

2 Methodische und technologische Grundlagen

Als Basis für die spätere Modellentwicklung zur Technologiebewertung innovativer Systeme im Busverkehr werden zunächst die methodischen Ansätze erläutert. Gemäß der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit bedarf es hierzu einer geeigneten Kostenbetrachtung der Systeme unter Berücksichtigung zukünftiger Unsicherheiten. In diesem Kontext werden ein Gesamtkostenansatz und ein Prognoseverfahren zur Abbildung potenzieller Kostenentwicklungen vorgestellt. Es folgt die Einführung in die Modellierung von Standortentscheidungen für die spätere Systemauslegung der Ladeinfrastruktur und Fahrzeuge. Im zweiten Abschnitt werden die technologischen Grundlagen dargelegt. Die durchgeführte Marktanalyse zu Stadtbussen und die Bewertung der Marktchancen elektrischer Bussysteme stellen den Ausgangspunkt für die Untersuchung der Kostendegressionen dar. Anschließend folgen eine detaillierte Beschreibung elektrischer Fahrzeugkonzepte im urbanen Busverkehr und die Eingrenzung der Konzepte für die Technologiebewertung. Nach dem Grundlagenteil werden der Forschungsbedarf spezifiziert und die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit anhand dreier Schwerpunkte konkretisiert.

2.1 Methodische Grundlagen für die Bewertung komplexer Systeme im Busverkehr

Die Grundzüge eines *Total-Cost-of-Ownership*-Konzepts werden nachfolgend als Modellansatz für die technisch-wirtschaftliche Bewertung elektrischer Bussysteme beschrieben. Des Weiteren wird als Prognoseverfahren zukünftiger Kostenentwicklungen der Erfahrungskurvenansatz eingeführt. Die methodischen Grundlagen zur Systemauslegung sind der Standort- und Tourenplanung zuzuordnen; geeignete Ansätze werden aus beiden Bereichen vorgestellt.

2.1.1 Einführung in die Lebenszykluskostenbetrachtung

Die besondere Bedeutung von Kosten, die im Gegensatz zu Einkaufspreis, Installation etc. nicht direkt mit der Anschaffung eines Investitionsgutes verbunden sind, hat den Fokus bei Beschaffungsentscheidungen auf eine Gesamtkostenbetrachtung gegenüber einer solitären Betrachtung der reinen Anschaffungskosten verlagert. Die verbesserte Verfügbarkeit von detaillierten Kostendaten, bedingt durch leistungsfähige Controlling- und Informationstechniksysteme, und steigende Kosten aus der Nutzung von Anlagen und Maschinen (z. B. Energiekosten) verstärken die Motivation von Unternehmen und In-

dustrieverbänden, sich intensiver mit lebenszyklusbasierten Modellen zur Entscheidungsfindung zu befassen.¹³ Das *Total-Cost-of-Ownership*-(TCO)-Konzept zählt zu den wichtigsten Instrumenten des strategieorientierten Kostenmanagements und kann branchenunabhängig als Werkzeug zur Unterstützung von mittel- und langfristigen Beschaffungsentscheidungen genutzt werden.¹⁴

In der Literatur sind diverse Definitionen des Terminus TCO zu finden. Gemäß Geissdörfer et al. (2009) lautet das Ziel des TCO-Ansatzes, eine „vollständige und präzise Erfassung der mit einer Investition verbundenen Kosten zu ermöglichen und damit als fundierte Entscheidungshilfe für den Einkauf zu dienen.“¹⁵ Ellram (1993a) definiert das TCO-Konzept als ein Werkzeug für den Einkauf sowie eine innovative Philosophie mit dem Ziel, ein Verständnis für die wahren Geschäftskosten (*true cost*), bedingt durch den Erwerb eines bestimmten Gutes oder einer Dienstleistung von einem bestimmten Lieferanten, zu entwickeln. Der komplexe Ansatz beinhaltet, die Gesamtkostenbestimmung einer Investition von der Akquisition über Betrieb und Wartung bis zur Entsorgung des Gutes.¹⁶ Nach Wild und Herges (2000) zeichnen sich TCO-Konzepte durch die Schaffung von Transparenz bezüglich der indirekten Kosten eines Systems und einem Bewusstsein für die Kostenstruktur aus.¹⁷ Neben vielen weiteren Begriffsdefinitionen, teilweise geprägt durch spezifische Branchenanwendungen, beschreiben Zachariassen und Arlbjørn (2011) den gemeinsamen Nenner des TCO-Verständnisses als die Nutzung von TCO zur Fokussierung auf indirekte Beschaffungskosten sowie Lebenszykluskosten, die aus der Durchführung von Transaktionen mit Lieferanten resultieren.¹⁸

Ellram und Siferd (1993) können erste Erwähnungen eines TCO-Denkens auf das Jahr 1927/1928 datieren, festgehalten in der Einkaufsmanagement-Literatur (*procurement management*) von Borsodi (1927) und Harriman (1928). Verbreitete Anwendung fand das Konzept schließlich Anfang der 1960er-Jahre, als stetig wachsende Betriebskosten des US-Verteidigungsministeriums zu einer intensiveren Betrachtung der Gesamtkosten einer Investition unter Verwendung des Ansatzes der Lebenszykluskostenrechnung bei

¹³ Vgl. Geissdörfer et al. (2009), S. 694

¹⁴ Vgl. Götze und Weber (2008), S. 249

¹⁵ Geissdörfer et al. (2009), S. 694

¹⁶ Vgl. Ellram (1993a), S. 49

¹⁷ Vgl. Wild und Herges (2000), S. 6

¹⁸ Vgl. Zachariassen und Arlbjørn (2011), S. 450

Einkaufsentscheidungen führten.¹⁹ Ein Jahrzehnt später nutzten den TCO-Ansatz dann zahlreiche Behörden in den USA für die Analyse, Planung, Konstruktion und Umsetzung von Bauvorhaben und anderen Investitionsentscheidungen zur Bewertung der kumulierten Kosten.²⁰ Ab den 1980er-Jahren wurde der TCO-Ansatz verstärkt zur Kostenbewertung im Bereich Informationstechnik eingesetzt. Besondere Aufmerksamkeit erlangte der Bewertungsansatz im Jahr 1987 durch das Beratungsunternehmen Gartner Group und dessen Entwicklung eines spezifischen Modells zur Kostenanalyse von IT-Systemen. Erste Anwendungen einer Lebenszyklusbetrachtung abseits reiner Beschaffungsentscheidungen im Einkauf sind auf Brown (1979) zurückzuführen²¹, indem der sinnvolle Einsatz von Bewertungsanwendungen im Bereich des Marketings von Industriegütern beschrieben wird. Als besonders prädestinierte Güter bzw. Produkte für den Einsatz einer Lebenszykluskostenanalyse benennt er neben Agrarmaschinen sowie Heiz- und Klimatisierungssysteme u. a. auch Busse für den Personenverkehr.²² Durch die gezielte weitere Anwendung im Vertrieb sind schließlich in den 1990er-Jahren erste Weiterentwicklungen des TCO-Konzepts entstanden, die den Nutzen, der nicht durch eine direkte monetäre Größe zu erfassen ist, für den Endverbraucher in den Fokus der Gesamtkostenbetrachtung stellen. Substanzielle Beiträge zu diesem sogenannten *Total-Value-of-Ownership*-(TVO)-Konzept wurden durch Cavinato (1992) sowie Hurkens und Wynstra (2004) erbracht.

Neben Anwendungen von Lebenszykluskostenbewertungen in den oben genannten Funktionsbereichen Einkauf, Marketing, Vertrieb sind darüber hinaus Einsätze in Entwicklung, Produktion und Controlling möglich. Geißdörfer (2009) konnte darüber hinaus basierend auf einer Befragung internationaler Unternehmen feststellen, dass die Zentralfunktionen bzw. Geschäftsleitungen sich in der Zusammenstellung des Projektportfolios maßgeblich von TCO-Analysen leiten lassen. Dies trifft insbesondere auf Investitions- und Make-or-Buy-Entscheidungen sowie auf Risikoprojekte zu.²³ Zusammenfassend können unter Berücksichtigung der einschlägigen Literatur die folgenden hauptsächlichen Einsatzgebiete für TCO-Konzepte identifiziert werden²⁴:

¹⁹ Vgl. Ellram und Siferd (1993), S. 163ff

²⁰ Vgl. Geißdörfer (2009), S. 55

²¹ Vgl. Geissdörfer et al. (2009), S. 696

²² Vgl. Brown (1979), S. 109

²³ Vgl. Geißdörfer (2009), S. 324

²⁴ Siehe hierzu Blanchard (1978); Dhillon (2010); Lamar (1981); Robert-Seldon (1979)

- Vergleich von Produktionskonzepten
- langfristige Planung und Budgetierung
- Vergleich konkurrierender Projekte
- Controlling laufender Projekte
- Vergleich von Logistikkonzepten
- Lieferantenauswahl
- Bestimmung von Kostentreibern
- Unterstützung bei strategischen Entscheidungen (z. B. Outsourcing)
- Bewertung innovativer Technologien
- Vergleich von System- und Produktprofilen (hinsichtlich der Nutzung und Umwelteinflüsse)

Ähnliche Instrumente des strategieorientierten Kostenmanagements, die dem Bewertungsansatz des TCO ähneln, sind Life-Cycle-Costing (LCC), Zero-Base Pricing, Wertanalysen und Kosten-Benchmarking.²⁵ Begriffliche Abgrenzungen zwischen den genannten Konzepten sind zum Teil schwierig und nicht immer eindeutig möglich, da die Grenzen oftmals fließend verlaufen. Insbesondere das LCC-Konzept und der beschriebene TCO-Ansatz weisen große Ähnlichkeiten auf und werden in der Literatur zum Teil synonym verwendet.²⁶ Darüber hinaus werden die Konzepte TCO und LCC in der praxisnahen Literatur häufig kongruent angewendet; eine Unterscheidung nach Konzepteinsatz erfolgt vielfach nicht.²⁷ Eine strikte Abgrenzung von LCC und TCO ist unter Berücksichtigung der Zielsetzung einer Kostenanalyse aus der Kundenperspektive der vorliegenden Arbeit nicht zielführend und wird im weiteren Verlauf daher auch nicht weiter thematisiert. Insbesondere im Kontext der Kostenbewertung alternativer Fahrzeugkonzepte wird der Terminus TCO in der jüngsten Literatur als Synonym für die ganzheitliche Kostenbetrachtung aufgefasst und entsprechend in dieser Arbeit verwendet.²⁸ Ferner werden die Begriffe Lebenszykluskosten und TCO nachfolgend gleichbedeutend verwendet.

²⁵ Vgl. Ellram (1995), S. 5; Geißdörfer (2009), S. 14. In der Literatur sind die Begriffe und Definitionen von TCO und LCC uneinheitlich dargestellt. Es sind zwei hauptsächliche Auffassungen wahrzunehmen: Ein Teil der Autorenschaft nutzt die Begriffe gleichbedeutend wie Heilala et al. (2006) und White (2006), ein anderer Teil sieht TCO als Übermenge von LCC wie Ellram (1995).

²⁶ Vgl. Ferrin und Plank (2002), S. 18; Geißdörfer (2009), S. 19

²⁷ Siehe hierzu u. a. Götze und Weber (2008); Heilala et al. (2006)

²⁸ Vgl. Kreyenberg (2016), S. 7069; siehe hierzu u. a. Plötz et al. (2014); Propfe et al. (2012)

Die Diversität bezüglich der Motivation und der Einsatzgebiete zur TCO-Anwendung beruht auf dem Nutzen einer gesamtheitlichen und weitsichtigen Kostenoptimierung, die mit dem Konzept einhergeht. Die Betrachtung der initialen Kosten einer Anschaffung als Fragment der Gesamtkosten und die präzise Erfassung der entstehenden Kosten über den Lebenszyklus eines Produktes dienen der Schaffung von Transparenz und unterstützt die Entscheidungsfindung. Die Abbildung 2-1 veranschaulicht die Kostenverteilung über den Produktlebenszyklus eines Gutes. Die Folgekosten nach Erwerb, insbesondere die Betriebskosten, übersteigen in vielen Fällen den ursprünglichen Anschaffungspreis und können sich beispielsweise bei Maschinen und Anlagen auf das Fünf- bis Zehnfache des Einkaufspreises belaufen.²⁹

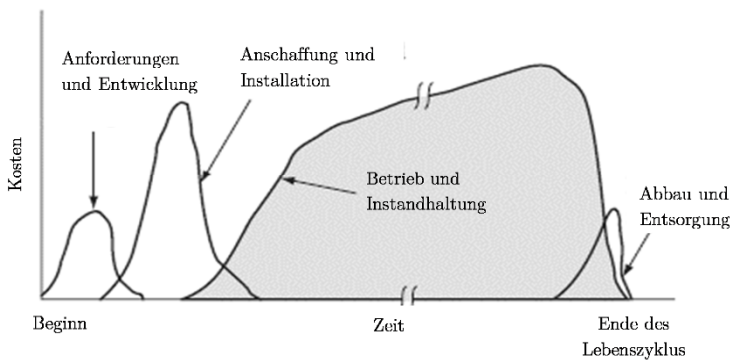


Abbildung 2-1: Verteilung der Kosten über die Phasen des Produktlebenszyklus³⁰

Die im Rahmen eines TCO-Modells zu betrachtenden Kosten können hierbei sehr unterschiedlich sein und variieren je nach Motivation des Anwenders, Einsatzgebiet und Betrachtungsobjekt. In der Literatur hat sich die Strukturierung eines TCO-Modells in drei Stufen etabliert (siehe Abbildung 2-2). Hiernach besteht das Gesamtmodell aus diversen Kostenkategorien, die wiederum untergliedert sind nach unterschiedlichen Kostenelementen bzw. Kostentreibern (*cost driver*). Der Begriff Kostentreiber wird vor allem in der englischsprachigen Literatur genutzt und ist gleichbedeutend mit dem Begriff Kostenelement zu verstehen.³¹

²⁹ Vgl. Geißdörfer (2009), S. 1

³⁰ Vgl. Blank und Tarquin (2012), S. 163

³¹ Vgl. Bremen (2010), S. 34

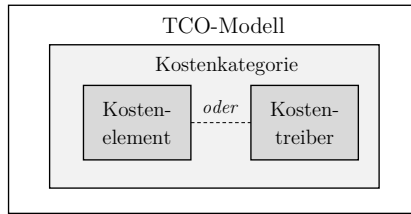


Abbildung 2-2: Kostenstruktur eines TCO-Modells³²

Eine Übersicht zu möglichen Kostentreibern bietet die von Ferrin und Plank (2002) durchgeführte Studie unter Verbandsmitgliedern des *Institute for Supply Management*. Durch die Befragung konnten 135 unterschiedliche Kostentreiber identifiziert werden, die den folgenden dreizehn Kostenkategorien zugeordnet wurden: Betriebskosten, Qualität, Logistik, Technologie, Lieferanzuverlässigkeit und -kapazität, Wartung, Lagerhaltung, Transaktionskosten, Lebenszykluskosten, Einkaufspreis, kundenbezogene Kosten, Opportunitätskosten und Verschiedenes.³³ Die tatsächlich verwendeten Kostenkategorien in einem Modell sind jedoch abhängig vom Untersuchungsobjekt sowie von der Zielsetzung und können empirisch ermittelt oder an definierte Regeln geknüpft werden.³⁴

Bei der Verwendung von TCO-Modellen wird in der Literatur zwischen Standard- und Individualmodellen differenziert. Eine Übersicht zu Empfehlungen zur Verwendung von Standard- und Individualmodellen ist in der folgenden Tabelle 2-1 aufgezeigt. Während Standardmodelle dieselben Kostenkategorien für jeden Kauf in einem standardisierten Format nutzen, sodass strukturelle Modellmodifikationen vermieden werden, wird bei individuellen Modellen für jede spezifische Beschaffungsentscheidung ein Modell entwickelt. Standardmodelle eignen sich vor allem bei sich häufig wiederholenden Einkäufen und zeichnen sich durch eine hohe Benutzerfreundlichkeit aus. White (2006) und Geißdörfer (2009) weisen auf die mögliche Zeitersparnis und bessere Vergleichbarkeit bei Verwendung des gleichen TCO-Modells im Einkauf und im Vertrieb hin. Die Kenntnis der

³² Vgl. Bremen (2010), S. 34

³³ Vgl. Ferrin und Plank (2002), S. 24ff

³⁴ Vgl. Geißdörfer (2009), S. 104; Kostenkategorien können beispielsweise anhand der Höhe ihres Kostenanteils an den Gesamtkosten selektiert werden.

Einkaufsentscheidungskriterien bietet zudem dem Lieferanten die Möglichkeit seine Produktangebote zu optimieren.³⁵ Unter Berücksichtigung von Unternehmens- und Branchenspezifika sind von Industrie- und Verbandsseite erste Standardmodelle u. a. vom VDMA (34160)³⁶, VDI (2884)³⁷ sowie der DIN³⁸ entstanden.

Ein individuelles Modell hingegen kommt dann zum Einsatz, wenn große Unterschiede bei den betrachteten Beschaffungsentscheidungen existieren und die Forderung nach Flexibilität bei der Kostenmodellierung aufkommt. Ein Individualmodell kann zwar auf Basis vorgegebener Kostenkategorien wie Liefer- und Betriebskosten entstehen; die einzelnen Kostenelemente der Kategorien werden jedoch fallbezogen von dem Nutzer ausgewählt. Das individualisierte Modell ist daher für eine spezifische Beschaffung ausgelegt und variiert stark hinsichtlich der berücksichtigten Kostentreiber.³⁹

Tabelle 2-1: Empfehlungen zum Einsatz eines Standard- oder Individualmodells⁴⁰

	Wiederholende Einkäufe		Einmalige Einkäufe	
Waren-/Anschaffungstyp	Lieferantenauswahl ohne oder mit Adhoc-Aktualisierung	Fortlaufendes Lieferantenmonitoring, möglicherweise auch Lieferantenauswahl	Produktionsvermögen, Investitionen	große Anschaffungen, Make-or-Buy-Entscheidungen, Prozessanalyse
Empfehlung TCO-Ansatz	Entwicklung eines Standardmodells, das für alle Warengruppen im Einkauf auf manueller oder IT- Basis genutzt werden kann	Entwicklung eines IT-basierten Standardmodells, das regelmäßig automatisch aktualisiert wird und für unterschiedliche Warengruppen eingesetzt werden kann	Entwicklung eines Standardmodell für Anlagen/Anschaffungen, das auch für andere Investitionsentscheidungen genutzt werden kann	Entwicklung eines individuellen Modells für den betrachteten Fall. Aktualisierung der Daten, um die aktuelle Leistung den Prognosen gegenüberzustellen

³⁵ Vgl. White (2006); Geißdörfer (2009), S. 98

³⁶ Siehe hierzu VDMA - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (2006)

³⁷ Siehe hierzu VDI - Verband Deutscher Ingenieure (2005)

³⁸ Siehe hierzu DIN EN 60300-3-3

³⁹ Vgl. Ellram (1994), S. 178

⁴⁰ Vgl. Ellram (1995), S. 16; Bremen (2010), S. 26

Sowohl Ellram (1994) als auch Ferrin und Plank (2002) zeigen in ihren Fallstudien auf, dass in der Praxis die Anwendung von Individualmodellen präferiert wird.⁴¹ Eine große Mehrheit der teilnehmenden Unternehmen an den Studien erkannte die Notwendigkeit für unterschiedliche Güter auch unterschiedliche Bewertungsmodelle einzusetzen.

Neben der Klassifizierung von TCO-Modellen in Standard- und Individualmodell wird weiterhin nach der Einbeziehung qualitativer Faktoren bei der Bestimmung der Zielgrößen unterschieden und nach monetären (*dollar-based*) und wertbasierten (*value-based*) Modellen differenziert.^{42,43}

Der monetäre Ansatz basiert auf messbaren Kostenelementen, die zur TCO-Berechnung mit dem Einkaufspreis addiert und beispielsweise durch die Anzahl gekaufter Teile dividiert wird, um so die spezifischen Stückkosten zu erhalten. Weiterhin werden TCO-Modelle differenziert nach solchen, die nur direkte Kosten betrachten, oder Modellen die Berechnungsformeln für die Kostenallokation verwenden. Für die TCO-Ermittlung bei direkten Kosten werden die messbaren Kostenelemente in Abhängigkeit vom betrachteten Gegenstand festgelegt. Bei der Verwendung von Berechnungsformeln hingegen erfolgt die Kostenzuordnung mittels Prozesskostenrechnung gemäß dem Kosten- und Ressourcenaufwand, mit dem ein bestimmtes Beschaffungsgut verbunden ist.⁴⁴

Im Gegensatz zum monetären werden bei dem wertbasierten TCO-Ansatz qualitative Faktoren berücksichtigt, die nicht direkt monetär abzubilden sind. Sie werden bei diesem Konzept mittels Gewichtungsfaktoren, ähnlich einer Nutzwertanalyse, und eines daraus abgeleiteten Kostenfaktors (*Total Cost Factor*) in die TCO-Ermittlung eingebunden. Der Kostenfaktor wird schließlich mit dem monetären Wert eines Gutes multipliziert, sodass die Gesamtbewertung einer Beschaffungsalternative berechnet wird. Der ermittelte TCO-Wert spiegelt bei dieser Methode dann nicht mehr den zahlungswirksamen monetären Wert einer Ware wider, sondern dient der Berücksichtigung nicht monetärer

⁴¹ Vgl. Ellram (1994), S. 180ff; Vgl. Ferrin und Plank (2002), S. 26; In zweitgenannter Studie gaben 69 von 114 Befragten die Präferenz zu individualisierten TCO-Modelle für eine akkurate Kostenbewertung an.

⁴² Die in diesem Kapitel erwähnten Konzepte von Cavinato (1992) sowie Hurkens und Wynstra (2004) sehen den wertbasierten Ansatz als eine weitreichende neue Denkweise und führen den Begriff des *Total Value of Ownership* (TVO) ein.

⁴³ Vgl. Ellram (1995)

⁴⁴ Vgl. Geissdörfer et al. (2009), S. 699

Entscheidungskriterien, beispielsweise Technologie, Qualität und Service. Eine Übersicht zu den Vor- und Nachteilen der jeweiligen Modelle ist in Tabelle 2-2 dargestellt.⁴⁵

Tabelle 2-2: Relativer Vergleich monetärer und wertbasierter TCO-Modelle⁴⁶

Modell	Vorteile	Nachteile
Monetär – direkte Kosten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Berücksichtigung der entscheidungsrelevanten Faktoren ▪ sehr flexibel ▪ Anpassung der Komplexität an die zu treffende Entscheidung ▪ Unterstützung bei der Identifikation kritischer Problemstellungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ zeitaufwendig ▪ ungeeignet für sich wiederholende Entscheidungen ▪ nicht kosteneffizient für Einkäufe mit geringem Wert
Monetär – Berechnungsformel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ einfache Verwendung, sobald System einmal implementiert ▪ sehr gut geeignet für sich wiederholende Entscheidungen, bei denen die Hauptkostentreiber ermittelt werden können 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ zeitaufwendige Erstellung des Systems ▪ verwendete Berechnungsformeln müssen periodisch überprüft und aktualisiert werden
Wertbasiert	<ul style="list-style-type: none"> ▪ kann Problemstellungen/Faktoren enthalten, für die keine Kosten bestimmt werden können ▪ Berücksichtigung der relativen Bedeutung einzelner Faktorendurch Gewichtungen ▪ einfache Verwendung für sich wiederholende Entscheidungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ zeitaufwendig zu erstellen; nur für wichtige und/oder sich wiederholende Einkäufe geeignet ▪ hoher Aufwand zur Ermittlung der Gewichtungen erforderlich; Problem der Objektivität

Nachdem nun verschiedene TCO-Ausprägungen aufgezeigt wurden, soll im nächsten Abschnitt detaillierter die konkrete Vorgehensweise der Anwendung und Ermittlung der TCO beschrieben werden. Für die Beschreibung zum Vorgehen einer TCO-Analyse wird der Fokus im Folgenden auf den Anwendungsbereich einer Beschaffungsentscheidung für ein Investitionsobjekt mit alternativen Anbietern bzw. Lieferanten aus der Kundenperspektive gelegt. Eine Übersicht über die Anwendung bzw. Einführung einer entsprechenden Lebenszykluskostenbewertung ist Abbildung 2-3 zu entnehmen.

⁴⁵ Vgl. Götze und Weber (2008), S. 253

⁴⁶ Vgl. Geissdörfer et al. (2009), S. 699; in Anlehnung an Ellram (1995), S. 14f

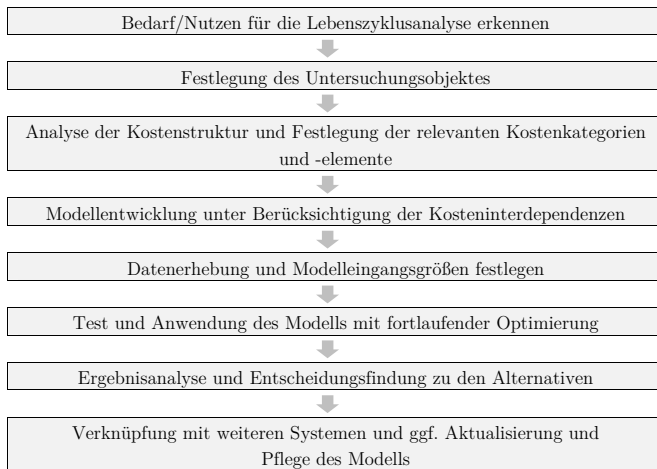


Abbildung 2-3: Vorgehensweise für eine Lebenskostenzyklusbewertung aus Kundenperspektive⁴⁷

Die Initiierung einer Gesamtkostenbewertung erfolgt nach Bedarfserkennung für einen bestimmten zu erbringenden Nutzen. Ausschlaggebend für die Motivation ist dabei stets die Erkenntnis der Unternehmenseinheit, die wahren Kosten eines Erwerbs zu analysieren und nicht nur den Anschaffungspreis in Betracht zu ziehen.⁴⁸ Nach der Bedarfserkennung und der Problemformulierung folgt die Festlegung auf ein Untersuchungsobjekt und den Betrachtungsrahmen. Hierbei werden die Beschaffungsalternativen identifiziert und die Grundannahmen, z. B. der Bewertungszeitraum, definiert. Als Untersuchungsobjekte kommen vor allem Anlagen und Systeme in Betracht, bei denen ein hoher Kostenanteil durch die Nutzung verursacht wird und dieser in Relation zum Anschaffungspreis möglichst groß ist. Wesentliche Faktoren für die Auswahl sind demnach die Lebensdauer und die Betriebs- sowie Wartungskosten.⁴⁹ Anschließend wird die Kostenstruktur des Investitionsobjektes ermittelt, sodass die relevanten Kostenkategorien und die zugehörigen

⁴⁷ Das aufgezeigte Vorgehen zur Anwendung basiert auf Literaturbeiträgen zur Anwendung von TCO-Konzepten und *Life-Cycle-Costing* (LCC)-Analysen. Eine eindeutige Differenzierung der beiden Modelanwendungen im Kontext einer Beschaffungsentscheidung aus Kundensicht, ist nicht vorhanden. Beide Ansätze sind kongruent und Abweichungen treten vereinzelt nur bei den betrachteten Kostenkategorien auf. Das skizzierte und formulierte Vorgehen entstand in Anlehnung an: Dhillon (2010), S. 30f; Barringer (2003), S. 4; Harvey (1976); Ellram (1993a); Geißdörfer (2009)

⁴⁸ Vgl. Ellram (1993b), S. 9

⁴⁹ Vgl. Uhl (2002), S. 105ff; Brown (1979), S. 109

Kostenelemente bestimmt werden können. Eine Fokussierung auf die signifikanten Kostenelemente ist hierfür zu empfehlen, um die Modellkomplexität zu reduzieren.⁵⁰

Auf dieser Basis wird nun ein geeignetes Bewertungsmodell entwickelt, das die Interdependenzen der einzelnen Kostenelemente möglichst realistisch abbildet. Ist dies geschehen und sind die Eingangsparameter definiert, kann mit der Datenerhebung und der Einführung der Eingangsgrößen begonnen werden. Die Datenerhebung schließt neben der Erfassung aktueller Kostenwerte auch die Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklung von Kostenelementen ein. Sobald die Inputdaten zu den Kostenelementen vorliegen, kann mit der Durchführung der Plausibilitätsuntersuchungen fortgefahren, und es können etwaige Modelloptimierungen vorgenommen werden. Abschließend erfolgt die Ergebnisanalyse mit der Auswahl einer Beschaffungsalternative. Je nach Zielsetzung und Anwendungshäufigkeit besteht die Möglichkeit, das Modell mit weiteren internen Unternehmenssystemen, beispielsweise mit einem Kostenrechnungssystem, zu verknüpfen und die Modellparameter zu aktualisieren.

Zusammenfassend besteht die größte Herausforderung bei der Entwicklung eines geeigneten Bewertungsmodells und der Modellierung der Kostenbeziehungen in einem Trade-off zwischen einem einfach zu verwendenden Ansatz und einem Ansatz, der komplex und flexibel genug ist, um die Hauptfaktoren zu erfassen.⁵¹

Aktuelle Trends führen zu einem zunehmenden Interesse an Lebenszykluskostenrechnungen. Dazu zählen eine gesteigerte Bedeutung der Qualität gekaufter Waren und Dienstleistungen, die Rationalisierung der Lieferantenbasis, der zunehmende globale Wettbewerb und die Fokussierung auf die Beschaffungskosten sowie das Bewusstsein für den Nutzen von TCO-Analysen als wichtige betriebliche Entscheidungshilfe in Bezug auf Neuanschaffungen oder Einsparungsmöglichkeiten.⁵² Allerdings zeigen Studien, dass das Konzept noch nicht allgegenwärtig in der Praxis eingesetzt wird.⁵³ Mögliche Hindernisse für eine Einführung bzw. Anwendung haben Ellram und Siferd (1993) untersucht und

⁵⁰ Vgl. Ellram (1993a), S. 54; Ellram konstatierte in ihrer Studie, dass in vielen Praxisfällen ein Pareto-Ansatz zur Bestimmung von relevanten Kosten gewählt wird, der besagt, dass 20 % der Kostenelemente für 80 % der Gesamtkosten stehen.

⁵¹ Vgl. Ellram (1995), S. 14

⁵² Vgl. Ellram (1993a), S. 49

⁵³ Siehe hierzu u. a. die Untersuchungen von Krämer (2007); Ferrin und Plank (2002); Geißdörfer (2009)

benennen folgende Gründe:

- Datenverfügbarkeit, -struktur und -genauigkeit (erheblicher, meist manueller Aufwand bei der Datengenerierung, fehlende automatisch aufbereitete Daten aus IT-Systemen, Prognosen zu Kostenentwicklungen erforderlich)
- Komplexität (Entwicklungszeitaufwand der Modelle, fehlende einheitliche Terminologie etc.)
- Unternehmenskultur (mangelndes Vertrauen in die TCO-Ergebnisse, internes Überzeugen bezüglich der Vorgehensweise zur Anwendung, Verständnis der Organisation, dass TCO nicht nur den Einkauf betrifft etc.)

2.1.2 Einführung in die Prognose von Kostenentwicklungen

Die monetäre Bewertung eines Produktes über den Lebenszyklus erfordert die Einbeziehung zukünftiger Kosten. Lebenszyklusbewertungen sind daher auch als Prognosewerkzeuge zur Evaluierung alternativer Investitionsgütern mit dem Ziel des optimierten Kapitaleinsatzes zu verstehen. Das Bewertungskonzept schließt die Analyse zukünftiger Kosten und Nutzen zu heutigen monetären Werten des Betrachtungsobjektes ein.⁵⁴ Neben Veränderungen von Kosten während der Nutzungsphase von Produkten, wie beispielsweise Wartungs- und Energiekosten, müssen zudem Kostenveränderungen der Anschaffungskosten in einem zeitlichen Verlauf betrachtet werden. Vor dem Hintergrund einer strategischen Beschaffungsentscheidung kann der Zeitpunkt der Investition durch die Höhe der jeweiligen Anschaffungskosten einen signifikanten Einfluss auf die TCO-Performance einer Entscheidungsalternative nehmen. Für eine Bewertung zu unterschiedlichen Beschaffungszeitpunkten ist daher eine Analyse möglicher Kostenentwicklungen essenziell.⁵⁵

Dieser Abschnitt dient zur Aufbereitung der methodischen Grundlagen für die Prognosen von Kostenentwicklungen im Kontext des in Kapitel 3 eingeführten Bewertungsmodell von alternativen Fahrzeugkonzepten im urbanen Busverkehr. Hierfür werden zum einen die Gründe für Kostenveränderungen, insbesondere für Kostendegressionen, thematisiert und zum anderen der Erfahrungskurvenansatz zur Bestimmung von Kostendegressionen erläutert.

⁵⁴ Vgl. Taylor (1981), S. 33

⁵⁵ Vgl. Woodward (1997), S. 339ff

Als Kosten bezeichnet man in der Betriebswirtschaftslehre den „mit Preisen bewerteten Verzehr von Produktionsfaktoren“⁵⁶. Gesamtkostenentwicklungen bzw. -verläufe lassen sich mittels der Kostenfunktion als Funktion der kumulierten Produktionsmenge X darstellen. Dividiert man die Gesamtkosten durch die Produktionsmenge, erhält man die Stückkosten. Im vorliegenden Kapitel sind Kosten im Sinne von Stückkosten bzw. Kosten je Outputeinheit zu verstehen. Für den Kostenverlauf sind zwei idealtypische Kostenentwicklungen möglich: eine negative (degressiver Kostenverlauf) und eine positive (progressiver Kostenverlauf) Korrelation von der Produktionsmenge und den Stückkosten.⁵⁷ Für die vorliegende Arbeit ist die negative Korrelation, also sinkende Stückkosten bei steigender Produktionsmenge (Kostendegression), von besonderer Relevanz, da in den nächsten Jahren mit einer steigenden Nachfrage an emissionsärmeren Fahrzeugkonzepten zu rechnen ist (siehe Kapitel 1.1).

Erfahrungskurvenmodell

Das Erfahrungskurvenmodell beruht auf der Entdeckung empirischer Zusammenhänge, den sogenannten *Erfahrungskurveneffekten*, zwischen den Stückkosten und der kumulierten Produktionsmenge durch Henderson in den 1960er-Jahren. In der Praxis ist der Erfahrungskurvenansatz ein Standardwerkzeug zur Darstellung von Kostenentwicklungen.⁵⁸ Basis einer Erfahrungskurve ist die Überlegung, dass mit jeder Verdoppelung der produzierten kumulierten Menge die Stückkosten um einen konstanten Prozentsatz sinken.⁵⁹ Die Quantifizierung der Erfahrungskurveneffekte für die Kostenreduktion einer kumulierten Anzahl produzierter Einheiten X_t ist wie folgt mathematisch darzustellen:

$$K(X_t) = K(X_0) \cdot \left(\frac{X_t}{X_0}\right)^{-b} \quad (2.1)$$

Dabei beschreiben $K(X_0)$ und X_0 die Produktionsstückkosten und die kumulierte Produktionsmenge (reflektiert die Erfahrung) zum ersten betrachteten Produktionsvorgang und b den Degressionsfaktor der Erfahrungskurve. Die relative Kostenänderung nach jeder Verdoppelung des Produktionsvolumens wird über die *Progress Ratio (PR)*⁶⁰ wie folgt berechnet:

⁵⁶ Wöhe und Döring (2013), S. 294

⁵⁷ Vgl. Ringlstetter und Knyphausen (1994), S. 85f

⁵⁸ Vgl. Candelise et al. (2013), S. 297

⁵⁹ Vgl. Henderson (1974), S. 19

⁶⁰ Die *Progress Ratio* beschreibt die Kostendegression im Verhältnis zu den Kosten des Ausgangsszenarios.

$$PR = 2^{-b} \quad (2.2)$$

Dieser Ausdruck beschreibt die Kostendegression bei jeder Verdoppelung der Produktionsmenge auf das 2^{-b} -fache der ursprünglichen Kosten. Analog dazu wird die Lernrate (LR) wie folgt definiert:

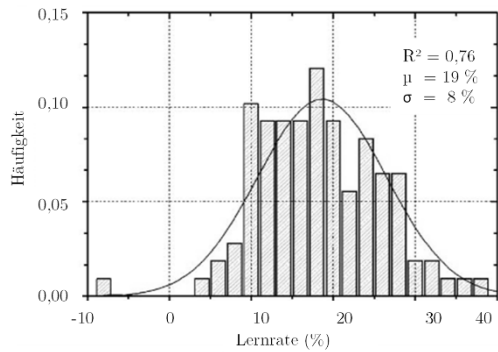
$$LR = 1 - PR = 1 - 2^{-b} \quad (2.3)$$

Wird einer Technologie eine Lernrate von 20 % zugeschrieben, also eine Kostendegression auf 80 % des Ausgangsniveaus, bedeutet dies, dass die Produktionsstückkosten bei jeder Verdoppelung der kumulierten Outputmenge um 20 % sinken. Die Lernrate kann je nach Technologie stark variieren. In einer umfangreichen Studie ermittelten Dutton und Thomas (1984) für Technologiebeispiele aus dem Produktionssektor die Häufigkeitsverteilung der aufgetretenen PR. Basierend auf diesen Daten ist in Abbildung 2-4 die Häufigkeitsverteilung der Lernraten dargestellt. Der Abbildung 2-4 ist zu entnehmen, dass die Lernraten deutlich voneinander abweichen können (*slow learner* und *fast learner*), dass jedoch eine Konzentration in einem Bereich von 15–20 % vorliegt. Eine pauschale Einordnung von Technologien ist allerdings nicht möglich, da neben den technologischen Spezifikationen auch die jeweilige Lebenszyklusphase bedeutsam ist.⁶¹ Untersuchungen des Energiesektors ergaben beispielsweise Lernraten für konventionelle Technologien wie Kohlekraftwerke von durchschnittlich 4 %; innovative Technologien aus dem Bereich der erneuerbaren Energien hingegen weisen Raten von durchschnittlich 20 % auf.⁶² Darüber hinaus sind negative Lernraten, also steigende Stückkosten bei einer Erhöhung der Produktionsmenge, nur selten und meist lediglich als temporäre Erscheinung zu beobachten. Kostensteigerungen sind hierbei u. a. unvorhergesehenen Problemen wie Lieferengpässen, steigenden Materialkosten oder der veränderten Wettbewerbssituation bzw. Preispolitik geschuldet.⁶³

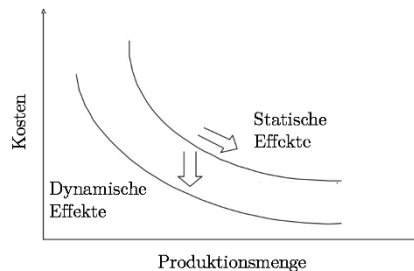
⁶¹ Vgl. Neij (2008)

⁶² Vgl. Kahouli-Brahmi (2008), S. 4141

⁶³ Vgl. McDowall (2012), S. 6

Abbildung 2-4: Häufigkeitsverteilung von Lernraten⁶⁴

Die Gründe für Kostendegressionen bzw. Erfahrungskurveneffekte können unterschiedlichen Ursprungs sein, wobei eine einheitliche Klassifizierung in der Literatur nicht erfolgt. Beispielsweise wird zwischen kapazitäts- und zeitabhängigen⁶⁵ oder technischen und nicht technischen⁶⁶ Faktoren differenziert. Papineau (2006) und Mayer et al. (2012) hingegen unterscheiden zwei Effekte: statische Volumeneffekte und dynamische Effekte. Erstere Kostendegressionen werden durch eine steigende kumulierte Produktionsmenge hervorgerufen, während letztere Degressionen unabhängig von Produktionszahlen zu bewerten sind, von externen Quellen ausgehen sowie unternehmens- und industrieübergreifend auftreten können.

Abbildung 2-5: Statische und dynamische Kosteneffekte⁶⁷

⁶⁴ Vgl. Ferioli et al. (2009), S. 2526; nach Dutton und Thomas (1984)

⁶⁵ Siehe hierzu u. a. McDowall (2012), S. 9ff

⁶⁶ Siehe hierzu u. a. Candelise et al. (2013), S. 7102

⁶⁷ Vgl. Papineau (2006), S. 428

Im Folgenden werden Faktoren erläutert, die zu möglichen Kostendegressionen führen können. Es wird von einer Klassifizierung nach oben genannten Definitionen aufgrund der uneinheitlichen und sich überlagernden Begriffsdefinitionen und -abgrenzungen abgesehen, sodass eine Auflistung der in der Literatur genannten und für die Bestimmung der Kostendegressionen von Bussystemen in Kapitel 3.6.1 relevanten Faktoren erfolgt.

i) Lerneffekte

Der Lerneffekt beschreibt Arbeits- und Prozesseffizienzsteigerungen durch Erfahrungszuwachs im klassischen Sinne (*labour learning*). Demnach können durch mehrfache Wiederholungen effizientere Arbeitsabläufe erprobt und anfängliche Fehler vermieden werden. In der Literatur wird dieser Faktor häufig mit *learning by doing* beschrieben. Lerneffekte können nicht nur in der Produktion realisiert werden, sondern in allen Unternehmensbereichen, sodass sie beispielsweise im Bereich der Instandhaltung von Anlagen und Fahrzeugen zu effizienteren Reparatur- und Wartungsarbeiten führen können.⁶⁸

ii) Technischer Fortschritt

Neben Effizienz- und Prozessverbesserungen durch Erfahrungszuwachs des Personals können auch durch technischen Fortschritt Verbesserungen erzielt werden. Dies ist z. B. durch effizientere Fertigungsverfahren oder durch Optimierungen am Produktdesign (Materialeinsparung) möglich. Weiterhin können sich technische Verbesserungen aus der konkreten Nutzung eines Produktes (*learning by using*) durch Kundenfeedback ergeben.

Der technische Fortschritt ist jedoch nicht nur auf innovative Prozesse und Produktverbesserungen zu beziehen, sondern kann ebenso aus dem Einsatz ausgereifter Technologien in einem neuen Anwendungsbereich hervorgehen.⁶⁹ Neben den genannten Ausprägungen, die meist ihre Quelle in unternehmensinternen Aktivitäten haben, kann technischer Fortschritt auch extern von Marktteilnehmern forciert werden und so zu Kostendegressionen führen. Dieser Vorgang, anderen Akteuren den Zugang zu effizienteren, vorteilhafteren technischen Lösungen zu verschaffen, wird mit *technology spillover* bezeichnet und führt dazu, dass

⁶⁸ Vgl. Arrow (1962)

⁶⁹ Vgl. Kahouli-Brahmi (2008), S. 139

Unternehmen von Fortschritten anderer Marktteilnehmer profitieren können. Die Beweggründe für ein solches Vorgehen sind in der Regel strategischer Natur und können zur Etablierung einer innovativen Technologie beitragen.⁷⁰ Spill-over-Effekte können zwischen einzelnen Unternehmen, verwandten Technologien sowie zwischen ganzen Branchen auftreten.⁷¹

Einen weiteren relevanten Beitrag zum technischen Fortschritt liefern die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten von Unternehmen und Forschungseinrichtungen (*learning by researching*). Insbesondere in der frühen Lebenszyklusphase eines Produktes können Produktverbesserungen durch Weiterentwicklungen erhebliche Kostendegressionen erzielen.⁷²

iii) Skaleneffekte

Skaleneffekte (*economies of scale*) führen zu Kostenvorteilen bei der Produktionsausweitung, beispielsweise beim Übergang einer Serienproduktion in die Massenfertigung. Die Kostendegressionen erfolgen zum einen über die Kostenallokation des Fixkostenanteils im Verhältnis zur Ausbringungsmenge (*Fixkostendegression*). Zum anderen können größere, effizientere Anlagen mit einer Produktionsausweitung wirtschaftlich betrieben und dadurch geringere Stückkosten erzielt werden (*Größendegression*). Des Weiteren können bei größeren Einkaufsmengen Lieferantenrabatte realisiert werden.⁷³

Eine Ausweitung der Produktion führt in der Regel zu einem höheren Bedarf an produkt- und prozessbezogener Standardisierung. Ein zunehmender Standardisierungsgrad wiederum ist mit effizienteren Prozessen verbunden, die mittelfristig zu einer reduzierten Ausschussrate und sinkenden Kosten führen können.⁷⁴

⁷⁰ Vgl. Homp (2000), S. 65f. Im Bereich der Elektromobilität sind in jüngster Zeit einige spillover-Aktivitäten zu beobachten. Beispielsweise haben der Automobilhersteller Tesla und der Hersteller von elektrischen Bussen Proterra einige ihrer Produktpatente anderen Marktteilnehmer offen gelegt.

⁷¹ Vgl. Anandarajah et al. (2013)

⁷² Vgl. Nemet (2006), S. 10

⁷³ Vgl. Ehrlenspiel et al. (2014), S. 181

⁷⁴ Vgl. Mayer et al. (2012), S. 14464f

iv) Verbundeffekte

In Abgrenzung zu Skaleneffekten, die Kostenvorteile durch die Produktionsausweitung eines einzelnen Produktes heben, erzielen Verbundeffekte (*economies of scope*) Kostendegressionen durch die gemeinsame Produktion heterogener Gütern und die Mehrfachnutzung von Ressourcen. Verbundeffekte existieren demnach, wenn die Gesamtkosten der Produktion von Gütern eines Unternehmens niedriger sind als die Summe der Produktionskosten bei separater Herstellung in mehreren Unternehmen.⁷⁵ Die gezielte Kombination von Produktionserzeugnissen kann einerseits zu Kostenvorteilen führen; andererseits können Unternehmen dies als Möglichkeit für Ertragssteigerungen nutzen, indem ein Hersteller sein Produktportfolio so erweitert, dass der Absatz eines Produktes zu weiteren Verkäufen komplementärer Produkte führt.⁷⁶ Es lässt sich hierbei differenzieren nach einer Erhöhung der Leistungsbreite (*Bündelungseffekt*) und einer Erhöhung der Leistungstiefe der Wertschöpfungskette (*Verkettungseffekt*).⁷⁷ Der Verkettungseffekt kann beispielsweise bei einer Systemintegration von Komponenten auftreten und ist sowohl aus produktionstechnischer als auch strategischer Sicht für den Hersteller relevant: Eine Systemintegration geht oft mit einer Kostendegressionen im klassischen Sinne von Verbundeffekten durch produktionstechnischen Synergien einher; zusätzlich kann der Hersteller durch sein erweitertes Angebot Erträge auf allen verknüpften Wertschöpfungsstufen steigern und seine Marktmacht ausbauen. Dies wiederum kann das Unternehmen nutzen, um die erzielten Preisdegressionen an die Kunden weiterzugeben.⁷⁸ Die Systemintegration kann insbesondere im Bereich der Elektromobilität eine bedeutende Stellung einnehmen, da die veränderte Marktstruktur im Vergleich zum konventionellen Automobilbereich den an der Wertschöpfungskette beteiligten Unternehmen erhebliche Chancen zum Ausbau ihres Wertschöpfungsanteils bietet.⁷⁹

⁷⁵ Vgl. Moschandreas (2000), S. 102

⁷⁶ Vgl. Schierenbeck und Wöhle (2012), S. 51

⁷⁷ Vgl. Lindstädt und Hauser (2004), S. 21

⁷⁸ Vgl. Candelise et al. (2013), S. 99

⁷⁹ Vgl. Kasperk und Drauz (2013), S. 126. März (2012), S. 48ff; Prädestinierte Komponenten zur weiteren Systemintegration bei elektrischen Fahrzeugen sieht März (2012) im Bereich der Antriebssystem-Bordelektronik-Batterien, und z.T. bei der Ladeelektronik bzw. Ladekomponenten-Batterie.

Die beschriebenen Effekte wirken allesamt kostenreduzierend und sind für die Prognose von Kostenentwicklungen zu berücksichtigen. Kostendegressionen sind in der Regel auf mehrere der oben beschriebenen Ursachen zurückzuführen und in ihrer zeitlichen Wirkung teilweise sehr unterschiedlich und produktspezifisch ausgestaltet.⁸⁰ Von einer isolierten Betrachtung der Auswirkungen der einzelnen Effekte wird allerdings aufgrund der hohen Komplexität in der Regel abgesehen und eine integrale Betrachtung der Effekte bevorzugt.⁸¹

Der zeitliche Verlauf der Kostendegressionen ist neben den aufgeführten technischen Faktoren zusätzlich von den politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängig. Da zukünftige Kostendegressionen im Allgemeinen für ein Unternehmen mit anfänglicher Kapital- und Ressourcenbindung verbunden sind, werden Kostenentwicklungen von der Investitionsbereitschaft der Unternehmen und der allgemeinen Marktdynamik beeinflusst. Die Politik wiederum kann durch gezielte Technologieförderung positive Voraussetzungen und Anreize schaffen, um Kostendegressionen zu begünstigen. Darüber hinaus sind die Entwicklungen an den Rohstoffmärkten für Produktionsmaterial und Energie als ein weiterer Faktor mit Einfluss auf die Kostenentwicklungen von produzierten Gütern zu nennen. Aufgrund der Komplexität der Rohstoffmärkte, deren Marktpreise im Spannungsfeld von Politik und globaler Wirtschaftslage liegen, werden die Rohstoffpreise für die Bussystembewertung primär zur Bestimmung der Betriebskosten und nur untergeordnet als Produktionsbetriebsmittel für die Herstellung berücksichtigt.

Vorgehen zur Prognose von Kostenentwicklungen

Für die Anwendung des Erfahrungskurvenansatzes zur Prognose der Kostenentwicklungen sind gemäß den Gleichungen 2.1–2.3 die Anfangskosten, die zukünftige Marktentwicklung (kumulierte Produktionsmengen) sowie die Lernraten festzulegen. Aktuelle Kosten und anfängliche sowie zu erwartende zukünftige Produktionsmengen können im Rahmen einer Marktanalyse recherchiert werden. Die Ermittlung der Lernrate bzw. der Kostendegressionen für die Technologien hingegen kann auf Basis zweier unterschiedlicher Ansätze vorgenommen werden.

⁸⁰ Schildt (1994), S. 24f

⁸¹ Die Auswirkungen der Effekte sind isoliert betrachtet kaum messbar. Erschwert wird eine Quantifizierung der einzelnen Effekte durch die in der Praxis nur sehr schwierig vorzunehmende Abgrenzung der Effekte. Daher wird meist eine Gesamtbewertung aller Effekte vorgenommen. Siehe hierzu u. a. Wacker (1980), S. 70ff

Zum einen können mittels Extrapolation von in der Vergangenheit beobachteten Lernraten (*ex post*) zukünftige Lernraten (*ex ante*) unter Berücksichtigung produktspezifischer Markterwartungen prognostiziert werden. Bei diesem *Top-down-Ansatz* werden die Ex-post-Lernraten basierend auf einer historischen Zeitreihenanalyse von Kosten- und Produktionsdaten ermittelt.⁸² Für etablierte Technologien liegen in der Regel bereits historische Daten vor, sodass diese zur Fortschreibung der Zeitreihen genutzt werden können. Für neue Technologien ist dies jedoch nicht möglich, sodass Erfahrungswerte bekannter Technologien als Benchmark genutzt werden müssen. Die Referenztechnologie sollte hierbei im Hinblick auf die Produktionsprozesse und technische Komplexität vergleichbar sein, um ein realistisches Abbild der innovativen Technologie zu ermöglichen.⁸³ Für die Prognose von Marktdaten bzw. Produktionsmengen werden im Allgemeinen jährliche Wachstumsraten für eine Technologie ab dem Ausgangszeitpunkt angenommen.⁸⁴

Zum anderen folgt ein zweites Vorgehen zur Prognose von Kostendegressionen dem *Bottom-up-Ansatz*, bei dem meist auf Komponentenbasis eine detaillierte Technologieanalyse durchgeführt wird. Die Technologie wird hierzu in Komponenten bzw. Komponentengruppen strukturiert, die Degressionspotenziale werden durch eine Einzelbewertung bestimmt und individuelle Lernraten werden den Komponentengruppen zugeordnet.⁸⁵ Vorteilhaft bei diesem Vorgehen ist die Berücksichtigung unterschiedlicher Degressionsverläufe, sodass Komponenten nach ihrer Lernfähigkeit differenziert werden können. Insbesondere für technisch ausgereifte Komponenten, die bereits lange in anderen Bereichen genutzt werden, ist diese Unterscheidung relevant. Die Kostenreduktionen einer Technologie sind also als Summe der einzelnen Komponenten darstellbar:⁸⁶

$$K_t = \sum_{i=1}^n K_{0i} \cdot \left(\frac{X_{ti}}{X_{0i}} \right)^{-b_i} \quad (2.4)$$

⁸² Vgl. Weiss et al. (2012)

⁸³ Vgl. Rubin et al. (2007), S. 189

⁸⁴ Jährliche Wachstumsraten werden in der Literatur in der Regel mit *Compound Annual Growth Rate (CAGR)* angegeben.

⁸⁵ Vgl. Niazi et al. (2005), S. 563f

⁸⁶ Vgl. Ferioli et al. (2009), S. 2528

Dabei werden jeder Komponente i die jeweiligen Anfangskosten K_{0i} zugeschrieben, und der Kostenverlauf wird durch die komponentenabhängigen Degressionsfaktoren b_i und die jeweiligen kumulierten Produktionsmengen X_{0i} und X_{ti} beschrieben.

Durch die komponentenweise Analyse wird also ein detailliertes Verständnis für die Kostenstruktur einer Technologie geschaffen, das für die Ableitung fundierter Kostendegressionen notwendig ist. Diverse Studien indizieren daher für diese Methodik eine höhere Prognosegenauigkeit als bei *Top-down-Ansatz*; allerdings ist ein deutlich höherer Erhebungsaufwand erforderlich.⁸⁷ Bei *Bottom-up-Ansätzen* werden die Kostendegressionen oftmals als jährliche Kostensenkungsraten im Verhältnis zu dem Ausgangswert angegeben und weichen dadurch von den Angaben klassischer Lernraten ab. Eine Ableitung von Lernraten zu jährlichen Degressionsraten et vice versa ist auf Basis der Produktionsmengen möglich.⁸⁸

Lernzyklus und Limitationen zur Anwendung von Erfahrungskurvenmodellen

Lernraten können nicht immer als konstant über den Zeitverlauf angenommen werden. Ferioli et al. (2009) beschreiben den Lernzyklus in Analogie zum Technologielebenszyklus. Demnach ist die Lernfähigkeit einer Technologie begrenzt und reduziert sich ab dem Übergang in die Reifephase und dem Erreichen der maximalen Marktdurchdringung der Technologie (siehe Abbildung 2-6). Der Verlauf mit linearer Skalierung in Abbildung 2-6 kann auch als Kostendegression über den Zeitverlauf, anstatt einer Produktionsmenge (siehe x-Achse), interpretiert werden.⁸⁹ Die Phase des linearen Lernens ist durch hohe Lernraten gekennzeichnet und tritt zu Beginn einer Technologieverbreitung, also während des Markteintritts und des Markthochlaufes, auf. In dieser Phase dominiert noch der Kostenanteil der innovativen Komponenten die Gesamtkosten, und der Kostenanteil der nicht-lernenden Komponenten nimmt erst im Laufe der weiteren Produktionsausweitung zu. Die Berücksichtigung der aktuellen Technologielebenszyklusphase im

⁸⁷ Siehe hierzu u. a. Layer et al. (2002), Niazi et al. (2005) und Ferioli et al. (2009). Zur Bestimmung der Kostendegressionen werden häufig Experteninterviews und -umfragen zu den einzelnen Komponenten Gruppen durchgeführt.

⁸⁸ Siehe hierzu Neij (2008)

⁸⁹ Vgl. Ferioli et al. (2009), S. 2531

Rahmen einer Kostendegressionsanalyse ist demnach entscheidend für eine präzise Prognose zukünftiger Kosten.

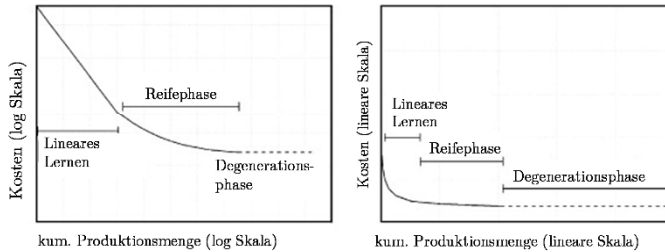


Abbildung 2-6: Qualitative Beschreibung der Erfahrungskurve als Funktion der kumulierten Produktionsmenge⁹⁰

Die letzte Phase des Lernzyklus ist die Alterungsphase der Technologie, in der keine weiteren Kostendegressionen auftreten. Für langfristige Prognosen wird daher in der Regel eine untere Kostengrenze (*floor cost*) definiert, die sich aus den reinen Materialkosten eines Produktes ableitet.⁹¹

Methodeninmanent können Erfahrungskurvenmodelle nur eine mögliche (wahrscheinliche) Kostenprognose für eine Technologie abgeben. Die Eingangsparameter eines beschriebenen Modells obliegen vielen Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Entwicklung. So basieren z. B. die zukünftigen Produktionsmengen auf Marktprognosen, die indirekt einen gewissen Erfolg der Technologie implizieren, dessen Eintritt jedoch von vielen unsicheren Faktoren abhängig ist. Analog werden den Technologien Lernraten zugewiesen, die insbesondere bei langfristigen Prognosen starke Auswirkungen auf die prognostizierten Kostenentwicklungen haben, sodass bereits geringe Veränderungen der Lernraten unterschiedliche Aussagen zulassen können. Um diesen Unsicherheiten Rechnung zu tragen, sollten stets Sensitivitäts- bzw. Szenarioanalysen durchgeführt werden, um mögliche Konsequenzen bei Abweichungen bewerten zu können.⁹²

⁹⁰ Vgl. Ferioli, F. et al. (2009), S. 2531; Grübler et al. (1999), S. 253

⁹¹ Vgl. Ergenzinger (2006), S. 104. In der Literatur auch als Plateau-Modell beschrieben.

⁹² Vgl. Reimers und Kaltschmitt (2014), S. 221

Trotz der genannten Kritikpunkte kann zusammenfassend festgehalten werden, dass das Erfahrungskurvenmodell ein geeignetes Werkzeug für Trendanalysen für kurz- bis mittelfristige Prognosen darstellt.⁹³ Insbesondere eignet sich das Erfahrungskurvenmodell in Verbindung mit einem *Bottom-up-Ansatz* zur Beschreibung und Modellierung potenzieller Kostenentwicklungen von Technologien, die sich in der Einführungs- oder Wachstumsphase ihres Produktlebenszyklus befinden und ggf. unterschiedliche Degressionspotenziale aufweisen.⁹⁴ Weiterhin ist die Eignung als strategisches Planungs- und Steuerungstool zur Marktintegration von innovativen Technologien hervorzuheben. Durch die Identifizierung kritischer Markt- und Absatzgrößen zur Realisierung von Kostendegressionen können Unternehmensstrategien und politische Förderungsinstrumente definiert und justiert werden.⁹⁵

Umgang und Einstufung der Unsicherheit bei innovativen Technologien

In der Fachliteratur wird die Elektromobilität übereinstimmend als eine tief greifende technologische Veränderung mit Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft bezeichnet, die oftmals als Musterbeispiel einer sogenannten *radikalen Innovation* angeführt wird.⁹⁶ Der Umgang mit radikalen Innovationen ist durch ein hohes Informationsdefizit bezüglich der zukünftigen Entwicklung gekennzeichnet. Als Arten von Unsicherheiten im Kontext einer innovativen Technologie können zwei Kategorien unterschieden werden: Marktunsicherheit und technische Unsicherheit.⁹⁷ Der Grad der Unsicherheit wiederum kann je nach Produktinnovation variieren und ist maßgebend für die Eignung finanzwirtschaftlicher Methoden und mathematischer Optimierungen für die Technologiebewertung.⁹⁸ Nach Courtney et al. (1997) werden Unsicherheiten grundsätzlich nach vier Graden differenziert (siehe Abbildung 2-7), die im Folgenden in Kürze beschrieben werden:

⁹³ Vgl. Neij (2008), S. 2201. In der Literatur werden langfristige Prognose mit einem Horizont von bis zu 50 Jahren angegeben. Mittelfristige Kostenprognosen umfassen meist einen Zeithorizont von 10-30 Jahren.

⁹⁴ Siehe hierzu u. a. Studien von Nemet (2006), S. 3218ff; Jungiger et al. (2008) und Ferioli et al. (2009)

⁹⁵ Vgl. Neij (2008)

⁹⁶ Vgl. Langer (2014); Jung (2015)

⁹⁷ Siehe hierzu u. a. Lynn und Akgün (1998)

⁹⁸ Vgl. Proff et al. (2014), S. 12f

i) *Clear-enough future:*

Der Unsicherheitsgrad ist gering genug, um eindeutige Prognosen zu formulieren. Die strukturellen und kausalen Zusammenhänge hierzu sind dem Entscheider bekannt.

ii) *Alternate futures:*

Dieser Grad beschreibt eine Unsicherheit, die durch eine definierte Anzahl unterschiedlicher Zukunftsszenarien beschrieben werden kann. Dem Entscheider ist jedoch unbekannt, welches der Szenarien eintreten wird.

iii) *A range of futures:*

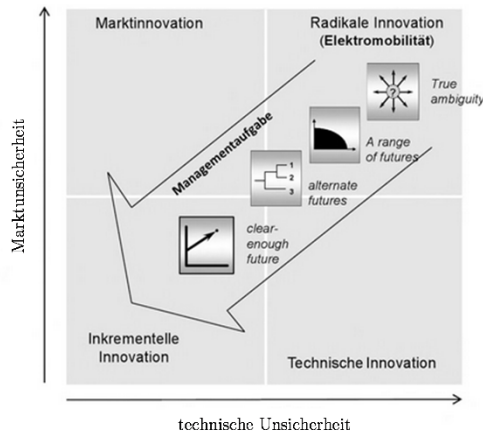
Dieser Unsicherheitsgrad unterscheidet sich zum vorgenannten insoweit, dass keine klaren Szenarien definiert werden können, sondern dass sich eine beliebige Situation zwischen Randszenarien einstellen kann. Die Situation ist allerdings durch eine begrenzte Anzahl an Variablen innerhalb der identifizierten Extremfälle abbildbar.

iv) *True ambiguity:*

Bei diesem Grad der Unsicherheit besteht weitgehende Unkenntnis bezüglich möglicher eintretender Szenarien. Sowohl Randbedingungen und Variablen als auch strukturelle Faktoren und kausale Zusammenhänge sind nicht bekannt.

In Abhängigkeit des Unsicherheitsgrads können – abgesehen von *true ambiguity*, wobei keine Vorhersage möglich ist – nun geeignete Bewertungsansätze genutzt und entwickelt werden, um die zukünftigen Potenziale einer Innovation bzw. Technologie zu analysieren. Viele Unternehmen im Bereich der Elektromobilität im Individual- und öffentlichen Personennahverkehr sehen sich aktuell in einem Übergang von *range of futures* zu *alternate futures*, sodass die Bandbreite möglicher Szenarien weiter eingegrenzt werden kann. Diese Verringerung der Unsicherheit wiederum ermöglicht den verstärkten Einsatz von Bewertungsmethoden, die mittels finanzieller Kennzahlen, mathematischer Optimierungen und statistischer Modelle die Zukunftsszenarien modellieren.⁹⁹

⁹⁹ Vgl. Proff et al. (2014), S. 13f

Abbildung 2-7: Einstufung der Unsicherheit bei innovativen Technologien¹⁰⁰

Abschließend für das Kapitel 2.1.2 wird als Ausblick auf die folgenden Kapitel die methodische Vorgehensweise für Zukunftsprognosen skizziert. Demnach wird basierend auf den methodischen Grundlagen zur Modellierung von Kostenentwicklungen im weiteren Verlauf dieser Arbeit ein Erfahrungskurvenansatz mit einer Analyse möglicher Kosten-depressionspotenziale gemäß dem *Bottom-up-Ansatz* für die Bewertung alternativer Fahrzeugkonzepte im Busverkehr verwendet. Die mit einer Prognose einhergehenden Unsicherheiten bezüglich potenziellen Kostenentwicklungen werden in dem gewählten Ansatz mittels eines stochastischen Simulationsverfahrens modelliert. Den Eingangsparametern werden hierfür Verteilungsfunktionen zugeordnet, sodass eine Szenarioanalyse möglich ist.

2.1.3 Einführung in die Modellierung von Standortentscheidungen zur Systemauslegung

Die Thematik des Aufbaus und der Auslegung einer Ladeinfrastruktur hat mit der jüngsten Einführung elektrifizierter Fahrzeuge signifikant an Bedeutung und Resonanz sowohl vom theoretisch-wissenschaftlichen Standpunkt aus als auch aus Praxis- bzw. Anwendersicht gewonnen. Der wissenschaftliche Diskurs zur Auslegung der Ladeinfrastruktur adressiert die anwendungsbezogene Entwicklung innovativer Modellansätze, die das jeweilige Einsatzverhalten und die Einschränkungen elektrifizierter Fahrzeuge reflektieren.

¹⁰⁰ Proff et al. (2014), S. 14 in Anlehnung an Courtney et al. (1997); Ansoff (1988)

Bei den publizierten Modellansätzen handelt es sich in der Regel um individuelle Optimierungsmodelle. Je nach Problemstellung fußen die Modelle auf etablierten Ansätzen aus den klassischen Anwendungsbereichen des *Operation Research*¹⁰¹ der Touren- und Standortplanung. Standardmodelle für unterschiedliche Fahrzeugeinsatzbereiche sind derzeit in der einschlägigen Literatur nicht vorhanden. Eine strikte Zuordnung bzw. Kategorisierung existierender Modelle auf Basis mathematischer Formulierungen ist an dieser Stelle nicht intendiert; vielmehr ist beabsichtigt, die grundsätzlich möglichen Verfahren und ihre spezifischen Ausprägungen für den Bereich elektrischer Fahrzeuganwendungen aufzuzeigen. Um das weite Spektrum der Modellierungsansätze aufzuzeigen und die wissenschaftlichen Entwicklungspfade zu würdigen, wird zunächst von einer ausschließlichen Betrachtung und Anwendung im elektrifizierten Busverkehr abgesehen. Die Problemstellung der netzabdeckenden Ladeinfrastruktur für elektrische Bussysteme ist im Vergleich zu Anwendungsfällen zur Errichtung einer konventionellen Tankstelleninfrastruktur und abgestuft auch zu elektrischen Pkw-Anwendungsfällen in der Literatur als neuartig einzustufen. Präferenzmodelle liegen daher nicht vor, und Entwicklungspfade möglicher zukünftiger Modellansätze können derzeit nicht abschließend spezifiziert werden. Im Folgenden werden daher unterschiedliche Modellansätze der Standortplanung und der Tourenplanung beschrieben. Eine konkrete inhaltliche Auseinandersetzung mit existierenden Simulationsmodellen zur Auslegung der Ladeinfrastruktur für elektrische Fahrzeuge und die abschließende Bewertung der Modellansätze zur Verwendung bei elektrischen Bussystemen unter Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen finden sich in Kapitel 6.2.

Die wissenschaftlichen Modellansätze zur Standortplanung werden nach Domschke und Drexel (1996) in die drei Teilgebiete volkswirtschaftliche, betriebliche und innerbetriebliche Standortplanung eingeteilt.¹⁰² Modelle für Standortentscheidungen von Ladestationen für elektrifizierte Fahrzeuganwendungen sind in das Gebiet der betrieblichen Standortplanung (*Facility Location Planning*) einzuordnen, das Problemstellungen der

¹⁰¹ Operation Research (OR) stellt einen Wissenszweig dar, „der sich mit der Analyse von praxisnahen, komplexen Problemstellungen im Rahmen eines Planungsprozesses zum Zweck der Vorbereitung von möglichst guten Entscheidungen durch die Anwendung mathematischer Methoden beschäftigt. Die Hauptaufgaben im OR bestehen in der Abbildung eines realen Entscheidungsproblems durch Optimierungs- oder Simulationsmodelle und die Anwendung bzw. Entwicklung eines Algorithmus zur Lösung des Problems.“ Domschke et al. (2015), S. 1

¹⁰² Vgl. Domschke und Drexel (1996), S. 1ff

Standortwahl einzelner Unternehmen, Unternehmenseinrichtungen oder auch öffentlicher Einrichtungen adressiert. Aufgrund der diversen Anwendungsbereiche solcher Modelle und ihrer spezifischen Ausrichtung auf die jeweilige Problemstellung weist die Literatur eine Vielzahl von Modellklassen auf, die sich u. a. hinsichtlich ihrer Zielfunktion, der Abbildung der Nachfrage, der Anzahl an Standorten sowie ihrer spezifischen Nebenbedingungen unterscheiden.¹⁰³ Mit der Frage nach bestmöglichen Standorten innerhalb eines Netzwerks ohne Präferenzunterscheidung in der Nachfrage befassen sich die *Location-Allocation*-Modelle (LA-Modelle). Sie sind darauf ausgerichtet, diejenige Kombination möglicher Standorte unter Berücksichtigung einer geografisch verteilten Nachfrage und verschiedener Nebenbedingungen zu bestimmen, welche die Zielvorgaben, beispielsweise eine Kostenminimierung, am vorteilhaftesten erfüllt.¹⁰⁴ Die LA-Modelle unterscheiden sich wiederum in der Darstellung der Nachfrage, die in den klassischen Modellen statisch in Punkten bzw. Knoten abgebildet und in den sogenannten *Flow-Capturing-Location*-Modellen (FCLM) als fahrtbezogene Verkehrsströme berücksichtigt wird. Grundsätzlich können beide Modellklassen – wie die Literaturübersicht in Kapitel 6.2 zeigt – zur Ladeinfrastrukturauslegung von elektrischen Fahrzeuganwendungen genutzt werden. Dies geht zum einen mit dem Bedarf an Ladestationen einher, der durch geografische Konzentration der Nachfrage (punktbasiert), z. B. Laden am Arbeitsplatz, und durch einen verkehrsorientierten Bedarf (flussbasiert) aufgrund der Reichweitenbeschränkung gekennzeichnet sein kann. Zum anderen ist eine bedarfsabhängige Auslegung der Ladeinfrastruktur anzustreben, die bestimmte Vorgaben zur Abdeckung einer Nachfrage erfüllt.¹⁰⁵ Eine umfangreiche Übersicht zu den mathematischen Formulierungen und der breiten Anwendung von Standortplanungsmodellen bietet das Werk von Drezner und Hamacher (2004).

Bei einer Vielzahl von Standortentscheidungen stellt die Distanz zwischen Angebotspunkten und Nachfragern ein entscheidendes Effizienzmaß dar. Ein etabliertes Modell in diesem Bereich ist das *p-Median*-Modell, das auf einem Netzwerk, in dem jeder Knoten

¹⁰³ Vgl. Hoerstebroek (2014), S. 16

¹⁰⁴ Vgl. Tu et al. (2016), S. 173

¹⁰⁵ Vgl. Hoerstebroek (2014), S. 17; NOW - Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzelle (2014), S. 87 zur bedarfsgerechten Infrastrukturauslegung.

einen Nachfragepunkt darstellt, basiert.¹⁰⁶ Ziel ist die Minimierung der mit der Nachfrage gewichteten Distanz zwischen den Nachfrageknoten und den vorgegebenen Angebotspunkten. Auf diese Weise erreicht das *p-Median*-Modell eine Standortverteilung, die sich an der Höhe der Nachfrage orientiert.¹⁰⁷ Nicholas et al. (2004) nutzen diesen Modellansatz beispielsweise in Verbindung mit einem Geoinformationssystem zur Auslegung einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur in Kalifornien.

Ähnlich dem *p-Median*-Modell geht das *Maximum Covering Location Problem* (MCLP) von einer vordefinierten Anzahl an Standorten bzw. Angebotspunkten aus. Im Gegensatz zum *p-Median*-Modell und der Reduzierung der durchschnittlichen Entfernungen zu Nachfragepunkten strebt die Modellierung auf Basis des MCLP eine Maximierung der abgedeckten Nachfragepunkte unter Berücksichtigung einer festgelegten Maximaldistanz zwischen Angebots- und Nachfragepunkt an.¹⁰⁸ Dieser Ansatz wird beispielsweise von García-Palomares et al. (2012) genutzt, um die Standortbestimmung für die Stationen eines Fahrradverleihsystems vorzunehmen.

Das *Location Set Covering Problem* (LSCP) beschreibt ebenfalls ein verbreitetes LA-Modell, wobei gegensätzlich zu den beiden vorgenannten Modellen das LSCP die Anzahl an Angebotspunkten nicht vorgibt. Die Angebotspunkte werden so verteilt, dass die Erfüllung der Anforderungen einer jeweiligen Nachfrage innerhalb einer vorgegebenen Zeit oder Distanz garantiert wird. Dabei gilt es, die Standortfestlegung so vorzunehmen, dass die Kosten der Nachfragedeckung bzw. die Anzahl an Angebotspunkten unter Einhaltung der vorgegebenen Grenzwerte minimiert werden.¹⁰⁹ Das LSCP wird bevorzugt bei der Standortbestimmung von Rettungsdienststellen wie der Feuerwehr und Notaufnahmen von Krankenhäusern verwendet.¹¹⁰ Darüber hinaus gehen erste Anwendungen im Busbereich auf Gleason (1975) zurück, welcher LSCP zur Standortverteilung von Bushaltestellen verwendete.

¹⁰⁶ Vgl. Hakimi (1964); Hakimi (1965), führte das *p-Median-Modell* im Rahmen seiner Untersuchungen zur Platzierung von Schaltzentren in Kommunikationsnetzwerken und Polizeistationen in Autobahnnetzen ein.

¹⁰⁷ Vgl. He et al. (2016), S. 133

¹⁰⁸ Vgl. Church und ReVelle (1974), die in ihrem Beitrag das *Maximum-Covering-Location-Problem* definiert haben.

¹⁰⁹ Vgl. Haase und Hoppe (2008), S. 22f

¹¹⁰ Erste Modelle in diesem Bereich entstanden in den 1970er-Jahren. Siehe hierzu u. a. Toregas et al. (1971).

Zusätzlich zu den bisher genannten klassischen Modellen, die die Nachfrage in Knoten abbilden, werden Standortmodelle, die die Nachfrage als Verkehrsströme (*flows*), bestehend aus einer Vielzahl einzelner Fahrten (*trips*), berücksichtigen, vermehrt für die Standortbestimmung von Betankungseinrichtungen eingesetzt. Das FCLM stellt eine Erweiterung der klassischen Modelle dar und wurde erstmals durch Hodgson (1990) beschrieben. Der Standort einer Einrichtung wird demnach so gewählt, dass möglichst viele Verkehrsströme abgedeckt werden. Eine Erweiterung dieses Modells zur Berücksichtigung von Fahrzeugreichweiten erfolgte durch Kuby und Lim (2005). Abweichend vom Basismodell, in dem angenommen wird, dass ein Verkehrsstrom bei einem einzigen Schnittpunkt (Betankungsvorgang) mit einer Einrichtung versorgt wird, kann die Reichweitenbegrenzung eine mehrfache Betankung entlang des Verkehrsflusses erfordern. Darüber hinaus erfolgte eine Verschärfung der Nebenbedingungen bezüglich der Tankstellenpositionierung zueinander, sodass Maximaldistanzen in Abhängigkeit der Reichweite festgelegt werden können. Das erweiterte Modell wird daher als *Flow-Refueling Location Model* (FRLM) bezeichnet.

Neben den vorgestellten Modellansätzen aus dem Bereich der Standortplanung werden analoge Problemstellungen ebenfalls in der Tourenplanung adressiert. Viele Standortprobleme enthalten daher Aspekte der Tourenplanung.¹¹¹ Im Gegensatz zu Standortproblemen jedoch, bei denen die Reihenfolge der Standorte nicht speziell berücksichtigt wird, kann in der Tourenplanung die Bedienung einer Nachfrage bzw. von Standorten durch Fahrzeuge unter Berücksichtigung eines Wegenetzes und einer bestimmten Abfolge realisiert werden.¹¹² In der Literatur werden entsprechende Problemstellungen unter den Begriffen *Vehicle Routing Problem* (VRP) und *Vehicle Scheduling Problem* (VSP) rubriziert. Die Ausgangssituation bei einem VRP und VSP ist beschrieben durch eine Anzahl an Fahrzeugen, stationiert an einem oder mehreren Standorten, die eine Kunden- bzw. Fahrgastnachfrage so bedienen, dass vorgegebene Nebenbedingungen erfüllt und die definierte Zielfunktion optimiert wird.¹¹³ Ein häufiges Ziel der VRP und VSP stellt die Minimierung der Gesamtkosten für die Bereitstellung einer Transportdienstleistung dar. Dies kann beispielsweise die Fahrzeugkosten, Laufleistungen und Personalkosten umfassen. Die Unterscheidung nach einem klassischen VRP und einem VSP begründet sich

¹¹¹ Vgl. Littger (1992), S. 88

¹¹² Vgl. Werkmeister (1997), S. 37f

¹¹³ Vgl. Desrochers et al. (1990), S. 323

durch die Formulierung zeitlicher Restriktionen und möglicher Vorrangbeziehungen. Ob liegen keine Zeitbeschränkungen und Vorrangbeziehungen bei der Bedienung von einer Kundennachfrage, handelt es sich um ein klassisches VRP. Falls hingegen bestimmte Zeiten für die Dienstleistung bzw. Fahrten gemäß einem Fahrplan terminiert sind und eine Reihenfolge vorgegeben ist, liegt ein VSP vor.¹¹⁴ So eindeutig die Abgrenzung der beiden klassischen Modelle scheint, zeigen anwendungsbezogene Problemformulierungen oftmals Elemente beider Ausprägungen auf, die jeweils über spezifische Nebenbedingungen definiert sein können, und erschweren eine Differenzierung. Darüber hinaus hat die enge Verflechtung der beiden Ansätze in der Praxis zu einer integrierten Betrachtung und Bewertung von VRP und VSR geführt.¹¹⁵ Einen umfassenden Überblick zu veröffentlichten Anwendungen von Modellen zeigen Littger (1992) und Eksioglu et al. (2009) auf. In der zweitgenannten Ausarbeitung wird darüber hinaus die starke Zunahme an Publikationen im Bereich der Tourenplanung in den letzten zwanzig Jahren dokumentiert.¹¹⁶

Aufgrund der beschriebenen Zielsetzung werden die VRP- und VSP-basierten Modelle insbesondere bei kommerziell genutzten Fahrzeugen des Wirtschaftsverkehrs und des fahrplanbezogenen Personenverkehrs angewendet. Das klassische VSP wird in diesen Bereichen zur Kostenminimierung bei der Zuteilung von Fahrzeugen einer Flotte auf fahrplangebundene Fahrten unter Berücksichtigung spezifischer Randbedingungen eingesetzt. Modellansätze des VSP können grundsätzlich ausgelegt sein, um die Umlaufplanung für ein bestimmtes Flottendepot oder für eine Vielzahl unterschiedlicher Depots vorzunehmen.¹¹⁷ Darüber hinaus existieren zahlreiche Weiterentwicklungen der Basismodelle, beispielsweise für VSP mit einer heterogenen Fahrzeugflotte, irreguläre Abfahrts- und Ankunftszeiten und zeitliche Einsatzbeschränkungen.¹¹⁸ Die letztgenannten Modellausprägungen werden als *Vehicle Scheduling Problem with Route Constraints* (VSPRC) bezeichnet und können genutzt werden, um eine limitierte zeitliche Einsatzdauer aufgrund von Personaleinsatzzeiten oder Kraftstoffbeschränkungen abzubilden. Einen effektiven

¹¹⁴ Vgl. Haksever und Render (2013), S. 369

¹¹⁵ Vgl. Funke (2003), S. 7; siehe u. a. die wissenschaftlichen Beiträge zur Taxonomie von Problemen der Tourenplanungen von Bodin und Golden (1981) und Desrochers et al. (1990).

¹¹⁶ Vgl. Eksioglu et al. (2009), S. 1475

¹¹⁷ Die Terminologie der Tourenplanung differenziert hier nach *Single Depot Vehicle Scheduling Problem* (SDVSP) und *Multi Depots Vehicle Scheduling Problem* (MDVSP).

¹¹⁸ Vgl. Bunte und Kliewer (2009)

Ansatz zur Implementierung zeitlicher Restriktionen lieferten Freling und Pinto Paixao (1995). Eine weitere Spezialisierung auf Fahrzeugtouren mit mehrmaligen Anfahren des Depots innerhalb einer Einsatzschicht, ähnlich der Einsatzpläne sogenannter Verstärkerfahrten im öffentlichen Busverkehr, lieferten Haghani und Banihashemi (2002). Die spezifischen Besonderheiten elektrischer Fahrzeuge hinsichtlich einer signifikanten Reichweitereinschränkung im Vergleich zu konventionellen Dieselfahrzeugen sowie der Nachladung an dedizierten Standorten berücksichtigten Wang und Shen (2007) und definierten das *Vehicle scheduling problem with route and fueling time constraints* (VSPRFTC), das eine optimierte Zuteilung der Fahrzeuge einer Flotte auf fahrplanbasierten Fahrten mit der Einhaltung der notwendigen Ladezeit für die Fahrzeuge unter Berücksichtigung der limitierten Reichweite erlaubt. Zhu und Chen (2013) formulierten schließlich einen Ansatz für den Busbetrieb mit einer Batteriewechselstation in Schanghai und dem Ziel der Minimierung der Fahrzeuganzahl, der Wechselbatterien sowie der benötigten Ladeleistung. Die Modellansätze zur Abbildung der technischen und betrieblichen Eigenschaften elektrischer Fahrzeuge im Rahmen der Umlaufplanung können als *Electric Vehicle Scheduling Problem* (EVSP) klassifiziert und zusammengefasst werden.¹¹⁹

Analog zu der beschriebenen Entwicklung von Modellansätzen zur Abbildung der charakteristischen Eigenschaften elektrischer Fahrzeuge erfolgte die Modelladaption im Bereich des VRP. Das klassische VRP führt zu einer Modellierung mit dem Ziel, die optimierten Routen durch Festlegung einer bestimmten Reihenfolge bei gegebenem Wegenetz und Auftragsbestand sowie ausgehend von einem oder mehreren Depots zu bestimmen. Üblicherweise wird eine kostenminimale Lösung aus der Fahrzeuganzahl und der Routenlänge angestrebt, bei der jeder Kunde nur einmal beliefert wird, also keine Teillieferungen existieren.¹²⁰ Erste explizite Problembeschreibungen mit modelldominierenden Distanzrestriktionen für konventionelle Fahrzeuge werden u. a. von Ichimori et al. (1983), Laporte et al. (1984) und Laporte et al. (1985) adressiert. Li et al. (1992) ergänzen darüber hinaus Erweiterungen zur individuellen Eingrenzung der Tageslaufleistung einzelner Fahrzeuge einer Flotte. Problemstellungen mit den genannten Reichweitenbeschränkungen werden als *Distance Constrained Vehicle Routing Problem* (DCVRP) be-

¹¹⁹ Vgl. Reuer et al. (2015)

¹²⁰ Vgl. Sharda et al. (2008), S. 3

zeichnet und können als Ausgangsmodelle für folgende Ansätze für alternative Fahrzeuganwendungen verstanden werden. Die beschriebenen Eigenschaften elektrischer Fahrzeuge hinsichtlich einer signifikanten Reichweiteneinschränkung, die Notwendigkeit des Nachladens verbunden mit einer Ladezeit und zugehörigem Ladestandort sowie fahrzeugtechnische Besonderheiten wie der Energierekuperation im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen, führten zu einer Problemformulierung mit dem Fokus auf eine energieeffiziente Routenplanung anstatt auf einer rein entfernungsbezogene.¹²¹ Erste Tourenprobleme dieser Art formulierten Artmeier et al. (2010) sowie Conrad und Figliozzi (2011). Der zweitgenannte Modellansatz berücksichtigt für den Lieferverkehr ein Nachladen des Fahrzeugs im Betrieb und außerhalb des Flottendepots. Potenzielle Ladestationen können an Nachfrageknoten, z. B. an einem Kundenstandort oder auch im übertragenen Sinne an Bushaltestellen, errichtet werden. Die Standortbestimmung der Ladestationen ist jedoch nicht Teil der Optimierung, sondern erfordert eine Vorfestlegung. Diese Weiterentwicklung und Einbindung möglicher Ladestandorte im vorgegebenen Wegenetz wurde von Conrad und Figliozzi (2011) als *Recharging Vehicle Routing Problem* (RVRP) definiert. Schneider et al. (2012) beschreiben ebenfalls das Problem der Reichweiteneinschränkung und limitierten Verfügbarkeit von Ladestationen für elektrische Lieferfahrzeuge. Es wird, wie üblich für VRP, eine Minimierung der eingesetzten Fahrzeuge und der Gesamtleistung der Fahrzeuge angestrebt. Allerdings wird eine Nachladung der Fahrzeuge im Betrieb und außerhalb des Depots ermöglicht und die benötigte Ladezeit in Abhängigkeit des Batterieladezustandes berücksichtigt.¹²² Analog zum EVSP hat sich für VRP, die die besonderen Eigenschaften elektrischer Fahrzeuge reflektieren, die Bezeichnung *Electric Vehicle Routing Problem* (EVRP) etabliert.¹²³ Barco et al. (2013) führte das erste EVRP mit einem simulierten Fahrzeugenergiebedarf ein, sodass der Fahrzeugverbrauch in Abhängigkeit physikalischer Größen und externer Faktoren bestimmt wird. Die Zielfunktion minimiert auf dieser Basis den Energiebedarf der Fahrzeuge anstelle der zurückgelegten Strecke. Zusätzlich wird die Ladestrategie optimiert und die durch das Entladeverhalten bedingte Batteriealterung berücksichtigt. Als Anwendungsfall dient ein Flughafenbus-Shuttleservice zu Hotels mit ausschließlicher Lademöglichkeit im Depot. Eine Standortwahl für Ladestationen entlang der Strecke wird jedoch nicht adressiert.

¹²¹ Vgl. Artmeier et al. (2010), S. 1

¹²² Hierzu wird für alle zurückgelegten Wege ein Energiebedarf mit einem konstanten Verbrauchsfaktor berechnet.

¹²³ Siehe hierzu u. a. Afroditi et al. (2014), Barco et al. (2013), Lin et al. (2016).

Die vorgestellten Modellansätze der Standort- und der Tourenplanung eignen sich grundsätzlich allesamt, um die spezifischen Eigenschaften elektrischer Fahrzeuge abzubilden. Die Literaturübersicht in Kapitel 6.2 wird zeigen, dass alle vorgestellten Modelle zur Standortbestimmung von Ladepunkten für elektrische Fahrzeuge verwendet werden. Die Standortplanung zielt dabei auf die explizite Bestimmung optimaler Standorte der Ladeinfrastruktur. Die Tourenplanung hingegen basiert auf vorgegebenen Standorten und intendiert die Optimierung der Routenabfolge bzw. der Fahrzeugeinsatzplanung. Die aufgezeigten Problemstellungen und die Vielzahl unterschiedlichen Modellansätzen unterstreichen die breite und flexible Anwendung von Standort- und Tourenplanungsmodellen. Eine strikte Abgrenzung der jeweiligen Ansätze, die sich jeweils durch die Definition spezifischer Nebenbedingungen auszeichnen, ist insbesondere für die Tourenplanung erschwert.

Die in Kapitel 6 definierte Problemstellung zur Auslegung einer Ladeinfrastruktur für innovative elektrische Bussysteme vereint sowohl Aspekte der klassischen Standort- als auch der Tourenplanung. In Tabelle 2-3 sind die drei grundlegenden Modellansprüche aggregiert dargestellt. Eine detaillierte Darstellung soll an dieser Stelle Kapitel 6 nicht vorweggenommen werden. Vielmehr ist beabsichtigt, aufzuzeigen, dass eine interdisziplinäre Vorgehensweise und Modellbildung erforderlich ist. Zusammengefasst sind folgende Punkte für die kostenoptimierte Auslegung der Ladeinfrastruktur erforderlich:

- die Abbildung von Routen mit relevanten Faktoren zur Bestimmung des weg- und zeitabhängigen Fahrzeugenergiebedarfs,
- die kostenminimierte Bestimmung von Ladepunktstandorten (als freie Entscheidungsvariable)
- und die Berücksichtigung von fahrzeugtechnischen Charakteristiken elektrischer Busse wie Reichweiteneinschränkung und Ladeverhalten.

Tabelle 2-3: Auslegung der Ladeinfrastruktur für innovative elektrische Bussysteme als Querschnittsthema unterschiedlicher Forschungsrichtungen

Relevante Aspekte	Standortplanung				Tourenplanung	
	p-Median	MCLP	LSCP	FCLM	VSP	VRP
Routen-/Streckenbetrachtung					X	X
Standortentscheidung (frei)	X	X	(X)	X		
Modellierung EV spezifisch	X	X	X	X	X	X

Die Tabelle 2-3 zeigt die relevanten Elemente der beschriebenen Modellansätze für die zu betrachtende Problemstellungen auf. Die Bewertung der Modellansätze hinsichtlich bedeutsamer Modelleigenschaften orientiert sich dazu jeweils an den klassischen Problemdefinitionen.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass neben der Modellbildung aus einer Zielfunktion sowie einer Reihe von Variablen und Nebenbedingungen die Entscheidung nach einem geeignetem Lösungsverfahren für das Optimierungsproblem getroffen werden muss. Von großer Bedeutung für die Wahl des Lösungsverfahrens ist die Charakteristik des Lösungsraumes, der durch die Nebenbedingungen festgelegt wird.¹²⁴ Die Verfahren werden in exakte Optimierungsmethoden, die die Ermittlung einer mathematisch beweisbaren optimalen Lösung verfolgen, sowie in heuristische und metaheuristische Verfahren, die sich mit Näherungslösungen begnügen, unterschieden.¹²⁵ Zu den erstgenannten Verfahren werden beispielsweise die lineare Programmierung und die gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung gezählt. Es sei an dieser Stelle bereits erwähnt, dass die verwendete Modellstruktur zur Auslegung der Ladeinfrastruktur im Kapitel 6 einer gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung bzw. Programmierung entspricht, d. h., die Variablen können sowohl reelle Zahlen annehmen als auch ganzzahlig sein. Eine umfassende Beurteilung unterschiedlicher Lösungsverfahren ist nicht Bestandteil der vorliegenden Ausarbeitung. Als Übersicht zu Lösungsverfahren und deren Anwendungen sind für die betrachteten Forschungsrichtungen folgende Werke und Rezensionen zu empfehlen: Eiselt und Marianov (2011) für die Standortplanung, Braekers et al. (2016) für das VRP und Baita et al. (2000) für das VSP.

2.2 Technologische Grundlagen urbaner elektrischer Bussysteme

Der Großteil der Fahrten im ÖPNV wird durch den Busverkehr erbracht. So wurden beispielsweise in Europa im Jahr 2014 rund 55 % der Fahrgastfahrten von Bussen durchgeführt, gefolgt von U- und Straßenbahnen.¹²⁶ Dem Verkehrsmittel Bus kommt daher eine zentrale Rolle in der Bedienung der ÖPNV-Nachfrage zu. Die Fahrzeugflotte in

¹²⁴ Vgl. Littger (1992), S. 12

¹²⁵ Vgl. Suhl und Mellouli (2013), S. 20

¹²⁶ Vgl. UITP - International Association of Public Transport (2016), S. 1

Europa besteht zu fast 90 % aus fossil kraftstoffbetriebenen Bussen, von denen ca. 50 % die Euro-IV-Norm nicht erfüllen.¹²⁷

Nach der Einführung der Euro-VI-Norm im Jahr 2014 nähert sich der Verbrennungsmotor in Bezug auf das innerstädtisch-dynamische Fahrprofil und den Anforderungen an Effizienz und Emissionen seiner systemimmanenten Grenzen und eröffnet den Weg für neue Antriebstechnologien.¹²⁸ Die elektrischen Antriebe können das Fahrprofil in ihrer Leistungscharakteristik besser darstellen, haben erhebliche Vorteile in der Effizienz und bieten insbesondere mit der Möglichkeit eines lokal emissionsfreien Betriebs eine Antwort auf die *Ultra Low* und *Zero Emission Zones* (ULEZ und ZEZ), die zur Reduktion von Abgasemissionen bereits in zahlreichen Städten eingeführt wurden. Zudem eignet sich das Segment der Stadtbusse durch das Betriebsprofil für die Einführung elektrischer Antriebe. So sind die Systemanforderungen über die gesamte Betriebsdauer vergleichsweise konstant: hohe Kilometerlaufleistungen werden erreicht; und durch ein integriertes und zentrales Flottenmanagement sowie entsprechende Skaleneffekte können sich auch große Infrastrukturinvestitionen langfristig als wirtschaftlich erweisen. Elektrische Antriebe im Busverkehr tragen nicht nur durch die Emissionseinsparungen von Luftschadstoffen zur Sicherung des Umweltvorteils des ÖPNV bei, sondern führen auch zu einer deutlichen Lärmreduktion, die einerseits den Fahrkomfort für die Fahrgäste erhöht und andererseits die Geräuschbelastung im öffentlichen Raum insgesamt reduziert.

Das vorliegende Kapitel der technologischen Grundlagen widmet sich zum einen der Marktanalyse im Segment der Stadtbusse und zeigt die Marktchancen elektrischer Busse auf. Zum anderen werden unterschiedliche innovative elektrische Buskonzepte beschrieben und die relevanten Konzepte für die Bewertung eingegrenzt.

2.2.1 Marktanalyse zu Stadtbussen und Marktchancen für Elektrobusse

Der Gesamtmarkt für Kraftfahrzeuge zur Beförderungen von Personen unterscheidet sich wesentlich vom Markt von Lastkraftwagen zur Beförderung von Gütern hinsichtlich

¹²⁷ Vgl. UITP - International Association of Public Transport (2015a), S. 5; 3iBs project (2013), S. 3

¹²⁸ Vgl. Wolff (2015), S. 8

Fahrzeugbestand und Absatzzahlen, die deutlich geringer ausfallen.¹²⁹ Weiterhin steht das Bussegment der Stadtbusse zur Personenbeförderung im öffentlichen Verkehr für einen relativ geringen Anteil am gesamten Busmarkt, wie die Zahlen im folgenden Abschnitt aufzeigen werden.

Vor dem Hintergrund der Zielsetzung dieser Arbeit gilt es also zunächst, die Marktentwicklungen alternativer elektrischer Antriebe innerhalb eines global wachsenden Marktes für Kraftomnibusse zu bewerten. Als Hinführung und Basis für die spätere Kostenbewertung innovativer Bussysteme werden zunächst die Marktstrukturen und -größen relevanter Bussegmente erläutert und mögliche Entwicklungschancen quantifiziert. Die Bewertung zukünftiger Marktentwicklungen kann nur auf Grundlage von Prognosen und Annahmen erfolgen und ist daher mit den bekannten Unsicherheiten von Zukunftsanalysen und subjektiven Einschätzungen behaftet. Durch spezifische Marktannahmen der berücksichtigten Studien wird die Vergleichbarkeit der quantifizierten Marktentwicklungen erschwert. Es ist daher im späteren Verlauf der Arbeit vorgesehen, eine möglichst subtile Darstellung der Entwicklungen durch die Bestimmung eines Referenzszenarios sowie einer pessimistischen und optimistischen Marktentwicklung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte sicherzustellen. Für die zweckdienliche Analyse von Busbeständen und Marktvolumina ist eine mehrfache Differenzierung der Märkte zwingend erforderlich. Die Unterscheidung nach Bussegmenten anhand regional geprägter Marktentwicklungen und technischer Aspekte zum Elektrifizierungspotenzial ist fundamental. Die Quellenlage stellt sich dabei als schwierig dar, da die deutliche Mehrheit an Studien Fahrzeugklassen innerhalb der Personenbeförderung nicht gesondert ausweisen, aber auch teilweise eine Differenzierung zu Fahrzeugklassen des Gütertransports unterlassen. Sofern eine Bewertung der Entwicklungspotenziale zur Marktdiffusion elektrischer Busse vollzogen wird, handelt es sich in der Regel um länderspezifische Erhebungen. Eine Aggregation der Untersuchungsergebnisse für den elektrifizierten Busverkehr ist dem Autor nicht bekannt.

Gemäß den Datenerhebungen und Prognosen des International Council on Clean Transportation, dargestellt in Tabelle 2-4, beträgt der globale Busbestand derzeit ca. 16

¹²⁹ Je nach Fahrzeugklassendifferenzierung stehen Kraftomnibusse für ca. 2 bis 10 % Marktanteil am gesamten Nutzfahrzeugmarkt. Detaillierte Marktzahlen können den Studien VDA - Verband der Automobilindustrie (2015); ICCT - International Council on Clean Transportation (2015); Shell Deutschland Oil GmbH (2016) entnommen werden.

Millionen Fahrzeuge. Die Hauptmärkte nach Fahrzeugbestand bilden der asiatisch-pazifische Raum (insbesondere China) Lateinamerika, Afrika und die EU-27.¹³⁰

Tabelle 2-4: Globaler Busbestand und Markterwartungen nach Regionen in Mio. Fahrzeuge¹³¹

Region	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
USA	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9
Kanada	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Mexiko	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4
Brasilien	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
Rest Lateinamerika	0,6	0,8	1,2	1,1	1,2	1,2	1,3
EU-27	0,8	0,8	0,8	1,1	1,1	1,1	1,1
Russland	0,6	0,8	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7
Rest Europa	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5
China	2,0	2,1	2,6	2,4	2,8	3,1	3,5
Japan	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Indien	0,5	0,5	0,7	1,1	1,4	1,7	2,0
Rest Asien-Pazifik	3,1	4,0	4,6	4,8	5,2	5,3	5,7
Mittlerer Osten	0,3	0,5	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5
Afrika	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Global	11,2	13,1	15,6	16,1	17,6	18,9	20,3

Bedingt durch die wachsende Nachfrage im öffentlichen Verkehr sowie einen zeit- und kosteneffizienten Aufbau und Einsatz von Busliniennetzen zur Bedienung eines Fahrgastaufkommens ist die Fortführung eines globalen Wachstumstrends im Bussektor zu erwarten. Busbasierte Verkehrssysteme bieten durch die zumeist wenig aufwendige Infrastruktur den Vorteil geringer Anfangsinvestitionen, einer hohen Flexibilität und kurzer Planungsphasen. Zudem entwickeln sich neue Märkte sowohl länderspezifisch aufgrund wirtschaftlicher Prosperität als auch durch den weltweit bestehenden Trend zu Urbanisierung.¹³² Im Zuge des gestiegenen Mobilitätsbedarfs und der Bildung neuer Metropolregionen werden Busse insbesondere in Gebieten mit hoher Bevölkerungsdichte als eine zügig realisierbare Lösung für Verkehrsstaus und Umweltbelastungen angesehen.¹³³ Die

¹³⁰ Das regionale Wachstum des Fahrzeugbestands kann von der Anzahl der Fahrzeugeritzulassungen aufgrund vom Handel mit Gebrauchtfahrzeugen abweichen.

¹³¹ ICCT - International Council on Clean Transportation (2012), S. 93. Prognose für die Jahre 2015, 2020, 2025 und 2030. Der Busbestand umfasst alle Stadtbusse, Fernbusse, Schulbusse etc. zur Personenbeförderung.

¹³² Vgl. UITP - International Association of Public Transport (2015b)

¹³³ Vgl. Lowe et al. (2008)

prognostizierten Zahlen zum Busbestand für unterschiedliche Regionen in Tabelle 2-4 erzeugen ein inkonsistentes Bild. Es ist ersichtlich, dass eine Bewertung des Wachstums eine erste geografische Differenzierung erfordert. Demnach ist die positive Entwicklung des Fahrzeugbestandes in wirtschaftlich aufstrebenden Ländern und Regionen wie China und Indien oder Entwicklungsländern im afrikanischen Raum deutlich ausgeprägter als in den westlichen Industrieländern, für die überwiegend eine Stagnation des Bestandes erwartet wird.

Darüber hinaus ist an dieser Stelle eine zusätzliche Differenzierung und Fokussierung auf Bussegmenten notwendig, die technologisch die größten Potenziale einer Elektrifizierung bieten. Es ist zu konstatieren, dass unter dem aktuellen technologischen Stand und zukünftigen Entwicklungsperspektiven ein Großteil der Fahrzeuge technisch nicht elektrifiziert werden kann bzw. ein wirtschaftlicher Einsatz nicht absehbar ist. Wie bereits eingehend erläutert, ist das Elektrifizierungspotenzial im Bereich von Stadtbussen als vielversprechend hoch einzuschätzen.^{134,135} Der Fokus liegt also im Folgenden vorrangig auf dem Markt von Bussen für den innerstädtischen öffentlichen Nahverkehr (*heavy-duty transit bus*¹³⁶), der für rund 20 % des Gesamtmarktes steht.¹³⁷

Der Markt für Stadtbusse hatte im Jahre 2015 ein globales Absatzvolumen von ca. 110.000 Fahrzeugen und kommt auf eine zu erwartende jährliche Wachstumsrate (CAGR) von rund 8 % im Zeitraum von 2015 bis 2022.¹³⁸ Diese Wachstumsrate ist vorrangig durch aufstrebende Entwicklungs- und Schwellenländer getrieben und steht nicht stellvertretend für die bereits erwähnten gesättigten Märkte. Von dem erwarteten Gesamtvolumen von rund 200.000 jährlich ausgelieferten Stadtbussen bis zum 2020 ist hierbei China mit mehr als 60.000 Einheiten weiterhin der größte Markt, gefolgt von Südamerika und Indien.¹³⁹

¹³⁴ Vgl. Sandén und Wallgren (2014), S. 169ff

¹³⁵ Elektrifizierung mittels Hybridsystemen ist zwar auch im außerstädtischen Fernverkehr technisch möglich, jedoch durch das wenig dynamische Fahrprofil ist nur ein sehr begrenztes Einsparpotential zu realisieren (ausgenommen sind sogenannte *E-Highway*).

¹³⁶ *Heavy-duty transit bus* umfasst die Busklassen für den innerstädtischen Personenverkehr mit Ausnahme von Sonderbeförderungsfahrzeugen wie Schulbusse. Berücksichtigte sind in der Regel Fahrzeuge mit einer Länge > 8 m und einem Fahrzeuggewicht > 8 t.

¹³⁷ Vgl. Lowe et al. (2008), S. 6

¹³⁸ Vgl. Frost & Sullivan research (2015), S. 4

¹³⁹ Vgl. Grütter (2015), S. 12; Frost & Sullivan research (2015), S. 4; weitere Studien prognostizieren Wachstumsraten von rund 5 %. Siehe hierzu u. a. Lowe et al. (2008)

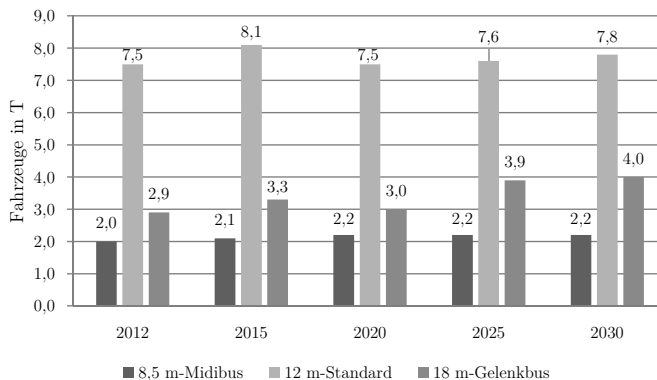


Abbildung 2-8: Jährliche Neuzulassungen im Segment Stadtbus in der EU-27 (inkl. Norwegen und der Schweiz)¹⁴⁰

Europa ist im Bereich öffentlicher Verkehrsmittel ein relevanter, aber stagnierender Markt. So haben die EU-27 bzw. EU-28 in den letzten Jahren durch die hohe Akzeptanz öffentlicher Verkehrsmittel rund 13.000 Neuzulassungen für Stadtbusse pro Jahr zu verzeichnen.¹⁴¹ Durch das bereits breite Angebot des öffentlichen Verkehrs und den hohen Entwicklungsstand Europas ist allerdings in den nächsten Jahren nur mit einem geringen Wachstum für das Segment Stadtbus zu rechnen, sodass der Bestand perspektivisch nahezu konstant bleiben wird.¹⁴² Dies führt dazu, dass der europäische Markt aufgrund des starken Wachstums der Märkte in den wirtschaftlich aufstrebenden Ländern Marktanteile abgeben und an Relevanz verlieren wird. Die prognostizierte Entwicklung der jährlichen Neuzulassungen nach Gefäßgrößen ist in Abbildung 2-8 dargestellt, wobei die Segmente 12 m-Standardbus, 18 m-Gelenkbus und 8,5 m-Midibus insgesamt für fast 90 % der jährlichen Zulassungen stehen. Bemerkenswert ist die Abnahme der Neuzulassungen von 12 m-Standardbussen zugunsten der 18 m-Gelenkbusse im Zeitraum von 2015 bis 2030, die eine erhöhte Mobilitätsnachfrage in Ballungsgebieten und die erforderliche Kapazitätsausweitung bei einer bereits hohen Servicequalität (dichte Taktungen etc.) widerspiegelt.

¹⁴⁰ Vgl. FCH JU (2012), S. 46

¹⁴¹ Vgl. FCH JU (2012), S. 46

¹⁴² Vgl. FCH JU (2012); Shell Deutschland Oil GmbH (2016)

In Deutschland lag der Busbestand im Jahre 2014 bei insgesamt 18.610 Stadtbussen.¹⁴³ Aufgeschlüsselt nach Antriebstechnologien der Linienbusflotten ergibt sich ein stark auf fossile Kraftstoffe ausgerichteter Bestand mit Diesel- (94 %), Erdgas- (4 %) und teilweise vollelektrifizierten Bussen (zusammen 2 %).¹⁴⁴ Dies entspricht in etwa auch dem globalen Anteil von Erdgas- und (teil-)elektrifizierten Buskonzepten, der mit rund 7 % angegeben wird.¹⁴⁵ Die Marktentwicklungen für alternative, elektrifizierte Fahrzeugkonzepte werden unisono als positiv bewertet, sind jedoch zum Teil von deutlich unterschiedlichen zukünftigen Marktanteilen geprägt. Ein starkes Wachstum des Gesamtmarktes in einzelnen Ländern bedeutet jedoch nicht immer auch ein starkes Nachfragewachstum für elektrifizierte Fahrzeuge. Im Vergleich der Prognosen von Russland und China zeigt sich der starke Einfluss lokaler Gegebenheiten (Klimazonen, Siedlungsstruktur, lokale Anbieterstruktur etc.) und politischer Maßnahmenprogrammen. So wird beispielsweise in China, um der fortgeschrittenen Urbanisierung des Landes gerecht zu werden, in lokal emissionsfreie Mobilitätssysteme investiert, während in Russland der verkehrspolitische Fokus auf lokale Emissionsfreiheit weniger ausgeprägt ist.¹⁴⁶

Die Marktprognosen für elektrische Bussysteme belaufen sich auf bis zu 42.000 weltweit verkaufte Einheiten im Jahr 2020. Jährliche Wachstumsraten für das Stadtbussegment von elektrifizierten Fahrzeugen werden in der Mehrzahl mit rund 20 % geschätzt.¹⁴⁷ Dieser Wert ist erheblich höher als die CAGR für den gesamten Busmarkt und führt damit zu einem perspektivisch wachsenden Anteil alternativer Bussysteme. An dieser Entwicklung hat Prognosen zufolge China mit einem Marktanteil von über 40 % im Jahr 2020 den größten Anteil, gefolgt von Europa und den übrigen BRIC-Staaten.¹⁴⁸ Die chinesische Marktdominanz wird im Bereich der alternativen Antriebe bei einem Blick auf vollelektrifizierte, batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV) deutlich: Über 90 % der weltweit in 2013 und

¹⁴³ VDV - Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2015), S. 37. Demnach liegt in Deutschland der Bestand an Linienbussen (konzessionierten Linien) bei rund 36.000 Fahrzeugen, wovon etwa die Hälfte im ÖPNV als Stadtbusse eingesetzt werden.

¹⁴⁴ Pütz (2013), S. 3

¹⁴⁵ Leenen und Padovan (2015), S. 10

¹⁴⁶ Frost & Sullivan research (2015), S. 4f

¹⁴⁷ Vgl. Frost & Sullivan research (2013), S. 16. Es werden Hybrid-, rein batteriebetriebene und Brennstoffzellenbusse aggregiert. Es werden Fahrzeuge mit einer Länge > 10 m betrachtet.

¹⁴⁸ Vgl. Frost & Sullivan research (2015); P&S Market Research (2016); BRIC umfasst die Staaten Brasilien, Russland, Indien und China.

2014 bestellten BEV wurden bzw. werden in China ausgeliefert.¹⁴⁹ Die zahlreichen Megastädte mit teils erheblichen Schadstoffproblemen und die consequenten Maßnahmenpakete der Regierung zu deren Bekämpfung schaffen hier günstige Rahmenbedingungen. Durch die Investitionen in die Kerntechnologien der elektrischen Antriebstechnik deckt die chinesische Industrie einen Großteil der Wertschöpfungskette elektrischer Bussysteme ab. Aktuell jedoch wird noch vornehmlich für den heimischen Markt produziert, und das bei einer fehlenden Markenstärke im Vergleich zu westeuropäischen Busherstellern, die den Export chinesischer Busse erschwert. Von einer stärkeren internationalen Marktpräsenz ist allerdings vor dem Hintergrund der intensiven Entwicklungs- und Expansionsbemühungen chinesischer Hersteller auszugehen. Erste Exporterfolge konnten zunächst im preissensiblen Marktsegment verzeichnet werden. Darüber hinaus beginnen die ersten Hersteller bereits mit dem Aufbau globaler Produktionskapazitäten.¹⁵⁰

In Europa ist ebenfalls ein wachsender Marktanteil elektrischer Busse absehbar. Durch die Ausweitungen der LEZ und ZEZ und erwarteten restriktiveren Grenzwerten in nahezu allen Städten und Ballungsgebieten Zentral- und Nordeuropas kommt ein unabdingbarer Bedarf an emissionsreduzierten Fahrzeugkonzepten auf und schafft so Investitionssicherheit sowohl für Betreiber als auch Anbieter.¹⁵¹ Prognosen sehen daher das Elektrifizierungspotenzial in den nächsten Jahren stark zunehmend, sodass bei stagnierenden Absatzzahlen von Stadtbussen in 2020 elektrifizierte Konzepte einen Anteil von 30 % besitzen.¹⁵² Dies entspricht jährlichen Neuzulassungen von ca. 3.800 Bussen. Demgegenüber stehen Prognosen der UITP¹⁵³, die die herausfordernden betriebs- und technologiebedingten Transformationsanpassungen bis 2020 noch nicht als vollständig überwunden sehen. Eine Marktanalyse für die 25 bevölkerungsreichsten Regionen in Europa prognostiziert für das Jahr 2020 einen Fahrzeugbestand von 2.000 elektrifizierten Bussen. Für den Zeitraum 2020 bis 2025 wird ein dynamisches Wachstum für das Elektrobusssegment

¹⁴⁹ Leenen und Padovan (2015), S. 12

¹⁵⁰ Vgl. Leenen und Padovan (2015)

¹⁵¹ Eine Übersicht zu den LEZ und ZEZ in europäischen Städten und Regionen mit relevanten Vorgaben für den ÖPNV kann der folgenden Internetseite zu entnommen werden: <http://urbanaccessregulations.eu/userhome/map>, zuletzt geprüft am 03.11.2016.

¹⁵² Vgl. Mahmoud et al. (2016), S. 677 in Anlehnung an Frost & Sullivan research (2013)

¹⁵³ UITP steht für *International Association of Public Transport* und ist ein weltweiter Zusammenschluss von Verkehrsunternehmen. In der UITP sind u. a. nationale Verbände wie der VDV, Verkehrsgesellschaften, Industrie, öffentliche Träger und Forschungsinstitute organisiert.

erwartet bei einer Konzentration auf europäische Städte, die konsequent eine Dekarbonisierungsstrategie des öffentlichen Verkehrs verfolgen, während in anderen europäischen Regionen eine Flottenerneuerung mangels finanzieller Mittel ausbleibt bzw. verzögert einsetzen wird.^{154,155} Der Fahrzeugbestand für elektrische Bussysteme in Europa wird für die untersuchten Verkehrsunternehmen mit einer Elektromobilitätsstrategie im Jahr 2025 auf rund 6.000 Fahrzeugen beziffert.¹⁵⁶ Schabka und Länger (2016) gehen ebenfalls von einer bis zum Jahr 2020 zurückhaltenden Nachfrage elektrischer Bussysteme in Europa aus mit einer anschließenden Phase eines ausgeprägten Marktwachstums und einem Anstieg auf rund 2.000 jährlich neu eingeführte Elektrobusse bis spätestens 2025.

In Deutschland beträgt der Bestand an Elektro- und Hybridbussen Anfang 2016 respektive 137 und 321 Fahrzeuge. Im Vergleich zum Vorjahr beläuft sich das Wachstum der elektrischen Antriebskonzepte somit auf insgesamt rund 13 %.¹⁵⁷ Marktstudien zur Diffusion alternativer Antriebskonzepte in Deutschland unterstreichen das Potenzial elektrifizierte Fahrzeuge im Stadtverkehr. In einer von Shell Deutschland und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführten Studie mit einem Bewertungshorizont bis 2040 werden die elektrischen Buskonzepte¹⁵⁸ für die betrachteten Szenarien jeweils als dominante Fahrzeugausprägung der nicht dieselbetriebenen Fahrzeuge gesehen.¹⁵⁹

¹⁵⁴ Neben einer Vielzahl von Städten, die ihre Ambitionen zur Elektrifizierung ihrer Busflotten artikuliert haben, seien beispielhaft Paris und London zu nennen. Beiden Städte definierten frühzeitig ihre Transformationsstrategien sowie stringente und konkrete Maßnahmen zur Umsetzung. London stellt demnach für die LEZ sowohl seine innerstädtische Eindeckerflotte mit 300 Fahrzeugen auf vollelektrifizierte Fahrzeuge bis 2020 um (51 Fahrzeuge werden bereits bis Ende 2016 im Einsatz sein) als auch die Doppeldeckerflotte mit 3.100 Fahrzeugen auf teil- und vollelektrifizierten Antriebskonzepte bis 2019 um. Die Pariser Verkehrsbetriebe RATP hat angekündigt die gesamte konventionelle Dieselbusflotte von 4.500 Fahrzeugen bis 2025 durch 80 % Hybrid- und vollelektrifizierte Fahrzeuge sowie 20 % Biogasbusse zu substituieren. Zur Umsetzung liegen hierzu bereits über 700 Fahrzeugbestellungen in 2016 vor. Die vollständigen Angaben und weiterführende Informationen zu Umsetzungsmaßnahmen für London und Paris können den jeweiligen Strategiepapieren entnommen werden. Siehe hierzu u. a. RATP - Régie autonome des transports Parisiens (2015) und TfL - Transport for London (2015).

¹⁵⁵ Vgl. Guida (2016), S. 16

¹⁵⁶ Vgl. Guida (2016), S. 16

¹⁵⁷ Kraftfahrt-Bundesamt (2016), S. 29

¹⁵⁸ Als elektrische Busse sind gemäß Studie Plug-In Hybride (PHEV), ausschließlich batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV) und Wasserstoffbusse (FCEV) zusammengefasst.

¹⁵⁹ Vgl. Shell Deutschland Oil GmbH (2016)

Gemäß des angenommenen Alternativszenarios¹⁶⁰ wird sich der Anteil elektrifizierter Fahrzeuge am Gesamtbusbestand im Jahre 2040 auf 35 % belaufen; die restlichen Fahrzeuge sind mit Diesel- (56 %) und Gasantrieb (8 %) ausgestattet. Unter der Annahme, dass die elektrifizierten Fahrzeuge hauptsächlich im Linienverkehr eingesetzt werden, entspricht dies einer Elektrifizierung von über 70 % der Linienbusflotten mit rund 25.000 Fahrzeugen.¹⁶¹ Das zweite berücksichtigte Szenario¹⁶² hingegen stellt einen Anteil bezogen auf den Gesamtbusmarkt von 91 % Dieselmussen und 6 % elektrischen Fahrzeugen (entspricht ca. 4.600 Bussen) in Aussicht. In der Studie Hacker et al. (2015) werden für den Zeithorizont bis 2025 unterschiedliche Szenarien bewertet. Für das konservativere Szenario wird der Bestand an vollelektrischen Bussen auf 40 % des Gesamtbestandes an Stadtbussen prognostiziert. Bei günstigen Preisentwicklungen hingegen wird für ein progressives Szenario sogar ein wirtschaftliches Elektrifizierungspotenzial von bis zu 80 % des Stadtbusbestandes angenommen.¹⁶³

Abschließend zur Marktübersicht und zu den Markterwartungen bezüglich elektrifizierter Buskonzepte werden folgend die Perspektiven für den US-amerikanischen Markt aufgezeigt. Neben Europa und China ist in den USA ein bemerkenswerter Aufbau einer auf alternative Fahrzeugkonzepte fokussierten Industrie zu beobachten (u. a. Entstehung großer Produktionskapazitäten von batteriebetriebenen Bussen von BYD und Proterra). Ambitionierte ordnungspolitische Maßnahmen zur Emissionsvermeidung in einigen Regionen wie Kalifornien sorgen darüber hinaus bereits aktuell für günstige Rahmenbedingungen für elektrische Bussysteme. Bezogen auf den Fahrzeugbestand stellt sich die Situation ähnlich wie auf dem europäischen Markt dar mit noch sehr geringen Stückzahlen, jedoch mit einem erwarteten signifikanten Gesamtwachstum. Betrug in den USA im Jahr 2014 die Anzahl an emissionsfreien Bussen 125, so wird im Laufe des Jahres 2016 die vollelektrifizierte Flottengröße auf über 300 Fahrzeuge ansteigen. Mit Blick auf die vorliegenden Bestellungen zeigt sich bereits, dass der US-amerikanische Markt für elektrische

¹⁶⁰ Annahme ambitionierter regulativer Vorgaben und einer wachsenden Marktdurchdringung von alternativen Fahrzeugkonzepten.

¹⁶¹ Siehe zur Begriffserläuterung Fußnote Nr. 105.

¹⁶² Ein Szenario ohne nennenswerte ordnungspolitische Maßnahmen zur Effizienzsteigerung und Emissionsreduktionen bei reichlich vorhandenen Rohstoffvorkommen.

¹⁶³ Hacker et al. (2015), S. 97ff

Busse einen Wachstumstrend fortsetzen wird.¹⁶⁴ Beispielsweise verzeichnete der Bushersteller Proterra eine Absatzsteigerung von 220 % für das Jahr 2016 mit mehr als 190 verkauften Einheiten.¹⁶⁵ Für das Jahr 2020 werden bereits Neuanschaffungen von 3.300 (teil-)elektrischen Bussen erwartet, von denen etwa ein Viertel über ein emissionsfreies Traktionssystem verfügen wird.¹⁶⁶ Das ausgegebene Ziel der Federal Transit Administration bis 2030, 12.000 vollelektrische Busse im Betrieb einzusetzen, liegt also aktuell zwar noch in weiter Ferne; es zeigt allerdings klar, welche Technologieoptionen zur Emissionsreduktion die nationalen Verkehrsbehörden präferieren.¹⁶⁷

2.2.2 Übersicht zu elektrischen Fahrzeugkonzepten im urbanen Busverkehr und derzeitige Entwicklungstrends

In diesem Abschnitt werden innovative elektrische Fahrzeugkonzepte vorgestellt, die einen lokal emissionsfreien Betrieb ermöglichen. Emissionsbehaftete Antriebskonzepte sind explizit nicht Bestandteil des Untersuchungsrahmens und werden daher nicht diskutiert. Dies umfasst sowohl teilelektrifizierte Fahrzeugkonzepte (Hybridfahrzeuge) als auch Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen und Verwendung alternativer Kraftstoffe aus fossilen und biogenen Energieträgern. Alternative Kraftstoffe aus biogene Energieträger können zwar im Fahrbetrieb teilweise einzelne Schadstoffe signifikant reduzieren; emissionsfreie Mobilität ist aber durch die Verbrennung nicht möglich.¹⁶⁸

Elektrische Antriebe im Busverkehr sind per se nicht als Innovationen der heutigen Zeit einzustufen. Erste Anwendungen im Personenverkehr waren mit der Erfindung des Bleiakkumulators um das Jahr 1860 und den ersten Oberleitungsbussen ab dem Jahr 1880 möglich geworden. Im Jahr 1882 wurde mit der *Elektromote* der erste Bus mit Energieübertragung mittels Oberleitung vorgestellt. Stetige Weiterentwicklungen der leitungsgebundenen Fahrzeuge führten auch in Deutschland zu einem Ausbau von Netzen, der

¹⁶⁴ Vgl. Tomic et al. (2016), S. 1

¹⁶⁵ Zahlen und Daten zu Proterra unter: <https://www.proterra.com/press-release/>. Angaben zum Absatz an Fahrzeugen unter <https://nextcity.org/daily/entry/electric-bus-tesla-proterra>, beide zuletzt geprüft am 02.12.2016.

¹⁶⁶ Vgl. Mahmoud et al. (2016), S. 677 in Anlehnung an Frost & Sullivan research (2013)

¹⁶⁷ Vgl. Gallo (2016), S. 2

¹⁶⁸ Vgl. Pütz (2012), S. 187–191; Bünger et al. (2012), S. 28–30. Im Hinblick auf die Produktion von biogenen Kraftstoffen ist weiterhin die CO₂-Bilanz des gesamten Energiepfades zu bewerten. Zusätzlich müssen direkte und indirekte Landnutzungsänderungen bei der Erschließung von Agrar-Anbauflächen berücksichtigt werden.

seinen Höhepunkt in den 1950er-Jahren mit 55 im Betrieb befindlichen Oberleitungssystemen erreichte.¹⁶⁹ Kostennachteile zum Dieselbus durch hohe Fahrzeugkosten und der erhebliche Aufwand zur Errichtung der Infrastruktur führten jedoch zum Rückbau der Netze in Deutschland¹⁷⁰ und zu einer global geringen Verbreitung.¹⁷¹

Batteriebetriebene Busse¹⁷² hingegen konnten sich in ihren Anfängen aufgrund der schweren Bleibatterien und einer sehr geringen Reichweite von wenigen Kilometern nicht gegen die aufkommenden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor durchsetzen.¹⁷³ Um die Reichweitenproblematik zu überwinden, gab es bereits um das Jahr 1900 erste Versuche von Siemens, Batteriebusse an Haltestellen nachzuladen. Eine nachhaltig erfolgreiche technische Lösung konnte jedoch nicht entwickelt werden.¹⁷⁴ Mit der Lithium-Ionen-Technologie kommen nun erstmals Batterien mit Energiedichten auf den Markt, die den hohen Einsatzanforderungen im Stadtverkehr gerecht werden können.¹⁷⁵ Das Entwicklungspotenzial der Lithium-Ionen-Batterien (LIB) ist als hoch einzuschätzen. Lernkurvenanalysen auf Basis der historischen Entwicklungen im Bereich der LIB indizieren zukünftige Entwicklungschancen bei bereits signifikanten Verbesserungen bei den Schlüsselparametern wie Energiedichte und Lebensdauer sowie Kosten in den letzten Jahren.¹⁷⁶

Fahrzeugkonzepte, die sich durch Einsatz und Verwendung neuartiger technischer Konzepte und Systeme auszeichnen sowie Lösungen für die bisherigen Herausforderungen im öffentlichen Personennahverkehr anbieten, aber auch einen präsenten gesellschaftlichen Veränderungsprozess unterstützen, werden im Folgenden als innovative Fahrzeugkonzepte und Bussysteme bezeichnet.

¹⁶⁹ Vgl. Reinhardt (2015), S. 603

¹⁷⁰ In Deutschland sind derzeit noch drei Oberleitungssysteme in den Städten Solingen Esslingen und Eberswalde im Betrieb mit ca. 70 Fahrzeugen.

¹⁷¹ Vgl. Schwertner und Weidmann (2014), S. 464

¹⁷² Im Kontext der Elektromobilität werden die elektrochemischen Energiespeicher meist als Batterien bezeichnet und entsprechende Fahrzeugkonzepte als batteriebetriebenen beschrieben. Im Folgenden wird sich diesem Sprachgebrauch angepasst, obwohl es sich technisch um einen aufladbaren Akkumulator handelt. Weiterhin wird nachfolgend die Batteriekapazität als Energiespeichervermögen interpretiert und in Kilowattstunde (kWh) angegeben.

¹⁷³ Vgl. Reinhardt (2015), S. 303ff

¹⁷⁴ Vgl. Reinhardt (2011), S. 69. Weitere Anwendungen von Batteriebussen erfolgten insbesondere in den 1970er Jahren, nicht zuletzt wegen der Ölkrise, scheiterten jedoch an der technischen Zuverlässigkeit und hohen Betriebskosten. (Vgl. Schwertner und Weidmann (2014), S. 464)

¹⁷⁵ Vgl. Schwertner und Weidmann (2014), S. 465

¹⁷⁶ Siehe hierzu u. a. Thielmann et al. (2015)

Im Unterschied zu den bereits verbreiteten Hybridsystemen wird bei innovativen voll-elektrischen Systemen die Verbrennungskraftmaschine vollständig substituiert. Somit müssen die gesamte Traktionsenergie und der Energiebedarf der Nebenverbraucher für einen emissionsfreien Betrieb mittels elektrochemischer (z. B. Batterien) oder chemischer Energiespeicher (z. B. Wasserstoff) bereitgestellt werden. Die Wahl des Energiespeichers hat u. a. Einfluss auf die realisierbare Fahrzeugautonomie, die Ladezeit und die Anforderungen der Energiezuführung sowie natürlich auf die Gesamtkosten des Systems. Die Einführung vollelektrischer Busse erfordert einen komplexen Kompromiss zwischen betrieblichen Restriktionen wie der limitierten täglichen Reichweite und der Fahrgastbeförderungsleistung und dem Aufbau einer komplexen Ladeinfrastruktur für das jeweilige Konzept. Durch die im Vergleich zu konventionellen Dieselnissen erhöhten infrastrukturellen Anforderungen besteht die Notwendigkeit einer systemischen Analyse, die sowohl das Fahrzeug als auch die Infrastruktur abdeckt. In der Konzeption von Elektrobussen bestimmen das Linienprofil sowie die Betriebsstrategie die benötigte Autonomie sowie die Beförderungskapazität und stellen damit die maßgeblichen Bedingungen für das Gesamtfahrzeugkonzept dar. Zusammen mit den marktspezifischen Zulassungsbestimmungen ergibt sich ein Spannungsfeld aus dem Fahrzeugtyp und den technischen Spezifikationen. Darüber hinaus sind die Anforderungen der Ladeinfrastruktur abhängig vom gewählten Ladekonzept. Die technischen Ausprägungen des elektrischen Bussystems, die Einsatzanforderungen und die Kosten stehen folglich in unmittelbaren Wechselwirkungen zueinander. Als typische Zielkonflikte können in diesem Zusammenhang u. a. identifiziert werden:

- i) Batteriegröße: Autonomie versus Kosten versus Masse
- ii) Masse: Fahrgastkapazität versus Energiebedarf versus zugelassene Achslast
- iii) Ladetechnik: Ladedauer versus Infrastrukturkomplexität versus Kosten versus Masse versus Raumbedarf
- iv) Batterieperformance: Masse versus Lebensdauer versus Ladedauer versus Kosten

Eine Vielzahl an unterschiedlichen Technologien wird derzeit zur Realisierung eines emissionsfreien Busverkehrs im ÖPNV eingesetzt. Die diversen Technologieoptionen sind in

Abbildung 2-9 dargestellt und werden im folgenden Abschnitt beschrieben. Die Darstellung erhebt nicht den Anspruch, die technischen Facetten umfassend zu beleuchten; vielmehr ist beabsichtigt, die unterschiedlichen betrieblichen Auswirkungen und den Einfluss auf die Betriebsstrategie sowie das Einsatzverhalten, das mit den Technologien einhergeht, zu erläutern. Detaillierte technische Aussagen und ein vollständiger Überblick über die systemischen Zusammenhänge sind der einschlägigen Fachliteratur zu entnehmen.¹⁷⁷

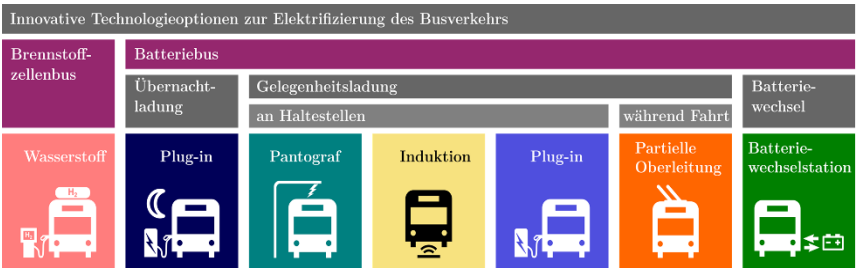


Abbildung 2-9: Innovative emissionsfreie elektrische Bussysteme im ÖPNV¹⁷⁸

Batteriebetriebene Busse kann man grundsätzlich nach unterschiedlichen Ladekonzepten differenzieren. Je nach Konzept ergeben sich spezifische Betriebsabläufe und Fahrzeugeigenschaften. Gemäß der VDV-Schrift 260 wird zunächst nach Ladeformen in Abhängigkeit von der Ladeleistung unterschieden. Ladeverfahren mit einer Leistung von bis 100 kW werden als Langsamladung und Leistungen über 100 kW mit Ladezeiten als Schnellladung bezeichnet.¹⁷⁹ Auf dieser Basis wiederum lassen sich die folgenden Lade-strategien der Übernachtsladung und Gelegenheitsladung herleiten.

Übernachtsladung (Overnight Charging – ON)

Die Batterien des Fahrzeugs werden bei dieser Ladestrategie ausschließlich auf dem Betriebshof geladen. Hierzu werden die Betriebspausen genutzt, in denen die Busse in der Regel konduktiv per Stecker und einer Leistung deutlich unter 100 kW geladen werden. Die längeren Betriebspausen zur Energiezuführung fallen meist nachts bei reduziertem Fahrplanangebot an. Da jedoch längere Betriebspausen je nach Umlaufplanung natürlich

¹⁷⁷ Als Grundlagenwerke zu elektrifizierten Fahrzeugkonzepten im Busverkehr eignen sich: Živanović und Nikolic (2012), Schwürzinger und Pütz (2012); Brecher (2010); Nylund et al. (2012)

¹⁷⁸ Darstellung des MPM-Fachgebiets

¹⁷⁹ Vgl. VDV - Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2016b), S. 11

auch zu anderen Tageszeiten eintreten können, ist ebenfalls die Bezeichnung für die beschriebene Ladestrategie als Depotladung geeignet. Aufgrund der eingeschränkten Nachlademöglichkeiten nur während der Betriebspausen im Depot zeichnen sich depotladene Busse durch eine deutlich größere Batteriekapazität als bei anderen Fahrzeug- bzw. Ladekonzepten aus. Bei aktuellen Fahrzeugeinsätzen werden Batteriekapazitäten mit mehr als 300 kWh eingesetzt. Als Batteriezellen kommen zumeist sogenannte Hochenergiebatteriezellen zum Einsatz, die sich durch hohe Energie- und niedrige Leistungsdichten auszeichnen. Im Betrieb der Busse können Batterieentladungstiefen von bis zu maximal 90 % der Gesamtkapazität auftreten. Aufgrund dieser charakteristischen Tiefenentladung mit anschließender Vollladung im Betriebshof wird dieses Fahrzeugkonzept auch als Voll-lader bezeichnet. Trotz der hohen Batteriekapazitäten ist der Einsatz derartiger Fahrzeuge aktuell mit Reichweiteneinschränkungen im Vergleich zu Dieselfahrzeugen verbunden. Praxiserfahrungen zeigen, dass Reichweiten von ca. 200 bis 300 km möglich sind, jedoch nur unter Einsatz von Brennstoffheizungen für das Heizen des Fahrgastraumes. Ein vollständig emissionsfreier Betrieb ist allerdings in diesem Fall nicht mehr gegeben. Wird das Fahrzeug dagegen elektrisch geheizt und die Energie der Batterie entnommen, reduziert sich die Einsatzreichweite signifikant auf deutlich unter 200 km. Je nach Linienbetrieb und Umlaufplanung sind daher häufig zusätzliche Fahrzeuge zur Linienelektrifizierung und Substitution der Dieselfahrzeuge notwendig. Der Aufbau entsprechender Ladeinfrastruktur im Betriebshof orientiert sich an der maximalen Anzahl der gleichzeitig abgestellten Batteriebusse. Bei größerer Fahrzeuganzahl und simultanem Laden sind zusätzlich bei der Errichtung der Ladeinfrastruktur energetische Aspekte der Energiebereitstellung aus dem Verteilnetz zu berücksichtigen.

Gelegenheitsladung an Haltestellen (Opportunity Charging – OC)

Die Ladestrategie der Gelegenheitsladung umfasst alle Konzepte, bei denen eine Energieübertragung mehrmals für einige Minuten während des Betriebs entlang der Linie an dafür vorgesehenen Haltestellen erfolgt. Prädestinierte Haltestellen für Schnellladepunkte sind beispielsweise Endhaltestellen, an denen während der Wendepausen nachgeladen werden kann. Dieses Konzept hebt grundsätzlich die Reichweitenbeschränkung batteriebetriebener Fahrzeuge auf und ermöglicht einen ganztägigen Betriebseinsatz. Allerdings ist durch die Errichtung von Ladepunkten außerhalb des Betriebshofs der Fahrzeugeinsatz an den jeweiligen Linienbetrieb gebunden. Im Gegensatz zum vorangestellten Voll-laderkonzept kann die Batteriekapazität für das Gelegenheitsladen konzipierten Fahrzeuge

kleiner dimensioniert werden, sodass sich Fahrzeugkosten- und Gewichtsvorteile¹⁸⁰ realisieren lassen. Die Energieübertragung erfolgt mittels konduktiver Ladeschnittstellen oder elektromagnetischer Induktion. Beim konduktiven System, beispielsweise ein Pantogرافensystem, können die aktiven Verbindungselemente entweder auf dem Dach des Fahrzeuges oder in die gegenseitige Ladeinfrastruktur integriert werden. Weiterhin können die Ladesysteme nach automatisierter und manueller Kontaktierung differenziert werden. Bei den manuellen Systemen handelt es sich um konduktive Steckverbindungen (Plug-in), die einen erhöhten Personaleinsatz erfordern. Bei automatischen Systemen hingegen bedarf es keines personellen Mehraufwands zum Einleiten des Ladevorgangs. Neben den Schnellladepunkten entlang der Linie sind zusätzliche Ladeeinrichtungen wie beim Voll-laderkonzept auf den Abstellplätzen der Busse zur Batteriekonditionierung (Temperierung und Balancing) vorzuhalten. Aufgrund der hohen Ladeleistungen von deutlich über 100 kW kommen für die Gelegenheitsladung sogenannte Hochleistungsbatterien (hohe Leistungs- und niedrige Energiedichte) zum Einsatz. Die Anzahl an Nachlademöglichkeiten entlang der Linie unterliegt einer Vielzahl von Einflüssen und Randbedingungen und ist mit zum Teil erheblichen finanziellen Investitionen in die Ladeinfrastruktur verbunden.

Gelegenheitsladung durch partielle Oberleitung (PO)

Bei einem konventionellen Oberleitungsbussystem erfolgt die Zufuhr der elektrischen Energie durch eine Oberleitungsanlage bei nahezu zeitgleicher und permanenter Umwandlung in kinetische Energie, sodass die Busse innerhalb des elektrifizierten Liniennetzes keiner Reichweitenbeschränkung unterliegen.¹⁸¹ Durch den Einsatz von Hochleistungsbatterien in leitungsgebundenen Bussen, die während der Fahrt unter der Oberleitung geladen werden, kann die Autonomie des Fahrzeugs mit einem begrenzten Radius auf Bereiche ohne Oberleitungen ausgedehnt werden. Dies eignet sich vornehmlich für Streckenabschnitte, die technisch komplexe Oberleitungsstrukturen erfordern, oder für Stadtgebiete, die besondere Ansprüche an die Stadtbildintegration stellen. Dieses Konzept stellt eine vielversprechende Option für Städte dar, die bereits über ein Oberleitungsnetz verfügen, durch die Energiespeicherung im Fahrzeug einen Rückbau der Oberleitungen realisieren oder Außenstadtbereiche ohne Oberleitung bedienen können. Für Neubauprojekte sind – wie im Kapitel 2.2.3 erläutert – die Aspekte der Akzeptanz sowie

¹⁸⁰ Keine Einbußen bezüglich der Fahrgastkapazität und Minderung des Fahrzeugenergiebedarfs.

¹⁸¹ Vgl. VDV - Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2014), S. 8

Bauplanung unter städtebaulichen Gesichtspunkten und die hohen Anschaffungsinvestitionen für die Infrastruktur und Fahrzeuge zu berücksichtigen.

Batteriewechselsystem (Battery Changing – BC)

Neben dem Gelegenheits- und Übernachtsladen stellt ein Batteriewechselsystem eine weitere Option für den Betrieb elektrischer Busse dar. Dieses System ist dadurch charakterisiert, dass die entladene Batterie gegen eine geladene ausgetauscht wird und der Ladevorgang außerhalb des Busses stattfindet. Der Wechsel kann sowohl manuell als auch automatisiert ausgeführt werden. Der automatisierte Wechsel ist hierbei anzustreben, da für den manuellen Wechsel zusätzliches Personal notwendig ist und das hohe Gewicht der Batterien zudem das Handling erschwert. Die dazu notwendigen Batteriewechselstationen erfordern im Vergleich zu Schnellladestationen einen deutlich größeren Platzbedarf, sodass eine Errichtung meist nur im Betriebshof und nicht in innerstädtischen Gebieten möglich ist. Zwar kann der automatisierte Batteriewechsel innerhalb einiger Minuten durchgeführt werden; jedoch kommt es durch die zusätzlichen Leerfahrten zur Wechselstation zu betrieblichen Einschränkungen, die zu einem erhöhten Personalaufwand und Fahrzeugbedarf führen können. Als eine Alternative für einen Batteriewechsel direkt am Fahrzeug ist der Einsatz von Batterieanhängern denkbar, die an entsprechenden Standorten gewechselt werden können. Unabhängig vom gewählten Batteriewechselkonzept führt das Vorhalten von Wechselbatterien zu deutlich höheren Investitionsaufwendungen.

Brennstoffzellenbusse (Fuel Cell Bus – FC)

Bei Bussen mit Brennstoffzellen wird die elektrische Energie durch Umwandlung aus Wasserstoff gewonnen. Brennstoffzellenbusse weisen hinsichtlich ihres Betriebsverhaltens und der benötigten Infrastruktur starke Ähnlichkeiten zu konventionellen Diesebussen auf. Zum einen sind die Einsatzreichweiten von Brennstoffzellenbussen mit denen von Diesebussen vergleichbar. Zum anderen können die Fahrzeuge herstellerunabhängig an zentralen, technisch komplexen Wasserstofftankstellen innerhalb weniger Minuten betankt werden.¹⁸² Bei vorhandener Tankeinrichtung im Betriebshof sind daher keine wesentlichen Änderungen betrieblicher Abläufe nötig. Brennstoffzellenfahrzeuge der neuesten Generation verfügen zusätzlich über Hochleistungsbatterien, die sowohl zur Speicherung von Rekuperationsenergie als auch zur Abdeckung von Lastspitzen dienen und eine

¹⁸² Vgl. Huss und Corneille (2015), S. 19f; VDV - Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2014), S. 8

reduzierte Dimensionierung sowie eine Betriebspunktoptimierung des Brennstoffzellensystems ermöglichen.¹⁸³

Zusammenfassung emissionsfreier Technologien im Busverkehr

Das Segment der batterieelektrischen Busse befindet sich in der Marktanlaufphase. Die Auswahl verwendeter Technologien und Modulusprägungen ist vielfältig, da es an Normung mangelt, erzielbare Stückzahleneffekte gering und Erfahrungen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit von Komponenten teilweise unvollständig sind. Es ist zu erwarten, dass sich mit wachsendem Einsatz elektrischer Busse allmählich deutliche praxisrelevante Vor- und Nachteile der Technologien und Betriebsstrategien abzeichnen. Dies kann mittelfristig schließlich zu eindeutigen individuellen und auch kollektiven Technologiepräferenzen seitens der Busbetreiber führen. In Tabelle 2-5 sind aktuelle Projekte zur Einführung elektrischer Bussysteme aufgeführt. Die hohe Bandbreite in der Auslegung der technischen Parameter spiegelt sich in dieser Auflistung wider. Aus heutiger Sicht ist zu konstatieren, dass bei Betrachtung europaweiter Demonstrationsvorhaben von emissionsfreien Bussystemen ein starkes Interesse dem Gelegenheitsladen gilt.¹⁸⁴

¹⁸³ Vgl. Kim et al. (2016), S. 3f

¹⁸⁴ Eine Auswertung von unterschiedlichen Förderprogrammen (u. a. Schaufenster Elektromobilität, ZeEUS) ergab, dass fast Zweidrittel der geförderten Projekte Gelegenheitsladen involvieren. (Stand 30.10.2016)

Tabelle 2-5: Beispiele zum Einsatz innovativer elektrischer Bussysteme in Europa¹⁸⁵

Stadt	Bustyp	Anzahl	Technologie	Hersteller	max. Ladeleistung (kW)	Batteriechemie	Batteriekap. (kWh) ¹⁸⁶	Betrieb ab
Barcelona (ES)	AB	2	kOC	Solaris	400	k. A.	120	Sep. 16
Berlin	SB	4	iOC	Solaris	200	LNMC	90	Sep. 15
Bonn	SB	6	ON	Sileo	64	LFP	340	Jan. 16
Braunschweig	SB;AB	6	iOC	Solaris	200	LNMC	60;90	Apr. 14
Bremen	SB	2	ON	Sileo	64	LFP	340	Aug. 16
Cagliari (IT)	SB	6	PO	Solaris	k. A.	LTO	160	Mrz. 16
Dresden	SB	1	kOC	Solaris	200	LFP	200	Jun. 15
Düsseldorf	SB	2	ON	Solaris	k. A.	LFP	210	Jul. 15
Esslingen	AB	4	PO	Solaris	600	LTO	37	Apr. 16
Hamburg (1)	AB	2	kOC	Van Hool	250	LMCd	215	Okt. 16
Hamburg (2)	AB	2	FC/B	Solaris	20	LFP	120	Feb. 15
Hannover	SB	3	kOC	Solaris	450	LTO	125	Mrz. 16
Köln (1)	SB	2	FC	Van Hool	-	LTO	k. A.	Okt. 16
Köln (2)	AB	8	kOC	VDL	240	LNMC	122	Dez. 16
Leipzig	SB	2	kOC	Göppel	250	LNMC	86;133	Mai. 16
London (UK)	SB	73	ON	BYD/ADL	k. A.	LFP	324	div. 15
Mannheim	SB	2	iOC	Hess	200	LNMC	60	Apr. 14
München	SB	2	ON	Ebusco	75	LFP	311	Jul. 16
Münster	SB	4	kOC	VDL	500	LTO	62,5	Apr. 15
Oberhausen	SB	2	kOC	Solaris	220	LFP	200	Okt. 15
Warschau (PL)	SB	10	kOC	Solaris	120	k. A.	208	Jun 15

Entwicklungspotenziale für Lithium-Ionen-Batterien

Zusätzlich zu den erläuterten Fahrzeugkonzepten und den jeweiligen Betriebsstrategien ist für die spätere Einführung der Bewertungs- und Optimierungsmodelle das Aufzeigen von bedeutenden Entwicklungspfaden essenziell. Dies dient zum einen zur Sicherstellung einer nachhaltigen Relevanz der in dieser Arbeit vorgestellten Bewertungsverfahren, und zum anderen wird das Fundament zur späteren Modellentwicklung durch entsprechende Annahmen gelegt. Das ökonomische Potenzial der Marktdiffusion von elektrischen Bussystemen wurde bereits ausgiebig in Kapitel 2.2.1 erläutert. Im Folgenden ist nun beabsichtigt, dezisive Einflussfaktoren auf die Verbreitung der vorgestellten elektrischen Buskonzepte zu beschreiben und Annahmen für die spätere Modellentwicklung abzuleiten. Die Beschreibung der unterschiedlichen Bussysteme offenbarte die Motivation der Kon-

¹⁸⁵ Folgende Abkürzungen werden verwendet: Bustyp - 12 m-Standardbus (SB), Gelenkbus (AB); Technologie – konduktives Opportunity Charging (kOC), induktives Opportunity Charging (iOC), Overnight Charging (ON), Partielle Oberleitung (PO), Brennstoffzellenbus (FC), Batteriebus mit Brennstoffzellensystem (FC/B).

¹⁸⁶ Als Batteriekapazität ist jeweils die Nennkapazität angegeben. Die effektiv nutzbare Kapazität ist deutlich niedriger anzusetzen.

zeptausrüstungen zur Überwindung von Reichweitenbeschränkungen für batteriebetriebene Fahrzeuge. Die unterschiedlichen Systeme sind auch vor dem Hintergrund zu erwartender Verbesserungen in der Batterietechnologie zu bewerten, da disruptive Technologien in diesem Bereich bestimmte Buskonzepte obsolet erscheinen lassen. Ein Überblick auf Literaturbasis zu der erwarteten Batterieentwicklung und Verbesserungspotenzialen bis zum Jahr 2030 wird daher bereitgestellt.

Aktuelle Batteriespeicher für fahrzeugtechnische Anwendungen basieren auf der Lithium-Ionen-Technologie und haben sich als global anerkannte Schlüsseltechnologie etabliert. Durch den branchenübergreifenden Bedarf nach leistungsfähigen Batterien und die sehr guten Marktentwicklungsprognosen steht diese Technologie im Fokus der globalen Batterieforschung und konnte mit kurzen Entwicklungszyklen bereits erhebliche Fortschritte seitens der Leistungsfähigkeit und der Kosten verbuchen. Aktuelle Studien gehen allerdings nicht von einem Durchbruch einer disruptiven Batterietechnologie, den sogenannten *Beyond-Lithium-Ion-Technologien*¹⁸⁷, innerhalb der nächsten fünfzehn Jahre aus und sehen eine mögliche Marktreife solcher Batterie erst nach dem Jahr 2030.¹⁸⁸ Der Fokus in den nächsten zwei Jahrzehnten für Weiterentwicklungen und Optimierungen liegt vielmehr auf einer Evolution aktueller Lithium-Metall-Legierungen. Eine Übersicht zu Entwicklungspotenziale der Batterieschlüsselparameter ist in Abbildung 2-10 dargestellt.

Die derzeit im Busbereich verstärkt Verwendung findenden Zelllegierungen (siehe Tabelle 2-5) sind Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxide (LNMC), Lithium-Eisenphosphat (LFP) und Lithium-Titanat (LTO).¹⁸⁹ Während sich LNMC und LFP sowohl preislich als auch in ihren Betriebseigenschaften ähneln, bieten LTO-Batterien die Möglichkeit der Nutzung sehr hoher Lade- und Entladeraten und eignen sich damit gut in Verbindung mit Gelegenheitsladekonzepten. Der Nachteil liegt hierbei jedoch in den höheren Kosten, der geringen Marktverbreitung und geringeren Energiedichte.¹⁹⁰ Die heute

¹⁸⁷ Diese Technologien umfassen meist Batterien auf Basis von Lithium-Schwefel, Metall-Luft sowie Festkörperakkumulatoren.

¹⁸⁸ Siehe hierzu u. a. die Studien Nationale Plattform Elektromobilität - NPE (2016) und Thielmann et al. (2015).

¹⁸⁹ Vgl. Dinger et al. (2010), S. 3; Müller-Hellmann (2016), S. 5

¹⁹⁰ Vgl. Yan et al. (2015), S. 1–13; Korthauer (2013), S. 42

in den meisten Fahrzeugen genutzte Zellchemie entspricht der ersten und zweiten LIB-Generation.¹⁹¹

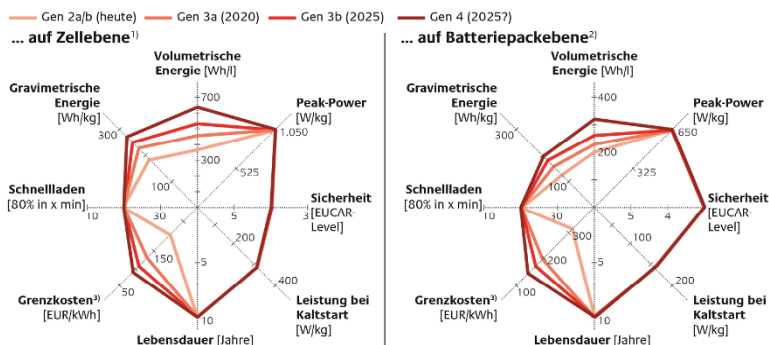


Abbildung 2-10: Übersicht zur Entwicklung der Schlüsselparameter von Lithium-Ionen-Batterien auf Zell- und Batteriepackebene¹⁹²

Die Entwicklung der Batterien entlang der Schlüsselparameter wird bis 2025 evolutionär in den LIB-Generationen 2 und 3 verlaufen.¹⁹³ Insgesamt wird der Technologie ein bereits recht ausgeschöpftes theoretisch mögliches Potenzial attestiert, das hinsichtlich der gravimetrischen Energiedichte spätestens im Zeitraum 2030 bis 2040 ausgereizt sein dürfte.¹⁹⁴ Angestrebte Entwicklungsziele werden vor allem durch Materialentwicklung erreicht.¹⁹⁵ Der dritten Lithium-Ionen-Generation wird, wie in der Abbildung 2-10 dargestellt, im Bereich der Energiedichten ein Verbesserungspotenzial von 30 bis 40 % bis 2025 zugeschrieben.¹⁹⁶ Die erwarteten Verbesserungen der Energiedichten von LIB werden in Zukunft zu entsprechenden erhöhten Reichweiten elektrischer Busse führen. Eine Erhöhung

¹⁹¹ Nationale Plattform Elektromobilität - NPE (2016), S. 19

¹⁹² Nationale Plattform Elektromobilität - NPE (2016), S. 16 (Daten aus 2015). Zu 1) in Abbildung: Batteriezeile für EV. Zu 2): Batteriepack für EV mit 80 kWh. Zu 3): Bei 15 Mio. Zellen einer Fahrzeugfamilie.

¹⁹³ LIB der zweiten Generation zeichnen sich durch Anoden aus natürlichem Grafit oder amorphem Kohlenstoff aus und werden mit dem Übergang zur dritten Generation durch Kohlenstoff-Silizium-Anoden ersetzt.

¹⁹⁴ Vgl. Thielmann et al. (2015), S. 11

¹⁹⁵ Vgl. Stenzel et al. (2015), S. 199

¹⁹⁶ Die gravimetrische Energiedichte beschreibt die Verteilung der von Energie pro Masse eines Stoffes und gibt Aufschluss über realisierbare Reichweite im Rahmen der zulässigen Achslasten. Die volumetrische Energiedichte beschreibt hingegen die Verteilung der Energie pro Raumvolumen. Ähnliche Werte zur Steigerung der Energiedichten sind Jack et al. (2014), S. 8 zu entnehmen.

in genannter Größenordnung bis 2025 wird jedoch nicht die Lücke zu den maximalen Einsatzreichweiten konventioneller Dieselfahrzeuge bei gleichbleibendem Fahrgastkomfort hinsichtlich der Fahrgastraumtemperierung und dem Anspruch an eine emissionsfreie Fortbewegung sowie ohne Einbußen der Fahrgastkapazität möglich sein. Aktuelle Herstellerangaben geben die garantierten Reichweiten für 12 m-Standardbusse mit rund 200 km an, allerdings nur bei Einsatz einer Brennstoffzusatzheizung.¹⁹⁷ Mit Reichweiten einzelner Fahrzeuge und einer Batterieladung sowie einem vollständig emissionsfreien Betrieb über 450 km – wie sie von Dieselfahrzeugen erreicht werden – ist im nächsten Jahrzehnt nicht zu rechnen. Unter Berücksichtigung der technischen Entwicklungspotenziale von LIB ist daher die Bewertung der unterschiedlichen Ladestrategien, insbesondere im Hinblick auf das Gelegenheitsladen, sinnvoll.¹⁹⁸

2.2.3 Eingrenzung der Buskonzepte für die Technologiebewertung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Bewertungsmethoden und Instrumente zur strategischen Beschaffung zu entwickeln, die die Einführung elektrischer Bussysteme und die Substitution dieselbetriebener Fahrzeuge unterstützen. Der Fokus liegt daher nachfolgend auf Technologien und Betriebskonzepten, die unter Berücksichtigung der Entwicklungspotenziale technisch und ökonomisch geeignet sind, eine weitgehende Substitution der Dieselflotten zu ermöglichen. Aufgrund der ambitionierten Ziele zur Emissionsreduktion müssen die Technologien darüber hinaus mittelfristig in großem Maßstab einsatzbereit sein. Für die im Kapitel 2.2.2 vorgestellten emissionsfreien Technologien ist dies nicht ex aequo gegeben. Für das TCO-Berechnungsmodell in Kapitel 3 wurde daher eine Technologievorselektion zugunsten der induktiven und konduktiven OC-, der ON- und der Brennstoffzellentechnologie vorgenommen, die nachfolgend erläutert ist. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass eine Modellintegration aller zuvor benannten Konzepte grundsätzlich möglich, jedoch im Kontext einer Methodeneinführung und einer zunächst zweckmäßigen Komplexitätsbegrenzung nicht notwendig ist. Die Ladekonzepte des Gelegenheitsladens mit manueller, konduktiver Steckverbindung (Plug-in) sowie mit partieller Oberleitung und das Batteriewechselsystem werden daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht mehr explizit betrachtet.

¹⁹⁷ Siehe hierzu u. a. die Herstellerangaben von Sileo für den S12 unter: <http://www.sileo-ebus.com/e-busse/e-bus-s12/>, zuletzt geprüft am 11.02.2016.

¹⁹⁸ Vgl. Knote (2016), S. 13

In den letzten Jahren haben international die Pilotprojekte zur Erprobung innovativer Bussysteme in einem erheblichen Maß zugenommen. Eine erste Indikation zu Technologiepräferenzen und Entwicklungsschwerpunkten erlaubt daher die Projektübersicht in Tabelle 2-5 und die Auswertung europäischer Förderprogramme (siehe Fußnote Nr. 184).

Das manuelle OC-Konzept weist inhärente Nachteile auf, die betriebliche und finanzielle Auswirkungen nach sich ziehen und einer zukünftigen erfolgreichen Diffusion entgegenstehen. Bei einem ähnlichen technischen Aufwand wie bei dem automatischen konduktiven OC-Konzept, erfordert es einen zusätzlichen Personaleinsatz für den Ladevorgang. Dieser besteht zur Herstellung und zum Lösen der Kontaktverbindung und zur Überwachung eines störungsfreien Ladevorgangs (Ladestationen an Haltestellen befinden sich fast ausnahmslos im öffentlichen Raum). Eine monetäre Quantifizierung des Personalbedarfs wurde von Göhlich et al. (2014) für einen Anwendungsfall in Deutschland durchgeführt. Ein signifikanter Kostenaufwand wird durch den Personaleinsatz verursacht, dem kein technischer oder betrieblicher Mehrwert im Vergleich zu den übrigen OC-Varianten gegenübersteht. Eine Marktdiffusion des manuellen OC ist daher in Ländern mit einem mittleren bis hohem Lohnniveau nicht zu erwarten.

Das Batteriewechselkonzept sieht den physischen Austausch der Traktionsbatterie vor. Hierzu bedarf es – wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben – eines Vorhaltens von Wechselbatterien und einer Einrichtung zum Austausch der Batterien. Sowohl die erhöhte Anzahl an Traktionsbatterien als auch die Wechselstation selbst erfordert einen hohen Investitionsbedarf.¹⁹⁹ Aufgrund der Flächenanforderung der Wechselstation ist darüber hinaus in städtischem Gebiet eine Errichtung in den Betriebshöfen oder an den Standrändern naheliegend; dies wiederum würde zu zusätzlichen Leerfahrten im Umlauf führen und somit die Betriebskosten erhöhen.²⁰⁰ Eine darüber hinaus fehlende Hersteller- und Zuliefererindustrie außerhalb einiger weniger asiatischer Länder erschwert eine internationale Markteinführung. Einsatzerprobungen des Batteriewechselkonzepts im europäischen Busverkehr sind im Zeitalter der LIB-Technologie nicht dokumentiert.²⁰¹ Eine höhere Marktverbreitung im ÖPNV wird daher nicht in den nächsten Jahren erwartet. Potenzielle Anwendungsgebiete sind hingegen im Industriebereich – für Flurförderzeuge bereits

¹⁹⁹ Vgl. Zhu et al. (2012), S. 14

²⁰⁰ Vgl. Schwürzinger und Pütz (2012), S. 32

²⁰¹ Vgl. ZeEUS project (2016), S. 10

eingesetzt – und für spezielle mobile Arbeitsmaschinen (z. B. in Häfen und im Bergbau) denkbar; es handelt sich hierbei jedoch um spezifische Nischenanwendungen.²⁰²

Das Gelegenheitsladen durch partielle Oberleitung ist bereits in einigen Städten im Einsatz. Durch die Nutzung von Hochleistungsbatterien wird insbesondere an technisch komplexen Streckenabschnitten auf die Oberleitung verzichtet. Der derzeitige Einsatz dieser innovativen Technologie ist allerdings fast ausschließlich denjenigen Städten vorenthalten, die bereits zuvor über Oberleitungsstrukturen verfügt haben (dies trifft auch auf die Projekte in Tabelle 2-5 zu). Die Ausstattung der Fahrzeuge mit Energiespeichern dient hierbei primär dem Rückbau der Oberleitungen in den Stadtkernen. Eine Elektrifizierung mittels eines Oberleitungssystems ist grundsätzlich mit hohen Infrastrukturinvestitionen verbunden.²⁰³ Neuinbetriebnahmen entsprechender Bussysteme sind daher die Ausnahmen und stellen oft die kostengünstigere Umsetzungsalternative zu Straßenbahnen oder sogenannten *Light-rails* dar.²⁰⁴ Potenziell ökonomisch sinnvolle Einsatzmöglichkeiten sind daher auf einzelne nachfragestarke Buslinien beschränkt, die hohe Beförderungskapazitäten (Passagiere je Stunde und Richtung) erfordern.²⁰⁵ Neben dem hohen finanziellen Infrastrukturaufwand sind vor allem gesellschaftliche Akzeptanzfragen und baurechtliche Aspekte bei Neuerrichtungen zu berücksichtigen.²⁰⁶ Der Aufbau der Infrastruktur gilt, beispielsweise in Deutschland, als ein raumbedeutsames Vorhaben, das ein Planfeststellungsverfahren auslöst. Langjährige Planungsphasen mit Entscheidungsunsicherheiten sind folglich einzuplanen. Vor dem Hintergrund einer fortschreitenden Batterieentwicklung und den beschriebenen mehrjährigen Implementierungsvorlaufzeiten in Verbindung mit langen Amortisationsdauern der Infrastrukturen (bis zu 40 Jahren) ist daher keine signifikante Marktausbreitung von Oberleitungssystemen zu erwarten.²⁰⁷

Die Fokussierung auf die OC-, ON- und Brennstoffzellentechnologie spiegelt die Ergebnisse einer im Jahr 2014 im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Umfrage

²⁰² Vgl. Lajunen et al. (2016), S. 5

²⁰³ Vgl. Schwertner und Weidmann (2014), 466ff

²⁰⁴ In den letzten 10 Jahren sind in Europa drei Neubauprojekte mit insgesamt fünf Buslinien durchgeführt wurden. Die jüngste Inbetriebnahme erfolgte im Jahr 2015 in Malatya, Türkei. (<http://www.trolley-motion.eu/www/index.php?id=4&L=3>, zuletzt geprüft am 02.12.2016.)

²⁰⁵ Siehe hierzu u. a. die Studie von Bergk et al. (2015).

²⁰⁶ Hohe Kosten und Akzeptanzaspekte führten beispielsweise in Basel im Jahr 2008 zum Rückbau des kompletten Oberleitungssystems. Vgl. Oggier (2014)

²⁰⁷ Siehe hierzu u. a. Nikutta (2015)

unter Verkehrsunternehmen in Deutschland, der Schweiz und Österreich zur mittelfristig erwarteten Technologieetablierung wider.²⁰⁸ Sowohl die gelegentlichladenden Konzepte als auch das ausschließliche Laden im Depot sowie der Einsatz von Brennstoffzellenbussen werden als vielversprechendste Alternativen zum Dieselfahrzeug eingeschätzt.

2.3 Ableitung des Forschungsbedarfs und der Zielsetzung für die vorliegende Arbeit

Nach den Ausführungen zu den methodischen und technischen Grundlagen wird im Folgenden der Forschungsbedarf aufgezeigt, und die Ziele der vorliegenden Arbeit werden formuliert. Die Abbildung 2-11 dokumentiert die Ableitung der Ziele für die vorliegende Arbeit. Das in Kapitel 1.1 dargestellte politische und gesellschaftliche Umfeld ist sowohl auf globaler als auch nationaler Ebene durch ein starkes Bewusstsein zur Notwendigkeit eines handlungsbestimmenden Klimaschutzes geprägt. Als eine Maßnahme zum Klimaschutz und zur Emissionsreduktion im Verkehrssektor wird die Elektrifizierung des Busverkehrs gesehen. Aufgrund der technischen Einschränkungen wird sich zunächst die Elektrifizierung auf den Busverkehr zur Personenbeförderung in urbanen Räumen beschränken. Die Verkehrsunternehmen befinden sich in diesem Transformationsprozess im Spannungsfeld aus einer – politisch forcierten – zügigen Umsetzung und Implementierung innovativer Bussysteme bei limitierten finanziellen Ressourcen. Die Einführung innovativer Systeme und die sukzessive Substitution bestehender Dieselflotten erfordern eine fundierte Technologieplanung für die strategische Fahrzeugbeschaffung. Diese zeichnet sich aus durch eine Mehrdimensionalität mit dem Fokus auf die Technologiewahl unter Berücksichtigung sowohl technischer und betrieblicher als auch finanzieller Kriterien sowie einer zeitlichen Dimension zum Beschaffungszeitpunkt. Die – wie es bereits Proff et al. (2014) allgemeingültig für die Elektromobilität postulierte – tief greifenden technologischen Veränderungen der Elektrifizierung bedingen neue Bewertungsansätze. Aufgrund des unterschiedlichen Betriebsverhaltens elektrischer Busse und einer sich signifikant abhebenden Kostenstruktur im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen eignen sich bestehende Bewertungsverfahren nicht für die Beschaffung alternativer Fahrzeugkonzepte. Die Notwendigkeit der Entwicklung adäquater Bewertungsansätze für elektrische Fahrzeuge bekräftigen beispielsweise von der Europäischen Kommission geförderte Initiativen wie

²⁰⁸ Zur Teilnahme an der Studie mit dem Titel *Entscheidungskriterien zur Beschaffung von alternativen Antriebs-technologien im ÖPNV* wurden insgesamt 64 Busbetreiber des öffentlichen Personennahverkehrs in Deutschland, Österreich und der Schweiz angefragt, von denen schließlich 28 Betreiber an der Studie teilnahmen.

Clean Fleets mit dem Ziel, Flottenbetreiber in Beschaffungsentscheidungen zu unterstützen.²⁰⁹ Charakteristisch für die frühe Phase im Marktlebenszyklus elektrischer Bussysteme ist darüber hinaus ein limitiertes Wissen zu technologischen und betrieblichen Parametern und deren Einfluss auf die Kostenbewertung (Kostentreiber). Neben dem Bedarf an geeigneten Bewertungsmethoden sowie der Analyse der Kostenstrukturen unter technologischen und betrieblichen Aspekten besteht, wie u. a. vom internationalem Verband für öffentliches Verkehrswesen (UITP) konstatiert, ein Vakuum an Planungsinstrumenten für die Linien- und insbesondere für die sukzessive Liniennetzelektrifizierung.²¹⁰

Aus dem identifizierten Forschungsbedarf können nun die drei Kernziele der vorliegenden Arbeit definiert werden:

- i) Strategische Beschaffungsentscheidung unter Unsicherheit
Ziel ist es, einen geeigneten Bewertungsansatz bzw. ein Modell zu entwickeln, dass die Technologiewahl unter Einbeziehung technischer, betrieblicher und kostenbasierter Faktoren und jeweiliger Interdependenzen ermöglicht und eine objektive sowie transparente Entscheidungsgrundlage für Busflottenbetreiber bietet. Diese ist durch die eindeutige Ergebnisdarstellung mittels eines aggregierten Entscheidungswertes sicherzustellen. Als substantielles Merkmal des zu entwickelnden Modells ist die Integration von Unsicherheiten im Kontext eines Informationsdefizits zu potenziellen Entwicklungen der Bussysteme beabsichtigt. Die komplexen Systemlösungen werden daher hinsichtlich der Eignung und des Zeitpunkts einer Beschaffung bewertet.
- ii) Kostenanalyse der innovativen Bussysteme
Die Technologiealternativen erfordern eine detaillierte Abbildung monetärer Größen. Die Kostenanalyse muss dabei der Heterogenität eines Linienbusnetzes durch die geldwerte Quantifizierung unterschiedlicher Einsatzanforderungen und -bedingungen gerecht werden. Darüber hinaus ist ein tief gehendes Verständnis der Kostenstruktur über den gesamten Lebenszyklus zu erzielen und die Identi-

²⁰⁹ Sie hierzu u. a. <http://www.clean-fleets.eu/home/>, zuletzt geprüft am 10.08.2016.

²¹⁰ Guida (2016), S. 2

fizierung Kosten steigender Faktoren zu ermöglichen. Eine adäquate Strukturierung bzw. Kostenkategorisierung, die die verschiedenen Ausprägungen der Technologieoptionen würdigt, ist essenzieller Anspruch an die Modellbildung.

- iii) Optimierte Systemauslegung bei einer Liniennetzelektrifizierung
- Ambitionierte Beschaffungsprogramme erfordern die Technologiebewertung und Planung aus einer System- und Netzperspektive. Es sollen hierfür Planungsinstrumente für die optimierte sukzessive Einführung elektrischer Bussysteme bereitgestellt werden unter Berücksichtigung netzspezifischer Randbedingungen und Restriktionen.

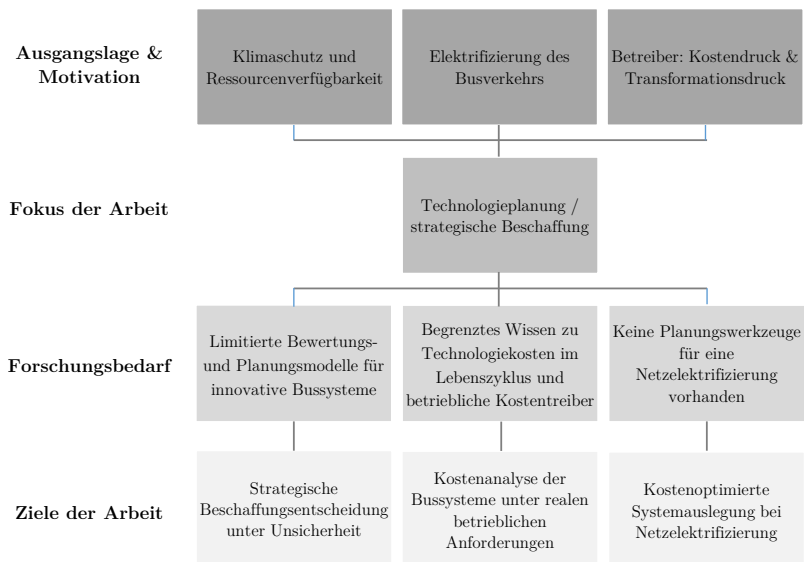


Abbildung 2-11: Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs
Technologiebewertung für den kosteneffizienten
Betrieb emissionsfreier Bussysteme

Kunith, A.

2017, XXII, 289 S. 45 Abb., 5 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-19346-1