

# Identifikation von Kriterien für den smarten Einsatz von Elektrobussen in den Netzen des ÖPNV

*Carina May, Conny Louen*

(Carina May M.Sc., Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr RWTH Aachen, Mies-van-der Rohe Str. 1, 52074 Aachen, may@isb.rwth-aachen.de)

(Dr.-Ing. Conny Louen, Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr RWTH Aachen, Mies-van-der Rohe Str. 1, 52074 Aachen, louen@isb.rwth-aachen.de)

## 1 ABSTRACT

In Deutschland werden in den kommenden Jahren die Busflotten der öffentlichen Personennahverkehrsbetriebe vor allem zur Reduzierung der Umweltbelastungen (Schadstoffe, Lärm) sukzessive elektrifiziert. Ein zentrales Problem, das die breitere Nutzung der Elektromobilität im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) stark behindert, ist die Frage der Klimatisierung batterieelektrisch angetriebener Busse. Im Rahmen des Projektes „CO<sub>2</sub>-neutrale Klimatisierungstechnologie für Elektrobuse“ werden die unmittelbar praxisbezogenen Grundlagen für eine lokal CO<sub>2</sub>-freie Elektrobus-Klimatisierung auf der Basis der Sorptionstechnik geschaffen, ohne dabei die sehr beschränkten Traktionsenergievorräte des Fahrzeugs einsetzen zu müssen. Das Projekt wird durch Mittel der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder gefördert und von vier Instituten der RWTH Aachen University durchgeführt.

Das Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr als eines der vier Institute, beschäftigt sich dabei mit der Frage der Einsatzpotentiale von Elektrobussen in den Netzen des ÖPNV. Um eine intelligente und nachhaltige Umstellung für Verkehrsbetriebe und Kommunen zu ermöglichen, ist zu überprüfen, welche Linien- und Netzstrukturen sich für den Einsatz von Elektrobussen besonders eignen. Zudem ist zu klären, wie diese optimiert werden können, um einen smarten Einsatz von Elektrobussen zu ermöglichen. Im Rahmen dieser Überlegungen werden Kriterien entwickelt, die dabei helfen zu entscheiden, welche Strukturen sich unter welchen geographischen und weiteren infrastrukturellen Randbedingungen für einen elektrifizierten Betrieb eignen. Die Kriterien zur Bestimmung der Einsatzpotentiale kommen von den vier Partnern des Projektes und werden unter Berücksichtigung technischer Grenzen, betrieblicher und verkehrlicher Rahmenbedingungen und der Gestaltbarkeit der Netze entwickelt. Die Kriterien bilden die Grundlage für einen multikriteriellen Ansatz, der die verschiedenen Möglichkeiten hinsichtlich einer Vereinbarkeit der Kriterien aufzeigt.

Bei der Gestaltung eines ÖPNV-Netzes spielt bei klassischer Antriebstechnik der Busse mit Verbrennungsmotoren vorrangig die Siedlungsstruktur, also die Verteilung und Dichte der bebauten und bewohnten Fläche eines Raumes, sowie die gewünschte Art der Erschließung eine Rolle. Verfügbare Energiemengen und Nachlademöglichkeiten brauchen bislang bei der Strukturierung der Netze nicht berücksichtigt zu werden. Die technischen Restriktionen beim Einsatz von Elektrobussen begrenzen jedoch die realisierbaren Netzstrukturen, wodurch ein Spannungsfeld von Nutzerakzeptanz und technischer Notwendigkeit entsteht. (ITMC et al., 2013)

Die Stadt der Zukunft wird aufgrund der Verknappung der Ressourcen ohne fossile Energieträger auskommen müssen. Die Elektrifizierung der Busse stellt demnach eine nachhaltige Strategie dar, welche darüber hinaus dazu beiträgt, die Umweltbelastungen zu reduzieren und die Lebensqualität der Bevölkerung zu verbessern. Gerade der ÖPNV hat im Hinblick auf die Elektrifizierung große Chancen, da durch den vorgegebenen Linienweg der Energiebedarf ziemlich genau abgeschätzt werden kann. (Soffel, Schwärzel, 2013)

Dieses Paper gibt einen Überblick über die im ersten Schritt des multikriteriellen Ansatzes entwickelten Kriterien aus Sicht des ÖPNV. Die Kriterien sind allgemein gültig und bilden die Grundlage für die Entwicklung des Ansatzes unter der Berücksichtigung weiterer Kriterien wie z. B. aus den Bereichen Material oder elektrische Netze.

## 2 PLANUNG IM ÖPNV

Der Planungsprozess im ÖPNV orientiert sich an dem Bedarf von Personen. Dazu gehören Aspekte wie die Erschließung, die Mindestversorgung oder auch die Nachfrage von Personen nach dem ÖPNV. Während in Städten vor allem die Nachfrage entscheidend ist, rücken in ländlichen Regionen dagegen Aspekte wie Mindestreichbarkeiten oder eine Mindestversorgung in den Vordergrund. Um die in der Bedarfsplanung

ermittelten Anforderungen bedienen zu können, ist das Angebot im ÖPNV entsprechend auszulegen. Die Planung kann dabei in Angebots- und Betriebsplanung unterteilt werden (vgl. Abb. 1).

Die Angebotsplanung umfasst die Netz-, Linien- und Fahrzeitplanung. In der Netzplanung wird zunächst das Streckennetz des ÖPNV bestimmt. Anschließend wird in der Linienplanung der Verlauf der einzelnen Linien festgelegt. Das Ziel bei der Linienplanung ist ein hoher Direktfahreranteil, d.h. ein hoher Anteil Reisender, die im untersuchten System nicht umsteigen müssen. Durch die Fahrzeitplanung werden anschließend die Abfahrtszeiten sowie die Taktfrequenzen festgelegt. Das Ergebnis der Fahrzeitplanung ist der fertige Fahrplan.

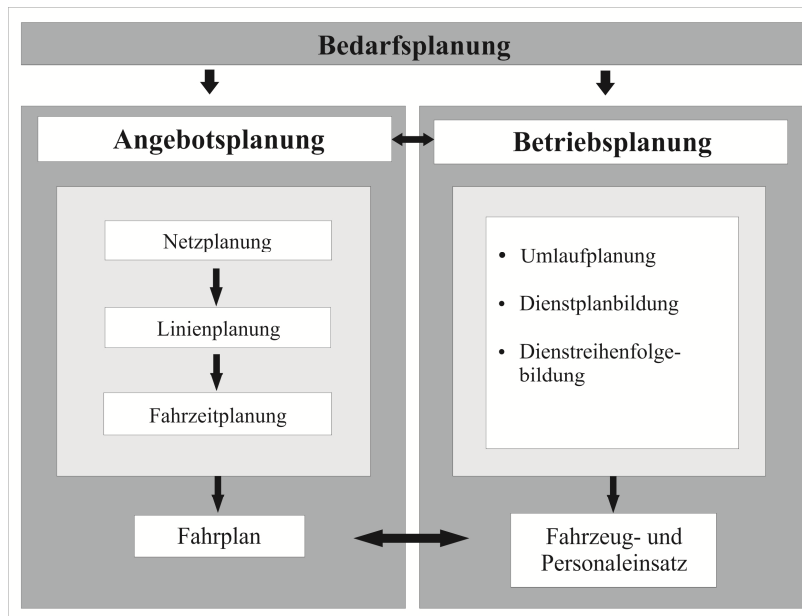


Abb. 1: Planungsprozess im ÖPNV (Quelle: eigene Darstellung ISB)

Der Einsatz von Elektrobussen würde bereits bei der Angebotsplanung zu Wechselwirkungen führen. So müssten bei der Planung z. B. Ladeorte berücksichtigt werden, die zu einer Veränderung des Linienverlaufs führen könnten. Gibt es einen zentralen Ladeort oder sollte ein Laden an jeder Endhaltestelle möglich sein? Und in wieweit hat die Ladezeit einen Einfluss auf den Fahrplan? Könnten sich durch die Ladung oder den Wechsel der Batterie auch die Reisezeiten für die Fahrgäste verändern? Dies sind nur einige Wechselwirkungen die durch den Einsatz von Elektrobussen im ÖPNV entstehen und bereits im Planungsprozess berücksichtigt werden sollten.

Die Betriebsplanung beinhaltet die Umlaufplanung, die Dienstplanbildung sowie die Dienstreihenfolgebildung. In der Umlaufplanung wird der Einsatz der Fahrzeuge festgelegt, wobei eine effiziente Ausführung des Fahrplans angestrebt wird. Es werden räumlich und zeitlich passende Fahrten hintereinander gelegt und zu einem Umlauf verbunden. Durch die Festlegung der Umlaufzeiten ergeben sich am Ende der Route Lücken, welche als Wendezeiten bezeichnet werden. Die Wendezeiten dienen dazu, Verspätungen aufzufangen und gesetzlich vorgeschriebene Pausenzeiten für den Fahrer zu ermöglichen. Am Ende der Umlaufplanung ist der Laufweg für jedes Fahrzeug festgelegt. Dieser beinhaltet dann alle Stillstände, Betriebs- und Nutzfahrten.

Die Dienstplanbildung und die Dienstreihenfolgebildung legen im Anschluss an die Umlaufplanung fest, wie das Personal optimal eingesetzt wird. In der Dienstplanung erfolgt eine Zuordnung von Diensten zu den Mitarbeitern. Eine große Herausforderung bei der Dienstplanung ist die Berücksichtigung von Randbedingungen wie Pausenregelungen, Ruhe- oder Dienstzeiten. Diese ergeben sich aus unterschiedlichen Regelwerken, wie dem Arbeitszeitgesetz, der Fahrpersonalverordnung (FPersV), EU-Verordnungen, Tarifverträgen oder Betriebsvereinbarungen. Diese Planungen werden oft auch vor der Umlaufplanung durchgeführt, da die hohen Personalkosten bei einer wirtschaftlichen Betrachtung in der Regel den maßgebenden Fall darstellen. Die Zuordnung konkreter Fahrzeuge und Fahrer zum Fahr- und Dienstplan, wird als Disposition bezeichnet und erfolgt nach der Planung.

Auch die Betriebsplanung würde durch den Einsatz von Elektrobussen beeinflusst. So kommt z. B. die Frage auf, ob ein Elektrobus auf dem vorgegebenen Linienweg überhaupt in der Lage ist das Fahrgastaufkommen

aufzunehmen und somit die Beförderungsnachfrage befriedigen kann. Oder ob vielleicht der Takt verdichtet werden müsste oder ein größeres Fahrzeug gewählt werden sollte?

Die Planung im ÖPNV erfolgt unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien, die sich aus den Anforderungen der Nutzer, der Betreiber und der Allgemeinheit an das ÖPNV-Angebot ergeben (Kirchhoff et al., 1999). In Abbildung 2 sind die von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) erarbeiteten Kriterien dargestellt. Die Kriterien werden in Kriterien mit Raumbezug und Kriterien mit Qualitätsbezug unterteilt. Die raumbezogenen Kriterien beziehen sich auf den Bedienungsraum und dessen Struktur. Bei den qualitätsbezogenen Kriterien steht dagegen die Qualität der Beförderung aus Sicht des Fahrgastes im Vordergrund.

Die Kriterien mit Raumbezug berücksichtigen die Anbindung der Gemeinden an das Liniennetz und unterstützen bei der Erstellung des ÖPNV-Fahrtenangebots. Für die Qualität der Beförderung ist es wichtig, dass der Fahrgast das gewünschte Fahrtziel schnell erreichen kann. Neben der Beförderungsgeschwindigkeit ist aber auch die Beförderungsqualität in den Fahrzeugen wichtig. In diesem Zusammenhang ist der Besetzungsgrad der Busse ein wichtiger Indikator.

Da die Attraktivität des ÖPNV-Angebots und die Kosten dieses Angebots sich gegenseitig beeinflussen, ist es wichtig, einen sinnvollen Kompromiss zu finden.



Abb. 2: Kriterien für die Planung und den Betrieb des ÖPNV (Quelle: eigene Darstellung May, in Anlehnung an FGSV 2010)

Durch den Einsatz von Elektrobussen in den Netzen des ÖPNV entsteht ein Wechselspiel zwischen den in Abbildung 2 aufgeführten Kriterien und den Kriterien, die sich durch die wesentlichen Randbedingungen und Anforderungen der Elektrobusse ergeben. Im nächsten Abschnitt werden die Randbedingungen und Anforderungen erläutert, sowie die im Rahmen des Projektes entwickelten Kriterien vorgestellt.

### 3 ANFORDERUNGEN UND GRENZEN ELEKTRISCH BETRIEBENER BUSSE

Linienbusse im ÖPNV eignen sich besonders gut für eine Elektrifizierung. Sie sind in ihrem Betrieb verhältnismäßig gut planbar, wodurch sie sich entsprechend deutlich wirtschaftlicher nutzen lassen als etwa individuell genutzte Elektro-Pkw. Der Linienverlauf der Busse ist vorgegeben, was die Abschätzung des täglichen Energiebedarfs recht präzise ermöglicht. Darüber hinaus kann der Abschreibungsanteil der derzeit noch teuren Batterien an den Betriebskosten auf ein vertretbares Maß gedrückt werden. (ITMC et al., 2013)

Durch die Elektrifizierung der Busse werden Umweltbelastungen wie der Schadstoffausstoß und Lärmemissionen reduziert. Bei einem verstärkten Einsatz von Elektrobussen ist jedoch aufgrund der technischen Restriktionen und der dadurch auferlegten Begrenzung realisierbarer Netzstrukturen ein Spannungsfeld von technischer Notwendigkeit und Nutzerakzeptanz zu erwarten. Ein Nachladen energetischer Ressourcen, was zurzeit über einen Betriebstag hinweg nicht vermieden werden kann, führt zu einer geringeren Transportgeschwindigkeit. Große Batteriekapazitäten, die eine höhere Reichweite ermöglichen würden, sind dagegen ökonomisch (Kosten, Bauraum, Nettotransportgewicht) nicht vertretbar.

Der Energieverbrauch der Elektrobusse setzt sich aus dem Traktionsenergieverbrauch und den traktionsfremden Energieverbräuchen zusammen. Der Traktionsenergieverbrauch der Busse ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Das Fahrzeug hat bei der Bewegung den Fahrwiderstand zu überwinden, welcher wiederum von der Größe des Busses, der Geschwindigkeit oder z. B. auch der Topographie abhängig ist. Zu den traktionsfremden Energieverbräuchen zählen z. B. der Verbrauch für die Klimatisierung der Busse oder die benötigte Energie für pneumatische Systeme (Türen, Kneeling). (Sinhuber et al., 2012)

Um den Einsatz von Elektrobussen in den Netzen des ÖPNV realisieren zu können, ist auch die städtebauliche Integration der Ladeinfrastruktur erforderlich. Dafür ist zunächst zu klären, ob bei den Fahrzeugen ein Austausch oder ein Laden der Batterie erfolgen soll (vgl. Abb. 3). Für den Austausch der Batterie sind zusätzlich zur vorhandenen Infrastruktur Batteriewechselstationen zu errichten, was z. B. zentral am Depot erfolgen könnte.

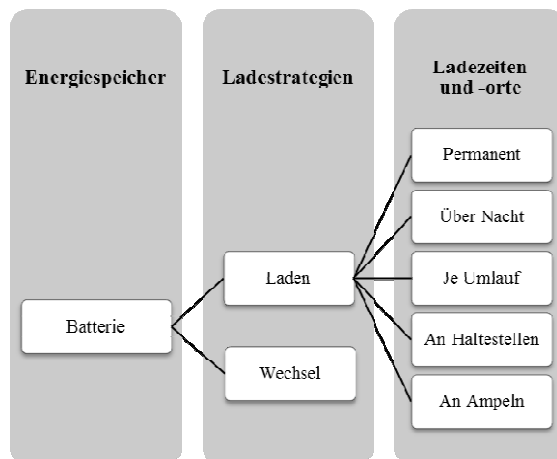


Abb. 3: Mögliche Ladezeiten und -orte (Quelle: eigene Darstellung May)

Für das Laden der Batterie stehen induktive und konduktive Systeme zur Wahl. Beim induktiven Laden wird die Batterie durch eine Spule im Boden der Fahrbahn berührungslos geladen. Dies könnte z. B. an Haltestellen, Ampeln oder auch im Depot erfolgen. Diese Art des Ladens bedarf allerdings einer aufwendigen und teuren Ladeinfrastruktur. Dies hätte jedoch den Vorteil, dass sie sich nahezu unsichtbar in das Stadtbild integrieren würde. Beim konduktiven Laden erfolgt die Energieübertragung an einer Ladestation. Dies könnte über eine Kabelverbindung oder mithilfe von Oberleitungen erfolgen. Das konduktive Laden würde jedoch durch die erforderlichen Ladesäulen optisch in das Stadtbild eingreifen.

Bei der Platzierung der Ladestationen sind zudem einige Randbedingungen zu beachten. Wo kann wie lange geladen werden, ohne dass der ÖPNV an Attraktivität für seine Kunden verliert, zugleich aber auch der Energiebedarf für die gewünschte Reichweite gesichert ist? Informatiker aus Hongkong haben sich mit der optimalen räumlichen Verteilung von Ladestationen für Elektroautos beschäftigt (Lam, Leung, Chu, 2013). Einige dieser Randbedingungen können auch auf den Einsatz von Elektrobussen übertragen werden. So muss ein voll geladener Bus mit der Strommenge in der Lage sein, eine andere Ladestation erreichen zu können. Idealerweise sollte dies ohne ein Abweichen vom Linienweg möglich sein. Der Abstand zwischen den Ladestationen darf daher nicht über der Reichweite des Elektrobusses liegen. Eine weitere Randbedingung ergibt sich aus der begrenzten Kapazität der Ladestation. Die lokale Nachfrage an dieser Station sollte befriedigt werden können, ohne den Linienverkehr einschränken zu müssen. Darüber hinaus sollten insgesamt so viele Ladestationen vorhanden sein, dass der gesamte E-Bus-Betrieb im Stadtgebiet abgedeckt werden kann. Eine optimale Verteilung ist dabei wichtig, da zu viele Ladestationen, die ineffizient genutzt werden, ökonomisch nicht sinnvoll sind.

#### 4 KRITERIEN FÜR DEN EINSATZ VON ELEKTROBUSSEN

Im Rahmen des Forschungsprojektes „CO<sub>2</sub>-neutrale Klimatisierungstechnologie für Elektrobusse“ wird ein multikriterieller Ansatz entwickelt der die Widersprüche zwischen nachfragebedingten und elektrooptimalen Netzstrukturen analysiert. Die Herausforderung besteht darin, die unterschiedlichen Anforderungen, die sich durch den Einsatz von Elektrobussen im Netz des ÖPNV ergeben, gegeneinander abzuwägen. Durch den

multikriteriellen Ansatz sollen verschiedene Möglichkeiten hinsichtlich einer Vereinbarkeit der unterschiedlichen Kriterien aufgezeigt werden.

Bei der Planung des ÖPNV werden bei einem Einsatz von Elektrobussen aufgrund von technischen Grenzen, betrieblicher und verkehrlicher Rahmenbedingungen und der Gestaltbarkeit der Netze, neben den Kriterien aus Abbildung 2, weitere Kriterien zu beachten sein. Die Kriterien werden von den vier Partnern des Projektes interdisziplinär entwickelt und berücksichtigen Randbedingungen und Anforderungen die sich durch den Einsatz von Elektrobussen im Linienbetrieb mit der neuen Klimatisierungstechnologie ergeben. Die multikriterielle Analyse erfordert somit eine Abwägung zwischen betrieblichen, ökologischen, fahrzeugtechnischen und infrastrukturellen Aspekten (vgl. Tab.1).

Betriebsablauf	Fahrzeugtechnik	Ökologie	Infrastruktur
Linienlänge Wendezeit Fahrgastnachfrage	Geschwindigkeit Rekuperationspotential	Lärmbelastung Schadstoff-emissionen	Integration der Ladeinfrastruktur Netzinfrastuktur

Tabelle 1: Kriterien für den Einsatz von Elektrobussen (Quelle: eigene Darstellung May)

Der Einsatz von Elektrobussen im ÖPNV wird zu einer Veränderung in der Angebots- und Betriebsplanung führen. Um den Elektrobuss optimal einzubeziehen ist es wichtig, dass der Linientyp und die Netzstruktur den Einsatz ermöglichen ohne dabei die Attraktivität des ÖPNV-Angebots zu beeinflussen. Der Bereich Betriebsablauf beinhaltet daher Kriterien, die aus betrieblicher Sicht den Einsatz von Elektrobussen begünstigen. Bedeutende Unterschiede zum Dieselbus liegen in der begrenzten Reichweite und dem erforderlichen Laden oder Wechseln der Batterie. Für den Betrieb mit Elektrobussen sind solche Linien geeignet, die ein entsprechendes Betriebskonzept durch ihre geographischen und organisatorischen Eigenschaften unterstützen.

Des Weiteren sollen die Vorteile des Elektrobusses bestmöglich genutzt werden, da so Ressourcen eingespart und der Nutzen gesteigert werden können. Die Kriterien aus dem Bereich Fahrzeugtechnik berücksichtigen den zu erwartenden Energieverbrauch der Fahrzeuge. Durch die Kriterien aus dem Bereich Ökologie soll die Umweltentlastung Beachtung finden, die durch den Einsatz der Elektrobusse entsteht. Da ein Elektrobuss bei dem momentanen Strommix nur lokal CO<sub>2</sub>-frei ist, bietet sich der Einsatz von Elektrobussen auf einer Linie an, bei der die größte Anzahl durch Schadstoffe betroffener Anwohner entlastet werden kann.

Der Bereich Infrastruktur behandelt die Problematik der Ladeorte und Ladestrategien, die sich durch den Einsatz von Elektrobussen ergibt.

#### 4.1 Betriebliche Kriterien

Die betrieblichen Kriterien setzen sich zusammen aus der Linienlänge, der Wendezeit sowie der Fahrgastnachfrage. Die Informationen für diese Kriterien können zum Teil direkt aus dem Fahrplan abgelesen werden.

##### 4.1.1 Linienlänge

Durch die begrenzten Energievorräte eines Elektrobusses ist die Reichweite der Fahrzeuge beschränkt. Die Linienlänge hat einen Einfluss auf die mitzuführende Energiemenge des Elektrobusses, die notwendige Ladeleistung an den Ladestationen sowie die Batteriekapazität im Bus. Bei langen Linien sind die Batterie sowie die Ladeleistung deutlich größer zu dimensionieren als bei kurzen.

##### 4.1.2 Wendezeit

Bei einem optimalen Fahrplan sollte die Wendezeit möglichst gering sein, da in dieser Zeit keine Verkehrsleistung erbracht wird. Dies spiegelt sich auch im Fahrplanwirkungsgrad wieder. Der Fahrplanwirkungsgrad dient in der Betriebsplanung als Qualitätsindikator für den erstellten Fahrplan, indem er den Anteil der Beförderungszeit an der Umlaufzeit ausweist. (Köhler, 2001)

Wenn die Wendezeit jedoch für das Nachladen eines Elektrobusses benötigt werden kann, ist eine aus betrieblichen Gründen schon vorhandene, lange Wendezeit besonders günstig. Für das Nachladen der Busse

kann jedoch nicht die gesamte Wendezeit genutzt werden. Je nach Ladetechnologie ist ein mehr oder weniger langer Initialisierungsprozess notwendig. Zudem sollte auch weiterhin ein Puffer eingeplant sein, um Verspätungen auffangen zu können. Verlängerte Wendezeiten können auch bei der Personaldisposition genutzt werden. Die Standzeiten der Busse können mit den Pausenzeiten des Fahrpersonals kombiniert werden, sodass weniger Fahrerwechsel nötig sind. Demnach eignen sich Linien mit einer schon vorhandenen langen Wendezeit besonders gut für den Einsatz eines Elektrobusses.

#### 4.1.3 Fahrgastnachfrage

Wenn der Elektrobus in die bestehenden Strukturen des ÖPNV integriert werden soll, sollte der einzusetzende Bus in der Lage sein, dass Fahrgastaufkommen der bisherigen Linie aufzunehmen. Die Größe des Busses ist demnach so zu wählen, dass genügend Plätze vorhanden sind, um die derzeitige Nachfrage auf dieser Linie befördern zu können. Dabei sollte die Beförderungsqualität in den Fahrzeugen beachtet werden. Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) empfiehlt im ÖPNV einen Besetzungsgrad von 65% als Mittelwert über die Spitzenstunde nicht zu überschreiten (VDV, 2001). Der Besetzungsgrad ist der Quotient aus der Zahl der Fahrgäste und der Zahl der Plätze (Sitz- und Stehplätze) je Richtung.

Wenn der bisherige Fahrplan der Linie beibehalten werden soll, ist die Größe und Anzahl der einzusetzenden Elektrobusse dementsprechend auszuwählen. Anderenfalls sollte der Fahrplan der Linie hinsichtlich Takt und Umlaufzeit angepasst werden.

### 4.2 Fahrzeugtechnische Kriterien

Die fahrzeugtechnischen Kriterien setzen sich zusammen aus der Geschwindigkeit und dem Rekuperationspotential.

#### 4.2.1 Geschwindigkeit

Gerade der ÖPNV eignet sich durch die geringen Durchschnittsgeschwindigkeiten besonders gut für den Einsatz von Elektrobussen, da diese in der Regel für einen geringen Geschwindigkeitsbereich ausgelegt sind. Der Einsatz eines Elektrobusses bietet sich auf den Strecken an, bei denen ein Dieselbus besonders ineffizient ist. Dies ist gerade im langsamen Geschwindigkeitsbereich der Fall. Denn dort arbeitet der Dieselbus im niedrigen Teillastbereich. (VDV, 1999)

Die Fahrplangeschwindigkeit ergibt sich aus der Division der Fahrplankilometer mit der Fahrplanzeit, und kann als erster Anhaltspunkt für die durchschnittliche Geschwindigkeit auf einer Linie dienen. Sollte diese durchschnittliche Geschwindigkeit die Höchstgeschwindigkeit des Elektrobusses übersteigen, ist ein Einsatz des Fahrzeugs auf dieser Linie nicht möglich.

#### 4.2.2 Rekuperationspotential

Elektrobusse können dank eines regenerativen Bremssystems auch Energie zurückgewinnen. Die zurückgewonnene Energie kann in der Batterie gespeichert und erneut verwendet werden. Die Energierückgewinnung wird aktiviert, sobald der Fahrer den Fuß vom Gaspedal nimmt. Linienwege, auf denen viel Energie zurückgewonnen werden kann, bieten sich daher besonders für den Einsatz von Elektrobussen an.

### 4.3 Ökologische Kriterien

Die ökologischen Kriterien umfassen die Kriterien Lärmbelastung und Schadstoffemissionen. Elektrofahrzeuge gelten als besonders umweltfreundlich. Die von ihnen ausgehenden Belastungen sowohl durch Schadstoffe als auch durch Lärm sind deutlich geringer als die eines Dieselbusses.

#### 4.3.1 Lärmbelastung

Im städtischen Umfeld gilt vor allem der Straßenverkehr als Hauptverursacher des Lärms (UBA, 2011). Während man den Güterverkehr zeitlich und räumlich leiten kann, ist dies im ÖPNV keine Option. Da ein Elektrobus durch den nahezu geräuschlosen Motor deutlich weniger Lärm verursacht als ein Bus mit Verbrennungsmotor, würde der Einsatz von Elektrobussen gerade in dicht besiedelten Bereichen zu einer spürbaren Reduzierung der Lärmbelastung beitragen. Bei höheren Geschwindigkeiten verursacht ein

Elektrobus jedoch ebenso Roll- und Windgeräusche wie ein konventioneller Bus. Daher würde der Unterschied gerade bei geringen Geschwindigkeiten deutlich.

Je dichter der Bereich um den Linienverlauf herum besiedelt ist, umso höher würde der Nutzen durch eine Umstellung auf Elektrobusse ausfallen. Die Elektromobilität könnte auf dieser Linie somit zu einer beträchtlichen Entlastung im Bereich des Lärms führen.

#### 4.3.2 Schadstoffemissionen

Durch den Einsatz von Elektrobussen kann der Schadstoffausstoß im Vergleich zu Dieselnissen reduziert werden. Jedoch lässt er sich derzeit noch nicht vollständig vermeiden. Ein elektrisch betriebener Bus stößt beim Fahrvorgang zwar kein Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) aus, jedoch kann der Strom, der zur Ladung der Fahrzeuge benötigt wird, mit Emissionen behaftet sein. Das Treibhausgas CO<sub>2</sub>, welches beim Verbrennen fossiler Energieträger entsteht, wirkt sich auf das Klima aus und ist mitverantwortlich für den Treibhauseffekt (Dykhoff, Souren, 2007). Die elektrische Energie zum Laden der Batterien muss demnach als Zwischenprodukt gesehen werden, bei dem als Primärenergieträger vor allem fossile Brennstoffe in Großkraftwerken zum Einsatz kommen. Bei dem derzeitigen Strommix in Deutschland fährt ein Fahrzeug mit Elektroantrieb somit nicht wirklich schadstoffärmer als mit Verbrennungsmotor (Öko-Institut, ISOE, 2011). Damit die Umstellung der Busse auf Elektroantriebe auch zum Klimaschutz beitragen kann und die CO<sub>2</sub>-Emissionen dauerhaft gesenkt werden können, müsste der Energiebedarf auf erneuerbare Weise gedeckt werden. Der schnelle Ausbau erneuerbarer Energien ist dafür unumgänglich.

Die Umstellung auf Elektrobusse und die Verlagerung des Emissionsortes aus dem Ballungsraum trägt momentan somit noch nicht zum Klimaschutz bei, sehr wohl aber zum Gesundheitsschutz der Bevölkerung, da neben dem klimaschädlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß, ein Teil der Schadstoffe, wie z. B. Stickoxide, Schwefeloxide oder Partikel auch gesundheitsschädigend wirken (FGSV, 1998). Die Schädigung des menschlichen Organismus kann sich z. B. in emissionsbedingten Atemwegserkrankungen, Augenreizungen oder auch Herz-Kreislauf-Störungen äußern. Demnach sind nicht nur die globalen Emissionen von Bedeutung, sondern auch die lokale Verteilung der Schadstoffe. Die Feinstaubbelastung kann durch den Einsatz von Elektrobussen stark reduziert werden, da elektrische Motoren im Betrieb keine Partikel ausstoßen und demnach Feinstaub nur durch den Reifen- und Straßenabrieb entsteht. Dies würde die Kommunen dabei unterstützen die geforderten Grenzwerte einzuhalten.

Da Elektrobusse lokal nahezu emissionsfrei sind, ist der Nutzen eines Elektrobusses folglich besonders groß, wenn der Bus innerhalb von dicht besiedelten Gebieten fährt und somit dort zu einer Reduzierung der Schadstoffbelastungen führt. Durch eine genaue Analyse des genutzten Strommixes könnte zudem eine Aussage über den Beitrag zum Klimaschutz getroffen werden.

### 4.4 **Infrastrukturelle Kriterien**

Zu den infrastrukturellen Kriterien zählen die Integration der Ladeinfrastruktur sowie die Netzinfrastruktur. Zum einen muss die Ladeinfrastruktur am Ladeort städtebaulich eingebunden werden können. Zum anderen sollte die Netzinfrastruktur ein Laden an diesem Ort auch ermöglichen.

#### 4.4.1 Integration der Ladeinfrastruktur

Um je nach Ladestrategie ein Nachladen der Busse oder einen Wechsel der Batterie ermöglichen zu können, sollte die Errichtung der benötigten Ladeinfrastruktur an dieser Linie bzw. in der Stadt auch möglich sein. Für den Wechsel der Batterie werden Wechselstationen benötigt, welche eine relativ große Fläche in Anspruch nehmen. Für das Laden der Batterie des Elektrobusses wird eine Ladestation benötigt. Da die ortsfeste Ladestation in räumlicher Nähe zum Bus sein muss, sollte am Ladeort für den Bus ein garantierter Stellplatz vorhanden sein. Gerade in der Innenstadt behindern Lieferverkehre oder Falschparker häufig die Haltestellen der Busse. Solche Störungen sind im Umland, bei geringerem Parkdruck tendenziell seltener zu erwarten.

Der mögliche Ladeort des Busses sollte demnach eine ausreichende Fläche aufweisen, um eine Lade- bzw. Wechselstation errichten zu können. Bei der Wahl des Ladeortes könnte auch untersucht werden inwieweit eine Nutzung der Ladeinfrastruktur durch andere Nutzergruppen wie z. B. Lieferverkehre möglich wäre.

#### 4.4.2 Netzinfrastruktur

Bei der Auswahl der Ladestrategie und der Errichtung von Lade- oder Wechselstationen ist eine Analyse der bestehenden Netzinfrastruktur erforderlich. Mögliche Ladeorte sollten über eine ausreichend vorhandene Stromnetzinfrastruktur verfügen, um das Laden der Batterie ermöglichen zu können. Sollte die vorhandene Infrastruktur nicht ausreichend sein, ist zu überprüfen, ob der Ausbau möglich ist, und ob er an diesem Ort auch als sinnvoll erachtet wird.

Darüber hinaus sollte auch überprüft werden, wie sich ein Aufladen vieler Elektrobusse in Spitzenlastzeiten auf die Stromnetze auswirkt, und ob größere Beschränkungen auftreten könnten. Durch ein intelligentes Lademanagement könnte dem entgegengewirkt werden. Eine weitere Herausforderung stellt die Kopplung der Elektrobusse an erneuerbare Energien dar. Wenn die Anbindungspotentiale des Ladeortes an das Stromnetz besonders hoch sind, bietet sich der Einsatz eines Elektrobusses auf dieser Linie an.

## 5 FAZIT UND AUSBLICK

Der Einsatz von Elektrobussen wird im Vergleich zur Dieseltechnologie zu Einschränkungen im Hinblick auf eine deutlich geringere Reichweite, höhere Anschaffungskosten und Mindeststandzeiten bedingt durch die Aufladung oder den Austausch der Batterien führen. Dies wird zu einem Wechselspiel zwischen nachfragebedingten und elektrooptimalen Netzstrukturen führen. Um diese Herausforderungen bestmöglich zu meistern, ist die Entwicklung geeigneter Linien- und Netztypen für den Einsatz von Elektrobussen unbedingt erforderlich. Im Vergleich zum herkömmlichen Antrieb wird beim Einsatz von Elektrobussen ein geringerer Schadstoffausstoß, geringere Lärmemissionen sowie ein geringerer Energieverbrauch erwartet.

Im Rahmen des durch die Mittel der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder geförderten Projektes „CO<sub>2</sub>-neutrale Klimatisierungstechnologie für Elektrobusse“ sind Kriterien entwickelt worden, die die Grundlage für einen multikriteriellen Ansatz bilden der die verschiedenen Möglichkeiten hinsichtlich einer Vereinbarkeit der Kriterien aufzeigt. Die entwickelten Kriterien stellen dabei keine Endlösung dar. Es ist ein ergebnisoffener Prozess, der das Wechselspiel der Kriterien aufzeigen und als Hilfestellung dienen soll.

Im Laufe des Projektes werden die Kriterien, aufgrund der neuen Klimatisierungstechnologie, durch weitere Kriterien zu ergänzen sein. So kann bei dem Klimakzept z. B. eine Nebelwolke entstehen, die städtebaulich berücksichtigt werden muss. Auch ein Wasseranschluss, nahegelegene Abwärmequellen und ein Anschluss an das Fernwärmenetz könnten für das Klimakzept relevant sein und einen Einfluss auf mögliche Ladeorte nehmen.

Der multikriterielle Ansatz bildet die Grundlage für die Ableitung elektrooptimaler Netz- und Linientypen, die neue Anforderungen berücksichtigen und somit den Einsatz von Elektrobussen begünstigen. Durch den Einsatz von Elektrobussen können lokal emissionsfreie und nachhaltigere Mobilitätskonzepte unterstützt werden. Der effiziente Einsatz von Elektrobussen trägt demnach zum Umweltschutz bei und steigert die Lebensqualität in den Innenstädten, wodurch ein positiver Beitrag zum Themenfeld Verkehr und Mobilität auf dem Weg zu einer Smart City geleistet werden kann.

## 6 LITERATUR

- Dyckhoff, Harald; Souren Rainer: Nachhaltige Unternehmensführung. Grundzüge industriellen Umweltmanagements. Berlin, Heidelberg 2007.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Volkswirtschaftliche Kosten und Nutzen des Verkehrs. Heft 108. Bonn 1998.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Empfehlungen für Planung und Betrieb des öffentlichen Personennahverkehrs. Köln 2010.
- Institut für Technische und Makromolekulare Chemie (ITMC), Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT), Lehrstuhl und Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA): CO<sub>2</sub>-neutrale Klimatisierungstechnologie für Elektrobusse. Unveröffentlichtes Angebot. Aachen 2013.
- Kirchhoff, P.; Heinze W.; Köhler U.; et. al.: Planungshandbuch für den öffentlichen Personennahverkehr in der Fläche; Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Reihe direkt, Heft 5. Bonn 1999.
- Köhler, Uwe: Verkehr. Straße, Schiene, Luft. Kap. A-8, A-9, Abschn. B-3.1, B-5.2, C-2.5, Kap. F-3, Berlin 2001.
- Lam, Albert Y.S.; Leung, Yiu-Wing; Chu Xiaowen: Electric Vehicle Charging Station Placement: Formulation, Complexity, and Solutions. Department of Computer Science, Hong Kong Baptist University, Kowloon Tong. Hong Kong 2013.
- Öko-Institut e.V. & Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE): OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Schlussbericht. Freiburg 2011.
- Sinhuber, Phillip; Rohlf, Werner; Sauer, Dirk Uwe: Study on Power and Energy Demand for Sizing the Energy Storage Systems for Electrified Local Public Transport Buses. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Seoul, Korea 2012.



- Soffel, Christian; Schwärzel, Christine: ÖPNV als Vorreiter und Innovationsmotor der Elektromobilität in Deutschland. In: Internationales Verkehrswesen, Heft 4, S. 72 ff. Dresden 2013.
- Umweltbundesamt (UBA): Auswertung der Online-Lärmumfrage des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau 2011.
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV): Verkehrserschließung und Verkehrsangebot im ÖPNV. Köln 2001.
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV): Linienbusse, fahrgastfreundlich - wirtschaftlich - schadstoffarm. Düsseldorf 1999.