007): Lucas Leads. Retired Lucas employee H. B. Homer provides us with an insight to Lucas' place in the development of electric vehicles. Internet: http://www.users.myisp.co.uk/~climengs/lucas/lucas.htm. Zugriff: 25.09.2007

USmayors (2007): City Of Chattanooga/Hamilton County, Tennessee. Reducing Energy Use. Internet: http://www.usmayors.org/uscm/best_practices/bp97/12_1997_Reducing_Energy_Use.htm. Zugriff: 09.11.2007

VAG (Verkehrs-AG Nürnberg) (2007): Mit dem Bus unterwegs. Die Nürnberger Busse. Internet: http://www.vag.de/barrierefrei.php?pid=45. Zugriff: 31.08.2007

Valleycleancities (2001). San Joaquin Valley Clean Cities Coalition. CNG-Hybrid Bus Fleet Enters Service in Denver. Internet: http://www.valleycleancities.org/Articles/04122001C.html. Zugriff: 18.09.2007

VBZ (Verkehrsbetriebe Zürich) (2006): VBZ kaufen 17 Doppelgelenk-Trolleybusse. Pressemitteilung, 29. März 2006. Internet: http://www.vbz.ch/vbz_opencms/export/system/galleries/download/Communiques06/060329_Ergebnis_Testbetrieb_DGT.pdf. Zugriff: 08.02.2008

VDA (Verband der Automobilindustrie e.V.) (2004): Auto Jahresbericht 2004. Internet: www.vda.de/de/service/jahresbericht/files/VDA_2004.pdf. Zugriff: 04.07.2007

VDA (Verband der Automobilindustrie e.V.) (2005): Auto Jahresbericht 2005. Internet: www.vda.de/de/service/jahresbericht/files/VDA_2005.pdf. Zugriff: 04.07.2007

VDL (2007): Pressekonferenz. Bilanz – CUTE / HyFLEET:CUTE. Internet: http://www.vdl.lu/Environnement+et+mobilit%C3%A9/Autobus/Mus%C3%A9e+de+tramways+et+de+bus/HyFLEET_CUTE+_+Bus+%C3%A0+pile+%C3%A0+combustible/Bilanz.html. Zugriff: 08.10.2007

VDV (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen) (2007): Sparte Bus. VDV Mitgliedsunternehmen mit Busverkehr. Stand 12/2007. Internet: www.vdv.de. Zugriff: 01.02.2008

Wasserstoffverband (2005): Neoman Bus Gruppe. Mobile Zukunft mit alternativen Antrieben. Die saubere Lösung für den ÖPNV. Internet: http://www.wasserstoffverband.at/index.php?id=12&detail=118. Zugriff: 08.10.2007

Weider, Marc; Marz, Lutz (2005): Quantensprung oder Sackgasse? Zum Stand und den Entwicklungsperspektiven der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in der Automobilindustrie. In: Rammler, Stephan; Weider, Marc (Hg.): Wasserstoffauto – Zwischen Markt und Mythos, Münster: LIT Verlag, S. 9-33

Wiener Umweltbericht (2003): Mobil in Wien – öffentlicher Verkehr. Internet: www.wien.gv.at/umweltschutz/umweltbericht/pdf/oeffentlich.pdf. Zugriff: 19.9.2007

Wiki (2007). OEM-Autogas-Fahrzeuge. Übersichtsseite der Autogas-Fahrzeuge in OEM-Ausführung (mit ab Werk installierte Gasanlage). Internet: http://wiki22.parsimony.net/cgi-bin/wiki/program/db-view.cgi?wiki41640;OEMAutogasFahrzeuge#21. Zugriff: 30.08.2007

Wikipedia (2007a): Suchbegriff: Gyrobus. Internet: http://de.wikipedia.org/wiki/Gyrobus. Zugriff: 24.09.2007

Wikipedia (2007b): Suchbegriff: Omnibus. Internet: http://de.wikipedia.org/wiki/Omnibus. Zugriff: 24.09.2007

Wikipedia (2007c): Suchbegriff: Oberleitungsbus. Internet: http://de.wikipedia.org/wiki/Oberleitungsbus. Zugriff: 24.09.2007

Wikipedia (2007d): Suchbegriff: Landauer (Omnibus). Internet: http://de.wikipedia.org/wiki/Landauer_%28Omnibus%29. Zugriff: 24.09.2007

Wikipedia (2008a): Suchbegriff: Wiener Linien. Internet: http://de.wikipedia.org/wiki/Wiener_Linien. Zugriff: 12.01.2008

Wikipedia (2008b): Suchbegriff: Fleet of the LACMTA. Internet: http://en.wikipedia.org/wiki/Fleet_of_the_LACMTA. Zugriff: 12.01.2008

Wright, Sewall (1932): The Roles of Mutation, Inbreeding, Crossbreeding and Selection in Evolution. In: Proceedings of the VIth International Congress of Genetics (Ithaka, New York). I, 6, S. 356-366

Veröffentlichungsreihe der Abteilung „Innovation und Organisation“

des Forschungsschwerpunktes Organisationen und Wissen am Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung

elektronisch verfügbar unter:
http://www.wzb.eu/publikation/discussion_papers/liste_discussion_papers.de.htm

1999

FS II 99-101	Emily Udler, Israeli Business in Transition, 45 S.
FS II 99-102	Mark B. Brown, Policy, design, expertise, and citizenship: Revising the California electric vehicle program, 49 S.
FS II 99-103	Stefan Bratzel, Umweltorientierter Verkehrspolitikwandel in Städten. Eine vergleichende Analyse der Innovationsbedingungen von „relativen Erfolgsfällen“, 74 S.

2000

FS II 00-101	Sabine Helmers, Ute Hoffmann & Jeanette Hofmann. Internet ... The Final Frontier: An Ethnographic Account. Exploring the cultural space of the Net from the inside, 124 S.
FS II 00-102	Weert Canzler und Sassa Franke, Autofahren zwischen Alltagsnutzung und Routinebruch. Bericht 1 der choice-Forschung, 26 S.
FS II 00-103	Mikael Hård und Andreas Knie, Getting Out of the Vicious Traffic Circle: Attempts at Restructuring the Cultural Ambience of the Automobile Throughout the 20th Century, 20 S.
FS II 00-104	Ariane Berthoin Antal, Ilse Stroo and Mieke Willems, Drawing on the Knowledge of Returned Expatriates for Organizational Learning. Case Studies in German Multinational Companies. 47 S.
FS II 00-105	Ariane Berthoin Antal und Meinolf Dierkes, Organizational Learning: Where Do We Stand? Where Do We Want to Go?, 33 S.

2001

FS II 01-101	Katrin Böhling, Zur Bedeutung von „boundary spanning units“ für Organisationslernen in internationalen Organisationen, 34 S.

2002

FS II 02-101	Ute Hoffmann und Jeanette Hofmann, Monkeys, Typewriters and Networks. The Internet in the Light of the Theory of Accidental Excellence, 24 S.

FS II 02-102 Ute Hoffmann, Themenparks re-made in Japan. Ein Reisebericht, 26 S.

FS II 02-103 Weert Canzler & Sassa Franke, Changing Course in Public Transport: The Car as a Component of Competitive Services. Choice-Research, Report No. 2, 58 S.

FS II 02-104 Weert Canzler & Sassa Franke, Mit cash car zum intermodalen Verkehrsangebot. Bericht 3 der choice-Forschung, 67 S.

FS II 02-105 Ariane Berthoin Antal, Meinolf Dierkes, Keith MacMillan & Lutz Marz, Corporate Social Reporting Revisited, 32 S.

FS II 02-106 Martin Gegner, Die Wege des urbanen Verkehrs zur Daseinsvorsorge, 63 S.

FS II 02-107 Meinolf Dierkes, Lutz Marz & Ariane Berthoin Antal, Sozialbilanzen. Konzeptioneller Kern und diskursive Karriere einer zivilgesellschaftlichen Innovation, 18 S.

FS II 02-108 Christiana Weber & Barbara Weber, Learning in and of Corporate Venture Capital Organizations in Germany. Industry structure, companies' strategies, organizational learning capabilities, 19 S.

FS II 02-109 Jeanette Hofmann unter Mitarbeit von Jessica Schattschneider, Verfahren der Willensbildung und Selbstverwaltung im Internet – Das Beispiel ICANN und die At-Large-Membership, 155 S.

FS II 02-110 Kathrin Böhling, Learning from Environmental Actors about Environmental Developments. The Case of International Organizations, 40 S.

FS II 02-111 Astrid Karl, Öffentlicher Verkehr im künftigen Wettbewerb. Wie ein inkonsequenter Ordnungsrahmen und überholte Finanzierungsstrukturen attraktive öffentliche Angebote verhindern, 60 S.

FS II 02-112 Thomas Sauter-Servaes & Stephan Rammler, Delaytainment an Flughäfen. Die Notwendigkeit eines Verspätungsservices und erste Gestaltungsideen, 83 S.

FS II 02-113 Ariane Berthoin Antal & Meinolf Dierkes, Organisationslernen und Wissensmanagement: Überlegungen zur Entwicklung und zum Stand des Forschungsfeldes, 39 S.

FS II 02-114 Ariane Berthoin Antal & Meinolf Dierkes, On the Importance of Being Earnest about Business: Overcoming liberal arts students' misconceptions about leadership in corporate change processes, 31 S.

FS II 02-115 Daniela Zenone, Das Automobil im italienischen Futurismus und Faschismus. Seine ästhetische und politische Bedeutung, 72 S.

2003

SP III 03-101 Ariane Berthoin Antal & Victor Friedman, Negotiating Reality as an Approach to Intercultural Competence, 35 S.

SP III 03-102 Ariane Berthoin Antal, Camilla Krebsbach-Gnath & Meinolf Dierkes, Hoechst Challenges Received Wisdom on Organizational Learning,

36 S.

SP III 03-103 Ariane Berthoin Antal & Jing Wang. Organizational Learning in China: The Role of Returners, 29 S.

SP III 03-104 Jeanette Hofmann, Die Regulierung des Domainnamensystems – Entscheidungsprozess und gesellschaftliche Auswirkungen der Einrichtung neuer Top Level Domains im Internet, 122 S.

SP III 03-105 Oliver Schöller & Stephan Rammler, „Mobilität im Wettbewerb“ Möglichkeiten und Grenzen integrierter Verkehrssysteme im Kontext einer wettbewerblichen Entwicklung des deutschen und europäischen Verkehrsmarktes – Begründung eines Forschungsvorhabens, 35 S.

SP III 03-106 Falk Berndt & Hermann Blümel, ÖPNV quo vadis? Aufforderung zu verkehrspolitischen Weichenstellungen im ÖPNV, 73 S.

SP III 03-107 Tobias Wölfle und Oliver Schöller, Die kommunale „Hilfe zur Arbeit“ im Kontext kapitalistischer Arbeitsdisziplinierung, 26 S.

SP III 03-108 Markus Petersen, Multimodale Mobilutions und Privat-Pkw, Ein Vergleich auf Basis von Transaktions- und monetären Kosten. Bericht 4 der choice-Forschung, 41 S.

SP III 03-109 Ariane Berthoin Antal & Victor J. Friedman, Learning to Negotiate Reality: A Strategy for Teaching Intercultural Competencies, 33 S.

SP III 03-110 Ute Hoffmann (Hg.), Reflexionen der kulturellen Globalisierung. Interkulturelle Begegnungen und ihre Folgen. Dokumentation des Kolloquiums „Identität-Alterität-Interkulturalität. Kultur und Globalisierung“ am 26./27. Mai 2003 in Darmstadt, 183 S.

SP III 03-111 Christiana Weber, Zeit und Zeitkompensation in der Entstehung und Entwicklung von Organisationskultur, 41 S.

SP III 03-112 Gerhard Prätorius & Christian Wichert, Integrierte Verkehrspolitik als Realtypus – mehr als die Summe von Teillösungen?, 60 S.

SP III 03-113 Christiana Weber & Barbara Weber, Corporate Venture Capital Organizations in Germany. A Comparison, 46 S.

SP III 03-114 Marc Weider, André Metzner & Stephan Rammler, Die Brennstoffzelle zwischen Umwelt-, Energie- und Wirtschaftspolitik. Darstellung der öffentlichen Förderprogramme für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Deutschland, der Europäischen Union, den USA und Japan, 77 S.

SP III 03-115 Martin Gegner, Crash, Boom, Bang – Reload. Metamorphosen eines Softwareprojekts in Zeiten des New Economy-Hypes, 32 S.

SP III 03-116 Ying Zhu, Leapfrogging into Hydrogen Technology: China’s 1990-2000 Energy Balance, 43 S.

SP III 03-117 Maria Oppen, Detlef Sack & Alexander Wegener, Innovationsinseln in korporatistischen Arrangements. Public Private Partnerships im Feld sozialer Dienstleistungen, 61 S.

2004

SP III 04-101 Marc Weider, André Metzner & Stephan Rammler, Das Brennstoffzellen-Rennen. Aktivitäten und Strategien bezüglich Wasserstoff und Brennstoffzelle in der Automobilindustrie, 137 S.

SP III 04-102 Ariane Berthoin Antal, The Centrality of ‚Between' in Intellectual Entrepreneurship, 27 S.

SP III 04-103 Martin Gegner, Die Auto-Referenz des öffentlichen Nahverkehrs – Selbst-, Konkurrenz- und Kundenbild im Marketing des Verbands Deutscher Verkehrsbetriebe, 102 S.

SP III 04-104 Holger Straßheim, Power in intercommunal knowledge networks. On the endogenous dynamics of network governance and knowledge creation, 37 S.

SP III 04-105 Marc Weider, China – Automobilmarkt der Zukunft? – Wie nachhaltig und zukunftsorientiert sind die Strategien der internationalen Automobilindustrie in China?, 73 S.

SP III 04-106 Ariane Berthoin Antal & Victor J. Friedman, Overcoming dangerous learning: The role of critical reflection in cross-cultural interactions, 26 S.

SP III 04-107 Felix Beutler, Intermodalität, Multimodalität und Urbanibility – Vision für einen nachhaltigen Stadtverkehr, 36 S.

SP III 04-108 Gerhard Prätorius & Christian Wichert, Die Ergänzung der Haushalts- durch Nutzerfinanzierung von Verkehrsinfrastrukturen, 36 S.

SP III 04-109 Hermann Blümel, Mobilitätsdienstleister ohne Kunden. Kundenorientierung im öffentlichen Nahverkehr, 114 S.

SP III 04-110 Maria Brie & Hagen Pietzcker, NGOs in China – Die Entwicklung des Dritten Sektors, 53 S.

SP III 04-111 Anke Borcherding, Strategies, Programs, and Projects Pertaining to Policy on Transport. Research in Selected European States, the United States, and Japan (Short title: "SmartBench") Final Report on Sweden, 50 S.

SP III 04-112 Ariane Berthoin Antal & André Sobczak, Beyond CSR: Organizational Learning for Global Responsibility, 41 S.

2005

SP III 05-101 Martin Lengwiler, Probleme anwendungsorientierter Forschung in den Sozialwissenschaften am Beispiel der Ausgründung "choice", 59 S.

SP III 05-102 Maria Brie, Prozesse politischer Entscheidungsfindung in China. Die „Vierte Führungsgeneration", 58 S.

SP III 05-103 Miriam Barnat, Lernen und Macht in einer Non-Profit Organisation,

50 S.

SP III 05-104 Roman Pernack, Öffentlicher Raum und Verkehr. Eine sozialtheoretische Annäherung, 46 S.

SP III 05-105 Ying Zhu, Energy and Motorization. Scenarios for China's 2005-2020 Energy Balance, 64 S.

SP III 05-106 Weert Canzler & Andreas Knie, Demografische und wirtschaftsstrukturelle Auswirkungen auf die künftige Mobilität: Neue Argumente für eine neue Wettbewerbsordnung im Öffentlichen Verkehr, 35 S.

SP III 05-107 Christiana Weber, Corporate Venture Capital als Beitrag zum Wissensmanagement – eine vergleichende Langzeitstudie in Deutschland, 55 S.

2006

SP III 06-101 Christian Maertins, Die Intermodalen Dienste der Bahn: Mehr Mobilität und weniger Verkehr? Wirkungen und Potenziale neuer Verkehrsdienstleistungen, 79 S.

SP III 06-102 Kathrin Böhling, Tanja Busch, Ariane Berthoin Antal & Jeannette Hofmann, Lernprozesse im Kontext von UN-Weltgipfeln. Die Vergesellschaftung internationalen Regierens, 34 S.

SP III 06-103 Martini, Stefan, Gibt es ein subjektives Recht auf öffentlichen Verkehr? Grundrechte statt Daseinsvorsorge, 61 S.

2007

SP III 07-101 Ariane Berthoin Antal, Maria Oppen & André Sobczak, (Re)discovering the social responsibility of business in Germany, 33 S.

SP III 07-102 Thomas Aigle, Lutz Marz, Automobilität und Innovation. Versuch einer interdisziplinären Systematisierung, 112 S.

SP III 07-103 Stefan Kirchner, Maria Oppen, Das Ende der Reorganisationsdynamik? High Performance Work Practices als Muster der Reorganisation in Deutschland, 50 S.

SP III 07-104 Oliver Schöller, Urbanität und Mobilität. Residenzwahl in der Zweiten Moderne, 24 S.

SP III 07-105 Thomas Aigle, Philipp Krien, Lutz Marz, Die Evaluations-Matrix. Ein Tool zur Bewertung antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen in der Automobilindustrie, 108 S.

SP III 07-106 Thomas Aigle, Holger Braun-Thürmann, Lutz Marz, Kerstin Schäfer, Marc Weider, Mobil statt fossil. Evaluationen, Strategien und Visionen einer neuen Automobilität, 38 S.

SP III 07-107 Jeanette Hofmann, Wandel von Staatlichkeit in digitalen Namensräumen – Zwischen Hierarchie und Selbstregulierung, 75 S.

Bei Ihren Bestellungen von WZB-Papers schicken Sie bitte unbedingt einen an Sie adressierten **Aufkleber** *mit, sowie* ***je Paper*** *eine* ***Briefmarke im Wert von Euro 0,55*** *oder einen "****Coupon Réponse International****" (für Besteller aus dem Ausland).*

Please send a ***self-addressed label*** *and* ***postage stamps in the amount of 0,55 Euro*** *or a* ***"Coupon-Réponse International"*** *(if you are ordering from outside Germany) for* ***each*** *WZB-Paper requested.*

Bestellschein ***Order Form***

Absender ● Return Address:

Wissenschaftszentrum Berlin
für Sozialforschung gGmbH
INFORMATION UND KOMMUNIKATION
Reichpietschufer 50

D-10785 Berlin

Hiermit bestelle ich folgende(s) Discussion Paper(s) ● Please send me the following Discussion Paper(s) ***Autor(en) / Kurztitel ● Author(s) / Title(s) in brief***	**Bestellnummer ● Order no.**