

EBF DRESDEN GMBH
FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR VERKEHRS- UND INFRASTRUKTURSYSTEME IVI

AKTUALISIERTER ENDBERICHT

Konzept für eine städteübergreifende Einführung von elektrisch angetriebenen Linienbussen in Thüringen

Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Hörold, EBF Dresden GmbH

Dipl.-Ing. (FH) Matthias Breilkopf, Fraunhofer IVI

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

Dresden, Februar 2015

Inhalt

1	Einleitung.....	3
2	Technische Vorbetrachtungen.....	4
2.1.1	Heizen.....	5
2.1.2	Klimatisieren	6
2.1.3	Geschwindigkeitsprofile	7
2.1.4	Energiespeicher	7
2.1.5	Ladestation und Fahrleitung	7
3	Stationäre Nachladung bei Variation der Energiespeichergröße	8
3.1	Erfurt	8
3.2	Gera	11
3.3	Gotha.....	13
3.4	Jena	16
4	Variation der Fahrleitungslänge	18
4.1	Erfurt	18
4.2	Gera	23
4.3	Gotha.....	26
4.4	Jena	31
5	ÖPNV–Investitionsrichtlinie 2015	36
6	Kostenkalkulation und Systemvergleich	37
6.1	Erfurt	39
6.2	Gera	44
6.3	Gotha.....	49
6.4	Jena	54
6.5	Nordhausen	59
7	Zusammenfassung.....	64

Durch die EBF Dresden GmbH und das Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme wurde im Zeitraum August 2013 bis Juni 2014 eine Untersuchung zur Einführung elektrisch betriebener Stadtbusse für ausgewählte Linien in den Straßenbahnstädten Erfurt, Gera, Gotha, Jena und Nordhausen im Auftrag des Thüringer Ministeriums für Bau, Landesentwicklung und Verkehr durchgeführt¹. Es wird auf die vorliegenden Berichte verwiesen.

Ziel der Untersuchung war die Erarbeitung von technischen Umsetzungskonzepten für die Fahrzeugtechnik und den damit in Zusammenhang stehenden Nachladelösungen, die Abschätzung ökologischer Wirkungen sowie eine Prognose zu erwartender Kosten.

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 in den 4 Städten, auf denen vorwiegend 18-Meter-Gelenkzüge eingesetzt werden, partielle Obus-Systeme vorgeschlagen. Lediglich für die Stadt Nordhausen konnte aufgrund des Einsatzes von 12-Meter-Solobussen ein weniger aufwändiges punktuell Nachladesystem empfohlen werden.

Anhand der durchgeführten Berechnungen zur Energiebilanz konnte erwartungsgemäß gezeigt werden, dass neben dem Antrieb besonders die Temperierung des Fahrgastinnenraumes bei niedrigen oder hohen Außentemperaturen (Heizen und Klimatisieren) maßgeblich den Energiebedarf bestimmen. Somit musste die technische Umsetzungsempfehlung dem Energiebedarf im Worst Case - Fall, der im Betrieb bei einer Außentemperatur von -20 °C anzusetzen ist, genügen. Für eine 100%-ige Emissionsfreiheit im Betrieb war demzufolge eine elektrische Energieversorgung aller Verbraucher einschließlich des Heizsystems zu berücksichtigen. In Konsequenz dieser Herangehensweise mussten entsprechend hohe nachzuladende Energiemengen berücksichtigt werden, welche aufgrund der begrenzten Speicherkapazität und Leistungsfähigkeit heutiger Batteriespeicher nur durch entsprechend lange Nachladezeiten realisiert werden können. Dies führte in den Städten mit partiellem Obus-Betrieb zu großen Fahrleitungslängen, welche bis zu 2/3 der gesamten Linienlänge betrug und einen entsprechend hohen Investitionsaufwand bedeuten.

Es erscheint daher aus wirtschaftlichen Gründen angebracht und legitim, Alternativen für die Temperierung des Fahrgastinnenraumes zu berücksichtigen, sowohl für das Heizen als auch für die in einigen Städten übliche Vollklimatisierung. Im vorliegenden Nachtrag zur eingangs genannten Untersuchung wurden daher die Betrachtungen dahingehend erweitert, dass ein Heizen mit chemischer Energie und die Klimatisierung mit eingeschränkter Temperierung (Klima-Light) zusätzlich berücksichtigt wurden. Entsprechende technische Auswirkungen, besonders im Hinblick auf die Nachladeinfrastruktur, sowie die sich einstellenden Kostenreduzierungspotentiale waren abzuleiten.

Darüber hinaus liegt für den Freistaat Thüringen 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 dieses Nachtrages zu berücksichtigen.

¹ EBF Dresden GmbH, Fraunhofer IVI: Konzept für eine städteübergreifende Einführung von elektrisch angetriebenen Linienbussen in Thüringen; 2014

2 Technische Vorbetrachtungen

Anhand der bisherigen Berechnungen der Energiebilanzen und der entsprechend notwendigen Ladeinfrastruktur ist in den Grenzfällen (Außentemperatur $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bzw. $40\text{ }^{\circ}\text{C}$) besonders das Heiz- und Klimatisierungskonzept zu hinterfragen. Hierbei ist auf den hohen Energiebedarf beim Heizen zu verweisen, der bei einer Außentemperatur von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durchaus 2,5- bis 3-mal größer sein kann, als für die Traktion benötigt wird (siehe Tabelle 01). Dieser maximale Energiebedarf, der den Aufwand für die Nachladeinfrastruktur bestimmt, wird nur sehr selten benötigt. Der entsprechend hohe bauliche Aufwand (große Fahrleitungslängen) verursacht erhebliche finanzielle Aufwendungen, die die vorgeschlagenen Elektrifizierungslösungen der Linien grundsätzlich unwirtschaftlich erscheinen lassen.

Auf Initiative des Auftraggebers wurde deshalb die Untersuchung von technisch realisierbaren Varianten für das Heizen und Klimatisieren angeregt, die den elektrischen Energiebedarf reduzieren und damit zur Kostensenkung beitragen.

Um die Relevanz des Sachverhaltes Heizen bzw. Klimatisieren besser einordnen zu können, wurden alle Tagestiefst-, Tageshöchst- und Tagesmitteltemperaturen in der Zeit zwischen dem 21.07.1954 und dem 19.07.2014 zu Grunde gelegt und nach deren Häufigkeit sortiert. Als Datenbasis dienen die verfügbaren Werte der Messstation Erfurt-Weimar.

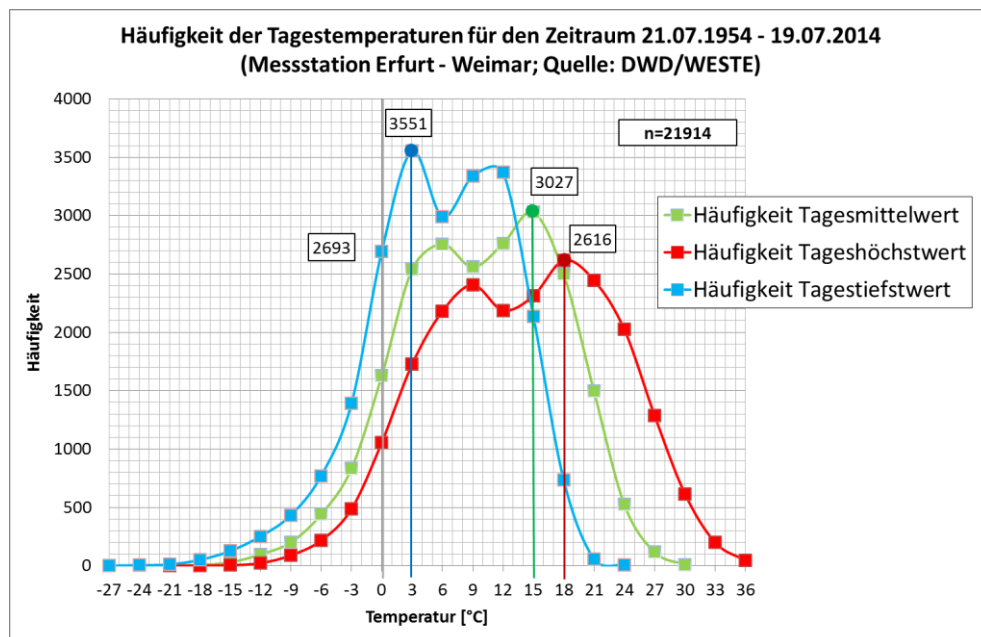


Abb. 01 Häufigkeitsverteilung der Tagestemperaturen

Der betrachtete Zeitraum in Abb. 01 umfasst insgesamt 21.914 Tage (ca. 60 Jahre). Aus der Statistik der letzten 10 Jahre ist zu ermitteln, dass

- die Anzahl der Tage mit Höchstwerten von $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ und darüber durchschnittlich nur an 4 Tagen im Jahr und
- die Anzahl der Tage mit Tiefstwerten von $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ und darunter durchschnittlich nur an 3 Tagen im Jahr

auftreten.

2.1.1 Heizen

In den vorangegangenen Untersuchungen wurden für die Beheizung der Fahrzeuge rein elektrische Heizungskonzepte unterstellt, was in der Konsequenz zu erheblichen Energieverbrauchswerten führte (siehe Tabelle 01).

	Erfurt (-20 °C)	Gera (-20 °C)	Gotha (-20 °C)	Jena (-20 °C)	Nordhausen (-20 °C)
Traktionsenergie [kWh/km]	1,4	1,5	1,5	1,4	0,9
Energie Heizung [kWh/km]	3,4	2,6	3,2	3,5	2,8
Energie Nebenaggre- gate [kWh/km]	0,5	0,4	0,5	0,5	0,3
Verluste Traktionsbat- terien [kWh/km]	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4
Gesamtenergiebedarf [kWh/km]	5,7	4,9	5,6	5,7	4,4

Tabelle 01
Ergebnisse für den Energie-
bedarf bei -20 °C aus Phase
1 der Studie (2013)

Durch eine wiederholte Fachrecherche und Diskussionen mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ist man zu dem Schluss gekommen, dass ein chemisches Heizen derzeit aus technischer und wirtschaftlicher Sicht durchaus eine sinnvolle Lösung darstellt. Einschränkung ist zu erwähnen, dass mit einem chemischen Heizsystem ein 100 %-ig emissionsfreier Betrieb nicht möglich ist (siehe Tabelle 02).

Schadstoff	EURO 5	EURO 6	Spheros Thermo S 300
CO [g/kWh]	1,5	1,5	0,06
NO _x [g/kWh]	2,0	0,4	0,38
HC [g/kWh]	0,5	0,13	0,02

Tabelle 02
Abgaswerte der Spheros
Thermo S Heizgeräte im
Vergleich zu den Anforde-
rungen an Nfz-
Verbrennungsmotoren
(Quelle: www.spheros.de;
abgefragt am 17.02.2015)

Laut der Angabe des Herstellers würde das Heizgerät bei Volllast, d. h. 1 Stunde Dauerbetrieb bei voller Leistung (2 x 30 kW), Emissionen von 3,6 Gramm Kohlenmonoxid (CO), 22,8 Gramm Stickoxide (NO_x) und 1,2 Gramm Kohlenwasserstoffe (HC) verursachen. Bei einem Kraftstoffverbrauch je Heizgerät von ca. 4 l/h im Volllastbetrieb werden etwa 21,2 kg CO₂ je Stunde emittiert.

Durch eine Ereignissteuerung, wie sie heutzutage schon in Fahrzeugen zum Einsatz kommt, kann man zudem in Unterführungen oder an Haltestellen ausschließen, dass die Emissionen der chemischen Heizung zu direkten Beeinträchtigungen führen. Dies ist auch bei niedrigen Außentemperaturen möglich, da durch die thermische Trägheit des Fahrgastinnenraums dieser verhältnismäßig langsam seine Temperatur ändert. Durch den zeitlich begrenzten Aufenthalt in abgastechnisch besonders sensiblen Bereichen sollte für den Fahrgast das Nichtheizen kaum spürbar sein.

Unter Berücksichtigung einer chemischen Heizung sollte anhand von Energiebilanzrechnungen geprüft werden,

- ab welcher Energiespeichergröße ein Fahrzeug den kompletten Tagesumlauf bei einer stationären Nachladung absolvieren könnte und
- in welchem Umfang sich bei partiellem Fahrleistungsbetrieb die vorzusehende Fahrleistungslänge reduzieren lässt.

Die Vorgehensweise entspricht dabei der des Zwischen- und Abschlussberichts.

Für die Simulationen des chemischen Heizens wurden die Charakteristika einer Zusatzheizung der Firma Spheros vom Typ Thermo S 300 genutzt. Diese mit 30 kW Heizleistung starke Wasserheizung ist Stand der Technik und wird in zahlreichen Fahrzeugen genutzt. Gegenüber Dieselfahrzeugen fehlt in einem Elektrobuss die Heizleistung eines Verbrennungsmotors, weshalb bei den Simulationsrechnungen für die 18 m-Gelenkzüge mit einem zweiten Heizgerät gerechnet wurde. Die damit zur Verfügung stehenden 60 kW Heizleistung reichen aus, um auch bei minus 20 °C das Fahrzeug komfortabel zu beheizen.

Heizleistung	2 x 30 kW
Kraftstoffverbrauch	4 l/h
Kraftstoff	Heizöl EL gemäß DIN 51603
unterer Heizwert	43 MJ/kg
Kraftstoffdichte	823 kg/m ³

Tabelle 03
Technische Daten der Zusatzheizung

2.1.2 Klimatisieren

Drei der vier thüringischen Städte mit eingesetzten 18 m-Gelenkbussen fordern für den Betrieb ihrer Fahrzeuge eine Vollklimatisierung des Fahrgastraums. Dieser Komfort muss mit einem höheren Energieverbrauch erkaufte werden. Bei Dieselfahrzeugen kann der Dieselmotorkraftstoffverbrauch durch eine Vollklimatisierung um bis zu zehn Prozent zunehmen. Einige Verkehrsbetriebe verzichten daher aus ökonomischen und ökologischen Gründen bewusst auf eine Klimatisierung des Fahrgastraums, auch wenn dies nicht den VDV-Vorgaben entspricht. In diesem Fall erfolgt die Kühlung lediglich durch Luftaustausch über die Türen, Fenster und Dachluken des Fahrzeugs. Der Fahrer Arbeitsplatz verfügt dagegen in fast allen Fällen über eine eigene Klimatisierung.

Zwischen dem Weglassen einer Klimatisierung und einer Vollklimatisierung stehen Klimaanlage (Klima-light), welche den Fahrgastinnenraum auf 3 K unter der Außentemperatur abkühlen, so wie es der VDV als Mindestkriterium fordert. Diese Anlagen weisen einen hohen Wirkungsgrad auf und können direkt am 24 V-Bordnetz betrieben werden. Eine derartige Klimaanlage bietet beispielsweise das Modell Citysphere der Fa. Spheros. Diese Klimaanlage wurde u. a. mit dem EBUS Award 2014 des Forums für Verkehr und Logistik unter der Schirmherrschaft des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur im Bereich „Innovative Komponenten - Klimatisierung“ ausgezeichnet. Diese Anlagen werden häufig in derzeitigen Elektrobussen, aber auch bei Anhängersystemen und in Dieselnissen eingesetzt.

Um den energetischen Unterschied der verschiedenen Klimatisierungsmethoden hervorzuheben, wurden für die Umlaufrechnungen auch Fahrten mit einer derartigen Klimaanlage wiederholt und der Vollklimaanlage gegenübergestellt.

Nennspannung	24 VDC
Kälteleistung	3,8 kW
Stromaufnahme	72 A
Gewicht	50 kg
Anzahl im Fahrzeug	3

Tabelle 04
Technische Daten der
Citysphere-Anlage der Fa.
Spheros

Gegenüber den Simulationen im Oktober 2013 konnte das für die Rechnungen hinterlegte Klimatisierungsmodell von einem Zweikörper- auf ein Fünfkörpermodell erweitert werden. Des Weiteren konnten die Kennfelder und Daten einer Klimaanlage mit Wärmepumpe genauer abgebildet werden - die neuen Daten erhöhen mitunter die Energieeffizienz der Klimaanlage. Daher können sich die Ergebnisse der Simulationen aus dem Jahr 2013 gegenüber denen in diesem Bericht unterscheiden.

2.1.3 Geschwindigkeitsprofile

Es werden die bereits vorhandenen Geschwindigkeitsprofile und Tagesumläufe verwendet. Die den Rechnungen zu Grunde liegenden Geschwindigkeitsprofile wurden im tatsächlichen Linienbetrieb eines Dieselfahrzeugs messtechnisch erfasst. Das Fahrzeug im Simulationsmodell versucht nun genau dieses Geschwindigkeitsprofil nachzufahren. Es ist daher gerade bei einer sehr großen Fahrzeugmasse und bei Verwendung eines großen Energiespeichers möglich, dass das Fahrzeug über längere Zeit im Volllastbereich betrieben werden wird. Die vorliegenden Ergebnisse werden sich daher von den Ergebnissen von Fahrzeugen, welche im Probetrieb von bewusst fahrenden Fahrern betrieben werden, mitunter deutlich unterscheiden.

2.1.4 Energiespeicher

Bei den Simulationen vom Oktober 2013 wurde der komplette Batteriespeicher mit einem Gebläse mittels Konvektionskühlung gekühlt, wobei die Lüfter insgesamt eine Leistung von 6,5 kW hatten. Durch die Temperaturempfindlichkeit der Batterien mussten die Lüfter nahezu den kompletten Tagesumlauf im Volllastbereich arbeiten. Eine eigene Klimaanlage für die Batterien ist bei derart hohen Temperaturen zweckmäßig. Diese kann bei einer hohen Wärmearbeitszahl von größer zwei, die anfallende Verlustwärme sehr effektiv abführen.

Noch effizienter wäre es, wenn die Batterien einen höheren Temperaturbereich abdecken können, wie bspw. Lithium-Yttrium-Zellen und damit eine Kühlung nahezu ganz entfallen könnte.

2.1.5 Ladestation und Fahrleitung

Wie in den vorherigen Untersuchungen wurde bei den Simulationen zur punktuellen Nachladung von 250 kW Ladeleistung ausgegangen. Ebenso blieben die Vorgaben von 90 kW Ladeleistung während des Fahrzeugstillstands und 240 kW während der Fahrt bei einer Anbindung an eine Fahrleitung bestehen.

3 Stationäre Nachladung bei Variation der Energiespeichergröße

Stationäre Nachladung bei
Variation der
Energiespeichergröße

In Kapitel 3 werden erweiterte Energiebilanzrechnungen für die entsprechenden Linien in Erfurt, Gera, Gotha und Jena durchgeführt. Es wird unter nachfolgenden Randbedingungen geprüft, mit welcher Energiespeichergröße ein punktuell Nachladesystem umsetzbar wäre. Bei Einsatz einer chemischen Heizung ist bei sehr hohen Außentemperaturen der höchste elektrische Energiebedarf vorhanden.

Heizung:	Chemische Standheizung
Klimatisierung:	Klima-light und Vollklimatisierung (außer Gera)
Worst Case - Fall:	Außentemperatur +40 °C

3.1 Erfurt

Als Standort für die punktuelle Nachladung mittels einer Ladestation mit einer Ladeleistung von 250 kW wurde in Erfurt die Haltestelle Nordbahnhof gewählt.

Abb. 02 zeigt den zeitlichen Verlauf des Ladezustands der Batterie, bei Variation des Speichereinhalts zwischen 220 und 395 kWh und wenn das Fahrzeug mit den Citysphere-Klimaanlagen klimatisiert werden würde. Bei einem Gesamtenergieinhalt von 220 kWh konnte das simulierte Fahrzeug nicht den gesamten Tagesumlauf absolvieren, sondern unterschritt nach 16 Stunden den unteren Grenzwert von fünf Prozent. Bei den Batterien mit größerem Energieinhalt konnte hingegen der komplette Tagesumlauf absolviert werden.

Der Energieverbrauch der Nebenaggregate ist weitgehend unabhängig von der Größe der Traktionsbatterie und beträgt 0,58 kWh/km. Gegenüber den Simulationen des Zwischenberichts senkt die Klimatisierung der Batterie den Verbrauch stark. Für die Klimatisierung werden durch den Einsatz der Klimaanlagen Citysphere von Spheros nur relativ geringe Energiemengen von 0,07 kWh/km benötigt. Die geforderte Abkühlung um drei Kelvin unter Außentemperatur konnte mit diesen Anlagen erreicht werden. Die Verluste der Traktionsbatterie, welche sich aus den Verlusten der Spannungswandler zum Laden und Entladen der Batterie sowie den inneren Verlusten in der Batterie zusammensetzen, betragen 0,27 kWh/km.

Die Vergrößerung des Energieinhalts der Traktionsbatterie geht mit einem deutlichen Massezuwachs einher, was sich im Traktionsenergiebedarf widerspiegelt. So steigt der Energiebedarf von 1,50 auf 1,56 kWh/km.

Beim Eintreffen im Depot lag der Ladezustand der Batterien zwischen 17 bis 33 Prozent, was einer theoretischen Restreichweite von 14,5 bis 44,6 km entspricht (vgl. Tabelle 05). Im Betriebshof müssten je nach Speichergröße zwischen 230 und 245 kWh nachgeladen werden. Diese Energiemenge kann mit einer 250 kW-Ladestation in etwa einer Stunde nachgeladen werden.

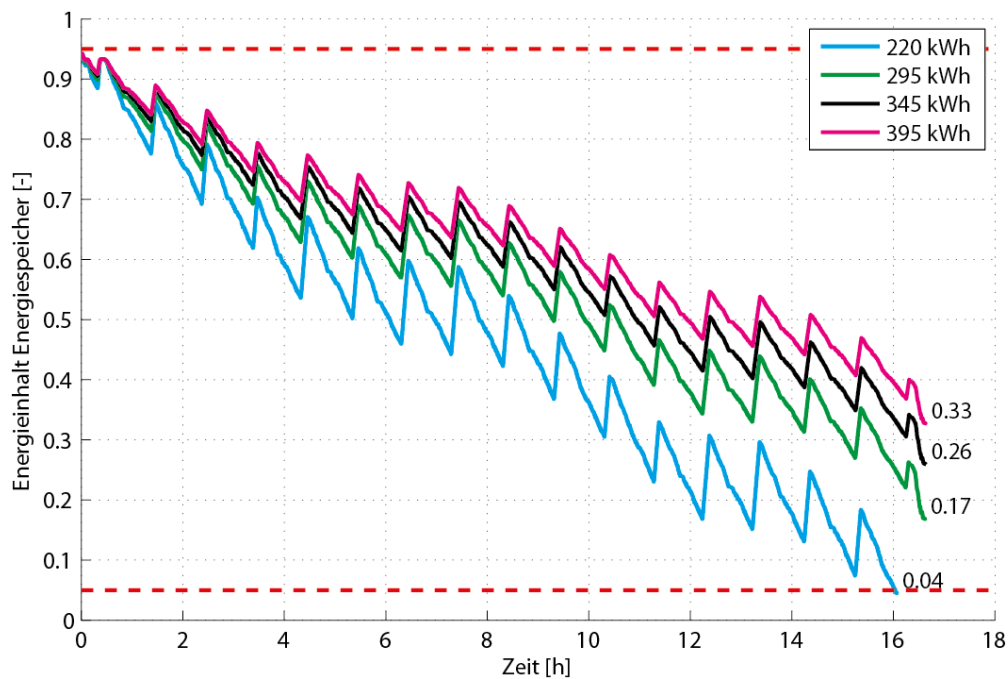


Abb. 02
Zeitlicher Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie bei punktueller Nachladung und 40 °C in Erfurt

Mit einer Restreichweite von 29,4 km bietet die Verwendung einer 345 kWh-Batterie genügend Reserven für den Linieneinsatz. Eine noch größere Reserve kann mit einer 395 kWh-Batterie erzielt werden. Eine weitere Vergrößerung des Energiespeichers erscheint darüber hinaus nicht notwendig.

	220 kWh	295 kWh	345 kWh	395 kWh
SOE _{Ende, Depot} [%]	k. A.	17	26	33
theor. Restreichweite [km]	k. A.	14,5	29,4	44,6
Ladung im Depot [kWh]	k. A.	230	238	245

Tabelle 05
Ladezustände und Reichweite bei Erreichen des Depots in Erfurt

Gegenüber der Betrachtung mit den Citysphere-Klimaanlagen, welche den Fahrgastraum lediglich drei Kelvin unter Außentemperatur abkühlen müssen, wird in Erfurt eine Vollklimatisierung des Fahrgastraums gefordert. Die Vorgabe der Maximaltemperatur des Fahrgastraums beträgt dabei 24 °C.

Abb. 03 zeigt den errechneten zeitlichen Verlauf des Batterieladezustands bei Vollklimatisierung. Die drei Varianten mit 220 kWh, 295 kWh sowie 345 kWh großen Batterien konnten den geforderten Tagesumlauf nicht komplett abschließen. Erst ab einer Batteriegröße von 395 kWh war dies möglich. Mit einem Ladezustand von 14 Prozent könnte das Fahrzeug noch eine Wegstrecke von ca. 12,6 km fahren. Mit einer 440 kWh großen Batterie stünde eine Restreichweite von 24,8 km zur Verfügung, was in etwa einem Umlauf vom Nordbahnhof über Daberstedt und zurück entsprechen würde (vgl. Tabelle 06).

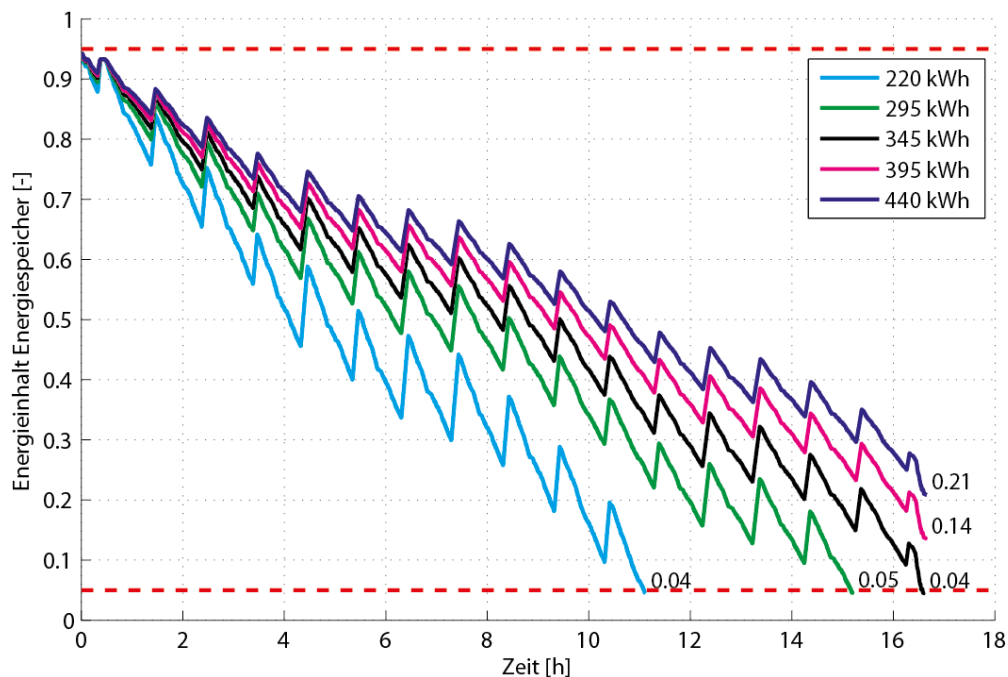


Abb. 03

Zeitlicher Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie bei punktueller Nachladung und 40 °C in Erfurt mit Vollklimatisierung

Im Betriebshof müssten je nach verwendeter Batteriegröße 320 kWh bzw. 325 kWh nachgeladen werden. Diese Energiemenge kann in unter eineinhalb Stunden übertragen werden.

	220 kWh	295 kWh	345 kWh	395 kWh	440 kWh
SOE _{Ende,Depot} [%]	k. A.	k. A.	k. A.	14	21
theor. Restreichweite [km]	k. A.	k. A.	k. A.	12,6	24,8
Ladung im Depot [kWh]	k. A.	k. A.	k. A.	320	326

Tabelle 06

Ladezustände und Reichweite bei Erreichen des Depots in Erfurt mit Vollklimatisierung

Die punktuelle Nachladung erscheint in Erfurt nur sinnvoll, wenn auf eine Vollklimatisierung des Fahrgastraums verzichtet wird. Dann wäre ein Betrieb mit einer 345 kWh großen Batterie, bei genügend Reserve, darstellbar. Wird auf eine Vollklimatisierung bestanden, müsste die Batterie einen Energieinhalt von mindestens 440 kWh aufweisen. Eine derart dimensionierte Batterie geht aber mit einem sehr hohen Systemgewicht von ca. vier Tonnen einher, was zu einer starken Beschränkung der Zuladung an Fahrgästen führen würde. Der Gesamtenergiebedarf bei einer Batteriegröße von 395 kWh sowie die Zusammensetzung aus Traktions-, Kühl-, Nebenaggregate- und Verlustenergie der Batterie zeigt Tabelle 07.

Batteriegröße: 395 kWh	mit Citysphere-Anlagen	mit Vollklimaanlage
Traktionsenergie [kWh/km]	1,56	1,56
Energie für Klimatisierung [kWh/km]	0,07	0,38
Energie für Nebenaggregate [kWh/km]	0,58	0,58
Verluste der Traktionsbatterie [kWh/km]	0,27	0,29
Gesamtenergiebedarf [kWh/km]	2,48	2,81

Tabelle 07

Energiebilanz bei punktueller Nachladung in Erfurt

3.2 Gera

In Gera bietet sich für eine punktuelle Nachladung die Haltestelle Reuß-Park an, da an diesem Endpunkt fahrplanmäßige Haltezeiten von 11 Minuten vorgesehen sind. In diesem Zeitfenster könnten idealerweise ca. 46 kWh nachgeladen werden. Hiervon sind aber die Energiemengen für den Eigenverbrauch des Fahrzeugs und die Ladeverluste noch abziehen.

Gegenüber den anderen Städten wird in Gera das Fahrzeug nicht vollklimatisiert. Damit reichen für die Simulationen die energiesparenden Citysphere-Anlagen aus. Laut den Simulationsergebnissen kann die geforderte Differenz zur Außentemperatur von drei Kelvin mit diesen Anlagen eingehalten werden.

Abb. 04 zeigt den Ladezustand mit fünf verschiedenen dimensionierten Batterien zwischen 220 kWh und 440 kWh. Lediglich die beiden größten Batterien erlaubten ein Erreichen des Depots am Tagesende. Bei einer Streckenlänge je kompletten Umlauf von 27 km und einem errechneten Gesamtenergiebedarf von 2,5 kWh/km müssten für eine ausgeglichene Energiebilanz ca. 67 kWh nachgeladen werden. Die errechnete Differenz führt zu den in der Abbildung dargestellten fallenden Kurven.

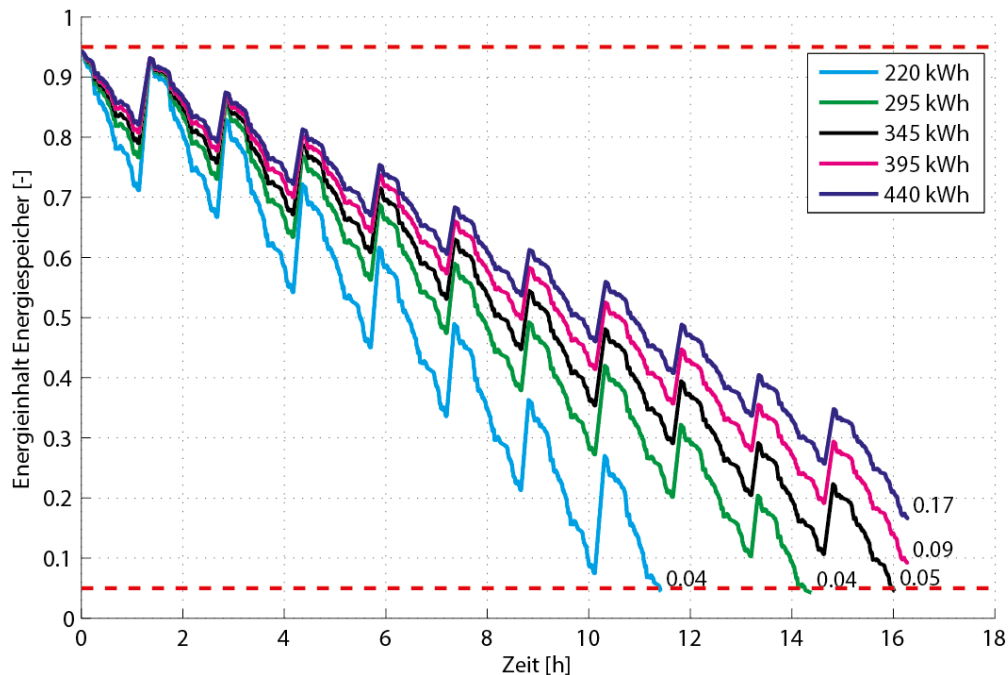


Abb. 04
Zeitlicher Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie bei punktueller Nachladung und 40 °C in Gera

Der Simulationslauf mit einer Batteriegröße von 395 kWh konnte zwar bis zum Ende gefahren werden, bietet aber mit einem Ladezustand im Betriebshof von neun Prozent nur noch eine geringe Restreichweite von ca. 6,4 km. Erst bei einer Batteriegröße von 440 kWh kann man, wenn auch recht knapp, von ausreichend Reserve für den Linienbetrieb ausgehen (vgl. Tabelle 08).

	220 kWh	295 kWh	344 kWh	395 kWh	440 kWh
SOE _{Ende,Depot} [%]	k. A.	k. A.	k. A.	9	17
theor. Restreichweite [km]	k. A.	k. A.	k. A.	6,4	21,3
Ladung im Depot [kWh]	k. A.	k. A.	k. A.	340	343

Tabelle 08 Ladezustände und Reichweite bei Erreichen des Depots in Gera

Die Simulationen zeigen, dass erst ausgesprochen große Batterien von größer 440 kWh und einer punktuellen Nachladung mit 250 kW am Endpunkt Reuß-Park einen Betrieb mit ausreichend Reserve bieten. Die große Systemmasse des Energiespeichers würde aber auch in Gera zur einer Einschränkung bei den möglichen Fahrgastzahlen führen.

.....
Stationäre Nachladung bei
Variation der
Energiespeichergröße
.....

Batteriegröße: 440 kWh	mit Citysphere-Anlagen
Traktionsenergie [kWh/km]	1,64
Energie für Klimatisierung [kWh/km]	0,05
Energie für Nebenaggregate [kWh/km]	0,53
Verluste der Traktionsbatterie [kWh/km]	0,26
Gesamtenergiebedarf [kWh/km]	2,48

Tabelle 09
Energiebilanz bei punktueller Nachladung in Gera

3.3 Gotha

Für die punktuelle Nachladung auf der Linie A in Gotha wurden zwei Ladestationen, je eine an den Endpunkten Seeberger Landstraße und Krankenhaus, vorgesehen.

Abb. 05 zeigt die zeitlichen Verläufe des Ladezustands der verschieden großen Batterien und einer Klimatisierung von drei Kelvin unter Außentemperatur. In den Morgenstunden wird mit dem Fahrzeugumlauf 2030 zwischen den beiden Endpunkten Krankenhaus und Tüttleben gefahren, wobei deutlich weniger nachgeladen werden kann, als für eine ausgeglichene Energiebilanz notwendig wäre. Durch eine lange Pause am Krankenhaus gegen 8:45 Uhr kann die Batterie komplett wieder aufgeladen werden, ebenso beim Halt im Betriebshof zwischen 12:30 Uhr und 14:30 Uhr.

Der Fahrzeugumlauf 2031 beginnt mit Fahrten zwischen der Seeberger Landstraße und der Eschleber Straße und würde laut Fahrplan eine Nachladung von 11 Minuten an der Seeberger Landstraße erlauben. Die sehr wenigen gemessenen Fahrten, die den Simulationen als Grundlage dienen, erlauben nur Nachladezeiten von fünf Minuten. Bis zu einem längeren Halt am Krankenhaus am frühen Abend nimmt der Ladezustand daher kontinuierlich ab. Die Batterien können in einer fahrplanmäßigen Standzeit von 35 Minuten auf nahezu 90 Prozent wieder aufgeladen werden.

Bei den Fahrten in den Abendstunden zwischen Krankenhaus und Seeberger Landstraße werden die Endpunkte angefahren, welche über eine Ladestation verfügen. Die für die Simulation zu Grunde liegenden gemessenen Fahrten weisen aber Verspätungen auf, so dass an keinem der beiden Endpunkte nachgeladen werden konnte. Laut Fahrplan würden jeweils drei bzw. vier Minuten Wendezeit zur Verfügung stehen. Entsprechend muss der Energiebedarf komplett aus dem Batteriespeicher abgedeckt werden, was zu einem stark abfallenden Ladezustand der Batterie führt. Erst Batterien ab einer Größe von 345 kWh erlauben diesen abendlichen Umlauf.

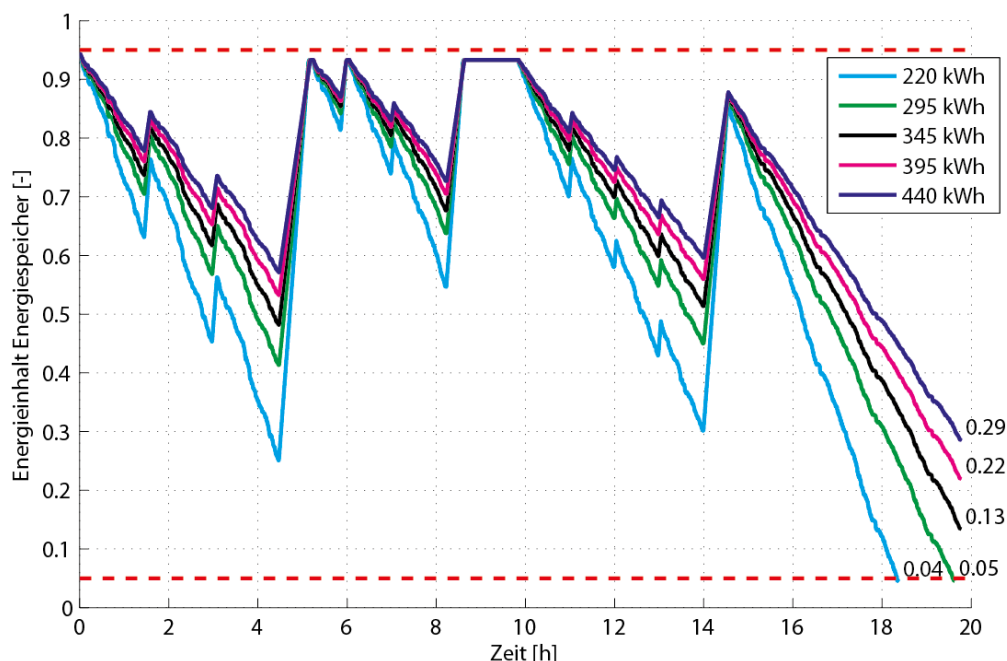


Abb. 05
Zeitlicher Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie bei punktueller Nachladung und 40 °C in Gotha

Mit einem Ladezustand von 13 Prozent (vgl. Tabelle 10), respektive einer theoretischen Reichweite von 10,9 km, bietet eine Batteriegröße von 345 kWh nur wenig Reserve. Erst ab einem Energieinhalt von 395 kWh ist ausreichend Reserve vorhanden. Wenn die laut Fahrplan vorhandenen Standzeiten an den beiden Endpunkten zum Nachladen genutzt werden

können, könnte möglicherweise bereits eine Batterie mit 345 kWh genügend Reserve für den Linienbetrieb bieten.

	220 kWh	295 kWh	345 kWh	395 kWh	440 kWh
SOE _{Ende,Depot} [%]	k. A.	k. A.	13	22	29
theor. Restreichweite [km]	k. A.	k. A.	10,9	26,3	41,0
Ladung im Depot [kWh]	k. A.	k. A.	283	288	290

Stationäre Nachladung bei
Variation der
Energiespeichergröße

Tabelle 10
Ladezustände und Reichweite bei Erreichen des Depots in Gotha

In Gotha werden gegenüber der oben stehenden Simulationen Fahrzeuge mit Vollklimatisierung eingesetzt. Abb. 06 zeigt den zeitlichen Verlauf des Ladezustands mit Batteriegrößen zwischen 220 und 440 kWh. Selbst eine Batterie mit 345 kWh würde in einer solchen Fahrzeugkonfiguration nicht ausreichen, um die beiden Fahrzeugumläufe zu bewältigen, wobei auch in diesem Fall im Wesentlichen das nicht mögliche Nachladen an den Endpunkten bei den abendlichen Fahrten verantwortlich ist. Erst ab einer Batteriegröße von 440 kWh steht eine Restreichweite von ca. 19,7 km bei Erreichen des Betriebshofs zur Verfügung und bietet etwas Reserve (Tabelle 11).

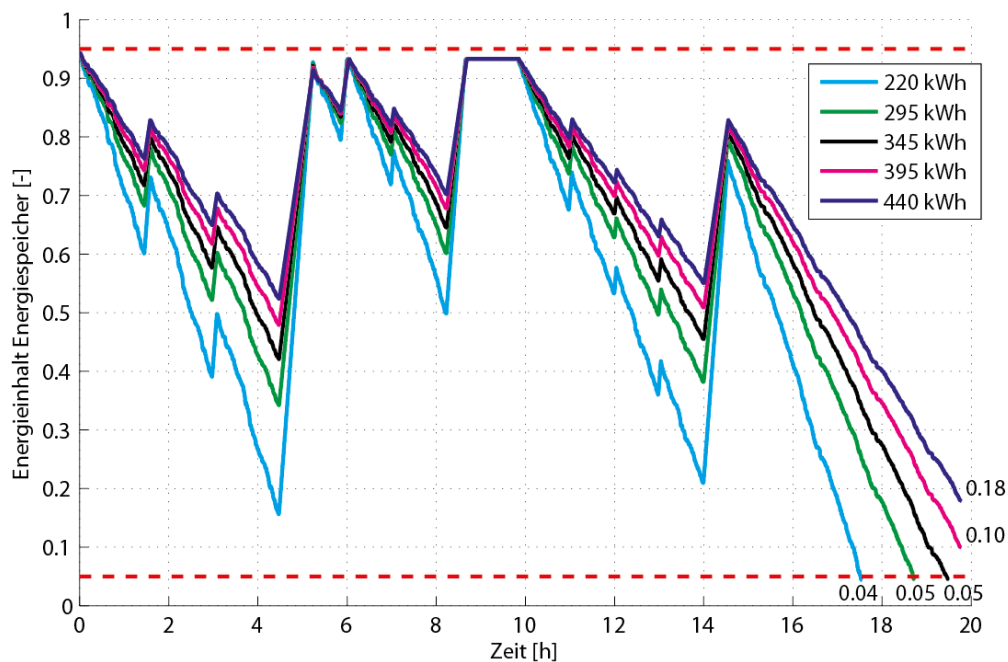


Abb. 06
Zeitlicher Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie bei punktueller Nachladung und 40 °C in Gotha mit Vollklimatisierung

	220 kWh	295 kWh	344 kWh	395 kWh	440 kWh
SOE _{Ende,Depot} [%]	k. A.	k. A.	k. A.	10	18
theor. Restreichweite [km]	k. A.	k. A.	k. A.	6,9	19,7
Ladung im Depot [kWh]	k. A.	k. A.	k. A.	336	339

Tabelle 11
Ladezustände und Reichweite bei Erreichen des Depots in Gotha mit Vollklimatisierung

Die Simulationen zeigen, dass bei einer Vollklimatisierung des Fahrgastraums sehr große Batterien von größer 395 kWh benötigt werden, um die beiden Fahrzeugumläufe 2030 sowie 2031 erfolgreich bedienen zu können. Erst ab 440 kWh bleibt am Tagesende etwas Reserve. Wird auf eine Vollklimatisierung verzichtet und greift man auf ein Klimagerät

zurück, welches den Fahrgastraum drei Kelvin unter Außentemperatur abkühlt, so bietet eine Batterie ab 395 kWh bereits genügend Reserve. Für alle Simulationen gilt, dass die als Datengrundlage dienenden gemessenen Fahrten mit dem Fahrplan nur schwer in Einklang zu bringen waren. Gerade die Fahrten in den späten Abendstunden mussten mit Geschwindigkeitsprofilen von Fahrten simuliert werden, welche in der Hauptverkehrszeit gemessen wurden. Im realen Linienbetrieb ist daher ein niedrigerer Energiebedarf zu erwarten.

Stationäre Nachladung bei
Variation der
Energiespeichergröße

Batteriegröße: 440 kWh	mit Citysphere- Anlagen	mit Vollklima- anlage
Traktionsenergie [kWh/km]	1,68	1,68
Energie für Klimatisierung [kWh/km]	0,05	0,35
Energie für Nebenaggregate [kWh/km]	0,58	0,58
Verluste der Traktionsbatterie [kWh/km]	0,27	0,29
Gesamtenergiebedarf [kWh/km]	2,58	2,90

Tabelle 12
Energiebilanz bei punktueller Nachladung in Gotha

3.4 Jena

Die Simulationen für Jena, bei einer Fahrgastraumklimatisierung von drei Kelvin unter Außentemperatur, wurden mit Batteriegrößen von 220 bis 345 kWh durchgeführt. Abb. 07 zeigt den zeitlichen Verlauf des Ladezustands der Batterien. Selbst bei einer Speichergröße von 220 kWh bleibt der Ladezustand nahezu durchgehend bei größer 50 Prozent. Bereits die 295 kWh und 345 kWh großen Batterien weisen einen nahezu deckungsgleichen Kurvenverlauf auf. Die geringfügig längeren Pausen in den Abendstunden am Endpunkt Winzerla reichen aus, um die Batterien kontinuierlich wieder aufzuladen. Entsprechend hoch ist der Ladezustand bei Erreichen des Betriebshofs am Tagesende. Lediglich 24 kWh müssten im Betriebshof wieder nachgeladen werden (Tabelle 13). Auf entsprechende Infrastruktur im Betriebshof könnte bei diesem Einsatzszenario verzichtet werden.

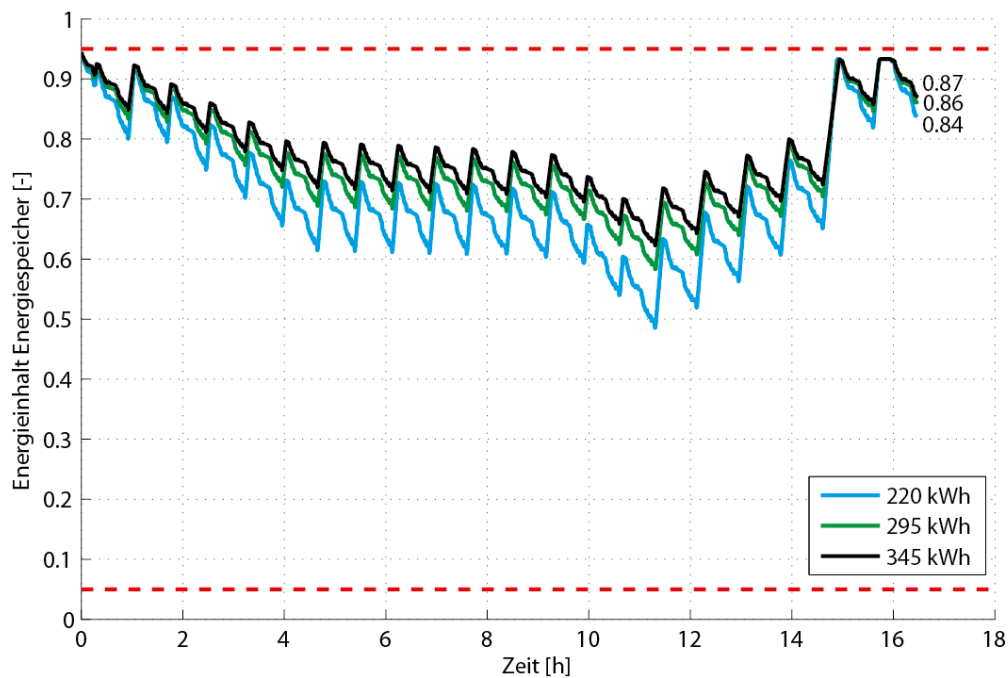


Abb. 07
Zeitlicher Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie bei punktueller Nachladung und 40 °C in Jena

	220 kWh	295 kWh	344 kWh
SOE _{Ende, Depot} [%]	84	86	87
theor. Restreichweite [km]	74,3	101,6	119,5
Ladung im Depot [kWh]	24	27	28

Tabelle 13
Ladezustände und Reichweite bei Erreichen des Depots in Jena

Die Ergebnisse der Simulationen der Tagesumläufe mit Vollklimatisierung zeigen Tabelle 14 und Abb. 08. Der komplette Tagesumlauf konnte mit allen drei Batteriegrößen realisiert werden. Gegenüber dem Zwischenbericht vom Oktober 2013, bei der der untere Grenzwert bei der 40 °C-Simulation nach einer Fahrzeit von ca. 11 Stunden unterschritten und damit beendet wurde, kann in der vorliegenden Rechnung der komplette Umlauf absolviert werden. Dies ist auf den besseren Wirkungsgrad der Klimaanlage und den damit einhergehenden niedrigeren Energiebedarf bei gleichbleibender Kühlleistung zurückzuführen. Ebenso entfällt der hohe Energiebedarf zur Kühlung der Batterien (vgl. 2.1.4). Die deutlich besseren Reserven bietet eine Batterie mit einem Energieinhalt ab 295 kWh. Hierbei wird der Ladezustand der Batterie von 40 Prozent kaum unterschritten.

Auch bei den Simulationen mit einer Vollklimatisierung können in den Abendstunden die Batterien bei den längeren Wendezeiten in Winzerla wieder aufgeladen werden. Mit einem entsprechend hohen Ladezustand zwischen 72 und 77 Prozent wird am Tagesende der Betriebshof erreicht. Je nach Batteriegröße müssten zwischen 51 und 62 kWh Energie nachgeladen werden.

Stationäre Nachladung bei
Variation der
Energiespeichergröße

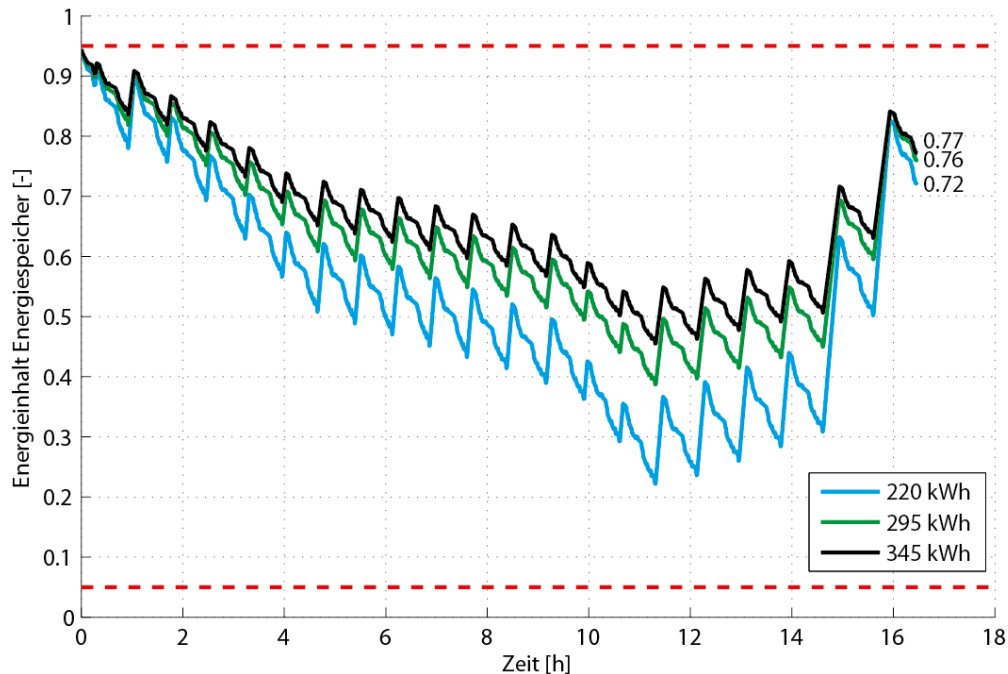


Abb. 08
Zeitlicher Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie bei punktueller Nachladung und 40 °C in Jena mit Vollklimatisierung

	220 kWh	295 kWh	344 kWh
SOE _{Ende, Depot} [%]	72	76	77
theor. Restreichweite [km]	53,6	76,0	89,7
Ladung im Depot [kWh]	51	56	62

Tabelle 14
Ladezustände und Reichweite bei Erreichen des Depots in Jena mit Vollklimatisierung

Ein Linienbetrieb mit punktueller Nachladung scheint in Jena sehr gut möglich. Die potentiellen Ladezeiten am Endpunkt Winzerla reichen aus, um ein Fahrzeug mit einer 220 kWh großen Batterie zu betreiben, sofern lediglich eine Klimatisierung mit drei Kelvin unter Außentemperatur gefordert wird. Sollte hingegen das Fahrzeug vollklimatisiert werden, ist eine Batterie mit einem Energieinhalt von 295 kWh notwendig.

Batteriegröße: 295 kWh	mit Citysphere-Anlagen	mit Vollklimaanlage
Traktionsenergie [kWh/km]	1,45	1,45
Energie für Klimatisierung [kWh/km]	0,07	0,43
Energie für Nebenaggregate [kWh/km]	0,58	0,59
Verluste der Traktionsbatterie [kWh/km]	0,26	0,29
Gesamtenergiebedarf [kWh/km]	2,36	2,76

Tabelle 15
Energiebilanz bei punktueller Nachladung in Jena

4 Variation der Fahrleitungslänge

In Kapitel 4 wird für die entsprechenden Linien in Erfurt, Gera, Gotha und Jena unter nachfolgenden Randbedingungen geprüft, welche Auswirkung der Einsatz einer chemischen Heizung auf die vorzusehende Fahrleitungslänge hat. Der höchste elektrische Energiebedarf der Fahrzeuge ist bei sehr hohen Außentemperaturen vorhanden.

Heizung:	Chemische Standheizung
Klimatisierung:	Klima-light und Vollklimatisierung (außer Gera)
Worst Case - Fall:	Außentemperatur 40 °C

4.1 Erfurt

Im Zwischenbericht vom Oktober 2013 wurden unterschiedlich lange Fahrleitungsvarianten für einen rein elektrischen Betrieb simuliert. Durch den Wegfall des großen Energiebedarfs zum Heizen bei minus 20 °C kann die Fahrleitung deutlich verkürzt werden. In den folgenden Abbildungen wurde der in dem Zwischenbericht errechnete Fahrleitungsbereich jeweils blau eingetragen. In oranger Farbe werden folgend die neuen simulierten Fahrleitungsabschnitte gekennzeichnet. Beispielsweise zeigt Abb. 09 den Fahrleitungsabschnitt zwischen dem Nordbahnhof und der Ruhrstraße, welcher im Zwischenbericht als Variante H genauer analysiert wurde. Ausgehend von der Haltestelle Eislebener Straße wurde nun in den darauf folgenden Abbildungen der Fahrleitungsabschnitt bis zur Neusißstraße (Abb. 11) eingekürzt, wobei der gesamte Bereich bis zum Nordbahnhof mit Fahrleitung versehen wurde.

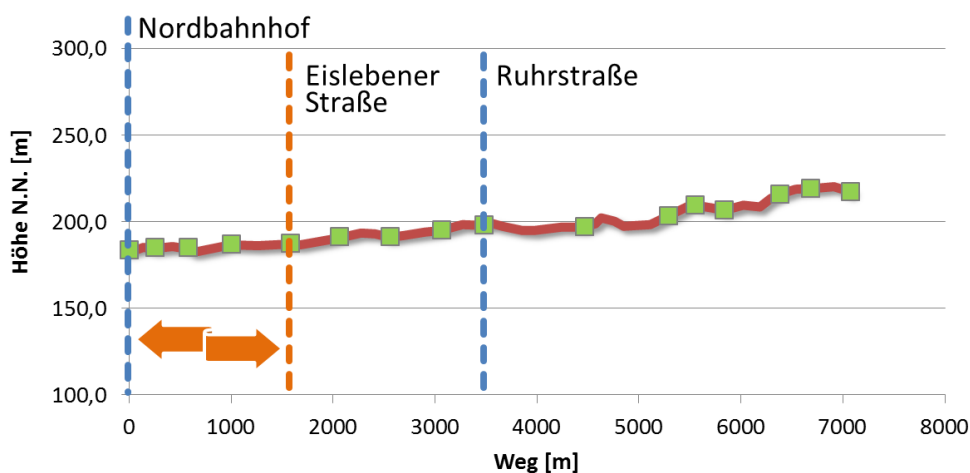
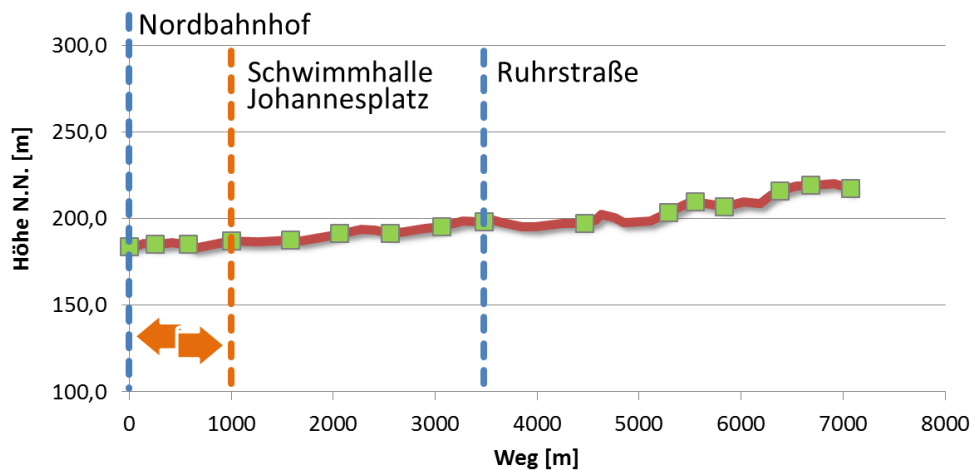


Abb. 09
Erfurt – Fahrleitungsvariante
zwischen Nordbahnhof und
Eislebener Straße



Variation der Fahrleitungslänge

Abb. 10
Erfurt – Fahrleitungsvariante zwischen Nordbahnhof und Schwimmhalle Johannesplatz

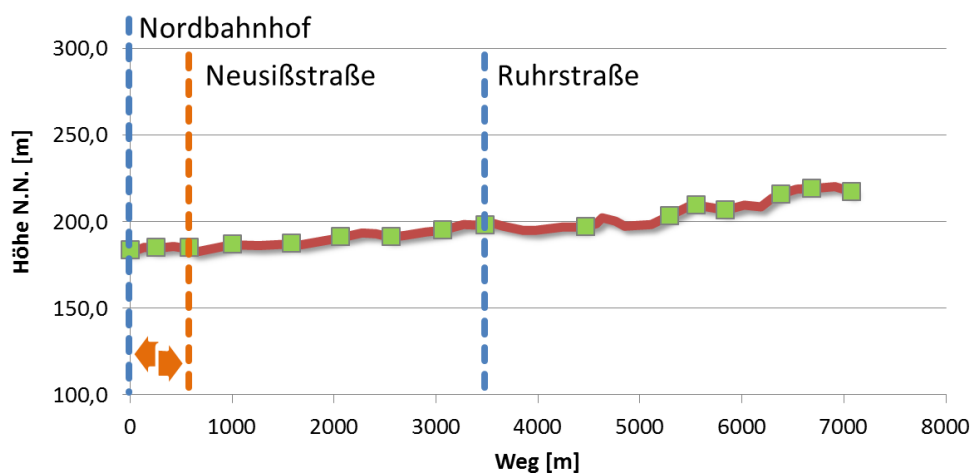


Abb. 11
Erfurt – Fahrleitungsvariante zwischen Nordbahnhof und Neusißstraße

Abb. 12 zeigt den zeitlichen Verlauf des Ladezustands der Batterie, bei einem Energieinhalt von 220 kWh. Bei allen drei Fahrleitungsvarianten konnte der Tagesumlauf erfolgreich absolviert werden, wobei die kürzeste Variante, bei der die Fahrleitung zwischen Neusißstraße und Nordbahnhof verlegt wurde, sich durch einen fallenden Kurvenverlauf von den anderen beiden Varianten unterscheidet. Bereits ab einer Fahrleitungsverlegung von der Haltestelle Schwimmhalle Johannesplatz bis zum Nordbahnhof und zurück ist die Energiebilanz nahezu ausgeglichen. Ohne einer Vollklimatisierung des Fahrgastraums, wäre diese Fahrleitungsvariante somit ausreichend, wobei durch die nahezu ausgeglichene Energiebilanz die Batterie weiter verkleinert werden könnte. Dies würde zwar zu einem größeren Hub beim Ladezustand der Batterie führen, könnte aber sowohl das Systemgewicht als auch die Anschaffungskosten reduzieren.

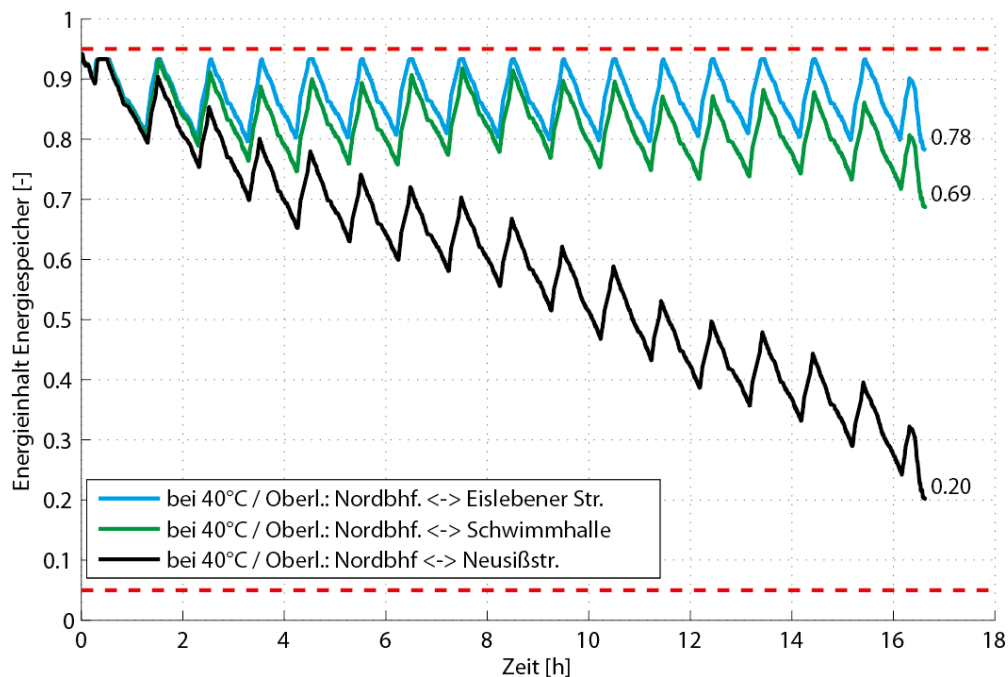


Abb. 12
Zeitlicher Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie bei Fahrleitungsbetrieb und 40 °C in Erfurt

Tabelle 16 zeigt, dass der Zeitpunkt beim Erreichen des Betriebshofs am Tagesende, bei jeder simulierten Fahrleitungsvariante auch der Zeitpunkt mit dem niedrigsten Ladezustand der Batterie ist. Wird die Fahrleitung ausgehend vom Nordbahnhof bis zur Eislebener Straße verlegt, so sind im Depot lediglich 37 kWh nachzuladen; bei der Variante bis zur Schwimmhalle Johannesplatz sind es 57 kWh. Bei der kürzesten Variante bis zur Neusißstraße müssten insgesamt 165 kWh nachgeladen werden, was bei einer möglichen Ladelistung im Stand von 90 kW ca. zwei Stunden benötigen würde.

	SOE _{Ende, Depot} [%]	SOE _{min} [%]	Ladung im Depot [kWh]
Nordbahnhof ⇌ Eislebener Straße	78	78	37
Nordbahnhof ⇌ Schwimmhalle Johannesplatz	69	69	57
Nordbahnhof ⇌ Neusißstraße	20	20	165

Tabelle 16
Ladezustände und Reichweite bei Erreichen des Depots in Erfurt

Abb. 13 zeigt den zeitlichen Verlauf des Batterieladezustands bei 40 °C Außentemperatur, wenn das Fahrzeug vollklimatisiert werden würde. Die Fahrleitungsvariante zwischen Nordbahnhof und Eislebener Straße weist eine ausgeglichene Energiebilanz auf, sodass bei jedem Umlauf der Energiespeicher wieder aufgeladen werden kann. In diesem Fall wäre ebenfalls eine Verkleinerung der Batterie denkbar.

Wird die Fahrleitung bis auf die Haltestelle Schwimmhalle Johannesplatz eingekürzt, ist eine Batteriegröße von 220 kWh notwendig, da mehr Energie aus der Batterie entnommen wird als im Fahrleitungsbereich nachgeladen werden kann. Bei Erreichen des Betriebshofs weist die Batterie einen Ladezustand von 35 Prozent auf.

Bei der Fahrleitungsvariante zwischen Nordbahnhof und Neusißstraße, wurde der Ladezustand von 5 Prozent nach einer Fahrzeit von ca. 15 Stunden unterschritten. Diese Variante ist bei einer Vollklimatisierung somit nicht möglich.

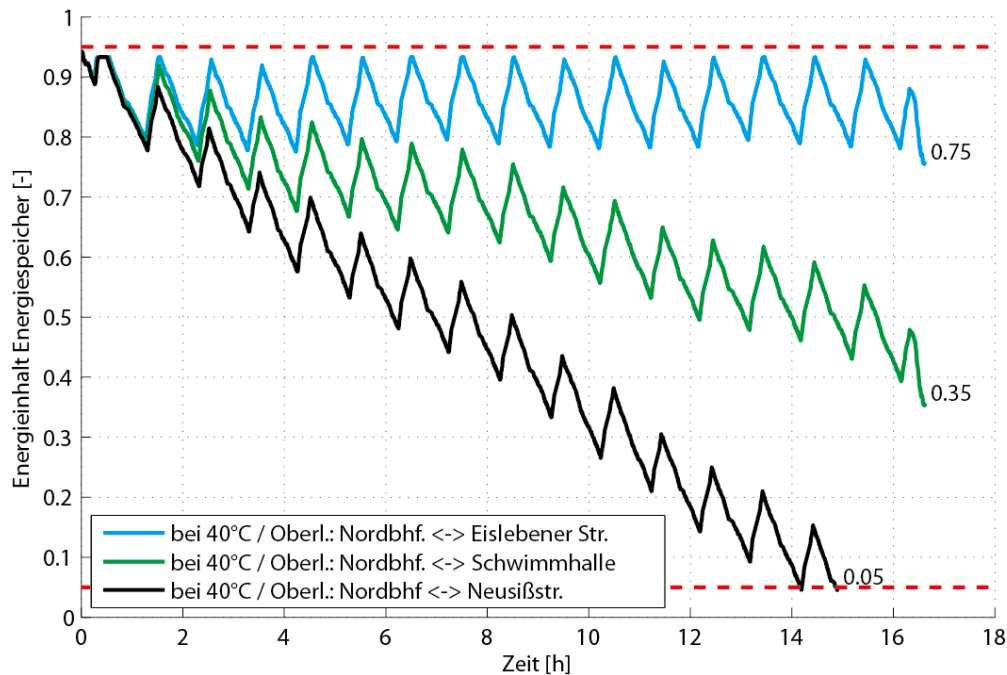


Abb. 13
Zeitlicher Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie bei Fahrleitungsbetrieb und 40 °C in Erfurt mit Vollklimatisierung

Sowohl bei der Fahrleitungsvariante vom Nordbahnhof bis zur Eislebener Straße als auch bis zur Schwimmhalle Johannesplatz kann der Energiespeicher in einem vertretbaren Zeitraum von unter 1,5 Stunden im Betriebshof wieder aufgeladen werden.

	SOE _{Ende, Depot} [%]	SOE _{min} [%]	Ladung im Depot [kWh]
Nordbahnhof ⇌ Eislebener Straße	75	75	44
Nordbahnhof ⇌ Schwimmhalle Johannesplatz	35	35	132
Nordbahnhof ⇌ Neusißstraße	k. A.	k. A.	k. A.

Tabelle 17
Ladezustände und Reichweite bei Erreichen des Depots in Erfurt mit Vollklimatisierung bei 40 °C

Die Simulationen zeigen, dass durch den Wegfall des elektrischen Heizens, die Fahrleitung deutlich eingekürzt werden kann. Sowohl mit als auch ohne Vollklimatisierung des Fahrgastraums bietet sich die Variante mit einer Fahrleitung zwischen Nordbahnhof und Schwimmhalle Johannesplatz an. Sollte auf die Vollklimatisierung verzichtet werden, könnte möglicherweise die Batterie weiter verkleinert werden. Mit Vollklimatisierung käme eine mögliche Verkleinerung der Batterie erst bei der Fahrleitungsvariante zwischen Nordbahnhof und Eislebener Straße infrage.

Tabelle 18 zeigt die Aufteilung des Energieverbrauchs bezüglich Traktion, Klimatisierung, Nebenaggregate und Verluste der Batterie für die Fahrleitungsvariante zwischen Johannesplatz und Nordbahnhof für beide Klimatisierungsmethoden auf. Der Gesamtenergiebedarf bei Kühlung mit den Citysphere-Anlagen liegt knapp 13 Prozent unter dem einer Vollklimatisierung.

Der größte Teil der Energie muss für die Traktion aufgebracht werden und liegt bei 1,46 kWh/km. Für die Nebenaggregate sind 0,55 bzw. 0,57 kWh/km aufzubringen. Dieser Wert wird maßgeblich durch den großen Leistungsbedarf der Kühlung der Lithium-Ionen Batterien beeinflusst, um ein Derating zu vermeiden. Batterietypen, welche für größere Temperaturen ausgelegt sind, würden einen niedrigeren Leistungs- und damit Energiebedarf erzielen.

.....
Variation der Fahrleitungslänge
.....

	mit Citysphere- Anlagen	mit Vollklima- anlage
Traktionsenergie [kWh/km]	1,46	1,46
Energie für Klimatisierung	0,07	0,39
Energie für Nebenaggregate [kWh/km]	0,55	0,57
Verluste der Traktionsbatterie [kWh/km]	0,22	0,25
Gesamtenergiebedarf [kWh/km]	2,30	2,67

Tabelle 18
Energiebilanz bei Fahrlei-
tung zwischen Nordbahnhof
und Schwimmhalle Johan-
nesplatz in Erfurt (40 °C)

4.2 Gera

Für den Fahrleitungsbetrieb eines rein elektrischen Fahrzeugs war gemäß dem Zwischenbericht das Verlegen einer Fahrleitung vom Heinrichsplatz bis zum Endpunkt Reuß-Park notwendig. Für ein Fahrzeug, welches chemisches Heizen erlaubt, wurden Fahrleitungsvarianten beginnend ab der Haltestelle Leumnitz bis zum Endpunkt Reußpark und zurück simuliert. Von Leumnitz ausgehend wurde die Fahrleitung um jeweils eine Haltestelle bis zur Laasener Straße Richtung Reuß-Park verkürzt.

Variation der Fahrleitungslänge

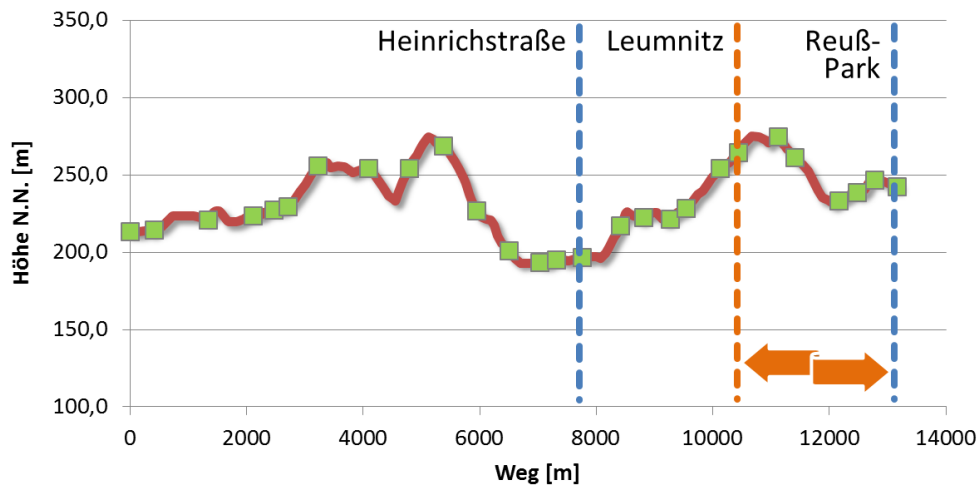


Abb. 14
Gera – Fahrleitungsvariante
zwischen Leumnitz und
Reuß-Park

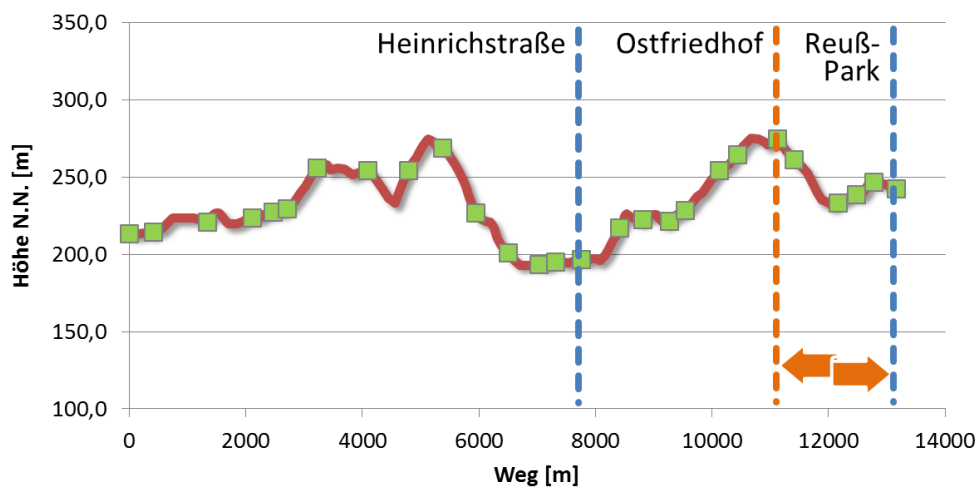


Abb. 15
Gera – Fahrleitungsvariante
zwischen Ostfriedhof und
Reuß-Park

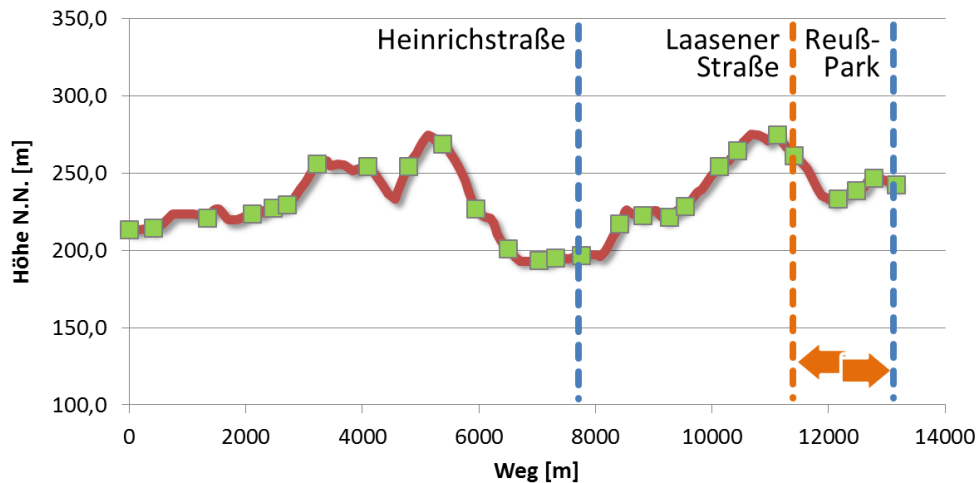


Abb. 16
Gera – Fahrleitungsvariante
zwischen Laasener Straße
und Reuß-Park

In Gera werden ausschließlich Fahrzeuge ohne Vollklimatisierung eingesetzt. Abb. 17 zeigt die resultierenden zeitlichen Verläufe des Ladezustands der Batterien über der Zeit bei Verwendung der Citysphere-Klimaanlagen.

Die Variante mit Fahrleitung zwischen Leumnitz und Reuß-Park ist aus energetischer Sicht ausgeglichen, d. h. die Energie zum Betrieb des Fahrzeugs kann nahezu vollständig innerhalb des Fahrleitungsabschnitts wieder geladen werden. Wie in den anderen bereits betrachteten Städten, wäre es auch in diesem Fall möglich die Batteriegröße bei dieser Fahrleitungsvariante zu verkleinern und damit die Fahrzeugmasse und Anschaffungskosten zu senken.

Bei der Fahrleitungsvariante zwischen Ostfriedhof und Reuß-Park wird mehr Energie aus dem Energiespeicher entnommen als nachgeladen werden kann. Hierdurch sinkt der Ladezustand im Tagesverlauf kontinuierlich ab. Bis auf 23 Prozent sinkt zwischenzeitlich der Ladezustand der Batterie. Bei Erreichen des Betriebshofs am Tagesende, weist das Fahrzeug einen Ladezustand von 27 Prozent auf (Tabelle 19).

Wird die Fahrleitung bis zur Laasener Straße weiter verkürzt, kann der Tagesumlauf nicht vollends befahren werden. Bereits nach 14,5 Stunden wird der untere Grenzwert von fünf Prozent unterschritten.

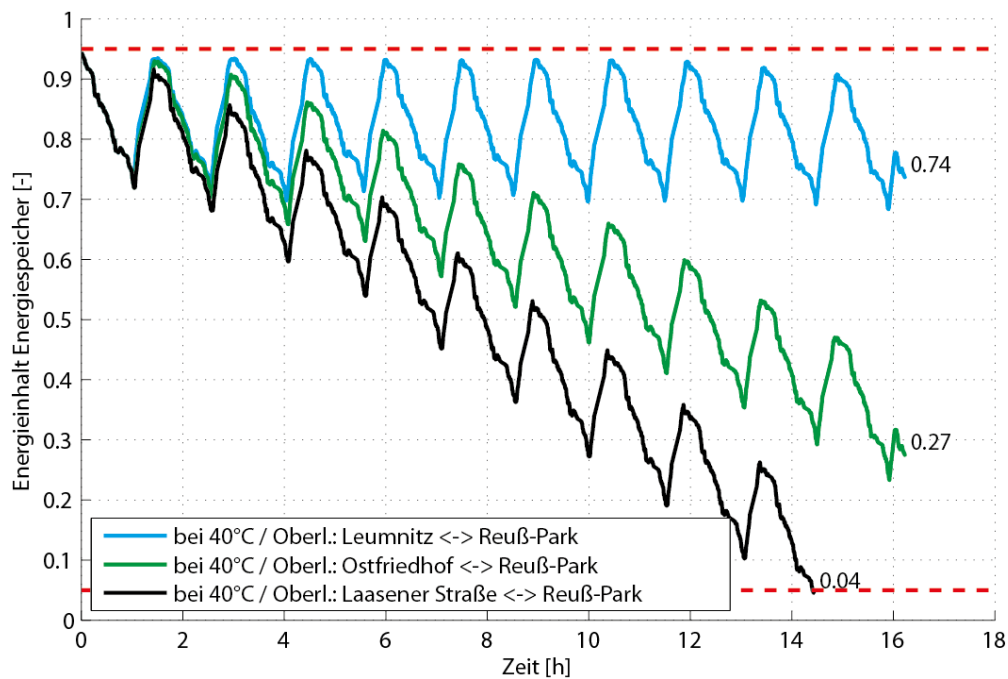


Abb. 17
Zeitlicher Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie bei Fahrleitungsbetrieb und 40 °C in Gera

	SOE _{Ende, Depot} [%]	SOE _{min} [%]	Ladung im Depot [kWh]
Leumnitz ⇌ Reuß-Park	74	68	46
Ostfriedhof ⇌ Reuß-Park	27	23	150
Laasener Straße ⇌ Reuß-Park	k. A.	k. A.	k. A.

Tabelle 19
Ladezustände und Reichweite bei Erreichen des Depots in Gera

Für einen energetisch ausgeglichenen und sicheren Betrieb ist bei einer Nachladung über die Fahrleitung der Bereich beginnend von der Haltestelle Leumnitz über den Endpunkt Reuß-Park und zurück nach Leumnitz mit Fahrleitung zu elektrifizieren. Die resultierenden Energieverbräuche zeigt Tabelle 20.

	mit Citysphere-Anlagen
Traktionsenergie [kWh/km]	1,50
Energie für Klimatisierung	0,05
Energie für Nebenaggregate [kWh/km]	0,47
Verluste der Traktionsbatterie [kWh/km]	0,22
Gesamtenergiebedarf [kWh/km]	2,24

Tabelle 20
Energiebilanz bei Fahrleitung zwischen Leumnitz und Reuß-Park in Gera

4.3 Gotha

Die Simulationen für den Zwischenbericht im Oktober 2013 ergaben eine sehr lange Fahrleitungsstrecke vom Krankenhaus bis zum ZOB. Ausgehend von der Haltestelle Krankenhaus wurden daher zwei Varianten simuliert, bei der die Fahrleitung zum einen bis zum Coburger Platz und zum anderen bis zur Eschleber Straße reicht. Da der Endpunkt Krankenhaus aber nicht bei jedem Umlauf angefahren wird, wurden drei weitere Varianten gerechnet, welche an der Eschleber Straße beginnend bis zum ZOB, bis zur Huttenstraße und bis zur Gartenstraße mit Fahrleitung versehen wurde. Hierdurch ist es möglich, die Standzeiten am Endpunkt Eschleber Straße mit zum Nachladen zu nutzen. Abb. 18 bis Abb. 22 zeigen schematisch die verschiedenen Fahrleitungsvarianten.

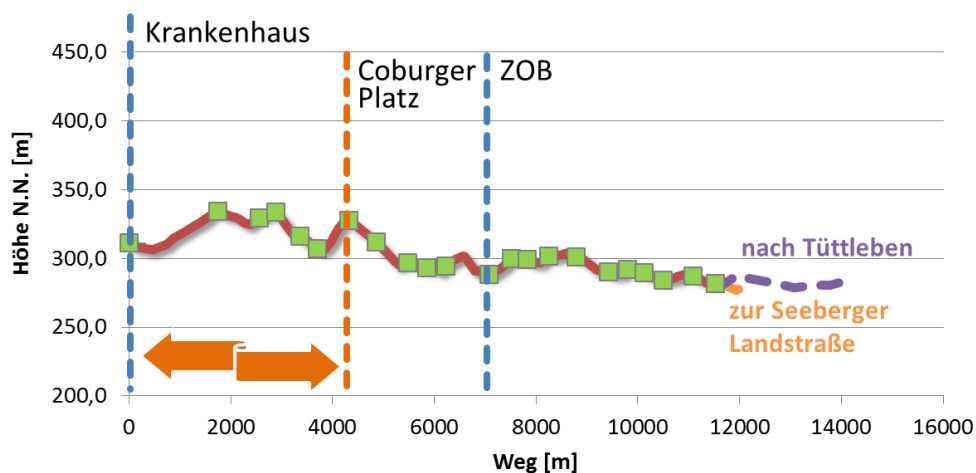


Abb. 18
Gotha – Fahrleitungsvariante zwischen Krankenhaus und Coburger Platz

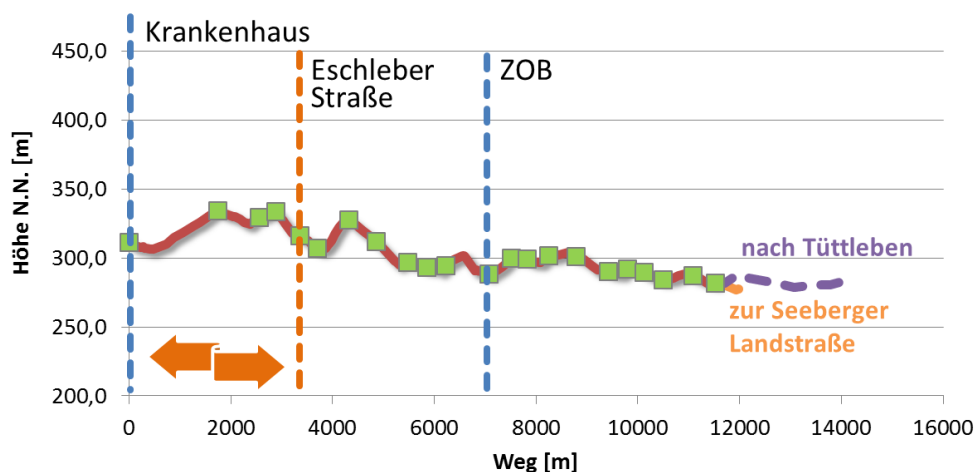


Abb. 19
Gotha – Fahrleitungsvariante zwischen Krankenhaus und Eschleber Straße

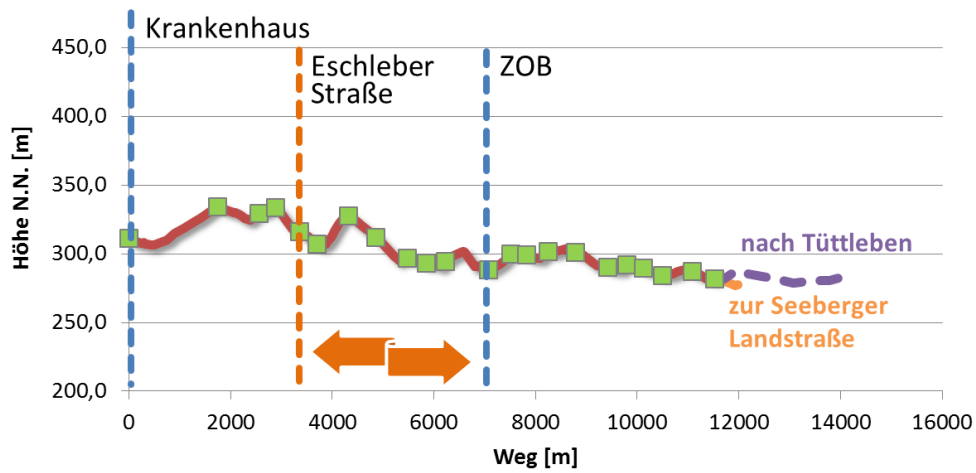


Abb. 20
Gotha – Fahrleitungsvarianten zwischen Eschleber Straße und ZOB

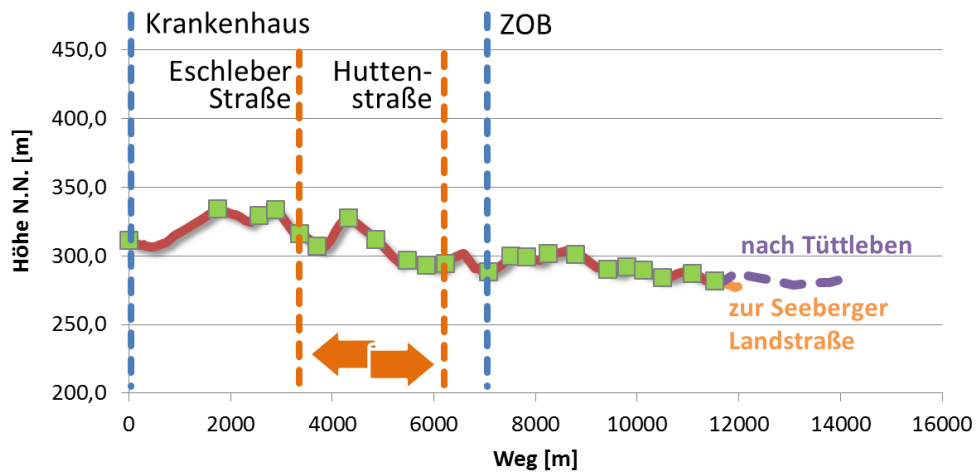


Abb. 21
Gotha – Fahrleitungsvarianten zwischen Eschleber Straße und Huttenstraße

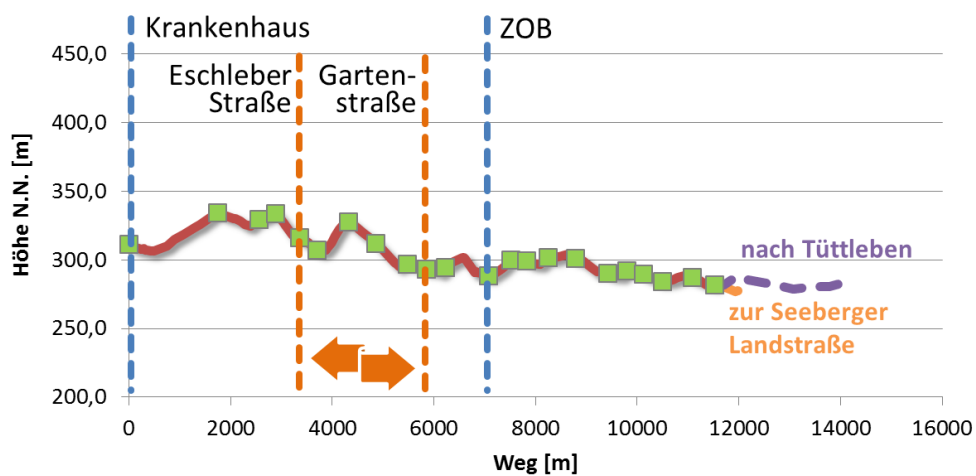


Abb. 22
Gotha – Fahrleitungsvarianten zwischen Eschleber Straße und Gartenstraße

Werden zum Klimatisieren der Fahrzeuge die Citysphere-Klimaanlagen genutzt, können bei vier der fünf Fahrleitungsvarianten die Tagesumläufe absolviert werden. Die Fahrleitungsvariante zwischen Eschleber Straße und Krankenhaus erlaubt keine Nachladung bei den langen Fahrten nach der Mittagspause zwischen Eschleber Straße und Seeberger Landstraße. Hierdurch wird der Energiespeicher innerhalb von ca. fünf Stunden komplett entladen, unterschreitet die untere Grenze des Ladezustands und beendet die Simulation.

Die Fahrleitungsvariante zwischen Coburger Platz und Krankenhaus weist zwar als minimalen Ladezustand noch einen Wert von 29 Prozent auf und bietet damit reichlich Reserve, aber Tagesumläufe welche öfter als die vier Fahrten zwischen der Seeberger Landstraße und der Eschleber Straße verkehren würden, würden den Energiespeicher voraussichtlich bei den nächsten Umlauf an dessen untere Grenze fahren.

Aus energetischer Sicht sinnvollsten sind die Fahrleitungsvarianten bei denen ausgehend von der Eschleber Straße bis zum ZOB bzw. der Huttenstraße Fahrleitung liegen würde, da dieser Streckenabschnitt immer befahren werden muss, egal welcher Endpunkt angefahren werden soll. Die Variante bis zur Huttenstraße nutzt dabei den Energiespeicher stärker (min. Ladezustand von 51 Prozent) als die ZOB-Variante (min. Ladezustand von 71 Prozent in Tabelle 21).

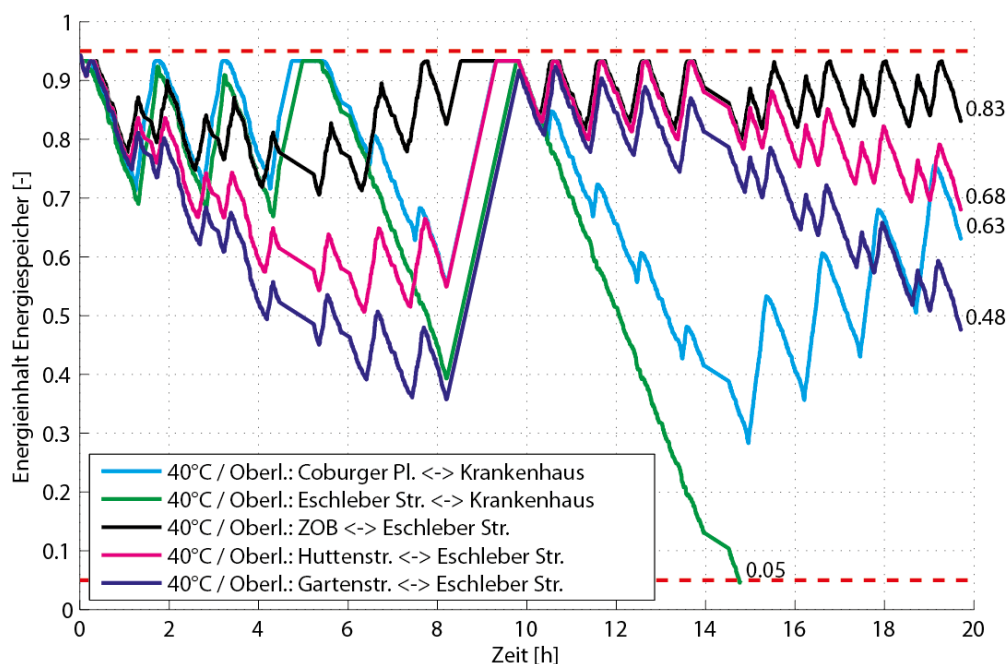


Abb. 23
Zeitlicher Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie bei Fahrleitungsbetrieb und 40 °C in Gotha

	SOE _{Ende, Depot} [%]	SOE _{min} [%]	Ladung im Depot [kWh]
Coburger Platz ⇔ Krankenhaus	63	29	70
Eschleber Straße ⇔ Krankenhaus	k. A.	k. A.	k. A.
ZOB ⇔ Eschleber Straße	83	71	26
Huttenstraße ⇔ Eschleber Straße	68	51	59
Gartenstraße ⇔ Eschleber Straße	48	36	103

Tabelle 21
Ladezustände und Reichweite bei Erreichen des Depots in Gotha

Abb. 24 zeigt die sich ergebenden zeitlichen Verläufe des Ladezustands der Batterie, bei einer Vollklimatisierung des Fahrzeugs. Gefordert wird, dass eine Temperatur des Fahr-
gastrausms von 24 °C nicht überschritten wird.

Variation der Fahrleitungslänge

Ausgehend von einer Fahrleitung ab dem Krankenhaus, muss diese bis mindestens zur Haltestelle Coburger Platz reichen, da sonst während der Fahrten nach dem Mittag nicht genügend Energie nachgeladen werden kann. Der Minimalwert von 18 Prozent Ladezustand zeigt, dass eine weitere Fahrt zwischen Eschleber Straße und Seeberger Landstraße voraussichtlich nicht mehr hätte absolviert werden können. Während der anschließenden Fahrten zum Krankenhaus kann allerdings der Speicher wieder kontinuierlich aufgeladen werden. Der Ladezustand von 42 Prozent im Betriebshof täuscht insgesamt etwas. Umläufe, die die Haltestelle Krankenhaus nur selten anfahren, würden ohne längere Pausen mit einem Nachladepunkt wie dem Depot, nur schwer fahrbar sein.

Deutlich attraktiver ist es, wenn die Fahrleitung genau in den Abschnitten verbaut werden würde, die grundsätzlich immer befahren werden, egal welcher der vier Endpunkte angefahren wird. Bei der Fahrleitungsvariante zwischen Eschleber Straße und ZOB sinkt der Ladezustand auf minimal 60 Prozent während der Vormittagsfahrten zwischen Krankenhaus und Tüttleben. Dieser Umlauf ist auch mit über 14 km der längste. Während der Fahrten zwischen der Eschleber Straße und der Seeberger Landstraße kann wieder mehr Energie in die Batterie geladen werden, als entnommen wird. Die Fahrten nach dem kompletten Aufladen im Betriebshof sind aus energetischer Sicht komplett unkritisch.

Ähnlich gestaltet sich der Kurvenverlauf des Batterieladezustands, wenn die Fahrleitung nur bis zur Huttenstraße verlegt wird. Zwar wird mit minimal 37 Prozent der Energiespeicher stärker entladen und nur ein längerer Verkehr zwischen Krankenhaus und Tüttleben würde zu einem weiteren Absinken führen, kann aber durch die Kombination mit den anderen Endhalten gut kompensiert werden.

Eine weitere Kürzung der Fahrleitung bis zur Gartenstraße ist mit dem vorgegebenen Tagesprofil zwar möglich, fällt mit einem minimalen Ladezustand von 8 Prozent sehr knapp aus und kann daher nicht empfohlen werden.

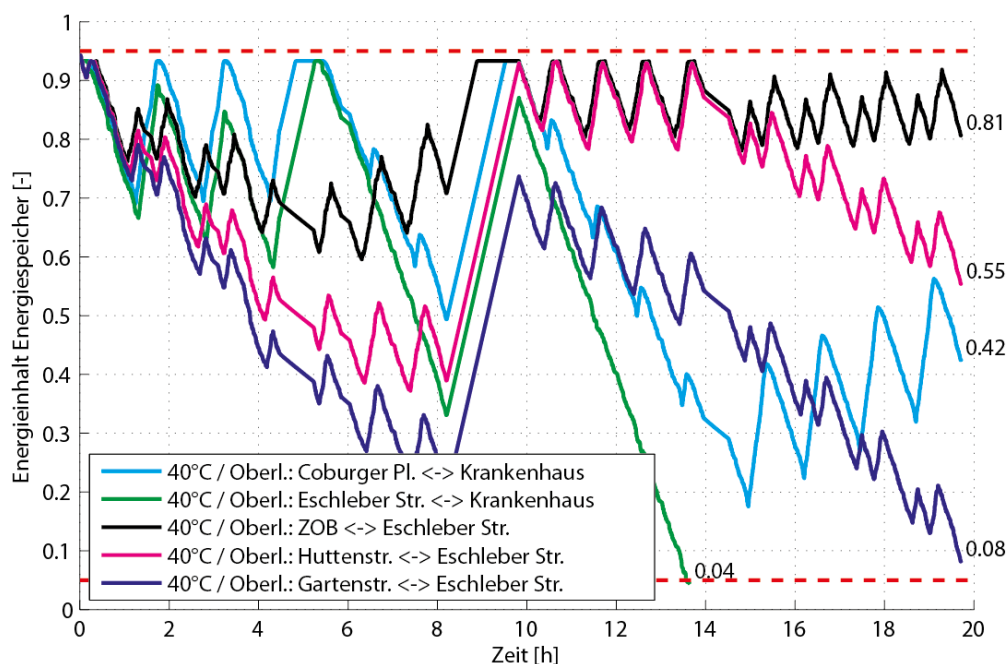


Abb. 24
Zeitlicher Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie bei Fahrleitungsbetrieb und 40 °C in Gotha

Entsprechend der genannten Fahrleitungsvarianten stellt sich bei Erreichen des Betriebshofs am Tagesende ein anderer Ladezustand ein. So sind zwischen 31 und 191 kWh an Energie nachzuladen (vgl. Tabelle 22), was Ladezeiten zwischen 20 Minuten und über zwei Stunden in Anspruch nehmen würde.

Variation der Fahrleitungslänge

	SOE _{Ende, Depot} [%]	SOE _{min} [%]	Ladung im Depot [kWh]
Coburger Platz ⇔ Krankenhaus	42	18	117
Eschleber Straße ⇔ Krankenhaus	k. A.	k. A.	k. A.
ZOB ⇔ Eschleber Straße	81	60	31
Huttenstraße ⇔ Eschleber Straße	55	37	88
Gartenstraße ⇔ Eschleber Straße	8	8	191

Tabelle 22
Ladezustände und Reichweite bei Erreichen des Depots in Gotha

Besonders in den Vormittagsstunden beeinflussen die langen Fahrten zwischen Tüttleben und dem Krankenhaus den Batterieladezustand, da bei diesen Fahrten mehr Energie der Batterie entnommen wird, als wieder nachgeladen werden kann. Wird der Bereich zwischen Eschleber Straße und Huttenstraße elektrifiziert, so sinkt der Ladezustand der Batterie stärker ab als bei der Fahrleitungsvariante bis zum ZOB. Der minimale Ladezustand bleibt dabei aber auf einem hohen Niveau von 51 Prozent bei der Klimatisierung auf drei Kelvin unter Außentemperatur bzw. 37 Prozent bei der Vollklimatisierung. Bei der ZOB-Variante werden 71 bzw. 60 Prozent nicht unterschritten.

Da die Simulationen in Gotha auf sehr wenigen Messfahrten und einen entsprechend künstlich erstellten Tagesumlauf der Umläufe 2030 und 2031 beruhen, ist auch bei der Auswertung der Fahrleitungsfahrten, wie bereits in Abschnitt 3.3 dargelegt, ein niedrigerer tatsächlicher Energiebedarf zu erwarten.

	mit Citysphere-Anlagen	mit Vollklima-anlage
Traktionsenergie [kWh/km]	1,52	1,52
Energie für Klimatisierung	0,05	0,34
Energie für Nebenaggregate [kWh/km]	0,55	0,56
Verluste der Traktionsbatterie [kWh/km]	0,23	0,24
Gesamtenergiebedarf [kWh/km]	2,35	2,66

Tabelle 23
Energiebilanz bei Fahrleitung zwischen Eschleber Straße und Huttenstraße in Gotha

4.4 Jena

Variation der Fahrleitungslänge

Für Jena wurden insgesamt fünf Fahrleitungsvarianten gerechnet (vgl. Abb. 25 bis Abb. 29). Die erste Variante sah eine Fahrleitung zwischen den Haltestellen Buchenweg und Fachhochschule vor. Die nächsten verkürzten ausgehend von der Haltestelle Grüne Aue den Abstand zur Haltestelle Westbahnhof. Die kürzeste Fahrleitungsvariante war die zwischen der Fachhochschule und dem Westbahnhof.

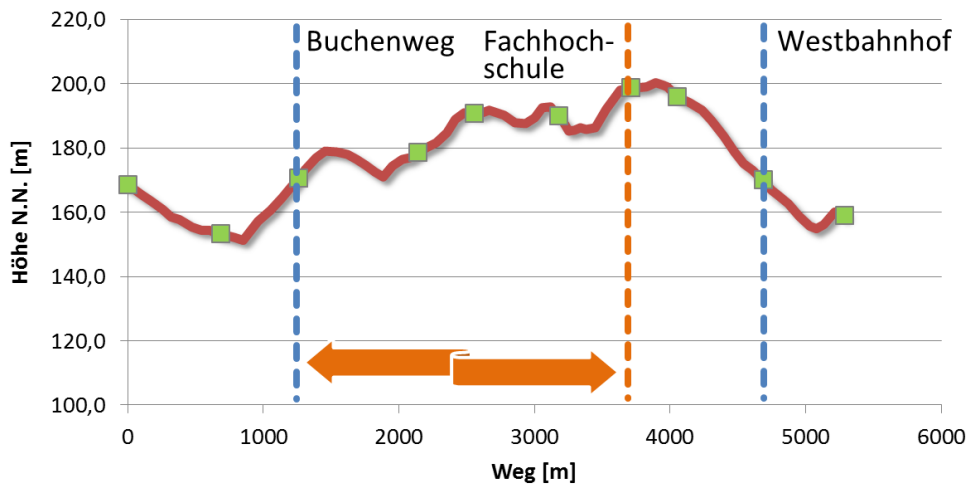


Abb. 25
Jena – Fahrleitungsvariante
zwischen Buchenweg und
Fachhochschule

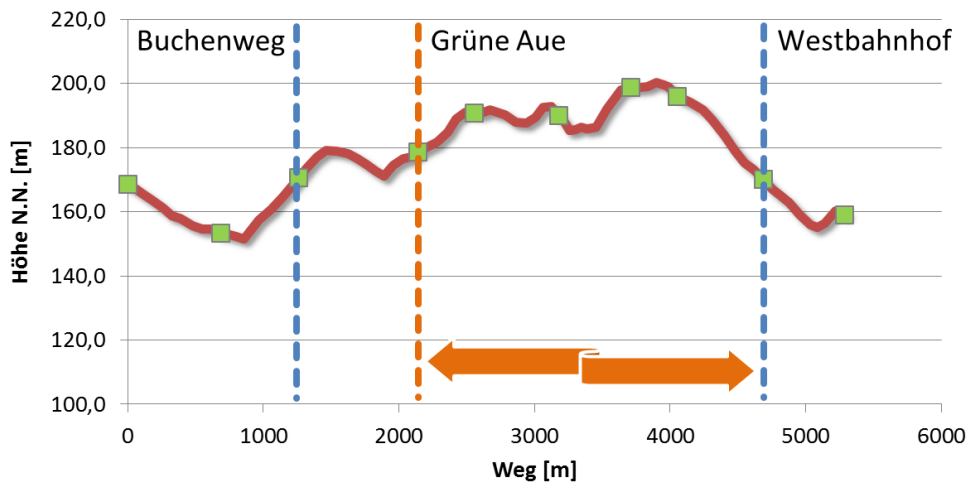


Abb. 26
Jena – Fahrleitungsvariante
zwischen Grüne Aue und
Westbahnhof

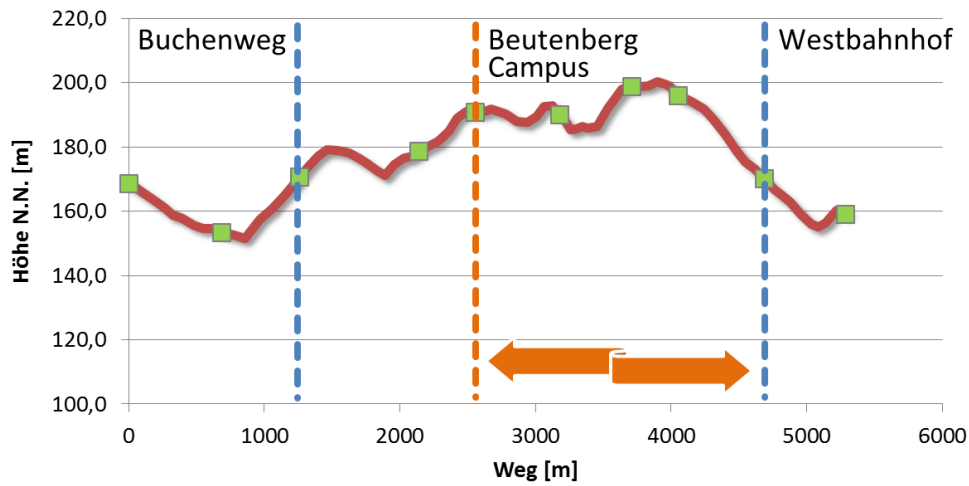


Abb. 27
Jena – Fahrleitungsvariante zwischen Beutenberg Campus und Westbahnhof

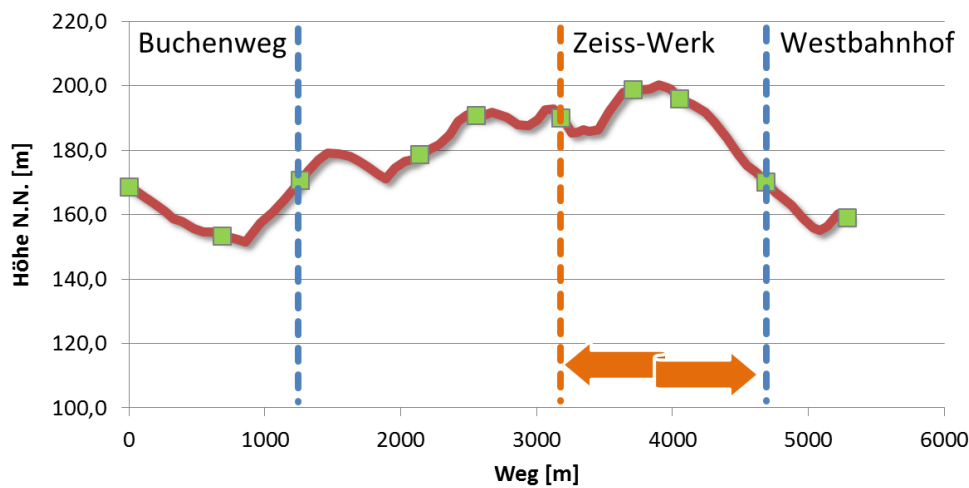


Abb. 28
Jena – Fahrleitungsvariante zwischen Zeiss-Werk und Westbahnhof

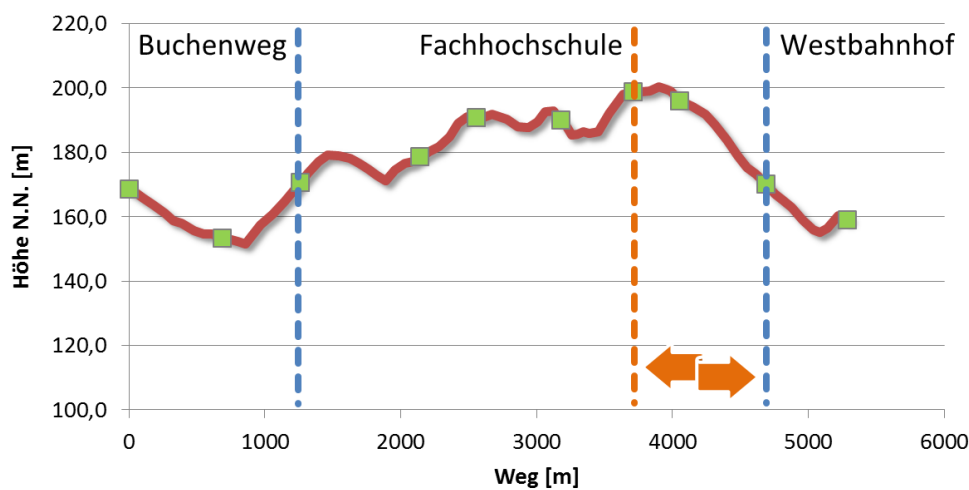


Abb. 29
Jena – Fahrleitungsvariante zwischen Fachhochschule und Westbahnhof

Abb. 30 zeigt die aus den einzelnen Varianten errechneten Ladezustände der Batterie. Dabei überlagern sich die Kurvenverläufe, bis auf die der Variante mit Fahrleitung zwischen Fachhochschule und Westbahnhof. Bei all diesen Varianten kann bei einem Fahrzeug mit den Citysphere-Klimaanlagen in kürzester Zeit die Batterie wieder komplett aufgeladen werden. Der Ladezustand der Batterie würde immer über 85 Prozent betragen, sodass der Energiespeicher deutlich verkleinert werden könnte.

Bei der Fahrleitungsvariante zwischen Fachhochschule und Westbahnhof kann hingegen der Energiespeicher in den Fahrleitungsabschnitten weniger Energie aufnehmen, als verbraucht wurde, sodass der Ladezustand der Batterie kontinuierlich fällt. Mit einem Minimum von 63 Prozent, bei Erreichen des Betriebshofs, besteht aber noch ausreichend Reserve.

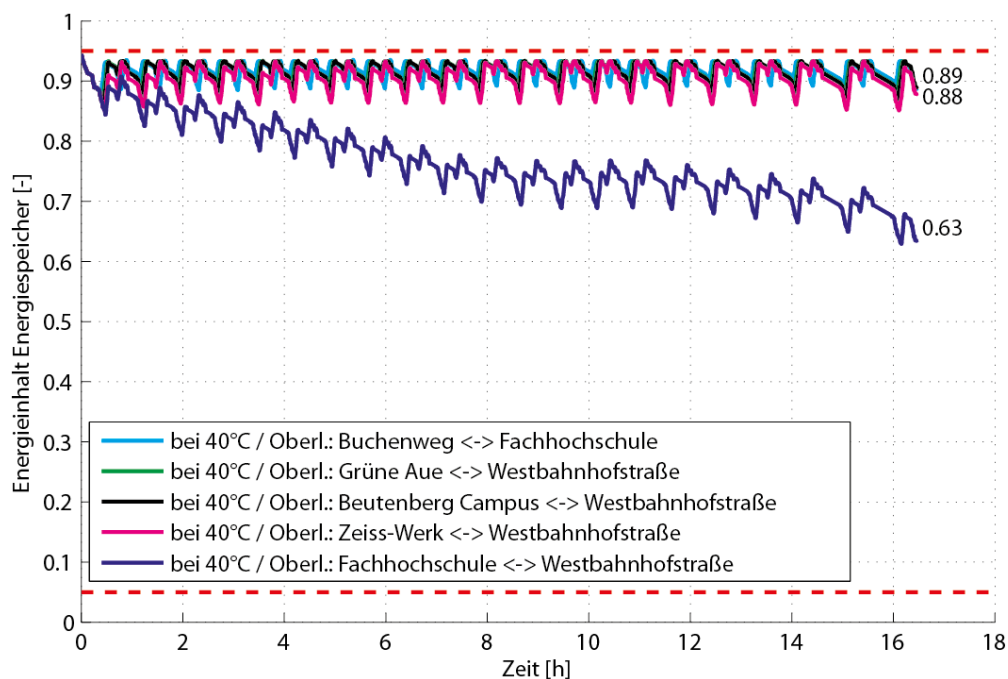


Abb. 30
Zeitlicher Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie bei Fahrleitungsbetrieb und 40 °C in Jena

Da der Energiespeicher in den ersten vier Varianten der Tabelle 24 während des Tages komplett aufgeladen werden konnte, sind im Betriebshof lediglich 13 bzw. 15 kWh nachzuladen – eine Nachladung im Betriebshof könnte damit entfallen. In der letzten Variante sind hingegen insgesamt 70 kWh nachzuladen, was in unter einer Stunde möglich ist.

	SOE _{Ende, Depot} [%]	SOE _{min} [%]	Ladung im Depot [kWh]
Buchenweg <-> Fachhochschule	89	87	13
Grüne Aue <-> Westbahnhofstraße	89	86	13
Beutenberg Campus <-> Westbahnhofstraße	89	86	13
Zeiss-Werk <-> Westbahnhofstraße	88	85	15
Fachhochschule <-> Westbahnhofstraße	63	63	70

Tabelle 24
Ladezustände und Reichweite bei Erreichen des Depots in Jena

Sind die Fahrzeuge mit einer Vollklimaanlage ausgerüstet, so wie es in Jena üblich ist, steigt der Energiebedarf für die Klimatisierung weiter an. Simuliert wurden die Fahrleitungsvarianten zwischen Zeiss-Werk und Westbahnhof sowie zwischen Fachhochschule und Westbahnhof. Wie schon bei den Citysphere-Klimaanlagen, fällt der Ladezustand der Batterie im Tagesverlauf kontinuierlich, wobei am Tagesende die Batterie noch einen Ladezustand von 26 Prozent aufweist.

Wird die Fahrleitung um eine Haltestelle bis zum Zeiss-Werk weiter verlängert, so ergibt sich wieder eine ausgeglichene Energiebilanz. Der Minimalwert des Ladezustands beträgt dabei 84 Prozent. Bei dieser Variante kann der Energiespeicher deutlich verkleinert werden, was auch in diesem Fall zu einer Reduktion der Anschaffungskosten und der Fahrzeugleermasse führen würde.

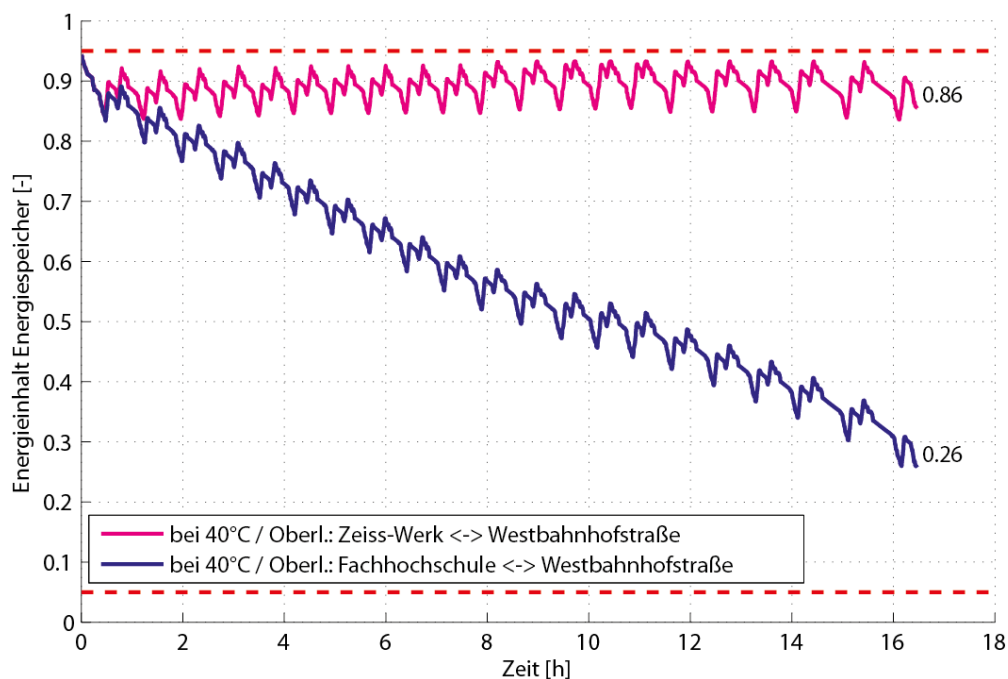


Abb. 31
Zeitlicher Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie bei Fahrleitungsbetrieb und 40 °C in Jena mit Vollklimatisierung

	SOE _{Ende, Depot} [%]	SOE _{min} [%]	Ladung im Depot [kWh]
Zeiss-Werk <-> Westbahnhofstraße	86	84	20
Fachhochschule <-> Westbahnhofstraße	26	26	152

Tabelle 25
Ladezustände und Reichweite bei Erreichen des Depots in Jena mit Vollklimatisierung

Die Simulationen zeigen, dass in Jena bereits bei sehr kurzen Fahrleitungsabschnitten der Betrieb von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen möglich ist. Unabhängig von der Klimatisierungsmethode und den Temperaturvorgaben kann bei der Fahrleitungsvariante zwischen Zeiss-Werk und Westbahnhof derart viel Energie innerhalb des Fahrleitungsabschnitts nachgeladen werden, dass eine Nachladung auf dem Betriebshof nicht notwendig ist. Des Weiteren, könnte der Energiespeicher verkleinert werden um die Systemmasse und die Anschaffungskosten zu reduzieren. Die Energieverbräuche mit und ohne Vollklimaanlage zeigt Tabelle 26.

	mit Citysphere- Anlagen	mit Vollklima- anlage
Traktionsenergie [kWh/km]	1,40	1,40
Energie für Klimatisierung	0,07	0,41
Energie für Nebenaggregate [kWh/km]	0,56	0,55
Verluste der Traktionsbatterie [kWh/km]	0,25	0,23
Gesamtenergiebedarf [kWh/km]	2,28	2,59

.....
Variation der Fahrleitungslänge
.....

Tabelle 26

Energiebilanz bei Fahrlei-
tung zwischen Zeiss-Werk
und Westbahnhof in Jena

5 ÖPNV-Investitionsrichtlinie 2015

Seit Beginn des Jahres 2015 ist die neue ÖPNV-Investitionsrichtlinie des Freistaates Thüringen in Kraft. 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 sein 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 27) sollen die wesentlichen Punkte der Investitionsrichtlinie als Auszug wiedergegeben werden.

	Inhalt der Richtlinie	Verweis auf Investitionsrichtlinie
Grundförderung für Gelenk-/ Doppelstockbus und Buszug	100.000 €	5.2.4
Grundförderung Standardbus (>11 m)	70.000 €	5.2.4
Fördersatz für zuwendungsfähige Mehrkosten alternativer Antriebe	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 27
Zusammenfassung für die
Kostenkalkulation relevanter
Punkte der Investitionsrichtlinie

6 Kostenkalkulation und Systemvergleich

Mit den unter Kapitel 6 genannten Fördersätzen sind nachfolgende Kalkulationen erstellt worden. Es sind für Diesel- 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 28). Diese Angebotspreise sind für weitere Kostenkalkulationen gemittelt worden. Bei den Kosten der Energiespeicher ist ebenfalls so verfahren worden. Für die Städte, die Kosten aus ihrer Betriebserfahrung zugearbeitet haben, wurden diese Werte für die Kalkulation berücksichtigt. Für die Städte, die keine Zuarbeit geleistet haben, wurden Mittelwerte aus den bekannten Werten gebildet. Bei den Wartungs-, Material- und Versicherungskosten der Elektrofahrzeuge sind die gleichen Kosten angesetzt worden, wie für die Dieselfahrzeuge in den jeweiligen Städten. Aus den Erfahrungen von Verkehrsbetrieben bei der Einführung von Hybridfahrzeugen ist bekannt, dass anfänglich höhere Kosten 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.

	Hersteller A	Hersteller B	Hersteller C
18 m-Obus mit Batteriespeicher	1.015.000 €	815.000	k. A.
18 m-Obus mit Batteriespeicher (für Kalkulation verwendeter Wert)	915.000 €		
12 m Batteriebus mit punktueller Nachladung	517.000 €	537.000 €	384.000 €
12 m Batteriebus mit punktueller Nachladung (für Kalkulation verwendeter Wert)	479.500 €		

Tabelle 28
unverbindliche Fahrzeugpreise von Herstellern, anonymisiert

Diese Anschaffungskosten beziehen sich auf das Fahrzeug inklusive Energiespeicher und fahrzeugseitig notwendigen Komponenten für das Nachladesystem.

Nach den neuen Simulationsergebnissen kommt für Jena auch eine Variante mit 18 m-Batterie Gelenkbus mit punktueller Nachladung in Frage. Derzeit liegen keine konkreten Preisangaben von Herstellern vor. Daher wird für die Kostenbetrachtungen dieser Variante von einem geschätzten Fahrzeugpreis inkl. Batteriespeicher von 700.000 € ausgegangen.

Die Anschaffungskosten für die Referenzdieselfahrzeuge werden anhand der zugearbeiteten Zahlen aus den Städten gebildet (siehe Tabelle 29). Für Städte, in denen Werte vorliegen, sind diese Werte bei der Kalkulation berücksichtigt worden.

Tabelle 29
Anschaffungskosten von
Dieselfahrzeugen

	Erfurt	Gera	Nordhausen
18 m-Gelenkdieselbus	360.000 €	315.000	k. A.
18 m-Gelenkdieselbus (Mittelwert)	338.000 €		k. A.
12 m Standardsolobus	k. A.	k. A.	240.000 € ... 250.000 €
12 m Standardsolobus (Mittelwert)	k. A.		245.000 €

Für die Energiespeicher ist bisher von Kosten von ca. 1.200 €/kWh ausgegangen worden. Nach neueren Erkenntnissen können die Kosten je kWh mit 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 €.

Diese Kosten spiegeln die aktuellen Tendenzen bei mobilen Batteriespeichern wider und entsprechen technisch sicheren sowie zyklentfesten 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 selbst konservativ bis zu 7 Jahre anzunehmen, Tendenz steigend. 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 entsprechen den Werten aus den vorangegangenen Berichten. Der Liter Diesel wird mit durchschnittlich 1,09 €/l und die Kilowattstunde elektrische Energie mit 0,12 €/kWh kalkuliert.

6.1 Erfurt

In Erfurt ergeben sich nach den neuen Ansätzen der Heizungs- und Klimatisierungsstrategie wesentlich kürzere Fahrleitungsstrecken (siehe Tabelle 30).

Heizungs- und Klimatisierungsstrategie	Fahrleitungsabschnitt	Fahrleitungslänge
Rein elektrisch geheizt und vollklimatisiert	Nordbahnhof ⇔ Ruhrstraße	8,2 Einf.-km
Chemisch geheizt und vollklimatisiert	Nordbahnhof ⇔ Schwimmhalle Johannesplatz	2,6 Einf.-km
Chemisch geheizt und Klima-light	Nordbahnhof ⇔ Schwimmhalle Johannesplatz	2,6 Einf.-km

Tabelle 30
Fahrleitungslängen in Abhängigkeit der Heizungs- und Klimatisierungsstrategie in Erfurt

Wie in Kapitel 4.1 dargelegt wird, kann mit der Fahrleitungsstrecke von der Haltestelle „Schwimmhalle Johannesplatz“ über die Endhaltestelle „Nordbahnhof“ und zurück zur Haltestelle „Schwimmhalle Johannesplatz“ der gesamte erforderliche Energiebedarf bei chemischen Heizen und den beiden Klimatisierungsvarianten abgedeckt werden. Lediglich die Klimatisierungsvarianten unterscheiden sich in ihrem Energiebedarf und den dadurch entstehenden Energiekosten.

Ausgehend von der o.g. Verkürzung der Fahrleitungslänge sind folgende Annahmen für die Kostenkalkulation getroffen worden:

- Variante EF 1: voll elektrisches Heizen, Vollklimatisierung, Fahrleitung von Ruhrstraße bis Nordbahnhof und zurück, 220 kWh Energiespeicher
- Variante EF 2: chemisches Heizen, Vollklimatisierung, Fahrleitung von Schwimmhalle Johannesplatz bis Nordbahnhof und zurück, 220 kWh Energiespeicher
- Variante EF 3: chemisches Heizen, Klima-light, Fahrleitung von Schwimmhalle Johannesplatz bis Nordbahnhof und zurück, 220 kWh Energiespeicher
- Variante EF 4: Dieselbus, vollklimatisiert

Eine Lösung mit punktueller Nachladung wäre mit einem vertretbar großen Energiespeicher nicht realisierbar (siehe Kapitel 3.1).

Tabelle 31
Eingangsgrößen für Fahrzeugkalkulation in Erfurt

Werte je Fahrzeug	Var. EF 1	Var. EF 2	Var. EF 3	Var. EF 4
Einzusetzende Fahrzeuge [-]	7			
Anschaffungskosten [T€]	915			360
Grundförderung [T€]	100			
Mehrkostenförderung bei 75 % Fördersatz [T€]	416,25			-
Summe Fördermittelaufwand [T€]	516,25			100
Eigenanteil für VU [T€]	398,75			260
Verzinsungssatz [%]	3			
Abschreibungsdauer [Jahre]	12			9
Nutzungsdauer [Jahre]	14			12
Jährliche Abschreibung und Verzinsung [T€]	39,2			32,8
Jährlicher Material-, Instandhaltungs- und Versicherungskosten [T€]	18,2			
Anschaffungskosten Ersatzenergiespeicher [T€]	165			-
Förderung Ersatzenergiespeicher bei 80 % Fördersatz [T€]	132			-
Eigenanteil Ersatzenergiespeicher für VU [T€]	33,0			-
Abschreibungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	5			-
Nutzungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	7			-
Jährliche Abschreibung und Verzinsung Ersatzenergiespeicher [T€]	7,1			-
Jahresfahrleistung [km]	60.100			
Mittlerer Energie-/ Kraftstoffverbrauch je km	2,92 kWh/km	2,31 kWh/km	2,24 kWh/km	0,54 l/km
Energie-/ Kraftstoffkosten je km [€/km]	0,35	0,28	0,27	0,59
Mittlerer Jahresheizenergieverbrauch für chem. Heizung [kWh/km]	-	0,77		-
Kosten chem. Heizen [€/km]	-	0,12		-
Reifen-/Verbrauchsstoffkosten je km [€/km]	0,05			

Aus den vorangegangenen Berichten (2013/2014) war zu entnehmen, dass neben den Anschaffungs- und Betriebskosten der Fahrzeuge, die Kosten für die Errichtung der Infrastruktur einen wesentlichen Anteil an den Projektgesamtkosten besitzen. Deshalb sind die neuen energetischen Untersuchungen durchgeführt worden, um eine Entscheidungsgrundlage zu erarbeiten wonach alle technisch realisierbaren Systeme auf Basis von batterieelektrischen Fahrzeugen untersucht worden. Nachfolgend sollen die Kosten in Erfurt für die Infrastrukturerrichtung und deren Betrieb dargestellt werden.

Kostenkalkulation und
Systemvergleich

	Var. EF 1	Var. EF 2	Var. EF 3	Var. EF 4
Errichtungskosten je Einf.-km Fahrleitung [T€]	350			-
Erforderliche Fahrleitungslänge [Einf.-km]	8,2	2,6		-
Anschaffungskosten Infrastruktur o. Förderung [T€]	2.870	910		-
Förderung bei 80 % Fördersatz [T€]	2.296	730		-
Eigenanteil für VU [T€]	574	180		-
Verzinsungssatz [%]	3			-
Abschreibungsdauer [Jahre]	25			-
Jährliche Abschreibung und Verzinsung [T€]	31,6	10,0		-
Instandhaltungskosten bei 4.850 €/Einf.-km Fahrleitung [T€]	39,8	12,6		-

Tabelle 32
Eingangsgroßen
Infrastrukturkalkulation in
Erfurt

Aus den in Tabelle 31 und Tabelle 32 aufgezeigten Kosten ergibt sich der Erstinvestitionsaufwand, der Fördermittelbedarf sowie der Eigenanteil für die Fahrzeugbeschaffung und die Erstellung der Infrastruktur (siehe Tabelle 33). Der Fördermittelbedarf beinhaltet die Grundförderung, die Mehrkostenförderung und die Infrastrukturförderung.

	Var. EF 1	Var. EF 2	Var. EF 3	Var. EF 4
Gesamtkosten [T€]	9.275	7.311		2.520
Fördermittel [T€]	5.910	4.340		700
Eigenanteil VU [T€]	3.365	2.971		1.820

Tabelle 33
Erstinvestitionskosten, Fördermittelbedarf und Eigenanteil in Erfurt

Abschließend sollen die zu erwartenden Gesamtkosten für das Verkehrsunternehmen angegeben werden. Dabei sind zukünftige Preisentwicklungen (z. B. Batteriespeicher, Kraftstoffe, Strom) nicht berücksichtigt. Des Weiteren wird ein inhaltliches Fortbestehen

der Investitionsrichtlinie über das Jahr 2017 hinaus vorausgesetzt, so dass auch bei Folge- bzw. Ersatzanschaffungen diese Anwendung findet. Welche Kosten für die Verkehrsunternehmen nach heutigen Preisen entstehen würden, wenn keine Förderung in diesem Umfang gewährt wird, kann dem Abschlussbericht der Phase 2 (2014) entnommen werden.

Kostenkalkulation und
Systemvergleich

	Var. EF 1	Var. EF 2	Var. EF 3	Var. EF 4
Abschreibung/ Verzinsung Fahrzeuge [T€]	6.760			4.360
Abschreibung/ Verzinsung Infrastruktur [T€]	800	250		-
Summe Abschreibung/ Verzinsung [T€]	7.560	7.010		4.360
Betriebskosten Fahrzeuge [T€]	7.720	7.910	7.840	9.910
Betriebskosten Infrastruktur [T€]	1.000	320		-
Summe Betriebskosten [T€]	8.721	8.240	8.160	9.910
Kostenaufwand für das VU [T€]	16.280	15.250	15.170	14.270
Fördermittelaufwand Fahrzeuge [T€]	9.080			2.100
Fördermittelaufwand Infrastruktur [T€]	2.300	728		-
Summe Fördermittelaufwand [T€]	11.380	9.810	9.810	2.100

Tabelle 34
Kostenaufwand für das VU
und Fördermittelaufwand
über 25 Betriebsjahre in
Erfurt

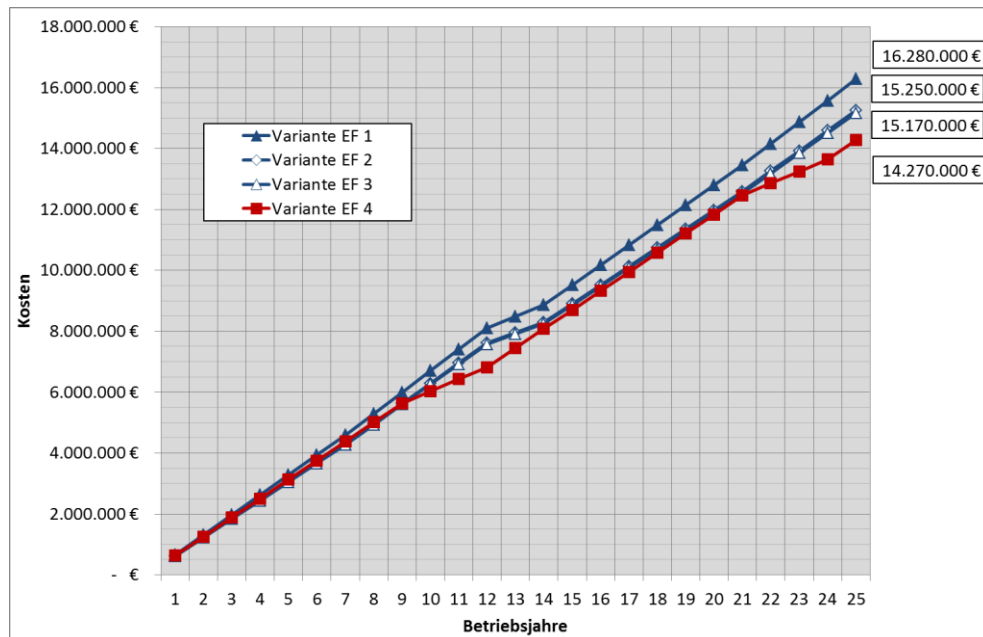


Abb. 32
Kosten für VU innerhalb von
25 Betriebsjahren in Erfurt

In Abb. 32 erkennt man sehr gut, dass gegenüber der Variante EF 1 (elektr. Heizen) die Varianten EF 2 und 3 (chem. Heizen) kostengünstigster sind. Aufgrund der höheren Förderung der Elektrofahrzeuge im Vergleich zu den Dieselfahrzeugen ergeben sich Kosten in der nahezu gleicher Höhe.

Um einen besseren Vergleich zwischen den Systemen zu geben, werden nachfolgend (siehe Tabelle 35) die Kosten je gefahrenen Linienkilometer als Mittelwert über den 25-jährigen Betrachtungszeitraum dargestellt. Es sind sowohl die Kosten für Anschaffung und Verzinsung für Fahrzeuge sowie Infrastruktur als auch sämtliche Betriebs- und Instandhaltungskosten für Fahrzeug und Infrastruktur berücksichtigt und durch die angenommene Fahrleistung auf der untersuchten Linie geteilt worden.

	Var. EF 1	Var. EF 2	Var. EF 3	Var. EF 4
Fahrzeugkosten [€/km]	1,38	1,39	1,39	1,36
Infrastrukturkosten [€/km]	0,17	0,05	0,05	-
Gesamt [€/km]	1,55	1,44	1,44	1,36

Tabelle 35
Mittlere Kilometerkosten
auf der untersuchten Linie 9
in Erfurt

6.2 Gera

Unter Berücksichtigung der neuen Untersuchungsansätze im Bereich des chemischen Heizens ergeben sich wesentlich kürzere Fahrleitungsstrecken (siehe Tabelle 36). Der Energiebedarf, der durch das rein elektrische Heizen erforderlich war, machte eine Fahrleitungslänge von über 11 km nötig. Durch den Einsatz eines chemischen Heizsystems kann die Fahrleitungslänge auf etwa 5 km reduziert werden. Dies senkt die erforderlichen Investitions- und Betriebskosten für die Infrastruktur.

Heizungs- und Klimatisierungsstrategie	Fahrleitungsabschnitt	Fahrleitungslänge
Rein elektrisch geheizt und Klima-Light	Heinrichstraße ⇔ Reußpark	11,4 Einf.-km
Chemisch geheizt und Klima-light	Leumnitz ⇔ Reußpark	5,2 Einf.-km

Tabelle 36
Fahrleitungslängen in Abhängigkeit der Heizungs- und Klimatisierungsstrategie in Gera

Aus den neu untersuchten Varianten ergeben sich ebenfalls neue Kostenszenarien, die nachfolgend dargestellt sind. Da in Gera bisher nur Klima-Light Anlagen in Gebrauch sind, wurde auf die Untersuchung einer vollklimatisierten Variante verzichtet.

- Variante G 1: voll elektrisches Heizen, Klima-Light, Fahrleitung von Heinrichstraße bis Reußpark und zurück, 220 kWh Energiespeicher
- Variante G 2: chemisches Heizen, Klima-light, Fahrleitung von Leumnitz bis Reußpark und zurück, 220 kWh Energiespeicher
- Variante G 3: Dieselbus, Klima-Light

Tabelle 37
Eingangsgrößen für Fahrzeugkalkulation in Gera

Werte je Fahrzeug	Variante G 1	Variante G 2	Variante G 3
Einzusetzende Fahrzeuge [-]	4		
Anschaffungskosten [T€]	915		315
Grundförderung [T€]	100		
Mehrkostenförderung bei 75 % Fördersatz [T€]	450		-
Summe Fördermittelaufwand [T€]	550		100
Eigenanteil für VU [T€]	365		215
Verzinsungssatz [%]	3		
Abschreibungsdauer [Jahre]	12		9
Nutzungsdauer [Jahre]	14		9
Jährliche Abschreibung und Verzinsung [T€]	35,9		27,1
Jährlicher Material-, Instandhaltungs- und Versicherungskosten [T€]	15,1		
Anschaffungskosten Ersatzenergiespeicher [T€]	165		-
Förderung Ersatzenergiespeicher bei 80 % Fördersatz [T€]	132		-
Eigenanteil Ersatzenergiespeicher für VU [T€]	33,0		-
Abschreibungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	5		-
Nutzungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	7		-
Jährliche Abschreibung und Verzinsung Ersatzenergiespeicher [T€]	7,1		
Jahresfahrleistung [km]	79.900		
Mittlerer Energie-/ Kraftstoffverbrauch je km	2,76 kWh/km	2,20 kWh/km	0,55 l/km
Energie-/ Kraftstoffkosten je km [€/km]	0,33	0,26	0,60
Mittlerer Jahresheizenergieverbrauch für chem. Heizung [kWh/km]	-	0,57	-
Kosten chem. Heizen [€/km]	-	0,09	-
Reifen-/Verbrauchsstoffkosten je km [€/km]	0,03		

Aus dem vorangegangenen Berichten ist zu entnehmen, dass neben den Anschaffungs- und Betriebskosten der Fahrzeuge, auch die Kosten für die Errichtung der Infrastruktur und deren Instandhaltung einen wesentlichen Anteil an den Projektgesamtkosten ausmachen. Deshalb sind neue energetische Untersuchungen unter Berücksichtigung des chemischen Heizens durchgeführt worden. Nachfolgend sind die Kosten für die Infrastrukturerrichtung und deren Betrieb in Gera für die oben genannten Varianten dargestellt.

Kostenkalkulation und
Systemvergleich

	Variante G 1	Variante G 2	Variante G 3
Errichtungskosten je Einf.-km Fahrleitung [T€]	350		-
Erforderliche Fahrleitungslänge [Einf.-km]	11,4	5,2	-
Anschaffungskosten Infrastruktur o. Förderung [T€]	3.990	1.820	-
Förderung bei 80 % Fördersatz [T€]	3.192	1.456	-
Eigenanteil für VU [T€]	798	364	-
Verzinsungssatz [%]	3		-
Abschreibungsdauer [Jahre]	25		-
Jährliche Abschreibung und Verzinsung [T€]	43,9	20	-
Instandhaltungskosten bei 4.850 €/Einf.-km Fahrleitung [T€]	55,3	25,2	-

Tabelle 38
Eingangsgroßen Infrastrukturkalkulation in Gera

Aus den Tabelle 37 und Tabelle 38 lassen sich Erstinvestitionskosten und der Fördermittelbedarf ableiten.

	Variante G 1	Variante G 2	Variante G 3
Gesamtkosten [T€]	7.650	5.480	1.260
Fördermittel [T€]	5.390	3.660	400
Eigenanteil VU [T€]	2.260	1.820	860

Tabelle 39
Erstinvestitionskosten und Fördermittelbedarf in Gera

Abschließend sollen die zu erwartenden Gesamtkosten für das Verkehrsunternehmen innerhalb von 25 Betriebsjahren gezeigt werden. Hierbei werden analog zur Berechnung in Erfurt der Einfluss von Inflation und weiteren kostenändernden Ereignissen nicht berücksichtigt. Das inhaltliche Fortbestehen der Investitionsrichtlinie wird vorausgesetzt, so dass auch bei Folge- bzw. Ersatzanschaffungen diese Anwendung findet.

	Variante G 1	Variante G 2	Variante G 3
Abschreibung/ Verzinsung Fahrzeuge [T€]	3.550		2.710
Abschreibung/ Verzinsung Infrastruktur [T€]	1.100	500	-
Summe Abschreibung/ Verzinsung (VU) [T€]	4.650	4.060	2.710
Betriebskosten Fahrzeuge [T€]	4.400	4.630	6.540
Summe Betriebskosten Infrastruktur (VU) [T€]	1.500	630	-
Summe Betriebskosten (VU) [T€]	5.900	5.260	6.540
Summe finanzieller Aufwand für VU [T€]	10.550	9.320	9.250
Fördermittelaufwand Fahrzeuge [T€]	5.460	5.980	1.200
Fördermittelaufwand Infrastruktur [T€]	3.190	1.460	-
Summe Fördermittelaufwand [T€]	8.650	7.440	1.200

Kostenkalkulation und
Systemvergleich

Tabelle 40
Kostenaufwand für VU und
Fördermittelaufwand über
25 Betriebsjahre in Gera

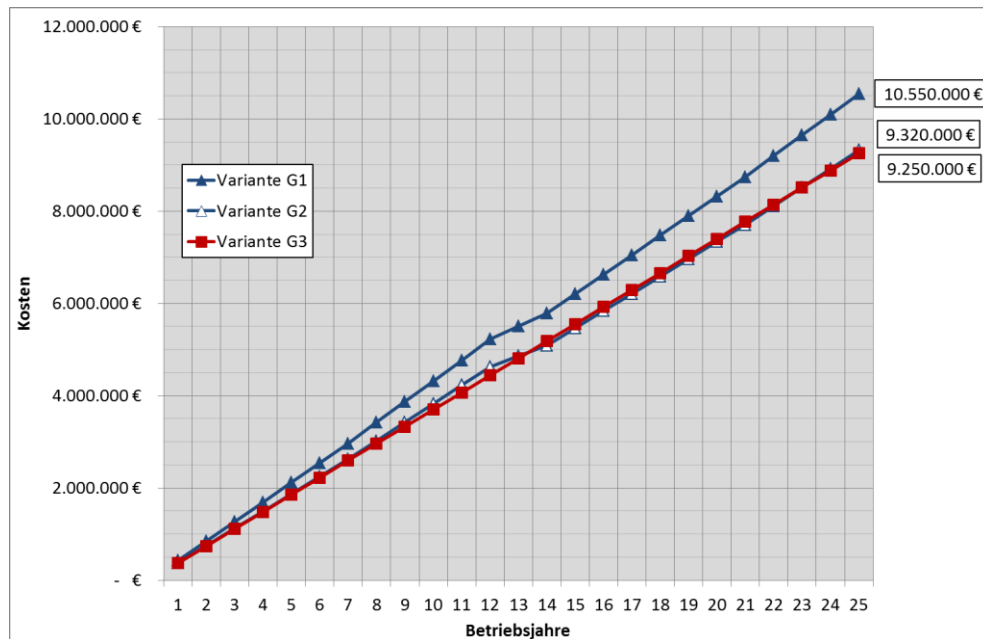


Abb. 33
Kosten für VU innerhalb von
25 Betriebsjahren in Gera

In Abb. 33 sind die zu erwartenden Kosten für das Verkehrsunternehmen innerhalb von 25 Betriebsjahren aufgezeigt. Durch die identischen Zeiträume für Abschreibung und Nutzung bei Variante G 3 verläuft die Kostenkurve linear. Dagegen ist der Anstieg der Kurven für Variante G 1 und G 2 zwischen dem 12. und dem 14. Betriebsjahr (Abschreibungszeitraum bzw. Nutzungsdauer der Fahrzeuge) geringer. Die Gesamtkosten für die Variante G 2 und G 3 sind auch nach 25 Jahren annähernd gleich hoch.

Wenn man sich zur Nutzung elektrischer Antriebe im ÖPNV entschließen möchte, bietet die chemische Heizvariante (G 2) einen guten wirtschaftlichen und technischen Kompromiss, um mit den aktuell eingesetzten Dieselbussen zu konkurrieren. Trotz der Nutzung einer chemischen Zusatzheizung, die mit Heizöl respektive Diesel genutzt wird, ist zu erwarten, dass die Belastung der Umwelt durch Schadstoffe wesentlich geringer ausfällt als bei konventionellen Dieselbussen.

Neben den finalen Kosten nach 25 Betriebsjahren sind die spezifischen Kosten der Linie von Interesse. Tabelle 41 zeigt in Abhängigkeit der Investitions- und Betriebskosten sowie der Jahresfahrleistung auf der Linie die zu erwartenden Kilometerkosten aufgeschlüsselt nach Fahrzeug-, Infrastruktur- und Gesamtkosten.

	Variante G 1	Variante G 2	Variante G 3
Fahrzeugkosten [€/km]	0,99	1,02	1,16
Infrastrukturkosten [€/km]	0,33	0,14	-
Gesamt [€/km]	1,32	1,16	1,16

Tabelle 41
Kosten je Kilometer auf der
untersuchten Linie 17 in
Gera

6.3 Gotha

In Tabelle 42 sind die unterschiedlichen Fahrleitungsabschnitte und –längen dargestellt. Durch die Berücksichtigung von chemischen Heizsystemen und der zusätzlichen Untersuchung von Klima-light Anlagen kann die erforderliche Fahrleitungslänge stark reduziert und zugleich in dem ausschließlich bei jedem Umlauf durchfahrenen Abschnitt vorgesehen werden.

Kostenkalkulation und
Systemvergleich

Heizungs- und Klimatisierungsstrategie	Fahrleitungsabschnitt	Fahrleitungslänge
Rein elektrisch geheizt und vollklimatisiert	ZOB ⇔ Krankenhaus	16,6 Einf.-km
Chemisch geheizt und vollklimatisiert	Huttenstraße ⇔ Eschleber Straße	7,0 Einf.-km
Chemisch geheizt und Klima-light	Huttenstraße ⇔ Eschleber Straße	7,0 Einf.-km

Tabelle 42
Fahrleitungslängen in Abhängigkeit der Heizungs- und Klimatisierungsstrategie in Gotha

Im Kapitel 4.3 ist durch die Simulation gezeigt worden, dass für beide Klimatisierungsarten in Verbindung mit einer chemischen Heizung weniger als die Hälfte der Fahrleitungslänge gegenüber der Ausführung mit elektrischer Heizung benötigt wird. Die unterschiedlichen Varianten zur Ermittlung der voraussichtlichen Kosten für die Umsetzung des Projektes werden nachfolgend genannt.

Variante GTH 1: voll elektrisches Heizen, Vollklimatisierung, Fahrleitung von ZOB bis Krankenhaus und zurück, 220 kWh Energiespeicher

Variante GTH 2: chemisches Heizen, Vollklimatisierung, Fahrleitung von Huttenstraße bis Eschleber Straße und zurück, 220 kWh Energiespeicher

Variante GTH 3: chemisches Heizen, Klima-light, Fahrleitung von Huttenstraße bis Eschleber Straße und zurück, 220 kWh Energiespeicher

Variante GTH 4: Dieselbus, vollklimatisiert

Tabelle 43
Eingangsgrößen für Fahr-
zeugkalkulation in Gotha

Werte je Fahrzeug	Var. GTH 1	Var. GTH 2	Var. GTH 3	Var. GTH 4
Einzusetzende Fahrzeuge [-]	7			
Anschaffungskosten [T€]	915			338
Grundförderung [T€]	100			
Mehrkostenförderung bei 75 % För- dersatz [T€]	432,75			-
Summe Fördermittelaufwand [T€]	532,75			100
Eigenanteil für VU [T€]	382,25			238
Verzinsungssatz [%]	3			
Abschreibungsdauer [Jahre]	12			9
Nutzungsdauer [Jahre]	14			12
Jährliche Abschreibung und Verzin- sung [T€]	38			30
Jährlicher Material-, Instandhaltungs- und Versicherungskosten [T€]	15,4			
Anschaffungskosten Ersatzenergie- speicher [T€]	165			-
Förderung Ersatzenergiespeicher bei 80 % Fördersatz [T€]	132			-
Eigenanteil Ersatzenergiespeicher für VU [T€]	33,0			-
Abschreibungsdauer Ersatzenergie- speicher [Jahre]	5			-
Nutzungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	7			-
Jährliche Abschreibung und Verzin- sung Ersatzenergiespeicher [T€]	7,1			-
Jahresfahrleistung [km]	97.900			
Mittlerer Energie-/ Kraftstoffver- brauch je km	3,03 kWh/km	2,35 kWh/km	2,31 kWh/km	0,55 l/km
Energie-/ Kraftstoffkosten je km [€/km]	0,36	0,28	0,28	0,60
Mittlerer Jahresheizenergieverbrauch für chem. Heizung [kWh/km]	-	0,77		-
Kosten chem. Heizen [€/km]	-	0,12		-
Reifen-/Verbrauchsstoffkosten je km [€/km]	0,04			

Durch die Verkürzung der Fahrleitung und unter Berücksichtigung der Investitionsrichtlinie für den ÖPNV (Stand 2015) sind wesentliche Kosteneinsparungen in der Fahrzeuganschaffung und auch in der Errichtung der benötigten Infrastruktur zu erwarten. Deshalb werden in nachfolgender Tabelle die Kosten für die Infrastruktur in Abhängigkeit der untersuchten Varianten dargestellt.

Kostenkalkulation und
Systemvergleich

	Variante GTH 1	Variante GTH 2	Variante GTH 3	Variante GTH 4
Errichtungskosten je Einf.-km Fahrleitung [T€]	350			-
Erforderliche Fahrleitungslänge [Einf.-km]	16,6	7,0		-
Anschaffungskosten Infrastruktur o. Förderung [T€]	5.810	2.450		-
Förderung bei 80 % Fördersatz [T€]	4.648	1.960		-
Eigenanteil für VU [T€]	1.162	490		-
Verzinsungssatz [%]	3			-
Abschreibungsdauer [Jahre]	25			-
Jährliche Abschreibung und Verzinsung [T€]	64.300	27.000		-
Instandhaltungskosten bei 4.850 €/Einf.-km Fahrleitung [T€]	80.500	34.000		-

Tabelle 44
Eingangsgroßen Infrastrukturmalkulation in Gotha

Aus den Tabellen Tabelle 43 und Tabelle 44 lassen sich der Fördermittelbedarf und die Erstinvestitionskosten berechnen (siehe Tabelle 45). Der Fördermittelbedarf beinhaltet neben der Grundförderung auch die Mehrkostenförderung in der Fahrzeuganschaffung und die Förderung zur Errichtung der Infrastruktur. Dafür ist jeweils der Förderhöchstsatz angesetzt worden.

	Variante GTH 1	Variante GTH 2	Variante GTH 3	Variante GTH 4
Gesamtkosten [T€]	12.220	8.860		2.370
Fördermittel [T€]	8.380	5.690		700
Eigenanteil VU [T€]	3.840	3.170		1.670

Kostenkalkulation und
Systemvergleich

Tabelle 45
Erstinvestitionskosten und
Fördermittelbedarf in Gotha

Abschließend soll der Kostenaufwand über 25 Betriebsjahre für alle 4 Varianten gegenübergestellt werden. Die einzelnen Ergebnisse sind der unten stehenden Tabelle zu entnehmen (siehe Tabelle 46). Zusätzlich wird der Fördermittelaufwand für den betrachteten Zeitraum auf Basis der aktuellen Förderrichtlinie ermittelt.

	Variante GTH 1	Variante GTH 2	Variante GTH 3	Variante GTH 4
Abschreibung/ Verzinsung Fahrzeuge [T€]		6.570		3.990
Abschreibung/ Verzinsung Infrastruktur [T€]	1.580	680		-
Summe Anschaffung/ Verzinsung (VU) [T€]	8.150	7.250	7.250	3.990
Betriebskosten Fahrzeuge [T€]	10.280	10.400	10.300	13.820
Summe Betriebskosten Infrastruktur (VU) [T€]	2.030	850		-
Summe Betriebskosten (VU) [T€]	12.310	11.250	11.150	13.820
Summe finanzieller Aufwand für VU [T€]	20.460	18.500	18.400	17.810
Fördermittelaufwand Fahrzeuge auf Linie [T€]		9.310		2.100
Fördermittelaufwand Infrastruktur [T€]	4.650	1.960		-
Summe Fördermittelaufwand [T€]	13.960	11.270		2.100

Tabelle 46
Kostenaufwand für VU und
Fördermittelaufwand über
25 Betriebsjahre in Gotha

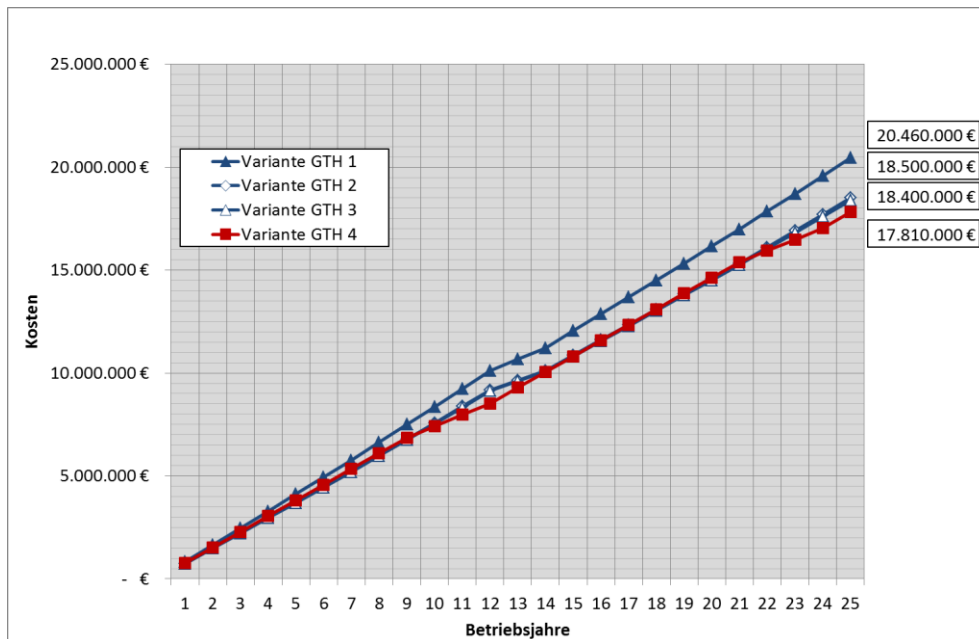


Abb. 34
Kosten für VU innerhalb von
25 Betriebsjahren in Gotha

Die Var. GTH 1 (rein elektrisches Heizen) ist trotz Anwendung der Förderrichtlinie mit Abstand die teuerste Lösung. Grund hierfür ist die wesentlich längere Fahrleitung, die errichtet werden müsste. Wie schon in den vorangegangenen Städten erkennt man, dass durch den Einsatz von chemischen Heizungen die Gesamtkosten reduziert werden können. Unabhängig von der Klimatisierungsvariante ist es möglich, einen annähernden kostengleichen Betrieb im Vergleich zum Dieselbus zu realisieren. Dies spiegelt sich auch in nachstehender Tabelle wider, in der die spezifischen Kosten für Fahrzeug und Infrastruktur dargestellt sind.

	Variante GTH 1	Variante GTH 2	Variante GTH 3	Variante GTH 4
Fahrzeugkosten [€/km]	0,98	0,99	0,98	1,04
Infrastrukturkosten [€/km]	0,21	0,09	0,09	-
Gesamt [€/km]	1,19	1,08	1,07	1,04

Tabelle 47
Kosten je Kilometer auf der
untersuchten Linie A in Gotha

In Tabelle 47 erkennt man, dass durch die hohe Fahrleistung pro Jahr, die spezifischen Fahrzeugkosten der Varianten GTH 1, 2 und 3 trotz der höheren Anschaffungskosten niedriger sind als die für den Dieselbus. Hier spielen die günstigen Kosten für die Energie eine wesentliche Rolle.

6.4 Jena

Durch die neuen Untersuchungen mit geänderten Annahmen hinsichtlich der Heizungs- und Klimatisierungsstrategie sind wesentlich kürzere Fahrleistungsstrecken (siehe Tabelle 48) in Jena realisierbar. Es besteht sogar die Möglichkeit die angedachte Elektrifizierung mit Hilfe von stationären Nachladesystemen zu realisieren. Hierzu ist es notwendig, dass die Fahrzeuge mit einem chemischen Heiz- und einem Klima-Light Klimasystem ausgestattet werden. Ein aktuelles Forschungsprojekt in Dresden befasst sich mit einem Konzept einer Ladestation, die in unmittelbarer Nähe einer Straßenbahnhaltestelle installiert werden soll. Durch die Anschlussverknüpfung von Bahn und Bus wird laut Konzept der Bus geladen während die Bahn in die Haltestelle einfährt. Durch eine direkte Verbindung von Ladestation und Fahrleitung soll die von der Bahn rekuperierte Energie direkt in den Bus übertragen werden. Sollte sich die Praxistauglichkeit nachweisen, wäre dies eine gute Lösung für die zwei Ladestationen in Winzerla und am Burgaupark.

Heizungs- und Klimatisierungsstrategie	Fahrleistungsabschnitt/ Ladestation	Fahrleistungslänge
Rein elektrisch geheizt und vollklimatisiert	Buchenweg ↔ Westbahnhofstraße	6,8 Einf.-km
Chemisch geheizt und vollklimatisiert	Zeisswerk ↔ Westbahnhofstraße	3,25 Einf.-km
Chemisch geheizt und Klima-light	Ladestation Winzerla/ Burgaupark ¹	-

Tabelle 48
Fahrleistungslängen in Abhängigkeit der Heizungs- und Klimatisierungsstrategie in Jena

In den Kapiteln 3.4 und 4.4 sind die Möglichkeiten aufgezeigt worden, dass mit einem chemischen Heizungssystem und der Klima-Light-Variante die Fahrleistungen vollständig wegfallen können bzw. durch den Einsatz einer chemischen Heizung mit Vollklimatisierung die Fahrleistungslänge nahezu halbiert werden kann. Nachfolgend werden verschiedene Varianten betrachtet und hinsichtlich der Anschaffungs- und Betriebskosten sowie des Fördermittelbedarfs untersucht.

- Variante J 1: voll elektrisches Heizen, Vollklimatisierung, Fahrleitung von Buchenweg bis Westbahnhofstraße und zurück, 220 kWh Energiespeicher
- Variante J 2: chemisches Heizen, Vollklimatisierung, Fahrleitung von Zeisswerk bis Westbahnhofstraße und zurück, 220 kWh Energiespeicher
- Variante J 3: chemisches Heizen, Klima-light, jeweils eine Ladestation in Winzerla und Burgaupark, 220 kWh Energiespeicher
- Variante J 4: Dieselbus, vollklimatisiert

¹ Nur für Kostenkalkulation berücksichtigt, da in den Arbeitsberatungen seitens der JeNah die Option genannt wurde, die Elektrobuslinie neben dem Endhalt Winzerla auch zum Burgaupark fahren zu lassen. Die Fahrtstrecke mit Ziel Burgaupark ist von der letzten gemeinsamen Haltestelle Damaschkeweg nur unwesentlich länger und weist keine nennenswerten Steigungs- oder Gefällestrrecken auf.

Tabelle 49
Eingangsgrößen für Fahr-
zeugkalkulation in Jena

Werte je Fahrzeug	Var. J 1	Var. J 2	Var. J 3	Var. J 4
Einzusetzende Fahrzeuge [-]	12			
Anschaffungskosten [T€]	915		700	338
Grundförderung [T€]	100			
Mehrkostenförderung bei 75 % Fördersatz [T€]	432,75		271,50	-
Summe Fördermittelaufwand [T€]	532,75		371,50	100
Eigenanteil für VU [T€]	382,25		328,50	238
Verzinsungssatz [%]	3			
Abschreibungsdauer [Jahre]	12			9
Nutzungsdauer [Jahre]	14			12
Jährliche Abschreibung und Verzinsung [T€]	38,0		32,3	30,0
Jährlicher Material-, Instandhaltungs- und Versicherungskosten [T€]	15,4			
Anschaffungskosten Ersatzenergiespeicher [T€]	165			-
Förderung Ersatzenergiespeicher bei 80 % Fördersatz [T€]	132			-
Eigenanteil Ersatzenergiespeicher für VU [T€]	33,0			-
Abschreibungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	5			-
Nutzungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	7			-
Jährliche Abschreibung und Verzinsung Ersatzenergiespeicher [T€]	7,1			-
Jahresfahrleistung [km]	70.500			
Mittlerer Energie-/ Kraftstoffverbrauch je km	3,06 kWh/km	2,21 kWh/km	2,30 kWh/km	0,55 l/km
Energie-/ Kraftstoffkosten je km [€/km]	0,37	0,27	0,28	0,60
Mittlerer Jahresheizenergieverbrauch für chem. Heizung [kWh/km]	-	0,92		-
Kosten chem. Heizen [€/km]	-	0,15		-
Reifen-/Verbrauchsstoffkosten je km [€/km]	0,04			

Tabelle 50
Eingangsgrößen Infrastruk-
turkalkulation in Jena

	Variante J 1	Variante J 2	Variante J 3	Variante J 4
Errichtungskosten je Einf.-km Fahrleitung [€/km] / Kosten je Ladestation [T€]	350		200	-
Erforderliche Fahrleitungslänge [Einf.-km] / Anzahl der zu errichtenden Ladestationen	6,8	3,25	2 Stck.	-
Anschaffungskosten Infrastruktur o. Förderung [T€]	2.380	1.138	400	-
Förderung bei 80 % Fördersatz [T€]	1.904	910	320	-
Eigenanteil für VU [T€]	476	228	80	-
Verzinsungssatz [%]	3			-
Abschreibungsdauer [Jahre]	25		12	-
Nutzungsdauer [Jahre]	Mind. 25		15	-
Jährliche Abschreibung und Verzinsung [T€]	26,2	12,5	7,9	-
Instandhaltungskosten bei 4.850 €/Einf.-km Fahrleitung / 7.000 € je Ladestation [T€]	33,0	15,8	14,0	-

Aus den Tabellen (Tabelle 49 und Tabelle 50) lassen sich der Fördermittelbedarf und die Erstinvestitionskosten berechnen (siehe Tabelle 51). Der Fördermittelbedarf beinhaltet die Kosten für die Grundförderung, die Mehrkostenförderung und die Förderkosten für die Infrastruktur.

Tabelle 51
Erstinvestitionskosten und
Fördermittelbedarf in Jena

	Variante J 1	Variante J 2	Variante J 3	Variante J 4
Gesamtkosten [T€]	13.360	12.120	8.800	4.440
Fördermittel [T€]	8.300	7.300	4.780	1.200
Eigenanteil VU [T€]	5.060	4.820	4.020	3.240

Nachdem die Kosten für die Erstinvestition beziffert sind, ist analog zu den anderen Städten die Gesamtkosten für den Betrieb und die Förderung innerhalb von 25 Betriebsjahren ermittelt worden. Diese Kosten werden in Abhängigkeit der unterschiedlichen Varianten dargestellt.

Kostenkalkulation und
Systemvergleich

	Variante J 1	Variante J 2	Variante J 3	Variante J 4
Abschreibung/ Verzinsung Fahrzeuge [T€]	11.140		9.680	6.840
Abschreibung/ Verzinsung Infrastruktur [T€]	660	310	170	-
Summe Anschaffung/ Verzinsung (VU) [T€]	11.800	11.450	9.860	6.840
Betriebskosten Fahrzeuge [T€]	14.060	14.550	14.570	18.130
Summe Betriebskosten Infrastruktur (VU) [T€]	820	390	350	-
Summe Betriebskosten (VU) [T€]	14.880	14.940	14.920	18.130
Summe finanzieller Aufwand für VU [T€]	26.680	26.390	24.780	24.970
Fördermittelaufwand Fahrzeuge [T€]	15.950		12.080	3.600
Fördermittelaufwand Infrastruktur [T€]	1.900	910	640	-
Summe Fördermittelaufwand [T€]	17.850	16.860	12.720	3.600

Tabelle 52
Kostenaufwand für das VU
und Fördermittelaufwand
über 25 Betriebsjahre in
Jena

Die o.g. Werte werden im Anschluss noch grafisch dargestellt, so dass sich die einzelnen Varianten besser vergleichen lassen.

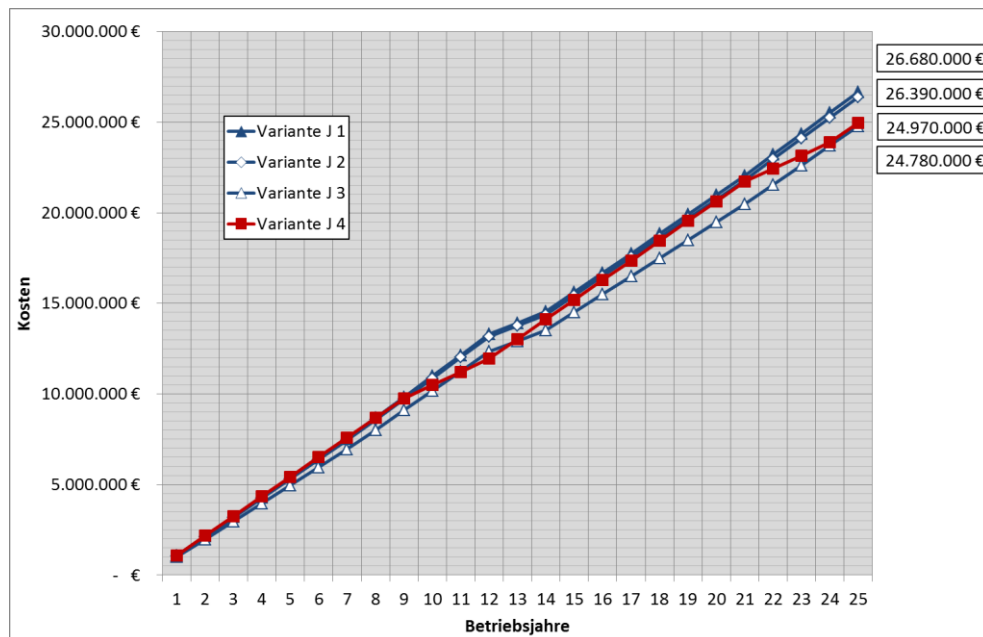


Abb. 35
Kosten für VU innerhalb von
25 Betriebsjahren in Jena

In Abb. 35 ist zu erkennen, dass die Variante J 3 (chemisches Heizen, Klima-light, punktuell-les Nachladen) die geringsten Gesamtkosten verursacht und bereits ab dem ersten Jahr wirtschaftlicher betrieben werden kann als die vergleichbare Dieselbusvariante J 4. Die Varianten mit Fahrleitung (J 1 und J 2) können näherungsweise zu gleichen Kosten wie die Dieselbusvariante betrieben werden. Der ausgewiesene Kostenunterschied nach 25 Jahren ist durch die unterschiedliche Abschreibungs- und Nutzungsdauern begründet. Generell ist jedoch festzustellen, dass alle Varianten unabhängig von der Antriebs-, Heiz- oder Klimatisierungsart in einem engen Kostenfenster liegen.

	Variante J 1	Variante J 2	Variante J 3	Variante J 4
Fahrzeugkosten [€/km]	1,19	1,21	1,15	1,18
Infrastrukturkosten [€/km]	0,07	0,03	0,02	-
Gesamt [€/km]	1,26	1,24	1,17	1,18

Tabelle 53
Kosten je Kilometer auf der
untersuchten Linie 10/13 in
Jena

In Tabelle 53 lässt sich zwischen der Variante mit elektrischer Heizung J 1 und chemischer Heizung J 2 kein nennenswerter Unterschied ausmachen. Die notwendige längere Fahrleitung und die daraus folgenden höheren Infrastrukturkosten für Variante J 1 führen nur zu einer geringen Erhöhung der Kilometerkosten, da für Jena die Fahrzeuge von 2 Linien berücksichtigt wurden.

6.5 Nordhausen

Anders als in den 4 zuvor vorgestellten Städten mit 18 m-Gelenkzügen kommen auf der Linie A in Nordhausen ausschließlich 12 m-Solobusse zum Einsatz. Die Simulationsergebnisse aus dem Zwischenbericht (2013/2014) haben ergeben, dass beim voll elektrischen Betrieb inklusive Vollklimatisierung der Fahrzeuge eine Ladestation am Endhalt Karl-Liebknecht-Platz in Salza notwendig wird.

Mittlerweile ist schon ein Probebetrieb mit einem 10,7 m-Elektrobus (Bozankaya Sileo) auf der Linie durchgeführt worden. Während dieses Probeeinsatzes betrug der spezifische Energiebedarf des Fahrzeuges ca. 1,1 bis 1,2 kWh/km. Der Einsatz fand bei moderaten Temperaturen statt und das Fahrzeug war mit einer chemischen Heizung und einer Klima-light Anlage ausgestattet. Mit diesem spezifischen Verbrauch wäre bei einer täglichen Fahrleistung von ca. 170 km und einem Energiespeicher mit nutzbarem Energiegehalt von etwa 220 kWh ein Nachladen am Endhalt Salza überflüssig. Da der Energiebedarf eines 12 m-Fahrzeugs auch leicht höher ist, wird für die nachfolgende Bewertung weiterhin von einer Ladestation am Endhalt Salza ausgegangen. Somit ist immer sichergestellt, dass die Fahrzeuge die Tagesumläufe mit ausreichend Reserve absolvieren können. Durch das regelmäßige Nachladen nach jedem Umlauf könnte ggf. die Speichergöße reduziert oder auf ein nächtliches Laden im Depot verzichtet werden. Dies sollte jedoch mit den Anbietern im Rahmen der Ausschreibung und auf Basis von Probeeinsätzen durch die Verkehrsbetriebe geprüft werden.

Um eine grundsätzlich vergleichbare Kostenkalkulation auf Basis der ÖPNV-Investitionsrichtlinie zu liefern, sind folgende Varianten kostenmäßig untersucht worden.

Variante NDH 1: voll elektrisches Heizen, Vollklimatisierung, eine Ladestation in Salza, 220 kWh Energiespeicher

Variante NDH 2: chemisches Heizen, Klima-light, eine Ladestation in Salza, 220 kWh Energiespeicher

Variante NDH 3: Dieselbus, Vollklimatisierung

In Tabelle 54 sind die grundlegenden Eingangsgrößen für die Fahrzeugkalkulation dargestellt.

Tabelle 54
Eingangsgrößen für Fahrzeugkalkulation in Nordhausen

Werte je Fahrzeug	Variante NDH 1	Variante NDH 2	Variante NDH 3
Einzusetzende Fahrzeuge [-]	5		
Anschaffungskosten [T€]	510		245
Grundförderung [T€]	70		
Mehrkostenförderung bei 75 % Fördersatz [T€]	198,750		-
Summe Fördermittelaufwand [T€]	268,750		70
Eigenanteil für VU [T€]	241,250		175
Verzinsungssatz [%]	3		
Abschreibungsdauer [Jahre]	12		8
Nutzungsdauer [Jahre]	12		8
Jährliche Abschreibung und Verzinsung [T€]	23,7		24,5
Jährlicher Material-, Instandhaltungs- und Versicherungskosten [T€]	15,0		
Anschaffungskosten Ersatzenergiespeicher [T€]	165		-
Förderung Ersatzenergiespeicher bei 80 % Fördersatz [T€]	132		-
Eigenanteil Ersatzenergiespeicher für VU [T€]	33,0		-
Abschreibungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	5		-
Nutzungsdauer Ersatzenergiespeicher [Jahre]	6 ¹		-
Jährliche Abschreibung und Verzinsung Ersatzenergiespeicher [T€]	7,1		
Jahresfahrleistung [km]	52.300		
Mittlerer Energie-/ Kraftstoffverbrauch je km	2,21 kWh/km	1,40 kWh/km	0,40 l/km
Energie-/ Kraftstoffkosten je km [€/km]	0,27	0,17	0,43
Mittlerer Jahresheizenergieverbrauch für chem. Heizung [kWh/km]	-	0,63	-
Kosten chem. Heizen [€/km]	-	0,07	-
Reifen-/Verbrauchsstoffkosten je km [€/km]	0,02		

¹ aufgrund der 12 Jahre Fahrzeugnutzung nur eine Ersatzbeschaffung pro Fahrzeug nötig

Wie eingangs beschrieben, ist nach aktuellem Stand ein punktuell Nachladen am Endhalt in Salza über ein Schnellladesystem notwendig. Die dadurch zu erwartenden Kosten werden in nachfolgender Tabelle (Tabelle 55) dargestellt.

Kostenkalkulation und
Systemvergleich

	Variante NDH 1	Variante NDH 2	Variante NDH 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 [T€]	3,93		-
Jährliche Instandhaltungskosten pro Ladestation [T€]	7,00		-

Tabelle 55
Eingangsgroßen Infrastrukturkalkulation in Nordhausen

Die geringeren Kosten für die Ladestation im Vergleich zu früheren Veröffentlichungen entstehen durch die nachträgliche Bewertung der vorliegenden Angebote. Aus den Tabellen (Tabelle 54 und Tabelle 55) lassen sich Erstinvestitionskosten und der Fördermittelbedarf ermitteln.

	Variante NDH 1	Variante NDH 2	Variante NDH 3
Gesamtkosten [T€]	2.750		1.125
Fördermittel [T€]	1.500		350
Eigenanteil VU [T€]	1.250		875

Tabelle 56
Erstinvestitionskosten und Fördermittelbedarf in Nordhausen

Abschließend sollen die zu erwartenden Gesamtkosten für das Verkehrsunternehmen und der Fördermittelbedarf innerhalb von 25 Betriebsjahren angegeben werden. Hierbei werden analog zu den anderen Städten 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.

	Variante NDH 1	Variante NDH 2	Variante NDH 3
Abschreibung/ Verzinsung Fahrzeuge [T€]	3.310		3.060
Abschreibung/ Verzinsung Infrastruktur [T€]	87		-
Summe Anschaffung/ Verzinsung (VU) [T€]	3.400		3.060
Betriebskosten Fahrzeuge [T€]	3.830	3.850	4.850
Summe Betriebskosten Infrastruktur (VU) [T€]	175		-
Summe Betriebskosten (VU) [T€]	4.010	4.030	4.850
Summe finanzieller Aufwand für VU [T€]	7.410	7.430	7.910
Fördermittelaufwand Fahrzeuge [T€]	5.350		1.400
Fördermittelaufwand Infrastruktur [T€]	320		-
Summe Fördermittelaufwand [T€]	5.670		1.400

Kostenkalkulation und
Systemvergleich

Tabelle 57
Kostenaufwand für das VU
und Fördermittelaufwand
über 25 Betriebsjahre in
Nordhausen

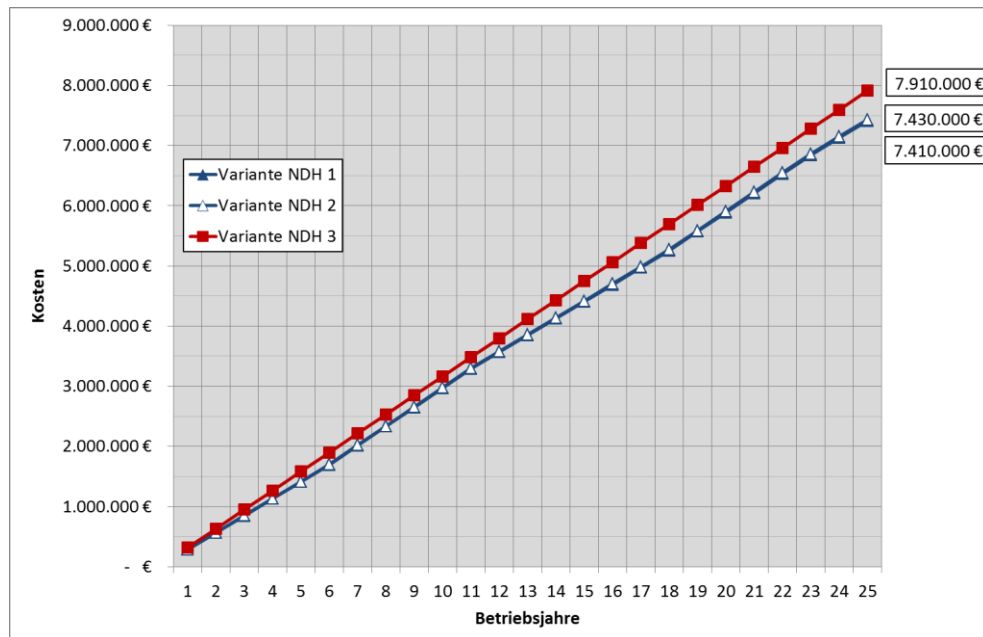


Abb. 36
Kosten für VU innerhalb von
25 Betriebsjahren in Nord-
hausen

In Abb. 36 erkennt man, dass die elektrifizierten Varianten NDH 1 und 2 günstiger sind als die Dieselvergleichsvariante NDH 3. Grund hierfür sind im Wesentlichen die längere Abschreibungs- und Nutzungszeit gegenüber den Dieselfahrzeugen und die geringeren Betriebskosten. Die chemisch geheizte Variante NDH 2 und die voll elektrische Variante NDH 1 unterscheiden sich in den Kosten kaum. Grund hierfür ist, dass die Energiekosten für das Heizen bei beiden Varianten ungefähr gleich hoch sind.

	Variante NDH 1	Variante NDH 2	Variante NDH 3
Fahrzeugkosten [€/km]	1,09	1,10	1,21
Infrastrukturkosten [€/km]	0,04	0,04	-
Gesamt [€/km]	1,13	1,14	1,21

Tabelle 58
Kosten je Kilometer auf der
untersuchten Linie A in
Nordhausen

Im vorliegenden Nachtrag im Rahmen der Studie „Konzept für eine städteübergreifende Einführung von elektrisch angetriebenen Linienbussen in Thüringen“ wurden erweiterte technische und wirtschaftliche Betrachtungen für die Städte Erfurt, Gera, Gotha, Jena und Nordhausen durchgeführt.

Es konnte anhand von Energiebilanzrechnungen gezeigt werden, dass in den Städten Erfurt, Gera und Gotha durch den Einsatz eines chemischen Heizsystems als Alternative zum elektrischen Heizen die notwendigen Fahrleitungslängen signifikant verkürzt werden können, wodurch die Kosten für die Infrastruktur deutlich sinken. Ein punktuelles Nachladekonzept für diese Städte ist technisch möglich, wird jedoch aufgrund der notwendigen sehr großen Speicherkapazität/-masse als unrealistisch eingeschätzt.

Für Jena ergibt sich aus den Ergebnissen die Möglichkeit, ein punktuelles Nachladekonzept an den Endhaltestellen Winzerla und Burgapark umzusetzen und auf eine partielle Fahrleitung zu verzichten. Die Kostenunterschiede zum partiellen Fahrleitungssystem sind aber hierbei moderat, da der vorgesehene Fahrleitungsabschnitt von 2 Buslinien (Linie 10 und 13) mit insgesamt 12 Fahrzeugen parallel genutzt werden kann.

Es wurden weiterhin für jede Stadt Betrachtungen durchgeführt, die sowohl von einer Vollklimatisierung als auch von einer eingeschränkten Klimatisierung (Klima-light) ausgehen. Gegenüber dem Heizenergiebedarf ist jedoch der Energiebedarf für das Klimatisieren im Jahresdurchschnitt deutlich geringer, so dass Kostenreduzierungspotentiale vor allem durch die Ausführung des Heizsystems und dem damit in Zusammenhang stehenden Aufwand für das Nachladesystem bestimmt werden.

In die Wirtschaftlichkeitsberechnungen ist die neue ÖPNV-Investitionsrichtlinie 2015 des Freistaates Thüringen eingeflossen. Entsprechende Vergleichsrechnungen zwischen elektrisch betriebenen Bussen mit verschiedenen Heiz-/Klimatisierungssystemen und konventionellen Dieselnissen wurden unter Berücksichtigung des Infrastrukturaufwandes und der Betriebskosten durchgeführt. Hierbei muss angemerkt werden, dass die angestellten Kostenprognosen über 25 Jahre von gleichbleibenden Förderbedingungen, Fahrzeugkosten, Energiekosten etc. ausgehen.

Aufgrund der hohen Fördersätze für elektrische angetriebene Busse (75 % der Mehrkosten zum Dieselniss), notwendige Infrastrukturmaßnahmen (80 %) sowie Ersatzbeschaffungen (80 %) sind in allen Städten die wirtschaftlichen Belastungen für das Verkehrsunternehmen auf dem Niveau eines Dieselnissbetriebes. Für die Städte Nordhausen und Jena (bei punktueller Nachladung) sogar darunter. Der bei der Erstinvestition (Fahrzeuge, Infrastruktur) notwendige höhere Eigenmittelbedarf kann vor allem durch die geringeren Energiekosten und die längere Nutzungsdauer der elektrischen Fahrzeuge teilweise überkompensiert werden.