

Modellierung der Lebenszykluskosten von Oberleitungsanlagen

Fritjof Aufschläger, Arnd Stephan, Dresden; André Dölling, Erlangen

Als Ergebnis einer Forschungsk Kooperation der Technischen Universität Dresden und Siemens Mobility GmbH wurde eine Methode zur probabilistischen Modellierung der Lebenszykluskosten von Oberleitungsanlagen entwickelt. Zur Demonstration der Möglichkeiten des entstandenen Softwaretools werden die Bauarten Re 200 und *Sicat SX* einem technisch-wirtschaftlichen Vergleich unterzogen.

Modelling the life cycle costs of overhead contact line systems

A joint research project of Technische Universität Dresden and Siemens Mobility GmbH resulted in the development of an approach for the probabilistic life cycle cost modelling of overhead contact lines. To further demonstrate the possibilities of the developed software, the catenary systems Re 200 and *Sicat SX* are compared by technological and commercial considerations.

Modélisation du coût de cycle de vie des lignes aériennes de contact

Un projet de recherche commun entre l'université technique de Dresde et la société Siemens Mobility SARL a conduit au développement d'une approche sur la modélisation probabilistique du coût de cycle de vie des lignes aériennes de contact. A titre de démonstration des possibilités ouvertes par les outils logiciels développés, les types de caténaires Re 200 et *Sicat SX* ont fait l'objet d'une comparaison technico-économique.

1 Einleitung

Im Jahr 2019 hatten die Bundesschienenetze in Deutschland eine Streckenlänge von 33 291 km, von denen 61 % elektrifiziert waren [1]. Die Regierungsparteien bekannten sich bereits ein Jahr zuvor dazu, bis 2025 eine Elektrifizierungsquote von 70 % anzustreben [2]. Damit unterstreicht auch Deutschland den weltweiten Trend zur leistungsfähigen, zuverlässigen und lokal emissionsfreien Energiezuführung per Fahrleitung.

Zur Nutzung der Vorteile der Elektrotraktion ist eine Fahrleitungsanlage heute nicht mehr überall die Grundvoraussetzung. Alternative Antriebsarten versprechen vor allem im leichten Regionalverkehr Potenziale. Leistungsfähige elektrische Verkehrssysteme lassen sich hingegen auch in Zukunft am wirtschaftlichsten mit einer Oberleitungsanlage betreiben. [3]

Vor diesem Hintergrund wurde in den vergangenen vier Jahren durch die Technische Universität Dresden in Kooperation mit Siemens Mobility GmbH ein Forschungsprojekt bearbeitet, in dem die Lebenszykluskosten (LCC) von Oberleitungsanlagen untersucht wurden. Ziel des Projekts war die Analyse und Abstraktion der Prozesse der Oberleitungserichtung und -instandhaltung. Darauf aufbauend sollte ein *Bottom-up*-Modell entworfen werden, mit dem eine Entscheidungshilfe für Investitionsoptionen auf Basis einer Deltaanalyse der LCC geboten werden kann. [4]

2 Modellbildung

2.1 Lebenszyklusphasen einer Oberleitungsanlage

Der Lebenszyklus einer Oberleitungsanlage umfasst vereinfacht die Phasen

- Planung,
- Errichtung,
- Instandhaltung und Betrieb sowie
- Rückbau oder Erneuerung,

die im Folgenden knapp dargestellt werden.

Die *Planung* einer Oberleitungsanlage kann beginnen, wenn das Bauvorhaben nach der Aufnahme in den Bundesverkehrswegeplan durch ein Ausbaugesetz gesetzlich legitimiert wurde [5]. Die Projektierung umfasst die Vorentwurfs-, Entwurfs- und Ausführungsplanung [6] mit entsprechenden Prüf- und Freigabeläufen. Nähere Regelungen zu den Planungsphasen sind in §47 HOAI [7] festgehalten.

Die *Errichtung* der Anlage umfasst alle Arbeitsschritte, die zur baulichen Realisierung bis zur Übergabe an den Kunden nach erfolgter Abnahme und Inbetriebsetzung notwendig sind. Die wichtigsten Meilensteine umfassen dabei nach [8]:

- Gründungen
- Maststellen
- Bahnenergie- und Rückleiterinstallation
- Stützpunktherstellung
- Kettenwerksmontage

- finale Regulierung
- Arbeiten an der Rückleitungsanlage

Arbeitsleistungen zur Vorbereitung der Elektrifizierung wie beispielsweise Anpassungen an Brücken, Gleisen, Leit- und Sicherungstechnik oder den elektrischen Energieanlagen, die auf Bestandsstrecken im Zuge der Elektrifizierung notwendig werden können, werden nicht als Teil der Anlagenerrichtung in dieser LCC-Berechnung betrachtet.

Die *Instandhaltung- und Betriebsphase* umfasst per Definition die Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung der Anlage [9]. Bei der DB Netz AG gliedert sich die Inspektion nach [10] in

- Zustandsprüfungen Z1 bis Z4, bei denen die Oberleitungsanlage durch Begehung in Augenschein genommen wird,
- Funktionsprüfungen F1 bis F6, die der Überprüfung des Zusammenwirkens Fahrdraht/Stromabnehmer sowie von Oberleitungsspannungsprüfeinrichtungen (OLSP) dienen und überwiegend durch Messfahrten erbracht werden,
- außerordentliche Prüfungen aP1 bis aP3, die nach Kurzschlüssen und besonderen witterungsbedingten Ereignissen durchgeführt werden und
- Vollinspektion V, bei der eine umfassende Inaugenscheinnahme bei ausgeschalteter und geerdeter Oberleitung vom Turmwagen durchgeführt wird und die Anlage auf Verschleiß, Beschädigung und Einhaltung der Abstände aktiver Teile untersucht wird.

Die aus den Inspektionen resultierenden Instandsetzungen zur Mängelbehebung werden bei einem späteren Einsatz separat bei ausgeschalteter und geerdeter Oberleitung durchgeführt. Mängelbehebungen, anteilig oder vollständig, sind insbesondere in Vollinspektionen oder außerordentlichen Prüfungen je nach Befundung und Sperrpause möglich. Tritt eine Funktionsunfähigkeit der Oberleitungsanlage auf, so muss diese beseitigt werden. Wie stark diese Funktionsstörung den Bahnbetrieb beeinträchtigt, hängt von Umfang und Beginn der Störung, der Strecke, dem Verkehr, der Fähigkeit und Organisation des Instandhaltungsnetzbezirks sowie der Dauer der Zuführung von Personal und Technik zum Fehlerort ab. Die Wiederherstellung der Betriebsfähigkeit kann ad hoc nach Abstimmungen mit dem Fahrdienstleiter ohne betriebliche Vorkehrungen wie einer im Voraus anzumeldenden Bau- und Betriebsanweisung (BETRA) durchgeführt werden. Im Gegensatz dazu werden planbare Erneuerungen der Oberleitungsanlage (Komponentenwechsel) im Rahmen des Lebenszyklus wie Fahrdrahtverschleiß, Austausch von Bauteilen zum Funktionserhalt durch BETRA-Prozesse geeignet koordiniert. [10]

Der ersatzlose Rückbau einer Oberleitungsanlage ist äußerst selten. Die Phase des *Rückbaus oder der*

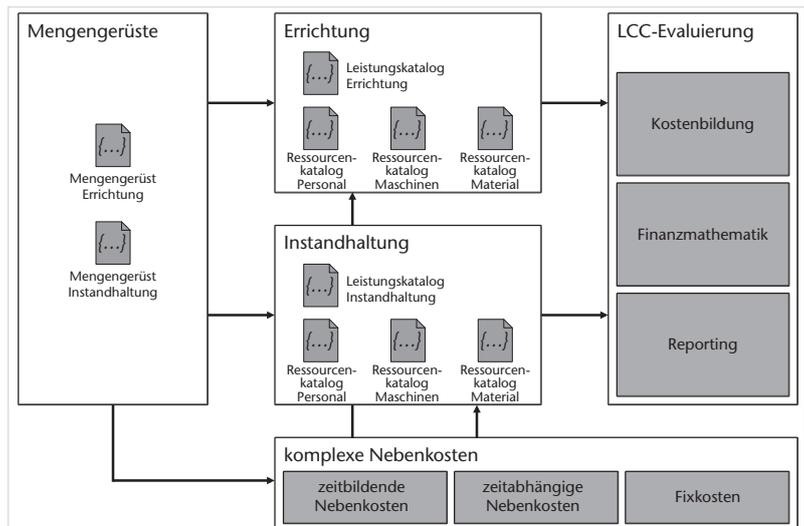


Bild 1: Entwurf des LCC-Modells (Bilder 1 bis 6: Fritjof Aufschläger, bearb. eb).

Erneuerung kann daher als Teil der Errichtung oder der Instandhaltung betrachtet werden. Dies betrifft beispielsweise die zuvor genannte Erneuerung von Anlagenteilen (Komponentenwechsel), den Umbau der Streckenführung oder den Ersatz durch eine Neuanlage. [4]

2.2 Konzeption des LCC-Modells

Bild 1 zeigt den Entwurf des LCC-Modells. Die Berechnung der Lebenszykluskosten beginnt mit einem *Technischen Mengengerüst*, welches den Umfang der Anlage beschreibt und das sich als zentraler Eingangsdatensatz am besten eignet. Als erste Prozessmodellierung wird die *Errichtungsberechnung* durchgeführt. Die zuvor definierten und als Leistungen abgebildeten Mengen werden hier mit den Einträgen in einem *Leistungskatalog* verrechnet. Dieser zeigt wiederum auf Ressourcenkataloge, die alle flexibel anpassbaren Angaben zu Material-, Maschinen- und Personalkosten enthalten.

Die *Instandhaltungsberechnung* wird analog dazu durchgeführt, wobei hier die zeitliche Dimension in Form der Wiederkehr von Leistungen über der Lebensdauer hinzukommt.

Die Berechnung *komplexer Nebenkosten* wird separat durchgeführt. Diese umfassen alle Kosten, die sich nicht direkt mit einem Anlagenmengengerüst abbilden lassen, so beispielsweise Nebenzeiten für An- und Abfahrt, Bewegungszeiten zwischen Arbeitsleistungen und Fixkosten wie für die Baustelleneinrichtung. Dies beinhaltet eine Abschätzung der Arbeitsschichten auf Basis realitätsnaher Erfahrungswerte [11].

Die einzelnen Kostenelemente werden abschließend in der *LCC-Evaluierung* zusammengeführt, in

Bild 2:
Beispiel zum Rechnen mit probabilistischen Größen.

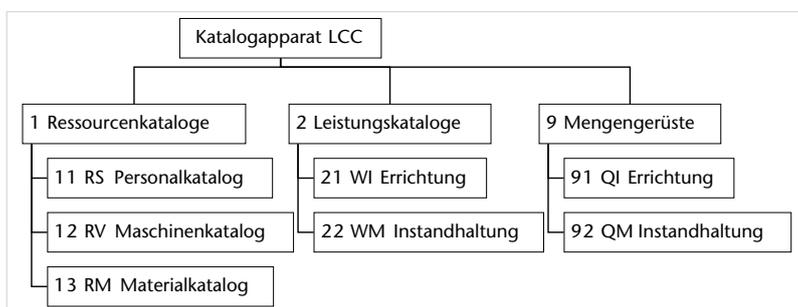
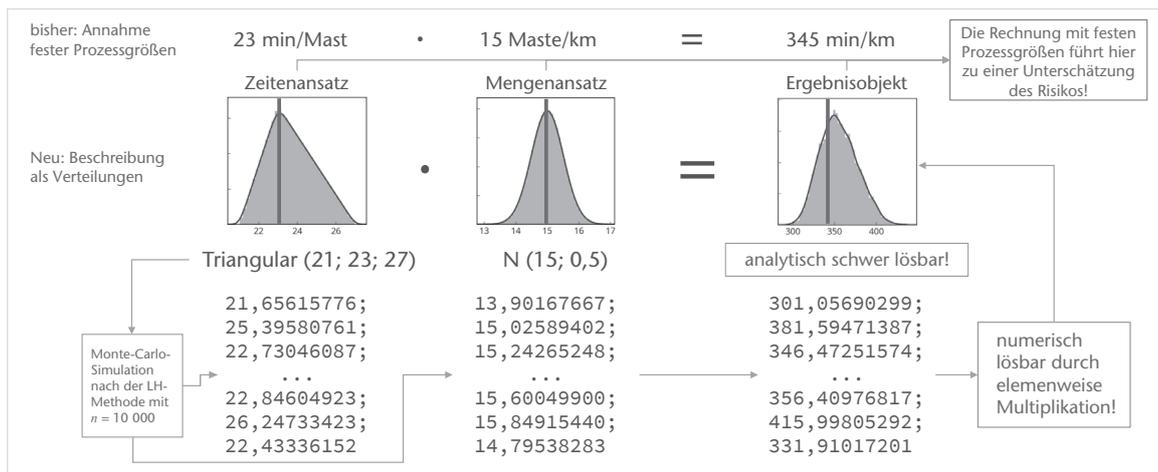


Bild 3:
Aufbau des Katalogapparats für die Lebenszykluskostenmodellierung mit internen Ordnungsnummern und Abkürzungen.

einen zeitlichen Kontext gebracht und mit finanzmathematischen Methoden miteinander verrechnet [4].

2.3 Probabilistische Risikosimulation

In der beschriebenen Modellierung und der damit verbundenen Softwareumsetzung können alle Berechnungen als probabilistische Risikosimulation durchgeführt werden, womit die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Chancen und Risiken bezifferbar sind. Im Gegensatz zum herkömmlichen deterministischen Ansatz geht der probabilistische Ansatz von der Unsicherheit der verwendeten Modellparameter aus. Die Eingangsgrößen werden als Wahr-

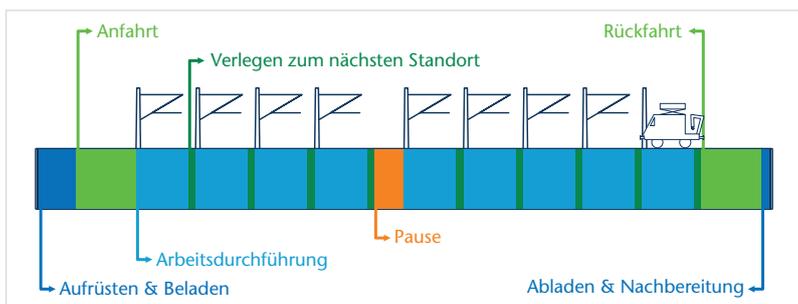


Bild 4:
Grundidee der schichtweisen Errichtungsmodellierung.

scheinlichkeitsverteilungen beschrieben, die Chancen und Risiken der Modellparameter abbilden und mittels numerischer Methoden aggregieren. Im Ergebnis ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Gesamtmodell. Bild 2 zeigt ein einfaches Beispiel zum Rechnen mit probabilistischen Größen [12; 13].

2.4 Module des LCC-Modells

2.4.1 Eingangsdatenverarbeitung

Die Eingangsdaten umfassen den Katalogapparat (Bild 3), der das LCC-Modell in mehreren Leistungs- und Ressourcenkatalogen sowie Mengengerüsten enthält. Diese werden in einem objektorientierten, nichtrelationalen Datenbankformat wie der *JavaScript Object Notation (JSON)* im Projektordner abgelegt. Dafür wurde für jeden Katalogtyp ein Objektschema definiert, welches strikt einzuhalten ist [4].

2.4.2 Prozessmodellierung

Die Modellierung wird für die bereits beschriebenen Lebenszyklusphasen in getrennt aufgestellten Lebenszyklusobjekten durchgeführt. Dabei wird die Grundidee der in Bild 4 dargestellten *schichtweisen Errichtungsmodellierung* angewendet, die eine Auftrennung der Leistungen einer Schicht in die jeweilige Nettoarbeitszeit und die Nebenzeiten vorsieht, die dann jeweils getrennt berechnet werden. Die Kostenarten wie beispielsweise Personal-, Maschinen- und Materialkosten bleiben somit durchgängig transparent und getrennt auswertbar.

Im Rahmen der Kostenbildung werden die bis zu diesem Punkt überwiegend als zeitliche Informationen vorliegenden Prozessgrößen mit den Kosteninformationen aus den Ressourcenkatalogen verrechnet und die zeitliche Kontextualisierung der bislang getrennt behandelten Lebenszyklusphasenobjekte

vorgenommen (Bild 5). Die Daten sind in ein relationales Tabellenformat überführt, da finanzmathematische Berechnungen damit besser arbeiten [4].

2.4.3 Kostenrechnung und Analyse

Die *finanzmathematischen Berechnungen* werden ausgehend von der Zahlungsflusstabelle aus der Prozessmodellierung durchgeführt. Diese beinhalten die Berechnung der abgezinnten Barwerte, die jahresweisen dargestellt und kumuliert werden können, um den Kapitalwert der Anlage zu erhalten.

Zahlreiche Funktionen zur *Berichterstellung und Auswertung* erlauben den Export der Ergebnisse in Tabellenformaten und als Diagramme. Die Möglichkeit der Erstellung von *Differenzmodellen* erleichtert speziell den Vergleich unterschiedlicher Investitionsoptionen.

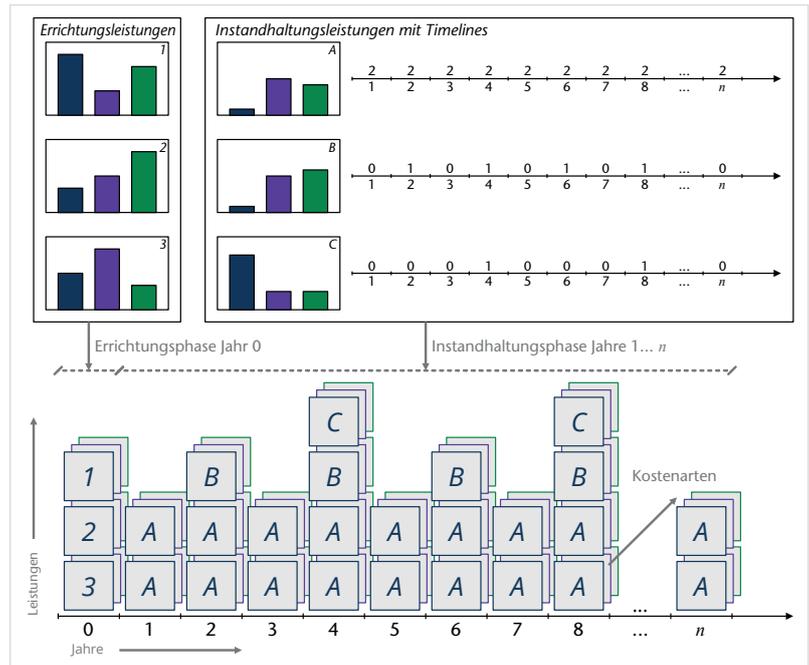


Bild 5: Zeitliche Kontextualisierung der Kosten als Teil der Kostenbildung mit je drei exemplarischen Errichtungs- und Instandhaltungsleistungen.

3 Eingangsdatenerzeugung und Parameterwahl

3.1 Eingangsdatenerzeugung mit Fokus auf die Schätzklausur

Die Qualität der Modellergebnisse wird durch die Qualität der für die Berechnung verwendeten Eingangsdaten maßgeblich bestimmt. Die für die LCC-Modellierung benötigten Eingangsdaten sind häufig nicht frei verfügbar oder nicht durchgehend doku-

mentiert. Für die Modellbildung kam daher eine Reihe von Methoden zur Eingangsdatenerzeugung zum Einsatz, von denen die in Bild 6 schematisch dargestellte *Schätzklausur zur systematischen Aufwandschätzung* die wichtigste ist.

Schätzklausuren eignen sich zur systematischen Erfassung von Prozessgrößen, die häufig den mit der

Schätzklausur im Rahmen der systematischen Aufwandschätzung				
Schätzklausur				
Phase	Vorbereitung	Durchführung	Nachbereitung	
Aktivität	Anforderungsdefinition <ul style="list-style-type: none"> Projektumgebung definieren Produkt- und Projektstrukturpläne sowie Arbeitspakete ausarbeiten Schätzgrößen bestimmen Protokollwesen festlegen Teilnehmerauswahl mit Rollenverteilung Vorgehensweise planen Aufgabenstellung erörtern 	Bottom-Up-Schätzung <ul style="list-style-type: none"> zerlegte Schätzobjekte beurteilen Gruppendiskussion <ul style="list-style-type: none"> strukturiert Time Boxing Dreizeitenschätzung	Top-Down-Schätzung <ul style="list-style-type: none"> Schätzung durch Erfahrungswissen plausibilisieren 	Abschluss <ul style="list-style-type: none"> Abfolge der Arbeitspakete festlegen Einsatzmittelpassung Risikobewertung
In-/Output	<ul style="list-style-type: none"> Produkt- und Projektstrukturplan Arbeitspaketbeschreibung Schätzformular Checklisten 	<ul style="list-style-type: none"> geschätzte Vorgangsdauern erfassen Aufwände berechnen 	<ul style="list-style-type: none"> historische Daten 	<ul style="list-style-type: none"> geplante Einsatzmittel Vorgangsbeziehung bewertete Risiken Projektvertrag
Prozesse	Anforderungs- und Risikomanagement <ul style="list-style-type: none"> Anforderungen identifizieren, Annahmen und Risiken dokumentieren Risikobewertung durchführen, Gegenmaßnahmen entwickeln oder Zuschläge einplanen 			

Bild 6: Standardisiertes Vorgehensmodell einer Schätzklausur im Rahmen der systematischen Aufwandschätzung.

Planung und Errichtung einer Anlage betrauten Personen bekannt sind, aber selten in standardisierter Form dokumentiert werden. In [14; 15] ist diese angewendete Methodik zur Generierung von Eingangsdaten für die Errichtungsmodellierung für die LCC-Modellierung beschrieben.

Zur *Vorbereitung* der Schätzklausur wird als Diskussionsgrundlage ein exemplarischer Arbeitsablauf in Form eines Projektstrukturplans zusammengestellt, der bereits jede zu schätzende Arbeitsleistung enthält. Auf dieser Grundlage wird jeweils eine Protokollvorlage angefertigt, die möglichst viele Angaben zur Durchführung der Arbeitsleistung enthält. Gleichzeitig sollte sie flexibel anpassbar sein, falls während der Schätzklausur Änderungsvorschläge aufkommen.

Die *Durchführung* der eigentlichen Schätzklausur sollte in sachkundiger Moderation nach einem zuvor festgelegten Zeitplan erfolgen. Im Ergebnis können für alle Arbeitsleistungen die begleitenden Prozessgrößen wie Umfang der Arbeitskolonne und benötigte Maschinen und Material benannt werden. Die Kolonnenarbeitszeit empfiehlt sich als Dreipunktschätzung zu erheben, deren Punkte die optimistische, typische und pessimistische Zeitschätzung abbilden. Diese Angaben lassen sich anschließend für die Anwendung der probabilistischen Risikosimulation in eine PERT-Verteilung überführen.

In der *Nachbereitung* werden die Ergebnisse einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Die Ergebnisse einzelner Schätzklausuren sind auf Basis ihrer angenommenen Glaubwürdigkeit oder der Selbsteinschätzung der befragten Personen gewichtet zu aggregieren, um ein Gesamtbild zu erhalten.

3.2 Festlegung des Szenarios und der Varianten

Als Szenario für die Demonstrationsrechnungen soll eine fiktive Bestandsstrecke betrachtet werden, wie sie im Zuge der zunehmenden Elektrifizierungsbestrebungen in den kommenden Jahren in Deutschland elektrifiziert werden könnte. Die Strecke hat eine Länge von 57,2 km und eine Entwurfsgeschwindigkeit von 160 km/h, zudem ist die Radienverteilung bekannt [4].

In den vorliegenden Demonstrationsrechnungen sollen zwei Varianten betrachtet und miteinander verglichen werden. Die *Basisvariante* mit Wahl der Regelbauart Re200 und auf Basis von Stahlmasten betrachtet, wie eine Bestandsstrecke in Deutschland mit den heute geltenden Standards und Vorgaben zu elektrifizieren wäre. Eine *Vergleichsvariante* enthält die Analyse dieser Elektrifizierung mit der windschiefen Bauart *Sicat SX*, wie sie in Dänemark im Rahmen des Elektrifizierungsprogramms verwendet wird [16].

Zur Wahrung der Übersichtlichkeit und aufgrund zunächst lückenhafter Eingangsdaten beschränken sich die Demonstrationsrechnungen auf die freie Strecke und die durchgehenden Hauptgleise in den Bahnhöfen. Auch die Zahl der planungsrelevanten Zwangspunkte wird als noch nicht bekannt angenommen. Neben diesen Einschränkungen bei der Modellierung müssen auch aufgrund ausstehender Features des LCC-Tools Vereinfachungen angenommen werden: Unternehmerische Risiken beziehungsweise Entscheidungsspielräume bei der Preisbildung, die Bauablaufplanung, Auswirkungen aus dem Bahnbetrieb sowie übergeordnete Planungs- und Managementaufgaben können in der vorliegenden rein kostenbasierten Modellierung zu Demonstrationszwecken noch nicht beachtet werden.

3.3 Parameterfestlegung für die Basisvariante

3.3.1 Erstellung der Mengengerüste

Für die Erstellung des streckenspezifischen Mengengerüsts für die *Errichtung* der Basisvariante wurde auf ein allgemeingültiges Verfahren zurückgegriffen [17]. Dies umfasst die Schritte:

- Ermittlung der bauartbedingten, radiusabhängigen Längsspannweiten
- Ermittlung der Bauart- und Streckenspezifischen mittleren Längsspannweite sowie mittleren Nachspannlänge
- Ermittlung des Mengengerüsts auf Basis der Projektdaten mittels eines Planungsprogramms der Siemens Mobility

Unter Verwendung der streckenspezifischen Parameter wie der Radienverteilung ergab sich für die Basisvariante eine mittlere Längsspannweite von 76,43 m und eine mittlere halbe Nachspannlänge von 734,04 m. Die resultierenden Mengen aus dem Planungstool wurden anschließend als Untergrenze einer Gleichverteilung angenommen, deren Obergrenze zur pauschalen Abdeckung von Projektrisiken der Projektierung als das 1,15-fache der Untergrenze festgelegt wurde.

Im Mengengerüst für die *Instandhaltung* tritt als zentrale Größe die Anzahl der Stützpunkte auf, da diese bei der DB Netz AG die Grundlage für alle entsprechenden Kalkulationen bildet [10]. Die zyklische Wiederholung der zuvor beschriebenen Inspektionen lässt sich der entsprechenden Richtlinie entnehmen [18]. Angaben zur Häufigkeit von Kurzschlüssen, Störungen und Komponentenwechseln wurden in [4] aus verschiedenen Quellen recherchiert.

Bestandteil beider Mengengerüste ist die Definition von *Arbeitssequenzen*, in denen für jede Menge

festgelegt wird, welche Leistungen aus dem Leistungskatalog wie häufig abgerufen werden sollen.

3.3.2 Bildung der Ressourcen- und Leistungskataloge

Als Grundlage der Kostenbildung dienen die *Ressourcenkataloge* für Personal, Maschinen und Material. Die Daten der *Personal- und Maschinenkataloge* wurden am Rande der bereits erwähnten Schätzklausuren erhoben und durch realistische Annahmen ergänzt [4]. Der *Materialekatalog* basiert auf internen branchenüblichen Annahmen der Siemens Mobility.

Der *Leistungskatalog der Errichtung* enthält für jede Arbeitsleistung die Quantifizierung der Prozessdaten unter Verweis auf die Ressourcenkataloge sowie die Dauer der Leistung. Der Katalog basiert auf der Befragung im Rahmen von Schätzklausuren mit insgesamt sieben Experten der Siemens Mobility GmbH mit langjähriger Erfahrung in der Bauausführung von Oberleitungsanlagen.

Der *Leistungskatalog der Instandhaltung* wurde auf Basis von Planarbeitszeiten und im Rahmen von Expertengesprächen ermittelt [4; 10].

3.4 Anpassungen für die Vergleichsvariante

Die Bauart *Sicat SX* hat in der im Elektrifizierungsprogramm Dänemark umgesetzten Form drei Faktoren, die für die vorliegende Modellierung besonders relevant sind:

1. Bauartbedingt ergibt sich ein deutlich reduziertes Mengengerüst.
2. Als Vorzugsgründung kommt ein Verfahren mit geramten Betonfertigteilfelementen zum Einsatz.
3. Die Ausrichtung der Masten auf dem Fundament wird mittels Stellmuttern durchgeführt, auf das bei der DB immer noch übliche Unterstopfen wird verzichtet.

Die Schritte der Bearbeitung bei der *Erstellung des Mengengerüsts* gleichen prinzipiell jenen der Basisvariante. Insbesondere die Ermittlung der durchschnittlichen Nachspannlänge stellte sich als Herausforderung dar, da speziell die Berechnung der zulässigen Rückstellkräfte einer windschiefen Oberleitung nicht trivial ist. Unter Berücksichtigung der Zielstellung der Modellierung konnte für die *Sicat SX* auf der Beispielstrecke eine mittlere Längsspannweite von 102,06 m im Einzelfeld und eine mittlere halbe Nachspannlänge von 889,66 m mit zufriedenstellender Genauigkeit ermittelt werden.

In der Definition der *Arbeitssequenzen* wurden aufgrund der erhöhten Kettenwerkslast größer di-

mensionierte Ortbetongründungen angenommen, die an Stellen zum Einsatz kommen sollen, an denen das Rammen nicht möglich ist. Bei den Vorzugsgründungen kommt nun das Rammverfahren zum Einsatz. Die Ausrichtung der Masten wurde vom herkömmlichen Verfahren mit Unterfüßern und Unterstopfen auf das Verfahren mit Edelstahlstellmutter angepasst. Außerdem wurden die Leistungen für die Kettenwerksmontage auf die zur Bauart passenden Varianten aktualisiert.

Das *Mengengerüst für die Instandhaltung* wurde aufgrund der Bauartbedingt reduzierten Stützpunktanzahl entsprechend angepasst.

Der *Materialekatalog* wurde aktualisiert, um die erhöhten Einzelkosten der verwendeten Komponenten korrekt abzubilden. Das betrifft insbesondere die Nachspanneinrichtungen und das Kettenwerk (Hänger und Fahrdraht).

4 Ergebnisse

4.1 Überblick

Mit dem LCC-Tool der Professur für Elektrische Bahnen können die Ergebnisse der Analyse in diversen Tabellen und Diagrammen ausgegeben werden. Die Granularität kann zwischen den Teilleistungen, den

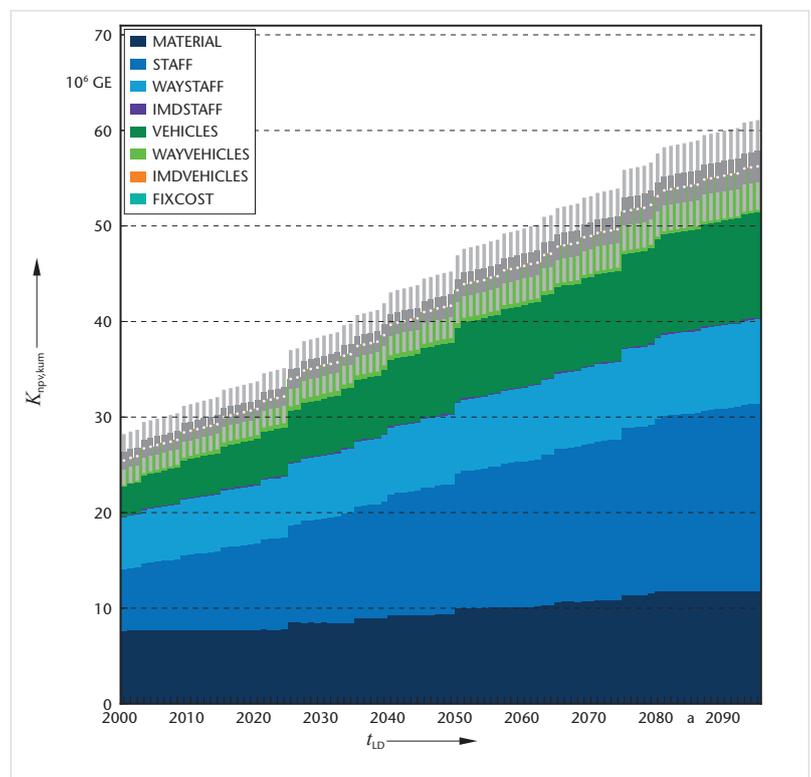


Bild 7: Kumulierte abgezinste Kosten $K_{npv,cum}$ in Geldeinheiten (GE) über der Lebensdauer t_{LD} in Jahren der Basisvariante Re 200 (Bilder 7 bis 13: Professur für Elektrische Bahnen, bearb. eb).

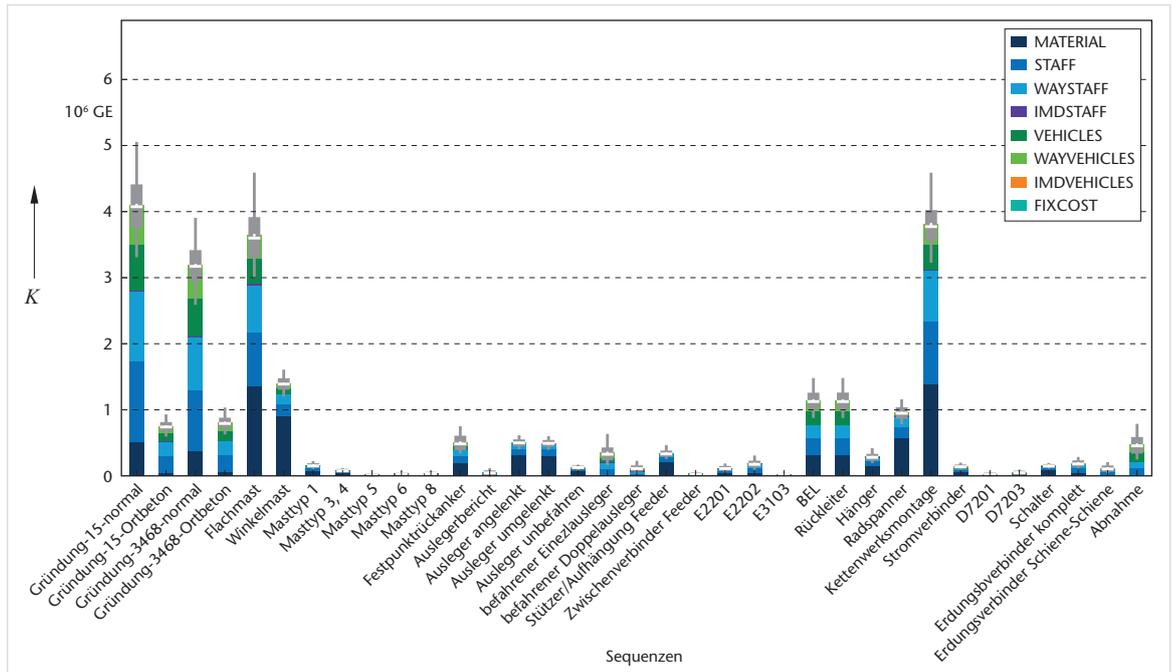


Bild 8: Kosten K in GE der Arbeitssequenzen der Errichtung der Basisvariante Re 200.

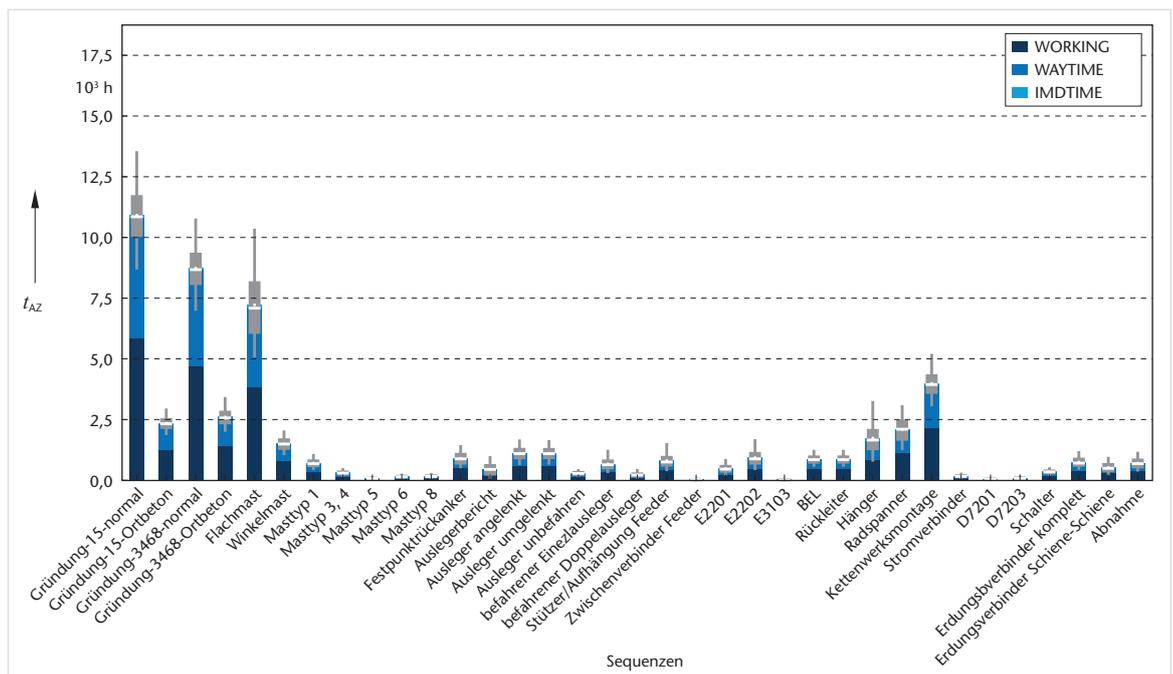


Bild 9: Arbeitszeit t_{AZ} in h der Arbeitssequenzen der Errichtung der Basisvariante Re 200.

Lebenszyklusphasen und dem Gesamtlebenszyklus beliebig gewählt werden. Die Auswertung ist sowohl auf Kosten- als auch auf der zugrunde liegenden Zeitebene möglich.

Die Verteilungen der probabilistisch berechneten Ergebnisse werden in den Diagrammen in Form von Boxplots repräsentiert. Dabei stellt die *graue* Box den Bereich dar, in dem die mittleren 50% des Kostenrisikos liegen. Die Antennen decken mit ihrer Spann-

weite 95% des Risikos ab. Der Mittelwert wird als *weißer* Balken, der Medianwert als *weißer* Punkt dargestellt.

4.2 Basisvariante

Zur Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eignet sich das Flächendiagramm der kumulierten abge-

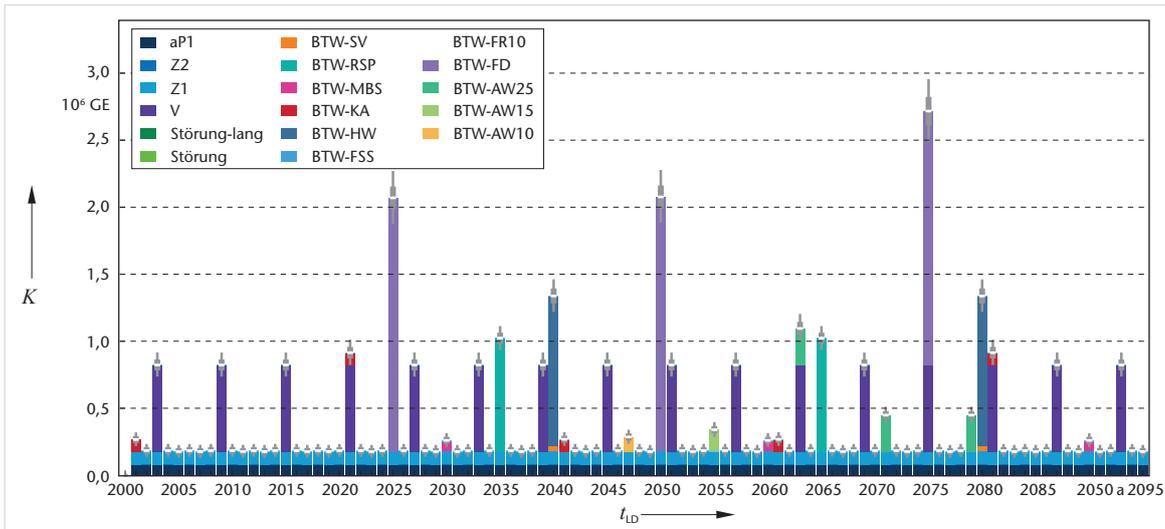


Bild 10: Kosten K in GE der Arbeitssequenzen der Instandhaltung der Basisvariante Re200.

zinsten Kosten über der Lebensdauer in Bild 7. Farblich abgesetzt sind dabei die Kostenarten Material (MATERIAL), Personal (STAFF), Nebenkosten für Personal (WAYSTAFF, IMDSTAFF), Fahrzeuge (VEHICLES), Nebenkosten für Fahrzeuge (WAYVEHICLES, IMDVEHICLES) sowie Fixkosten (FIXCOST, im vorliegenden Modell nicht angewendet). Dargestellt sind die Errichtungskosten (Jahr 2000) von im Mittel 25,5 Mio. Geldeinheiten (GE) bei einer Standardabweichung von 1,3 Mio. GE. Über die 95 Betriebsjahre kommen Instandhaltungskosten von im Mittel 30,8 Mio. GE bei einer Standardabweichung von 1,9 Mio. GE hinzu.

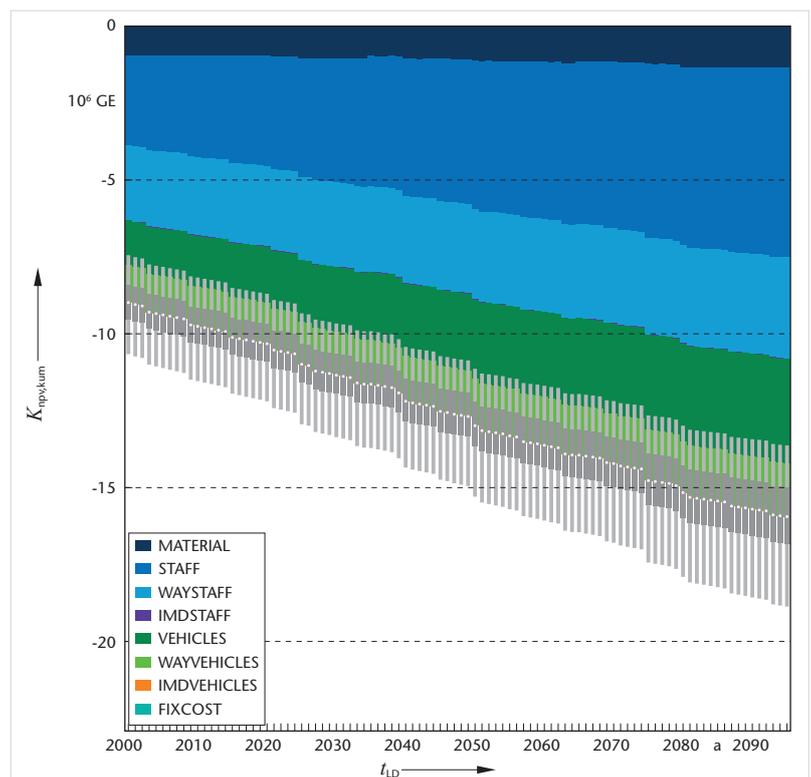
Die Errichtungskosten sind in Bild 8 nach Arbeitssequenzen aufgeteilt. Die farbliche Absetzung repräsentiert auch hier die Kostenarten. Die Gründungs- und Maststellesequenzen sowie die Installation des Leitermaterials treten deutlich als Kostentreiber hervor. In Bild 9 sind die gleichen Arbeitssequenzen auf der Abszisse dargestellt, auf der Ordinate ist jedoch die Kolonnenarbeitszeit zu sehen. Farblich abgesetzt sind die Nettoarbeitszeit (WORKING) und die Wegezeit (WAYTIME, IMDTIME).

Die Arbeitsleistungen der Instandhaltung sind in Bild 10 über dem jeweiligen Jahr ihres Fristablaufs dargestellt. Es zeigt sich, dass die wesentliche finanzielle Grundlast durch das von den Produktionsdurchführungen verantwortete Inspektionaufkommen (ap1, Z2, Z1, V) geprägt wird. Störungen fallen insgesamt kaum ins Gewicht. Bei den Bauteilwechseln sind insbesondere der Fahrdrachtwechsel (BTW-FD), der Hängerwechsel (BTW-HW) und die gestaffelten Auslegerwechsel (BTW-AW) auffällig.

Bild 11: Kumulierte abgezinste Kosten $K_{npv,cum}$ in GE über der Lebensdauer t_{LD} in Jahren des Differenzmodells aus Re200 und *Sicat SX*.

4.3 Vergleichsmodell

Zum Vergleich der Bauarten wurde zunächst das Vergleichsmodell auf Basis der beschriebenen Eingangsdaten der *Sicat SX* modelliert. Anschließend wurde mit der Vergleichsfunktion des LCC-Tools aus Basis- und Vergleichsmodell ein Differenzmodell erzeugt. Negative Darstellungen in den folgenden Differenzdiagrammen stellen dabei die Einsparungen des Vergleichsmodells gegenüber der Basisvariante dar.



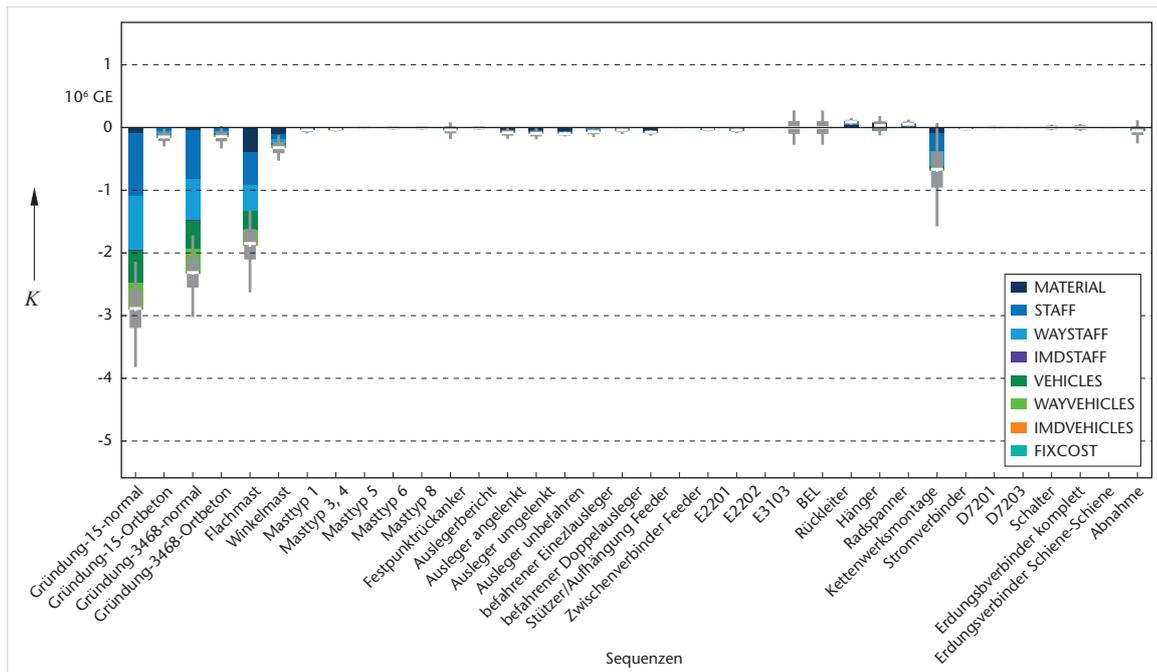


Bild 12: Kosten K in GE der Arbeitssequenzen der Errichtung des Differenzmodells aus Re200 und *Sicat SX*.

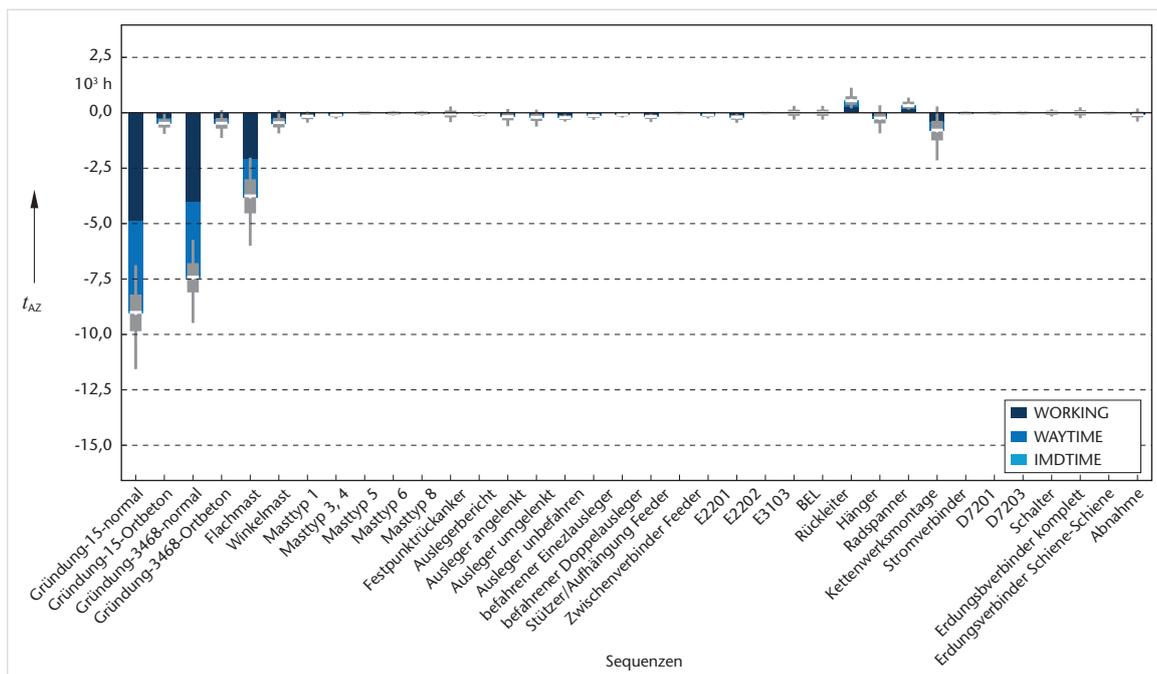


Bild 13: Arbeitszeit t_{AZ} in h der Arbeitssequenzen der Errichtung des Differenzmodells aus Re 200 und *Sicat SX*.

Die Betrachtung der Differenz des gesamten Lebenszyklus in Bild 11 zeigt deutliche Einsparungen von im Mittel 9,0Mio. GE bei einer Standardabweichung von 0,8Mio. GE, was im Rahmen der betrachteten Leistungen einem Anteil von etwa 35% entspricht. Durch die verringerte Anzahl Stützpunkte kommt es auch in der Instandhaltungsphase zu Einsparungen, die mit im Mittel 7,0Mio. GE bei einer Standardabweichung von 0,9Mio. GE über 95 Jahre

aber weniger signifikant ausfallen und mit einer Schiefe von -0,21 eher rechtssteil ausgeprägt sind.

Ein Blick in die Differenz der Arbeitssequenzen der Errichtung in Bild 12 zeigt sehr deutlich, wo die Einsparungen zu verorten sind. In den Gründungssequenzen profitiert die Bauart *Sicat SX* doppelt durch ein weniger umfangreicheres Mengengerüst und die Nutzung des innovativen Fertigteilbetonrammpfahlverfahrens in den Vorzugsgründungen (normal).

Weiteres Einsparpotenzial ist durch den Verzicht auf die Praxis des Unterfütterns und des Unterstopfens in den Maststellsequenzen (Flachmast, Winkelmast) zu heben. Die Kettenwerksmontage profitiert von der geringeren Anzahl Nachspannlängen und von den optimierten Kettenwerksmontageverfahren des dänischen Elektrifizierungsprogramms. Zu leichten Mehrkosten kommt es bei den Hängern und Radspannern, da hier spezielle, hochpreisige Komponenten zum Einsatz kommen, die die technische Umsetzung der windschiefen Oberleitungsbauweise erlauben. Die Differenz der Arbeitszeiten in Bild 13 offenbart, dass die Einsparungen – speziell bei den Gründungen und Masten – vor allem durch zeitlich deutlich gestraffte Verfahren getragen werden. Dies dürfte auch positive Auswirkungen auf die Gesamtprojektlaufzeit haben und dadurch zusätzlich die Kostenbestandteile beeinflussen, die in den vorliegenden Modellen gemäß der genannten Vereinfachungen noch nicht abgebildet werden.

5 Ausblick

Das vorgestellte LCC-Berechnungsmodell mit zugehöriger Software wurde seitens der Autoren im Rahmen einer Forschungs Kooperation der Siemens Mobility und der TU Dresden entwickelt. Das Modell verfügt über den *Bottom-up*-Ansatz und kann – abhängig von der Pflege der jeweiligen Kataloge – alle relevanten Prozessschritte im Rahmen des Lebenszyklus abbilden. Aufgrund der Einbindung vieler Experten aus Errichtung und Instandhaltung ist die Modellierung äußerst praxisnah. Wozu kann ein solches Werkzeug aber im Alltag genutzt werden?

Siemens verfolgt hier verschiedene Ansätze zur Nutzung dieses Modells. Das sind beispielsweise:

- LCC-Studien in frühen Phasen eines Projekts wie beispielsweise der Vorentwurfsplanung zur Auswahl einer Vorzugslösung auf Basis eines Variantenvergleichs
- LCC-Studien zur Ableitung eines sinnvollen Investitionszeitpunkts für die Erneuerung einer Anlage
- Durchführung von Vergleichen zwischen verschiedenen Oberleitungsbauweisen
- Unterstützung der Angebotserstellung mit Zielpreisermittlung
- Überprüfung von Errichtungs- und Instandhaltungsangeboten
- Weiterentwicklung von Oberleitungssystemen und -komponenten auf Basis von LCC-Ergebnissen gewichtet nach ihrem technisch-wirtschaftlichen Einfluss
- Transparenz der Lebenszykluskosten von Oberleitungsanlagen
- Aufzeigen von Potentialen einer zusätzlichen LCC-basierten Bewertung von Errichtungsange-

boten durch Endkunden als ergänzende Säule der Qualitätssicherung

Die Autoren stellen fest, dass Entwicklungs- und Weiterentwicklungsentscheidungen bei Bahnverwaltungen heute oft auf eigenen Erfahrungen und jeweiligen technischen Vorlieben beruhen. Die Lebenszyklusmodellierung ermöglicht es, die jeweiligen technischen Lösungen – bei fairer und fachlich fundierter Modellierung sowie richtigen Eingangsgrößen – auf ihre wirtschaftlichen Effekte im Lebenszyklus zu untersuchen. Das entbindet uns Ingenieure nicht von der Aufgabe, funktionale Basisanforderungen an eine Anlage geeignet zu verstehen, zu überprüfen und daraus abgeleitet eine anforderungsgerechte Lösung zu entwickeln. Führt man beide Tätigkeiten aber in Einklang, so entstehen neue sinnvolle Weiterentwicklungen unter Berücksichtigung aktueller Herausforderungen.

Kein Modell kann als „fertig“ bezeichnet werden. Auch das hier in seinen Grundsätzen vorgestellte Modell bedarf in den nächsten Jahren weiterer Pflege. In erster Linie sind es Weiterentwicklungen einzelner Modellierungen, Vervollständigung der Leistungs- und Ressourcenkataloge, Einführung einer grafischen Nutzeroberfläche mit Vereinfachung der Ein- und Ausgaben, Anbindung an existierende Planungssoftware sowie Schaffung eines automatisierten Ergebnisberichts. Im Rahmen interner oder externer Weiterentwicklungen lässt sich der Funktionsumfang auch auf die Anlagen der Bahnenergieversorgung ausdehnen. Die heute verfügbaren Berechnungsprogramme zur Anlagenauslegung können hierfür wertvolle Ergebnisse liefern.

Literatur

- [1] Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung – Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht 2019. www.eba.bund.de/DE/Themen/Finanzierung/LuFV/IZB/izb_node.html. Abruf: 09.09.2020.
- [2] Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD – 19. Legislaturperiode, 2018.
- [3] Stephan, A.; Wittemann, N. T.; Müller, A.: Alternative Antriebskonzepte: Welcher Hybrid für welche Strecke? In: *El – Der Eisenbahningenieur* (2018), H. 9, S. 60–66.
- [4] Aufschläger, F.: Methodik zur Modellierung der Lebenszykluskosten von Oberleitungsanlagen. Technische Universität Dresden, Dissertation, 2021 (Entwurf).
- [5] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Hintergrund und Ziele der Bundesverkehrswegeplanung. www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Infrastrukturplanung-Investitionen/Bundesverkehrswegeplanung/bundesverkehrswegeplanung.html. Abruf: 29.10.2020.
- [6] Kiessling, F.; Puschmann, R.; Schmieder, A.: Fahrleitungen elektrischer Bahnen – Planung, Berechnung, Ausführung, Betrieb. Erlangen: Publicis, 3. Auflage, 2014.

- [7] Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure – HOAI) vom 10. Juli 2013.
- [8] *Aufschläger, F.; Stephan, A.; Dölling, A.*: Modellierung der Lebenszykluskosten von Oberleitungsanlagen. In: *El – Der Eisenbahningenieur* (2019), H. 8, S. 12–17.
- [9] EN 13306:2017: Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung.
- [10] *Detle, L.*: Instandhaltung der Oberleitung auf betrieblich stark ausgelasteten Strecken. Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2020.
- [11] *Kluge, S.*: Methoden zur automatisierten Analyse von Standortprotokollen von Baufahrzeugen zur Ableitung und Validierung von Prozessgrößen der Oberleitungserrichtung. Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2019.
- [12] *Vose, D.*: Risk analysis: a quantitative guide. Chichester: Wiley, 3. Auflage, 2008.
- [13] *Hofstadler, C.; Kummer, M.*: Chancen- und Risikomanagement in der Bauwirtschaft – Für Auftraggeber und Auftragnehmer in Projektmanagement, Baubetrieb und Bauwirtschaft. Berlin: Springer Vieweg, 1. Auflage, 2017.
- [14] *Schmelzer, F.*: Entwicklung einer Methode zur standardisierten Katalogisierung von Oberleitungsarbeiten durch Expertenschätzung. Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2019.
- [15] *Schmelzer, F.*: Methodik zur Planung von Bauabläufen für die Errichtung von Oberleitungsanlagen. Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2020.
- [16] *Hahn, G.; Kunz, D.; Matthes, R.*: Oberleitung *Sicat SX* für die Elektrifizierung in Dänemark. In: *Elektrische Bahnen* 116 (2018), H. 4-5, S. 130–138.
- [17] *Röhr, T.*: Konstruktive und bautechnologische Einflussgrößen auf die Lebenszykluskosten von Oberleitungsanlagen. Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2020.
- [18] DB Ril 997.014x: Oberleitungsanlagen Instand halten.

Autoren



Dipl.-Ing. Fritjof Aufschläger (30), Studium des Verkehrsingenieurwesens an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Studienvertiefung Planung und Betrieb elektrischer Verkehrssysteme; 2017 bis 2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand an der Professur für Elektrische Bahnen; seit 2018 Vertreter der Professur im VDV AEE-UA „Oberleitungsanlagen“.

Adresse: Technische Universität Dresden, Professur für Elektrische Bahnen, 01062 Dresden, Deutschland;
Fon: +49 351 463-36872;
E-Mail: Fritjof.aufschlaeger@tu-dresden.de



Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan (56), Studium Elektrotechnik/Elektrische Bahnen an der Hochschule für Verkehrswesen (HfV) „Friedrich List“ Dresden; 1990 bis 1993 Forschungsstudium an der HfV/TU Dresden; 1995 Promotion zum Dr.-Ing.; 1993 bis 2008 IFB – Institut für Bahntechnik GmbH, ab 1995 Niederlassungsleiter des IFB Dresden; 1995 Sachverständiger des Eisenbahn-Bundesamtes für elektrotechnische Anlagen, seit 1999 für Magnetbahnsysteme, seit 2015 für Umrichter; 2002 Honorarprofessor an der TU Dresden; seit 2008 Professor für Elektrische Bahnen an der TU Dresden; seit 2012 Geschäftsführer IFB – Institut für Bahntechnik GmbH Berlin und Dresden.

Adresse: wie oben;
Fon: +49 351 463-36730;
E-Mail: arnd.stephan@tu-dresden.de



Dr.-Ing. André Dölling (41), Studium des Verkehrsingenieurwesens an der TU Dresden, 2003 bis 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Promotion an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Professur für elektrische Bahnen; seit 2007 tätig bei Siemens AG, jetzt Siemens Mobility GmbH, in diversen Funktionen im Bereich Entwicklung von Fahrleitungskomponenten und -systemen, Vertrieb, Consulting und Kundens Schulungen sowie Produktportfolio- und Produktmanagement für Bahnelektrifizierung/Fahrleitung; Senior Key Expert für Fahrleitungskomponenten und -systeme sowie Lehrbeauftragter für Fahrleitungen an der TU Dresden und Bahnelektrifizierung an der Technischen Hochschule Nürnberg; seit 2021 Plan- und Abnahmeprüfer des Eisenbahn-Bundesamtes.

Adresse: Siemens Mobility GmbH, SMO RI EL CoC COL, Mozartstraße 33b, 91052 Erlangen, Deutschland;
Fon: +49 152 09026336;
E-Mail: andre.doelling@siemens.com