

Modellierung der Lebenszykluskosten von Oberleitungsanlagen



Quelle: SiemensMobility GmbH

Wie hoch sind die wahren Kosten der Oberleitungsinfrastruktur und wie setzen sich diese zusammen?

FRITJOF AUFSCHLÄGER | ANDRÉ DÖLLING | ARND STEPHAN

Elektrische Züge fahren mit großen Tonnagen, in engen Takten, mit hohen Beschleunigungen und Betriebsgeschwindigkeiten von bis zu 300 km/h, dabei energieeffizient und hoch verfügbar – ermöglicht durch die Energiezuführung per Fahrleitung. Da die Kosten einer Oberleitungsanlage (OLA) über ihren gesamten Lebenszyklus derzeit nur grob beziffert werden können, untersucht ein laufendes Forschungsprojekt an der TU Dresden die Prozesse der einzelnen Lebenszyklusphasen. Das Ziel ist die Entwicklung eines Werkzeugs, das die Berechnung und Analyse der Lebenszykluskosten (LCC) erlaubt und damit den wirtschaftlichen Vergleich von Elektrifizierungsvarianten ermöglichen soll.

Kosten der elektrischen Traktionsinfrastruktur

Auch durch die Entwicklungen auf dem Gebiet der alternativen Antriebe gewinnt die Frage nach der Wirtschaftlichkeit von OLA an Aktualität. Obwohl in Deutschland bereits etwa

90% der Transportleistung elektrisch erbracht werden, sind nur etwa 61% der Bahnstrecken der DB Netz AG mit einer OLA ausgestattet. Um den Anteil der Dieselstrecken vor allem in der Fläche zu reduzieren, können alternative Antriebe eine wirtschaftliche Lösung sein. Sobald die Verkehre in nennenswerter Häufigkeit stattfinden, lohnt sich fast immer die klassische Elektrifizierung [1].

Für den Neubau von Fahrleitungsanlagen im Netz der DB, die auch einen geringen Anteil Stromschienen umfassen, lässt sich anhand der Infrastrukturzustands- und Entwicklungsberichte der DB [2] über die vergangenen Jahre als Mittel aller Projekte eine Bandbreite zwischen 0,80 und 1,50 Mio. EUR pro Gleiskilometer (Gkm) aus Sicht des Betreibers ableiten. Eine aktuelle Studie der britischen Railway Industry Association [3] erweitert diesen Rahmen auf einen Bereich zwischen 0,35 und 2,90 Mio. EUR im europäischen Vergleich. Bei Betrachtung des Beispiels der Elektrifizierung der Neubaustrecke Erfurt-Leipzig/Halle aus Herstellersicht ergibt sich bei einer Streckenlänge von ca. 122 km und einem Auftragsvolumen von 67 Mio. EUR eine durchschnittliche Summe von maximal 280 Tsd. EUR je Gkm, wobei noch zahlreiche Nebenleistungen enthalten sind [4, 5].

Die DB Netz betreibt mit Stand 2018 ein elektrifiziertes Netz von 20 283 km Streckenlänge. Die Aufwendungen für die Instandhaltung von OLA alleine gehen aus [2] nicht klar hervor, für 2018 lassen sie sich aber grob mit maximal 122 Mio. EUR oder 6610 EUR je Streckenkilometer beziffern.

Der Überblick zeigt, dass die kilometrischen Kosten sehr stark von den Gegebenheiten der einzelnen Projekte und vom Betrachtungsumfang abhängen. Sie lassen sich mangels genauerer Aufschlüsselung nicht ohne Weiteres auf eine andere Situation übertragen, da kostentreibende Projektparameter strecken- und zeitspezifisch zu betrachten sind. Um eine generalisierte und übertragbare Berechnung der LCC vornehmen zu können, ist es daher notwendig die Lebenszyklusphasen, abhängig vom Einzelprojekt und seinen Parametern, zu modellieren und mit Kostensätzen für die einzelnen Prozessgrößen zu verrechnen.

Lebenszyklusphasen von Oberleitungsanlagen Aufbau einer typischen Anlage

Die bekannteste Fahrleitungsbauweise stellt die Hochkettenoberleitung dar, bei der der beschliffene Kupferfahrdraht über

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für TU Dresden /
Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
genehmigt von DW Media Group, 2019

mehrere, unterschiedlich lange Hänger an einem Tragseil aufgehängt ist. So wird der Durchhang des Fahrdrachts zwischen zwei Stützpunkten zum Erreichen einer über dem Gleis möglichst horizontalen Höhenlage ausgeglichen. Um eine konstante Fahrdrachtlage auch bei schwankenden Temperaturen zu garantieren, werden die Leiter, die der thermischen Längenänderung unterworfen sind, an Nachspannrichtungen wie Radspannern zum Erreichen einer konstanten Horizontalzugkraft beweglich abgefangen. Die Anlage unterteilt sich auf diese Weise in aufeinanderfolgende Nachspannlängen, die sich üblicherweise zwischen drei und fünf Längsfelder überlappen [6, 7].

Planung der Oberleitungsanlage

Die Planung unterscheidet sich je nach Zielmarkt und Kundenvorgaben. In Ländern wie Deutschland oder Österreich geben die Betreiber durch die Definition von netzweiten Regelbauarten enge Vorgaben hinsichtlich der möglichen Systemparameter und der einsetzbaren Komponenten. Im Gegensatz dazu kann bei einer funktionalen Ausschreibung eine Oberleitungsbauart eingesetzt werden, die speziell auf den Anwendungsfall, die landesspezifischen Anforderungen oder bestimmte Systemparameter zugeschnitten ist [8].

Im Rahmen der Projektierung wird zunächst der Oberleitungsschaltplan aufgestellt und ausgehend von der bestehenden oder geplanten Gleislage der Oberleitungslageplan erstellt. Die Planung beginnt an Zwangspunkten wie Absenkungen, Bögen oder Weichen und wird erst danach in Geraden ausgeführt, wo die Vorgaben der Regelbauweise besser erreicht werden. Aus dem Lage-

plan werden anschließend alle weiteren Unterlagen wie Querprofile, Längsprofile und Erdungspläne abgeleitet. Ziel der Planung ist die Schaffung eines baureifen Projektstatus mit den notwendigen Nachweisen, Beschreibungen, Stück- und Ausrüstungslisten für alle Bauphasen [6].

Anlagenerrichtung

Der Ablauf und die Teilprozesse der Errichtung ergeben sich maßgeblich aus den gewählten Errichtungsmethoden, die sich je nach Verkehrsart, Bauweise, Topografie und vorhandener Maschinenteknik unterscheiden. Allgemeingültig lassen sich die Errichtungsarbeiten in folgende Teilprozesse untergliedern:

- Gründungsherstellung,
- Mastenerrichtung und -ausrüstung,
- Bahnenergie- und Rückleiterzug,
- Stützpunktherstellung,
- Kettenwerksmontage (Tragseil- und Fahrdrachtzug, Hängereinbau),
- Finale Regulierung mit Komponenteneinbau sowie
- Arbeiten an der Rückleitungsanlage.

Die Planung und Durchführung dieser Arbeiten und die Disposition von Personal, Maschinen und Materialflüssen erfordern eine erfahrene Projektleitung sowie eingespielte Teams von Monteuren [9, 10].

Betrieb und Instandhaltung

Die in der Instandhaltung durchgeführten Maßnahmen umfassen Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung. Neben Arbeiten, die zyklisch wiederkehren oder sich durch Zustandsbeobachtung langfristig planen lassen, werden auch Störungen beseitigt, die eine kurzfristige oder sofortige Reaktion erfordern und gegebenenfalls –

beispielsweise bei Unwetter – sehr gehäuft auftreten. Die Bahnverwaltungen und Verkehrsbetriebe unterhalten daher Instandhaltungsabteilungen, die über die notwendige Mitarbeiterzahl sowie spezielle Fahrzeuge und Werkstätten verfügen, um alle planbaren Arbeiten – häufig in Nachtschichten – fristgerecht auszuführen und Störungen zügig beseitigen zu können [11].

Durch Wahl der Bauart und der eingesetzten Produkte werden viele Kosten, die sich erst in der Betriebsphase bemerkbar machen, bereits in den Planungsphasen bestimmt [12–14].

Rückbau, Erneuerung oder Überführung in eine Folgeanlage

Das Prinzip des Life-Cycle-Managements umfasst den gesamten Lebenszyklus, also auch die Phase des Rückbaus und damit verbundene Kosten oder Einnahmen durch Recycling des Rohmaterials. Eine getrennte Betrachtung dieser Lebenszyklusphase ist bei OLA komplex, da diese über eine sehr hohe Lebensdauer verfügen und ein Rückbau fast ausschließlich in Kombination mit dem Neubau der Folgeanlage verbunden wird [12, 13].

Toolbasierte Lebenszyklusmodellierung Konzept und Struktur

Ziel der laufenden Forschungsarbeit ist die Entwicklung eines Werkzeugs zur Berechnung der LCC durch eine technisch-wirtschaftliche Prozessmodellierung der durchgeführten Leistungen. Die darin verwendeten Berechnungsvorschriften basieren auf der detaillierten Beobachtung der durchgeführten Arbeitsschritte und auf der Abstraktion der kostenrelevanten Prozesse. Abb. 1 zeigt den aktuellen Stand des Kon-

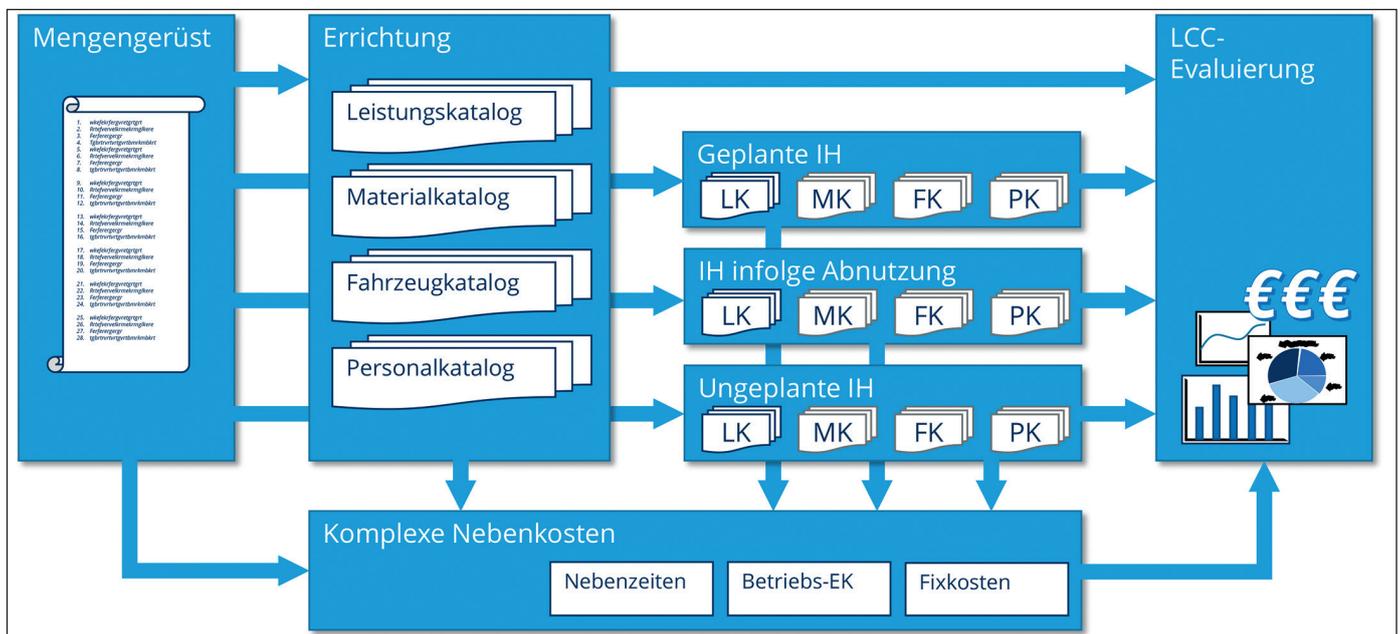


Abb. 1: Aktuelles Konzept der toolbasierten Berechnung der Lebenszykluskosten einer Oberleitungsanlage

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für TU Dresden /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten
 genehmigt von DW Media Group, 2019

stelleneinrichtungen mit Büro, Lagerhaltung und ggf. Unterkünften zeigen – die Kosten­summe in erheblichem Maße prägen. Speziell in der Instandhaltungsphase spielen auch Betriebserschwerungskosten, die bei Nichtverfügbarkeit der Anlage anfallen, eine Rolle. Nach der umfangreichen Bestimmung der in den jeweiligen Lebenszyklusphasen anfallenden Kostenpunkte ist die eigentliche Berechnung der LCC vergleichsweise trivial. Mittels gängiger finanzmathematischer Methoden wie der Abzinsung werden durch Annahme realistischer Teuerungsraten und Zinssätze der Kapitalwert sowie Annuitäten

der Anlage bestimmt, um den Vergleich unterschiedlicher Varianten zu erlauben.

Erzeugung von Eingangsdaten

Die größte Herausforderung bei der Berechnung plausibler Ergebnisse ist die Nutzbarmachung qualitativ hochwertiger Eingangsdaten, die die Realität angemessen widerspiegeln, gleichzeitig den Berechnungsvorgang aber nicht unnötig verkomplizieren.

Die Komplexität der Arbeitsschritte und der sich ergebende Aufwand zur Modellierung vollständiger Projekte zeigt das Beispiel der

Kettenwerksverlegung einer aktuellen Streckenelektrifizierung in Dänemark (Abb. 2). Fahrdrabt und Tragseil einer typischen Nachspannlänge lassen sich mit modernen Kettenwerksinstallationseinheiten in etwa zwei Stunden gleichzeitig installieren. Davon entfällt eine Stunde auf die Einrichtung der insgesamt vier Radspanner am Anfang und am Ende der Nachspannlänge sowie eine Stunde auf den eigentlichen Verlegeprozess, der unter Beteiligung weiterer Maschinen auch die Fixierung der Leiter an den Stützpunkten sowie den Einbau provisorischer Hänger beinhaltet. In einer

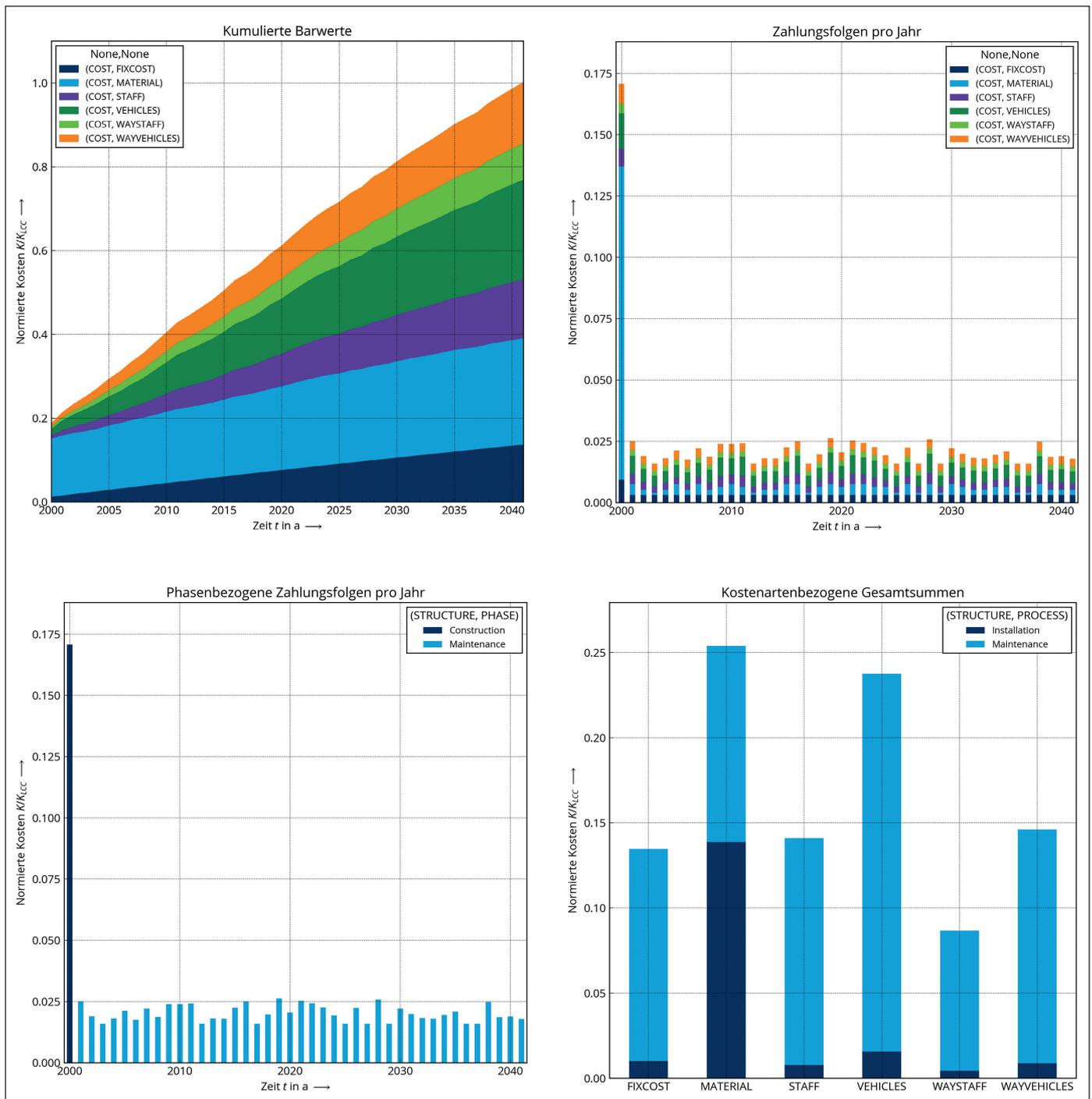


Abb. 3-6: Ausgewählte Ergebnisse der Berechnung des Minimalbeispiels

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für TU Dresden /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten
 genehmigt von DW Media Group, 2019

Phase	Parameter	Wert
Errichtung	Auslegermontage	208 Stk.
	Kettenwerkszug	12,5 Gkm
	Hängereinbau	12,5 Gkm
	Kettenwerksregulierung	12,5 Gkm
Instandhaltung	Jährliche Inspektion	12,5 Gkm
	Zufällige Störung	Häufigkeit: Gleichverteilt 0,00...0,28 Stk./km Dauer: Weibullverteilt $\lambda = 6,64$ $k = 0,86$

Tab. 1: Auszug aus dem Mengengerüst des Minimalbeispiels

normalen Arbeitsschicht lässt sich dieser Vorgang allerdings nicht mit optimaler Effizienz betreiben, da weitere Nebenzeiten zur reinen Produktivzeit hinzukommen: Neben den Zeiten für Vor- und Nachbereitung der Maschine am Abstellort muss auch Zeit für die Bewegung zum Arbeitsort und für Pausen eingeplant werden. Dies ist besonders der Fall, wenn die Arbeiten an Sperrpausen gebunden sind und der Maschinenpark an einem definierten Ort abgestellt werden muss. Zur Bestimmung der Nebenkosten ist eine Abbildung der Anreise- und Pausenzeiten notwendig sowie die Definition der verfügbaren Arbeitsschicht, um eine Aussage über die Anzahl der benötigten Schichten treffen zu können [15].

Der vorgestellte analytische Ansatz eignet sich zur Modellierung der Arbeitsschritte der Oberleitungserrichtung, muss allerdings mit verlässlichen Eingangsdaten kombiniert werden. Eine praxisnahe Möglichkeit ist die Erstellung von Leistungskatalogen durch Expertenschätzung, für die eine Methodik erarbeitet wurde, die momentan in Erprobung ist. Dafür werden langjährige Obermonteure sowie Bau- und Projektleiter im Rahmen einer Schätzklausur befragt. Nach der grafischen und tabellarischen Vorstellung des betreffenden Prozesses schätzt der Experte nach dem Vorbild der Baukostensimulation pessimistische, realistische und optimistische Werte, um die Arbeitszeiten im Vergleich zu einem

festen Wert mit einer realistischeren Bandbreite abbilden zu können [16, 17].

Aktueller Stand und beispielhafte Ergebnisse

Die Nutzung der aktuellen Entwicklungsversion des LCC-Tools erlaubt bereits eine beispielhafte Darstellung der Ergebnisse, für belastbare Zahlen ist die Erhebung der notwendigen Eingangsdaten allerdings noch nicht weit genug fortgeschritten und somit weiterhin Gegenstand des bis 2021 laufenden Forschungsprojekts.

Die Abb. 3 bis 6 zeigen aktuelle Berechnungsergebnisse, die zum vereinfachten Verständnis als Minimalbeispiel mit reduzierten Prozessen ausgeführt wurden. Tab. 1 enthält eine Repräsentation des verwendeten Mengengerüsts.

Abb. 3 zeigt ein unter Anwendung der Abzinsung entstandenes Diagramm der kumulierten Barwerte über der angesetzten Lebensdauer von 40 Jahren, wobei die Errichtung komplett im Jahr 0 verrechnet wird, was insbesondere im Diagramm der jährlichen Zahlungsfolgen in Abb. 4 gut zu erkennen ist. Die Auswertung lässt sich anhand aller in der Modellierung verwendeten Randbedingungen durchführen, wie beispielsweise in Abb. 5 nach einer Aufteilung nach Lebenszyklusphasen mit jährlicher Darstellungsweise oder wie in Abb. 6 mit einer Darstellung der

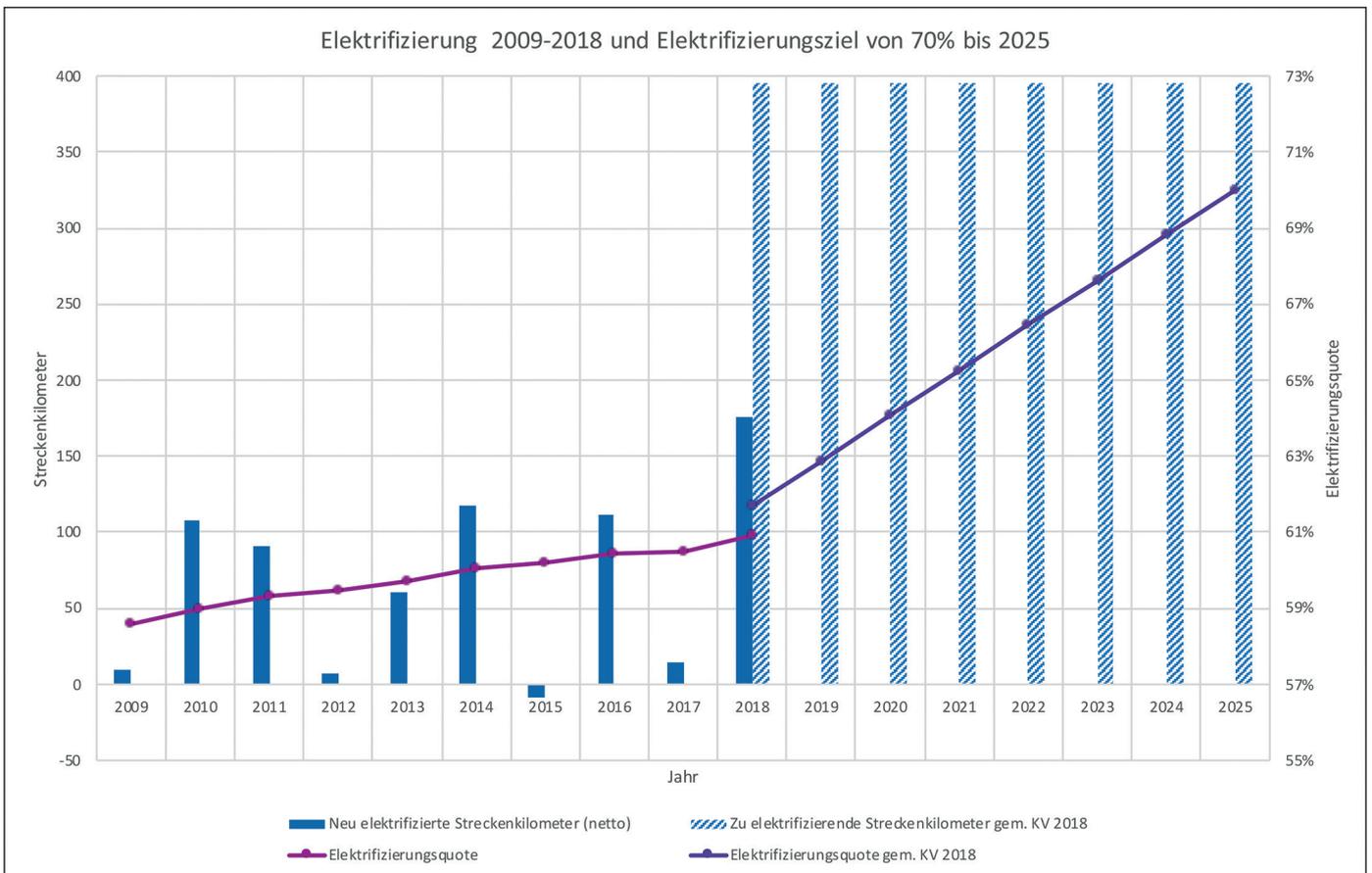


Abb. 7: Die Elektrifizierung der vergangenen Jahre in Gegenüberstellung mit dem Elektrifizierungsziel der Bundesregierung bis 2025

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für TU Dresden /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
 genehmigt von DW Media Group, 2019

Gesamtsummen der angegebenen Kostenarten. Die Entwicklung weiterer Auswertoroutinen, die insbesondere auch die Arbeitszeiten umfassen sollen, wird sich mit der Verbesserung der Datenbasis ergeben.

Fazit

Am Ende des Forschungsprojekts soll ein Werkzeug zur Verfügung stehen, das mit möglichst wenigen Eingangsparametern für Fern- und Nahverkehr alle Lebenszyklusphasen von Oberleitungsanlagen monetär abbilden und analysieren kann, sodass ein Variantenvergleich und eine holistische Prozess- und Kostenoptimierung möglich ist. Mit den vorgestellten Herangehensweisen wurde dabei eine erfolgversprechende Methodik gefunden. Als zentral für die erfolgreiche Kostenermittlung muss jedoch die Generierung von Eingangsdaten angesehen werden, die neben der Validierung und Verifizierung eine große Herausforderung bleibt. Über die weiteren Entwicklungen und die Ergebnisse des bis 2021 laufenden Forschungsprojekts werden daher noch weitere Berichte folgen.

Die Signale für die fortgesetzte Elektrifizierung des deutschen Schienennetzes stehen prinzipiell auf grün. Um das Tempo zu erhöhen, sind jedoch effektive Maßnahmen der Politik unerlässlich. Der aktuelle Koalitionsvertrag [18] sieht die Elektrifizierung von 70% des deutschen Streckennetzes bis ins Jahr 2025 vor, was als begrüßenswerte Priorisierung des umweltfreundlichen Verkehrsträgers Schiene zu bewerten ist (Abb. 7). Es liegt dabei auch in der gemeinsamen Verantwortung von Politik und Betreibern, langfristige Planungssicherheit für die Errichterfirmen zu schaffen, die Ausbildung und Attraktivität der montierenden Berufe zu fördern und die Innovationskraft der gesamten Branche zu nutzen, um Kosten und Qualität der Anlagen weiter zu verbessern. ■

QUELLEN

- [1] Stephan, A.; Witemann, N. T.; Müller, A. T.: Alternative Antriebskonzepte: Welcher Hybrid für welche Strecke? In: EI – DER EISENBAHNINGENIEUR, 9/2018, S. 60–66
- [2] Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung – Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht 2018. URL: https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Finanzierung/LuFV/IZB/izb_node.html, letzter Abruf: 07.05.2019
- [3] The Railway Industry Association: RIA Electrification Cost Challenge – March 2019. URL: https://www.riagb.org.uk/RIA/Newsroom/Stories/Electrification_Cost_Challenge_Report.aspx, letzter Abruf: 16.04.2019
- [4] SPL Powerlines Germany GmbH: Referenzprojekte. URL: https://www.powerlines-group.com/spl/spl_germany.nsf/sysPages/referenzen_de.html, letzter Abruf: 01.06.2016
- [5] Feldwisch, W.: Die Verkehrsprojekte Deutsche Einheit (VDE) – Schienenprojekte. In: ETR Spezial, Dezember 2017, S. 68–73
- [6] Kiessling, F.; Puschmann, R.; Schmieder, A.: Fahrleitungen elektrischer Bahnen – Planung, Berechnung, Ausführung, Betrieb, 3. Aufl., Erlangen: Publicis, 2014
- [7] Stephan, A.; Zweig, B.-W.: Energieversorgung elektrischer Bahnen. In: Fendrich, L.; Fengler, W. (Hrsg.): Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 681–752
- [8] Dölling, A.; Schmieder, A.: Innovative Bahnenergieversorgungsanlagen – Förderung durch funktionale Ausschreibung. In: Elektrische Bahnen (114), 8-9/2016, S. 428–442
- [9] Aufschläger, F.; Stephan, A.; Dölling, A.: Montage von Fernverkehrs-oberleitungen. In: Elektrische Bahnen (116), 4-5/2018, S. 140–149

- [10] Neuber, M.: Errichtung von Straßen- und Stadtbahn Oberleitungsanlagen. Technische Universität Dresden, Studienarbeit, 2019
- [11] Lieber, J.: Entwurf eines Instandhaltungsplanungs- und Steuerungskonzepts für Oberleitungsanlagen. Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2017
- [12] Helwig, E.; Stephan, A.; Puppe, F.: Lebenszykluskosten von Fahrdrähten – Grundlagen und erste Ergebnisse. In: Elektrische Bahnen (114), 4/2016, S. 188–195
- [13] Helwig, E.; Stephan, A.; Puppe, F.: Lebenszykluskosten von Fahrdrähten – neue Ergebnisse aus mehrjährigen Betriebserprobungen. In: Elektrische Bahnen (115), 2-3/2017, S. 60–68
- [14] Puschmann, R.; Kaschky, C.: Fahrdrähtverschleiß auf Hochgeschwindigkeitsstrecken. In: Elektrische Bahnen (117), 2-3/2019, S. 86–96
- [15] Aufschläger, F.: Installationsmethoden und -mittel zur Errichtung einer Oberleitungsanlage in Neu- und Bestandsanlagen. Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2017
- [16] Schach, R.; Flemming, C.: Grundlagen der Kostensimulation unter Einbeziehung von Risiken. In: Scherer, R. J.; Schapke, S.-E. (Hrsg.): Informationssysteme im Bauwesen 2. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014, S. 253–267
- [17] Schmelzer, F.: Entwicklung einer Methode zur standardisierten Katalogisierung von Oberleitungsarbeiten durch Expertenschätzung. Technische Universität Dresden, Studienarbeit, 2019
- [18] Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD – 19. Legislaturperiode (2018)



Dipl.-Ing. Fritjof Aufschläger
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Professur für Elektrische Bahnen
Technische Universität Dresden
fritjof.aufschlaeger@tu-dresden.de



Dr.-Ing. André Dölling
Senior Key Experte und
Lehrbeauftragter für Fahrleitungen
und Bahnstromversorgung
Siemens Mobility GmbH, Erlangen
andre.doelling@siemens.com



Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan
Inhaber der Professur
für Elektrische Bahnen
Technische Universität Dresden
arnd.stephan@tu-dresden.de



EXPERTS BY EXPERIENCE

Als führender Anbieter elektrischer Ausrüstungen für spurgeführte Verkehrssysteme mit elektrischer Traktion liefert Rail Power Systems mit seinen Produkten und Dienstleistungen seinen Anteil an effizienten und nachhaltigen Lösungen.

Rail Power Systems GmbH
Garmischer Str. 35 | 81373 München
info@rail-ps.com

www.rail-ps.com