

BERICHT

Städteübergreifendes Konzept für elektrisch angetriebene Busse in Thüringer Mittelstädten

Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Hörold, EBF

Dipl.-Ing. (FH) Matthias Bretkopf, IVI

Im Auftrag Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie
und Naturschutz (TMUEN)

Dresden, Juni 2015

Inhalt

1	Einleitung.....	3
2	Datenerfassung und Simulation	4
2.1	Grundlagen der Simulation	4
2.1.1	Simulationsprogramm IVIsion	4
2.1.2	Energiebilanzierung	5
2.1.3	Parametrierung der Fahrzeuge.....	7
2.1.4	Fahrprofile	8
2.1.5	Vorgehensweise der Simulationsrechnungen.....	9
2.2	Simulationsrechnungen	11
2.2.1	Altenburg Linie S.....	11
2.2.2	Eisenach Linie 2.....	19
2.2.3	Mühlhausen Linie 5	23
2.2.4	Suhl / Zella-Mehlis Linie A1/A2	30
2.2.5	Weimar Linie 2	34
3	Abschätzung der Emissionen an ausgewählten Querschnitten	42
3.1	Grundlagen	42
3.1.1	HBEFA 3.2	42
3.1.2	Angaben zum Verkehr an ausgewählten Querschnitten	43
3.1.3	Vorgehen	44
3.2	Ergebnisse	50
3.3	Immissionsauswirkungen auf die Stadt	53
3.4	CO ₂ -Einsparung	57
4	ÖPNV–Investitionsrichtlinie 2015	58
5	Betriebswirtschaftliche Betrachtung	59
5.1	Einführung	59
5.2	Ergebnisse	61
5.2.1	Altenburg.....	61
5.2.2	Eisenach.....	66
5.2.3	Mühlhausen	70
5.2.4	Suhl / Zella-Mehlis.....	74
5.2.5	Weimar	79
6	Probefetriebe in thüringischen Städten und Dresden	84
6.1	Nordhausen	84
6.2	Erfurt	85
6.2.1	E-Bus Europa.....	85
6.2.2	Bozankaya Sileo (12 m)	87
6.3	Bad Langensalza	89
6.3.1	Bozankaya Sileo (10,7 m).....	89
6.3.2	SOR EBN (9,5 m).....	90
6.4	Weimar	91
6.5	EDDA-Bus Dresden	92
7	Zusammenfassung.....	95

Die vorliegende Studie wurde im Auftrag des Thüringer Ministeriums für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN) im Zeitraum von August 2014 bis Juni 2015 durch die beauftragten Stellen erarbeitet.

Der Freistaat Thüringen verfolgt mit der Studie das Ziel, innovative Elektromobilitätskonzepte im ÖPNV für eine nachhaltige Mobilität zu erarbeiten und umzusetzen. Hierbei sollen vor allem positive Umwelteffekte durch

- Minderung des CO₂-Ausstoßes,
- Einhaltung der Grenzwerte für Feinstaub und NO_x,
- Minderung der Lärmemissionen und
- Einsparung fossiler Treibstoffe

erreicht werden.

Die Ergebnisse der Studie sollen die Entscheidungsfindung diesbezüglich unterstützen.

Schwerpunkt der Arbeiten war die Untersuchung zur Einführung elektrisch betriebener Stadtbusse für ausgewählte Linien in den Thüringer Mittelstädten Altenburg, Eisenach, Mühlhausen, Suhl/Zella-Mehlis sowie Weimar.

Die Erarbeitung von technischen Umsetzungskonzepten für die Fahrzeugtechnik und den damit in Zusammenhang stehenden Nachladekonzepten, die Abschätzung ökologischer Wirkungen sowie eine Prognose zu erwartender Kosten stellten dabei die Kernaufgaben dar.

Im Ergebnis der Untersuchungen wurden für die Buslinien der betrachteten Städte technische Lösungen vorgeschlagen, die ausgehend von den Anforderungen aus dem derzeitigen Fahrbetrieb einen Einsatz von elektrisch betriebenen Bussen ermöglichen. Dabei wurden batterieelektrisch betriebene 12-Meter Standardbusse betrachtet und ausgehend vom Stand der Technik notwendige Energiespeichergrößen in Zusammenhang mit entsprechenden Nachladekonzepten vorgeschlagen.

Anhand der durchgeführten Berechnungen zur Energiebilanz konnte erwartungsgemäß gezeigt werden, dass neben dem Antrieb besonders die Außentemperaturen maßgeblich den Energiebedarf bestimmen. Somit musste die technische Umsetzungsempfehlung dem Energiebedarf bei extremen Außentemperatur (-20 bzw. +40 °C) genügen.

Während sich die Ausstattung hinsichtlich der Klimatisierung der Fahrzeuge in den einzelnen Städten unterscheidet (ohne Klimaanlage bis hin zu Vollklimaanlagen), wurde bezüglich des Heizens einheitlich eine chemische Heizung berücksichtigt. Diese stellt unter Berücksichtigung ihres hohen Wirkungsgrades und vor dem Hintergrund eingeschränkter Energiedichten bei elektrischen Speichern derzeit das sinnvollste Heizprinzip dar.

Die vorgeschlagenen technischen Lösungen für den batterieelektrischen Betrieb auf den jeweiligen Linien wurden weiterhin einer ökologischen Bewertung unterzogen. Hierbei konnten zum Teil signifikante Einsparungen bezüglich CO₂ und emittierter Luftschadstoffe im Vergleich mit den derzeit eingesetzten Diesel- und Gasfahrzeugen ermittelt werden.

Für den Freistaat Thüringen liegt seit Anfang 2015 die neue ÖPNV-Investitionsrichtlinie vor, welche besonders im Bereich elektrisch betriebener Stadtbusse maßgebliche Änderungen aufweist. Die in dieser Richtlinie benannten Fördersätze waren für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen dieser Studie zu berücksichtigen.

Ergänzend sind aus mehreren Städten in Thüringen die objektiven und subjektiven Einsatzerfahrungen der VU mit Batteriebussen aufgenommen worden.

2 Datenerfassung und Simulation

2.1 Grundlagen der Simulation

2.1.1 Simulationsprogramm IVision

Am Fraunhofer IVI wurde das Simulationsprogramm IVision für Straßen- und Schienenfahrzeuge entwickelt. IVision ermöglicht die Dimensionierung und den Vergleich von Antriebssträngen, die Entwicklung von Betriebsstrategien sowie die Auslegung der wegseitigen Infrastruktur für die externe Energieversorgung bei Elektrofahrzeugen. Das Programm bildet mit über 100 verschiedenen, vorkonfigurierten Antriebsstrangvarianten eine große Vielfalt an konventionellen, hybriden und elektrischen Fahrzeugen ab.

Die Auswahl der Antriebstrangkonfiguration und der Betriebsstrategie erfolgt mittels einer grafischen Benutzeroberfläche. Die Parameter der Antriebstrangkomponenten sowie die Fahrzyklen sind in einer Datenbank hinterlegt. Automatisierte Abläufe ermöglichen die Durchführung aufwändiger Variationsreihen einzelner Parameter oder kompletter Komponenten.

Das Programm umfasst:

- ein Fahrzeugmodell; ein Fahrzeug kann aus bis zu drei Segmenten und fünf Achsen / Drehgestellen bestehen
- kennfeldbasierte Verbrennungsmotor-, Elektromaschinen- und Getriebemodelle
- kennlinienbasierte Leistungselektronik
- Bordnetz (Hoch- und Niederspannung)
- Energiespeicher (Akkumulatoren, Kondensatoren)
- Modelle des Druckluftsystems und der Innenraumheizung
- Modelle zum Kontakt und Schlupfverhalten zwischen Gummireifen-Fahrbahn und Stahlrad-Stahlschiene
- weg- oder zeitgenaue Simulation von Fahrzyklen (standardisierte und nutzerdefinierte Fahrzyklen)
- Betriebsstrategien für konventionelle, hybride und elektrische Antriebsstränge
- komfortable Analyse- und Visualisierungsfunktionen.

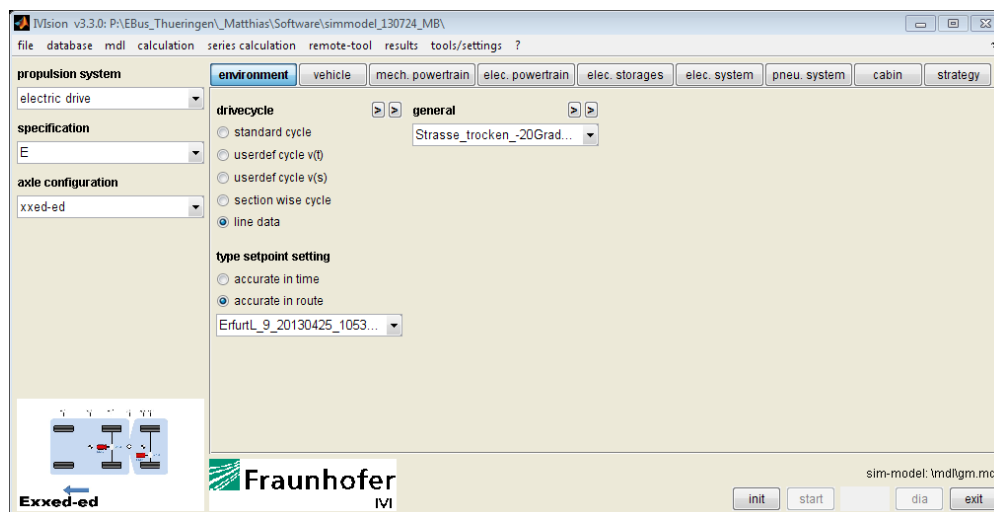


Abb. 01
Benutzeroberfläche des Simulationsmodells IVision

Dieses Simulationsprogramm wurde zur Untersuchung verschiedener Einsatzszenarien eines 12 m-Elektrobusses auf den zu untersuchenden Linien verwendet. Hierzu wurde ein Fahrzeugmodell konfiguriert und gemäß der Aufgabenstellung angepasst, die benötigten Antriebsstrangkomponenten parametrisiert, die gemessenen Geschwindigkeitsverläufe und das Höhenprofil aufbereitet und in der Datenbank abgelegt sowie Variationsrechnungen durchgeführt.

2.1.2 Energiebilanzierung

Der Energiebedarf eines Fahrzeuges setzt sich aus der Traktionsenergie, dem Energiebedarf für die Klimatisierung sowie die Nebenaggregate im Hochspannungskreis und dem 24 V-Bordnetzbedarf zusammen.

Die Gesamtbilanz am Hochspannungszwischenkreis des Fahrzeuges lautet:

$$E_{\text{Zwischenkreis}} = E_{\text{Traktion}} + E_{\text{Klima}} + E_{\text{Nebenag}} + E_{\text{Bordnetz}}$$

Die Traktionsenergie setzt sich aus der Antriebsenergie, die aus dem Zwischenkreis entnommen wird und der zurückgespeisten Energie beim Bremsen zusammen. Bei Streckenabschnitten mit großen Gefälleanteilen kann die Traktionsenergie sehr klein und unter Umständen auch negativ ausfallen.

$$E_{\text{Traktion}} = E_{\text{Antrieb}} - E_{\text{Rekuperation}}$$

Der Energiebedarf der Nebenaggregate setzt sich zusammen aus:

$$E_{\text{Nebenag}} = E_{\text{Servolenkung}} + E_{\text{Kompressor}} + E_{\text{Lüfter Traktion}} + E_{\text{Lüfter Batterie}}$$

Das Niederspannungsbordnetz wird über einen Spannungswandler aus dem Hochspannungskreis versorgt. Für den Spannungswandler wurde ein mittlerer Wirkungsgrad von 97 Prozent angenommen.

$$E_{\text{Bordnetz}} = E_{\text{Bordnetzverbraucher}} / \eta_{\text{Bordnetzwandler}}$$

Die Summe der am Zwischenkreis entnommenen Energie wird aus dem Speicher entnommen, dessen Ladezustand, also Energieinhalt sinkt. Der Wirkungsgrad des Energiespeichers berücksichtigt sowohl die Energieverluste beim Laden als auch beim Entladen des Speichers.

$$\Delta E_{\text{Speicher}} = E_{\text{Zwischenkreis}} / \eta_{\text{Speicher}}$$

Um den tatsächlichen Energiebedarf eines Fahrzeuges für einen kompletten Einsatztag bestimmen zu können, sollte der Energiespeicher am Tagesende auf den gleichen Wert geladen werden, wie er startete. Hierdurch werden alle Lade- und Entladeverluste der Batterie mit berücksichtigt. Denn erst die Summe aller Teilenergiemengen erlaubt eine Bilanzierung.

Abb. 02 zeigt in einem Sankey-Diagramm schematisch die Energieflüsse in einem elektrisch angetriebenen Fahrzeug nach einer beispielhaften Fahrt ohne anschließender Nachladung. Aus dem Energiespeicher wurde insgesamt eine Energiemenge von 53 kWh entnommen und 16,9 kWh eingespeist. Die Werte verändern sich, in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers beim Übergang zum Zwischenkreis. Aus dem Zwischenkreis werden 46,8 kWh für die Traktion entnommen. Über den AC/DC-Wandler, den Elektromotor sowie das Differential vermindert sich die Energiemenge auf 38,7 kWh. 7,2 kWh werden zur Überwindung der Rollreibung aufgebracht. 2,3 kWh gehen über die

mechanische Bremse in thermische Energie „verloren“ und 4,7 kWh werden zur Überwindung des Luftwiderstands benötigt. Letzten Endes werden 7,7 kWh in potentielle Energie und 26,4 kWh in kinetische Energie umgewandelt, welche wieder zurückgewonnen werden kann. Über die lange Wirkungsgradkette verringert sich die Energiemenge, welche in den Zwischenkreis eingespeist wurde, von 23,1 kWh auf 19,3 kWh. Für die Nebenaggregate werden 6,4 kWh benötigt, die Heizung bzw. Klimatisierung war nicht notwendig.

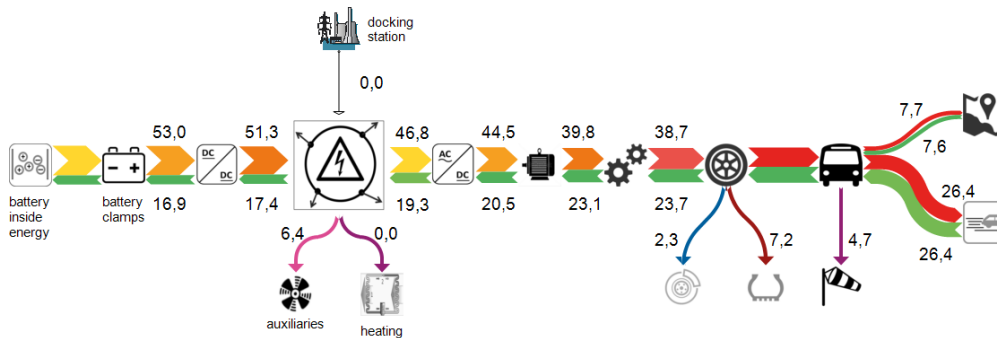


Abb. 02 Sankey-Diagramm ohne Nachladung

Eine aktuelle Bilanzierung der Energien am Zwischenkreis würde die Ladeverluste der Batterie bzw. des Energiespeichers nicht berücksichtigen. Während des Ladevorgangs ist, besonders bei den betrachteten sehr hohen Außentemperaturen, eine Kühlung des Energiespeichers notwendig. Zusätzlich wird für die Leistungselektronik und Überwachungselektronik Energie benötigt. Abb. 03 zeigt, dass im Gegensatz zu Abb. 02, eine Energiemenge von insgesamt 8,0 kWh für die Nebenaggregate benötigt wird. Die gesamten Lade- und Entladeverluste des Energiespeichers ergeben sich aus der Subtraktion der Energiemenge, welche in den Energiespeicher eingespeist wurde zu der Energiemenge, welche entnommen wurde.

Der tatsächliche Energiebedarf des Fahrzeugs kann ohne eine detaillierte Betrachtung der Einzelenergien direkt am Ladegerät bzw. der Ladestation erfolgen. Da die Ladestationen einen unterschiedlichen Wirkungsgrad besitzen, wird in der vorliegenden Studie die Sekundärseite der Ladestation betrachtet. Die tatsächliche vom Energieunternehmen bezogene Energiemenge wird entsprechend dem Wirkungsgrad größer sein.

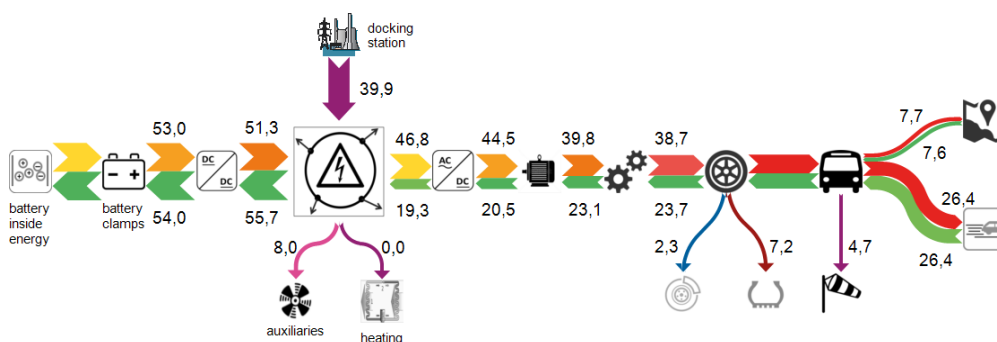


Abb. 03 Sankey-Diagramm mit Nachladung

Bei den folgenden Betrachtungen der Energieverbräuche der Fahrzeuge in den einzelnen thüringischen Städten, werden grundsätzlich alle Fahrzeuge nach ihrem simulierten Tagesumlauf vollständig geladen, sodass grundsätzlich die Summe aller Teilenergiemengen der nachgeladenen Energiemenge entspricht. Diese abschließenden Ladevorgänge wurden in den folgenden Abbildungen der Ladezustände der Energiespeicher nicht aufgeführt, um den unterschiedlichen Ladezustand bei Erreichen des Betriebshofs miteinander besser vergleichen zu können.

Basisfahrzeug

Die Konfiguration des Basisfahrzeugs gilt für die Simulationen aller Städte. Es wurde ein 12 m-Solofahrzeug angenommen, welches mit einem Energiespeicher mit einem Energieinhalt von 220 kWh eine Leermasse von 14,5 t aufweist. Das Fahrzeug verfügt über einen leistungsstarken Elektromotor von 180 kW, welcher als Zentrilmotor über ein Differential die Hinterachse antreibt. Der elektrische Zwischenkreis liegt auf einem Spannungsniveau von 600 V. Der Luftpresser und die Hydraulikpumpe werden direkt am Zwischenkreis betrieben. In die Energiebilanz fließen ebenfalls die Verbräuche weiterer Nebenverbraucher, wie bspw. Entwerter, Fahrgastinformationssystem und RBL mit ein. Die Verbräuche sind durch mehrmonatige Messungen eines Elektrobusses im Linienbetrieb abgesichert.

Heizung

Für die Simulationen wurden die Charakteristika einer Zusatzheizung der Firma Spheros vom Typ Thermo 300 genutzt. Diese mit 30 kW Heizleistung starke Wasserheizung ist Stand der Technik und wird bereits in zahlreichen Fahrzeugen genutzt.

Tabelle 01 technische
Daten der Zusatz-
heizung

Heizleistung	1 x 30 kW
Kraftstoffverbrauch	4 l/h
Kraftstoff	Heizöl EL gemäß DIN 51603
unterer Heizwert	43 MJ/kg
Kraftstoffdichte	823 kg/m ³

Klimaanlage

Zwischen den einzelnen zu untersuchenden thüringischen Städten unterscheidet sich die Fahrgastraum- und Fahrerklimateisierung. In Suhl / Zella-Mehlis wird komplett auf eine Klimatisierung verzichtet, während in Eisenach zumindest der Fahrerarbeitsplatz klimatisiert wird. In Mühlhausen werden standardmäßig die sparsamen Klimaanlage der Fa. Spheros vom Typ Citysphere eingesetzt, wobei zwei Stück je Fahrzeug Verwendung finden. Diese Anlagen weisen einen hohen Wirkungsgrad auf, können direkt am 24 V-Bordnetz betrieben werden - bei geringer Leistung. Diese Anlagen werden häufig in derzeitigen Elektrobussen, aber auch bei Anhängersystemen und in Dieselnissen eingesetzt. In Altenburg und in Weimar werden Vollklimaanlagen mit einer Kälteleistung von 32 kW eingesetzt. Als Solltemperatur wurde bei diesen Städten jeweils eine Innenraumtemperatur von 25 °C gefordert.

Energiespeicher

Der Energieinhalt und die Leistung des Energiespeichers bestimmt neben der Positionierung einer Ladestation die Wegstrecke, die mit einem Fahrzeug zurückgelegt werden

kann. So können bspw. auf einer Linie, bei der eine regelmäßige Nachladung möglich ist, Batterien mit einem kleineren Energieinhalt eingesetzt werden, wodurch sowohl die mitzuführende Batteriemasse als auch die Anschaffungskosten reduziert werden kann. Andererseits sind Linien zu erwarten, die wenig Wendezeit bieten und nur unzureichend nachgeladen werden können. In diesem Fall ist der Energiespeicher entsprechend groß zu dimensionieren.

Als Energiespeicher werden für die Simulationen Lithium-Ionen-Batterien verwendet. Es werden Energiespeicher mit einem Energieinhalt zwischen 120 und 440 kWh untersucht. Der nutzbare Energieinhalt basiert auf einer oberen Ladegrenze von 95 Prozent und einer unteren Entladegrenze von 5 Prozent.

Ladestation

Bei den Simulationen kann das Nachladen an Endpunkten der Linie Berücksichtigung finden. Welche Energiemenge während des Fahrzeugstillstands dabei in die Fahrzeuge übertragen werden kann, ist abhängig von der anzusetzenden Ladeleistung der Ladestation und der Batterie. Der derzeitige Stand der Technik, sowohl bei den Batterien der Fahrzeuge als auch der der Ladestationen, erlaubt bei einem kontaktbasiertem System eine Ladeleistung von 250 kW.

Des Weiteren hat die Art, wie der Kontakt zur Ladestation hergestellt werden kann und der hinterlegten Prozedur bis zur tatsächlichen Stromübertragung, einen maßgeblichen Einfluss auf die Ladezeit. So ist bspw. bei einer Steckerlösung, bei der der Fahrer manuell den Kontakt zwischen Fahrzeug und Ladestation herstellen muss, sehr zeitintensiv. Halb- oder Vollautomatische Systeme können helfen, die meist sehr knappe Wendezeit für möglichst lange Ladevorgänge auszunutzen. Ausgehend von einer Ladeleistung von 250 kW, können innerhalb einer Minute ca. 4,2 kWh übertragen werden, womit ein Solobus bei mittleren Temperaturen eine Wegstrecke von über drei Kilometer zurücklegen könnte.

Die im vorliegenden Bericht angegebenen Ladeenergien beziehen sich auf die Sekundärseite einer Ladestation und spiegeln den tatsächlichen Energiebedarf eines Fahrzeugs wieder. Die tatsächlich vom Energieversorger bezogene Energiemenge ist abhängig vom Wirkungsgrad der Ladestation und liegt über der des Fahrzeugs.

2.1.4 Fahrprofile

Messaufbau und Durchführung

Die Grundlage für eine aussagekräftige Simulation von elektrisch betriebenen Fahrzeugen auf den zu untersuchenden Linien, bilden reale gemessene Fahrzyklen. Hierdurch werden die typischen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bei einer bestimmten Fahrgastbelegung und Topographie erfasst. Ebenso basieren dadurch die Wendezeiten an den Endpunkten nicht ausschließlich auf dem vorgegebenen Fahrplan, sondern beinhalten ggf. auftretende Verspätungen oder ein vorzeitiges Erreichen der Haltestellen. Es wurden daher für eine genaue Analyse der Linien in den einzelnen Städten in Abstimmung mit den Verkehrsbetrieben alle dienstplanmäßigen Fahrten, inklusive Leerfahrten vom und zum Depot, aufgezeichnet. Grundlage war dabei ein von den Verkehrsbetrieben gewählter repräsentativer Umlauf.

Gemessen wurden die geografische Position des Fahrzeugs und die Höhe der Fahrtroute über NN (Höhenprofil) mittels GPS. Während der Messfahrten wurde zusätzlich die geografische Position aller Haltepunkte aufgenommen.

.....
Datenerfassung und Simulation
.....

Abb. 04 zeigt einen Teil des Messaufbaus in einem vergleichbaren Fahrzeug.



Abb. 04
beispielhafter Messaufbau im
Fahrzeug

Zusätzlich wurden die Fahrten mit einer Kamera gefilmt, um Besonderheiten in den Messwerten dem Messgeschehen zuordnen und verkehrsbedingte Ursachen identifizieren zu können. Während der Fahrten wurden von Hand die Fahrgastzahlen ermittelt und aufgezeichnet.

Die erfassten Fahrprofile dienen als Grundlage der Simulationen, d. h. dass alle externen Einflüsse, wie Verkehrsfluss, Verspätungen, die Fahrweise des Fahrers, Umsteigezeiten, die Fahrzeugbeschleunigung etc. mit in die Ergebnisse einfließen. Entsprechend können die simulierten Ergebnisse von einem tatsächlichen Fahrbetrieb abweichen, da schwer beurteilt werden kann, ob die Fahrprofile positive oder negative Auswirkungen auf den Energieverbrauch haben.

2.1.5 Vorgehensweise der Simulationsrechnungen

Für jede Stadt wurde der komplette gemessene Tagesumlauf simuliert. Variiert wurde dabei:

- die Nachladestrategie: einmaliges Laden im Betriebshof oder Nachladen an Wendepunkten während des Linienbetriebs
- die Batteriegröße: Energiespeichereinhalt zwischen 120 und 440 kWh
- sowie die Umweltbedingungen: Außentemperatur zwischen -20 und 40 °C sowie zusätzliche Sonneneinstrahlung

Insgesamt 21.927 Simulationsrechnungen wurden für die Untersuchung durchgeführt. Die detaillierte Betrachtung der Ergebnisse jeder Parametervariation ist schwer darstellbar, weswegen die Ergebnisse gebündelt werden. So werden die beiden verschiedenen Nach-

ladestrategien separat voneinander betrachtet, hierin aber die Speichergrößen hinsichtlich der Außentemperatur mit dem größten Energiebedarf des Fahrzeugs bewertet.

.....
Datenerfassung und Simulation
.....

Soll ein Fahrzeug während des Einsatztages nicht nachgeladen werden, muss der komplette Energiebedarf durchgehend aus dem Energiespeicher abgedeckt werden. Entsprechend groß, schwer und teuer ist diese Lösung. Zumal eine Dimensionierung des Energiespeichers nicht auf ein errechnetes Minimum beschränkt sein sollte, sondern Reserven für eventuelle Störungen (Staus, Umleitungen, etc.) mitgeführt werden sollten. Die Auslegung muss in diesem Fall für den energetisch anspruchsvollsten Tagesumlauf erfolgen. Bei Umläufen, die kürzer sind, wird unnötigerweise Masse mitgeführt, welche nicht benötigt wird.

Wird hingegen eine Strategie mit Nachladung an Linienendpunkten gewählt, kann, so ausreichend Wendezeit zur Verfügung steht, der Energiespeicher nach jedem Umlauf wieder neu aufgeladen werden. In den Fällen, bei denen die Zeit nicht ausreicht um den Energiespeicher komplett zu laden, kann eine ausreichend dimensionierte Batterie auch defizitär betrieben werden. Das heißt, dass der Ladezustand des Energiespeichers im Tagesverlauf sinkt. In diesem Fall werden genaue Aussagen hinsichtlich der Reserven für den Linienbetrieb getroffen.

2.2 Simulationsrechnungen

2.2.1 Altenburg Linie S

Messungen des Fahrprofils

- Datum: 15.01.2015, Donnerstag
- Einsatzzeit: 04:44 - 19:40 Uhr
- Anzahl der Umläufe gem. Fahrplan: 22
- Takt Hauptverkehrszeit: 10 min
- Takt Nebenverkehrszeit: 20 min
- Wendezeit Stauffenbergstraße gemäß FPL: 8 min

Der gemessene Umlauf mit der Abfahrtszeit 15:38 Uhr und einer geplanten Ankunftszeit von 16:10 Uhr hatte eine Verspätung von über 10 Minuten, sodass der darauf folgende Umlauf nicht mehr pünktlich hätte bedient werden können. Daher wurde durch die Einsatzleitung der Verkehrsbetriebe ein zusätzliches Fahrzeug auf der Linie eingesetzt und das Messfahrzeug hatte eine verlängerte Haltezeit am Endpunkt von ca. 27 Minuten. Da dieser Fall ausgesprochen selten auftritt, wurde in Absprache mit dem Verkehrsbetrieb sowohl die Fahrt mit der starken Verspätung als auch die anschließende Pause nicht für die Simulation genutzt. Anstatt dessen wurden die beiden Fahrten (inkl. zugehöriger Pausen) zwischen 11:38 Uhr und 12:50 Uhr als Austausch verwendet. Der anschließende Umlauf ab 16:58 Uhr entspricht wieder dem tatsächlich gemessenen Geschwindigkeitsprofil.

Fahrgastzahlen am Messtag

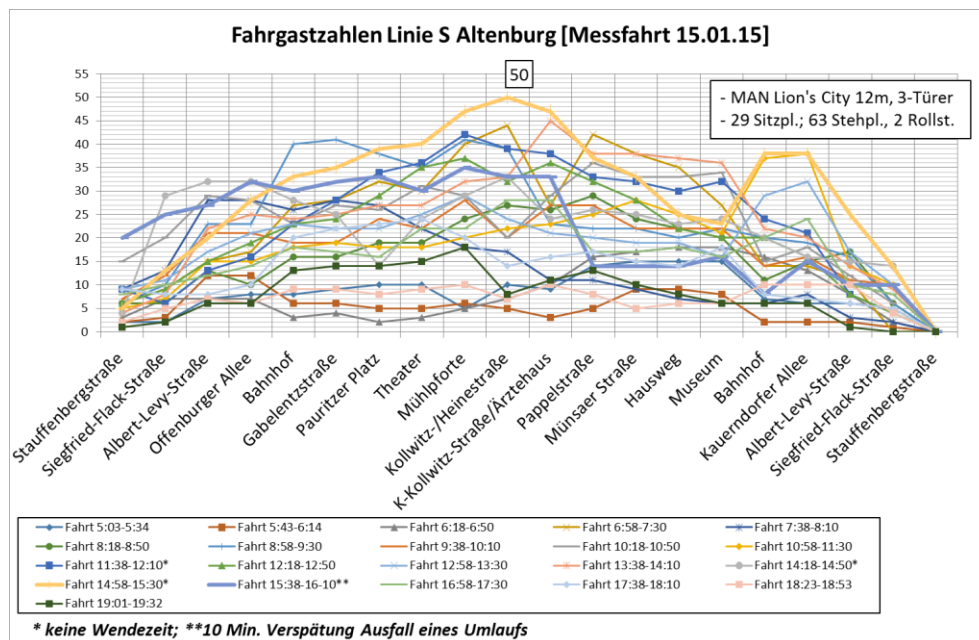


Abb. 05 Fahrgastzahlen
Linie S in Altenburg vom
15.01.2015

Stadtspezifische Konfiguration

In Altenburg werden vollklimatisierte Fahrzeuge eingesetzt. Diese haben in der Regel eine Kälteleistung von ca. 32 kW. Als Temperaturvorgabe im Fahrgastinnenraum werden 25 °C gefordert.

Die Anzahl der beförderten Fahrgäste war während des Messtags hoch, sodass in der Spitze 50 Fahrgäste befördert wurden, was bei einem Personengewicht von 70 kg einer Zuladung von 3,5 t entspricht. Da beim Fahrgastwechsel nicht konsequent alle Türen von den Fahrgästen genutzt wurden, waren die Fahrgastwechselzeiten mitunter sehr lang.

Energiebedarf ohne Nachladung während des Einsatztags

Abb. 06 zeigt den zeitlichen Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers während des Einsatztages. Grundlage bilden Simulationen mit Energiespeichern mit einem Energieinhalt zwischen 220 und 440 kWh und einer Außentemperatur von 15 °C ohne direkter Sonneneinstrahlung auf das Fahrzeug.

Um den ca. 260 km langen Tagesumlauf ohne Nachladung während des Einsatztages absolvieren zu können, ist ein Energiespeicher von ca. 440 kWh notwendig. Ein derart großer Energiespeicher geht mit einem Systemgewicht von nahezu vier Tonnen einher, wodurch der Traktionsenergiebedarf des Fahrzeugs erheblich steigt. So summieren sich das hohe Systemgewicht des Energiespeichers, die große Zuladung an Fahrgästen und der Versuch des Fahrers den Fahrplan zu halten. Eine spezifische Energie von 1,04 kWh/km müsste entsprechend für die Beschleunigung des Fahrzeugs aufgebracht werden. Für die Nebenverbraucher des 24 V- und Hochspannungsnetzes werden 0,25 kWh/km benötigt. Für Heizung und Klimatisierung wird aufgrund der mäßigen Außentemperatur von 15 °C keine Energie gebraucht. Die Lade- und Entladeverluste des Energiespeichers betragen 0,17 kWh/km. Insgesamt ergibt sich damit ein spezifischer Gesamtenergiebedarf von 1,46 kWh/km.

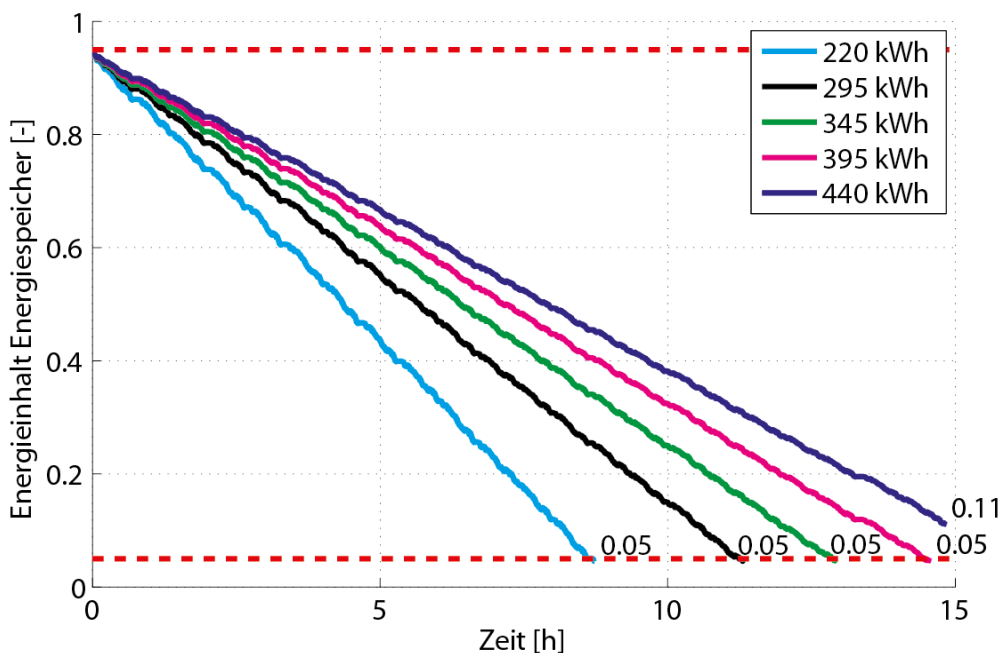


Abb. 06 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 15 °C, im Schatten und ohne Nachladung in Altbau

Den zeitlichen Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 40 °C im Schatten zeigt Abb. 07. Die Energieversorgung der Vollklimaanlage für den Fahrgastinnenraum erfolgt über einen Gleichspannungswandler direkt am Zwischenkreis. Der zusätzliche Energiebedarf für die Klimatisierung führt dazu, dass selbst mit einem 440 kWh-großen Energiespeicher der Tagesumlauf nicht vollständig gefahren werden kann. Eine zusätzliche Sonneneinstrahlung auf die Fahrzeugoberfläche würde zu einem noch größeren Energiebedarf für die Klimaanlage führen – entsprechend eher würde die untere 5 %-Grenze beim Ladezustand erreicht werden.

Die Simulationen zeigen weiter, dass mit der derzeitigen Energiespeichertechnologie ein derart langer und anspruchsvoller Fahrzeugumlauf mit dem gleichzeitigen Wunsch einer Vollklimatisierung des Fahrgastinnenraums nicht möglich ist. Selbst ohne eine Klimatisierung und einem sehr großen Energiespeicher bestünde nur eine geringe Reserve am Tagesende, um eventuelle Störungen im Betriebsablauf abfangen zu können.

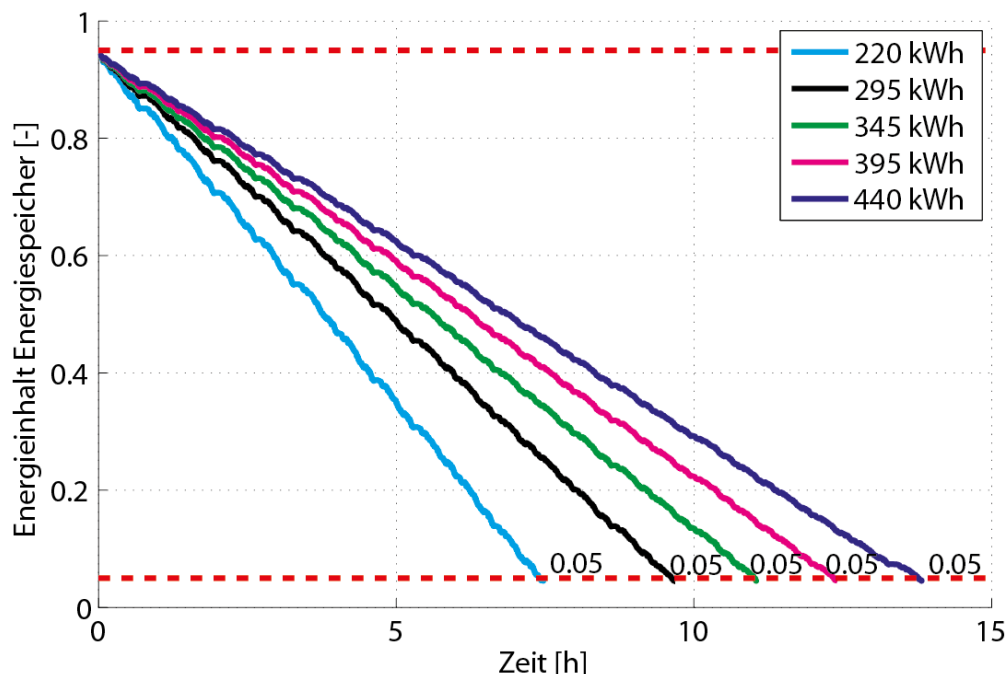


Abb. 07 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 40 °C, im Schatten und ohne Nachladung in Altenburg

Außentemperatur	15 °C	40 °C schattig	40 °C sonnig
empf. Speichergröße [kWh]	440	>440	>440
Traktion [kWh/km]	1,04	k. A.	k. A.
Klimatisierung [kWh/km]	0,00	k. A.	k. A.
Nebenaggregate [kWh/km]	0,25	k. A.	k. A.
Verluste Energiespeicher [kWh/km]	0,17	k. A.	k. A.
Gesamt [kWh/km]	1,46	k. A.	k. A.

Tabelle 02 empfohlene Speichergröße sowie spez. Energiebedarf ohne Nachladung in Altenburg

Energiebedarf mit Nachladung während des Einsatztags

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass eine Nachladung während des Einsatztages für den rein elektrischen Fahrbetrieb zwingend notwendig wäre. Als Nachladepunkt wurde die Haltestelle „Stauffenbergstraße“ gewählt, da an dieser Haltestelle eine fahrplanmäßige Wendezeit von acht Minuten besteht. Allerdings ist die Ankunfts- und die Abfahrts Haltestelle voneinander getrennt, sodass für die Verbindung eine Leerfahrt notwendig ist. Dabei

regelt eine Lichtsignalanlage die Ausfahrt aus der Haltstelle und erlaubt die Querung der Straße. Durch den Wendevorgang und dem anschließenden Halt für den Zustieg von Fahrgästen geht potentielle Ladezeit verloren.

Für die Simulationen wurde bei besonders kurzen Stopps von kleiner einer Minute keine Nachladung angenommen. Von den insgesamt 53 min Haltezeit an der Ankunftshaltstelle, wurden somit 42,5 min zum Laden genutzt. Die Differenz von 10,5 min verteilt sich auf insgesamt neun Umläufe, wodurch eine potentielle Nachladung von 40 kWh nicht erfolgt.

Abb. 08 zeigt den Ladezustand des Energiespeichers bei 15 °C Außentemperatur im Schatten und Energiespeichergrößen von 220, 295 und 345 kWh. Während des Vormittags zwischen 5 und 11 Uhr kann in den Wendezeiten der Energiespeicher ausreichend nachgeladen werden, sodass mit einer nahezu ausgeglichenen Energiebilanz, unabhängig von der Energiespeichergröße, gefahren werden kann. Bei den darauf folgenden Umläufen beträgt die Haltezeit in der Ankunftshaltstelle Stauffenbergstraße nur wenige Sekunden und es kann bis zum Tagesende lediglich zweimal nachgeladen werden. Entsprechend stark fällt der Ladezustand des Energiespeichers ab. Bei einer Energiespeichergröße von 220 kWh wäre bei Erreichen des Betriebshofs der Energiespeicher zu neun Prozent geladen. Bei Einbeziehung der potentiellen 10,5 Minuten Ladezeit, welche aufgrund ihrer Kürze in den nachmittäglichen neun Umläufen nicht zum Nachladen genutzt wurden, würde der Ladezustand ca. 25 Prozent betragen. Ausreichend Reserve, sollten bspw. weitere Ladevorgänge nicht durchführbar sein, bietet ein Energiespeicher mit 295 kWh Energieinhalt.

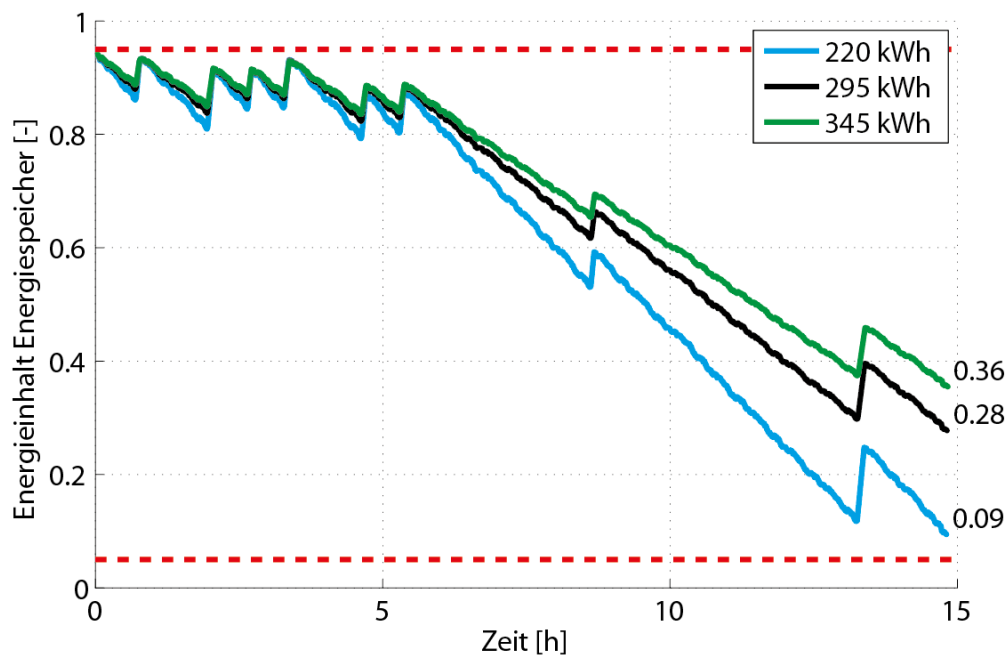


Abb. 08 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 15 °C, im Schatten und mit Nachladung in Altenburg

Die Simulationen bei Außentemperaturen von 40 °C wurden getrennt betrachtet, zum einen wenn das Fahrzeug durchgehend im Schatten (Abb. 09) eingesetzt wird sowie als „worst case“ bei direkter Sonneneinstrahlung (Abb. 10). Um das Fahrzeug auf die vorgegebene Temperaturvorgabe des Fahrgastinnenraums von 25 °C abzukühlen, wird ohne Sonneneinstrahlung eine spezifische Energiemenge von 0,23 kWh/km benötigt. Bei voller Sonneneinstrahlung steigt der spezifische Energiebedarf auf 0,35 kWh/km.

Die Abbildungen zeigen nun stärker fallende Kurven, da der Gesamtenergiebedarf deutlich steigt. Selbst ein 345 kW-großer Energiespeicher bietet nur geringe Reserven, um bei den derzeit bestehenden Ladezeiten, einen sicheren Tagesumlauf garantieren zu können.

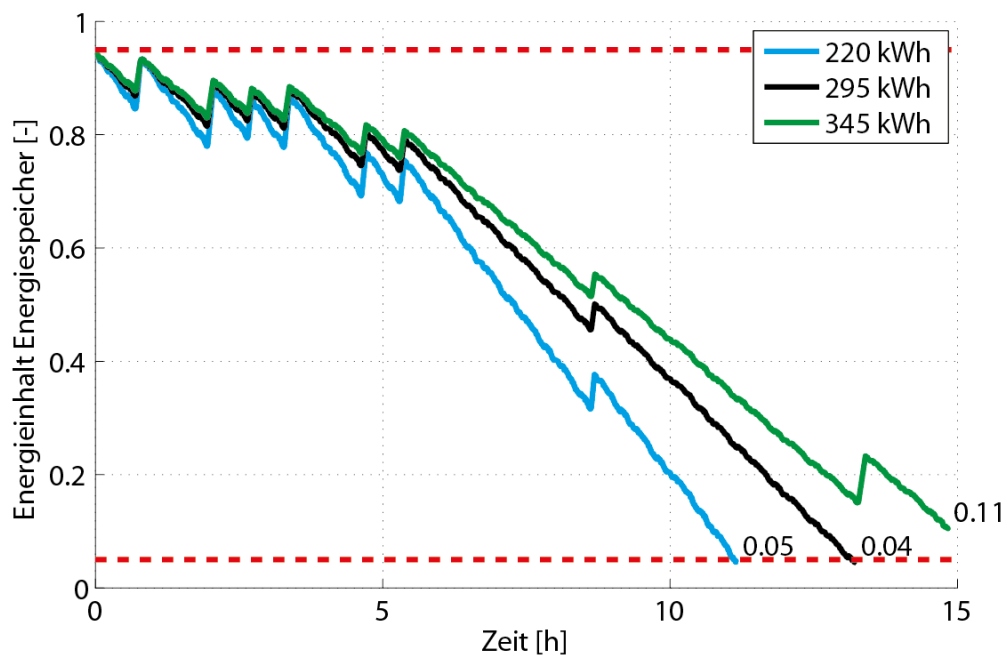
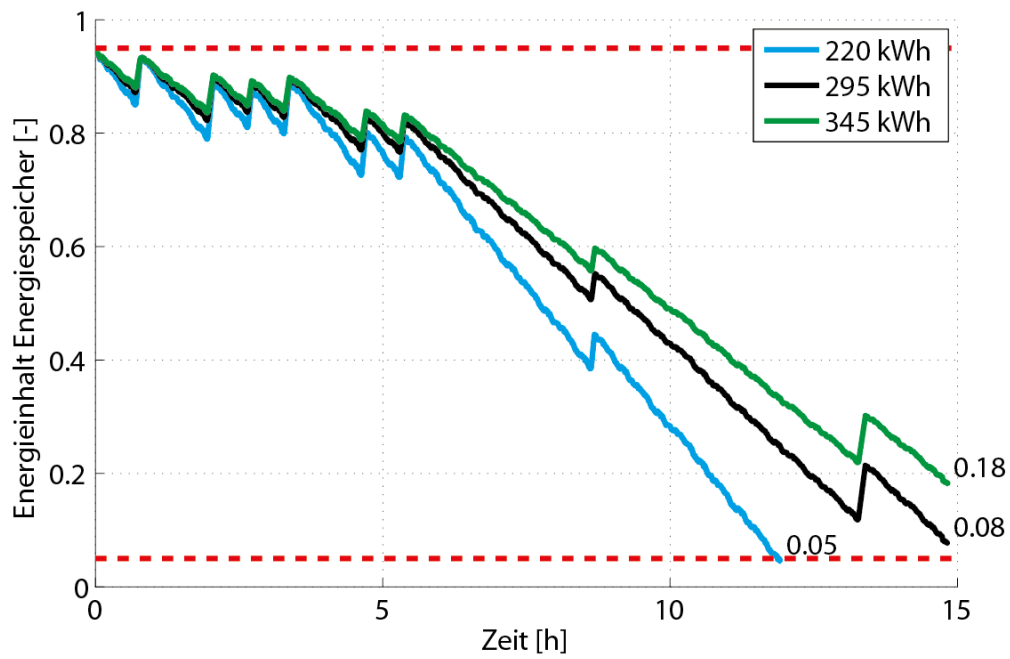


Tabelle 01 empfohlene
Speichergröße sowie
spez. Energiebedarf
mit Nachladung in
Altenburg

Außentemperatur	15 °C	40 °C schat- tig	40 °C sonnig
empf. Speichergröße [kWh]	295	345	>345
Traktion [kWh/km]	0,96	0,98	>0,98
Klimatisierung [kWh/km]	0,00	0,23	0,35
Nebenaggregate [kWh/km]	0,25	0,29	0,29
Verluste Energiespeicher [kWh/km]	0,17	0,18	0,19
Gesamt [kWh/km]	1,38	1,68	>1,81

Die Auswertung der Simulationen zeigt, dass mit der aktuellen Energiespeichertechnologie, den Vorgaben einer Vollklimatisierung des Fahrgastinnenraums auf 25 °C sowie den durch Verspätungen verursachten kurzen Ladezeiten am Endpunkt Stauffenbergstraße ein Batteriebus aus technischer Sicht nicht sinnvoll einsetzbar ist. Eine Lösung wäre, die Anzahl der auf der Linie eingesetzten Fahrzeuge zu vergrößern, sodass mehr Wendezeit am Endpunkt generiert wird. Diese Maßnahme geht aber mit erhöhten Kosten einher, da mehr Fahrzeuge und Fahrer benötigt werden. Eine Änderung des Takts würde ebenfalls die derzeitige Fahrplananbindung zum S-Bahnnetz kappen, was aus betrieblicher Sicht ausgeschlossen wird. Diese Verstärkerfahrten wären aber nicht durchgehend nötig, sondern würden sich auf die Hauptverkehrszeit beschränken.

Alternativ könnte der derzeit bei Dieselbussen unkritische Betriebsablauf am Endpunkt Stauffenbergstraße abgeändert werden. Derzeit sind die Ankunfts- und Abfahrthaltestellen voneinander räumlich getrennt. Entsprechend verkürzt sich die potentielle Ladezeit an der Ankunftshaltestelle um die Zeit, welche für das Wenden sowie den Fahrgastzustieg an der Abfahrthaltestelle benötigt wird. In Abb. 11 ist der Haltestellenbereich des Endpunkts sichtbar. Am Punkt 1 fährt das Fahrzeug in den Haltestellenbereich ein, die Fahrgäste können aussteigen und der Fahrer kann pausieren. In dieser Zeit könnte der Energiespeicher über eine Ladestation nachgeladen werden. Nach Beendigung der Pause fährt das Fahrzeug zu Punkt 2 und meldet sich an der Fußgängerampel an. Anschließend wendet das Fahrzeug, fährt in die Abfahrthaltestelle (Punkt 3) ein und lässt die Fahrgäste zusteigen. Abschließend verlässt das Fahrzeug den Haltestellenbereich und beginnt seine Linienfahrt (Punkt 4).



Abb. 11 Luftbild des Endpunkts Stauffenbergstraße

Um das mögliche Potential an Ladezeit abzuschätzen, welches sich aus der Zusammenlegung der Ankunfts- und Abfahrthaltestelle ergibt, wurde anhand der aufgezeichneten GPS-Messdaten der Zeitpunkt bestimmt, wann das Fahrzeug Punkt 1 erreicht und Punkt 3 verlässt. Als Reservezeit für Anfahrts- und Bremsvorgang wurden hiervon zusätzlich zehn Sekunden abgezogen. In Abb. 12 sind für jeden Haltevorgang als blaue Balken diese Zeitwerte eingetragen. Die roten Balken symbolisieren die Haltezeiten an Punkt 1 und repräsentieren somit die Ladezeiten, welche in der Ausgangssituation zu berücksichtigen waren. Die Differenz beider Balken weist somit das Potential auf, welches durch die Zusammenlegung der Haltestellen besteht. Die orange Linie symbolisiert die fahrplanmäßige Wendezeit.

Die Summe aller Zeiten für den gesamten Aufenthalt im Haltestellenbereich Stauffenbergstraße beträgt 87 Minuten, was 34 Minuten mehr sind, als die Summe der derzeitigen Ladezeiten von 53 Minuten. Durch Streichung der sehr kurzen Stopps, werden davon nur 42,5 Minuten als Ladezeiten angesetzt.

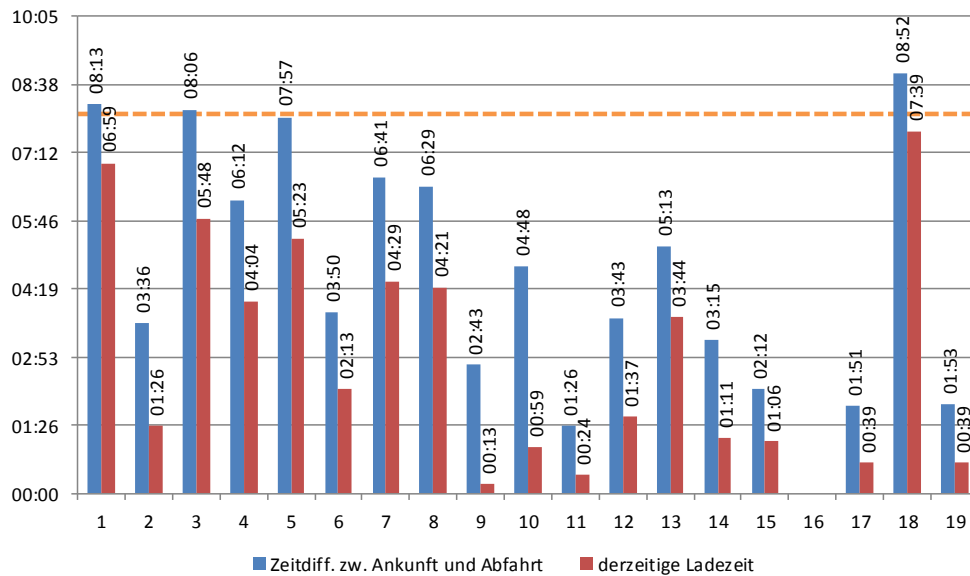


Abb. 12 Wendezeiten am Endpunkt Stauffenbergstraße

Mit einer Überschlagsrechnung kann nun geprüft werden, ob bei Nutzung der bestehenden Reserven ein Elektrobuseinsatz auf der Linie S bei Beibehaltung des Fahrplans sowie Fahrzeug- und Fahrerbedarfs möglich ist. Hierzu wird für die drei zugrunde liegenden Vorgaben an die Umweltbedingungen der Gesamtenergiebedarf bestimmt (vgl. Tabelle 02). Um die Energiemenge zu bestimmen, welche während des Einsatztages nachzuladen sind, muss der nutzbare Energieinhalt des Energiespeichers subtrahiert werden. Insgesamt ist es notwendig, zwischen 150 und 255 kWh nachzuladen, was bei einer (konstant angenommenen) Ladeleistung von 250 kW zwischen 36 und 61 Minuten in Anspruch nehmen würde.

Temperaturvorgabe	Gesamtenergiebedarf	nutzbarer Energieinhalt des Speichers	zu ladende Energiemenge	ca. Ladezeit
15 °C schattig:	350 kWh	– 200 kWh	= 150 kWh	36 min
40 °C schattig:	420 kWh	– 200 kWh	= 220 kWh	53 min
40 °C sonnig:	455 kWh	– 200 kWh	= 255 kWh	61 min

Tabelle 02 überschlägige Abschätzung der notwendigen Ladezeit

Die Überschlagsrechnung, welche unter vereinfachten Annahmen durchgeführt wurde, zeigt deutlich, dass die durch Zusammenlegung der Haltestellen erzielbaren Ladezeiten am Endpunkt Stauffenbergstraße von 87 Minuten über den geforderten 61 Minuten Ladezeit liegen und eine Reserve von 26 Minuten bietet. Es gilt aber zu beachten, dass gerade am Tagesanfang durchaus der Energiespeicher bereits vollständig geladen sein könnte und in dem Fall trotz Ladezeit nicht nachgeladen werden kann. Bei einem Ladefenster von ca. vier Minuten könnte aber ein Umlauf mit ausgeglichener Energiebilanz betrieben werden. Kürzere Ladezeiten würden zu einem Absinken des Ladezustands des Energiespeichers führen. Unter Berücksichtigung der ermittelten Zeiten in Abb. 12 ist auch bei extremen Umweltbedingungen von 40 °C und direkter Sonneneinstrahlung und einer stark genutzten Vollklimaanlage ein Betrieb mit ausreichend Reserve zu erwarten.

Für die zusteigenden Fahrgäste bleibt die Sicherheit bei der Zusammenlegung der Ankunfts- und Abfahrthaltestelle durch die bestehende LSA für Fußgänger gewährleistet. Ein weiterer Vorteil wäre, dass die Pausenzeiten der Fahrer ebenfalls besser eingehalten werden könnten.

2.2.2 Eisenach Linie 2

Messungen des Fahrprofils

- Datum: 02.12.2014 / 10.02.2015, Dienstag
- Einsatzzeit: 04:20 - 20:30 Uhr
- Anzahl der Umläufe gem. Fahrplan: 10 (auf Linie 2)
- Takt Hauptverkehrszeit: 20 min
- Takt Nebenverkehrszeit: 40 min
- Wendezeit Hauptbahnhof gemäß FPL: 13 min

In Absprache mit der KVG Eisenach werden die Leerfahrten zum und vom Betriebshof in Wutha-Farnroda nicht bei der Simulation berücksichtigt, da der zukünftige Busbahnhof in unmittelbarer Nähe zum Hauptbahnhof errichtet werden soll.

Fahrgastzahlen am Messtag

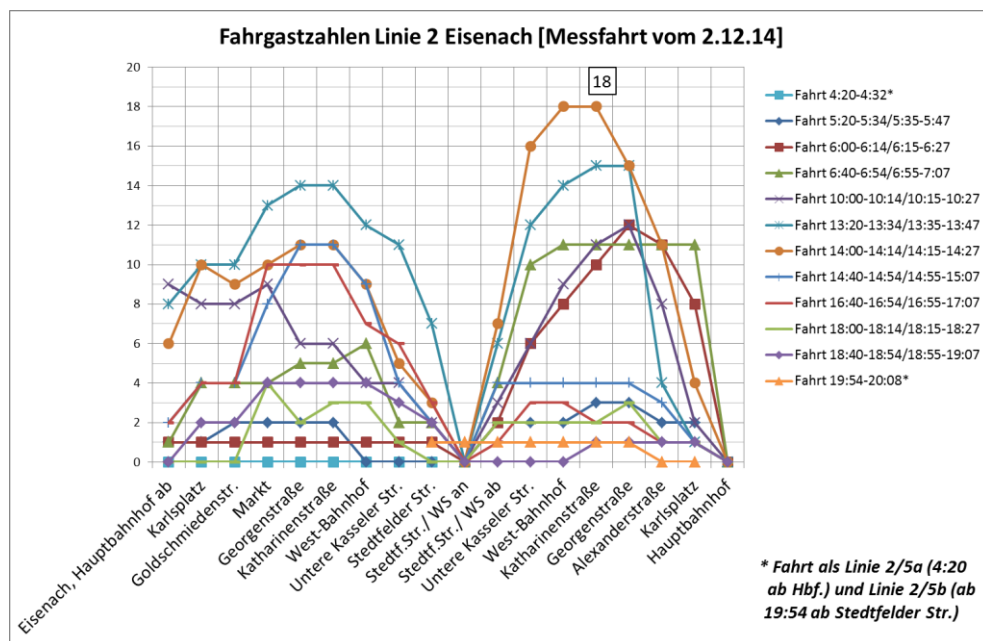


Abb. 13 Fahrgastzahlen
Linie 2 in Eisenach vom
02.12.2014

Stadtspezifische Konfiguration

Der Fahrgastinnenraum wird bei den Fahrzeugen in Eisenach nicht klimatisiert. Jedoch ist für den Fahrerarbeitsplatz eine Klimaanlage vorzusehen. Im Simulationsmodell steht derzeit eine gesonderte Betrachtung zwischen Fahrgastinnenraum und Fahrerarbeitsplatz nicht zur Verfügung. Daher wurde die Fahrerklimateanlage als gesondertes Nebenaggregat am Bordnetz eingefügt. Da zu erwarten ist, dass bei einer extremen Außentemperatur von 40 °C die Klimaanlage zum größten Teil im Vollastbetrieb arbeiten wird, wurde ein Aggregat mit einer Leistung von 1,8 kW verwendet, was bei einer Wärmearbeitszahl von drei, einer Kälteleistung von 5,4 kW entspricht. Ob die gesamte Kühlleistung von dem Fahrer tatsächlich den ganzen Einsatztag abgefordert wird, ist abhängig vom Fahrer und dessen

Temperaturempfinden. Die vorliegenden Ergebnisse sind daher als „worst case“ anzusehen und werden im Folgenden entsprechend behandelt.

Energiebedarf ohne Nachladung während des Einsatztags

Der 164 km lange Tagesumlauf kann bei moderaten Außentemperaturen mit einem Energiespeicher, dessen Energieinhalt 220 kWh beträgt, befahren werden, wobei der Energiespeicher danach nahezu komplett entladen wäre (vgl. Abb. 14). Ein zusätzlicher Betrieb einer Fahrerklimaanlage wäre nicht möglich (vgl. Abb. 15).

Ein Energiespeicher mit einem Energieinhalt von 295 kWh wäre für einen Betrieb ohne Nachladung während des Einsatztages sehr gut geeignet, da er noch ausreichend Reserve bietet, auf eventuelle Probleme im Betriebsablauf ggf. noch reagieren zu können. Für Eisenach wurde keine gesonderte Simulation für eine Außentemperatur von 40 °C und direkter Sonneneinstrahlung durchgeführt, da sich die Werte, aufgrund der gewählten Klimatisierungsmethode nicht unterscheiden würden.

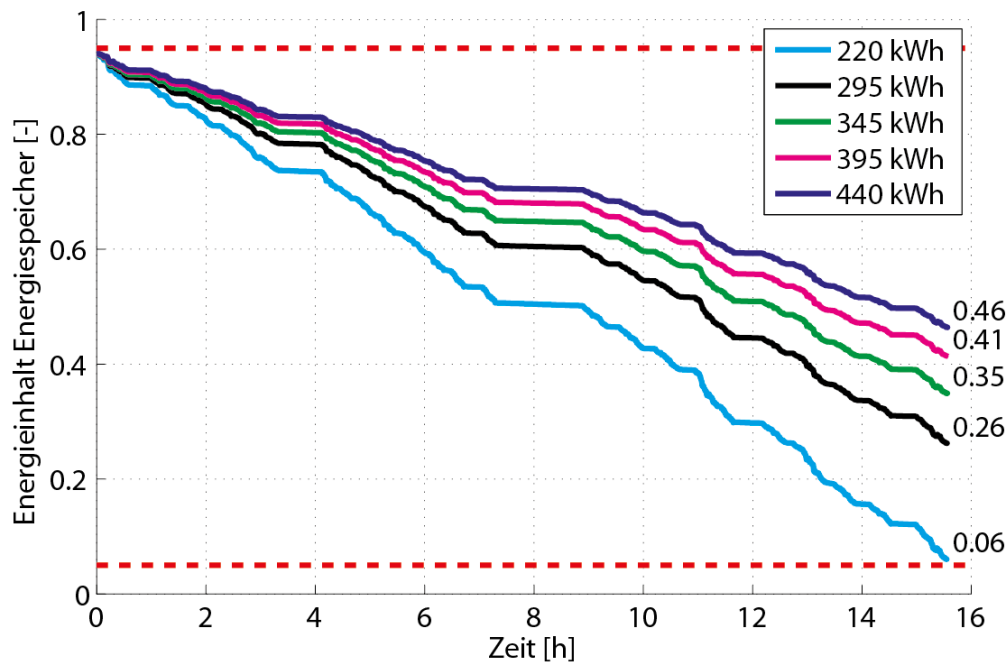


Abb. 14 Zeitlicher Verlauf
des Ladezustands des
Energiespeichers bei 15
°C ohne Nachladung in
Eisenach

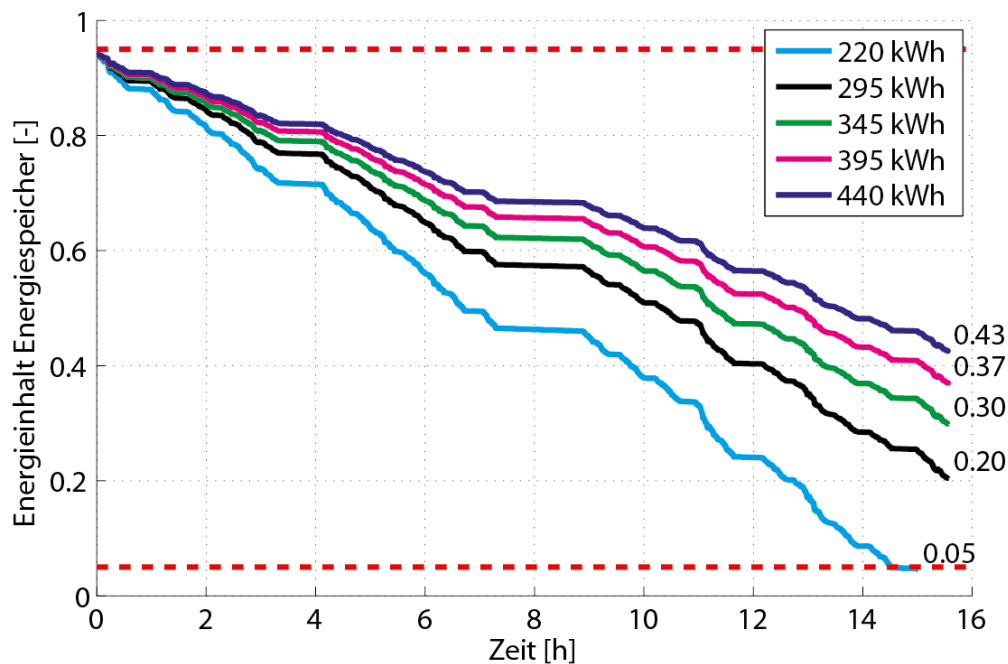


Abb. 15 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 40 °C, Schatten und ohne Nachladung in Eisenach

In Tabelle 03 sind der spezifische Energiebedarf für die Simulationen ohne Nachladung in Eisenach bei einer Energiespeichergröße von 295 kWh aufgeführt. Ein spezifischer Gesamtenergiebedarf von 1,27 kWh/km ist bei einer Außentemperatur von 15 °C zu erwarten. Durch die Klimatisierung des Fahrerarbeitsplatzes bei 40 °C steigt der Energiebedarf auf 1,42 kWh/km an. Aufgrund der oben aufgeführten Erklärung der Einstellungen am Simulationsmodell, wird der Energiebedarf der Fahrerklimaanlage den Nebenaggregaten zugeordnet.

Außentemperatur	15 °C	40 °C schattig	40 °C sonnig
empf. Speichergröße [kWh]	295	295	295
Traktion [kWh/km]	0,85	0,84	0,84
Klimatisierung [kWh/km]	0,00	0,00 *	0,00 *
Nebenaggregate [kWh/km]	0,28	0,43 *	0,43 *
Verluste Energiespeicher [kWh/km]	0,14	0,15	0,15
Gesamt [kWh/km]	1,27	1,42	1,42

*Der Energiebedarf der Klimatisierung des Fahrerarbeitsplatzes wurde bei den Nebenaggregaten bilanziert

Tabelle 03 empfohlene Speichergröße sowie spez. Energiebedarf ohne Nachladung in Eisenach

Energiebedarf mit Nachladung während des Einsatztags

Ein 295 kWh großer Energiespeicher ist für ein Solofahrzeug zwar beim derzeitigen Stand der Technik vorstellbar, stellt aber den derzeitigen Grenzfall hinsichtlich Zuladung dar, da die Systemmasse bereits einen guten Teil der Zuladung belegt.

Deutlich attraktiver wäre es, wenn die während des Einsatztages am Hauptbahnhof eingelegten Wendezeiten, für das Nachladen eines Energiespeichers genutzt werden könnte. Hierdurch könnte der Energiespeicher deutlich verkleinert werden. Abb. 16 zeigt den zeitlichen Verlauf des Ladezustands eines nur 120 kWh großen Energiespeichers, für die Außentemperaturen von 15 °C und 40 °C jeweils im Schatten. Es wurde bei den Simulationen unterstellt, dass bei jedem längeren Halt nachgeladen wird.

Es wird deutlich, dass die Klimatisierung des Fahrerarbeitsplatzes bei der Beurteilung der Energiespeichergröße keinerlei Einfluss mehr hat, da die beiden Kurven nahezu deckungsgleich verlaufen. Bei jedem längeren Halt am Hauptbahnhof konnte der Energiespeicher vollständig aufgeladen werden. Um die Betriebsabläufe an der Haltestelle hinsichtlich eines Betriebs von mehreren Elektrobussen in Kombination mit nur einer Ladestation zu optimieren, könnte der Nachladevorgang auf eine längere Pause während des Einsatztages verschoben werden.

Ein elektrischer Fahrbetrieb auf der Linie 2 bietet sich beim derzeitigen Fahrplan und der idealen Lage einer Ladestation am Hauptbahnhof an. Auch mit einem relativ kleinen Energiespeicher und bei gelegentlichem Nachladen steht noch ausreichend Reserve bereit, um einen sicheren Fahrbetrieb, auch bei Besonderheiten im Betriebsablauf, zu gewährleisten. Durch die zentrale Lage der Nachladestation sowie deren Anbindung zu weiteren Linien, erscheint die Erweiterung des elektrischen Fahrens auf die anderen Linien praktisch möglich.

Bei der Wahl der Energiespeichergröße ist entscheidend, wie oft das Fahrzeug die Möglichkeit des Nachladens bekommt.

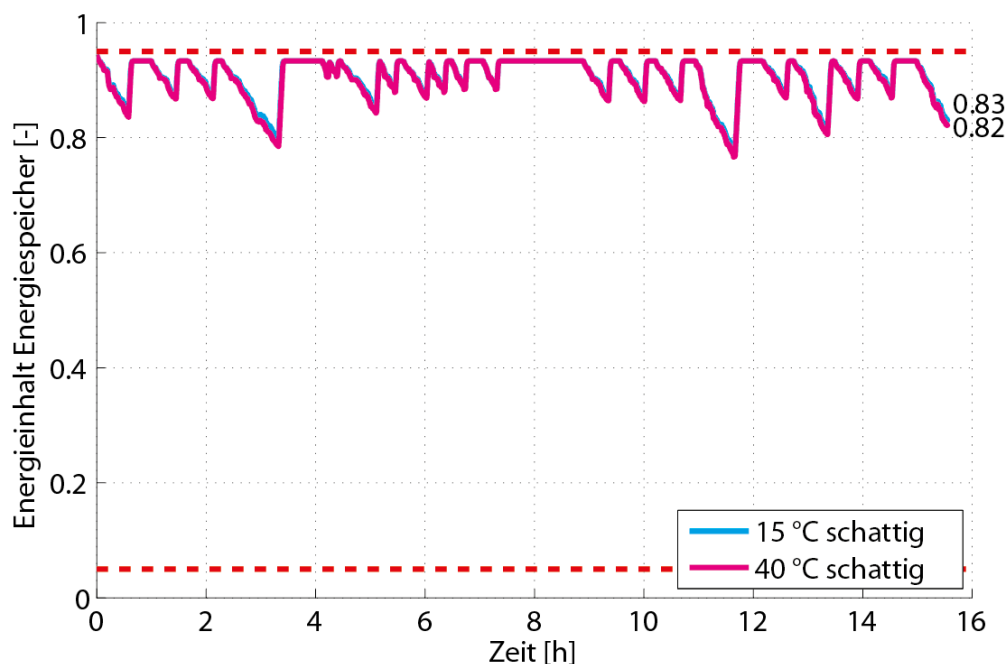


Abb. 16 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 15 und 40 °C, Schatten mit Nachladung in Eisenach

Der Energiebedarf auf der Linie 2 in Eisenach liegt bei Verwendung eines Energiespeichers von kleiner gleich 120 kWh und einer Außentemperatur von 15 °C bei unter 1,21 kWh/km.

Durch die Klimatisierung des Fahrerarbeitsplatzes steigt der Bedarf bei 40 °C auf in Summe 1,34 kWh/km (vgl. Tabelle 04).

.....
Datenerfassung und Simulation
.....

Außentemperatur	15 °C	40 °C schattig	40 °C sonnig
empf. Speichergröße [kWh]	<120	<120	<120
Traktion [kWh/km]	<0,78	<0,77	<0,77
Klimatisierung [kWh/km]	0,00	0,00 *	0,00 *
Nebenaggregate [kWh/km]	0,27	0,42 *	0,42 *
Verluste Energiespeicher [kWh/km]	0,15	0,15	0,15
Gesamt [kWh/km]	<1,21	<1,34	<1,34

Tabelle 04 empfohlene Speichergröße sowie spez. Energiebedarf mit Nachladung in Eisenach

2.2.3 Mühlhausen Linie 5

Messungen des Fahrprofils

- Datum: 13.11.2014, Donnerstag
- Einsatzzeit: 04:48 - 17:43 Uhr
- Anzahl der Umläufe gem. Fahrplan: 7
- Takt: 30 min
- Wendezeit Weißes Haus gemäß FPL: 15 min

Batteriegrößen

ohne Nachladen: 220, 295, 345, 395 und 440 kWh
mit Nachladen an Hst. Weißes Haus: 120 kWh

Fahrgastzahlen am Messtag

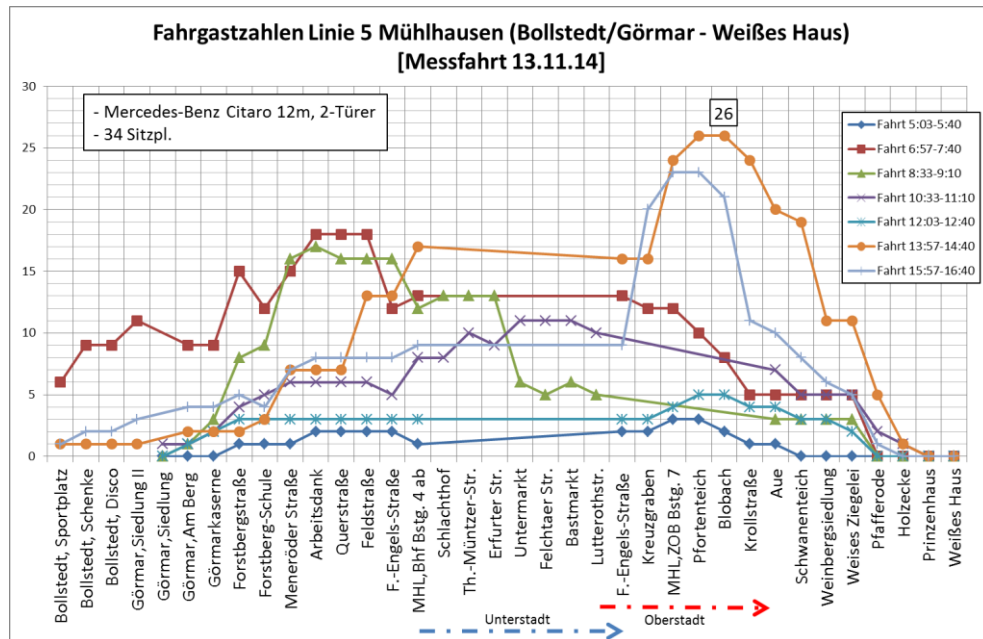


Abb. 17 Fahrgastzahlen
Linie 5 (Richtung
Bollstedt/Görmär) in
Mühlhausen vom
13.11.2014

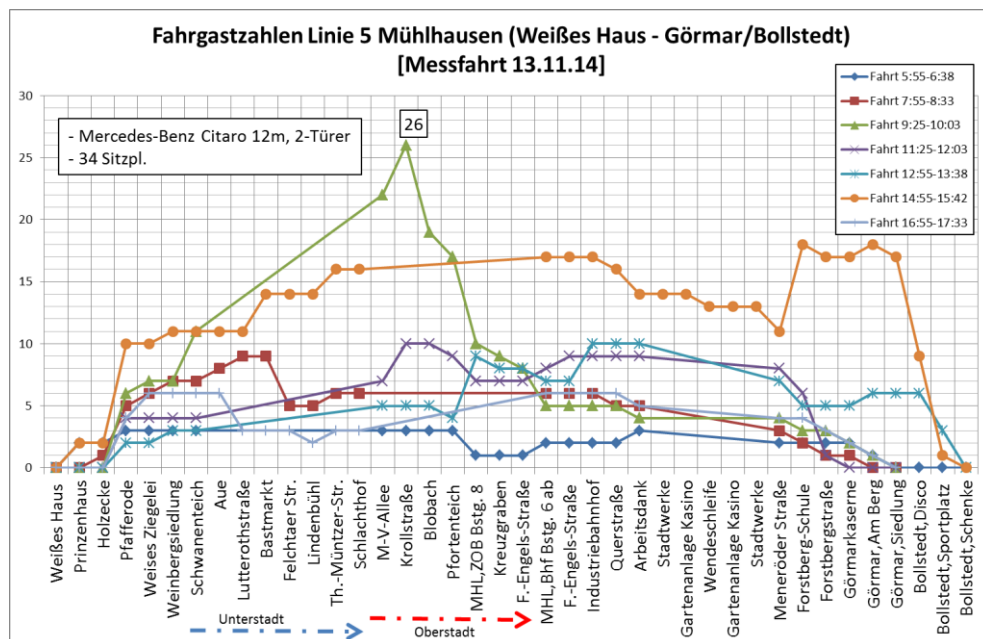


Abb. 18 Fahrgastzahlen
Linie 5 (Richtung Weißes
Haus) in Mühlhausen
vom 13.11.2014

Stadtspezifische Konfiguration

Die Fahrzeuge in Mühlhausen sind zur Fahrgastraumklimatisierung mit den sparsamen und am 24 V-Bordnetz angeschlossenen Klimaanlage Citysphere ausgestattet. Als Innenraumtemperatur wurden 25 °C vorgegeben.

Energiebedarf ohne Nachladung während des Einsatztags

Datenerfassung und Simulation

Abb. 19 bis Abb. 21 zeigen die zeitlichen Verläufe des Ladezustands der unterschiedlich groß dimensionierten Energiespeicher (220 bis 440 kWh) bei Außentemperaturen zwischen 15 und 40 °C. Zum Absolvieren des 220 km langen Tagesumlaufs, wird bei 15 °C ein Energiespeicher mit einem Energieinhalt von 345 kWh benötigt. Am Tagesende beträgt der Energieinhalt damit noch 14 Prozent. Bei 40 °C im Schatten, könnte der Tagesumlauf mit diesem Energiespeicher zwar ebenfalls erreicht werden, ist aber mit einem Ladezustand von sechs Prozent nahezu komplett entladen. Die durch die Sonnenstrahlung in das Fahrzeug zusätzlich eingebrachte Wärme, würde zu einer größeren Kühlleistung der Klimaanlage führen, sodass erst ein Energiespeicher mit 395 kWh einen kompletten Tagesumlauf erlauben würde. Die notwendigen Energiespeichergößen sind beim derzeitigen Stand der Technik für 12 m-Solofahrzeuge als zu schwer anzusehen.

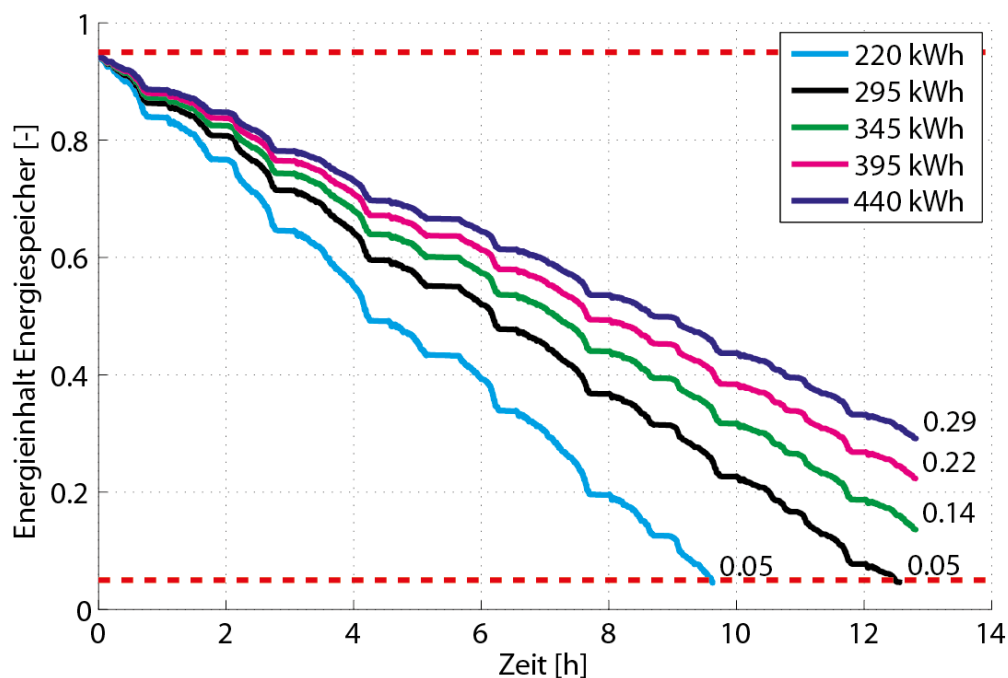


Abb. 19 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 15 °C, im Schatten und ohne Nachladung in Mühlhausen

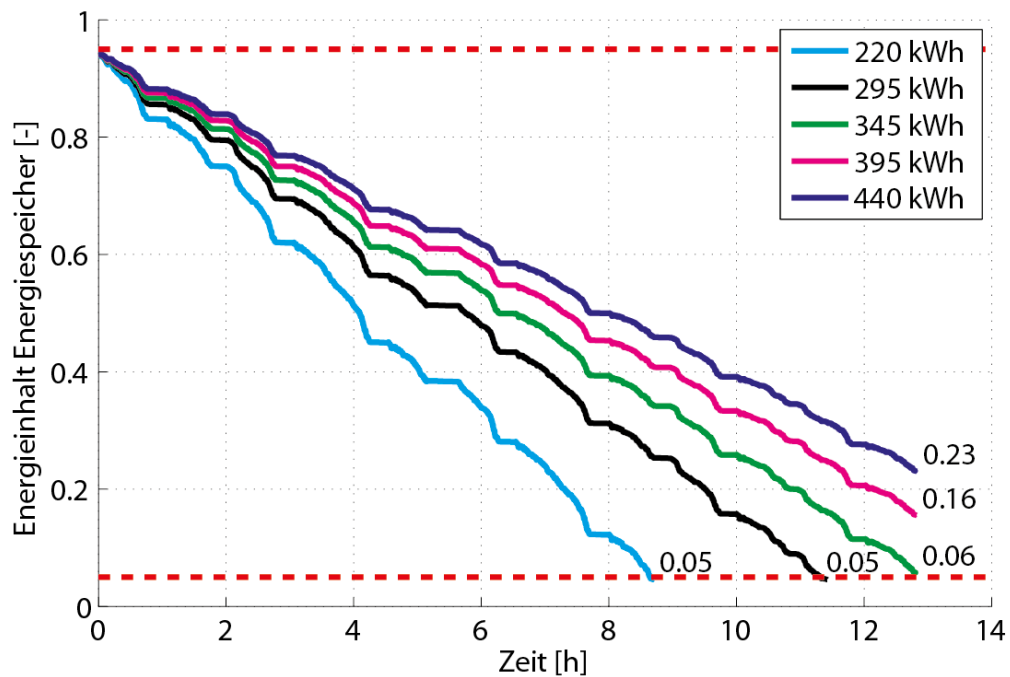


Abb. 20 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 40 °C, im Schatten und ohne Nachladung in Mühlhausen

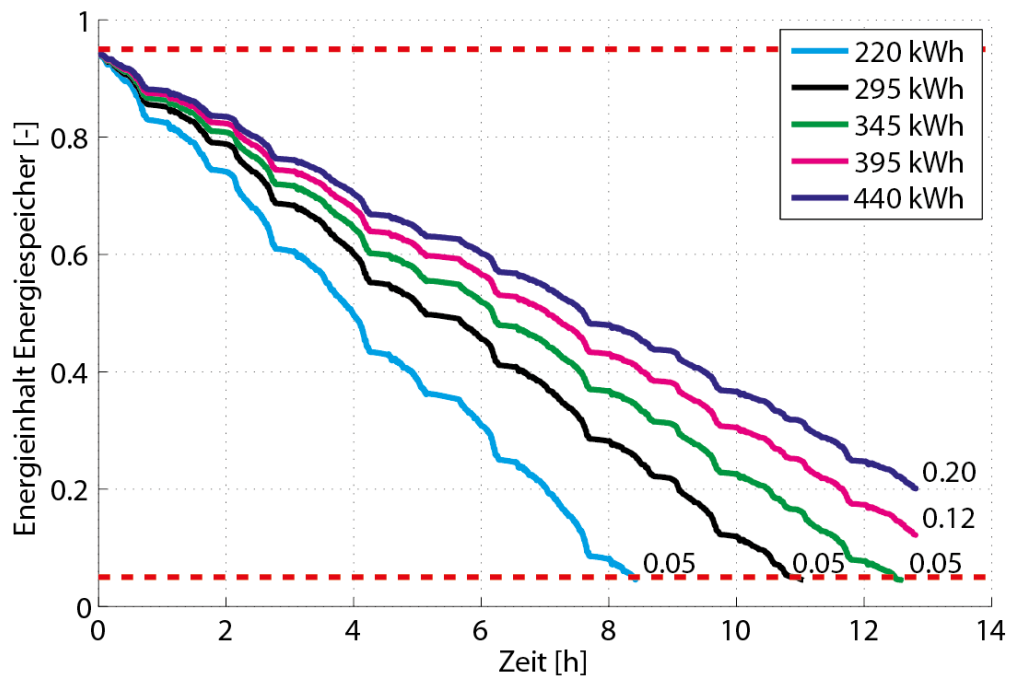


Abb. 21 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 40 °C, direkter Sonneneinstrahlung und ohne Nachladung in Mühlhausen

Der spezifische Gesamtenergiebedarf liegt zwischen 1,30 und 1,58 kWh/km. Der Traktionsenergiebedarf liegt aufgrund der hohen Systemmasse des großen Energiespeichers auf einem hohen Niveau.

Außentemperatur	15 °C	40 °C schat- tig	40 °C sonnig
empf. Speichergröße [kWh]	345	395	395
Traktion [kWh/km]	0,95	0,96	0,96
Klimatisierung [kWh/km]	0,00	0,12	0,18
Nebenaggregate [kWh/km]	0,20	0,26	0,26
Verluste Energiespeicher [kWh/km]	0,15	0,16	0,16
Gesamt [kWh/km]	1,30	1,50	1,56

Tabelle 05 empfohlene Speichergröße sowie spez. Energiebedarf ohne Nachladung in Mühlhausen

Energiebedarf mit Nachladung während des Einsatztags

Die Linie 5 in Mühlhausen hat am westlichen Endpunkt die Haltestelle „Weißes Haus“, welche bei jedem Umlauf angefahren wird. In der Gegenrichtung wird zwar bei jedem Umlauf am Endpunkt Görmar gehalten, vereinzelt wird darüber hinaus aber, als Weiterführung der Strecke, der Endpunkt Bollstedt angefahren. Die Wendezeiten am Endpunkt „Weißes Haus“ betragen konstant 15 Minuten, was den Punkt als Ladepunkt zusätzlich prädestiniert.

In den folgenden Abbildungen (Abb. 22 bis Abb. 24) ist für die drei Temperaturvorgaben jeweils der Tagesverlauf des Ladezustands des Energiespeichers für zwei Speichergrößen (120 und 220 kWh) aufgetragen. Bei einer Außentemperatur von 15 °C wird bei Nutzung eines Energiespeichers mit 220 kWh ein Ladezustand von 70 Prozent nie unterschritten. Bei einem Energiespeicher mit 120 kWh werden Minimalwerte von 60 Prozent erreicht.

Die Kurvenverläufe des Ladezustands des Energiespeichers werden bei höheren Außentemperaturen und bei zusätzlicher Sonneneinstrahlung nur unwesentlich gestreckt, sodass bei 220 kWh im Minimum weiterhin 70 Prozent nicht unterschritten werden. Bei einem 120 kWh großen Energiespeicher stellen 55 Prozent das Minimum dar. Es bliebe, selbst bei der Nutzung eines kleinen Energiespeichers, ausreichend Reserve, um bei Ausfall einer Wendezeit zwei Umläufe hintereinander absolvieren zu können bzw. auf Störungen im Betriebsablauf mit einer ausreichenden Flexibilität reagieren zu können.

Durch die fahrplanseitigen ausreichenden Wendezeiten sowie dem Linienverlauf ist ein elektrischer Fahrbetrieb bei Verwendung eines Nachladesystems sehr gut möglich. Aufgrund der Lage der Ladestation an einem Linienende, ohne Schnittpunkt mit anderen Linien, kann die Ladestation ausschließlich nur für die Fahrzeuge der Linie 5 genutzt werden und bietet im derzeitigen Linienplan kein darüber hinausgehendes Potential.

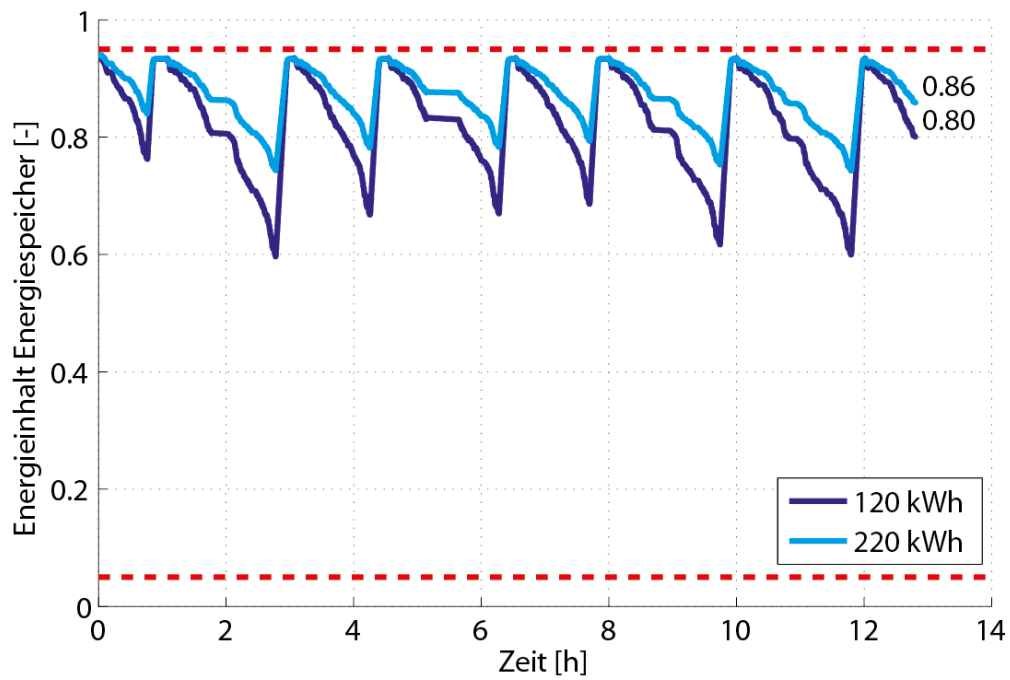


Abb. 22 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 15 °C, im Schatten und mit Nachladung in Mühlhausen

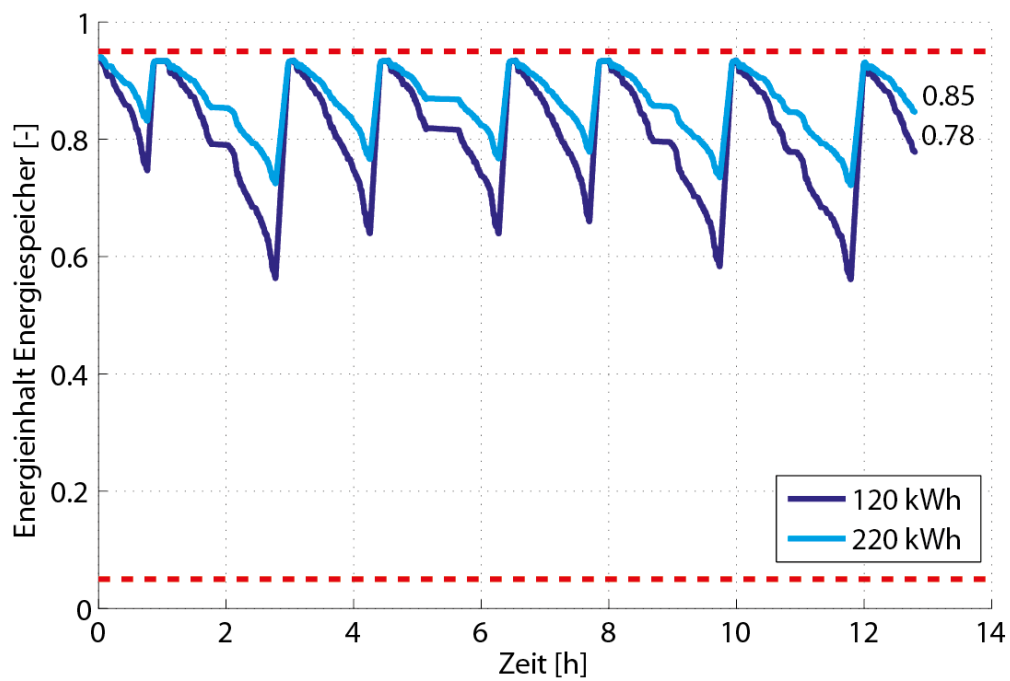


Abb. 23 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 40 °C, im Schatten und mit Nachladung in Mühlhausen

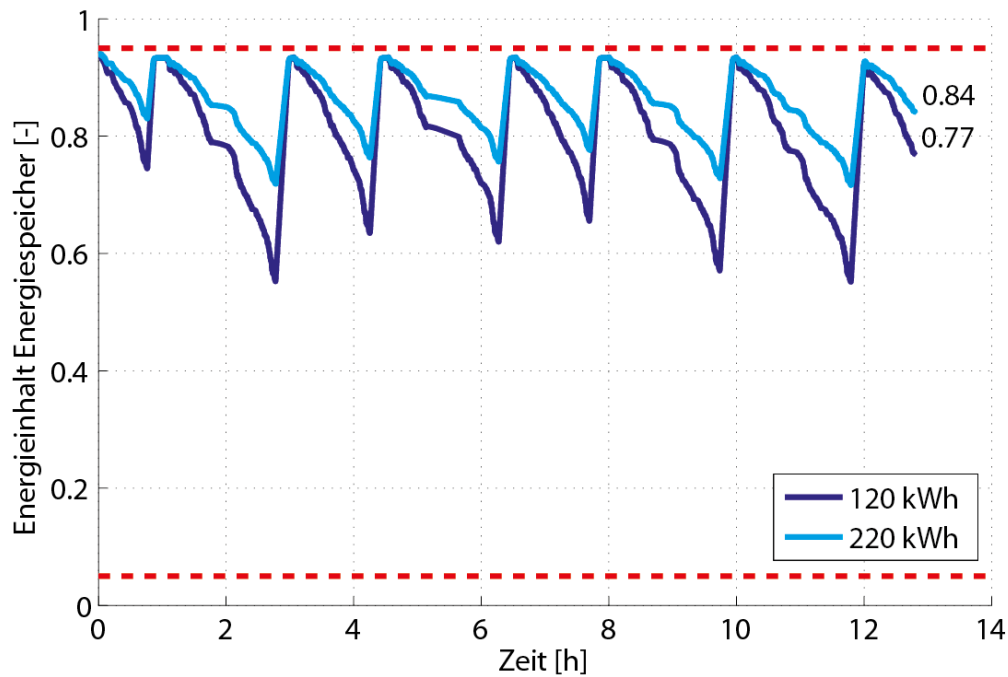


Abb. 24 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 40 °C, direkter Sonneneinstrahlung und mit Nachladung in Mühlhausen

Tabelle 06 zeigt die spezifischen Energieverbräuche für Traktion, Klimatisierung, den Betrieb der Nebenaggregate sowie die Energiespeicherverluste bei Verwendung eines Energiespeichers mit einem Energieinhalt von 120 kWh und bei Nachladung am Endpunkt „Weißes Haus“. Trotz der Klimatisierung des Fahrgastinnenraums und den extremen Vorgaben der Umwelteinflüsse, ist ein sicherer elektrischer Fahrbetrieb in Mühlhausen auf der Linie 5 darstellbar.

Außentemperatur	15 °C	40 °C schattig	40 °C sonnig
empf. Speichergröße [kWh]	120	120	120
Traktion [kWh/km]	0,86	0,84	0,84
Klimatisierung [kWh/km]	0,00	0,12	0,18
Nebenaggregate [kWh/km]	0,21	0,26	0,27
Verluste Energiespeicher [kWh/km]	0,18	0,19	0,19
Gesamt [kWh/km]	1,25	1,41	1,48

Tabelle 06 empfohlene Speichergröße sowie spez. Energiebedarf mit Nachladung in Mühlhausen

Messungen des Fahrprofils

- Datum: 11.11.2014, Dienstag
- Einsatzzeit: 04:45 - 22:10 Uhr
- Anzahl der Umläufe gem. Fahrplan: 10
- Takt Hauptverkehrszeit: 20 min
- Takt Nebenverkehrszeit: 30/60 min
- Wendezeit Kommerstraße gemäß FPL: 9 min

Fahrgastzahlen am Messtag

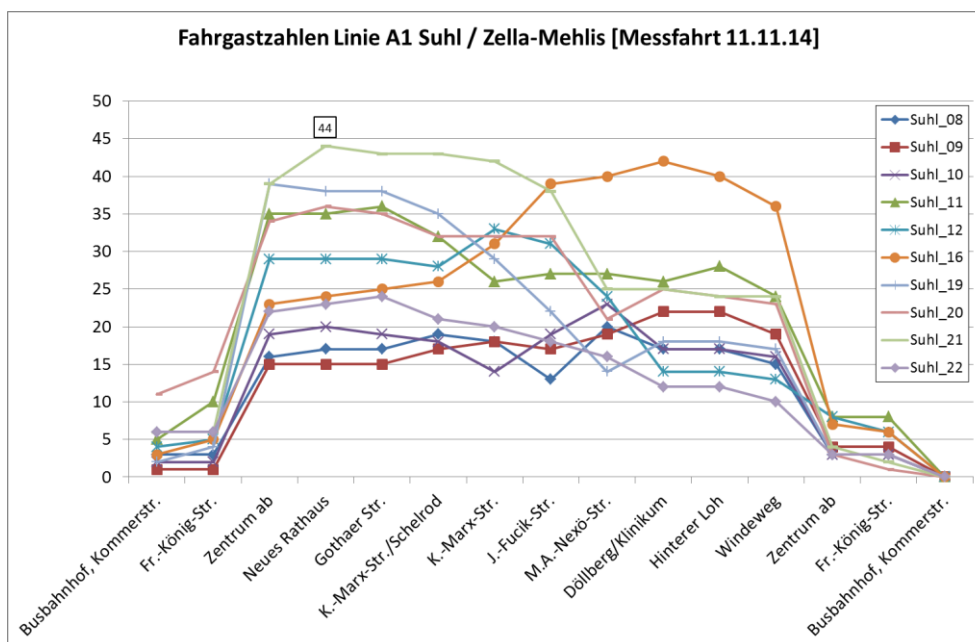


Abb. 25 Fahrgastzahlen
Linie A1 in Suhl / Zella-
Mehlis vom 11.11.2014

Stadtspezifische Konfiguration

In den Fahrzeugen der städtischen Nahverkehrsgesellschaft mbH Suhl / Zella-Mehlis werden keine Systeme zur Klimatisierung des Fahrgastinnenraums oder des Fahrerarbeitsplatzes eingesetzt. Auf den Gesamtenergieverbrauch ist daher keine getrennte Simulation zwischen 40 °C im Schatten und bei voller direkter Sonneneinstrahlung notwendig – die Werte sind identisch.

Energiebedarf ohne Nachladung während des Einsatztags

In Suhl / Zella-Mehlis werden die Fahrzeuge nicht linienrein eingesetzt, sodass während des Messtages eine Vielzahl von Linien befahren wurde. Mit einer Streckenlänge von über 260 km und einem teils starken Höhenunterschied werden große Anforderungen an einen möglichen Energiespeicher gestellt. Sowohl bei 15 °C als auch bei 40 °C müsste ein Energiespeicher mit einem Energieinhalt von 440 kWh genutzt werden, um den kompletten Tagesumlauf, mit ausreichend Reserve, bedienen zu können. Vor allem der lange und mit

einer hohen Durchschnittsgeschwindigkeit befahrene Umlauf vom Busbahnhof nach Zella-Mehlis erfordert viel Energie.

Datenerfassung und Simulation

Wie bereits bei den vorhergehenden Städten erläutert, ist ein derartiges System Aufgrund der Masse und der Anschaffungskosten nicht sinnvoll.

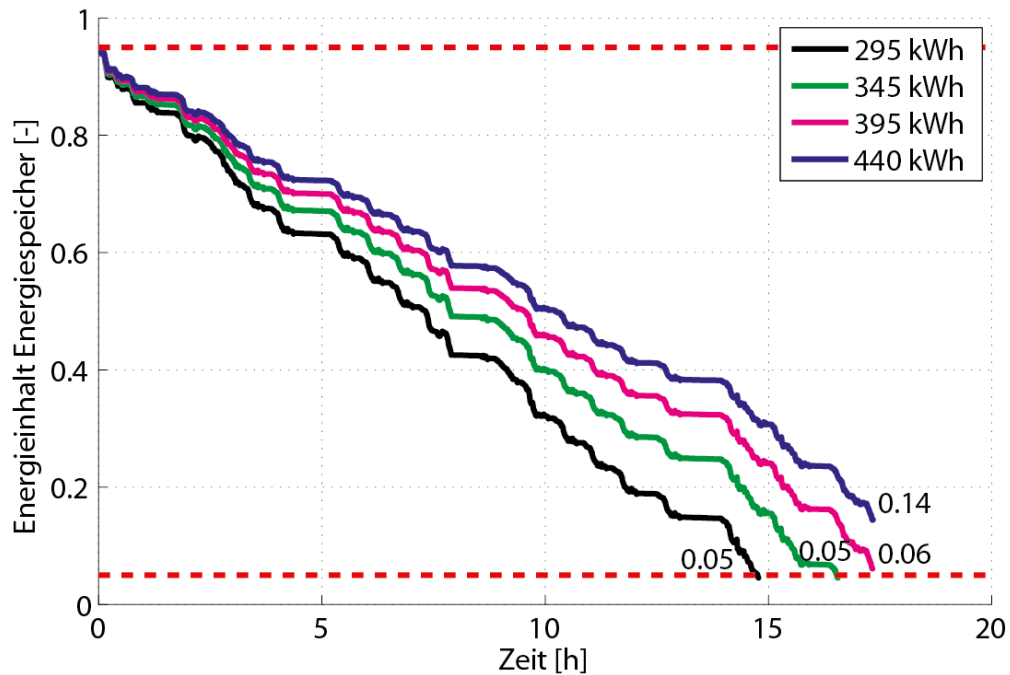


Abb. 26 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 15 °C, im Schatten und ohne Nachladung in Suhl / Zella-Mehlis

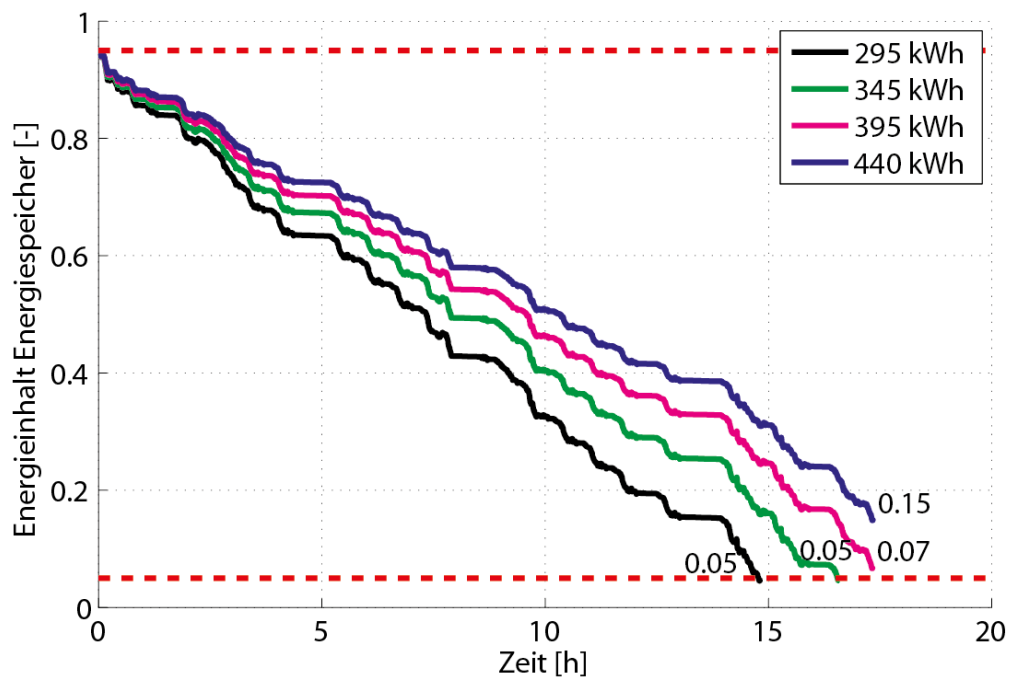


Abb. 27 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 40 °C, im Schatten und ohne Nachladung in Suhl / Zella-Mehlis

Der ermittelte spezifische Gesamtenergieverbrauch von 1,39 bzw. 1,41 kWh/km (vgl. Tabelle 07) wird maßgeblich für die Traktion aufgebracht. Die hohen Verbräuche von 1 bzw. 1,02 kWh/km sind auf die große Fahrzeugmasse (Masse des Energiespeicher + Zuladung an Fahrgästen) zurückzuführen. Für die Klimatisierung des Fahrgastinnenraums wird, aufgrund des Fehlens entsprechender Aggregate, auch bei 40 °C keine Energie benötigt.

Außentemperatur	15 °C	40 °C schattig
empf. Speichergröße [kWh]	440	440
Traktion [kWh/km]	1,02	1,00
Klimatisierung [kWh/km]	0,00	0,00
Nebenaggregate [kWh/km]	0,21	0,25
Verluste Energiespeicher [kWh/km]	0,16	0,16
Gesamt [kWh/km]	1,39	1,41

Tabelle 07 empfohlene Speichergröße sowie spez. Energiebedarf ohne Nachladung in Suhl / Zella-Mehlis

Energiebedarf mit Nachladung während des Einsatztags

In den Vormittagsstunden werden bei dem gemessenen Umlauf im Wesentlichen andere Linien als die Linie A1 befahren; erst nach drei Stunden startet die erste Fahrt auf dieser Linie. Der Busbahnhof „Kommerstraße“ wird mit nur wenigen Ausnahmen fast immer angefahren, die Haltezeiten können dabei stark variieren. Durch die häufigen Halte und der zentralen Lage im Liniennetz, wäre eine Ladestation an dieser Stelle äußerst günstig positioniert.

Die Kurvenverläufe in Abb. 28 und Abb. 29 zeigen die zeitlichen Verläufe des Ladezustands des Energiespeichers. Bei Verwendung eines 220 kWh großen Energiespeichers und bei einer Nachladung bei jedem Besuch des Busbahnhofs, sinkt der Ladezustand jeweils auf minimal 69 Prozent. Bei einem 120 kWh Energiespeicher würde der niedrigste Ladezustand 50 Prozent betragen. Das Minimum wird jeweils nach der zweimaligen Fahrt von Suhl nach Zella-Mehlis und zurück erreicht. In der sich daran anschließenden Pause von ca. 25 Minuten im Busbahnhof, könnten die Energiespeicher wieder komplett aufgeladen werden.

Die Kurvenverläufe zeigen, dass nicht nach jeder Linienfahrt eine Nachladung notwendig ist. So könnten beispielsweise die drei Fahrten auf der Linie A1 und der anschließenden Fahrt auf der Linie F (9:53 bis 12:40 Uhr) ohne Nachladung befahren werden, da bei der anschließenden 40-minütigen Pause, genügend Zeit bestehen würde, um den Energiespeicher wieder komplett zu laden. Entsprechend gut könnte bei geschickter Planung eine Ladestation von mehreren Fahrzeugen genutzt werden.

Durch die zentrale Lage, den günstigen Ladezeiten sowie dem niedrigen Energiebedarf der Fahrzeuge erscheint eine Erweiterung auf die anderen Linien des Netzes gegeben. Dies ist aber davon abhängig, ob die anderen Fahrzeugumläufe ähnlich dem gemessenen Umlauf sind. Sollte dies der Fall sein, könnte möglicherweise bereits mit einer sehr geringen Anzahl an Ladepunkten das komplette Liniennetz mit elektrisch betriebenen Fahrzeugen bedient werden.

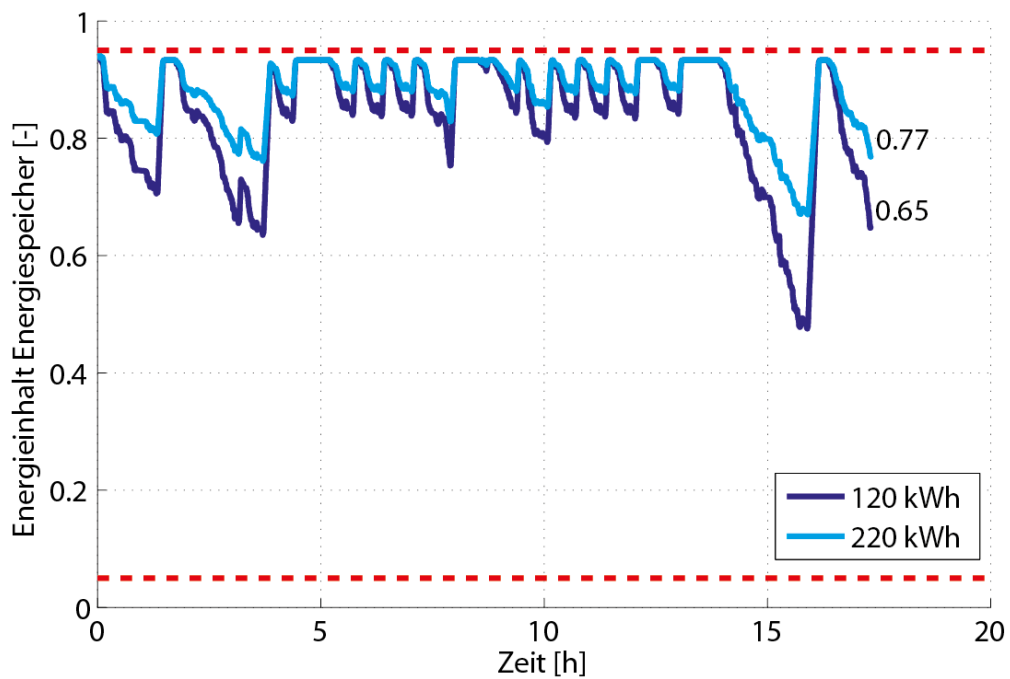


Abb. 28 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 15 °C, im Schatten und mit Nachladung in Suhl / Zella-Mehlis

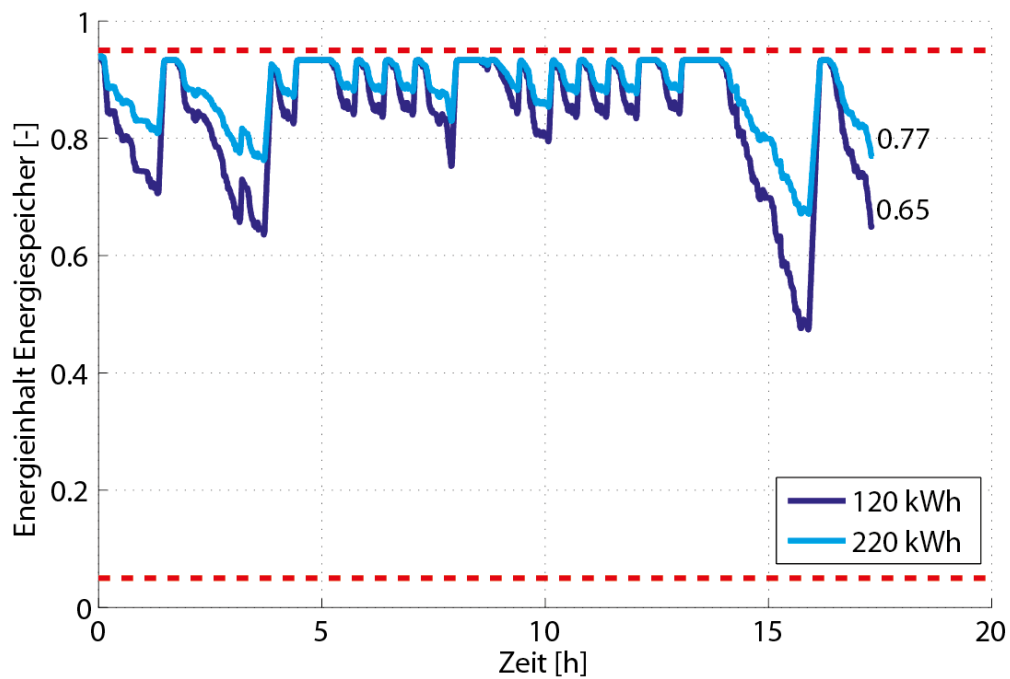


Abb. 29 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 40 °C, im Schatten und mit Nachladung in Suhl / Zella-Mehlis

Tabelle 08 zeigt zusammenfassend die spezifischen Energieverbräuche bei einer Energiespeichergröße von 120 kWh.

Außentemperatur	15 °C	40 °C schattig
empf. Speichergröße [kWh]	120	120
Traktion [kWh/km]	0,87	0,86
Klimatisierung [kWh/km]	0,00	0,00
Nebenaggregate [kWh/km]	0,21	0,25
Verluste Energiespeicher [kWh/km]	0,18	0,18
Gesamt [kWh/km]	1,26	1,29

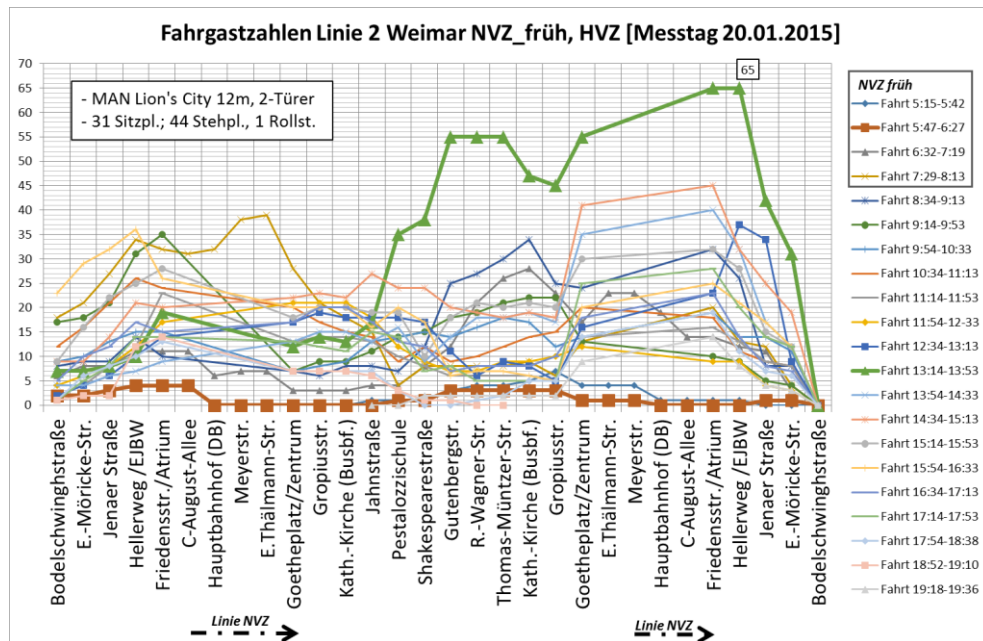
Tabelle 08 empfohlene Speichergröße sowie spez. Energiebedarf mit Nachladung in Suhl / Zella-Mehlis

2.2.5 Weimar Linie 2

Messungen des Fahrprofils

- Datum: 20.01.2015, Dienstag
- Einsatzzeit: 05:09 - 23:20 Uhr
- Anzahl der Umläufe gem. Fahrplan: 25
- Takt Hauptverkehrszeit: 20 min
- Takt Nebenverkehrszeit: 15/30 min
- Wendezeit Shakespearestraße gemäß FPL: 4 min

Fahrgastzahlen am Messtag



Datenerfassung und Simulation

Abb. 30 Fahrgastzahlen
Linie 2 in Weimar vom
20.01.2015

Stadtspezifische Konfiguration

Für die Klimatisierung des Fahrgastinnenraums werden in Weimar Vollklimaanlagen mit einer Kälteleistung von 32 kW eingesetzt. Bei den Simulationen wurde hierzu die gleiche Konfiguration wie bei den Simulationen in Altenburg gewählt. Als Fahrgastrauminnen-temperatur wurden von den Verkehrsbetrieben 25 °C vorgegeben.

Energiebedarf ohne Nachladung während des Einsatztags

Der Umlauf 202 verkehrt linienrein auf der Linie 2 in Weimar und bedient die Endpunkte „Bodelschwingstraße“ und „Shakespearestraße“. Während des Messumlaufs wurde die Strecke insgesamt 25-mal befahren. Abb. 31 sowie Abb. 32 zeigen die zeitlichen Verläufe des Ladezustands der berechneten Energiespeichergrößen. Bei einer Außentemperatur von 15 °C war der Umlauf, mit nahezu keiner Reserve, mit einem 395 kWh großen Energiespeicher absolvierbar. Aus Betreibersicht, bieten die verbleibenden acht Prozent Ladezustand aber zu wenig Reserve. Erst ein Energiespeicher mit 440 kWh Energieinhalt weist entsprechende Reserven auf.

Durch die Innenraumklimatisierung auf 25 °C steigt der Gesamtenergiebedarf derart an, dass auch mit einem 440 kWh großen Energiespeicher der Tagesumlauf, bei 40 °C Außentemperatur und ohne Sonneneinstrahlung auf das Fahrzeug, nicht bis zum Ende gefahren werden könnte.

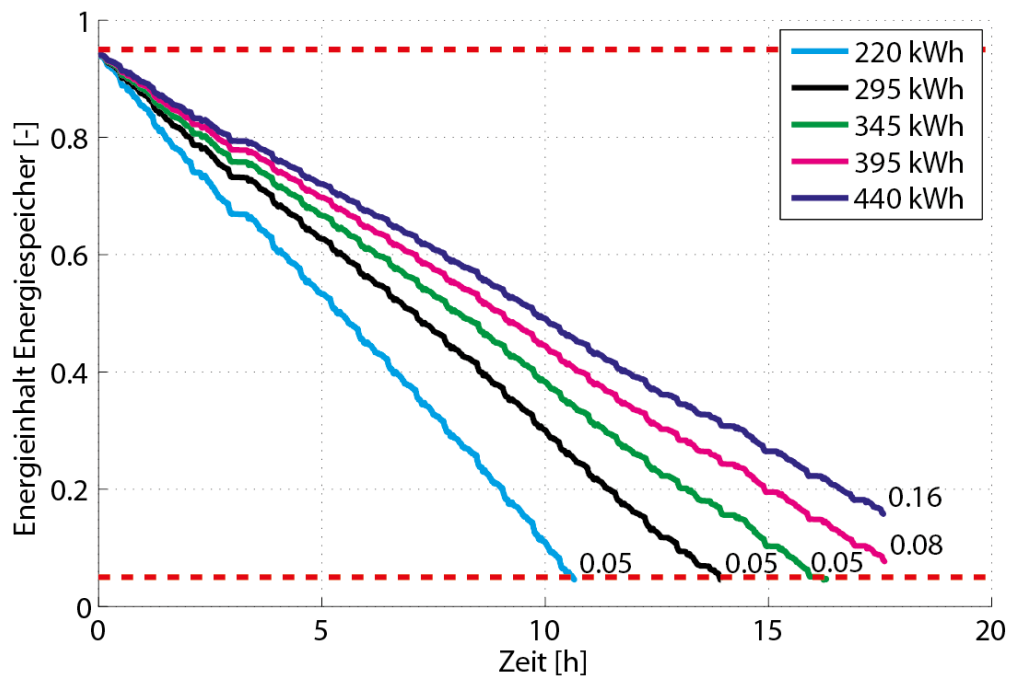


Abb. 31 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 15 °C, im Schatten und ohne Nachladung in Weimar

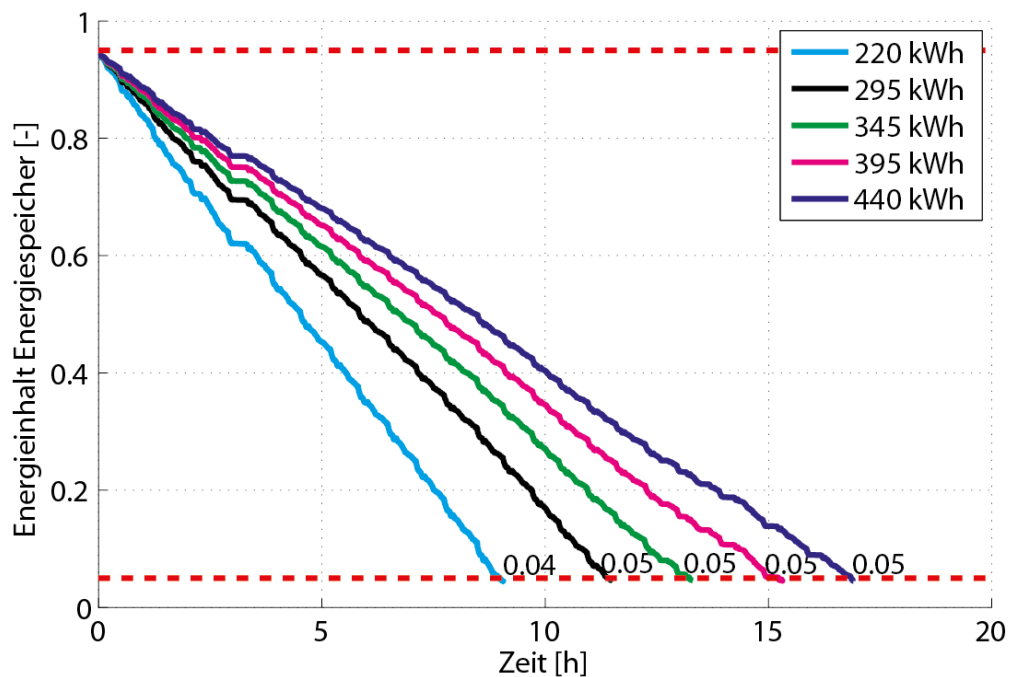


Abb. 32 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 40 °C, im Schatten und ohne Nachladung in Weimar

Aufgrund der hohen Masse des Energiespeichers wird eine beachtliche Energiemenge von 0,99 kWh/km allein für die Traktion des Fahrzeugs benötigt. Insgesamt summiert sich der spezifische Energieverbrauch auf einen Wert von 1,45 kWh/km bei einer Außentemperatur von 15 °C. Für die 40 °C-Simulationen konnten keine Ergebnisse gewonnen werden, da kein vollständiger Tagesumlauf mit den gewählten Energiespeichern erreicht werden konnte.

Tabelle 09 empfohlene
Speichergröße sowie
spez. Energiebedarf
ohne Nachladung in
Weimar

Außentemperatur	15 °C	40 °C schat- tig	40 °C sonnig
empf. Speichergröße [kWh]	440	k. A.	k. A.
Traktion [kWh/km]	0,99	k. A.	k. A.
Klimatisierung [kWh/km]	0,00	k. A.	k. A.
Nebenaggregate [kWh/km]	0,30	k. A.	k. A.
Verluste Energiespeicher [kWh/km]	0,16	k. A.	k. A.
Gesamt [kWh/km]	1,45	k. A.	k. A.

Energiebedarf mit Nachladung während des Einsatztags

Der gemessene Umlaufplan wurde auf eine Vernetzung mit den anderen Linien von Weimar an der Haltestelle „Goetheplatz/Zentrum“ optimiert. Hierdurch ergeben sich relativ kurze Halte an den Endpunkten. Am Endpunkt „Bodelschwinghstraße“ steht zum Wenden gemäß Umlaufplan nur eine Minute zur Verfügung. In der Gegenrichtung an der Haltestelle „Shakespearestraße“ sind es vier Minuten. Daher wurde als Standort einer potentiellen Ladestation der Endpunkt „Shakespearestraße“ gewählt.

Die im Tagesverlauf abfallenden Kurvenverläufe in Abb. 33 bis Abb. 35 zeigen, dass die Energiemenge, welche während der Haltephase am Endpunkt nachgeladen werden kann, kleiner ist als die Energiemenge, welche auf der Fahrt verbraucht wurde. Erst bei einem fahrplanmäßigen längeren Halt (von 18:38 bis 18:52 Uhr) konnte eine größere Energiemenge nachgeladen werden. Die fahrplanmäßigen Haltezeiten wurden durch die Verkehrssituation und dem Betriebsablauf nie erreicht.

Bei einer Außentemperatur von 15 °C wäre ein Betrieb mit ausreichender Sicherheit erst bei einem Energiespeicher mit einem Energieinhalt von größer 220 kWh gewährleistet, da am Ende des Tagesumlauf lediglich ein Ladezustand von 11 Prozent vorhanden wäre. Durch die Vollklimatisierung des Fahrgastinnenraums steigt der Energiebedarf deutlich an. Selbst ein Energiespeicher mit 345 kWh Energieinhalt wird nahezu komplett entladen.

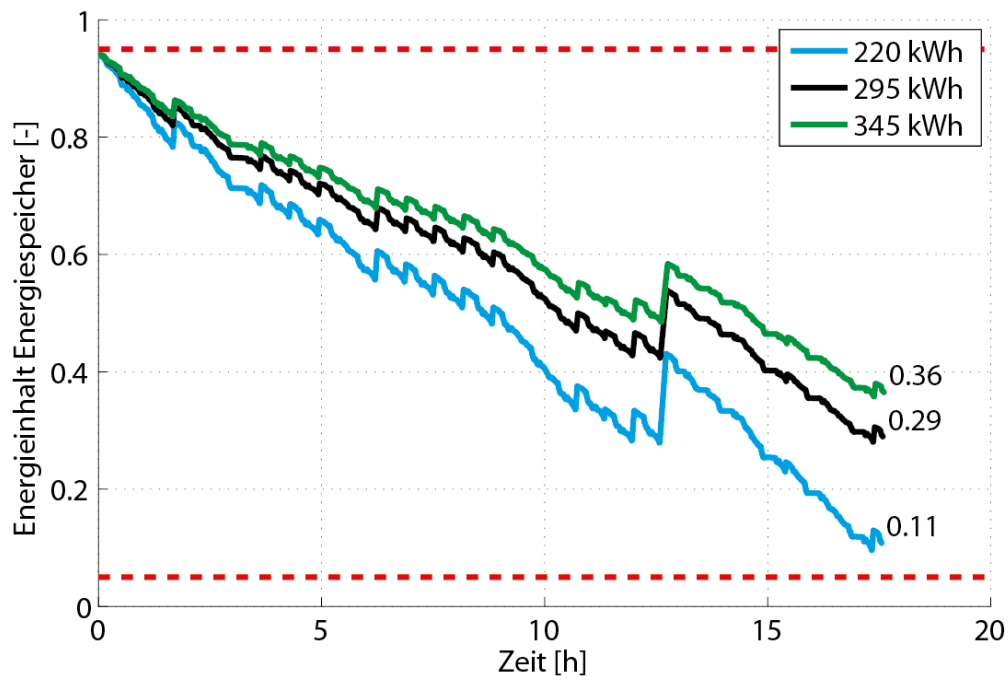


Abb. 33 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 15 °C, im Schatten und mit Nachladung in Weimar

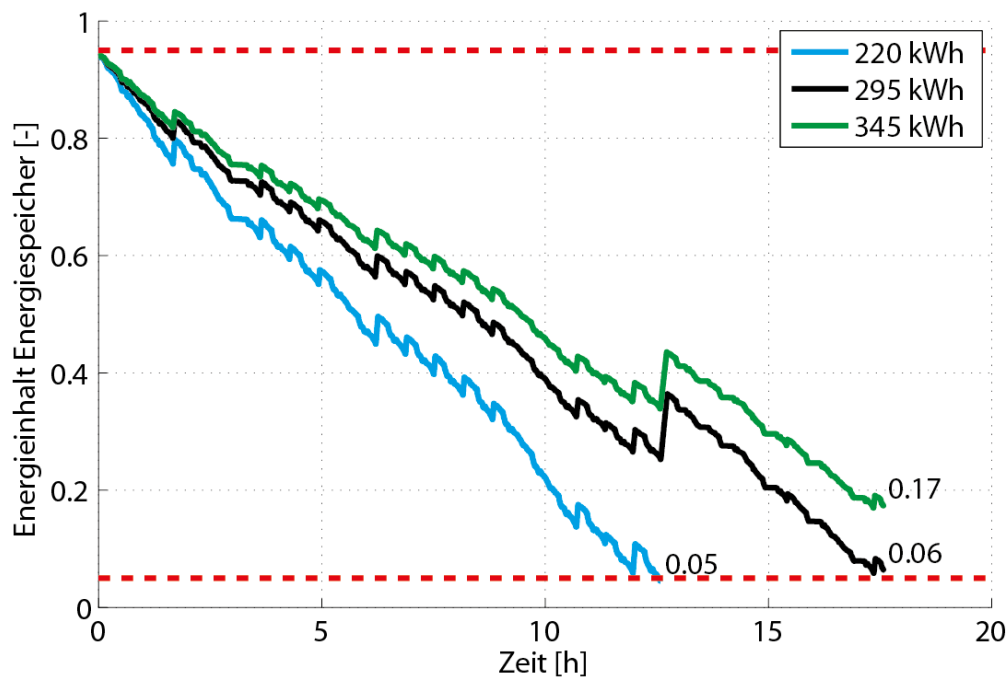


Abb. 34 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 40 °C, im Schatten und mit Nachladung in Weimar

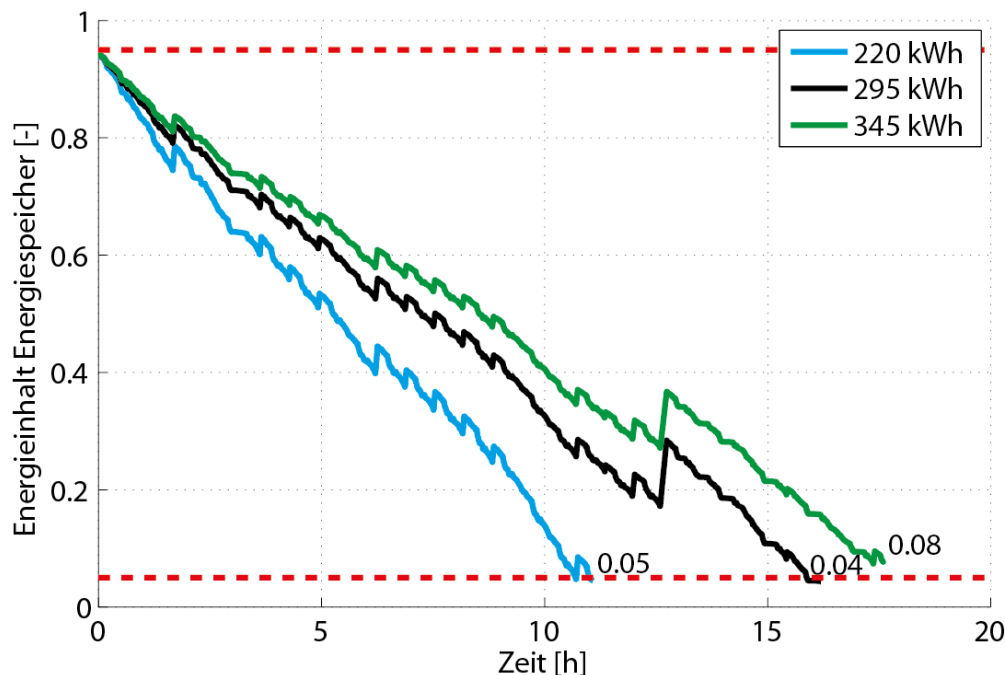


Abb. 35 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 40 °C, direkter Sonneneinstrahlung und mit Nachladung in Weimar

Die in Tabelle 10 aufgeführten spezifischen Energieverbräuche verdeutlichen den enormen Energiebedarf einer Vollklimatisierung des Fahrgastinnenraums bei extremen Vorgaben der Umweltbedingungen. Bei 40 °C Außentemperatur und direkter Sonneneinstrahlung sowie einem Energiespeicher von 345 kWh wird eine Energiemenge von insgesamt 1,86 kWh/km verbraucht.

Außentemperatur	15 °C	40 °C schattig	40 °C sonnig
empf. Speichergröße [kWh]	295	345	>345
Traktion [kWh/km]	0,92	0,93	>0,93
Klimatisierung [kWh/km]	0,00	0,26	0,40
Nebenaggregate [kWh/km]	0,29	0,33	0,34
Verluste Energiespeicher [kWh/km]	0,16	0,18	0,19
Gesamt [kWh/km]	1,37	1,70	>1,86

Tabelle 10 empfohlene Speichergröße sowie spez. Energiebedarf mit Nachladung in Weimar

Durch die Kombination einer langen Wegstrecke, mit einem hohen Energiebedarf für die Vollklimatisierung des Fahrgastinnenraums und einer sehr kurzen Ladezeit von unter drei Minuten am Endpunkt „Shakespearestraße“ ist selbst bei Verwendung einer leistungsstarken 250 kW Ladestation ein elektrischer Busbetrieb mit den derzeitigen Fahrzeugumläufen nicht darstellbar.

Um einen Linienbetrieb mit elektrisch angetriebenen Bussen in Weimar auf der Linie 2 dennoch zu ermöglichen, ist die komplette Überarbeitung des Fahrplans notwendig, um die Ladezeiten an den Endpunkten garantieren zu können.

Variante mit anderer Ladehaltestelle

Der Simulationsablauf wurde für die Bestimmung der notwendigen Ladezeiten an einem der Endpunkte wie folgt überarbeitet:

- Die für die Simulationen gemessenen Geschwindigkeits-Weg-Profile während der Linienfahrt wurden unverändert übernommen.
- Der Fahrzeugumlauf 202 wurde vom Beginn um 5:09 bis 8:51 Uhr sowie von 18:20 Uhr bis zum Ende 23:30 Uhr beibehalten.
- Zwischen 8:51 und 18:20 Uhr wurden die längeren Wendezeiten am Endpunkt „Shakespearestraße“ entfernt und das Fahrzeug wurde wieder direkt auf Linienfahrt gegeben. Zusätzlich wurde bei jedem Umlauf eine Haltezeit von vier, sechs sowie acht Minuten am Endpunkt „Bodelschwinghstraße“ eingeführt, während Nachgeladen werden konnte.
- Die Haltestelle „Bodelschwinghstraße“ wurde als Ladepunkt gewählt, da der Haltestellenbereich eine einfachere Positionierung des Fahrzeugs unter einer Ladestation ermöglichen würde. Darüber hinaus bietet der Platz einen entsprechenden Bauraum für die zu errichtende Ladeinfrastruktur.

Abb. 36 zeigt das Ergebnis bei einer garantierten Wendezeit von vier Minuten sowie einer Außentemperatur von 40 °C und direkter Sonneneinstrahlung. Die Kurvenverläufe bei einer Wendezeit von sechs bzw. acht Minuten wären aus energetischer Sicht nahezu deckungsgleich, nur die Gesamtfahrzeit würde sich deutlich strecken. Der erarbeitete Tagesumlauf wäre gegenüber dem Originalumlauf 202 ca. 22 Minuten länger.

Der Ladezustand eines 220 kWh großen Energiespeichers sinkt, bei Gewährleistung einer Wendezeit von vier Minuten, nicht unter 80 Prozent, sodass auch ein kleinerer Energiespeicher durchaus verwendbar wäre. Dass die vier Minuten Wendezeiten nicht weiter verkürzt werden sollten, zeigt die zwischenzeitlich leicht fallende Kurve des Ladezustands nach Beendigung eines Ladevorgangs.

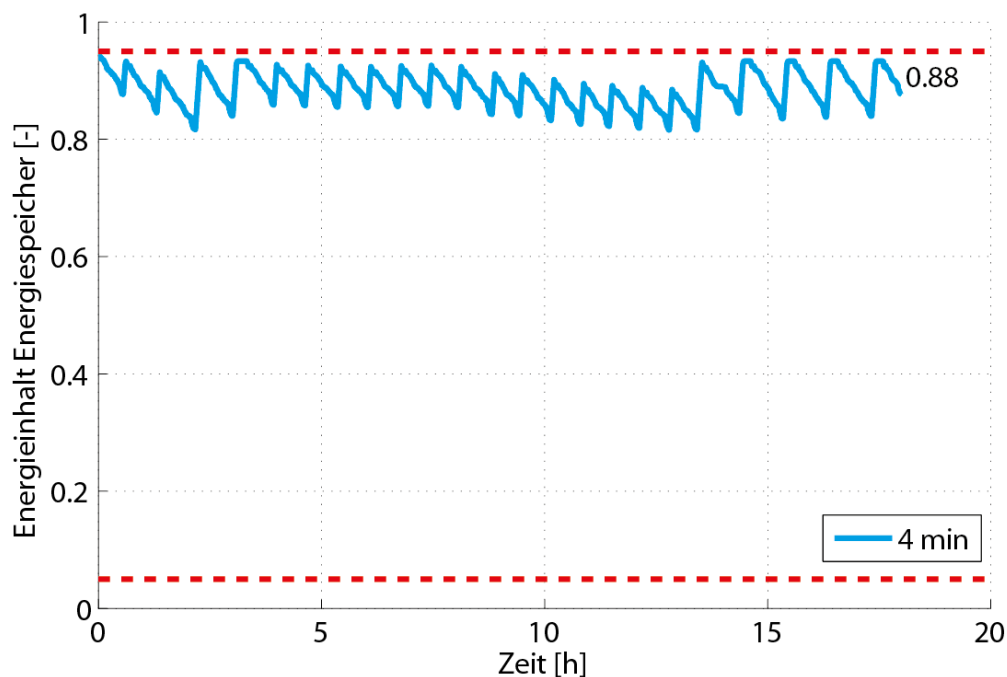


Abb. 36 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Energiespeichers bei 40 °C, direkter Sonneneinstrahlung und mit Nachladung an der Haltestelle Bodelschwinghstraße in Weimar

Tabelle 11 zeigt die spezifischen Energieverbräuche bei einem Energiespeicher mit einem Energieinhalt von 220 kWh. Die Werte würden bei Nutzung eines kleineren Speichers weiter sinken, da der Traktionsenergiebedarf kleiner wäre. Aufgrund der Vollklimatisierung des Fahrzeugs ist der Gesamtenergiebedarf mit 1,8 kWh/km sehr groß. Bei Änderung des Klimakonzepts, könnte die für einen energetisch ausgeglichenen Betrieb vorzuhaltende Wendezeit weiter reduziert werden.

.....
Datenerfassung und Simulation
.....

Außentemperatur	40 °C sonnig
empf. Speichergröße [kWh]	<220
Traktion [kWh/km]	<0,87
Klimatisierung [kWh/km]	0,42
Nebenaggregate [kWh/km]	0,33
Verluste Energiespeicher [kWh/km]	0,18
Gesamt [kWh/km]	<1,80

Tabelle 11 empfohlene Speichergröße sowie spez. Energiebedarf mit Nachladung an Bodenschwinghstr. in Weimar

3 Abschätzung der Emissionen an ausgewählten Querschnitten

.....
Abschätzung der Emissionen an
ausgewählten Querschnitten
.....

3.1 Grundlagen

Als Grundlage für die nachfolgenden Betrachtungen werden die von den örtlichen Behörden oder beauftragten Institute bereitgestellten Angaben zum Verkehrsaufkommen an ausgewählten Straßenquerschnitten und die im Handbuch der Emissionsfaktoren (HBEFA 3.2, Stand Mai 2015) zu Grunde gelegten Schadstoffemissionen herangezogen.

3.1.1 HBEFA 3.2

Auf der Grundlage von Messungen stellt das HBEFA 3.2 Faktoren für den Ausstoß (die Emission)¹ von potenziellen Schadstoffen aus Kraftfahrzeugen zur Verfügung. Diese Werte gelten in der Ausgabe 3.2 für alle Abgasnormen.

Man unterscheidet in die Fahrzeugkategorien

- Personenkraftwagen (Pkw),
- leichte Nutzfahrzeuge (LNF),
- schwere Nutzfahrzeuge (SNF), bestehend aus Lastkraftwagen (Lkw), Lastzügen (LZ) und Sattelzügen (SZ)
- Linienbus (LBus),
- Reisebus (RBus) und
- Kraftrad (KR)

Für diese werden Schadstoffemissionen im warmen Betriebszustand (sog. Motoremissionen) berechnet (s. Tabelle 12) und in der Einheit g/km ausgegeben. Kaltstartzuschläge und Verdampfungsemissionen sowie Emissionen aus Klimaanlage können für die Kategorien Pkw und LNF zusätzlich ausgegeben werden.

Die Werte für die ausgegebenen Motoremissionen unterscheiden sich nach dem jeweils betrachteten Land, dem Bezugsjahr, typischen Verkehrszusammensetzungen und -abläufen sowie Streckenlängsneigungen. Eine Differenzierung der Emissionsfaktoren nach sog. Fahrzeugschichten (Fahrzeuggröße, Abgasnorm) in den jeweiligen Fahrzeugkategorien wird durch das HBEFA 3.2 ebenfalls unterstützt.

¹ Die Begriffe Emission und Immission hängen eng zusammen und geben deshalb häufig Anlass zu Verwechslungen. Sie sind abhängig von der Wahl des Betrachters. Während Emissionen den Ausstoß von Stoffen o. auch Geräuschen aus einer bestimmten Quelle bezeichnen, versteht man unter Immissionen den Eintrag von Stoffen/Geräuschen an einem bestimmten Ort oder über ein ausgewähltes Gebiet. Als Immission bezeichnet man also den Stoff- bzw. Schadstoffeintrag. Dieser Eintrag wird sowohl durch lokale als auch durch regionale und globale Emissionsanteile bestimmt. Inwieweit sich Emissionen in den Immissionen niederschlagen, hängt u.a. von meteorologischen Bedingungen (Sonne, Wind, Regen), lokalen Ausbreitungsbedingungen (Bebauung, Bewuchs) und globalen Faktoren (Höhenströmungen, z.B. für Sahara-Sand) ab. [Quelle: Breitzkopf, M. (IVI); Hörold, S. (EBF) Abschlussbericht Phase 2, Konzept für eine städteübergreifende Einführung von elektrisch angetriebenen Linienbussen in Thüringen, Kap. 5.4, Dresden Juni 2014]

Tabelle 12
Übersicht über Schadstoff-
komponenten des HBEFA 3.2

Stoff	Beschreibung
mKr	Kraftstoffverbrauch
HC	Kohlenwasserstoffe
CO	Kohlenmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid (im HBEFA berechnet aus Anteilen von NO _x)
NO _x	Stickstoffoxid als NO ₂ -Äquivalent
CO ₂ -total	Gesamt-CO ₂ , berechnet aus dem Treibstoffverbrauch
CO ₂ -rep(orted)	CO ₂ -Ausstoß, ohne Berücksichtigung des Anteils von Bio-Kraftstoffen
PM	Partikelmasse
Zusätzlich können Blei, SO ₂ , die Partikelanzahl und weitere, z. T. abgeleitete Schadstoffkomponenten ausgegeben werden.	

3.1.2 Angaben zum Verkehr an ausgewählten Querschnitten

Von den Verkehrsbehörden, beauftragten Instituten bzw. aus der Verkehrsmengenkarten des Freistaates Thüringen wurden die in Tabelle 13 angegebenen DTV-Werte an Querschnitten der betrachteten Elektrobuss-Linien bezogen.

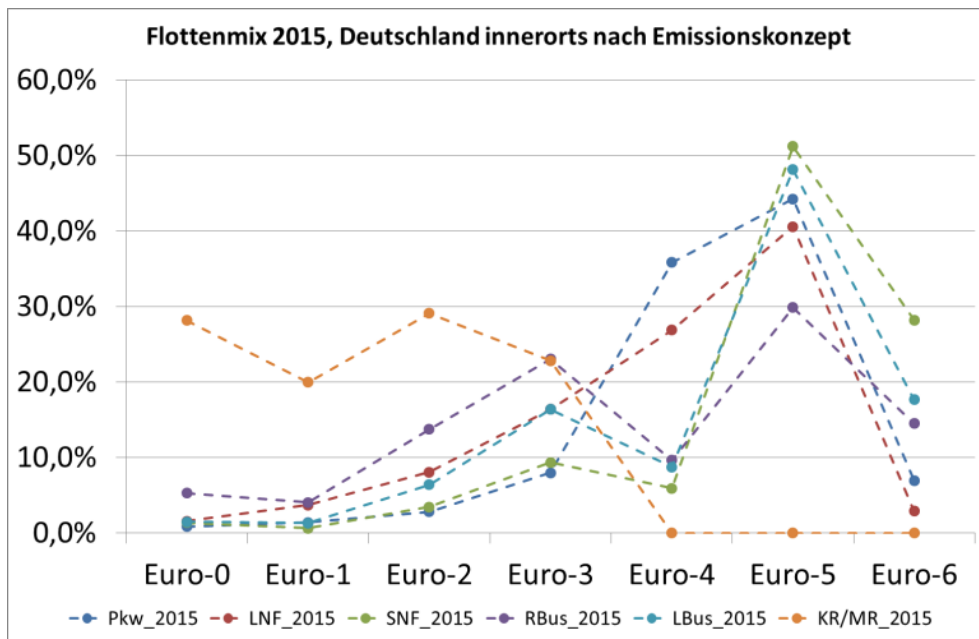
DTV-Zählung	Querschnitt	ca. Haltestelle	DTV [Fzg/24h]	DTV Pkw + LNF+KR [Fzg/24h]	DTV SNF (Lkw, LZ, SZ) [Fzg/24h]	DTV Bus [Fzg/24h] Zählg.	DTV SNF+Bus [Fzg/24h]
Altenburg (S)	Kreuzung Kauerndorfer Allee (B180)/ Offenburger Allee	Kauerndorfer Allee/ Offen- burger Allee	9.901	9.255	584	62	6,5 % (646)
Eisenach 1 (2)	Bahnhofstraße (Hauptbahn- hof/Nicolaitor)	zw. Haupt- bahnhof und Karlsplatz	14.247	11.148	1.794 ^{a)}	-	12,6 % (1.794)
Eisenach 2 (2)	Goldschmie- denstraße	Goldschmie- denstraße	2.180	1.540	297 ^{a)}	-	13,6 % (297)
Mühlhausen 1 (5)	Kreuzung Fr.- Engels-Str./ Kiliansgraben/ Kreuzgraben	Zw. Feldstr./ Fr.-Engels-Str./ Kreuzgraben	16.655	15.208	1.250	197	8,7 % (1.447)
Mühlhausen 2 (5)	Kasseler Str. B249 (zw. M.- Verfaillle-Allee u. Heyderöder Landstraße)	Hst. Aue/ M.- Verfaillle-Allee	8.984	8.332	519	133	7,2 % (652)
Suhl 1 (A1/A2)	L 3247/ L1140 Höhe Fr.- König-Str.	Zw. Busbhf. Kommerstr. u. Fr.-König-Str.	4.797	4.687	57	53	2,3 % (110)
Suhl 2 (A1/A2)	Kreuzg. Ilme- nauer Str./ M.- A.-Nexö-Str./ J.-Fucik-Str.	J.-Fucik-Str./ M.-A.-Nexö- Str.	12.556	14.020	344 ^{a)}	-	2,7 % (344)
Weimar (2)	Jenaer Straße (B7)	zw. Hellerweg u. Jenaer Str.	22.776	19.920	2.741	115	12,5 % (2.856)

^{a)} Beinhaltet die Fzg.-Kategorien: Lkw, LZ, SZ, Bus

Tabelle 13
DTV-Werte an ausgewählten
Querschnitten

3.1.3 Vorgehen

Für eine erste Abschätzung der Schadstoffeinsparungen durch den Einsatz von Elektrobussen wurden die vom HBEFA 3.2 bereitgestellten aggregierten Angaben für den Flottenmix der Fahrzeugkategorien (Zusammensetzung s. Tabelle 12) in durchschnittlichen Innerorts-situationen mit durchschnittlichen Geländeneigungen in Deutschland ausgewählt. Als Bezugsjahr wurde das Jahr 2015 ausgewählt. Die im HBEFA verwendeten Unterschiede im Flottenmix der Bezugsjahre zeigt ein Vergleich der Abb. 37 und Abb. 38 beispielhaft.



.....
Abschätzung der Emissionen an
ausgewählten Querschnitten
.....

Abb. 37
Flottenmix 2015 HBEFA
nach Fahrzeugkategorien und
Emissionsstufen

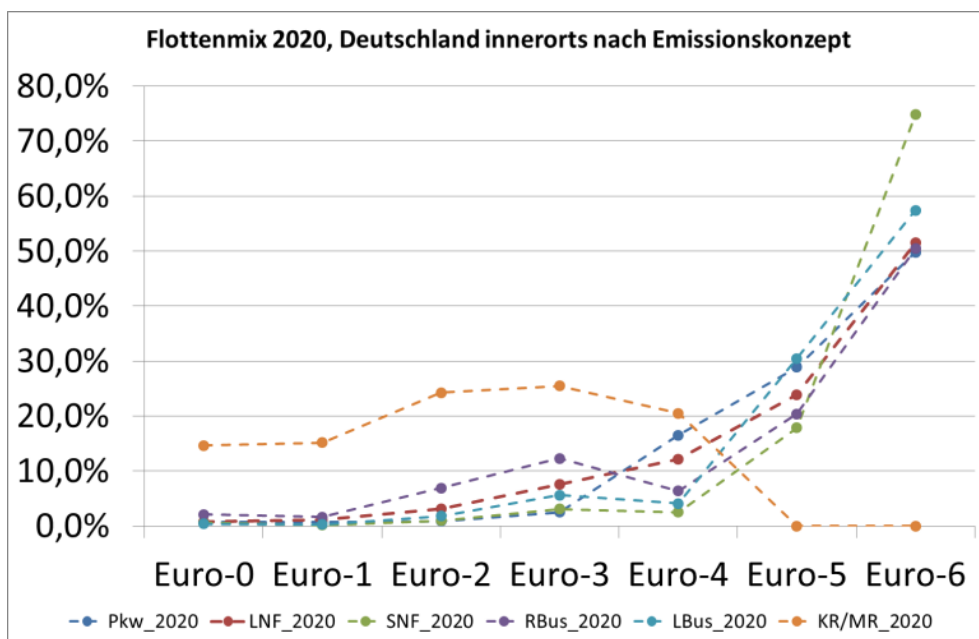


Abb. 38
Flottenmix 2020 HBEFA
nach Fahrzeugkategorien und
Emissionsstufen

In die Betrachtung werden nur die für alle Fahrzeugkategorien bereitgestellten Emissionen aufgenommen, d. h. es werden nur die sog. warmen Emissionen verwendet. Die daraus resultierenden Emissionen pro Fahrzeugkategorie und Kilometer zeigen die folgenden Abbildungen. Daraus ist klar erkennbar, dass die durchschnittlichen Emissionen der Linienbusse im innerörtlichen Verkehr die Emissionen der schweren Nutzfahrzeuge (SNF) übersteigen. Eine Unterscheidung zwischen SNF und Linienbussen scheint deshalb für die nachfolgenden Betrachtungen sinnvoll.

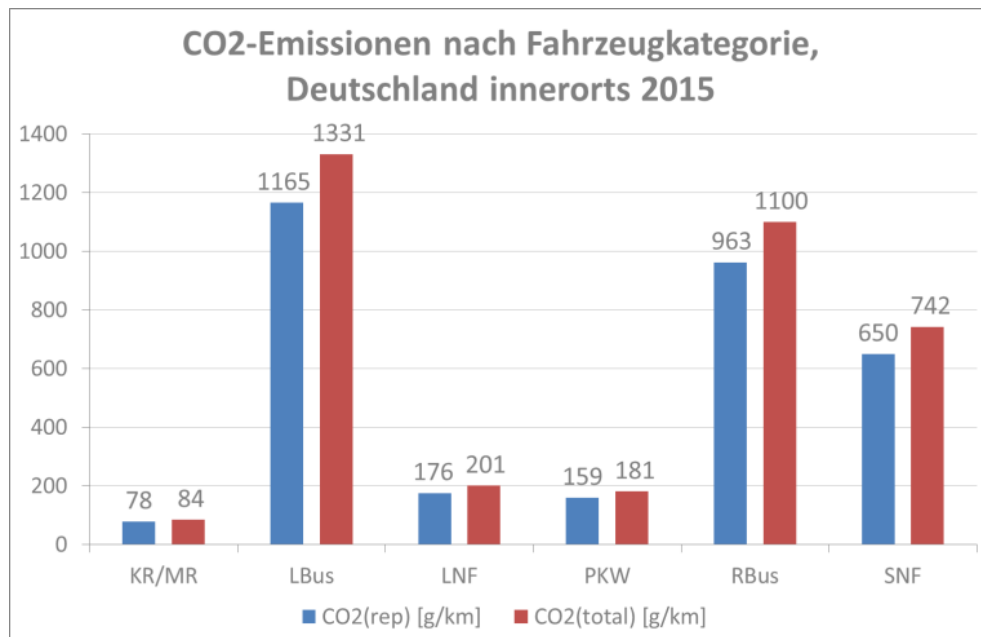


Abb. 39
Kohlendioxid
(warme Emissionen)

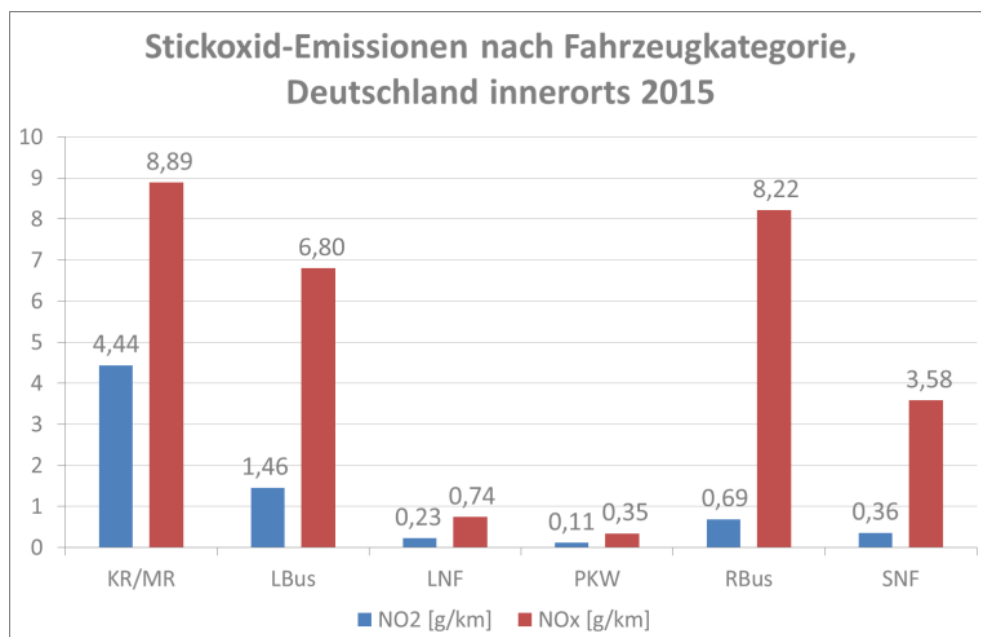


Abb. 40
Stickoxide
(warme Emissionen)

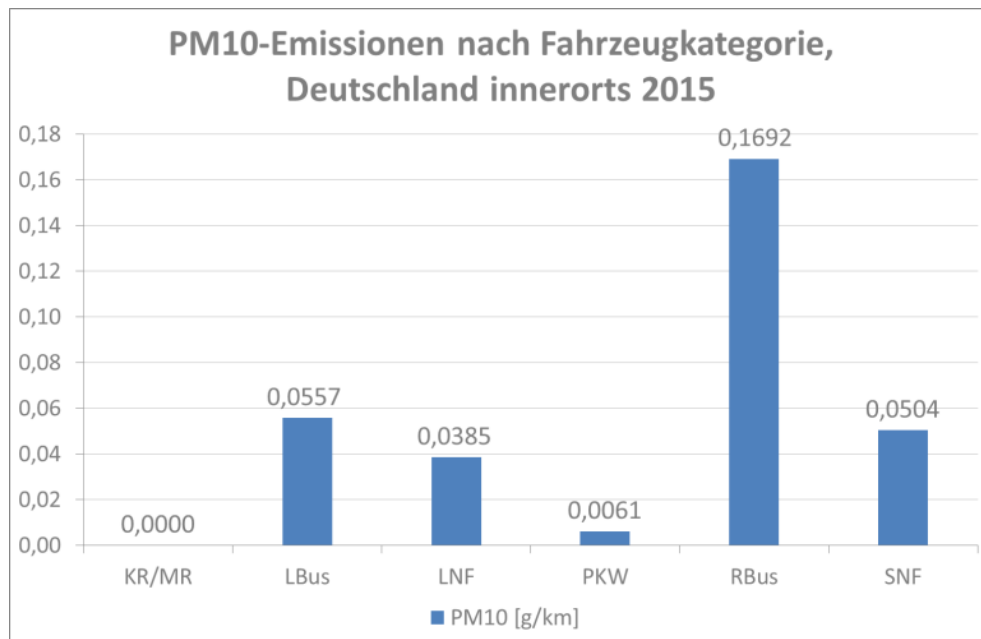


Abb. 41
Partikelmasse
(warme Emissionen)

Die Angaben zum Verkehrsaufkommen in Tabelle 13 berücksichtigen die Unterscheidung der Fahrzeugkategorien nach HBEFA nur teilweise. Um den Anteil des Linienbusverkehrs zu bestimmen, wurde deshalb aus dem Liniennetz und den jeweiligen Fahrplänen der Linienbusanteil am Schwerverkehr für den jeweiligen Querschnitt bestimmt. Vereinfachend wurde für montags bis freitags der Fahrplan für die Schulzeit angesetzt. Da in Eisenach, Mühlhausen und Suhl Verkehrszahlen für zwei Straßenquerschnitte vorliegen, sind in diesen Stellen auch zwei Querschnitte betrachtet worden. Die Unterscheidung erfolgt innerhalb der untersuchten Stadt mit den Ziffern 1 und 2.

.....
Abschätzung der Emissionen an
ausgewählten Querschnitten
.....

Tabelle 14
Anzahl der Linienbusse
an den Querschnitten
aus Fahrplandaten

Querschnitt	Nr. E-Bus- Linie	weitere Linien am Querschnitt	Linie	Anz. Busse Mo-Fr. [Fzg/24h]	Anz. Busse Sa. [Fzg/24h]	Anz. Busse So. u. Feiertag [Fzg/24h]	Anz. Busse gew. Mittel [Fzg/24h]
Altenburg 1	S	K, Z	S	200	132	115	176
			K	21	12	12	17
			Z	7	5	5	6
			Summe ABG	228	149	132	199
Eisenach 1	2	1; 2/5a; 2/5b; 3; 5; 6a; 7; 8; 9; 10; 11; 12b; 15	2	56	-	-	39
			1	86	-	-	60
			2/5a	12	46	32	20
			2/5b	8	44	30	17
			3	24	10	8	19
			5	86	-	-	60
			6a	16	-	-	11
			7	15	-	-	10
			8	12	2	-	9
			9	10	-	-	7
			10	18	18	18	18
			11	-	14	8	3
			12b	22	8	-	16
			15	8	-	-	6
			Summe EA1	373	142	96	295
Eisenach 2	2	1; 2/5a; 2/5b; 5; 6a; 7; 8; 9; 12b; 15	2	27	-	-	19
			1	43	-	-	30
			2/5a	6	23	16	10
			2/5b	4	22	15	8
			5	43	-	-	30
			6a	8	-	-	6
			7	7	2	-	5
			8	6	1	-	4
			9	5	-	-	3
			12b	9	6	-	7
			15	4	-	-	3
			Summe EA2	162	54	31	125
Mühlhausen 1	5	3A; 7; 8/1; 8/2; Regio- nalbus	5	93	14	14	69
			3A	2	-	-	1
			7	21	5	5	16
			8/1	3	4	4	3
			8/2	29	8	8	23
			Regional- bus	Ca. 50	-	-	35
			Summe MHL1	198	31	31	147
Mühlhausen 2	5	2; 8/1	5	58	10	10	43
			2	39	10	10	30
			8/1	4	4	4	4
			Summe MHL2	101	24	24	77

.....
Abschätzung der Emissionen an
ausgewählten Querschnitten
.....

Querschnitt	Nr. E-Bus- Linie	weitere Linien am Quer- schnitt	Linie	Anz. Busse Mo-Fr. [Fzg/24h]	Anz. Busse Sa. [Fzg/24h]	Anz. Busse So. u. Feier- tag [Fzg/24h]	Anz. Busse gew. Mittel [Fzg/24h]
Suhl/Zella- Mehlis 1	A1/A2	A/G; A ₄ ; B; B/F; C ₁ ; C ₂ ; C ₁₂ ; D ₁ /D ₂ ; F; G; K	A1/A2	108	-	-	75
			A/G	16	19	15	16
			A ₄	12	-	-	8
			B	28	-	-	19
			B/F	13	38	32	20
			C ₁	57	-	-	40
			C ₂	79	-	-	55
			C ₁₂	26	53	49	34
			D ₁ /D ₂	36	20	14	30
			F	26	-	-	18
			G	37	-	-	26
			K	5	7	7	6
			Summe SHL1	437	137	117	347
Suhl/Zella- Mehlis 2	A1/A2	A/G; A ₃ ; D ₁ /D ₂ ; F; H; K	A1/A2	72	-	-	50
			A/G	16	19	15	16
			A ₃	14	4	4	11
			D ₁ /D ₂	55	30	16	45
			F	61	-	-	42
			H	14	-	-	10
			K	4	4	4	4
			Summe SHL2	236	57	39	178
Weimar 1	2		2	105	65	63	92
			9	23	14	4	19
			Summe WE1	128	79	67	111

Die Werte für das gewichtete Mittel ergeben sich aus dem jährlichen Anteil der Einsatzzeit laut Fahrplan. Hierbei sind Tage mit und ohne Schulverkehr sowie Samstag, Sonn- und Feiertag aus den aktuellen Fahrplänen bzw. Jahreskalender 2015 berücksichtigt worden. Der Vergleich der Tabelle 13 und Tabelle 14 zeigt, dass die Querschnitte Altenburg 1 und Suhl/Zella-Mehlis 1 offensichtlich unter anderen Randbedingungen bestimmt wurde. Es wird daher mit den aus Tabelle 14 ermittelten Werten auf Basis der Fahrpläne gerechnet. In den Zahlen für SNF in Eisenach sind die Busse mit inbegriffen. Somit reduziert sich die Anzahl der SNF um die Zahl der Busse laut Fahrplan.

Damit ergeben sich folgende Anteile der Fahrzeugkategorien am Verkehrsaufkommen der Querschnitte. Im Fall Mühlhausen 1 und 2 bleiben von den im DTV angegeben Bussen nach Abzug der Linienbusse noch 50 bzw. 56 Busse in 24 Stunden übrig. Hier wird angenommen, dass es sich um Reise- bzw. Regionalbusse handelt. In Weimar 1 wird analog verfahren.

Tabelle 15
Verkehrsaufkommen an den
Querschnitten als Grundlage für
die Schätzung der Schadstof-
femissionen

DTV-Zählung	DTV ge- samt [Fzg/24h]	Pkw + LNF [Fzg/24h]	SNF (Lkw, LZ, SZ) [Fzg/24h]	RBus [Fzg/24h]	LBus gesamt [Fzg/24h]	LBus elektr. [Fzg/24h]
Altenburg 1	9.901	9.255	584	k. Schät- zung mögl.	199	176
Eisenach 1	14.247	11.148	1.499	k. Schät- zung mögl.	295	76
Eisenach 2	2.180	1.540	172	k. Schät- zung mögl.	125	37
Mühlhausen 1	16.655	15.208	1.250	50*	147	69
Mühlhausen 2	8.984	8.332	519	56*	77	43
Suhl/Zella- Mehlis 1	4.797	4.687	57	k. Schät- zung mögl.	347	75
Suhl/Zella- Mehlis 2	12.556	12.212	166	k. Schät- zung mögl.	178	66
Weimar 1	22.776	19.920	2.741	4*	111	92

* Differenz zwischen Linienbusanzahl lt. Fahrplan und DTV-Angabe als Reisebus/Regionalbus gewer-
tet.

Für die Abschätzung der Emissionen wurden aufgrund der Datenlage die folgenden weite-
ren Annahmen getroffen.

- Da der Anteil von Pkw und LNF in keinem Fall unterschieden werden kann, wer-
den beide Fahrzeugkategorien bezüglich des Schadstoffausstoßes als Pkw be-
trachtet.
- Weil in nur in drei Fällen eine Abschätzung für die Anzahl von Reisebussen vor-
liegt, werden diese, so wie in den anderen Fällen, den SNF zugeordnet.

3.2 Ergebnisse

Unter Berücksichtigung der Daten aus Abschnitt 3.1.2 und 3.1.3 ergeben sich die in den
folgenden Tabellen dargestellten Abschätzungen für Schadstoffe in g pro km und Jahr aus
den warmen Emissionen der Fahrzeuge an den betrachteten Querschnitten unter den o.g.
Bedingungen.

Querschnitt	CO ₂ (rep.) [t/km*a]	CO ₂ (total) [t/km*a]	NO ₂ [kg/km*a]	NO _x [kg/km*a]	PM [kg/km*a]
Altenburg 1	762	865	565	2.432	35,31
Eisenach 1	1.131	1.285	815	4.108	58,29
Eisenach 2	184	209	153	731	9,12
Mühlhausen 1	1.263	1.433	883	4.080	62,79
Mühlhausen 2	661	750	467	2.095	33,05
Suhl/Zella-Mehlis 1	434	493	386	1.531	18,50
Suhl/Zella-Mehlis 2	826	937	620	2.208	33,75
Weimar 1	1.859	2.112	1.243	6.400	97,09

Abschätzung der Emissionen an ausgewählten Querschnitten

Tabelle 16

Schätzung der warmen Schadstoffemissionen des Verkehrs an den Querschnitten
Bezug: 2015, Deutschland, Flottenmix, Durchschnitt innerorts, durchschnittliche Straßenneigung, LNF als PkV, Reise- bzw. Regionalbusse als SNF

Unter der Voraussetzung, dass auf den E-Bus-Linien ausschließlich Elektrobusse eingesetzt werden, ergeben sich folgende Minderungen der warmen Emissionen im Linienbetrieb.

Querschnitt	CO ₂ (rep.) [t/km*a]		CO ₂ (total) [t/km*a]		NO ₂ [kg/km*a]		NO _x [kg/km*a]		PM [kg/km*a]	
Altenburg 1	75	9,8%	86	9,9%	94	16,6%	437	18,0%	3,58	10,1%
Eisenach 1*	32	2,9%	37	2,9%	41	5,0%	189	4,6%	1,55	2,7%
Eisenach 2*	16	8,6%	18	8,6%	20	12,9%	92	12,6%	0,75	8,3%
Mühlhausen 1	29	2,3%	34	2,3%	37	4,2%	171	4,2%	1,40	2,2%
Mühlhausen 2	18	2,8%	21	2,8%	23	4,9%	107	5,1%	0,88	2,6%
Suhl/Zella-Mehlis 1	32	7,4%	36	7,4%	40	10,4%	186	12,2%	1,53	8,3%
Suhl/Zella-Mehlis 2	28	3,4%	32	3,4%	35	5,7%	164	7,4%	1,34	4,0%
Weimar 1	39	2,1%	45	2,1%	49	3,9%	229	3,6%	1,87	1,9%

Tabelle 17

Vermiedene warme Emissionen durch den vollständigen Einsatz von Elektrobusen auf den Linien
prozentuale Einsparung bezogen auf Gesamtwerte aus Tabelle 16
Bezug: 2015, Deutschland, Flottenmix LBus, Durchschnitt innerorts, durchschnittl. Straßenneigung
* Einsparungen sind für die Linien 2; 2/5a und 2/5b ermittelt

In den folgenden Abbildungen ist das Minderungspotenzial der verkehrsbedingten Schadstoffeinträge für ausgewählte Schadstoffe durch den Einsatz von Elektrobusen unter den o.g. Bedingungen und in Abhängigkeit der Ergebnisse aus dem HBEFA dargestellt. Diese basieren auf durchschnittliche innerörtliche Verkehrsverhältnisse, für das Bezugsjahr 2015 in Deutschland.

.....
Abschätzung der Emissionen an
ausgewählten Querschnitten
.....

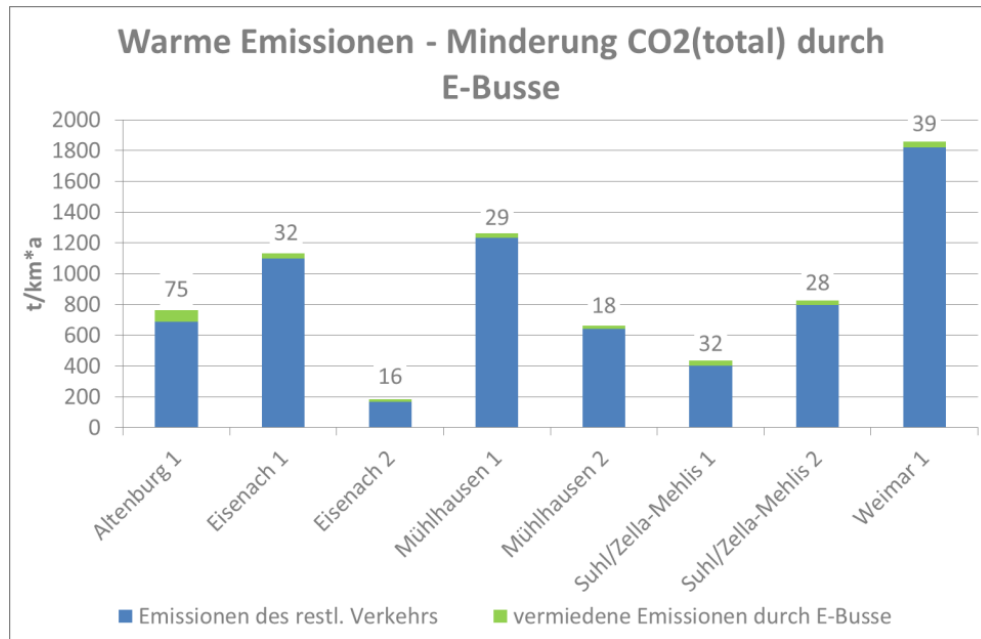


Abb. 42
Minderungspotential
CO₂(total)
Bezug: 2015, Deutschland,
Flottenmix, Durchschnitt
innerorts, durchschnittliche
Straßenneigung, LNF als PkW,
Reisebusse als SNF

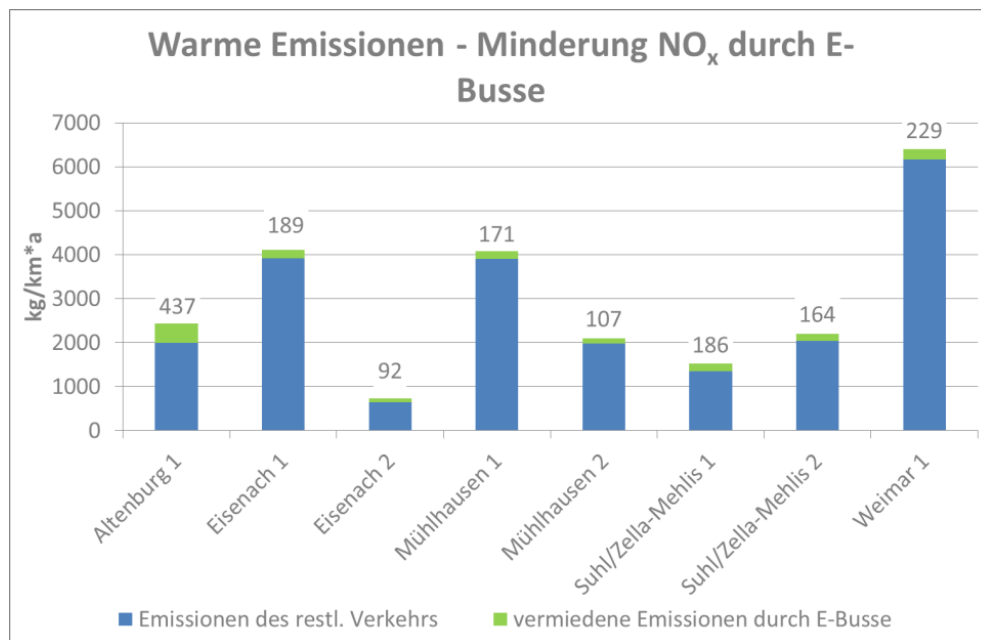


Abb. 43
Minderungspotential NO_x
Bezug: 2015, Deutschland,
Flottenmix, Durchschnitt
innerorts, durchschnittliche
Straßenneigung, LNF als PkW,
Reisebusse als SNF

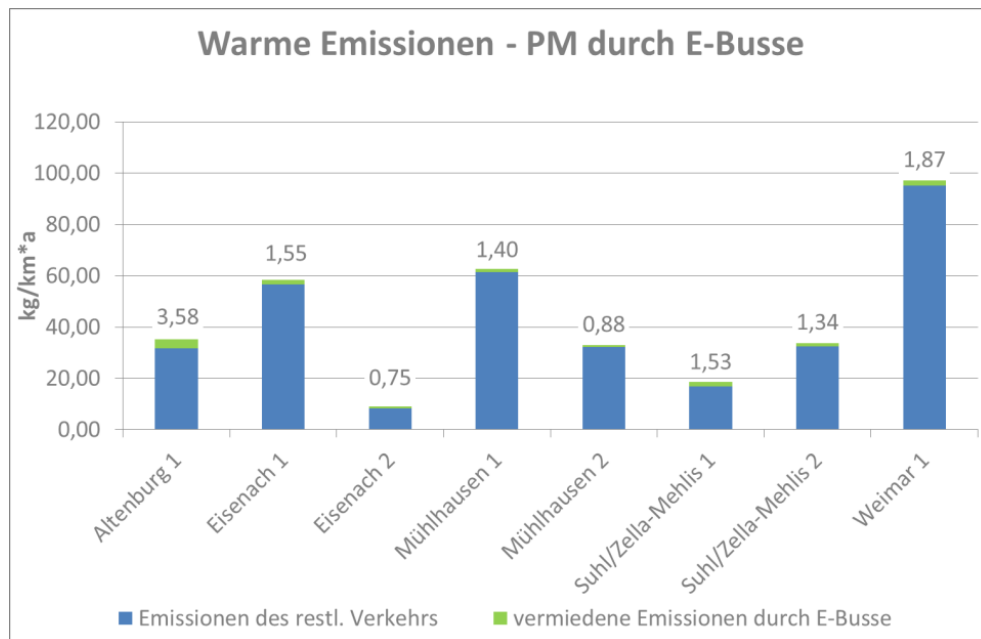


Abb. 44
Minderungspotential Partikelmasse
Bezug: 2015, Deutschland, Flottenmix, Durchschnitt innerorts, durchschnittliche Straßenneigung, LNF als PkV, Reisebusse als SNF

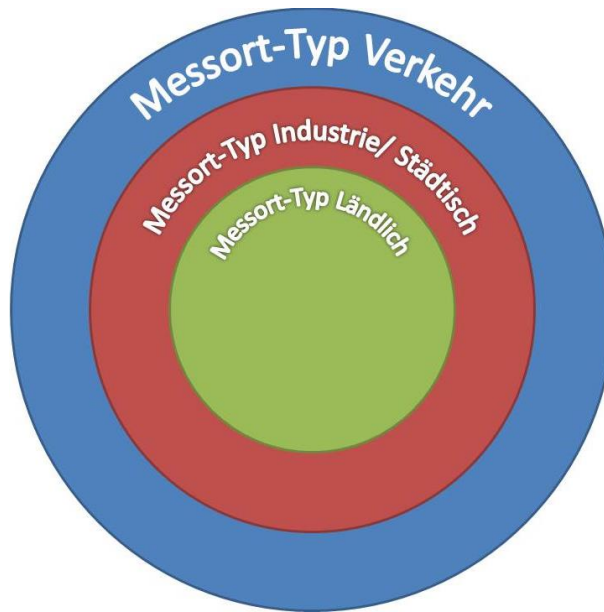
3.3 Immissionsauswirkungen auf die Stadt

Diese Angaben der Einsparung am Schadstoffeintrag in die Stadt beruhen lediglich auf den ermittelten Emissionsfaktoren aus dem HBEFA 3.2 und dem Anteil der Busse am DTV, welches von den Städten bzw. vom Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr zur Verfügung gestellt wurde. Soll ein Bezug zur Verringerung der Werte an den Messstationen in den Städten erfolgen, so muss man den Anteil der Einsparung durch die Elektrobusse auf den untersuchten Linien an den verkehrsbedingten Schadstoffimmissionen im Luftschadstoff-Messnetz Thüringens bzw. der untersuchten Städte zu Hilfe nehmen. Der Anteil an Schadstoffeintrag durch die Busse aus dem DTV ist bekannt, somit kann über das Verhältnis des Verkehrsanteils am Messort die Einsparung an der Messstelle überschläglich quantifiziert werden. Für genauere und belastbare Vorhersagen der lokalen Immissionseinsparung müssen aufwändige Rechenmodelle zu Rate gezogen werden, die nicht Bestandteil dieser Studie sind.

Zur besseren Verständlichkeit der ermittelten Messwerte am Messort soll folgende Grafik die Zusammenhänge der einzelnen Schadstoffwerte in Verbindung mit dem jeweiligen Messort-Typ erklären. Der Schadstoffwert, der am Messort-Typ „Verkehr“ gemessen wird beinhaltet die Hintergrundbelastung aus den Messort-Typen „Städtisch“ und „Ländlich“ und der Mess-Typ „Städtisch“ nur die Hintergrundbelastung aus dem Mess-Typ „Ländlich“.

.....
Abschätzung der Emissionen an
ausgewählten Querschnitten
.....

Abb. 45
Zusammensetzung der Luft-
schadstoffmesswerte in Ab-
hängigkeit des Messort-Typs



Nachfolgende Tabelle soll die zur Ermittlung des verkehrsbedingten Schadstoffeintrags berücksichtigten Messstationen benennen. Als Referenzwert werden die Jahresmittelwerte aus dem Jahr 2014 für NO_x , NO_2 und Partikel PM_{10} genommen. Für die Städte zu denen keine Werte für NO_2 zur Verfügung stehen wird das Verhältnis aus Erfurt angenommen, da laut Luftreinhalteplan der Stadt Gera [2012] dieses Verhältnis für verkehrsbelastete Straßenschluchten als repräsentativ angenommen werden kann. Aus den zur Verfügung stehenden Messwerten können lediglich für Mühlhausen, Suhl/Zella-Mehlis sowie Weimar² diese Messstation bezogenen Verhältnisse aufgestellt werden. Alle weiteren Verhältnisse beziehen sich auf die Werte aus Erfurt.

² Nur für NO_2 gültig, alle anderen Werte analog gemäß des Erfurter Verteilungsschlüssels

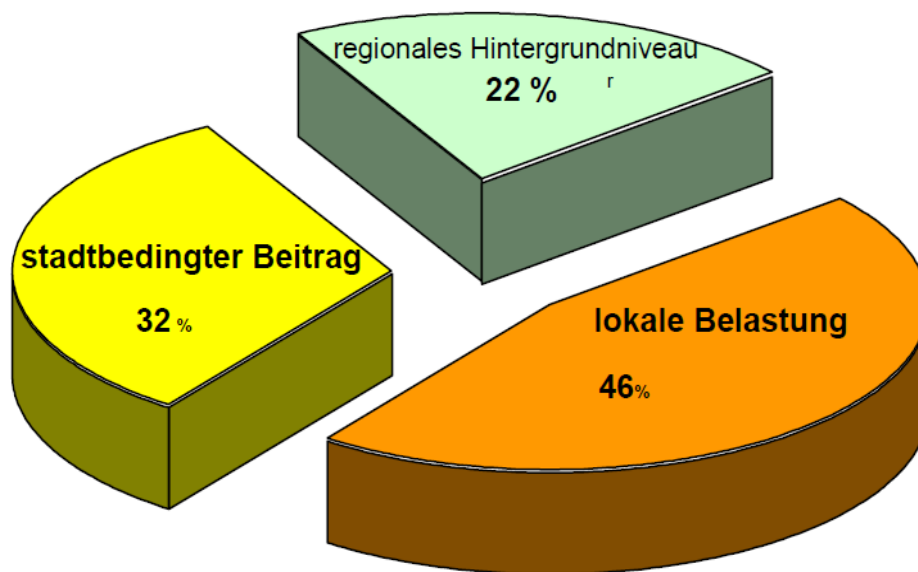


Abb. 46
 Herkunft von Stickstoffdioxid
 nach prozentualen Anteilen in
 verkehrsbelasteten Straßen-
 schluchten aus Erfurt (Quelle:
 Luftreinhalteplan Gera 2012)

Messort-Typ	Altenburg	Eisenach	Mühlhausen	Suhl/ Zella-Mehlis	Weimar	Erfurt
Verkehr	-	-	Kiliansgraben	Fr.-König-Str.	Jenaer Str.	Bergstraße
Städtischer Hintergrund	Theaterplatz	Werneburger Str.	Bastmarkt	K.-Liebknecht-Platz	Schwansee-str.	Krämpfer-straße
Ländlicher Hintergrund	Hummelshain	Possen	Possen	Schmücke	Hummelshain	Hummelshain

Tabelle 18
 Zuordnung der Messstationen zu
 den einzelnen Messort-Typen in
 den untersuchten Städten

Nachfolgende Jahresmittelwerte sind analog zu Tabelle 18 für das Jahr 2014 anzunehmen.

	Altenburg ³			Eisenach ³			Mühlhausen			Suhl/Zella-Mehlis			Weimar			Erfurt		
Ausge- wählter Schad- stoff	NO _x	NO ₂	PM ₁₀	NO _x	NO ₂	PM ₁₀	NO _x	NO ₂	PM ₁₀	NO _x	NO ₂	PM ₁₀	NO _x ³	NO ₂	PM ₁₀ ³	NO _x	NO ₂	PM ₁₀
Verkehr [µg/m³]	107	38	26	107	38	26	101	33	25	78	29	15	107	42	26	107	38	26
Städ- tisch [µg/m³]	35	21	18	35	21	18	31	19	19	28	16	17	35	19	18	35	21	18
Ländlich [µg/m³]	8	7	12	8	7	12	8	7	14	5	5	12	8	7	12	8	7	12

Tabelle 19 Jahresmittelwerte ausgewählter Schadstoffe und verkehrsbedingter Eintrag

Da nicht für alle untersuchten Städte Werte für die verschiedenen Messort-Typen verfügbar sind, wurde in Altenburg und Eisenach das Verhältnis von Erfurt angesetzt. In Weimar wurde für die Werte NO_x und PM₁₀ auf die gleiche Weise verfahren. Lediglich für NO₂ liegen städtespezifische Werte vor, die auch zur Ermittlung des Einsparungspotenzials verwendet wurden.

Aus den Werten der Tabelle 19 lassen sich nun die Immissionsanteile der elektrifizierten Fahrzeuge zusammen mit dem emissionsbedingten Anteil der Busse aus dem HBEFA ermitteln.

Quer- schnitte	Anteil lt. HBEFA an Emission- en f. NO _x	Einspa- rungspo- tenzial für NO _x	Anteil lt. HBEFA an Emission- en für NO ₂	Einspa- rungspo- tenzial für NO ₂	Anteil lt. HBEFA an Emission- en für PM ₁₀	Einspa- rungspo- tenzial für PM ₁₀
ABG 1 ³	18,0%	12,1%	19,8%	8,86%	10,10%	3,11%
EA 1 ³	4,6%	3,1%	5,6%	2,51%	2,40%	0,74%
EA 2 ³	12,6%	8,5%	17,4%	7,78%	6,60%	2,03%
MHL 1	4,2%	2,8%	4,60%	2,06%	2,40%	0,74%
MHL 2	5,1%	3,4%	5,50%	2,46%	3,00%	0,92%
SHL 1	12,2%	7,8%	17,40%	7,80%	8,30%	2,55%
SHL 2	7,4%	4,8%	6,50%	2,91%	4,00%	1,23%
WE 1	3,6%	2,4%	4,10%	2,25%	1,90%	0,58%

Tabelle 20
Einsparungspotenzial von
ausgewählten Schadstoffen in
Abhängigkeit des verkehrs-
bedingten Eintrags und
Anteil der eingesparten
Emissionen der Busse lt.
HBEFA 3.2; Bezugsjahr 2015

³ Entsprechend den Werten von Erfurt

Aus Tabelle 20 lässt sich erkennen, dass die höchsten Einsparungspotenziale an Schadstoffen in Altenburg und in der Goldschmiedenstraße in Eisenach erreicht werden können. Gründe hierfür sind zum einen der recht hohe Anteil an Linienbussen am gesamten DTV, welches sich im Anteil der Emissionen laut HBEFA niederschlägt. In Städten wie Mühlhausen, Suhl und Weimar ist der Einfluss der elektrifizierten Linie auf die Immissionen in der Stadt geringer, da weniger Busse im betroffenen Straßenabschnitt verkehren sowie der Haupteintrag durch andere Verkehrsteilnehmer erfolgt (Bsp. Weimar) oder noch eine größere Zahl anderer Linienbusse den gleichen Streckenabschnitt nutzen (Bsp. Mühlhausen und Suhl).

3.4 CO₂-Einsparung

Eine andere Methode zur Ermittlung der CO₂-Emissionen ist das Verfahren über den direkten Zusammenhang zwischen Kraftstoffverbrauch und Jahresfahrleistung. Hierfür wird ein Umrechnungsfaktor genutzt, der auf Basis der Menge des verbrannten Kraftstoffes das freigesetzte CO₂ berechnet. Hierfür sind Zahlen zum Durchschnittsverbrauch und der Jahresfahrleistung auf der zu elektrifizierenden Linie nötig. Im Rahmen der Studie wurden diese Werte bei den Verkehrsunternehmen (VU) abgefragt. Folgende Werte sind von den VU bereitgestellt worden.

	Altenburg	Eisenach	Mühlhausen	Suhl/Zella-Mehlis	Weimar
Jahresfahrleistung [km]	355.000 km	50.000 km	255.000 km	157.726 km	191.610 km
Durchschnittsverbrauch [l/100 km]; [kg/100 km]	41,0 l/100 km	34,0 l/100 km	33,55 kg/100 km	40,41 l/100 km	46,0 l/100 km
Umrechnungsfaktor [kg/l]; [kg CO ₂ /kg Erdgas]	2,65 kg/l	2,65 kg/l	2,79 kg/kg	2,65 kg/l	2,65 kg/l
Eingespartes CO ₂ [t/Jahr]	386 t/Jahr	45 t/Jahr	239 t/Jahr	169 t/Jahr	234 t/Jahr

Tabelle 21 Eingespartes CO₂ auf Basis des Durchschnittsverbrauches und der Jahresfahrleistung auf der untersuchten Linie

Im Vergleich zu den CO₂-Werten aus Tabelle 17 wird ein Vielfaches an CO₂ eingespart. Ursache für diese starken Abweichungen bei den Berechnungsmethoden sind zum einen bei HBEFA wird ein Flottenmittelwert, ein mittlerer Verkehrsfluss und eine mittlere Längsneigung des Querschnittes angenommen. Bei der o.g. Variante werden verkehrsunternehmensspezifische Verbrauchswerte und Jahresfahrleistungen berücksichtigt. Unter der Annahme einer vollständigen Elektrifizierung der auf der untersuchten Linie eingesetzten Fahrzeuge ergeben sich die in Tabelle 21 gezeigten Einsparungen.

Die CO₂-Einsparungen ergeben sich nur unter der Voraussetzung, dass elektrische Energie aus regenerativen Energiequellen nutzt. Würde die elektrische Energie aus dem deutschen Strommix bereitgestellt werden, so sind die Einsparungen quasi nicht vorhanden.

Diese Werte reduzieren sich geringfügig aufgrund des Anteils der chemischen Heizung. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Emissionen, die von der chemischen Heizung auf Basis von Diesel oder Heizöl verursacht werden einen sehr geringen Anteil ausmachen. Nutzt man Bioheizstoffe, wie z.B. Biodiesel oder Bioethanol so verbessert sich die CO₂-Gesamtbilanz im Vergleich zu den konventionellen Heizstoffen.

Seit Januar 2015 ist die neue ÖPNV-Investitionsrichtlinie des Freistaates Thüringen veröffentlicht. Sie enthält nun neben der Grundförderung für Fahrzeuge auch einen Teil, der den Einsatz von alternativen Antrieben im ÖPNV zusätzlich unterstützt. Als Besonderheit muss festgehalten werden, dass nicht nur die Erstinvestition für Fahrzeuge und Infrastruktur in nicht unerheblichen Maße gefördert werden kann, sondern auch ein beträchtlicher Teil notwendiger Ersatzbeschaffungen von wichtigen Komponenten, wie z.B. Energiespeicher. Dies ist zu begrüßen, da nach aktuellem Stand der Technik weder Langzeiterfahrungen für Elektrofahrzeuge existieren noch heutige Energiespeicher so standfest sind, dass sie 10 oder 15 Jahre im Einsatz bestehen können. Durch diesen Teil der ÖPNV-Investitionsrichtlinie ist das wirtschaftliche Risiko, dass eine Neueinführung eines elektrischen Antriebssystems mit sich bringt, stark reduziert. In nachfolgender Übersicht (Tabelle 22) sollen die wesentlichen Punkte der Investitionsrichtlinie als Auszug wiedergegeben werden.

	Inhalt der Richtlinie	Verweis auf Investitionsrichtlinie
Grundförderung Standardbus (>11 m)	70.000 €	5.2.4
Fördersatz für zuwendungsfähige Mehrkosten alternativer Antriebe (Elektro- und Gasbus)	75 %	5.2.6
Fördersatz für begründete Ersatzbeschaffung	80 %	5.2.6
Fördersatz für Infrastrukturinvestitionen	80 %	5.2.6
Bindungsfrist Dieselfahrzeuge	8 Jahre / 400.000 km im Linienverkehr	Anlage 1.2, Punkt 3
Bindungsfrist Elektrofahrzeuge	12 Jahre / 600.000 km im Linienverkehr	Anlage 1.2, Punkt 3

Tabelle 22
Zusammenfassung für die
Kostenkalkulation relevanter
Punkte der Investitionsrichtlinie

5 Betriebswirtschaftliche Betrachtung

5.1 Einführung

Mit den unter Kapitel 4 genannten Fördersätzen sind nachfolgende Kalkulationen erstellt worden. Es sind für Diesel-, Gas- und Elektrofahrzeuge die Grundförderung und jeweils der maximale Fördersatz bei Mehrkostenförderung, Infrastruktur und Ersatzbeschaffung berücksichtigt worden. Für die Elektrofahrzeuge liegen unverbindliche Angebote von Herstellern vor (siehe Tabelle 23). Diese Angebotspreise sind für weitere Kostenkalkulationen gemittelt worden. Bei den Kosten der Energiespeicher ist ebenfalls so verfahren worden. Bei den Wartungs-, Material- und Versicherungskosten der Elektrofahrzeuge sind die gleichen Kosten angesetzt worden, wie für die Diesel- bzw. Gasfahrzeuge in den jeweiligen Städten. Aus den Erfahrungen von Verkehrsbetrieben bei der Einführung von Hybridfahrzeugen ist bekannt, dass anfänglich höhere Instandhaltungskosten entstehen, jedoch nach einer gewissen Anlaufzeit die Annahme der gleichen Kosten in Wartung und Material als zutreffend bewertet werden kann. Kosten für eine besondere Schulung von Werkstatt- und Fahrpersonal sind nicht berücksichtigt worden. Hierzu sind von der Handwerkskammer keine Angaben gemacht worden.

Weitere Kosten für Werkstattausrüstung wie z.B. Podeste für Dacharbeitsstände sind nicht kalkuliert worden. Die Anschaffungskosten hierfür belaufen sich je nach Ausführung zwischen wenigen tausend Euro für verschiebbare einfache Podeste und ca. 100.000 € für einen vollen Dacharbeitsplatz mit ausfahrbaren Tritten, höhenverstellbaren Arbeitsplattformen und vollständig installierten Medien (Druckluft, Elektro etc.). Diese Kostenauskunft basiert auf einer unverbindlichen Anfrage bei der Firma Günzburger Steigtechnik. Es gibt noch andere Anbieter auf diesem Markt, so dass die Kosten in beide Richtungen je nach Ausstattung variieren können. Die Nutzungsdauer sollte bei regelmäßiger Wartung und sachgemäßer Nutzung bei 15...20 Jahren liegen.

	Hersteller A	Hersteller B	Hersteller C
12 m Batteriebus mit punktueller Nachladung	517.000 €	537.000 €	450.000 €
12 m Batteriebus mit punktueller Nachladung (für Kalkulation verwendeter Wert)	495.000 €		

Tabelle 23
unverbindliche Fahrzeugpreise von Herstellern, anonymisiert

Diese Anschaffungskosten beziehen sich auf das Fahrzeug inklusive Energiespeicher (220 kWh) und fahrzeugseitig erforderliche Komponenten für das Nachladesystem.

Die Anschaffungskosten für die Referenzdieselfahrzeuge werden anhand der zugearbeiteten Zahlen aus den Städten gebildet (siehe Tabelle 24).

Tabelle 24
Anschaffungskosten von
Dieselfahrzeugen bzw. Erd-
gasfahrzeugen

	Altenburg	Eisenach	Mühlhau- sen	Suhl / Zella- Mehlis	Weimar
12 m Stan- dard- Dieselsolobus	230.000 €	220.600 €	270.000 € ⁴	225.000 €	220.000 €
Mittelwert 12 m- Dieselsolo- bus ⁵	224.000 €				

Für die Energiespeicher können die Kosten je kWh mit ca. 650...800 € kalkuliert werden. Dieser Preis orientiert sich an den Gesamtkosten für ein nutzbares Batteriesystem und nicht nach den Zellkosten. Auf Basis dieser Zahlen ergeben sich für alle Städte mittlere Anschaffungskosten für einen 220 kWh-Energiespeicher von etwa 165.000 € unter Berücksichtigung des vollständigen Tausches des Energiespeichers.

In Eisenach, Mühlhausen und Suhl / Zella-Mehlis ergeben die Simulationen, dass Energiespeicher mit einer geringeren Kapazität ausreichen würden. Hierzu existieren keine Kostenangebote. Es ist zu beachten, dass unter Beibehaltung der Ladeleistung von ca. 250 kW die Energiespeicher mit dem Doppelten der Nennkapazität geladen würden. Dies kann unter Umständen andere Zellzusammensetzungen oder zusätzliche technische Einrichtungen am Energiespeicher erfordern, die die Kosten erhöhen. Deshalb wird davon ausgegangen, dass die Kosten für die kleineren Energiespeicher etwa genauso hoch sind wie für die 220 kWh-Speicher.

Diese Kosten spiegeln die aktuellen Tendenzen bei mobilen Batteriespeichern wider und entsprechen technisch sicheren sowie zyklensicheren Systemen hauptsächlich aus europäischer Herstellung. Vor der Einführung eines batterieelektrischen Antriebssystems wird empfohlen, detaillierte Angaben des Buserstellers zum verbauten Batteriesystem abzufragen und ggf. mit Hilfe externer fachlicher Expertise zu prüfen. Es bestehen seitens des Auftraggebers dieser Studie Kontakte zu wissenschaftlichen Einrichtungen, die entsprechende Beurteilungen durchführen können.

Als Nutzungsdauer für Batteriespeicher sind in Abhängigkeit der durchgesetzten Energiemenge zwischen 5 und 7 Jahren anzunehmen, Tendenz steigend. Die durchgesetzte Energiemenge ist wesentlich vom spezifischen Verbrauch und der jährlichen Fahrleistung der Fahrzeuge abhängig und weniger vom häufigen Laden. Dies wird nur erforderlich, wenn der Tagesenergiebedarf größer als die im Energiespeicher zu speichernde Energie ist. Bei der Ausschreibung ist unbedingt darauf zu achten, dass die Fahrzeughersteller eine entsprechende Lebensdauer gewährleisten. Damit werden die Risiken für das Verkehrsunternehmen begrenzt. Die angesetzten Energie- bzw. Kraftstoffkosten sind nachfolgender Tabelle 25 zu entnehmen.

Die Werte für die chemische Zusatzheizung, die in jeder Stadt angegeben werden sind nicht auf Basis der städtespezifischen Untersuchungen ermittelt worden, sondern sie entsprechen einem vergleichbaren Simulationswert aus dem Jahr 2013 in Nordhausen.

⁴ Anschaffungskosten für Erdgasbus

⁵ Mittelwert aus den Städten Altenburg, Eisenach, Suhl/Zella-Mehlis und Weimar auf ganze tausend gerundet

	Altenburg	Eisenach	Mühlhausen	Suhl/Zella-Mehlis	Weimar
Kosten für Diesel (netto) [€/l]	1,03	1,05	-	1,04	1,05
Mittelwert Diesel [€/l]	1,04				
Kosten für Gas [€/kg]			0,77		
Energiekosten [€/kWh]	0,25 €/kWh	0,23 €/kWh	0,23 €/kWh	0,222 €/kWh	-
Mittlere Energiekosten [€/kWh]	0,233 €/kWh				

Tabelle 25
Energie und Kraftstoffkosten

In Tabelle 25 sind neben den städtespezifischen Kosten für Diesel, Gas und elektrischer Energie auch mittlere Kosten angegeben. Diese sollen bei Vergleichsrechnungen oder fehlenden Angaben seitens der Verkehrsunternehmen als Basis dienen, da sie als Mittelwert aus 4 Städten für diese Studie als repräsentativ angenommen werden können. Als Vergleichskosten für Energie wird im Rahmen der Kalkulation ein reduzierter Wert von 0,18 €/kWh angenommen. Dieser Wert ist nur ein Richtwert der genaue städtespezifische Kostenwert wird im Anschluss an diese Studie von einer anderen Arbeitsgruppe ermittelt. Da die Energiekosten stark von der maximal abgeforderten Leistung und der entnommenen Energie sowie von verschiedenen anderen Faktoren abhängen, ist eine getrennte Betrachtung dieser Themen sinnvoll. Im Rahmen dieses zweiten Projektes soll die Energie aus regenerativen Quellen bereitgestellt werden.

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Altenburg

In Altenburg basiert die Kostenkalkulation auf folgenden Eingangswerten, die vom Verkehrsunternehmen bereitgestellt wurden. Folgende Annahmen sind für die Kalkulation getroffen worden.

Variante ABG 1: 12 m-Dieselbus, vollklimatisiert

Variante ABG 2: 12 m-Elektrobus, vollklimatisiert

Variante ABG 3: 12 m-Elektrobus, vollklimatisiert, angepasste Energiekosten

Tabelle 26
Eingangsgrößen für Fahrzeugkalkulation in Altenburg je Fahrzeug

Werte je Fahrzeug	Var. ABG 1	Var. ABG 2	Var. ABG 3
Einzusetzende Fahrzeuge [-]	5		
Anschaffungskosten [T€]	230	495	
Grundförderung [T€]	70	70	
Mehrkostenförderung bei 75 % Fördersatz [T€]	-	199	
Summe Fördermittelaufwand [T€]	70	269	
Eigenanteil für VU [T€]	160	226	
Verzinsungssatz [%]	3		
Abschreibungsdauer [Jahre]	9	12	
Nutzungsdauer [Jahre]	13	14	
Jährliche Abschreibung und Verzinsung für Fahrzeug auf gesamten Nutzungszeitraum [T€]	14	18,5	
Jährlicher Material-, Instandhaltungs- und Versicherungs-kosten [T€]	10,5		
Anschaffungskosten Ersatzenergiespeicher, mittlerer Wert [T€]	-	165	
Förderung Ersatzenergiespeicher bei 80 % Fördersatz [T€]	-	132	
Eigenanteil Ersatzenergiespeicher für VU [T€]	-	33	
Abschreibungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	-	5	
Nutzungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	-	5	
Jährliche Abschreibung und Verzinsung Ersatz-energiespeicher [T€]	-	7	
Jahresfahrleistung [km]	71.000		
Spezifischer Kraftstoff-/ Energieverbrauch je km	0,41 l/km	1,45 kWh/km	
Energie-/ Kraftstoffkosten je km [€/km]	0,42	0,36 ⁶	0,26 ⁷
Mittlerer Jahresheizenergieverbrauch für chem. Heizung [kWh/km]	-	0,63	
Kosten chem. Heizen [€/km]	-	0,07	
Reifen-/Verbrauchsstoffkosten je km [€/km]	0,10		

⁶ Bei 0,25 €/kWh Energiekosten (Angabe VU)

⁷ Bei 0,18 €/kWh Energiekosten (Annahme EBF)

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, ist eine Nachladestation an der Haltestelle Stauffenbergstraße notwendig, um den gesamten Tagesbedarf an Energie bereitzustellen. An dieser Ladestation soll während der Wendezeit zwischen zwei Umläufen das Fahrzeug mittels einer SchnellladeLösung geladen werden. Die zu erwartenden Kosten werden unter Berücksichtigung der aktuellen Investitionsrichtlinie für den ÖPNV des Freistaates Thüringen in nachfolgender Tabelle 27 dargestellt. Die Kosten für die Dieseltankstelle sind von den Verkehrsunternehmen abgefragt worden, doch sind sie für den Vergleich nicht von Relevanz, da durch den Ersatz von wenigen Dieselfahrzeugen sich die Kosten auf den Rest der Flotte umlegt. Dabei entstehen nur geringe Mehrkosten, die aber in dieser Kalkulation nicht berücksichtigt werden. Bei den Elektrofahrzeugen sind die Wartungskosten für wenige Fahrzeuge verhältnismäßig hoch, so dass diese berücksichtigt werden.

	Var. ABG 1	Var. ABG 2	Var. ABG 3
Kosten Ladestation [T€]	-	200	
Förderung [T€]	-	160	
Eigenanteil VU [T€]	-	40	
Verzinsungssatz [%]	-	3	
Abschreibungsdauer Infrastruktur [Jahre]	-	12	
Nutzungsdauer Infrastruktur [Jahre]	-	15	
Jährliche Abschreibung und Verzinsung auf gesamte Nutzungsdauer bezogen [T€]	-	3,3	
Jährliche Instandhaltungskosten pro Ladestation [T€]	-	7	

Tabelle 27
Eingangsgroßen Infrastrukturkalkulation in Altenburg

	Var. ABG 1	Var. ABG 2	Var. ABG 3
Gesamtkosten [T€]	1.400	2.950	
Fördermittel [T€]	350	1.510	
Eigenanteil VU [T€]	1.050	1.440	

Tabelle 28
Erstinvestitionskosten und Fördermittelbedarf in Altenburg

Abschließend sollen die zu erwartenden Gesamtkosten für das Verkehrsunternehmen und der Fördermittelbedarf innerhalb von 15 Betriebsjahren angegeben werden. Hierbei werden der Einfluss von Inflation und weiteren kostenändernden Ereignissen nicht berücksichtigt. Das inhaltliche Fortbestehen der Investitionsrichtlinie wird ebenfalls vorausgesetzt, so dass auch bei Folge- bzw. Ersatzanschaffungen diese Anwendung findet.

	Var. ABG 1	Var. ABG 2	Var. ABG 3
Abschreibung/ Verzinsung Fahrzeu- ge [T€]	1.050	1.700	
Abschreibung/ Verzinsung Infra- struktur [T€]	-	50	
Summe Anschaffung/ Verzinsung (VU) [T€]	1.050	1.750	
Betriebskosten Fahrzeuge [T€]	3.610	3.645	3.105
Summe Betriebskosten Infrastruk- tur (VU) [T€]	-	105	105
Summe Betriebskosten (VU) [T€]	3.610	3.750	3.210
Summe finanzieller Aufwand für VU [T€]	4.660	5.500	4.960
Fördermittelaufwand Fahrzeuge [T€]	700	4.010	
Fördermittelaufwand Infrastruktur [T€]	-	160	
Summe Fördermittelaufwand [T€]	700	4.170	

Tabelle 29
Kostenaufwand für das VU
und Fördermittelaufwand
über 15 Betriebsjahre in
Altenburg

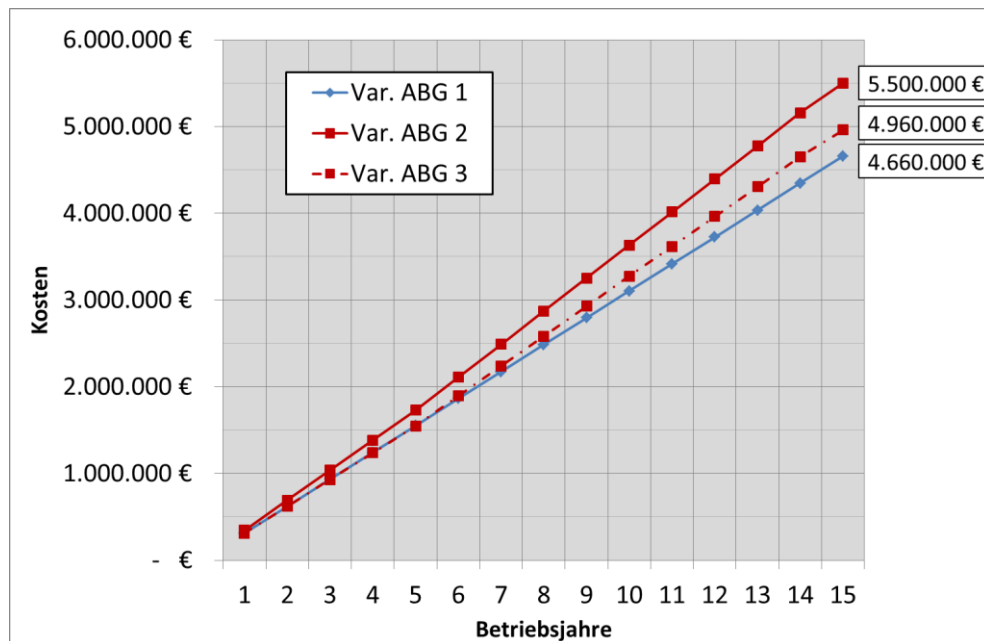


Abb. 47
Kosten für VU innerhalb
von 15 Betriebsjahren in
Altenburg

In Abb. 47 erkennt man, dass nur mit den günstigen Energiekosten der Variante ABG 3 in den ersten Betriebsjahren ein annähernd kostengleicher Betrieb im Vergleich zum Diesellbus (Variante ABG 1) darstellbar ist. Der Anstieg der Kosten in Variante ABG 3 ab dem 6. Betriebsjahr kommt durch die Ersatzbeschaffung der Energiespeicher zustande. Diese müssen aufgrund der hohen Jahresfahrleistung von 71.000 km pro Fahrzeug gegebenenfalls schon nach 5 Jahren getauscht werden.

	Variante ABG 1	Variante ABG 2	Variante ABG 3
Fahrzeugkosten [€/km]	0,87	1,00	0,84
Infrastrukturkosten [€/km]	-	0,03	0,03
Gesamt [€/km]	0,87	1,03	0,87

Tabelle 30
Kosten je Kilometer auf der
untersuchten Linie S in Alt-
enburg je Fahrzeug

In nachstehender Tabelle soll noch der Einfluss einer 2 %-igen Kostensteigerung pro Jahr auf die Gesamtkosten dargestellt werden.

	Variante ABG 1	Variante ABG 2	Variante ABG 3
Gesamtkosten ohne Kostensteigerung [T€]	4.660	5.500	4.960
Gesamtkosten mit 2 % Kostensteigerung pro Jahr [T€]	5.480	6.480	5.850
Gesamtkosten mit 4 % Kostensteigerung pro Jahr [T€]	6.460	7.670	6.920

Tabelle 31
Übersicht der Gesamtkosten
nach 15 Betriebsjahren bei
einer jährlichen Kostenstei-
gerung von 2 bzw. 4 % für
Altenburg

5.2.2 Eisenach

In Eisenach sind folgende Annahmen für die Kalkulation getroffen worden.

Variante EA 1: 12 m-Dieselbus, nur Fahrerklimaanlage

Variante EA 2: 12 m-Elektrobus, nur Fahrerklimaanlage

Variante EA 3: 12 m-Elektrobus, nur Fahrerklimaanlage, angepasste Energiekosten

Werte je Fahrzeug	Var. EA 1	Var. EA 2	Var. EA 3
Einzusetzende Fahrzeuge [-]	2		
Anschaffungskosten [T€]	221	495	
Grundförderung [T€]	70	70	
Mehrkostenförderung bei 75 % Fördersatz [T€]	-	205,5	
Summe Fördermittelaufwand [T€]	70	275,5	
Eigenanteil für VU [T€]	151	219,5	
Verzinsungssatz [%]	2,5		
Abschreibungsdauer [Jahre]	9	12	
Nutzungsdauer [Jahre]	12	14	
Jährliche Abschreibung und Verzinsung für Fahrzeug auf gesamten Nutzungszeitraum [T€]	14,5	18,5	
Jährlicher Material-, Instandhaltungs- und Versicherungskosten [T€]	8,6		
Anschaffungskosten Ersatzenergiespeicher, mittlerer Wert [T€]	-	165	
Förderung Ersatzenergiespeicher bei 80 % Fördersatz [T€]	-	132	
Eigenanteil Ersatzenergiespeicher für VU [T€]	-	33	
Abschreibungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	-	5	
Nutzungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	-	6	
Jährliche Abschreibung und Verzinsung Ersatzenergiespeicher [T€]	-	6	
Jahresfahrleistung [km]	50.000		

Tabelle 32
Eingangsgrößen für Fahrzeugkalkulation in Eisenach je Fahrzeug

Werte je Fahrzeug	Var. EA 1	Var. EA 2	Var. EA 3	Betriebswirtschaftliche Betrachtung
Spezifischer Kraftstoff-/ Energieverbrauch je km	0,34 l/km	1,25 kWh/km		
Energie-/ Kraftstoffkosten je km [€/km]	0,36	0,29 ⁸	0,23 ⁹	
Mittlerer Jahresheizenergieverbrauch für chem. Heizung [kWh/km]	-	0,63		
Kosten chem. Heizen [€/km]	-	0,11		
Reifen-/Verbrauchsstoffkosten je km [€/km]	0,04			

Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, ist eine Nachladestation am Hauptbahnhof notwendig, um den gesamten Tagesbedarf an Energie bereitzustellen. An dieser Ladestation soll während der Wendezeit zwischen zwei Umläufen das Fahrzeug mittels einer Schnelladelösung geladen werden. Die zu erwartenden Kosten werden unter Berücksichtigung der aktuellen Investitionsrichtlinie für den ÖPNV des Freistaates Thüringen in nachfolgender Tabelle 33 dargestellt. Die Kosten für die Dieseltankstelle sind von den Verkehrsunternehmen abgefragt worden und bei den Instandhaltungskosten der Fahrzeuge eingerechnet.

	Var. EA 1	Var. EA 2	Var. EA 3	Tabelle 33 Eingangsgrößen Infrastrukturkalkulation in Eisenach
Kosten Ladestation [T€]	-	200		
Förderung [T€]	-	160		
Eigenanteil VU [T€]	-	40		
Verzinsungssatz [%]	-	3		
Abschreibungsdauer Infrastruktur [Jahre]	-	12		
Nutzungsdauer Infrastruktur [Jahre]	-	15		
Jährliche Abschreibung und Verzinsung auf gesamte Nutzungsdauer bezogen [T€]	-	3,3		
Jährliche Instandhaltungskosten pro Ladestation [T€]	-	7		

⁸ Bei 0,23 €/kWh Energiekosten (Angabe VU)

⁹ Bei 0,18 €/kWh Energiekosten (Annahme EBF)

	Var. EA 1	Var. EA 2	Var. EA 3
Gesamtkosten [T€]	348	1.281	
Fördermittel [T€]	140	711	
Eigenanteil VU [T€]	488	570	

Tabelle 34
Erstinvestitionskosten
und Fördermittelbedarf in
Eisenach

Abschließend sollen die zu erwartenden Gesamtkosten für das Verkehrsunternehmen und der Fördermittelbedarf innerhalb von 15 Betriebsjahren angegeben werden. Hierbei werden der Einfluss von Inflation und weiteren kostenändernden Ereignissen nicht berücksichtigt. Das inhaltliche Fortbestehen der Investitionsrichtlinie wird ebenfalls vorausgesetzt, so dass auch bei Folge- bzw. Ersatzanschaffungen diese Anwendung findet.

	Var. EA 1	Var. EA 2	Var. EA 3
Abschreibung/ Verzinsung Fahrzeuge [T€]	435	650	
Abschreibung/ Verzinsung Infrastruktur [T€]	-	50	
Summe Anschaffung/ Verzinsung (VU) [T€]	435	700	
Betriebskosten Fahrzeuge [T€]	860	907	814
Summe Betriebskosten Infrastruktur (VU) [T€]	-	105	105
Summe Betriebskosten (VU) [T€]	860	1.012	919
Summe finanzieller Aufwand für VU [T€]	1.295	1.710	1.620
Fördermittelaufwand Fahrzeuge [T€]	280	1.633	
Fördermittelaufwand Infrastruktur [T€]	-	160	
Summe Fördermittelaufwand [T€]	280	1.793	

Tabelle 35
Kostenaufwand für das VU
und Fördermittelaufwand
über 15 Betriebsjahre in
Eisenach

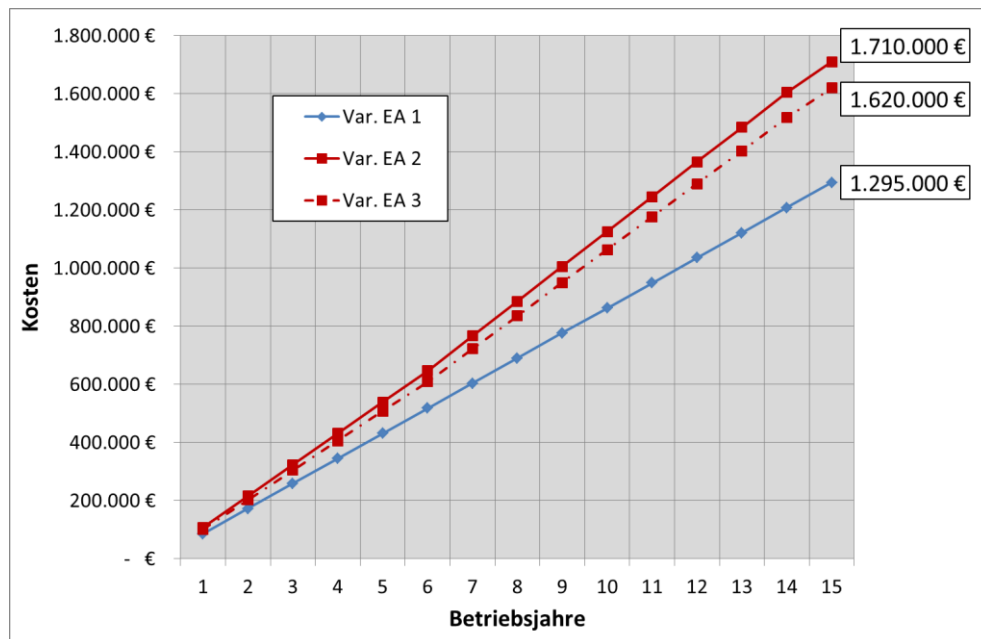


Abb. 48
Kosten für VU innerhalb
von 15 Betriebsjahren in
Eisenach

In Abb. 47 ist zu erkennen, dass aufgrund der geringen Fahrleistung die Mehrkosten in der Anschaffung nicht durch geringere Energiekosten kompensiert werden können. Dadurch laufen die Kurven der Variante EA 1 und der günstigen Varianten EA 3 von Beginn an auseinander. Ein weiterer Grund für den Unterschied ist die geringe Anzahl an Fahrzeugen. Dadurch lassen sich die Fixkosten für Infrastruktur auf nur zwei Fahrzeuge umlegen, so dass diese ebenfalls die Endkosten deutlich erhöhen.

	Variante EA 1	Variante EA 2	Variante EA 3
Fahrzeugkosten [€/km]	0,86	1,03	0,97
Infrastrukturkosten [€/km]	-	0,10	0,10
Gesamt [€/km]	0,82	1,03	0,97

Tabelle 36
Kosten je Kilometer auf der
untersuchten Linie 2 in Ei-
senach je Fahrzeug

In nachstehender Tabelle soll noch der Einfluss einer 2 %-igen und 4 %-igen Kostensteigerung pro Jahr auf die Gesamtkosten dargestellt werden.

	Variante EA 1	Variante EA 2	Variante EA 3
Gesamtkosten ohne Kostensteigerung [T€]	1.295	1.710	1.620
Gesamtkosten mit 2 % Kostensteigerung pro Jahr [T€]	1.522	2.020	1.909
Gesamtkosten mit 4 % Kostensteigerung pro Jahr [T€]	1.797	2.390	2.260

Tabelle 37
Übersicht der Gesamtkosten
nach 15 Betriebsjahren bei
einer jährlichen Kostenstei-
gerung von 2 bzw. 4 % für
Eisenach

5.2.3 Mühlhausen

In Mühlhausen sind folgende Annahmen für die Kalkulation getroffen worden.

Variante MHL 1: 12 m-Erdgasbus, Citysphere-Klimaanlage

Variante MHL 2: 12 m-Dieselbus, Citysphere-Klimaanlage

Variante MHL 3: 12 m-Elektrobus Citysphere-Klimaanlage

Variante MHL 4: 12 m-Elektrobus, Citysphere-Klimaanlage, angepasste Energiekosten

Werte je Fahrzeug	Var. MHL 1	Var. MHL 2	Var. MHL 3	Var. MHL 4
Einzusetzende Fahrzeuge [-]	2			
Anschaffungskosten [T€]	270	224	495	
Grundförderung [T€]	70	70	70	
Mehrkostenförderung bei 75 % Fördersatz [T€]	37,5	-	205,5	
Summe Fördermittelaufwand [T€]	107,5	70	275,5	
Eigenanteil für VU [T€]	162,5	154	219,5	
Verzinsungssatz [%]	3			
Abschreibungsdauer [Jahre]	7	9	12	
Nutzungsdauer [Jahre]	7	12	14	
Jährliche Abschreibung und Verzinsung für Fahrzeug auf gesamten Nutzungszeitraum [T€]	23,2	17,1	18,5	
Jährlicher Material-, Instandhaltungs- und Versicherungskosten [T€]	11,5	10,8		
Anschaffungskosten Ersatzenergiespeicher, mittlerer Wert [T€]	-		165	
Förderung Ersatzenergiespeicher bei 80 % Fördersatz [T€]	-		132	
Eigenanteil Ersatzenergiespeicher für VU [T€]	-		33	
Abschreibungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	-		5	
Nutzungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	-		6	
Jährliche Abschreibung und Verzinsung Ersatzenergiespeicher [T€]	-		6	
Jahresfahrleistung [km]	50.000			

Tabelle 38

Eingangsgrößen für Fahrzeugkalkulation in Mühlhausen je Fahrzeug

Werte je Fahrzeug	Var. MHL 1	Var. MHL 2	Var. MHL 3	Var. MHL 4
Spezifischer Kraftstoff-/ Energieverbrauch je km	0,3355 kg/km	0,4025 l/km ¹⁰	1,25 kWh/km	
Energie-/ Kraftstoffkosten je km [€/km]	0,26	0,42	0,29 ¹¹	0,23 ¹²
Mittlerer Jahresheizenergieverbrauch für chem. Heizung [kWh/km]	-		0,63	
Kosten chem. Heizen [€/km]	-		0,11	
Reifen-/Verbrauchsstoffkosten je km [€/km]	0,03	0,04		

Gemäß der Investitionsrichtlinie des Freistaates Thüringen erfüllen die Erdgasbusse auch die Anforderungen für die Alternativen Antriebe. Deshalb sind die Förderkosten ebenfalls mit dem Höchstsatz ermittelt worden. Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, ist eine Nachladestation an der Endhaltestelle Weißes Haus notwendig, um den gesamten Tagesbedarf an Energie bereitzustellen. An dieser Ladestation soll während der Wendezeit zwischen zwei Umläufen das Fahrzeug mittels einer Schnellladelösung geladen werden. Die zu erwartenden Kosten werden unter Berücksichtigung der aktuellen Investitionsrichtlinie für den ÖPNV des Freistaates Thüringen in nachfolgender Tabelle 39 dargestellt. Die Kosten für die Gastankstelle (ca. 700 € je Fahrzeug) sind von den Verkehrsunternehmen abgefragt worden und bei den Instandhaltungskosten der Gasfahrzeuge eingerechnet.

	Var. MHL 1	Var. MHL 2	Var. MHL 3	Var. MHL 4
Kosten Ladestation [T€]	-		200	
Förderung [T€]	-		160	
Eigenanteil VU [T€]	-		40	
Verzinsungssatz [%]	-		3	
Abschreibungsdauer Infrastruktur [Jahre]	-		12	
Nutzungsdauer Infrastruktur [Jahre]	-		15	
Jährliche Abschreibung und Verzinsung auf gesamte Nutzungsdauer bezogen [T€]	-		3,3	
Jährliche Instandhaltungskosten pro Ladestation [T€]	-		7	

Tabelle 39
Eingangsgroßen Infrastrukturkalkulation in Mühlhausen

¹⁰ Basiert auf mittleren Durchschnittsverbrauch aller 4 anderen Städte mit Dieselbus

¹¹ Bei 0,23 €/kWh Energiekosten (Angabe VU)

¹² Bei 0,18 €/kWh Energiekosten (Annahme EBF)

	Var. MHL 1	Var. MHL 2	Var. MHL 3	Var. MHL 4
Gesamtkosten [T€]	574	503	1.291	
Fördermittel [T€]	215	140	713	
Eigenanteil VU [T€]	359	363	578	

Abschließend sollen die zu erwartenden Gesamtkosten für das Verkehrsunternehmen und der Fördermittelbedarf innerhalb von 15 Betriebsjahren angegeben werden. Hierbei werden der Einfluss von Inflation und weiteren kostenändernden Ereignissen nicht berücksichtigt. Das inhaltliche Fortbestehen der Investitionsrichtlinie wird ebenfalls vorausgesetzt, so dass auch bei Folge- bzw. Ersatzanschaffungen diese Anwendung findet.

	Var. MHL 1	Var. MHL 2	Var. MHL 3	Var. MHL 4
Abschreibung/ Verzinsung Fahrzeuge [T€]	770	454	660	
Abschreibung/ Verzinsung Infrastruktur [T€]	-	-	50	
Summe Anschaffung/ Verzinsung (VU) [T€]	770	454	710	
Betriebskosten Fahrzeuge [T€]	788	1.026	1.001	902
Summe Betriebskosten Infrastruktur (VU) [T€]	21	-	105	105
Summe Betriebskosten (VU) [T€]	809	1.026	1.110	1.010
Summe finanzieller Aufwand für VU [T€]	1.580	1.480	1.820	1.720
Fördermittelaufwand Fahr- zeuge [T€]	645	280	1.633	
Fördermittelaufwand Infra- struktur [T€]	-	-	160	
Summe Fördermittelauf- wand [T€]	645	280	1.793	

Tabelle 41

Kostenaufwand für das
VU und Fördermittelauf-
wand über 15 Betriebs-
jahre in Mühlhausen

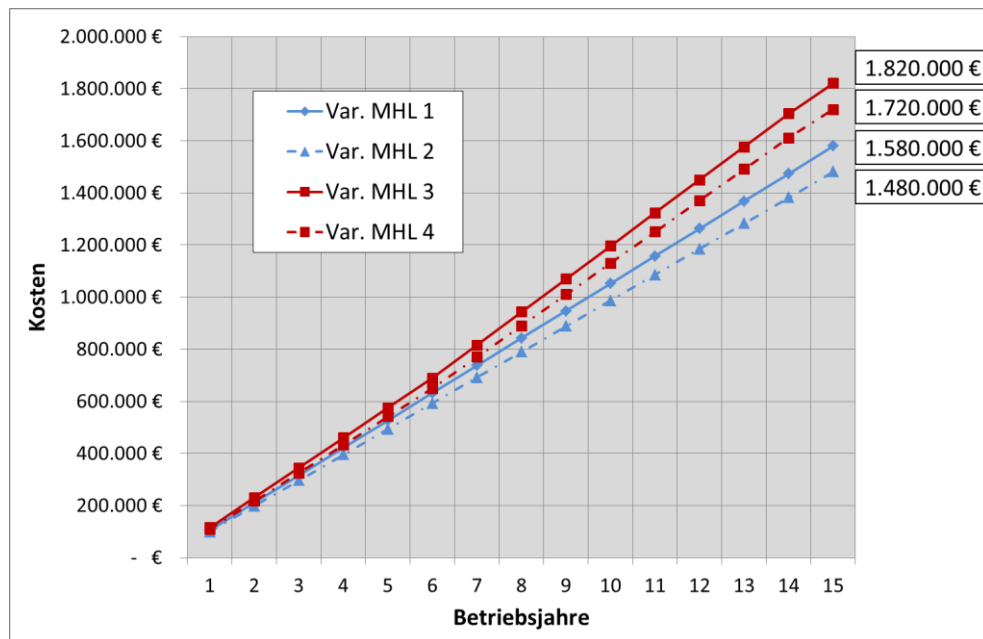


Abb. 49
Kosten für VU innerhalb
von 15 Betriebsjahren in
Mühlhausen

In Abb. 49 ist zu erkennen, dass aufgrund der geringen Jahresfahrleistung die Mehrkosten in der Anschaffung nicht durch geringere Energiekosten kompensiert werden können. Nach Rücksprache mit dem VU sind für die Kalkulation nur 2 Fahrzeuge zu berücksichtigen, da andere Umläufe auf der Linie im Mischbetrieb bedient werden und ein rein elektrischer Betrieb dieser Fahrzeuge nicht ganzjährig realisierbar ist. Somit ergeben sich analog zu den Varianten in Eisenach relativ große Kostenunterschiede. Ursache hierfür sind ebenfalls die Kosten für die Infrastruktur, die nur auf eine sehr kleine Anzahl an Fahrzeugen umzulegen geht. Der Dieselbus (Var. MHL 2) stellt sich als günstigste Variante heraus. Hierbei ist zu beachten, dass die angenommenen Werte für Anschaffung, Instandhaltung, Kraftstoffverbrauch und Kraftstoffkosten den Mittelwerten aus den anderen 4 Städten mit Dieselfahrzeugen entsprechen.

	Var. MHL 1	Var. MHL 2	Var. MHL 3	Var. MHL 4
Fahrzeugkosten [€/km]	1,02	0,97	1,08	1,02
Infrastrukturkosten [€/km]	0,01	-	0,10	0,10
Gesamt [€/km]	1,03	0,97	1,18	1,12

Tabelle 42
Kosten je Kilometer auf der
untersuchten Linie 5 in
Mühlhausen je Fahrzeug

In nachstehender Tabelle soll noch der Einfluss einer 2 %-igen und 4 %-igen Kostensteigerung pro Jahr auf die Gesamtkosten dargestellt werden.

	Var. MHL 1	Var. MHL 2	Var. MHL 3	Var. MHL 4
Gesamtkosten ohne Kostensteigerung [T€]	1.580	1.480	1.820	1.720
Gesamtkosten mit 2 % Kostensteigerung pro Jahr [T€]	1.856	1.740	2.143	2.027
Gesamtkosten mit 4 % Kostensteigerung pro Jahr [T€]	2.191	2.055	2.536	2.398

Tabelle 43
Übersicht der Gesamtkosten nach 15 Betriebsjahren bei einer jährlichen Kostensteigerung von 2 bzw. 4 % für Mühlhausen

5.2.4 Suhl / Zella-Mehlis

In Suhl / Zella-Mehlis sind folgende Annahmen für die Kalkulation getroffen worden.

Variante SHL 1: 12 m-Dieselbus, Kompakt-Klimaanlage für Fahrerplatz und Fahrgastinnenraum

Variante SHL 2: 12 m- Elektrobus, Kompakt-Klimaanlage für Fahrerplatz und Fahrgastinnenraum

Variante SHL 3: 12 m- Elektrobus, Kompakt-Klimaanlage für Fahrerplatz und Fahrgastinnenraum

Tabelle 44
Eingangsgrößen für Fahrzeugkalkulation in Suhl / Zella-Mehlis je Fahrzeug

Werte je Fahrzeug	Var. SHL 1	Var. SHL 2	Var. SHL 3
Einzusetzende Fahrzeuge [-]	3		
Anschaffungskosten [T€]	225	495	
Grundförderung [T€]	70	70	
Mehrkostenförderung bei 75 % Fördersatz [T€]	-	202,5	
Summe Fördermittelaufwand [T€]	70	272,5	
Eigenanteil für VU [T€]	151	222,5	
Verzinsungssatz [%]	1,98		
Abschreibungsdauer [Jahre]	9	12	
Nutzungsdauer [Jahre]	11	14	
Jährliche Abschreibung und Verzinsung für Fahrzeug auf gesamten Nutzungszeitraum [T€]	15,6	18,1	
Jährlicher Material-, Instandhaltungs- und Versicherungskosten [T€]	8,4		
Anschaffungskosten Ersatzenergiespeicher, mittlerer Wert [T€]	-	165	
Förderung Ersatzenergiespeicher bei 80 % Fördersatz [T€]	-	132	
Eigenanteil Ersatzenergiespeicher für VU [T€]	-	33	
Abschreibungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	-	5	
Nutzungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	-	6	
Jährliche Abschreibung und Verzinsung Ersatzenergiespeicher [T€]	-	6	
Jahresfahrleistung [km]	52.600		
Spezifischer Kraftstoff-/ Energieverbrauch je km	0,4041 l/km	1,275 kWh/km	
Energie-/ Kraftstoffkosten je km [€/km]	0,42	0,28 ¹³	0,23 ¹⁴
Mittlerer Jahresheizenergieverbrauch für chem. Heizung [kWh/km]	-	0,63	
Kosten chem. Heizen [€/km]	-	0,10	
Reifen-/Verbrauchsstoffkosten je km [€/km]	0,10		

¹³ Bei 0,222 €/kWh Energiekosten (Angabe VU)

¹⁴ Bei 0,18 €/kWh Energiekosten (Annahme EBF)

Wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben, ist eine Nachladestation an der Endhaltestelle Busbahnhof Kommerstraße vorgesehen, um den gesamten Tagesbedarf an Energie bereitzustellen. An dieser Ladestation soll während der Wendezeit zwischen zwei Umläufen das Fahrzeug mittels einer Schnellladelösung geladen werden. Die zu erwartenden Kosten werden unter Berücksichtigung der aktuellen Investitionsrichtlinie für den ÖPNV des Freistaates Thüringen in nachfolgender Tabelle 45 dargestellt.

	Var. SHL 1	Var. SHL 2	Var. SHL 3
Kosten Ladestation [T€]	-	200	
Förderung [T€]	-	160	
Eigenanteil VU [T€]	-	40	
Verzinsungssatz [%]	-	3	
Abschreibungsdauer Infrastruktur [Jahre]	-	12	
Nutzungsdauer Infrastruktur [Jahre]	-	15	
Jährliche Abschreibung und Verzinsung auf gesamte Nutzungsdauer bezogen [T€]	-	3,3	
Jährliche Instandhaltungskosten pro Ladestation [T€]	-	7	

Tabelle 45
Eingangsgroßen Infrastrukturmalkulation in Suhl / Zella-Mehlis

	Var. SHL 1	Var. SHL 2	Var. SHL 3
Gesamtkosten [T€]	726		1.678
Fördermittel [T€]	210		978
Eigenanteil VU [T€]	516		700

Tabelle 46
Erstinvestitionskosten
und Fördermittelbedarf in
Suhl / Zella-Mehlis

Abschließend sollen die zu erwartenden Gesamtkosten für das Verkehrsunternehmen und der Fördermittelbedarf innerhalb von 15 Betriebsjahren angegeben werden. Hierbei werden der Einfluss von Inflation und weiteren kostenändernden Ereignissen nicht berücksichtigt. Das inhaltliche Fortbestehen der Investitionsrichtlinie wird ebenfalls vorausgesetzt, so dass auch bei Folge- bzw. Ersatzanschaffungen diese Anwendung findet.

	Var. SHL 1	Var. SHL 2	Var. SHL 3
Abschreibung/ Verzinsung Fahrzeuge [T€]	703	920	
Abschreibung/ Verzinsung Infrastruktur [T€]	-	50	
Summe Anschaffung/ Verzinsung (VU) [T€]	703	970	
Betriebskosten Fahrzeuge [T€]	1.617	1.525	1.395
Summe Betriebskosten Infrastruktur (VU) [T€]	-	105	105
Summe Betriebskosten (VU) [T€]	1.617	1.630	1.500
Summe finanzieller Aufwand für VU [T€]	2.320	2.600	2.470
Fördermittelaufwand Fahrzeuge [T€]	420	2.031	
Fördermittelaufwand Infrastruktur [T€]	-	160	
Summe Fördermittelaufwand [T€]	420	2.191	

Tabelle 47

Kostenaufwand für das VU und Fördermittelaufwand über 15 Betriebsjahre in Suhl / Zella-Mehlis

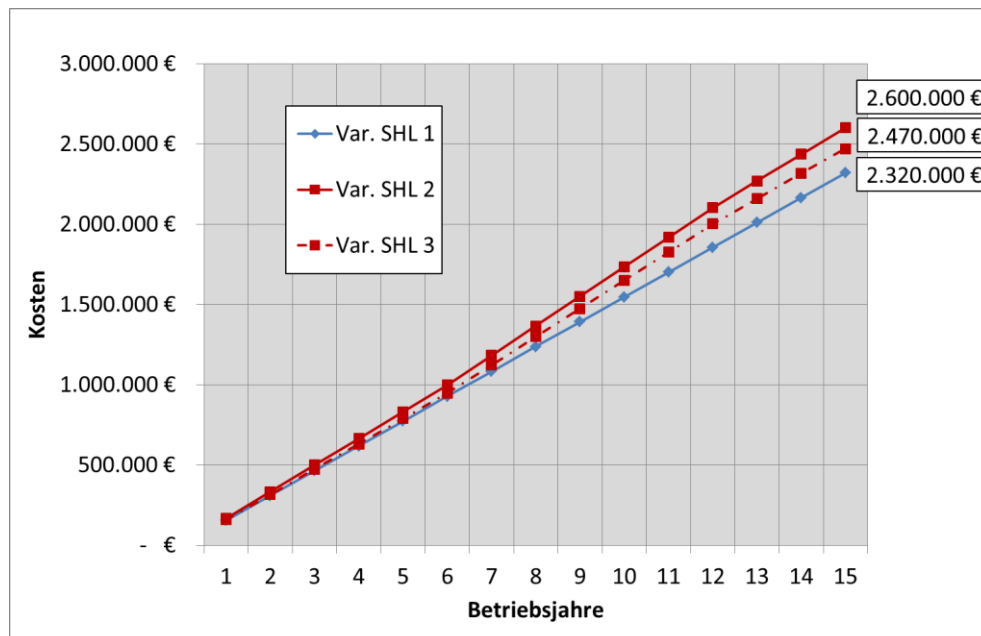


Abb. 50

Kosten für VU innerhalb von 15 Betriebsjahren in Suhl / Zella-Mehlis

In Abb. 50 ist zu erkennen, dass die Kosten zwischen dem Dieselbus (Var. SHL 1) und den kostengünstigen E-Bus (Var. SHL 3) sich nicht in Größenordnungen unterscheiden und prinzipiell ein annähernd kostengleicher Betrieb realisierbar ist. Aufgrund der Tatsache,

dass an der Haltestelle Kommerstraße alle Linien enden bzw. beginnen, besteht die Möglichkeit die E-Bus-Flotte auszubauen und somit die spezifischen Kosten für die Infrastruktur zu reduzieren.

.....
Betriebswirtschaftliche
Betrachtung
.....

	Var. SHL 1	Var. SHL 2	Var. SHL 3
Fahrzeugkosten [€/km]	0,98	1,03	0,98
Infrastrukturkosten [€/km]	-	0,07	0,07
Gesamt [€/km]	0,98	1,10	1,05

Tabelle 48
Kosten je Kilometer auf der untersuchten Linie A1 / A2 in Suhl / Zella-Mehlis je Fahrzeug

In nachstehender Tabelle soll noch der Einfluss einer 2 %-igen und 4 %-igen Kostensteigerung pro Jahr auf die Gesamtkosten dargestellt werden.

	Var. SHL 1	Var. SHL 2	Var. SHL 3
Gesamtkosten ohne Kostensteigerung [T€]	2.320	2.600	2.470
Gesamtkosten mit 2 % Kostensteigerung pro Jahr [T€]	2.729	3.063	2.914
Gesamtkosten mit 4 % Kostensteigerung pro Jahr [T€]	3.222	3.619	3.443

Tabelle 49
Übersicht der Gesamtkosten nach 15 Betriebsjahren bei einer jährlichen Kostensteigerung von 2 bzw. 4 % für Suhl / Zella-Mehlis

5.2.5 Weimar

In Weimar sind folgende Annahmen für die Kalkulation getroffen worden.

Variante WE 1: 12 m-Dieselbus, vollklimatisiert

Variante WE 2: 12 m-Elektrobus, vollklimatisiert

Variante WE 3: 12 m-Elektrobus, vollklimatisiert, angepasste Energiekosten

Tabelle 50
Eingangsgrößen für Fahrzeugkalkulation in Weimar je Fahrzeug

Werte je Fahrzeug	Var. WE 1	Var. WE 2	Var. WE 3
Einzusetzende Fahrzeuge [-]	2	3	
Anschaffungskosten [T€]	220	495	
Grundförderung [T€]	70	70	
Mehrkostenförderung bei 75 % Fördersatz [T€]	-	206,5	
Summe Fördermittelaufwand [T€]	70	276,5	
Eigenanteil für VU [T€]	150	218,5	
Verzinsungssatz [%]	3		
Abschreibungsdauer [Jahre]	6	12	
Nutzungsdauer [Jahre]	12	14	
Jährliche Abschreibung und Verzinsung für Fahrzeug auf gesamten Nutzungszeitraum [T€]	14,8	18,9	
Jährlicher Material-, Instandhaltungs- und Versicherungskosten [T€]	20,6		
Anschaffungskosten Ersatzenergiespeicher, mittlerer Wert [T€]	-	165	
Förderung Ersatzenergiespeicher bei 80 % Fördersatz [T€]	-	132	
Eigenanteil Ersatzenergiespeicher für VU [T€]	-	33	
Abschreibungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	-	5	
Nutzungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	-	5	
Jährliche Abschreibung und Verzinsung Ersatzenergiespeicher [T€]	-	7,1	
Jahresfahrleistung [km]	61.300		
Spezifischer Kraftstoff-/ Energieverbrauch je km	0,46 l/km	1,5 kWh/km	
Energie-/ Kraftstoffkosten je km [€/km]	0,48	0,35 ¹⁵	0,27 ¹⁶
Mittlerer Jahresheizenergieverbrauch für chem. Heizung [kWh/km]	-	0,63	
Kosten chem. Heizen [€/km]	-	0,09	
Reifen-/Verbrauchsstoffkosten je km [€/km]	0,01		

¹⁵ Bei 0,233 €/kWh Energiekosten (keine Angabe VU, Mittelwert aus anderen 4 Städten)

¹⁶ Bei 0,18 €/kWh Energiekosten (Annahme EBF)

Wie in Kapitel 2.2.5 dargestellt wurde, kommen zwei Ladestationen in Frage. Zum einen an der Shakespearestraße oder der Bodelschwingstraße. Für die Kostenbetrachtungen ist nur die Variante mit Ladestation an der Bodelschwingstraße betrachtet worden. Aufgrund der notwendigen Anpassung des Fahrplans ist ein weiteres Fahrzeug für den ganzen Tagesumlauf notwendig. Aus diesem Grund fallen für die zwei E-Busvarianten (Var. WE 2 und 3) zusätzlich Personalkosten für 3 Fahrer pro Jahr von 108.000 € an.

Für die zu errichtende Infrastruktur an der Bodelschwingstraße sind die bei der Kalkulation angenommenen Kosten in Tabelle 51 dargestellt.

	Var. WE 1	Var. WE 2	Var. WE 3
Kosten Ladestation [T€]	-	200	
Förderung [T€]	-	160	
Eigenanteil VU [T€]	-	40	
Verzinsungssatz [%]	-	3	
Abschreibungsdauer Infrastruktur [Jahre]	-	12	
Nutzungsdauer Infrastruktur [Jahre]	-	15	
Jährliche Abschreibung und Verzinsung auf gesamte Nutzungsdauer bezogen [T€]	-	3,3	
Jährliche Instandhaltungskosten pro Ladestation [T€]	1,25	7	

Tabelle 51
Eingangsgrößen Infrastrukturkalkulation in Weimar

	Var. WE 1	Var. WE 2	Var. WE 3
Gesamtkosten [T€]	494	1.829	
Fördermittel [T€]	140	989	
Eigenanteil VU [T€]	354	840	

Tabelle 52
Erstinvestitionskosten und Fördermittelbedarf in Weimar

Abschließend sollen die zu erwartenden Gesamtkosten für das Verkehrsunternehmen und der Fördermittelbedarf innerhalb von 15 Betriebsjahren angegeben werden. Hierbei werden der Einfluss von Inflation und weiteren kostenändernden Ereignissen nicht berücksichtigt. Das inhaltliche Fortbestehen der Investitionsrichtlinie wird ebenfalls vorausgesetzt, so dass auch bei Folge- bzw. Ersatzanschaffungen diese Anwendung findet.

	Var. WE 1	Var. WE 2	Var. WE 3
Abschreibung/ Verzinsung Fahrzeuge [T€]	442	1.041	
Abschreibung/ Verzinsung Infrastruktur [T€]	-	50	
Summe Anschaffung/ Verzinsung (VU) [T€]	442	1.091	
Betriebskosten Fahrzeuge [T€]	1.525	2.157	1.937
Summe Betriebskosten Infrastruktur (VU) [T€]	19	105	105
Summe Betriebskosten (VU) [T€]	1.544	2.262	2.042
Summe finanzieller Aufwand für VU [T€]	1.986¹⁷	3.353¹⁸	3.134¹⁹
Fördermittelaufwand Fahr- zeuge [T€]	280	2.450	
Fördermittelaufwand Infra- struktur [T€]	-	160	
Summe Fördermittelauf- wand [T€]	280	2.610	

Tabelle 53
Kostenaufwand für das VU und
Fördermittelaufwand über 15
Betriebsjahre in Weimar

¹⁷ 2.970 T€ bei drei Dieselfahrzeugen

¹⁸ 4.973 T€ mit Personalkosten für drei Fahrer

¹⁹ 4.754 T€ mit Personalkosten für drei Fahrer

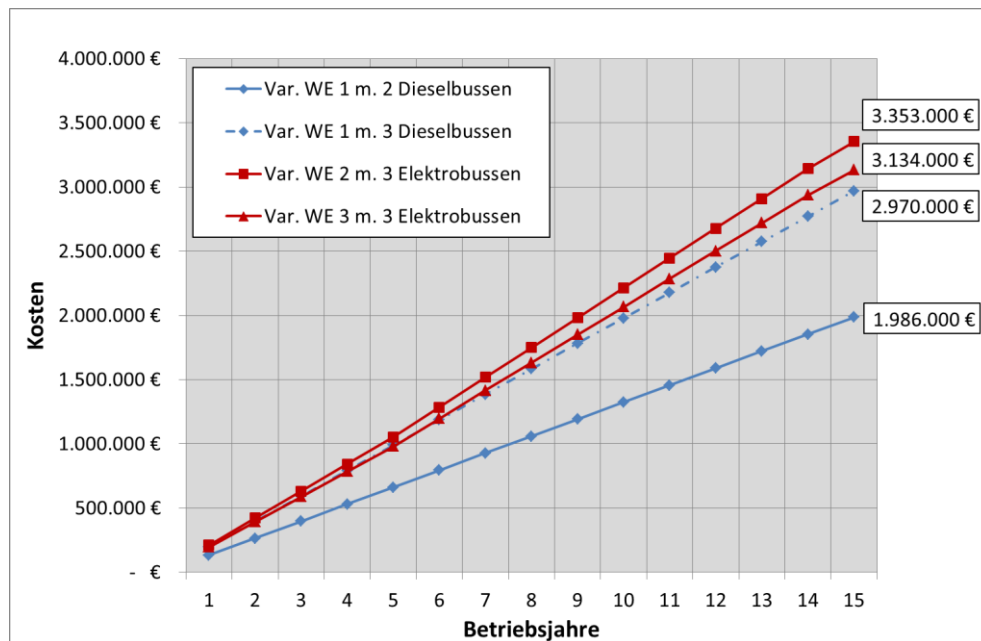


Abb. 51
Kosten für VU innerhalb
von 15 Betriebsjahren in
Weimar

In Abb. 51 ist zu erkennen, dass die Kosten zwischen dem Dieselbus (Var. WE 1) und den E-Busvarianten (Var. WE 2 und 3) sich stark unterscheiden. Ursache dafür ist das zusätzlich einzusetzende Fahrzeug. Betrachtet man hingegen die drei Graphen mit je 3 Fahrzeugen, so erkennt man, dass grundsätzlich der E-Bus, bei vergleichbarer Anzahl an Fahrzeugen, annähernd kostengleich zum Dieselbus betrieben werden kann (Differenz < 200 T€). Das zusätzlich einzusetzende Personal verursacht jährliche Kosten in Höhe von 108.000 €. Somit erhöhen sich die Kosten innerhalb von 15 Betriebsjahren um 1.620.000 €.

	Var. WE 1	Var. WE 2	Var. WE 3
Fahrzeugkosten [€/km]	1,07	1,16	1,08
Infrastrukturkosten [€/km]	0,01	0,06	0,06
Gesamt [€/km]	1,08	1,22	1,14

Tabelle 54
Kosten je Kilometer auf der
untersuchten Linie 2 in
Weimar je Fahrzeug

In nachstehender Tabelle 55 soll noch der Einfluss einer 2 %-igen und 4 %-igen Kostensteigerung pro Jahr auf die Gesamtkosten dargestellt werden.

	Var. WE 1	Var. WE 2	Var. WE 3
Gesamtkosten ohne Kosten- steigerung [T€]	1.986	3.353	3.134
Gesamtkosten mit 2 % Kos- tensteigerung pro Jahr [T€]	2.336	4.132	3.875
Gesamtkosten mit 4 % Kos- tensteigerung pro Jahr [T€]	2.757	4.888	4.583

Tabelle 55
Übersicht der Gesamtkosten
bei einer jährlichen Kosten-
steigerung von 2 bzw. 4 %
für Weimar

6 Probetriebe in thüringischen Städten und Dresden

Probetriebe in thüringischen
Städten und Dresden

Nach den Ergebnissen der Studie „Konzept für eine städteübergreifende Einführung von elektrisch angetriebenen Linienbussen in Thüringen“ (2014) sind in verschiedenen Städten im Freistaat Thüringen Probetriebe durchgeführt worden. Nachfolgend sollen die Erkenntnisse der verschiedenen VU zeitlich geordnet zusammengefasst und ohne Wertung wiedergegeben werden.

6.1 Nordhausen

- Testzeitraum: 25.11. bis 27.11.2014
- Witterung: kein Frost, Tagesmitteltemperaturen von +3 °C
- Mittlere Sonnenscheindauer: 2,3 h
- Getestetes Fahrzeug: Bozankaya Sileo (10,7 m)
- Befahrene Linie: Linie A (Karl-Liebknecht-Platz, Salza – Pferdemarkt)
- Ausstattung, Klimatisierung/Heizung: 3-Türen, Klima-light, Dieselstandheizung

Testtag	25.11.2014	27.11.2014
Fahrtstrecke	146 km	148 km
Verbrauchte Energie ²⁰	152,3 kWh	144,4 kWh
Spez. Energieverbrauch	1,04 kWh/km	0,98 kWh/km

Tabelle 56
Werte aus Testbetrieb in
Nordhausen (25.11. bis
27.11.14)

Das Fahrzeug ist auf einem realen Umlauf der Linie A eingesetzt worden. Die Fahrer empfanden das Fahren recht angenehm. Als besonders positiv ist die variable Rekuperation genannt worden, welche es dem Fahrer herstellerbedingt ermöglicht bis fast zum Stillstand Energie zu rekuperieren. Während des Testzeitraumes traten keinerlei Probleme mit Komponenten des Elektroantriebsstranges auf.

Als weniger positiv wurden Probleme mit flackernden Anzeigen und Beleuchtung benannt. Laut VU gab es gegebenenfalls Probleme mit der 24 VDC Bordnetzversorgung. Diese Annahme lässt sich durch immer wiederkehrenden ABS-Fehler verstärken. Zu Beginn des Tages gab es Probleme mit dem Zündverhalten der Standheizung, welche verhältnismäßig starke Geräusche von sich gab. Neben der Verarbeitung im Innenraum, welche laut Aussage des VU nicht ganz den Ansprüchen deutscher Verkehrsunternehmen entsprach, schliffen bei Kurvenfahrten im Kreisverkehr die Räder im Radhaus.

Zusammenfassend bestätigt der Vertreter des VU, dass das elektrische Fahren mit dem Fahrzeug einen positiven Gesamteindruck hinterlässt und die genannten Mängel ließen sich seiner Meinung nach beheben.

²⁰ Ablesewert von Ladegerät, keine andere Messung erfolgt

6.2 Erfurt

.....
 Probetriebe in thüringischen
 Städten und Dresden

6.2.1 E-Bus Europa

- Testzeitraum: 20.02. bis 27.02.2015
- Witterung: mittlere Tagestemperaturen von +2 °C, trocken
- Sonnenscheindauer: 4,6 h
- Getestetes Fahrzeug: E-Bus Europa (12 m)
- Befahrene Linie: Linie 9 (Daberstedt - Nordbahnhof)
- Ausstattung, Klimatisierung/Heizung: 2-Türen, keine Klima, Dieselstandheizung

Testtag	23.02.2015	24.02.2015 ²¹	20.02. – 27.02.2015
Fahrtstrecke	167 km	113 km	280
Verbrauchte Energie ²²	208 kWh	204,5 kWh	412,5
Spez. Energieverbrauch	1,25 kWh/km	1,81 kWh/km	1,47 kWh/km
Dieserverbrauch	-	-	52 l
Spez. Dieserverbrauch	-	-	0,186 l/km

Tabelle 57
 Werte aus Testbetrieb E-Bus
 Europa in Erfurt (20.02. bis
 27.02.15)

²¹ Defekt Fahrzeug

²² realer Energieverbrauch inkl. Wirkungsgrad des Ladegerätes

Tabelle 58

Ergebnisse Fahrerauswertung E-Bus Europa in Erfurt (20.02. bis 27.02.15)
[Quelle: Erfurter Verkehrsbetriebe, Hr. Nitschke]

Bewertungskriterium	Note
Motorisierung	gut / ausreichend
Bremsen (Dosierbarkeit/Wirkung)	2,0
Schaltpunkte/Abstufung	3,0
Federung	2,5
Lenkung	1,5
Heizung	1,5
Lüftung	1,3
Klima	ohne
Armaturenbrett	2,3
Innenlautstärke	2,3
Gesamteinschätzung	2,5
Bemerkungen	- Ausfall Schmierung + Kompressor - E-Motor + Antriebsachse defekt (Fahrzeug stillgelegt)

Das Fahrzeug des Herstellers E-Bus Europa war für eine Woche zum Probefahrerbetrieb in Erfurt. In dieser Zeit absolvierte das Fahrzeug an nahezu 2 Einsatztagen 280 km. Am zweiten Tag gab es einen Defekt im Antriebsstrang, der das Fahrzeug fahruntfähig machte, so dass das Fahrzeug mit aufwendiger Technik in den Betriebshof geschleppt werden musste. Den Rest der Zeit wurde das Fahrzeug in der Werkstatt abgestellt. Aus diesem Grund sind die Testergebnisse nur bedingt verwertbar. Die Bewertung der Fahrer sind der Tabelle 58 zu entnehmen.

6.2.2 Bozankaya Sileo (12 m)

- Testzeitraum: 28.02. bis 09.03.2015
- Witterung: mittlere Tagestemperaturen von +3 °C, trocken
- Mittlere Sonnenscheindauer: 4,2 h
- Getestetes Fahrzeug: Bozankaya Sileo (12 m)
- Befahrene Linie: Linie 9 (Daberstedt - Nordbahnhof)
- Ausstattung, Klimatisierung/Heizung: 2-Türen, Klima-light, Dieselstandheizung

Testtag	03.03.15	04.03.15	28.02. – 09.03.2015 ²³
Fahrtstrecke	179 km	156 km	677 km
Verbrauchte Energie ²⁴	211 kWh	233 kWh	715
Spez. Ener- gieverbrauch	1,18 kWh/km	1,49 kWh/km	1,06 kWh/km
Dieseler- brauch	-	-	61 l
Spez. Diesel- verbrauch	-	-	0,09 l/km

Tabelle 59
Werte aus Testbetrieb Sileo
12 m in Erfurt (28.02. bis
09.03.15)

²³ Weitere Einzelaufschlüsselung für die restlichen Tage aus Aufzeichnungen nicht möglich

²⁴ realer Energieverbrauch ab „Steckdose“

Tabelle 60

Ergebnisse Fahrerauswertung für Sileo 12 m in Erfurt
(28.02. bis 09.03.15)
[Quelle: Erfurter Verkehrsbetriebe, Hr. Nitschke]

Bewertungskriterium	Note
Motorisierung	gut
Bremsen (Dosierbarkeit/Wirkung)	1,4
Schaltpunkte/Abstufung	1,3
Federung	1,9
Lenkung	2,0
Heizung	1,2
Lüftung	1,3
Klima	2,0
Armaturenbrett	1,3
Innenlautstärke	2,2
Gesamteinschätzung	2,1
Bemerkungen	- allgemein gutes Fahrverhalten - keine Tankanzeige für Heizung - Türen klebten nach Wäsche

Der 12 m-Sileo von Bozankaya hat einen positiven Gesamteindruck hinterlassen. Ebenfalls wie in Nordhausen bemerkte man, dass das Fahrzeug noch nicht 100 % für den deutschen Markt aufgearbeitet ist.

6.3 Bad Langensalza

6.3.1 Bozankaya Sileo (10,7 m)

- Testzeitraum: 26.03. bis 27.03.2015; mittl. Tagestemperaturen von +7 °C; trocken; mittl. Sonnenscheindauer: 0,8 h
- Testzeitraum: 19.05. bis 22.05. 2015; mittl. Tagestemperaturen von +12 °C; trocken; mittl. Sonnenscheindauer: 8,1 h
- Testzeitraum: 26.05.2015; mittl. Tagestemperaturen von +11 °C; trocken; mittl. Sonnenscheindauer: 0,5 h
- Getestetes Fahrzeug: Bozankaya Sileo (10,7 m)
- Befahrene Linie: Stadtverkehr Bad Langensalza
- Ausstattung, Klimatisierung/Heizung: 3-Türen, Klima-light, Dieselstandheizung

Datum	km Stand Anfang	km Stand Ende	Gefahrene km	kWh Stand Anfang	kWh Stand Ende	Geladen kWh	Verbrauch kWh/km
26.03.	6.901,0	7.113,0	212,0	40.137,0	40.357,0	220	1,038
27.03.	7.113,0	7.238,0	125,0	40.357,0	40.492,0	135	1,080
19.05.	8.078,5	8.265,5	187,0	41.265,0	41.470,0	205	1,096
20.05.	8.265,5	8.431,8	166,3	41.470,0	41.665,0	195	1,173
21.05.	8.431,8	8.607,7	175,9	41.665,0	41.850,0	185	1,052
22.05.	8.607,7	8.763,5	155,8	41.850,0	42.028,0	178	1,142
26.05.	8.763,5	8.948,0	184,5	42.028,0	42.256,0	228	1,236
Gesamt	-	-	1.206,5			1.346	1,117

Tabelle 61
Werte aus Testbetrieb Sileo
10,7 m in Bad Langensalza
(26.03. bis 27.03.15;
19.05. bis 26.05.15)
[Quelle: Salztours König
OHG, 2015]

6.3.2 SOR EBN (9,5 m)

- Testzeitraum: 27.04. bis 30.04.2015; mittl. Tagestemperaturen von +9 °C; trocken; mittl. Sonnenscheindauer: 5,6 h
- Testzeitraum: 04.05. bis 08.05.; mittl. Tagestemperaturen von +15 °C; trocken; mittl. Sonnenscheindauer: 7,2 h
- Testzeitraum: 11.05.; mittl. Tagestemperaturen von +14 °C; trocken; mittl. Sonnenscheindauer: 11,6 h
- Getestetes Fahrzeug: SOR EBN 9,5 (9,5 m)
- Befahrene Linie: Stadtverkehr Bad Langensalza
- Ausstattung, Klimatisierung/Heizung: 1-2-Türen, Fahrerplatzklimatisierung, Dieselselbstheizung

Datum	km Stand Anfang	km Stand Ende	Gefahrene km	kWh Stand Anfang	kWh Stand Ende	Geladen kWh	Verbrauch kWh/km
27.04.	47.941,8	48.030,0	88,2	55.695,1	55.767,3	72,2	0,819
28.04.	48.030,0	48.204,3	174,3	55.767,3	55.905,3	138,0	0,792
29.04.	48.204,3	48.367,1	162,8	55.905,3	56.027,8	122,5	0,752
30.04.	48.367,1	48.506,5	139,4	56.027,8	56.135,7	107,9	0,774
04.05.	48.506,5	48.667,3	160,8	56.135,7	56.261,4	125,7	0,782
05.05.	48.667,3	48.860,0	192,7	56.261,4	56.404,4	143,0	0,742
06.05.	48.860,0	49.036,0	176,0	56.404,4	56.544,1	139,7	0,794
07.05.	49.036,0	49.216,0	180,0	56.544,1	56.693,1	149,0	0,828
08.05.	49.216,0	49.395,0	179,0	56.693,1	56.772,1	79,0	0,441
11.05.	49.395,0	49.474,8	79,8	56.772,1	56.881,1	109,0	1,366
Gesamt	-	-	1.533			1.186	0,809

Tabelle 62
Werte aus Testbetrieb
SOR 9,5 EBN in Bad Langensalza (27.04. bis 30.04.15; 04.05. bis 08.05.15; 11.05.)
[Quelle: Salztours König OHG, 2015]

Zusammenfassung Probefahrten in Bad Langensalza

In Bad Langensalza sind zwei Fahrzeuge getestet worden. Zum einen der Sileo 10,7 m und zum anderen der SOR EBN 9,5. Beide Fahrzeuge gehören zur Midi-Busklasse und wurden nachts im Depot geladen. Die Fahrzeuge haben vergleichbare Tagesumläufe absolviert. Der SOR ist in einem längeren Zeitraum getestet worden und hat sich insbesondere durch einen geringeren spezifischen Verbrauch ausgezeichnet. Der Vorteil aus Sicht des VU war, dass das Testfahrzeug ein im Liniendienst in Tschechien befindliches Fahrzeug war. Es hatte bereits ca. 50.000 km absolviert. Des Weiteren war während der gesamten Testphase ein Mitarbeiter des Herstellers vor Ort, der die Fahrer auch schulte, wie man die geringsten Energieverbräuche erzielt. Das VU und die Fahrer haben dies als sehr positiv empfunden. In naher Zukunft soll noch der SOR EBN 8 getestet werden. Laut Aussage des Herstellers verfügt er über denselben Batteriesatz und soll aufgrund der kleineren Abmessungen und der geringeren Masse sogar noch weniger Energie verbrauchen. Dadurch soll die gewünschte Reichweite seitens des VU von 200 km erreicht werden.

Im direkten Vergleich sind beide Fahrzeuge doch sehr unterschiedlich. Der Sileo ist mit Achsen aus deutscher Produktion ausgestattet im Gegensatz zum SOR, der auf eigen entwickelten Achsen bzw. auf Achsen aus tschechischer Produktion basiert. verarbeitungstechnisch sind beide getesteten Fahrzeuge solide gewesen und es wurden keine Mängel entdeckt.

6.4 Weimar

- Testzeitraum: 11.05. bis 18.05.2015
- Witterung: mittlere Tagestemperaturen von +13 °C, trocken
- Mittlere Sonnenscheindauer: 10,5 h
- Getestetes Fahrzeug: Bozankaya Sileo (12 m)
- Befahrene Linie: Linie 2 (Shakespearestr. – Bodelschwinghstr.)
- Ausstattung, Klimatisierung/Heizung: 2-Türen, Klima-light, Dieselstandheizung

Testtag	11.05.15 ²⁵	12.05.15	13.05.15	15.05.15	18.05.15	11.05.15 bis 18.05.15
Fahrtstrecke	260 km	68,2 km	86 km	92,2 km	96,1 km	602 km
Verbrauchte Energie ²⁶	209,3 kWh	80,5 kWh	123,4 kWh	155 kWh ²⁷	128,2 kWh	703,3 kWh
Spez. Energieverbrauch	0,81 kWh/km	1,18 kWh/km	1,43 kWh/km	1,68 kWh/km	1,33 kWh/km	1,17 kWh/km

Tabelle 63
Werte aus Testbetrieb
Sileo 12 m in Weimar
(11.05. bis 18.05.15)

²⁵ Überführungsfahrt nach Weimar

²⁶ realer Energieverbrauch inkl. Wirkungsgrad des Ladegerätes

²⁷ Inkl. Erhaltungsladung von ca. 1 kW je Stunde bis zum 18.05.15

In Tabelle 63 ist ersichtlich, dass der spezifische Verbrauch sich im Stadtverkehr erheblich von Werten im Überlandverkehr unterscheidet. So beträgt der spezifische Verbrauch während des Tests in Weimar 1,42 kWh/km (vom 12.05. bis 18.05.). Dieser Wert ist im Vergleich zu den anderen Städten verhältnismäßig hoch. Dafür kann es verschiedene Erklärungen geben. Zum einen wurde das Fahrzeug von Fahrern bewegt, die bisher wenig bis keine Erfahrung mit elektrisch fahrenden Fahrzeugen besitzen. Dies zeigt, dass neben der Anschaffung der Fahrzeuge eine Schulung des Fahrpersonals unabdingbar ist, um die Fahrzeuge energiesparend zu bewegen. Des Weiteren zeigen die Daten aus Weimar, dass der Energieverbrauch bei der sog. Erhaltungsladung von ca. 1 kW verhältnismäßig hoch ist. Dadurch kommt der relative hohe spezifische Verbrauch von 1,68 kWh/km zwischen dem 15.05. und 18.05. zu Stande. Angaben über Besonderheiten im Betrieb sind nicht gemacht worden.

.....
 Probefahrten in thüringischen
 Städten und Dresden

6.5 EDDA-Bus Dresden

Projektkurzbeschreibung

In Dresden wurde seit November 2014 ein, im Rahmen des vom BMBF geförderten SEB-Teilprojektes EDDA-Bus, entwickelter 12 m - Elektrobus im täglichen Linienbetrieb getestet. Das Fahrzeug wurde von einem Konsortium, bestehend aus Industrie- und Verkehrsunternehmen sowie dem Fraunhofer IVI, entwickelt und in einem seriennahen Stand erprobt. Kernstück des Projektes bildet dabei ein auf dem Fahrzeugdach montiertes induktives Hochstromübertragungssystem mit wegseitiger Ladestation. Die Ladestation wurde auf dem Betriebsgelände der Dresdner Verkehrsbetriebe AG in Dresden Gruna errichtet. Das Fahrzeug wurde als Verstärkerfahrzeug im realen Fahrgastbetrieb auf Teilstücken der Linie 61 sowie auf der Linie 85 eingesetzt.



Abb. 52
 Projektfahrzeug EDDA-
 Bus (Batteriebus mit
 Schnellladung)

Erste Phase der Praxiserprobung

.....
Probefetriebe in thüringischen
Städten und Dresden
.....

Im Zeitraum vom 03.11.2014 bis zum 30.01.2015 erfolgte die im Projektablauf vorgesehene Praxiserprobung. Hierbei befuhr das Fahrzeug einen gegenüber den ursprünglichen Planungen erweiterten Rundkurs mit 14,4 km Umlauflänge zwischen dem Betriebshof Gruna und dem Endpunkt der Linie 61 in Löbtau.

Die im Projekt entwickelten Kerntechnologien Batteriespeicher, Ladestation und Kontaktsystem mit Automatisierungslösung zeigten nahezu vom Beginn der Erprobung an eine zum Normalbetrieb von konventionellen Fahrzeugen vergleichbare Verfügbarkeit.

Nach anfänglich auftretenden Fehlern von Standardkomponenten (Standheizung, Elektrotraktion) konnten diese im Verlauf der Erprobung durch Mitarbeiter des Fraunhofer IVI unter Einbeziehung von Werkstattkapazitäten der DVB schrittweise minimiert werden.

Wurde in den ersten Wochen bis zum Jahreswechsel 2014/15 eine Gesamtverfügbarkeit von 77 % erreicht, lag diese im Januar 2015 bereits bei 91 %.

Auf insgesamt 9.400 km ergab sich ein durchschnittlicher Energiebedarf von 1,19 kWh/km ab Kontaktsystem. Es wurden im Mittel 4:30 min. Nachladezeit für den Ausgleich der Energiebilanz des Fahrzeugenergiespeichers nach jedem Umlauf benötigt.

Der Übertragungswirkungsgrad der Ladestation wurde mit 94,7 % ermittelt, dieser Wert änderte sich in den anschließenden Phasen der Praxiserprobung lediglich marginal.

Zweite Phase der Praxiserprobung

Aufgrund der erzielten Projektergebnisse entschlossen sich die DVB und das Fraunhofer IVI zur Beantragung einer dreimonatigen, kostenneutralen Projektverlängerung für eine Erweiterung der Praxiserprobung. Dem Antrag wurde seitens des Projektträgers statt gegeben und der Projektzeitraum bis 30.04.2015 ausgedehnt.

Im Zeitraum vom 02.02.2015 bis zum 27.03.2015 befuhr das Fahrzeug erneut einen Rundkurs zwischen dem Betriebshof Gruna und einem anderen Endpunkt der Linie 61 in Bühlau.

Die befahrene Strecke war mit 19,5 km Umlauflänge und einem Streckenabschnitt mit starker Streckenneigung (Grundstraße) gegenüber dem Linienumlauf der ersten Phase deutlich anspruchsvoller hinsichtlich der Leistungsbeanspruchung des Fahrzeuges.

Die im Projekt entwickelten Kerntechnologien Batteriespeicher, Ladestation und Kontaktsystem mit Automatisierungslösung zeigten auch in der zweiten Phase der Praxiserprobung eine zum Normalbetrieb von konventionellen Fahrzeugen vergleichbare Verfügbarkeit.

Es wurde eine Gesamtverfügbarkeit von 94 % erreicht.

Auf insgesamt 5.100 km ergab sich ebenfalls ein durchschnittlicher Energiebedarf von 1,19 kWh/km ab Kontaktsystem. Es wurden im Mittel 6:30 min. Nachladezeit für den Ausgleich der Energiebilanz des Fahrzeugenergiespeichers nach jedem Umlauf benötigt.

Dritte Phase der Praxiserprobung

Vom 30.03.2015 an war das Fahrzeug bis zum Ende des verlängerten Projektzeitraums auf einem Rundkurs mit 15,5 km Umlauflänge zwischen dem Betriebshof Gruna und einem Endpunkt der Linie 85 in Löbtau-Süd eingesetzt.

Nach anfänglich notwendig gewordenen Reparaturarbeiten am Batteriespeicher (ausgefallener Temperatursensor) zeigen die im Projekt entwickelten Kerntechnologien Batteriespeicher, Ladestation und Kontaktsystem mit Automatisierungslösung weiterhin eine zum Normalbetrieb von konventionellen Fahrzeugen vergleichbare Verfügbarkeit.

Auf den absolvierten 3.800 km ergab sich ein leicht erhöhter durchschnittlicher Energiebedarf von 1,22 kWh/km ab Kontaktsystem. Die Ursache hierfür wird in der gegenüber den zuvor befahrenen Rundkursen geringeren Umlaufgeschwindigkeit vermutet. Mit einem nochmaligen Anstieg wird durch den Einsatz der Fahrerarbeitsplatzklimatisierung bei steigenden Umgebungstemperaturen gerechnet.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Fahrerbefragung

Probefetriebe in thüringischen
Städten und Dresden

Mittels mit dem Gesamtbetriebsrat der DVB AG abgestimmtem Fragebogen wurden die Fahrer um eine Einschätzung des Fahrzeuges mit Schnellladung mit Benotungen von 1 (sehr gut) bis 5 (ungenügend) gebeten. Es wurden folgende Bewertungen als durchschnittliche Werte der von allen 11 regelmäßig eingesetzten Fahrern ausgefüllten Fragebögen ermittelt.

Bewertungskriterium	Ø Note	Tabelle 64 Fahrerbefragung EDDA-Bus Dresden
Fahrerarbeitsplatz/Bedienung Bedienelemente, Lenkrad, Fahrerfenster, Fahrertür, Fahrersitz, Heizung/ Klimatisierung, Einsicht, Spiegel, Türbedienung, Türöffnungsgeschwin- digkeit, Fahrgastrückhaltesystem, Geräuschempfinden Fahrerarbeitsplatz	1,53	
Bedienungsaufwand Schnellladesystem	1,27	
Fahrverhalten Beschleunigung, Bremsen, Lenkeinschlag, Kurvenfahrverhalten, Kurven- anfahrt, Kurvendurchfahrt, Federung, Nick- und Wankbewegungen	1,76	
Fahrgasttauglichkeit Sitzplätze, Stehplätze, Ein- und Ausstieg (Türen), Fahrräder/ Kinderwa- genmitnahme, Fahrgastverteilung im Fahrzeug, Be- und Entlüftung Fahr- zeug, Fußboden, Griffstangen/Halteschlaufen, Türöffnungs- und Schließ- zeiten	1,85	
Verwendbarkeit für die DVB	1,45	
Fahrgastmeinung Anfahren, Innenausstattung, Geräuschkulisse	1,55	

Die Ergebnisse der Studie belegen, dass dank des technologischen Fortschrittes bei batterieelektrischen Linienbussen und leistungsfähigen Nachladekonzepten die Substitution der konventionellen Antriebe unter realen, teils sehr anspruchsvollen Einsatzbedingungen, möglich ist. So wird die Einführung von Batteriebussen mit stationärer Nachladung auf den Linien in Eisenach (Linie 2), Mühlhausen (Linie 5) und Suhl/Zella-Mehlis (Linie A1/A2) aus technischer Sicht als machbar eingestuft. Für diese Städte konnte anhand der durchgeführten Energiebilanzrechnungen gezeigt werden, dass ein sicherer Tagesumlauf der Busse unter den zu Grunde liegenden Einsatzbedingungen nur unter Verwendung einer stationären Nachladung an Endpunkten und bei Einsatz von chemischen Heizsystemen möglich ist. Unter ungünstigen Einsatzbedingungen (hohe Außentemperatur, Fahrzeugklimatisierung) ist die ausschließliche Nachladung über Nacht im Depot aufgrund der Restriktionen durch den Batteriespeicher (begrenzte gravimetrische und volumetrische Energiedichte -> Masse und Volumen sowie der erheblichen Speicherkosten) nicht möglich. Im Gegensatz zu den o.g. Linien kann für die untersuchten Linien der Städte Altenburg (Linie S) und Weimar (Linie 2) eine Einführung von Batteriebussen nur bei einer Anpassung des Betriebsablaufes gelingen. Darüber hinaus wird diesen zwei Städten eine Mitarbeit in einem F&E-Projekt empfohlen, dessen Ziel eine Vergrößerung der Reichweite durch den Einsatz von Energieanhängern sein soll. Dadurch soll die Nachladezeit deutlich reduziert und im besten Fall der Einsatz durch eine Depotladung in der Nacht realisiert werden.

Hinsichtlich der zu erwartenden Umwelteffekte wurden an ausgewählten Querschnitten die Einsparungen bzgl. Luftschadstoffe und Feinstaub anhand der vermiedenen warmen Emissionen nachgewiesen. Je nach Stadt, betrachteten Querschnitt und dem vorherrschenden Fahrzeugaufkommen konnten relative Reduzierung beim NO_x zwischen 3,6 % und 18,0 % ermittelt werden. Beim Feinstaub betrug die Spanne zwischen 1,9 % und 10,1 %. Die kleinsten relativen Einsparungen wurden in Weimar (Querschnitt Jenaer Str.) und die höchsten in Altenburg (Querschnitt Kauerndorfer Allee) ausgewiesen, wobei die Höhe und die Zusammensetzung des Fahrzeugaufkommens am jeweiligen Querschnitt maßgeblich das Ergebnis beeinflusst.

Einen deutlichen Beitrag zum Klimaschutz hingegen kann durch die vermiedenen CO₂-Emissionen erreicht werden, wenn die eingesetzte elektrische Energie aus regenerativen Quellen bezogen wird. In Summe aller Städte ist eine jährliche Einsparung an CO₂ von ca. 1.000 Tonnen zu erwarten, wenn die betrachteten Linien auf elektrischen Betrieb umgestellt werden.

In den Untersuchungen wurde in Zusammenarbeit mit den involvierten Verkehrsunternehmen eine prognostische Abschätzung der zu erwartenden Kosten einer Umstellung auf Batteriebusbetrieb vorgenommen und den derzeit eingesetzten, konventionell betriebenen Bussen gegenüber gestellt. Hierbei fand die aktuelle Investitionsrichtlinie des Freistaates Thüringen, welche alternative Antriebstechnologien besonders berücksichtigt, Anwendung.

Im Ergebnis zeigte sich, dass in allen Städten zunächst von höheren Investitionsaufwendungen bei der Einführung von Batteriebussen zu rechnen ist, die aufgrund der hohen Förderung jedoch moderat ausfallen. Darüber hinaus wurden anhand der jährlich aufzubringenden Kapital-, Betriebs- und Energiekosten Szenarien für einen 15-jährigen Einsatzhorizont abgeleitet. Hier zeigt sich, dass insbesondere die hohen Stromkosten (25 ct/kWh) bei gleichzeitig geringen Kraftstoffkosten (Diesel 1,03 €/Liter) zu einem unwirtschaftlichen Betrieb führen, wenn als Basis die Preise aus dem Jahr 2014 herangezogen werden. In der Studie „Konzept für eine städteübergreifende Einführung von elektrisch angetriebenen Linienbussen in Thüringen“ (2014/EBF und IVI) sind andere Ergebnisse erzielt worden. Hauptursache für die Kostenunterschiede ist der Sachverhalt, dass aufgrund eines wesentlich höheren Energieverbrauchs in den 5 Straßenbahnstädten deutlich niedrigere Energie-

kosten von ca. 12 ... 17 ct/kWh bzw. Kraftstoffkosten von 1,09 €/Liter (Bezugsjahr 2012) angesetzt wurden. Zusätzlich waren deutlich kürzere Nutzungszeiten der Dieselbusse von 8 Jahren zu verzeichnen. Dieser positive Effekt der Energiekosten wird auch in den 5 untersuchten Städten dieser Studie eintreten, doch kann zum jetzigen Zeitpunkt die Höhe nicht quantifiziert werden, da deren Ermittlung Bestandteil einer weiteren Studie zur Bereitstellung und Erzeugung der benötigten Energie ist. Es sei erwähnt, dass bereits eine leichte Steigerung der Dieselskosten oder ein günstigerer Bezugspreis für den Strom das Szenario zu Gunsten des Elektrobusses beeinflusst. Bei Städten mit sehr wenigen Fahrzeugen haben zudem die spezifischen Kosten für die Infrastruktur (Ladestation) einen größeren Einfluss und trüben somit den überaus positiven Umweltaspekt für die jeweilige Stadt. Die spezifischen Kosten der Infrastruktur können durch die Nutzung von mehreren Elektrobussen deutlich reduziert werden. Dieser Effekt stellt sich besonders in Eisenach und Suhl ein, wenn viele Fahrzeuge die zentral gelegenen Nachladestationen ohne Veränderung der Linienführung nutzen können.