



Mut zur Fahrleitung

Ein Leitfaden für verkehrspolitische Entscheidungen
mit Sachverstand

by VDE ETG

Empfohlene Zitierweise:

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.: Mut zur Fahrleitung,
VDE Leitfaden, Offenbach am Main, September 2025

Dieser VDE Leitfaden ist ein Arbeitsergebnis des ETG Fachbereichs A2 „Bahnen mit elektrischen Antrieben“.

Autoren:

Tobias Bregulla
Dr.-Ing. Felix Dschung
Roland Jauß
Jan Pape
Dr.- Ing. Carsten Söffker
Ulrich von Stockhausen
Markus Werner
Ulrich Zimmermann

Vorbemerkung:

VDE Leitfäden geben – entsprechend der Positionierung des VDE als neutraler, technisch-wissenschaftlicher Verband – gemeinsame Erkenntnisse der Mitglieder der jeweiligen Arbeitsgruppen wieder. Die Gemeinschaftsergebnisse werden im konstruktiven Dialog aus häufig unterschiedlichen Positionen erarbeitet. Die Studien spiegeln daher nicht unbedingt die Meinung der durch ihre Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter vertretenen Unternehmen und Institutionen wider.

Herausgeber:

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.
Energietechnische Gesellschaft (ETG)
Merianstraße 28
63069 Offenbach
Tel. +49 69 6308-346
etg@vde.com
www.vde.com/etg

Titelbild: Errichten einer OL-Anlage, © Furrer + Frey AG

Design: Schaper Kommunikation, Bad Nauheim

September 2025

Inhaltsverzeichnis

1. Präambel	4
2. Einleitung	5
3. Methodik	8
4. Stakeholderanalyse	10
4.1 Fernverkehr (Güter/Personenverkehr)	12
4.2 Regionalverkehr	13
4.3 Güterverkehr (Last Mile)	14
4.4 U- und S-Bahnen	15
4.5 Straßen- und Stadtbahnen	16
4.6 Trolley- und Batterie-Fahrzeuge	17
4.7 Elektrischer LKW	18
5. Nutzwertanalyse	21
5.1 Technik und Betrieb	23
5.1.1 Betriebsstabilität	23
5.1.2 Eignung für das Betriebsprogramm	23
5.1.3 Verbesserung des Betriebsprogramms	23
5.1.4 Kombinationsfähigkeit mit anderen nationalen und internationalen Verkehren bzw. mit anderen Verkehrsarten	24
5.1.5 Energie- und Leistungsbedarf	24
5.2 Umwelt und Akzeptanz	24
5.2.1 Umweltauswirkung	24
5.2.2 Nachhaltigkeit (Ressourceneinsatz, Recyclingfähigkeit)	24
5.2.3 Flächenbedarf	25
5.2.4 Architektonische Wirkung	25
5.2.5 Dauer des notwendigen Infrastrukturbaus	25
5.3 Finanzierung und Wirtschaftlichkeit	26
5.3.1 Infrastrukturkosten	26
5.3.2 Betriebskosten (Instandhaltung, Energie, Personal)	26
5.3.3 Fahrzeugkosten (Beschaffung, Komponententausch)	26
5.3.4 Nutzbarkeit von Skaleneffekten (z.B. Landesflotten, gemeinsame Reserveflotte, Homogenität)	26
5.3.5 Förderfähigkeit/zuverlässige Finanzierung	27
5.4 Zukunftssicherheit	27
5.4.1 Migrationsfähigkeit bei Infrastrukturerweiterung	27
5.4.2 Erhebung und Auswertung von Nutzungs- und Zustandsdaten	27
5.5 Risiken	27
5.5.1 Herstellerabhängigkeit	27
5.5.2 Reifegrad der Technologien	28
5.5.3 Externe Rahmenbedingungen (z.B. Energiekosten, CO ₂ -Bepreisung, Verfügbarkeit und Preis H ₂)	28
5.6 Beispielanwendung	28
6. Empfehlungen zur Beseitigung von Hindernissen	32
6.1 An die Treiber einer konkreten Elektrifizierungsinitiative gerichtet:	32
6.1.1 Fahrleitung in sensiblen Bereichen	33
6.2 An die Verkehrspolitik gerichtet	35
6.2.1 Vollbahn	35
6.2.2 Stadtverkehr	37
6.2.3 Schaffung geeigneter Rahmen für ein erfolgreiches Projekt	38
7. Alternative Antriebe	40
8. Zusammenfassung/Fazit	44
Quellenverzeichnis	45
Anhang	46
Verzeichnis der Abkürzungen	50

1. Präambel

Die Umstellung des Schienenverkehrs von dieselbetriebenen Verkehren hin zu elektrischem Betrieb schreitet kontinuierlich fort. Im Hinblick auf umzusetzende Lösungen werden mit Bezug auf die inzwischen verfügbare Speichertechnologien verschiedenste Optionen diskutiert. Allerdings scheint die „klassische“ Elektrifizierung mittels Oberleitung aufgrund diverser Herausforderungen dabei ins Hintertreffen zu geraten. Mit dem Verweis auf alternative Antriebssysteme, die bisweilen kurzfristig leichter umzusetzen sind, verliert die bewährte Maßnahme Elektrifizierung durch ihren initial höheren Aufwand und durch die nur langfristig gesehen sehr gute Amortisation in der Diskussion an Boden.

Der vorliegende Leitfaden verfolgt das Ziel, eine sachliche und unaufgeregte Auseinandersetzung mit dem Thema Elektrifizierung im Verkehr zu ermöglichen. Dabei handelt es sich nicht um eine detaillierte Studie, sondern vielmehr um eine Handreichung, welche den dringenden Bedarf an mehr Elektrifizierung im Verkehr beleuchtet und eine fundierte Grundlage für eine sachliche Diskussion liefern möchte. Ziel dieses Leitfadens ist es, die Thematik zu versachlichen und ganzheitlich objektiv zu betrachten, ohne sich in zu vielen Details zu verlieren oder ohne langwierige Studien zu fordern, deren Randbedingungen oft nicht hinreichend bekannt oder stabil sind.

Unser Papier grenzt sich bewusst von anderen Ansätzen ab, die etwa eine Kosten-Nutzen-Analyse oder die Förderungswürdigkeit konkreter Planungen behandeln. Studien, die in erster Linie monetäre Aspekte vergleichen bewerten langfristig wirksame Faktoren oft nur grob, weil diese Faktoren nicht oder nur schwierig in Geldwerten auszudrücken sind. Das Gesamtbild dieser Studien bleibt damit meist unvollständig. Der Ansatz dieses Leitfadens hingegen verfolgt in seiner einfachen und transparenten Bewertungssystematik eine Betrachtung aller in Frage kommenden Aspekte.

Der vorliegende Leitfaden richtet sich zunächst an die handelnden Personen im Zusammenhang mit der bevorstehenden Elektrifizierung von Verkehren, sei es auf einem bestehenden Netz oder bei Neubauprojekten: Betreiber, Eisenbahninfrastrukturunternehmen, Stadtgestalter/Aufgabenträger, Journalisten, insbesondere als Hilfestellung für die Treiber / Befürworter von vernünftigen Lösungen.

In einem zweiten Schritt adressiert sie auch die Verkehrspolitik und ihre Akteure, um mittel- und langfristig bessere Rahmenbedingungen für einen effizienten, nachhaltigen Verkehr zu schaffen.

2. Einleitung

Die Elektrifizierung im Schienenverkehr stellt grundsätzlich eine bewährte, wirtschaftliche und sehr effiziente Lösung dar, welche in der Transportbranche kaum zu übertreffen ist. Oft bedarf es gar keiner spektakulären Innovationen, um langfristig positive Ergebnisse zu erzielen. Besonders im Bereich der Traktionsarten hat sich das elektrische Fahren seit langer Zeit als bevorzugte Methode etabliert. Es bietet eine hohe Leistungsfähigkeit, Robustheit, sowie die Fähigkeit zur Rückspeisung und zur effizienten Verteilung von (rekuperierter) Energie.

Doch wie gelangt die benötigte Energie auf den Zug? Während es mittlerweile leistungsfähige und relativ effiziente Alternativen zur Fahrleitung gibt – etwa Batteriespeicher, mit oder ohne „Range Extender“ wie Wasserstoff-Brennstoffzellen – so führen diese Technologien immer zu einem Verlust an Effizienz. Zudem gehen sie mit einem höheren Aufwand für die Beschaffung, Instandhaltung und der Betriebsabwicklung einher. Insbesondere im fahrleitungsfreien Betrieb, wenn dieser nicht weitgehend „netzeinheitlich“ umgesetzt wird, entstehen zusätzliche Herausforderungen wie beispielsweise Klein- und Sonderserien innerhalb der Fahrzeugflotte. Das wiederum führt nicht selten zu zusätzlichen Randbedingungen und Einschränkungen bei der Betriebsplanung. Darüber hinaus sind Rohstoffe für Speichertechnologien und die benötigte Energiemenge kostbar und endlich.

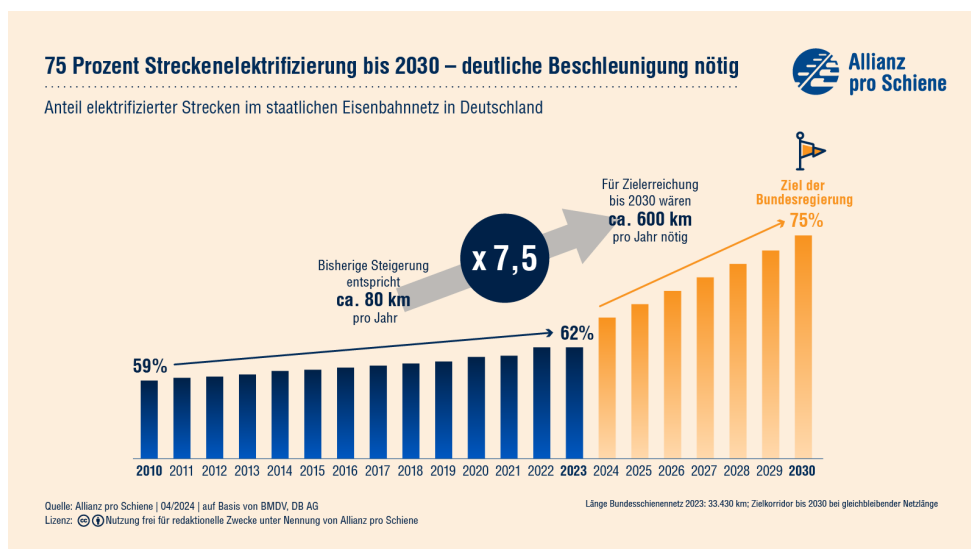


Abbildung 1 : Anteil elektrifizierter Strecken im bundeseigenen Eisenbahnnetz in Deutschland
(Quelle: Allianz pro Schiene)

Ein weiterer Vorteil der Fahrleitungssysteme ist die Möglichkeit zur Vermaschung und Netzbildung, sowie die Eigenschaft der kontinuierlichen Leistungsübertragung, welche sich im betrieblichen Alltag sehr gut bewährt hat – für nahezu alle Verkehrsarten. Aufgrund dieser Stärken sollte langfristig die Elektrifizierung der meisten Strecken nach dem Modell der integralen Netze angestrebt werden, wie sie beispielsweise in der Schweiz erfolgreich umgesetzt ist und weiter umgesetzt wird. Natürlich mag dies

- kurzfristig aufgrund anderer Priorisierungen,
- mittelfristig aufgrund schwieriger Rahmenbedingungen oder finanzieller Hürden oder
- langfristig aufgrund besonderer Umstände wie Naturschutzgebieten oder besonders sensiblen Streckenabschnitten

nicht immer umsetzbar sein. In solchen Fällen sind Übergangs- oder Sonderlösungen durchaus sinnvoll, was im Kapitel „Alternative Antriebe“ näher erläutert wird.

In der öffentlichen Diskussion rund um die Elektrifizierung von Verkehrsinfrastrukturen wird das Thema häufig „kaputt diskutiert“. Dies geschieht besonders dann, wenn viele unterschiedliche Stakeholder beteiligt sind, was per se die Zahl der Bedenken trägt erhöht und die Diskussion in viele Richtungen verzerrt. In diesem Zusammenhang wollen wir den Fokus auf die wesentlichen Punkte richten, alle relevanten

Parameter angemessen berücksichtigen und damit eine Versachlichung erreichen ohne uns in den Details einzelner Einzelfälle oder Übergangslösungen zu verlieren. Stattdessen soll der Blick auf die großen, strukturellen Herausforderungen gerichtet bleiben.

Es ist leider festzustellen, dass der Fortschritt bei der Elektrifizierung von Verkehrswegen weit hinter den ursprünglichen Erwartungen zurückbleibt. Die Ursachen hierfür sind vielfältig und müssen kritisch hinterfragt werden. Woran scheitert die zügige Elektrifizierung?

- Fehlt es am echten politischen Willen? Wer hat den Nutzen und wer trägt die Lasten der Elektrifizierung?
- Sind die politischen Rahmenbedingungen für eine Umsetzung innerhalb einer Legislaturperiode gegeben?
- Steht einer zügigen Umsetzung die unsichere oder mangelnde Finanzierung im Wege?
- Werden ineffiziente Prozesse oder administrative Hürden als Hemmnis wahrgenommen? Sind die zulassungs- und planrechtlichen Verfahren für reine Elektrifizierungen überzogen?
- Werden falsche Prioritäten gesetzt oder sind Zuständigkeiten unklar?
- Spielt die Komplexität von sekundären Anforderungen (wie etwa Akustikvorgaben oder Bahnhofsfüberführungen) eine Rolle?
- Ist der Fortschritt durch zu lange Realisierungs- und Amortisationszeiten in einer schnelllebigen Zeit blockiert?

In den meisten Fällen ist die Streckenelektrifizierung eine Frage des Gemeinwohls und muss langfristig betrachtet werden. Die Investitionen, welche zu Beginn erforderlich sind, erscheinen hoch, doch die langfristigen Vorteile sind unbestritten: eine kontinuierliche, effiziente Energiezufuhr bei niedrigen laufenden Kosten. Leider wird dieser langfristige Nutzen oftmals nicht ausreichend betont, während kurzfristige Lösungen, die mit geringerem Initialaufwand realisiert werden können, unverhältnismäßig hervorgehoben werden. Dies führt dazu, dass die „fahrdrahtlosen“ Lösungen oft in einem positiveren Licht erscheinen als die langfristig stabileren und nachhaltigeren elektrischen Infrastrukturen.

Ein weiteres Hindernis für eine umfassende und optimal vernetzte Elektrifizierung stellt die häufige Beschränkung auf lokale Zuständigkeiten dar. Wenn keine überregionalen Schulterschlüsse hinsichtlich der Prioritäten und Finanzierung stattfinden, entsteht zwangsläufig ein Ergebnis, das mehr auf lokale Lösungen fokussiert ist als auf eine gesamtheitliche Betrachtung der Infrastruktur.

Die Errichtung einer optimalen Infrastruktur für die Elektrifizierung erfordert einen Ansatz, der nicht nur auf lokale Bedürfnisse eingeht, sondern auch eine überregionale Vernetzung und Koordination anstrebt. Verschiedene Stakeholder haben jeweils unterschiedliche Interessen und Vorstellungen von Nutzen und Lasten der Elektrifizierung. Die Einflussnahme dieser Interessen muss transparent und ausgewogen erfolgen, um eine gerechte und effiziente Lösung zu finden.

Die folgenden Verkehrsarten sollen in diesem Leitfaden betrachtet werden:

1. Personen- und Güterfernverkehr
2. Regionalverkehr/Schienenpersonennahverkehr (SPNV)
3. Güterverkehr (Last Mile)
4. U-Bahn/S-Bahn
5. Straßen-/Stadtbahn
6. Trolleybus
7. Oberleitungs-LKW/eHighway

Der besseren Vergleichbarkeit halber und um dem eigenen Anspruch auf eine generische, vollständige Untersuchung gerecht zu werden, wurden auch Trolleybusse sowie Oberleitungs-LKW in die Betrachtung mit einbezogen. Die Unterscheidung in Verkehrsarten ist bei der Betrachtung erforderlich, weil die Einflussgrößen, Stakeholder-Belange und Nutzwerte, sowie Zuständigkeiten und Betroffenheiten nicht einheitlich sind.

3. Methodik

Für diejenigen Leserinnen und Leser, welche mit einer konkreten „Elektrifizierungsaufgabe“ befasst sind und Argumente für eine nachhaltige und effiziente Umsetzung suchen, anstelle sich mit einem suboptimalen Kompromiss zufrieden geben zu müssen, seien die nachfolgenden Kapitel als beispielhafter Leitfaden gedacht, um das eigene Projekt zielgerichtet vorantreiben zu können. Gewisse Randbedingungen und Einschätzungen werden sich von den Beispielfällen (ggfs. deutlich) unterscheiden. Es obliegt dem Anwender, diese Anpassungen vorzunehmen und so eine maßgeschneiderte Kalibrierung des im folgenden vorgestellten Bewertungswerkzeugs zu erhalten.

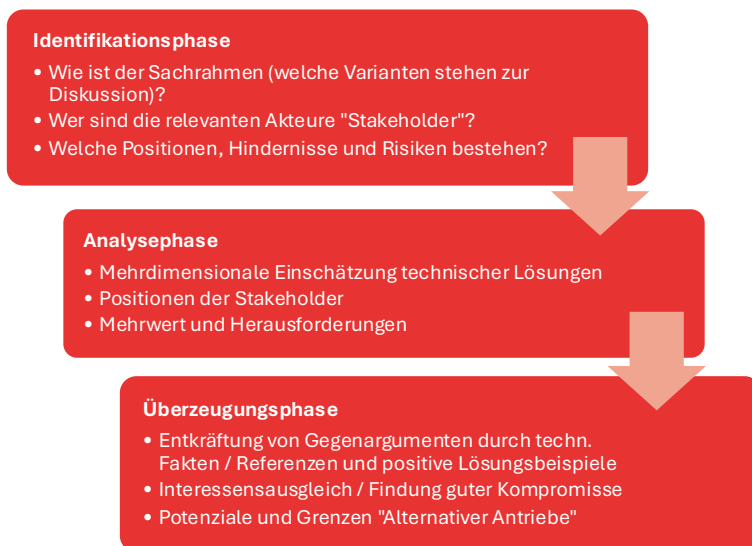


Abbildung 2: Phasen der Bewertungsmethodik

Die Autoren sind jedoch der Überzeugung, dass diese Fälle hinreichend typisch sind, um sowohl als Ab-sprungbasis für den Einzelfall als auch für verkehrspolitische Weichenstellungen im Allgemeinen zu dienen.

Im ersten Schritt „Identifikationsphase“ werden zunächst die in Frage kommenden Verkehrsarten benannt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich deren Elektrifizierungsobjekte deutlich unterscheiden können.

Den Verkehrsarten werden die Anspruchsgruppen „Stakeholder“ gegenübergestellt, und zwar getrennt nach ihrer prinzipiellen Haltung zur Elektrifizierung und nicht nach ihrer exakten Rolle oder ihrer organisatorischen Zuordnung (weil die Zuständigkeiten und Betroffenheiten in den Betriebsordnungen, in den Aufgabenträgern, usw. je Verkehrsart sehr unterschiedlich sind).

Es gibt bei den Stakeholdern typische Treiber, Befürworter, Neutrale und Gegner. In der Praxis häufig beobachtete Gründe für diese Haltungen werden formuliert und zusammengefasst. Dabei ist zu beachten, dass die Darstellung der Stakeholder und der typischen Argumente einzelner Lösungen keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Es werden beispielhafte Fälle dargestellt, die nicht jeden Einzelfall und deren Randbedingungen erfassen können, aber hinreichend typisch sind.

Im Hauptteil „Analysephase“ wird mit der Nutzwertanalyse eine Methodik vorgeschlagen, die es erlaubt, sehr unterschiedliche Kriterien miteinander vergleichbar zu machen ohne in allen Bereichen tiefes Detailwissen oder spezifische Detaildaten verfügbar haben zu müssen. So können die Ausführungsvarianten mit einem einfachen Verfahren einander gegenübergestellt werden und je nach Verkehrsart qualitativ, aber auch hinreichend quantitativ bewertet und gewichtet werden.

Im Gegensatz zu der sonst (als Basis für den Nachweis der Förderfähigkeit) etablierten standardisierten Bewertung ist eine sehr detaillierte Bewertung für eine grundsätzliche Einschätzung auch nicht erforderlich. Diese Art der Bewertung erfordert bereits initial viele Details, von denen manche bereits sehr klar zu quantifizieren sind. Andererseits gelingt es bei dieser Bewertungsart nicht immer, alle relevanten Kriterien auch adäquat auszudrücken und angemessen zu berücksichtigen.

Die Nutzwertanalyse unseres Leitfadens zeichnet sich durch ihre Nachvollziehbarkeit und die zügige Anwendbarkeit aus. Die Wirkung verschiedener Parameter auf die Tendenz des Gesamtergebnisses ist durch die Gegenüberstellung von Nutzwertanalysen verschiedener Varianten auch mit begrenztem Fachwissen leicht nachzuvollziehen. Gerade für einen ersten Variantenvergleich besitzt die vorgestellte Nutzwertanalyse eindeutige Vorteile gegenüber den etablierten und aufgrund der Detailtiefe sehr unübersichtlichen Verfahren.

Schließlich sind für die „Überzeugungsphase“ vielfältige, praxisorientierte Beispiele enthalten, die im Ergebnis zeigen, an welchen Stellen ein Interessensausgleich herbeigeführt bzw. moderiert werden müsste, um nicht auf die „zweitbeste“ Lösung zurückzufallen. Damit werden den Akteuren Handlungsempfehlungen gegeben, mit welchen Fakten, technischen Lösungen oder Referenzen potenzielle Gegenargumente entkräftet werden können.

4. Stakeholderanalyse

Die folgende Matrix von Verkehrsarten vs. Anspruchsgruppen zeigt stichwortartig die typischen Beziehungen und Interessen der Stakeholder auf und teilt diese in positive, neutrale und negative Grundhaltungen ein. Die bewusst kurz gefassten Beschreibungen erlauben eine erste Annäherung an die Thematik. Sie konzentrieren sich auf die dominierenden Aspekte, welche den jeweiligen Stakeholdern am wichtigsten sind.

Besteller/AGT (inkl. Finanzierung ¹)	Halter/ Betreiber/Fahrzeug-Instandhalter	EIU
Verkehrsart: Fernverkehr; Elektrifizierung		
In Europa: Budget muss durch den Staat zur Verfügung gestellt werden	Elektrifizierung verspricht flexiblere Fzg mit günstigen LCC Möglichkeiten auch Ausweichstrecken mit vorhandenem Fuhrpark zu fahren	Problem der Anlagenmehrung bei annähernd gleichbleibendem Personalstamm
Verkehrsart: Regionalverkehr; Elektrifizierung		
Elektrifizierung kann verkehrlich wichtig sein, aber dauert zu lange. Budgets sind nicht langfristig orientiert Wirtschaftlichkeit (nur wenn der Bund die FL bezahlt) Fahrzeuge mit lokal emissionsfreien Antrieben versprechen Image und werden von den Herstellern beworben	Elektrifizierung verspricht flexiblere Fzg mit günstigen LCC (einheitlicher, standardisiert, ohne spez. Infrastruktur). Jegliche Fahrzeuge mit «mitgeführter» Energie unterliegen Umlaufrestriktionen (Tanken, Laden, etc.)	Bundesweit operierendes EIU hat keinen wirtschaftlichen Vorteil und meist wenig Interesse an regionalen Kleinprojekten; Bei Regionalen EIU kann das durchaus anders sein
Verkehrsart: Güterverkehr (Last Mile); Elektrifizierung		
Günstigere Logistikkosten durch günstigere Durchführung des Betriebes bei Bedienung, ggf. Verzicht auf eigene Rangiergeräte/-lok und Personale möglich Kurze Return-of-Invest-Zeiten	Elektrifizierung verspricht günstigere Produktion durch Verzicht auf zusätzliche oder aufwändigere Lokomotiven für „letzte Meile“ bzw. Fahrt auf gesamtem Zuglauf mit V-Traktion, bzw. Verzicht auf Dual-Mode-Lok	Mühsam, hohe Kosten jedoch bei EIU = anschließendes Unternehmen günstigere Produktionskosten ggf. als Gesamtvorteil Anschlussbedingungen bei DB Netz erfordern viel Planungsvorlauf und „langen Atem“ Elektrifizierung häufig komplex/ nicht möglich aufgrund Verladeanlagen
Verkehrsart: U-Bahn/S-Bahn; Elektrifizierung		
Elektrifizierung verspricht höchste Wirtschaftlichkeit	Elektrifizierung verspricht leistungsfähige Fahrzeuge; bestmögliche „Vermaschung“ des elektrischen Netzes für kontinuierlichen Energieaustausch	Elektrifizierung mit Oberleitung und Stromschiene ist bekannt Hohe Betriebsleistung dieser Verkehrsart ist ohne Elektrifizierung (langfristig) nicht denkbar
Verkehrsart: Straßen/Stadtbahn²; Elektrifizierung		
Elektrifizierung verspricht höchste Wirtschaftlichkeit	Elektrifizierung verspricht einheitliche Fahrzeuge	Elektrifizierung ist bekannt
Verkehrsart: Trolley (+Batterie); Elektrifizierung		
Elektrifizierung verspricht auf Netzen mit stark ausgeprägten Hauptachsen bzw. schwierigen Topografien	(Teil-) Elektrifizierung verspricht größere Unabhängigkeit von Speichermedien (zumindest geringere Speicherkapazität oder längere Lebensdauer), bestmögliche „Vermaschung“ für kontinuierlichen Energieaustausch	Mitnutzung von UW, die ggf. bereits für Straßen-Stadtbahnen vorhanden sind; Nutzung der FL für kontinuierliche Ladung von Batterie-elektrischen Bussen Know-How-Erhalt schwierig, grundsätzlich geringes Know-How beim Betreiber
Verkehrsart: Oberleitungs-LKW; Elektrifizierung		
Elektrifizierung verspricht auf Netzen mit stark ausgeprägten Hauptachsen bzw. schwierigen Topografien höchste Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit (typ. Anwendung eHighway; Mining mit Punkt-zu-Punkt-Verkehr)	Elektrifizierung verspricht geringere erforderliche Speicherkapazitäten auf Fahrzeugen; Nur marginale Einflüsse auf logistische Prozesse - der Fahrweg wird zum Ladeweg.	Business-Case für kontinuierliche Energiebereitstellung; Mittelspannungsleitung entlang von Hochleistungstrassen

1 Hier müssen die Anwender prüfen, ob im konkreten Fall der Besteller vom Finanzierer getrennt werden muss. Die Kategorie Finanzierung kann sich von Bund über Länder bis zur Kommunalpolitik erstrecken.

2 Tram-Trains sind wohl zunächst als Hybrid von Stadtbahn und Regio zu betrachten

3 Besonderheit innerstädtische Netzergänzung: Vorteil der elektrischen Netzbildung, Problematik von Teilfahrzeugflotten aufgrund von Fahrleitungslücken
Weitere Besonderheit: Elektrifizierung beeinflusst im Diskurs der Stakeholder häufig die Entscheidung pro/contra neuer Stadtbahnlinien!

Farbcodierung:

- Überschrift/Anspruchsgruppe
- Positive Grundhaltung

- Neutrale Position
- Ablehnende Grundhaltung

Anlieger (ggfs. Lokalpolitik)	Stadtarchitekten Umweltschutz Andere Dritte	Errichter (Planer bis Monteur)
erungsumfang/-objekt: Magistralen		
Halten FL für überflüssig „nicht mehr nötig“. Sorge vor mehr Lärm durch zusätzlichen (auch Güter-) Verkehr		
umfang/-objekt: Lückenschlüsse, Stichstrecken		
Halten FL für überflüssig „nicht mehr nötig“. Sorge vor mehr Lärm durch zusätzlichen (auch Güter-) Verkehr	Freischnitt, Vogelschutz, ...	Mutmaßlich Kapazitätsproblem bei vielen, aber kleinen Projekten, schwieriger Markteintritt für Newcomer (Oligopol)
Durchbindung von Verkehr „Verkaufsargument“	Langfristige Aufwertung der Bahnanbindung (lokale Verbände: Tourismus, Industrie etc.)	Andererseits wäre dies auch eine Chance für „Newcomer“
ifizierungsumfang/-objekt: Anschlussbahnen		
Untergeordnet, da meist Industriegebiet	Freischnitt, beschränkte Möglichkeit der Stützpunkt-Anordnung (Logistikflächen, Verladeanlagen, Arbeitssicherheit, ...)	Mutmaßlich Kapazitätsproblem bei vielen, aber kleinen Projekten mit Sonderlösungen
bei längeren Anschlussbahnen Hoffnung: leiserer Verkehr		
Sorge: mehr Lärm durch ggf. zusätzlichen Güterverkehr		
zierungsumfang/-objekt: Linien/Netze		
Unabhängigkeit von Speichermedien; „Green Mobility“ sofort sichtbar. Premium-ÖPNV-Achse sofort sichtbar. Marken-/Symbolwert „U“ und „S“	i.d.R. keine, oder geringe, da unabhängig geführte Verkehrsachsen; Denn es liegt in der Diskussion nicht an der FL, sondern an der Trasse	Normales, eingespieltes Business; Für die Planer sind diese Projekte interessant, da häufig größere Volumen
ngsumfang/-objekt: Neue Linien(abschnitte)³		
Ggf. begründete oder unbegründete Bedenken (EMV, Masten); Ästhetik	Ästhetik, Feuerwehr, Sonderveranstaltungen	Normales, eingespieltes Business
umfang/-objekt: Innerstädtische Verkehrsachsen		
Unabhängigkeit von Speichermedien; „Green Mobility“ sofort sichtbar. Premium-ÖPNV-Achse sofort sichtbar	Ästhetik, Feuerwehr, Sonderveranstaltungen; Bauartbedingt als optisch massiv empfundene FL-Kreuzungen	Inzwischen besonderes Business aufgrund 2-poliger Fahrleitung und IT; Inzwischen Nischentechnologie, wenig Anreize zur Fortentwicklung
Ggfs. begründete oder unbegründete Bedenken (EMV, Masten); Ästhetik		
ierungsumfang/-objekt: Autobahnen o.ä.		
Geringere Speichermedien notwendig; „Green Mobility“ sofort sichtbar. Premium-Achse sofort sichtbar	i.d.R. keine, da unabhängig geführte, oder ohnehin stark belastete Verkehrsachsen (Highways); ggf. Bedenken bzgl. Beeinflussung der Avifauna	Inzwischen besonderes Business aufgrund 2-poliger Fahrleitung und IT
Ggf. begründete oder unbegründete Bedenken (EMV, Masten)		
Lärmthematik aufgrund der höheren Geschwindigkeiten von Rad-Straße-Kontakt dominiert		

4.1 Fernverkehr (Güter/Personenverkehr)

Fernverkehr als Verbindung zwischen Agglomerationen, Metropolen und Häfen wird heute zum überwiegenden Teil als elektrifizierter Verkehr oder beim Personenverkehr abschnittsweise als Hochgeschwindigkeitsverkehr erbracht. Fernverkehre für Güter und Personen nutzen in vielen Bereichen ein- und dieselbe Infrastruktur und stehen dort in Konkurrenz um deren Kapazitäten. Statistisch gesehen werden jedoch hier auch die Hauptlasten der Verkehrsleitung erbracht. Verschiedene Spannungssysteme in Europa sind kein Hemmnis mehr für durchgehenden europäischen Schienenverkehr.



Abbildung 3: RABe 503 der SBB als EuroCity-Express – Foto: Wald-Burger8; lizenziert unter CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=102559883>

Die Rationalisierung des Bahnbetriebs hat dazu geführt, dass Einzelwagenkonzepte immer mehr zurückgedrängt wurden. Rangieraufwände sind im Bahnbetrieb eben enorme Kostentreiber. Im Güterverkehr zählt häufig „Masse“ und Verlässlichkeit. Betrachtet man die Feinverteilung der Güter, dann kann man hier durchaus Parallelen zum Personen-FV ziehen. Güteranschlüsse werden seit Jahren mit Förderprogrammen unterstützt, dennoch nimmt die Zahl der Verladestellen stetig ab. Der Güterfernverkehr kann Treiber für die Elektrifizierung sein, wenn es um die Anbindung großer Güterverkehrs-Anschlüsse geht oder wenn es darum geht, die oben erwähnte konkurrierende Situation mit dem Personenverkehr im Bestandsnetz zu entzerren.

Fernverkehr im Reiseverkehr definiert sich über Sitzplatzzahl, Komfort und Reisegeschwindigkeit. Geschäftsreisende, Fernpendler und touristisch Fernreisende sind hier die Hauptnutzer und zum großen Teil „Umsteige-Reisende“ aus anderen Verkehrsträgern. Es wurden für die Hauptmagistralen in Form von Hochgeschwindigkeitsstrecken abschnittsweise eigene spezielle Infrastrukturen geschaffen.

Beim Personenfernverkehr bedarf hier der touristische Fernverkehr der näheren Betrachtung, denn dieser nutzt überproportional die nicht elektrifizierten Strecken. Einerseits sind hier – auf Grund des mitgeführten Gepäcks – umsteigefreie Verbindungen der Wunsch vieler Reisenden und es ist eine starke saisonale Prägung zu nennen. Andererseits liegen zahlreiche touristische Hotspots abseits der Metropolen und oft auch fern der Magistralen, weswegen hier häufiger keine Elektrifizierung vorzufinden ist. Ein Kurswagen-Konzept unabhängig von der Traktionsart ist im Triebzug-Zeitalter nicht mehr so einfach umsetzbar und der erforderliche Rangieraufwand ist schlichtweg als bedeutender Kostentreiber zu nennen. Denn eine zusätzliche Besonderheit des Fernverkehrs in Deutschland ist die Sonderstellung als eigenwirtschaftlich zu erbringende Verkehrsdienstleistung. Dies hat auch dazu geführt, dass Fernverkehrsangebote in der Fläche auf einigen Strecken nur durch entsprechende Förderung erhalten geblieben sind – hier entsteht die o.g. Parallele zum Güterverkehr beim Aspekt der Feinverteilung. Der Fernverkehr wird also neu elektrifizierte Strecken im ergänzenden Netz nur dann nutzen, falls sich die Angebote dort lohnen.

Aufgrund der hohen Netzbelastung der Korridore mit Mischverkehr (Güter/Personen) gewinnt die Betrachtung von Umleitungsstrecken insbesondere im Güterverkehr immer größere Bedeutung. Die länger andauernden großen Behinderungen des europäischen Güterverkehrs im Zuge der Sperrung der Rheintalstrecke nach dem Tunnelleinsturz bei Rastatt haben dies eindrücklich deutlich gemacht. So existieren zu stark befahrenen Güterverkehrskorridoren nur wenige Umleitungsmöglichkeiten und wenn diese vorhanden sind, dann nicht immer mit der notwendigen elektrischen Energieversorgung oder erforderlichen Fahrwegkapazität. Ein Ausbau dieser (Umleitungs-)Abschnitte inklusive Elektrifizierung kann einen wichtigen Beitrag zur

Erhöhung von Kapazität und Resilienz im Güterverkehr leisten. Neue Strecken sind allerdings sowohl im Personenfern- wie im Güterverkehr mit hohen Hürden bei der Realisierung in Bezug auf Finanzierung, Regulatorik sowie technische Herausforderungen versehen. Diese wiegen umso schwerer, je länger die zu errichtende Strecke ist.

4.2 Regionalverkehr



Abbildung 4: Regionalverkehr auf der Schönbuchbahn – Foto: Zonk43; lizenziert unter CC-BY-4.0; https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/Schoenbuchbahn14122019_2.png

Im Regionalverkehr ist typischerweise die Elektrifizierung von Stichstrecken oder ein Lückenschluss zwischen bereits elektrifizierten Teilnetzen Gegenstand der Diskussion. Eine führende Rolle nehmen die lokalen Aufgabenträger ein, welche die Verkehre bestellen und dabei aus betrieblichen wie auch gesellschaftlich-politischen Gründen zunehmend auf einen elektrischen Fahrtrieb setzen, weil dieser sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile verspricht. Auch wenn die Streckenelektrifizierung verkehrlich sinnvoll wäre, steht die langfristige Perspektive solcher Projekte im Widerspruch zur vergleichbar kurzen der Dauer der Verkehrsverträge für die zu erbringenden Verkehre. Finanzierung und Umsetzung einer solchen Elektrifizierung sind eben langfristige Vorhaben und bergen zusätzliche terminliche Risiken. Deshalb werden neuartige Regionaltriebzüge mit lokal emissionsfreiem Antrieb (Batterie, Brennstoffzelle, ...) als mindestens gleichwertige Alternative betrachtet und von den Herstellern auch entsprechend beworben.

Die Betreiber (Eisenbahnverkehrsunternehmen, Aufgabenträger), wie auch die Halter und Instandhalter, würden jedoch vielfach rein durch Fahrleitung versorgte elektrische Fahrzeuge bevorzugen, weil sie ohne Sondermaßnahmen (z.B. Ladestationen oder Traktionsbatteriehandlung) auskommen und über ihre gesamte Lebensdauer hinweg flexibler einsetzbar sind. Sie sind einfacher aufgebaut, leichter, in hohem Maße standardisiert und bieten somit die günstigsten Lebenszykluskosten im Markt.

Ein bundesweit operierendes Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) zieht hingegen keinen oder nur sehr geringen wirtschaftlichen Vorteil aus solchen Elektrifizierungen, weil die Verkehrsleistung dadurch nicht signifikant steigt und das EIU hat meist wenig Interesse an regionalen Kleinprojekten.

Bei Anwohnern und Lokalpolitikern ist zunehmend zu beobachten, dass sie aufgrund der „Alternativen Antriebe“ eine Fahrleitung für unnötig oder sogar überflüssig halten. Hinzu kommt die latente Sorge vor mehr Verkehrslärm durch zusätzlichen Verkehr – womöglich sogar Durchgangsgüterverkehr, welcher die nicht elektrifizierten Abschnitte bislang vermeiden musste. Ein Pluspunkt ist allerdings die langfristige Aufwertung der Bahnanbindung, die von lokalen Verbänden (Industrie wie Tourismus) positiv gesehen wird. Dem stehen gegebenenfalls lokale Umweltbedenken entgegen, weil Fahrleitungsanlagen mehr Baufreiheit erfordern und eine Gefahr für Vögel darstellen könnten.

Vor dem Hintergrund der voranstehend beschriebenen Situation sind Elektrifizierungsvorhaben im Regionalverkehr schwieriger geworden und nur mit konzertanter Überwindung der hohen Hürden umzusetzen. Als

Kompromiss setzen sich aktuell Fahrleitungsinselnetze durch, welche beim Einsatz von hybriden BEMU-Fahrzeugen einen Mischbetriebe mit und ohne Fahrleitung zulassen und eine Nachladung (oder sogar bei längeren Abschnitten ein „In-Motion-Charging“) an betrieblich günstigen Stellen ermöglichen.

4.3 Güterverkehr (Last Mile)

Bei **Elektrifizierungsbestrebungen der sogenannten „letzten Meile“** geht es vor allem um den Verzicht auf zusätzliche Rangiergeräte und -lokomotiven mit Dieselantrieb für die letzten Kilometer des Fahrweges eines Güterzuges, welcher auf seinem bisherigen Fahrweg durchgehend elektrisch gezogen werden konnte. Häufig findet diese letzte Meile auf der Infrastruktur von sogenannten Anschlussbahnen statt, die teilweise auch im Eigentum der ans Gleisnetz angeschlossenen Firmen sind. Auch viele Häfen und Containerterminals fallen in diese Kategorie.

Die Elektrifizierung solcher kurzer Gleisabschnitte ist insbesondere dann relevant, wenn im Gleisanschluss selbst gar nicht oder nur sehr wenig rangiert werden muss, sondern es lediglich um das Zustellen des Zuges direkt an eine Ladeanlage (beispielsweise Rampe, befestigte Zufahrt) oder ein Containerterminal (ohne Krananlagen im FL-Bereich) geht. Hier sind eigene Rangierloks häufig unwirtschaftlich, weil sie wenig eingesetzt werden, aber dennoch vorgehalten werden müssen. Bei manchen Zugläufen führt die fehlende Oberleitung auf der letzten Meile mangels geeigneter Alternativen sogar zu einem Einsatz von Dieseltraktion auf dem gesamten Fahrtweg des Zuges.

Die Elektrifizierung dieser Anschlussgleise bzw. Anschlussbahnen oder auch von kurzen Streckenabschnitten (Anm.: Bahnstrecken im regulären Mischbetrieb Personen- / Güterverkehr), welche von einer elektrifizierten Strecke abzweigen, verspricht für den **Verlader und Anschließer** demzufolge günstigere Logistikkosten. Dies ergibt sich aus dem möglichen Verzicht auf eigene Rangiergeräte/-loks und dem Entfall entsprechend qualifizierten, eigenen Betriebspersonals. Eine Hürde dabei ist, dass Verlader und Anschließer (als privatwirtschaftlich agierende Unternehmen) branchentypisch kurze Return-of-Invest-Zeiten erwarten. Dem entgegen steht der Return-of-Invest einer Elektrifizierung mit 30 bis 50 Jahren, ggf. hohen Einmalinvestitionen und für diesen Wirtschaftszweig ungünstig langen Amortisationszeiten.

Für das **bedienende Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU)** verspricht der Entfall von zusätzlichen Lokomotiven oder sogar der Ersatz der Dieseltraktion durch eine vollelektrische Traktion auf dem gesamten Laufweg hohe wirtschaftliche Vorteile.

Für das **Eisenbahn-Infrastrukturunternehmen (EIU)**, welches häufig nicht der Anschließer (Güterkunde) selbst ist, birgt eine Elektrifizierung viele Mühen, da ein Anschluss an die vorhandene Bahninfrastruktur (z.B. bei der DB InfraGO) und die damit verknüpften Randbedingungen viel Planungsvorlauf und häufig einen sehr „langen Atem“ erfordern. Die entstehenden ggf. hohen Kosten lassen sich wirtschaftlich nur dann vertreten, wenn daraus eine höhere Nutzungshäufigkeit der Infrastruktur entsteht und somit mehr Einnahmen generiert werden können. Dies ist auch in Förderrahmenbedingungen meist eine Grundvoraussetzung für eine Förderfähigkeit der Erstinvestition. Ein Sonderfall entsteht dann, wenn das EIU selbst das anschließende Unternehmen ist, da aus Gesamtunternehmenssicht dann ggf. günstigere Produktionskosten der Logistik als Gesamtunternehmensvorteil wirken und die Elektrifizierungskosten auf lange Sicht erwirtschaften.

Technisch bzw. betrieblich kann so eine Elektrifizierung komplex oder sogar überhaupt nicht möglich sein. Ein Beispiel sind vorhandene Verladeanlagen, die eine Beladung „von oben“ erfordern oder es gibt keine Möglichkeit zur Errichtung der notwendigen Fahrleitungsmaste, da diese die Logistikflächen und den Warenumschatz einschränken würden. Container-Terminals oder Holzverladeanlagen, in denen der Ladebereich zwar keine Oberleitung hat, aber die Standflächen der Lokomotiven am Rand der Verladefläche positioniert und damit elektrifiziert sind, könnten dafür jedoch gute Gegenbeispiele sein bzw. Anregungen für eine Lösung bieten. Auch für die Betreiber größerer Industrieverbund- und Hafenbetriebe ist die Elektrifizierung – zumindest für die Übergabegleise am Beginn der Anschlussbahn – interessant, sodass die Hauptzugläufe jederzeit elektrisch betrieben werden können und der Hafen somit wirtschaftlicher angebunden werden kann.



Abbildung 5: MegaHub Lehrte – Foto : mit freundlicher Genehmigung: DB AG, Volker Emersleben

Für **Anlieger bzw. die Lokalpolitik** spielen Anschlussbahnen eine eher untergeordnete Rolle, da sie meist in Industriegebieten liegen. Bei längeren Anschlussbahnen besteht die Hoffnung auf leiseren Verkehr beispielsweise in Wohngebieten, gleichzeitig jedoch auch die latente Sorge vor ggf. zusätzlichem Güterverkehr, verbunden mit den daraus entstehenden Geräuschemissionen.

Für die **Gestalter** entsprechender Anlagen bieten sich vor allem Hürden im Bereich der Logistik- und Verladeflächen, da eine passende Mastanordnung hier Herausforderungen bieten kann. Aus **Umweltschutzaspekten** sind der konsequente notwendige Grünschnitt entlang der Trasse (Äste und Bäume im Bereich der Oberleitung) und auch die notwendigen Eingriffe bei der Fahrleitungserrichtung zu bewerten.

Für die **Errichter** (Planungsunternehmen und ausführende Gewerke) würde sich durch die konsequentere Elektrifizierung von Anschlussgleisen vor allem ein Kapazitätsproblem ergeben, da hier viele kleine Projekte mit verhältnismäßig vielen Sonderlösungen (Oberleitung über Logistikflächen, spezielle Fahrleitungsstrukturen etc.) mehr personelle und technische Ressourcen binden.

4.4 U- und S-Bahnen



Abbildung 6: Effiziente Stadtschnellbahnen verkehren auch mit Gleichstrom, aber stets durchgehend an der Fahrstromversorgung (U- und S-Bahn Hamburg) – Foto: Gerhard Schneider

Mit der Eröffnung der ersten elektrischen U-Bahn in Budapest Ende des 19. Jahrhunderts trat dieses Verkehrsmittel einen Siegeszug auf dem europäischen Kontinent und auch in Metropolen auf der ganzen Welt an. Von Beginn an war die U-Bahn das Synonym für unabhängige Führung des Fahrweges, große Zuglängen und sehr große Beförderungsleistungen. Aufgrund der Unabhängigkeit vom übrigen Verkehr und den hohen Anforderungen an eine kontinuierliche Leistungsbereitstellung werden U-Bahnen in der Regel über eine 3. Schiene – die Stromschiene – mit 750 V DC versorgt. Vereinzelt haben sich auch Fahrleitungsanlagen (Oberleitung) mit 1500 V DC etabliert, welche wegen der größeren Tunnelquerschnitte und infolgedessen höherer Baukosten weniger häufig verbreitet sind.

Die jüngere „Schwester“ der U-Bahn ist die S-Bahn, welche im Stadt- und Vorortverkehr große Beförderungsleistungen auf Eisenbahninfrastrukturen wahrnimmt. Ähnlich wie bei der U-Bahn nutzen die ersten S-Bahn-Systeme eine Stromschiene mit Systemspannungen von 0,75...1,2 kV DC. Bei späteren Neuanlagen wurde die Fahrdratversorgung 15 kV AC der klassischen Eisenbahninfrastruktur (bzw. im Ausland entsprechend der nationalen Spannungssysteme) genutzt. Im Laufe der letzten Jahrzehnte sind auch um mittelgroße Städte herum S-Bahn-Netze entstanden, welche oftmals mit einer Umstellung von Diesel- auf Elektrotraktion verbunden waren. Teilweise entstanden diese aus klassischen Vorortverkehren, häufig unter besserer Vernetzung der einzelnen Linien sowie zusätzlichen Taktverdichtungen.

Aufgrund der hohen Traktionsleistungen als Massenverkehrsmittel und der unabhängigen Führung nicht unmittelbar durch architektonisch sensible Abschnitte wird eine Abkehr vom Fahrdrat bei U- und S-Bahnen wenig diskutiert. Bei Bahnen mit 3. Schiene erscheint ein Batteriespeicher für Fahrten im Depot ein geeignetes Mittel, um die Thematik der Arbeitssicherheit gegenüber Stromschienen, Hilfsstromkabeln und offenen Stromabnehmern weiter zu verbessern.

Allerdings unterliegen insbesondere neue U-Bahn-Projekte aufgrund der hohen Infrastrukturkosten sowie der Umweltauswirkungen des Infrastruktur- und Tunnelbaus größeren Diskussionen, wenn es um die Akzeptanz von Erweiterungsvorhaben geht.

4.5 Straßen- und Stadtbahnen



Abbildung 7: Straßenbahn Dresden – Foto: Tobias Bregulla

Die elektrische Straßenbahn hat sich seit über 130 Jahren im Stadtverkehr erfolgreich durchgesetzt und vermag es auf Hauptachsen, ihre technischen und wirtschaftlichen Vorteile deutlich auszuspielen. Oft müssen Straßenbahnsysteme aufgrund des begrenzten Platzes im Innenstadtraum mit dem MIV konkurrieren. Im Nachbarland Frankreich sind in den letzten drei Jahrzehnten sehr erfolgreich über 20 neue Straßenbahnbetriebe entstanden – so auch in der Hauptstadt Paris, wo die frühere Straßenbahn aufgrund anderer Planungsleitlinien zugunsten des Autoverkehrs bereits 1937 eingestellt worden war. Dieses „Revival“ kann als Beleg für die Eignung und Zukunftsfähigkeit des Systems als leistungsfähiges Verkehrssystem für Groß- und Mittelstädte gewertet werden.

Da klassische U-Bahnen nicht überall sinnvoll finanzierbar waren, hatte man in zahlreichen Fällen die Straßenbahn seit den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts zu sogenannten „Stadtbahnen“ weiterentwickelt. Hierbei werden neuralgische Abschnitte unabhängig vom übrigen Verkehr geführt und es sind „U-Bahn-ähnliche“ große Zuglängen möglich, um hohe Beförderungsleistungen erbringen zu können.

Dank der bei Straßenbahnen und Stadtbahnen klassischerweise vorhandenen Fahrleitungsanlagen ist eine kontinuierliche Leitungsbereitstellung auf hohem Niveau möglich und anerkannt. Allerdings zeigt sich hier bei der Neuanlage von Netzen und von „sensiblen“ Streckabschnitten die Tendenz, dass man aus „architektonischen“ oder EMV-Gründen in Einzelfällen auf die Fahrleitung verzichten möchte. Die prinzipielle Betriebstauglichkeit von fahrleitungslosen Systemen wurde inzwischen (z.B. in Frankreich) mit in der Straße verbauten Stromschienen oder von Fahrzeugen mit Batteriespeicher eingehend nachgewiesen, wenn auch bei spezifisch sehr hohen Gestehungs- und Betriebskosten. Teilabschnitte ohne Fahrleitung sind jedoch kritisch zu

sehen, denn sie bedeuten entweder hohe Aufwände bei der Infrastruktur für bodengebundene Energiezuführungssysteme oder sie führen bei den Fahrzeugen zu Mehraufwänden, indem in eine (Teil-)Serie ein entsprechend schwerer Energiespeicher (Ultracap und/oder Hochleistungsbatterie) zusätzlich installiert werden muss. Im Gegensatz zu den vorgenannten Verkehrsarten fokussiert sich die Diskussion um die Fahrleitung also nicht auf den „Lückenschluss“ zur Ergänzung von bestehenden Fahrleitungsabschnitten, sondern – umgekehrt – auf die Etablierung von „Fahrleitungslücken“ in einem ansonsten homogenen Fahrleitungsnetz.

4.6 Trolley- und Batterie-Fahrzeuge

Klassische Trolleybusse (auch „Oberleitungsbus“ oder kurz „Obus“ genannt), das heißt Omnibusse mit elektrischem Antrieb und kontinuierlicher Energiezuführung durch eine Fahrleitung waren in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts technisch so weit ausgereift, dass deren weltweite Verbreitung begann.

Auch wenn im Laufe der Zeit der Abstand zum mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Omnibus – was Wirtschaftlichkeit und technische Vorteile betrifft – im Laufe der Jahre beträchtlich gesunken ist, sind die Vorteile des Trolleybusses dennoch signifikant. Bei schwierigen Topographien und Netzstrukturen mit ausgeprägten Hauptachsen zeigen sich nach wie vor deutliche Vorteile dieses Verkehrssystems.



Abbildung 8: Obus in der Berner Fußgängerzone: emissionsfrei und mit guter Performance auf Steigungen unterwegs – Foto: U. v. Stockhausen

Bestehende Netze implementieren zunehmend auch Batterieoberleitungsbusse, um unter Beibehaltung der bestehenden Infrastruktur neue Linien(-teile) abseits des Fahrdrachts ergänzen zu können oder bestehende Linien auf elektrischen Betrieb umzustellen zu können. Auch können aufwendige Fahrleitungskreuzungsanlagen an Knotenpunkten vermieden werden, indem diese durch Nutzung des Speichers überbrückt werden. Im Rahmen der Elektromobilitätsoffensive und bei endlichen Ressourcen für die Produktion von Batteriespeichern hat der Trolleybus seine Berechtigung. Leider scheitern viele Projekte trotz gravierender Vorteile an der Neuanlage der Fahrleitungsanlagen. Letztere garantieren eine zuverlässige Energieversorgung der Fahrzeuge. In Verbindung mit einem kurzzeitigen fahrleitunglosen Betrieb aus Batteriespeichern oder Superkondensatoren lassen sich vielfältige Einsatzszenarien abbilden. Lärm- und Abgasemissionen sind im Vergleich zum Dieselmotor deutlich geringer. Eigene Verkehrswege sind nicht notwendig, können aber bei hohem Verkehrsaufkommen für eine Entflechtung vom Autoverkehr sorgen. Zusätzlich kann in Kombination mit einer vorhandenen Straßenbahn/Stadtbahn/U-Bahn eine gemeinsame Nutzung von Versorgungskomponenten wie beispielsweise Unterwerken möglich sein.

Erstrebenswert wäre die Errichtung weiterer Fahrleitungsanlagen bei Betrieben mit strukturierten Hauptachsen und schwieriger Geländegeographie, um die technischen und wirtschaftlichen Vorteile der Trolleybusstechnik im Rahmen der Elektromobilitätsoffensive adäquat auszunutzen und erforderliche Ressourcen für leistungsfähige On-Board-Speicher reduzieren zu können. Fahrleitungsanlagen ermöglichen ein „In-Motion-Charging“, das heißt die Nachladung bedeutet hier keinen Fahrzeugstillstand und erfordert infolgedessen

keine zusätzlichen Fahrzeugreserven (höherer Flottenwirkungsgrad). Ästhetische Bedenken aus der Sicht der Stadtarchitektur, sowie die vergleichsweise hohen Investitionskosten bei langfristiger Abschreibung verhindern trotz vernünftigen Argumenten allzu oft eine Realisierung von Projekten. Eine Abwandlung der Trolleybustechnik ist beim Schwerlastgütertransport zu finden, dies ist im folgenden Kapitel beschrieben.

4.7 Elektrischer LKW

Fahrleitungsgebundener, elektrischer Güterverkehr von Straßenfahrzeugen ist aktuell zwar eine Randerscheinung, aber Realisierungen zeigen die Potenziale, welche mit dieser Technik zu heben sind.

Wesentliche Anwendungen finden sich aktuell in Tagebauanwendungen und als Testbetrieb auf Autobahnen („eHighway“).

Tagebauanwendungen

Selbst in großen Tagebauen wird mitunter der LKW-Verkehr (trotz ausgeprägter Punkt-zu-Punkt-Verbindung auf eng definierten Trassen) gegenüber der Schiene bevorzugt, um eine örtliche Flexibilität bei wechselnden Abbauverhältnissen sicherzustellen. In dezidierten Fällen bieten die elektrische Traktion und Fahrleitungsanlagen deutliche wirtschaftliche und technische Vorteile, so zum Beispiel auf den sehr stark befahrenen Trassen der Tagebauauffahrten, die zudem eine hohe Traktionsleistung bedingen. Manche Anlagen sind wie die klassischen Fahrleitungsanlagen beim Trolleybus aufgebaut, in einigen neueren Anwendungen hatte man jedoch eine Stromabnahme durch Schleifleisten ohne Fahrdrahtführung realisiert und die Einhaltung der Spurführung administrativ geregelt.

Für die Betreiber derartiger Anlagen besteht der Vorteil weniger in der emissionsfreien Fahrt, als in der Möglichkeit, eine höhere Leistung bei Betrieb unter Fahrdraht bereitstellen zu können, Umlaufzeiten zu verkürzen sowie hohe Anfahrzugkräfte und einen geringeren Wartungsaufwand für den Dieselmotor (Dieselgenerator) erzielen zu können. Übliche Anwendungsfälle sind so aufgebaut, dass an der Abbaustelle das dieselektrische Fahrzeug zwar von einem Dieselgenerator über elektrische Motoren angetrieben wird, die eigentlich anspruchsvollere Fahrt im Konvoi aus dem Tagebau aber rein elektrisch unter Fahrdraht erfolgt. Die Fahrdrähte der zweipoligen Fahrleitung liegen mehrere Meter auseinander und werden von zwei unabhängigen Stromabnehmern bestrichen. Es sind Fahrdrahtspannungen bis zu 1800 V DC üblich (Robertson, 2015).



Abbildung 9: Mining Truck mit E-Antrieb und „Trolley Assist“ für den Weg aus der Tagebaugrube – Foto: CAT

eHighway⁴

Das Thema Oberleitungs-LKW mag im Hinblick auf die bislang aufgeworfenen Verkehrsarten etwas exotisch erscheinen, allerdings ist durch die Nutzung einer Oberleitungsinfrastruktur hier klar die Verknüpfung zum Hauptthema dieses Leitfadens gegeben. Mit Blick auf die angestrebten Klimaziele muss auch der schwere Straßengüterverkehr einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors leisten. Eine Möglichkeit für lokal emissionsfreien Straßengüterverkehr stellt das System eHighway dar. Bei diesem System wird schweren Oberleitungs-LKW über eine Gleichstrom-Oberleitung elektrische Energie zugeführt, die einerseits den elektrischen Antrieb der Fahrzeuge versorgt und andererseits einen fahrzeugseitigen Energiespeicher während der Fahrt lädt („In-Motion-Charging“). Die Idee ist, die bekanntermaßen hohe Effizienz und Leistungsfähigkeit von Fahrleitungsanlagen mit der Flexibilität des Straßengüterverkehrs zu kombinieren.

Die zweipolige Oberleitung wird beim e-Highway abschnittsweise über dem rechten Fahrstreifen der Autobahn errichtet und ist elektrisch vergleichbar mit derjenigen für Trolleybusse. Für eine sinnvolle Anwendung des Systems ist ein Oberleitungs-Kernnetz auf den stark belasteten Autobahnabschnitten zu errichten – verschiedene Studien schlagen für Deutschland den sukzessiven Aufbau eines Kernnetzes von bis zu 4.000 km vor. Von der einmal errichteten Infrastruktur können dann viele Fahrzeuge profitieren. Die Fahrzeuge werden entweder als rein batterieelektrische Fahrzeuge oder als dieselektrische Hybridfahrzeuge ausgeführt und darüber hinaus mit einem passiven Stromabnehmer ausgestattet. Der Stromabnehmer ermöglicht ein teilautomatisiertes An- und Abbügeln über dem gesamten Geschwindigkeitsbereich der Fahrzeuge. Mit dem Fahrzeugenergiespeicher können sowohl Überholvorgänge als auch Vor- und Nachlaufstrecken des eHighway elektrisch gefahren werden. (Werner, Schiebel, & Stephan, 2024)

Nach ersten Versuchsstrecken in den USA, Deutschland und Schweden wurde die Technologie in mehrjährigen Feldversuchen auf deutschen Autobahnen (Abschnitte der A1 und A5) umfangreich erprobt. Dabei wurden die Praxistauglichkeit des Gesamtsystems und eine hohe infrastrukturseitige Verfügbarkeit bereits nachgewiesen. (TUD, FuE-Zentrum FH Kiel, 2024) Im Rahmen dieser Erprobung konnten zudem Erfahrungen bei der Integration der Technologie in den Straßenraum, zur Energieversorgung und zu den logistischen Abläufen der Speditionen sowie beim Betrieb und der Instandhaltung der Anlage unter Realbedingungen gesammelt werden.

Aus Betreiber- und Systemsicht liegt eine der zentralen Herausforderungen bei der Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs in der Integration der Ladeinfrastruktur in die vorgelagerten Energienetze. Entlang stark befahrener Verkehrsachsen entsteht ein hoher zusätzlicher Leistungs- und Energiebedarf – und zwar in Bereichen und Regionen, in denen bisher nur wenig elektrische Energie benötigt wurde. Um die Energieversorgung der LKW entlang von Autobahnen sicherzustellen, müssen die Energienetzinfrastrukturen leistungsfähig und mit Blick auf lange Planungs- und Genehmigungsprozesse zeitnah ausgebaut werden – unabhängig von der konkreten Ladetechnologie. Dafür sind frühzeitig mit den Netzbetreibern abgestimmte Ladeinfrastruktur- und Netzausbaupläne notwendig. (Jöhrens, et al., 2024)



Abbildung 10 : eHighway-Probetrieb auf den Autobahnabschnitten der A1 – Foto: Markus Werner

⁴ Der Begriff eHighway steht hier stellvertretend für alle LKW-Systeme mit durchgezogener Fahrleitung.

Durch das Konzept der abschnittswisen kontinuierlichen Energieversorgung können beim eHighway Fahrzeugbatterien kleiner dimensioniert werden, was sich vorteilhaft auf die Fahrzeuganschaffungskosten sowie die Energie- und Umweltbilanz auswirkt. Zudem werden durch das Laden während der Fahrt bestehende logistische Prozesse nur marginal beeinflusst, sowie durch das Ladevorgänge bedingte Stillstandszeiten minimiert und der Flottenwirkungsgrad optimiert. Der zusätzliche Flächenbedarf für den Infrastrukturaufbau ist, im Gegensatz zum stationären Schnellladen, gering und somit unproblematisch. (Stephan & Werner, 2024) Viele Autobahnabschnitte liegen außerhalb bebauter Gebiete, Anwohner sind daher zumeist nur wenig betroffen. Studien aus den Feldversuchen zum Thema Vogelschutz zeigen, dass keine Beeinträchtigung der Avifauna durch die Oberleitung resultiert.

Für die Planer/ Errichter der Infrastruktur sind Regelwerke zu definieren. Zudem müsste bei flächendeckender Ausrüstung mit eHighway-Systemen ein entsprechender Rollout-Plan entwickelt werden, um Auslastungsspitzen bei den beteiligten Behörden und Unternehmen zu verhindern.

Als wohl größtes Hemmnis für einen Roll-Out der Technologie stellen sich vor allem die initialen Infrastrukturinvestitionen für den Oberleitungsaufbau und die dafür notwendigen politischen Richtungs- bzw. Pfadentscheidungen heraus. Trotzdem können sich wirtschaftliche Vorteile über den Lebenszyklus insbesondere hinsichtlich geringerer Fahrzeuganschaffungs- und Betriebskosten für die beteiligten Akteure ergeben.

5. Nutzwertanalyse

Die im Rahmen dieses Leitfadens entwickelte Nutzwertanalyse ist bewusst einfach gehalten. Sie kann und soll etablierte Verfahren wie die standardisierte Bewertung nicht ersetzen, sondern bei Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen einen Überblick über Stärken und Schwächen verschiedener Lösungen geben. Die Nutzwertanalyse erlaubt es als Methodik, sehr unterschiedliche Kriterien und Einflussfaktoren mit einem einfachen und transparenten Verfahren einer ausgewogenen Gesamtbewertung zu unterziehen bzw. miteinander vergleichbar zu machen. Hierbei müssen – anders als bei den üblichen Bewertungsverfahren – nicht in allen Bereichen tiefes Detailwissen oder spezifische Detaildaten verfügbar sein. Eine detaillierte Evaluation ist für eine grundsätzliche Einschätzung naturgemäß nicht erforderlich und kommt erst im Vorfeld der Beschlussfindung und zur Feststellung der Förderfähigkeit.

Die Nutzwertanalyse unseres Leitfadens liefert also zwar nicht die präziseste Lösung, ist aber sogar für den Erstnutzer sofort evident und schnell selbst anwendbar. Die Wirkung verschiedener Parameter auf die Tendenz des Gesamtergebnisses ist damit auch bei begrenztem Detailwissen leicht nachzuvollziehen. So können die Ausführungsvarianten einfach einander gegenübergestellt werden und je nach Verkehrsart qualitativ, aber auch hinreichend quantitativ bewertet werden. Die Wichtung kann der Anwender zudem auf die Belange seines Projektes anpassen, wenn er partiell oder global eine andere Sichtweise besitzt als diejenige, die in den Beispielprojekten zum Ausdruck kommt.

Um eine leicht zugängliche Bewertung zu ermöglichen, wurde eine Liste von 20 Indikatoren entwickelt, anhand derer eine erste Beurteilung erfolgen kann. Diese können mittels Tabellenkalkulation nach untenstehendem Muster bewertet werden. Sollte ein zu einem konkreten Fall gehörender Indikator hinzugefügt werden, lässt die Tabelle dies problemlos zu.

Die Tabelle basiert auf dem Vergleich von jeweils zwei Szenarien, von denen eines auch der Status quo sein kann. Eingetragen werden müssen für alle Indikatoren der Einflussgrößen und Rahmenbedingungen zwei Angaben, nämlich ein Wert (jeweils zwischen 1 und 3)

- für deren Relevanz und einer
- für die Bewertung, wie gut die Lösung für das Problem geeignet ist.

Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der vereinfachten Bewertungsmethodik keine Varianten im Detail miteinander verglichen werden können, was aber auch nicht beabsichtigt ist. Vielmehr ist das Schema für eine Gegenüberstellung grundsätzlicher Lösungsvarianten vorgesehen. Beispielsweise kann der Unterschied zwischen einer Vollelektrifizierung und einer Teilelektrifizierung eines SPNV-Netzes aufgrund der Einfachheit des zweidimensionalen Bewertungsraumes der Nutzwertanalyse sehr transparent gemacht werden.

Relevanzwert:

- 1: keine Relevanz
- 2: niedrige Relevanz
- 3: hohe Relevanz

Bewertung:

- 1: (sehr) negativ im Sinne des Indikators
- 2: neutral im Sinne des Indikators
- 3: (sehr) positiv im Sinne des Indikators

5 Die Tabellenvorlage kann auf der ETG-Webseite unter: www.vde.com/mut-zur-fahrleitung heruntergeladen werden

Der zweidimensionale Bewertungsraum führt zu Nutzwerten nach dem folgenden Muster (jeweils in Spalte B bzw. D der Excel-Tabellen):

Bewertung	Relevanz		
	1	2	3
1	0	-1	-2
2	0	0	0
3	0	1	2

Tabelle 1: Ergebniswerte der Nutzwertanalyse

Eine mittlere Bewertung bzw. eine niedrige Relevanz führen dabei zu einem Ergebnis von „0“ und damit im Endergebnis weder zu einer Stärke noch eine Schwäche der bewerteten Lösung im entsprechenden Indikator.

Ergebnis:

Zentrale Elemente der Auswertung sind die beiden Graphen, die die Verteilung der Nutzwerte für die beiden Lösungen über alle Indikatoren darstellen:

- Nutzwert < 0: Schwäche der jeweiligen Lösung
- Nutzwert = 0: neutraler Bereich bzw. niedrige Relevanz
- Nutzwert > 0: Stärke der jeweiligen Lösung, relevante Kriterien in hohem Maße erfüllt.

Verteilung Nutzwerte (Mit-Fall)

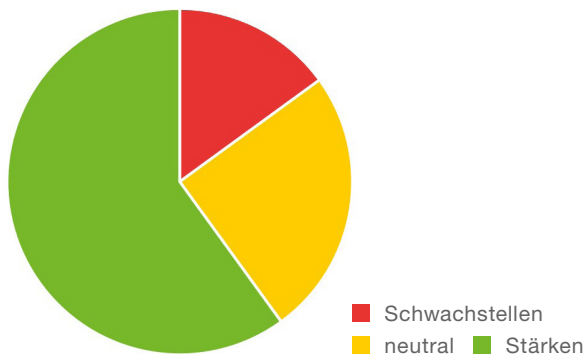


Abbildung 11: Beispiel Nutzwertanalyse

Die Ergebnisdarstellung kennt damit keine absoluten Werte (was bewusst so gewollt ist, um im Sinne der zu einem Gesamtergebnis führenden Bewertung unnötige und diesbezüglich wenig zielführenden Detail- und Partikular Diskussionen zu vermeiden). Die Ergebnisdarstellung zeigt aber dennoch jeweils eine deutliche Tendenz des Gesamtergebnisses.

Zum Vergleich werden Indikatoren der Einflussfaktoren in der Bewertungstabelle der Nutzwertanalyse jeweils

- rot eingefärbt, wenn die erste bewertete Lösung (z.B. „OHNE-Fahrleitung-FALL“) besser ist und
- grün, wenn die zweite bewertete Lösung (z.B. „MIT-Fahrleitung-FALL“) besser ist.
- Tritt bei einem Indikator keine Veränderung ein, bleibt der Indikator weiß.

Diese deutliche Tendenz des Gesamtergebnisses wird naturgemäß auch nicht bereits durch die Veränderung der Relevanz und Bewertungsfaktoren einiger weniger Einflussfaktoren verändert, wenn – so wie in unserem Ansatz – eben auch **alle** relevanten Einflussfaktoren berücksichtigt werden. So wird – anders als häufig im öffentlichen Diskurs – vermieden, dass nur wenige Argumente den Ausschlag geben, nur weil sie entsprechend laut und vehement vorgetragen werden, oder weil andere Argumente und Einflüsse nicht adäquat berücksichtigt wurden. Andererseits kann die Wichtung von Einflussgrößen durch den Anwender auf die Belange „seines Projektes“ jederzeit angepasst werden, wenn er partiell oder global eine andere Sichtweise als diejenige besitzt, die in den Beispielprojekten zum Ausdruck kommt.

Die Nutzwertanalyse setzt also bei der Bewertung der Einflussgrößen

- auf **Vollständigkeit** und
- auf **Transparenz für alle Anwender** wegen der Evidenz und Einfachheit des Bewertungsverfahrens

Die Absolutheit des Ergebnisses ist also nachrangig (und aufgrund der nur ausreichenden Genauigkeit des 2 x 3 – stufigen Bewertung naturgemäß begrenzt), sie bleibt aber aufgrund der sich jeweils **deutlich ergebenden Tendenz** immer noch signifikant und hinreichend aussagekräftig!

Als weiterer Nutzen der Tabelle ist neben dem Gesamtergebnis eine Analyse möglich, welche Indikatoren Schwachstellen einer Lösung darstellen, die dann gezielt verbessert oder zumindest im weiteren Verfahren frühzeitig behandelt werden sollten. Zum anderen wird durch die gezielte Beschäftigung mit allen Indikatoren im folgenden Verlauf die Identifikation aller jeweils einzubeziehenden Stakeholder unterstützt. Eine eigene Beschäftigung mit den Vor- und Nachteilen, welche zum jeweiligen Gesamtergebnis einzelner Szenarien führen, kann die weitere Diskussion auf der politischen Ebene vorbereiten und letztendlich erleichtern.

Die einzelnen Indikatoren der Einflussgrößen sind im Folgenden mit einer kurzen Erklärung aufgelistet:

5.1 Technik und Betrieb

5.1.1 Betriebsstabilität

Die spezifischen technischen Eigenschaften der Antriebe haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Betriebsstabilität:

- Lücken in der Elektrifizierung können/müssen mit Energiespeichern überbrückt werden.
- Größere Speicher (als erforderlich) erhöhen die Resilienz gegenüber Störungen (z.B. Umleitungen oder dem Ausfall von Ladeinfrastruktur).
- Energiespeicher müssen im Stillstand oder in Fahrt geladen werden. Dies schränkt die Freizügigkeit und den Flottenwirkungsgrad der Fahrzeuge für einen gewissen Zeitraum ein und verhindert ggf. den Abbau von Verspätungen.

5.1.2 Eignung für das Betriebsprogramm

Die ausgewählte Antriebstechnologie muss zum geplanten Betriebskonzept passen – nicht umgekehrt.

- Erfüllen die Fahrzeuge die Erfordernisse hinsichtlich Traktionsleistung, Beschleunigungsvermögen, Höchstgeschwindigkeit und Passagierkapazität
- Erfüllen der Erfordernisse hinsichtlich Taktichte, Linienlänge und Umlaufkonzept mit den jeweiligen technologiespezifischen Einschränkungen (Nachladung/Betankung, Leistungsfähigkeit)
- Das Betriebsprogramm soll aufgrund der Antriebstechnologie in seiner Erweiterbarkeit nicht eingeschränkt werden, es sollen weitere Linien ergänzt und Umläufe erweitert werden können

5.1.3 Verbesserung des Betriebsprogramms

Neue Antriebstechnologien können das Betriebsprogramm gegenüber dem Status Quo verbessern:

- Höheres Traktionsvermögen kann kürzere Fahrzeiten ermöglichen.
- Elektrischer Antrieb verbessert den Fahrkomfort (Lärm/Vibrationen).
- Reduktion der Umstiege durch mögliche Weiterfahrt am Ende elektrifizierter Abschnitte
- Möglicher Wegfall von dezidierten Tankfahrten

5.1.4 Kombinationsfähigkeit mit anderen nationalen und internationalen Verkehren bzw. mit anderen Verkehrsarten

Wenn die Errichtung neuer (Lade-)Infrastruktur für ein Antriebssystem notwendig ist, so stellt sich automatisch die Frage, inwieweit eine Nutzung auch für andere Verkehrsarten möglich ist.

- Lückenschlüsse in der Elektrifizierung können als Umleitungsstrecken oder neue planmäßige Routen für nationalen und internationalen SGV und SPFV genutzt werden.
- Ladestationen und spezielle Anlagen sind aufgrund der Zugangshürde (nicht elektrifizierter Abschnitt) nur durch dafür geeignete Fahrzeuge nutzbar.
- Die Verwendung von Industriestandards ermöglicht die Nutzbarkeit beispielsweise für Fahrzeuge aus dem Ausland.
- Infrastruktur, die für eine Verkehrsart vorhanden ist, kann ggf. auch für die Ladeinfrastruktur einer anderen Verkehrsart genutzt werden.

5.1.5 Energie- und Leistungsbedarf

Die ausgewählte Antriebstechnologie muss in der Lage sein, sowohl die benötigte Energie als auch die für die Einhaltung des Fahrplans erforderliche Leistung bereitzustellen.

- Größerer Energiebedarf führt bei diskontinuierlicher Energieversorgung zu größeren Speichermassen und -volumina.
- Höhere Leistungen müssen technologisch bereitstellbar sein und führen bei
 - kontinuierlicher Energieversorgung zu einer größeren Anlagendimensionierung und ggf. Strukturkomponenten (UW)
 - diskontinuierlicher Energieversorgung zu speziellen Komponenten (Hochleistungsakkumulator, Supercap) und einem höheren Energiebedarf
- Die vorgelagerte Energieversorgung muss den Leistungs- und Energiebedarf sowohl zeitlich als auch betragsmäßig passend bereitstellen.
- Energieträger wie Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe müssen in ausreichendem Maß (und zu verträglichen Kosten) für den Sektor zur Verfügung stehen.
- Der Energiebedarf sollte langfristig aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden.

5.2 Umwelt und Akzeptanz

5.2.1 Umweltauswirkung

Die Wahl der Antriebstechnologie beeinflusst lokale Umweltauswirkungen

- Schall und Vibration von Fahrzeug und Infrastrukturanlagen
- Emission von Luftschadstoffen (lokal und global)
- Transport und Lagerung von Gefahrgütern

5.2.2 Nachhaltigkeit (Ressourceneinsatz, Recyclingfähigkeit)

Trotz grundsätzlich hoher Fahrzeuglebensdauern und einer intensiven Ressourcenausnutzung müssen Herkunft und Nachnutzung von Ressourcen betrachtet werden

- Die Verwendung von Ressourcen sollte möglichst reduziert, Sekundärrohstoffe nach Möglichkeit miteinbezogen und die Herkunft und Verfügbarkeit berücksichtigt werden.
- Einige Bestandteile der Fahrzeugantriebe besitzen kürzere Lebensdauern als das Gesamtfahrzeug.
- Komponenten, die die hohen Anforderungen im Traktionsbetrieb nicht mehr erfüllen, dennoch aber weiterhin wirtschaftlich und technisch betreibbar sind, können einer Nachnutzung in einem anderen Bereich zugeführt werden (beispielsweise Second-Life-Konzepte von Traktionsbatterien)
- Grundsätzlich muss die Recyclingfähigkeit der Antriebskomponenten bewertet werden.

5.2.3 Flächenbedarf

Minimalinvasive Infrastrukturkonzepte erhöhen die allgemeine öffentliche Akzeptanz

- Aus dem Bedarf an Infrastruktur der Antriebstechnologie (kontinuierlich oder punktuell) resultieren jeweils recht unterschiedliche Flächenbedarfe, die hier zu bewerten sind.
- In architektonisch sensiblen Umgebungen (Stadtzentren, Ensembles mit historischer Bebauung) wird die Fahrleitungsanlage im Allgemeinen bei Neuanlage negativ bewertet.
- Es gilt zu bewerten, ob durchgehende Fahrleitungsanlagen bzw. Lückenschlüsse (z.B. aufgrund der Synergien durch Nutzung bestehender UW) einen geringeren Flächenbedarf haben, als die Anlage von Infrastruktur bei (punktuell) fahrdrahtlosen Abschnitten.

5.2.4 Architektonische Wirkung

Optisch attraktive Infrastrukturkonzepte erhöhen die allgemeine öffentliche Akzeptanz

- Bewertung der architektonischen Attraktivität abseits technisch notwendiger Rahmenbedingungen (insbesondere in Städten).
- Der Einfluss auf den Betrieb, die Betriebsanlagen und die Fahrzeuge, wenn die (architektonische) Diskussion zugunsten eines fahrdrahtlosen Abschnittes obsiegt, kann enorm und sehr weitreichend sein, bis zu dauerhaft höheren Gesamtkosten, geringer betrieblicher Flexibilität und betrieblicher Resilienz bei Störungen und bis hin zur Nichtrealisierung; dieses wird häufig in der Diskussion unterschätzt.

5.2.5 Dauer des notwendigen Infrastrukturbaus

In Bezug auf die Realisierung von Infrastruktur können sich je nach Antriebstechnologie sehr unterschiedliche Aufwände und Zeiträume bis zum Bauabschluss ergeben.

- Dabei sind auch die Umfeldler und Regelwerke teilweise unterschiedlich und spezifisch (Straßenraum, Eisenbahn usw.), sodass die Menge der zu errichtenden Infrastruktur nicht zwingend proportional zum Realisierungszeitraum ist.
- Eine Rolle besteht auch darin, dass die Genehmigungs- und Realisierungshürden je nach Bau- und Maßnahmenträger sehr spezifisch hoch sein können.



Abbildung 12: Was zählt ist das Gesamtkonzept: Straßenbahn Mulhouse – Foto: U. v. Stockhausen

5.3 Finanzierung und Wirtschaftlichkeit

5.3.1 Infrastrukturkosten

Infrastrukturkosten fallen zu Beginn der Lebensdauer an und sind i.d.R. vergleichsweise hoch.

- Sollten nicht als alleinstehendes Vergleichsmaß herangezogen werden. (Siehe Betriebskosten!)
- Diese Kosten sind von der Menge der Infrastruktur, den technischen Notwendigkeiten und dem jeweiligen Regelrahmen abhängig.
- In begründeten Fällen macht es Sinn, individuelle Lösungen zu untersuchen, wenn für den Rahmen, in dem die Strecke betrieben wird, die Kompatibilität mit dem Gesamtnetz nicht gefährdet wird.
- Vorteilhaft ist, wenn möglichst viel Bestandsinfrastruktur genutzt werden kann.
- Erfordern ggf. eine Finanzierung (Aspekt der Förderung wird getrennt betrachtet).

5.3.2 Betriebskosten (Instandhaltung, Energie, Personal)

Aufgrund der hohen Anlagen- und Fahrzeuglebensdauern besitzen die Betriebskosten eine hohe Dominanz.

- Die Antriebswirkungsgrade und die fahrdynamisch wirksamen Mehrgewichte werden über die Energiekosten in den Betriebskosten abgebildet.
- Technologiespezifischer personeller und fahrzeugtechnischer Mehraufwand (Tankfahrten, Umsetzfahrten an Ladestationen, Zuführung zu Ladestationen, operativ spezifisch notwendige Zusatzreserven, z.B. für Fahrpersonal und Rangierer).
- Technologiespezifische (Zusatz-)Instandhaltungskosten bei Fahrzeugen und Infrastruktur.

5.3.3 Fahrzeugkosten (Beschaffung, Komponententausch)

Fahrzeugkosten fallen zu Beginn der Lebensdauer an und sind i.d.R. vergleichsweise hoch.

- Sollten nicht als alleinstehendes Vergleichsmaß herangezogen werden. (Siehe Betriebskosten!)
- Zusätzlich: Bei manchen Technologien ist ein Komponententausch während der Lebensdauer erforderlich.
- Zusatzkosten bei der Fahrzeugbeschaffung durch die Erfordernis von Energiespeichern.

5.3.4 Nutzbarkeit von Skaleneffekten (z.B. Landesflotten, gemeinsame Reserveflotte, Homogenität)

Kleine Fahrzeugflotten mit spezifischer Ausrüstung gehen häufig mit höheren Kosten (auf das einzelne Fahrzeug gerechnet) einher.

- Kostenreduktion durch Nutzung gleichartiger Fahrzeuge innerhalb eines größeren Verbundes
 - Geringere Beschaffungskosten pro Fahrzeug
 - Skaleneffekte in der Instandhaltung durch Homogenität (weniger vorgehalten Ersatzteile, Know-How)
 - Mehrfachtraktionen mit Kuppel- und Flügelkonzepten
- Größere Fahrzeugreserven und freizügige Austauschbarkeit auf Linien auch bei Störungen und Umleitungen; mehrere Teilflotten mit spezifischen Zusatzausrüstungen erfordern partiell höhere Fahrzeugreserven.
- Im Stadtverkehr bedingen im Stadtverkehr kurze fahrleistungslose Abschnitte in Konsequenz eine große Inhomogenität der Fahrzeugflotte, dadurch dass neben reinen Oberleitungsfahrzeugen zusätzlich eine Teilflotte mit Fahrzeugen mit Energiespeichern vorgehalten werden muss.
- Sonderlösungen an einem Teil der Fahrzeugflotte bedingen höhere Instandhaltungsaufwände und höhere Fahrzeugmassen.

5.3.5 Förderfähigkeit/zuverlässige Finanzierung

- Auch wenn die unterschiedlichen Verkehrsarten stark unterschiedliche Arten der Finanzierung von Fahrzeug und Infrastruktur aufweisen, kann eine gesicherte Finanzierung und ggf. damit verbunden eine Förderfähigkeit die wirtschaftliche Eignung der verschiedenen Antriebstechnologien stark beeinflussen.

5.4 Zukunftssicherheit

5.4.1 Migrationsfähigkeit bei Infrastrukturerweiterung

Die Kompatibilität einer Antriebstechnologie mit einer (ggf. erst sukzessiv verfügbaren) Infrastruktur hat entscheidenden Einfluss auf den Erfolg einer Technologie. Darüber hinaus ist es vorteilhaft, wenn zukünftige Netzerweiterungen nicht durch die Wahl der Antriebstechnologie behindert werden.

- Häufig lassen sich Infrastrukturvorhaben nur schrittweise umsetzen. Die Bewertung einer Antriebstechnologie muss daher auch die Anpassung an nur schrittweise verfügbare Infrastruktur enthalten.
- Häufiges politisches Ziel ist die Vollelektrifizierung einzelner Korridore in einem Zeithorizont weniger Jahrzehnte. Eine Antriebstechnologie sollte sowohl während der einzelnen Ausbaustufen als auch im Endzustand (Vollelektrifizierung) wirtschaftlich sein.
- Aufgrund sich verlagernder Verkehrsströme oder Änderungen an der Verkehrsnachfrage werden Verkehrsnetze aller Art nicht selten im Laufe der Zeit angepasst oder erweitert. Das Konzept sollte darauf geprüft werden, ob zukünftige Netz- bzw. Betriebserweiterungen nicht durch die Wahl der Antriebstechnologie behindert werden.

5.4.2 Erhebung und Auswertung von Nutzungs- und Zustandsdaten

Nutzungs- und Zustandsdaten bieten die Möglichkeit, Aussagen zum Zustand einzelner Technologiekomponenten treffen zu können. Dies ist insb. bei alternden Batterien von erheblicher Bedeutung.

- Eine Zustandseinschätzung ermöglicht die Ermittlung des Restwertes von Technologiekomponenten (beispielsweise bei Fahrzeurückgabe).
- Die Nutzungszeit der kostenintensiven Hochtechnologiekomponenten kann verlängert werden, wenn deren Zustand möglichst genau bekannt ist. Dieser kann auf Basis des bereits zurückliegenden Belastungsprofils ermittelt werden.
- Die permanente Zustandsüberwachung motiviert zu einer komponentenschonenden Nutzung beim EVU (beispielsweise über Pönalen/Anreize/shared Benefit).

5.5 Risiken

5.5.1 Herstellerabhängigkeit

Einzelne Antriebstechnologien und Antriebskomponenten werden nur von wenigen Herstellern angeboten.

- Es sollte daher bewertet werden, inwieweit bei der Auswahl eine Abhängigkeit von einem oder nur sehr wenigen Herstellern geschaffen wird, die sich ggf. finanziell negativ auswirken oder ein Risiko für die langfristige Verfügbarkeit von Wartung und Ersatzteilen darstellen kann.

5.5.2 Reifegrad der Technologien

Jede Antriebstechnologie beinhaltet zum einen eine technische Verfügbarkeit der diesbezüglichen Systeme, die sich beispielsweise in Fahrzeugverfügbarkeiten ausdrücken kann.

- Es ist zu berücksichtigen, ob eine genügend ausgereifte Antriebstechnologie vorliegt, die sich im Betrieb nicht durch „Kinderkrankheiten“ negativ auswirkt.
- Es ist zu berücksichtigen, wie sich technologisch bedingte und spezifisch erwartbare End-of-Life-Effekte auf die Verfügbarkeit auswirken.

5.5.3 Externe Rahmenbedingungen (z.B. Energiekosten, CO₂-Bepreisung, Verfügbarkeit und Preis H₂)

Rahmenbedingungen können sich über eine lange Fahrzeuglebensdauer deutlich verändern

- Überproportional steigende Energiepreise
- Gesetzesänderungen
- Verfügbarkeit von (preisgünstigem) Wasserstoff
- Veränderung der Förderschwerpunkte während der Einführungsphase von Technologien

5.6 Beispielanwendung

Nachfolgend ist anhand der Beispiele „Regionalverkehr“ und „Straßenbahn“ exemplarisch erläutert, welche Gesichtspunkte als jeweilige Grundlage für die Bewertung gedient haben bzw. welche Bedeutung die jeweils relevanten Kriterien in diesem Kontext haben.

Regionalverkehr

Die Aufgabe sei folgendermaßen skizziert: Der Regionalverkehr auf einer etwa 30 km langen Verbindungsstrecke zwischen zwei elektrifizierten Hauptbahnen soll „dekarbonisiert“ werden. Folglich stehen zur Entscheidung:

- „Ohne-Fall“: Einsatz von Akkuhybrid-Triebzügen „BEMU“ mit Nachladung unter bestehender Fahrleitung an beiden Enden bzw. im elektrifizierten Netz „dahinter“.
- „Mit-Fall“: Elektrifizierung als Lückenschluss und Einsatz klassischer Elektro-Triebzüge (EMU).

Zunächst wird für diesen Fall die Relevanz der Bewertungsfaktoren folgendermaßen eingeschätzt:

Im Eisenbahnsystem unerlässlich sind: Die Eignung des Konzepts für den vorgesehenen Betrieb, dessen Stabilität (was auch den Reifegrad der eingesetzten Technologie beinhaltet) und die Deckung des Energiebedarfs. Aus Sicht des Bestellers spielen die „Total Cost of Ownership“ (Beschaffung, Instandhaltung und Energiebedarf der Fahrzeuge im gesamten bzw. betrachteten Lebenszyklus) sowie die Förderfähigkeit eine große Rolle und nicht zuletzt die Umsetzungsdauer für die angestrebte Lösung.

Von eher untergeordneter Bedeutung sind die architektonische Wirkung einer Streckenelektrifizierung im ländlichen Raum, die Erhebung von Nutzungsdaten sowie die eventuell eingeschränkte Auswahl zwischen mehreren Anbietern, solange man die relevanten Spezifikationen erfüllt.

Der „Ohne-Fall“ hat seine Stärken in der Nutzung von Bestandsinfrastruktur (Flächenbedarf, Umsetzungsdauer, Baukosten) und dagegen Schwächen beim Thema „Nutzbarkeit für andere Verkehrsarten“ und Nachhaltigkeit (wegen des Einsatzes von Hochleistungsbatterien).

Der „Mit-Fall“ wurde grundsätzlich umgekehrt eingestuft. Der Lückenschluss ist ein relevanter netzbildender Aspekt und Elektrotriebzüge sind im Hinblick auf Ressourceneinsatz „best-in-class“. Zusätzlich sinken bei EMU gegenüber BEMU die Beschaffungs- und Betriebskosten, rein elektrische Fahrzeuge sind standardisierter und ihr Angebot am Markt größer.

Folglich weist dieser Fall „mit Fahrleitung“ sowohl absolut (Tortendiagramm) als auch relativ zum Fall „ohne (neue) Fahrleitung“ (Bewertungstabelle) deutlich mehr Stärken auf, was eine nachdrückliche Verfolgung bzw. Umsetzung nahelegt. Die einzigen Schwächen bzw. Hürden liegen im Zeit- und Investitionsaufwand für die Umsetzung der Elektrifizierung.

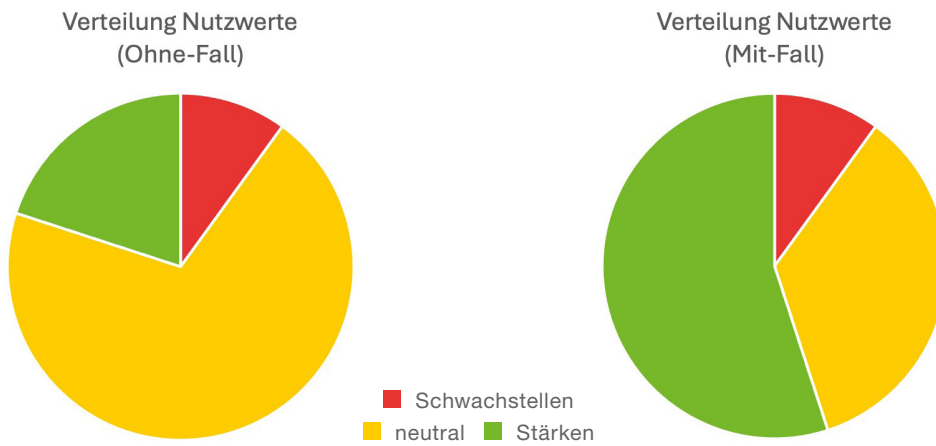


Abbildung 13: Beispiel Nutzwertanalyse Regionalverkehr

Falls sie sich nicht überwinden lassen, bleibt aber festzustellen, dass auch der „zweitbeste“ Fall auf der Basis von BEMU „unterm Strich“ positiv gesehen werden kann und keine „schlechte“ Lösung darstellt.

Straßenbahn/Stadtbahn



Abbildung 14: Auch in städtebaulich sensiblen Gebieten oder in historischen Ensembles ist eine Lösung mit einer ästhetischen Fahrleitung machbar (Margarethenbrücke in Budapest) – Foto: U. v. Stockhausen

Die Aufgabe sei folgendermaßen skizziert: Bei der Betrachtung stehen neue Linien und Netze (Teilnetze) im Fokus. Bei den Bestandsnetzen ist die Errichtung einer Fahrleitungsanlage in der Regel kein diskutiertes Thema und aufgrund der positiven Betriebserfahrung, des jahrelang positiv erfahrenen Kundennutzens akzeptiert. Dies gilt in der Regel auch für Umbauten der Fahrleitungsanlage, zum Beispiel bei Erhöhung der Leistungsbereitstellung.

Um innerhalb der Studie eine einheitliche Anwendung der Kriterien und die gleiche Eskalationsrichtung bei der Bewertung anzuwenden, sind Mit- und Ohne-Fall wie folgt definiert:

Der „Ohne-Fall“ beschreibt die Situation mit gewissen Fahrleitungslücken.

Der „Mit-Fall“ ist hingegen dadurch definiert, dass eine Fahrleitungsanlage mit 100% Netzabdeckung zugrunde gelegt wird.

Entgegen der gefühlten Erwartung beschreibt in diesem Beispiel also der Mitfall eine Situation, welche bei fast allen Straßenbahnbetrieben den Normalfall darstellt. Dies ist beim Verständnis der Analyse zu beachten, weil die Diskussion in realen Szenarien häufig die Ausführung mit Fahrleitungs-Lücken als „Mit-Fall“ in den Mittelpunkt stellt. Das bedeutet: Ausgehend von einer Vollversorgung über Fahrleitungen diskutiert man die Einrichtung von Lücken an sensiblen Stellen. Die gedrehte Zuordnung von Mit- und Ohne-Fall hat methodische Gründe und hat – wie bei den anderen Verkehrsarten auch – den Vorteil, dass sie den Wert und die Bedeutung der Fahrleitung implizit unterstreicht.

Insofern ist es im Ergebnis der Nutzwertanalyse für dieses Beispiel nicht verwunderlich, dass der so definierte Mit-Fall aufgrund der mit der 100 %-Lösung implizierten Homogenität grundsätzlich besser ausfällt als der Ohne-Fall mit partiellen Lücken im Fahrleitungssystem. Die Kriterien „Betriebsstabilität“, „Flottenhomogenität“, „Betriebskosten“, „Fahrzeugkosten“, sowie auch „Skaleneffekte“ prägen diese positive Bewertung des Mit-Falls. Der Mit-Fall berücksichtigt, dass Synergien aus ohnehin bestehenden Betriebsmitteln genutzt werden können und Störgrößen, welche sich aus der Inhomogenität durch Fahrleitungslücken und ihrer Konsequenzen ergeben, dann nicht zu Buche schlagen.

Die bei Neubauvorhaben meist aus architektonischen Gründen und zur Akzeptanzhöhung diskutierten partiellen Lücken im Fahrleitungssystem müssen in der Bewertung gerade in den o.g. Kriterien deshalb schlechter abschneiden, weil die schon vorhandenen Betriebsanlagen (Oberleitung, Unterwerke) und Fahrzeuge nur wegen lokal sehr begrenzter Systembrüche nicht mehr uneingeschränkt nutzbar sind und vielmehr deutliche Sonderlösungen wie Energiespeicher auf Fahrzeugen erfordern – und dies in der Regel nur für einen Teil der Flotte! Vor dem Hintergrund einer wirtschaftlichen Leistungserbringung im Vergleich zum Bestand sind zusätzliches Mehrgewicht auf Fahrzeugen, Mehraufwand in der Beschaffung und Instandhaltung nicht akzeptabel. Die Beeinträchtigung der „Flottenhomogenität“ hat zudem noch sekundäre negative Effekte, weil für einen Teilbetrieb zusätzliche Fahrzeugreserven mit besonderer Ausprägung vorgehalten werden müssen. Weiterhin sind für Störungen und Umleitungen spezifische Maßnahmen und Konzepte zu implementieren, welche für den derart definierten Ohne-Fall im Zweifelsfall eher eine schlechtere Lösung als der Mit-Fall bedeuten.

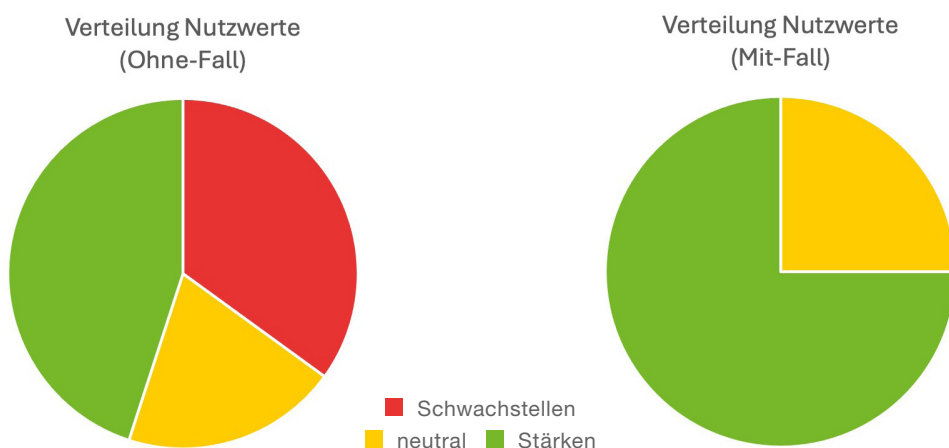


Abbildung 15: Beispiel Nutzwertanalyse Straßenbahn/Stadtbahn

Das vorangehend skizzierte Beispielszenario findet sich real in der Praxis wieder:

- In Sevilla wird im Zentrum die 2007 eröffnete neue Straßenbahn schlussendlich auf einem kurzen Teilstück ohne Fahrleitung betrieben. Architektonische Gesichtspunkte überwogen bei der Wahl der Lösung. Der Betreiber erhielt zunächst die Auflage, die Oberleitung in der Altstadt zu Zeiten traditioneller Prozessionen zu entfernen. In 2010 wurde die Oberleitung im Umfeld der Kathedrale probeweise und 2011 dauerhaft abgebaut und auf diesem Abschnitt auf Batteriebetrieb übergegangen. (Las catenarias del Metrocentro serán desmontadas este fin de semana de cara a la Semana Santa, 2010)
- In Nizza wird die 2007 eröffnete Straßenbahnlinie T1 in der Innenstadt Place Masséna auf einem 500 m langen Abschnitt in der Innenstadt aus städtebaulichen Gründen (sowie auf Grund der traditionellen Karnevalsumzüge mit Wagen mit hohen Aufbauten) ohne Fahrleitung betrieben. Die Fahrzeuge verfügen hierfür über einen Batteriespeicher, der während der Fahrt auf der übrigen Linie unter Fahrdrat wieder aufgeladen wird.



Abbildung 16: An der Place Masséna ist in Nizza die Fahrleitung der Linie T1 unterbrochen –
Foto: U. v. Stockhausen

- Ähnliche Gründe werden auch für die geplante Straßenbahnlinie, welche in München durch den Englischen Garten fahren soll, angeführt. Hier besteht die zuständige Verwaltung der bayerischen Schlösser und Seen aus Gründen des Ensembleschutzes auf eine Trassierung ohne Fahrleitung. Dieser Umstand sowie anhaltende sehr politisch geprägte Diskussionen verhinderten bislang den Bau der verkehrlich an sich seit Jahren sehr dringend benötigten Querverbindung im Münchner Straßenbahnnetz. Für den geplanten Betrieb wurden verschiedene Münchner Straßenbahnfahrzeuge für den Einbau eines Energiespeichers vorgerüstet bzw. als Prototyp erprobt.

Entsprechende Erläuterungen für weitere Verkehrsarten finden sich im Anhang.

6. Empfehlungen zur Beseitigung von Hindernissen

6.1 An die Treiber einer konkreten Elektrifizierungsinitiative gerichtet:

Aus der Nutzwertanalyse ergibt sich, welche relevanten Stärken und Schwächen die in Betracht gezogenen Varianten tatsächlich aufweisen. Dabei kann man sowohl eine absolute als auch eine (aus dem im Vergleich untereinander) relative Aussage ableiten:

- Ist die Variante mehrheitlich positiv, neutral oder negativ bewertet worden?
- Inwieweit ist eine Variante höher bzw. niedriger bewertet worden als die andere?

Wie bei den in Kap. 5 aufgeführten beispielhaften Anwendungen ist in der Vorstellung bzw. Diskussion des Ergebnisses eine kurze Erläuterung hilfreich, was als jeweilige Grundlage für die Bewertung gedient hat bzw. die jeweiligen Kriterien (z. B. wenn neue hinzugefügt wurden) bedeuten sollen. Im Einzelfall vorhandene Referenzen sowie Daten und Fakten unterstreichen die Objektivität des Ergebnisses – aber auch der evidente Berechnungsweg der in diesem Leitfaden vorgestellten Nutzwertanalyse selbst.

Es empfiehlt sich nun, gezielt an den identifizierten Schwächen zu arbeiten, um mehr Stakeholder von der besseren Lösung überzeugen zu können. Die im Vorfeld durchgeführte Stakeholderanalyse gibt systematisch darüber Aufschluss, welche Personen(gruppen) eher zu den Kritikern oder Unterstützern einer bestimmten Lösung zu zählen sind.

Auch ein gezielter Interessensausgleich kann eine erfolgreiche Methode sein, um zu vermeiden, dass gute Konzepte am Veto Einzelner scheitern. Die Nutzwertanalyse hilft dabei, einen möglichen Kompromiss nicht unabsichtlich zu verschlimmbessern.

Somit wird es möglich, auf eine konkrete Aufgabenstellung „maßgeschneiderte“ Lösungsansätze zu entwickeln. Allgemeingültige Empfehlungen können eher nicht gegeben werden, aber typischerweise (auch bei den in dieser Studie aufgeführten Beispielen) kristallisieren sich im Straßenbahnbereich die Ästhetik und im Vollbahnbereich die Finanzierung sowie Zeitschiene als größte Angriffspunkte heraus. Wie man diese durch Hindernisse bereits durch clevere Ausgestaltung überwinden konnte, wird in den nachfolgenden beiden Abschnitten dargelegt.



Abbildung 17: In historisch sensiblen Stadtzentren können einfache und wenig sichtbare Oberleitungsanlagen realisiert werden. Straßenbahn Freiburg (links) und Obus Bern (rechts) – Fotos: U. v. Stockhausen

6.1.1 Fahrleitung in sensiblen Bereichen

Es wird leider tendenziell zu wenig berücksichtigt, dass in architektonisch sensiblen Abschnitten eine geeignet gestaltete Fahrleitungsanlage eine Lösung sein kann. Hinzu kommt, dass diese architektonisch sensiblen Streckenabschnitte meist räumlich begrenzt und wegen Geschwindigkeitsbeschränkungen nur mit sehr geringen Traktionsleistungen bedient werden müssen. Dies erlaubt gegenüber der Regelausführung eine sehr einfache, filigrane Fahrleitungsanlage und würde Systembrüche im Fahrzeugpark oder bei der Infrastruktur obsolet machen.

Die architektonische Diskussion ist nicht neu und prägt bereits die Entstehungszeit des elektrischen Stadtverkehrs um 1900. Letztendlich lehrt die Geschichtsschreibung, dass sich alternative Konzepte zur Fahrleitung (Akkufahrzeuge, Stromzuführung über Unterleitungssysteme) in den meisten Systemen auf die Dauer wegen zu hoher Betriebskosten und mangelnder Zuverlässigkeit nicht durchsetzen konnten, in manchen Fällen sogar die Abschaffung ganzer Straßenbahnsysteme beschleunigte.

Andererseits zeigt die historische Betrachtung auch, dass in der Zeit des Jugendstils ein hohes Verständnis für Gebrauchsdesign herrschte und durchaus ansprechende Lösungen realisiert werden konnten (z.B. siehe Abbildung 18). Als Dokument zeitloser Schönheit sind einige Fahrleitungsmasten auch nach Verlegung der Straßenbahnlinie im Jahre 1971 dem Straßenbild erhalten geblieben (siehe Abbildung 19).

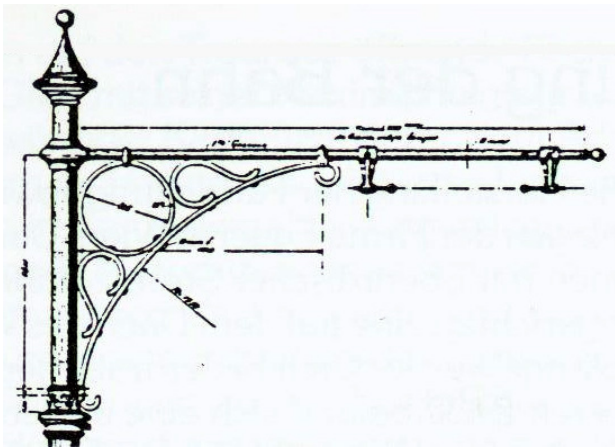


Abbildung 18: Oberleitungsmast der Gmundner Straßenbahn anno 1894



Abbildung 19: Ehemaliger Mast der Dresdener Straßenbahn - Foto: Tobias Bregulla

Beispiele für die gelungene Realisierung von Fahrleitungsanlagen in architektonisch sensiblen Bereichen finden sich in den Strecken mit Fußgängerzonen in Bern, Freiburg, München, Grenoble, Linz, Augsburg, Heilbronn, Besançon, Stadtbahn Wildbad (bei Pforzheim).

Lösungen in Karlsruhe oder Nantes zeigen, dass – in Abkehr von der üblichen gegenüber der Fahrleitung negativ konnotierten architektonischen Diskussion – explizit der umgekehrte Weg gegangen und die Fahrleitung in ihrer Bedeutung architektonisch bei der Gestaltung des urbanen Umfelds bewusst hervorgehoben werden kann:



Abbildung 20: Markante Oberleitungsanlagen bei den Straßenbahnen Karlsruhe und Nantes –
Fotos: U. v. Stockhausen

Hier werden gerade die Fahrleitungsanlage und das Gesamtsystem „Straßenbahn“ als die Urbanität charakterisierendes Element betont und in einen positiven Kontext gestellt. Nach dem Motto: „Infrastruktur hat deutliche Vorzüge für den Bürger und muss deshalb auch herausgestellt werden“.

Architektonische Gesamtlösungen sind zudem dazu geeignet, die gegebenenfalls „parasitäre“ und als störend empfundene Wirkung von Fahrleitungs- und Betriebsanlagen abzumildern. Auch hier zeigen Beispiele von neu aufgebauten Straßenbahnsysteme einen Weg auf, welcher die Integration der Straßenbahnen und ihrer Oberleitungen in die Stadtlandschaft fördern kann.

Beschleunigte Elektrifizierung

Die Flutkatastrophe 2021 in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz kostete mehr als 180 Menschen ihr Leben und führte darüber hinaus zu Sachschäden in historischem Ausmaß. Auch die Eisenbahninfrastruktur war auf mehreren Strecken großflächig betroffen und wurde teilweise vollständig zerstört. Für die betroffenen Bahnstrecken in der Region Eifel (Eifelstrecke, Voreifelbahn, Erftalbahn) wurde daraufhin politisch beschlossen, diese im Rahmen des Wiederaufbaus bis Ende 2026 vollständig zu elektrifizieren.

Hierzu stellte der Gesetzgeber durch Änderungen am Allgemeinen Eisenbahngesetz (AEG) und am Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) eine grundsätzliche Planrechtsfreiheit für das Errichten von Oberleitungsanlagen beim Wiederaufbau von Bahnstrecken nach Naturkatastrophen her. Dies stellt eine erhebliche Vereinfachung der Planungs- und Genehmigungsprozesse dar, allerdings nur für die Oberleitungsanlagen.

Anders als bei der ebenfalls zerstörten Ahrtalbahn (abzweigende Stichstrecke mit ca. 42 km) ist bei den Strecken in der Region Eifel wegen ihrer Länge von insgesamt circa 210 km eine Speisung aus dem bereits elektrifizierten Netz nicht möglich. Zusätzliche Einspeisungen sind zwingend erforderlich. Für eine zentrale Speisung mit 110 kV-Bahnstromleitungen gibt die Deutsche Bahn Realisierungsdauern von mindestens zwölf Jahren an. Für eine dezentrale Speisung mit Umrichtern inklusive ihrer Anbindung in das dreiphasige Landesnetz auf 110 kV-Ebene ist laut Deutscher Bahn mit Realisierungsdauern von mindestens acht

Jahren zu rechnen. Das Ziel 2026 wäre somit bei weitem verfehlt worden.

Daher wurde ein neuartiges Energieversorgungs-System 2 AC 2x25 kV 16,7 Hz + 1 AC 15 kV 16,7 Hz entwickelt. Dieses sieht vor, die zur Speisung der Strecken benötigte Leistung mit der höheren Spannung von 2x25 kV in sogenannten Verbindungsleitungen bzw. Kabeln entlang der Strecke (hier der Eifelstrecke) und damit als Bestandteil der (planrechtsfreien) Oberleitungsanlage mitzuführen. Das System und die durchgeführten technischen Untersuchungen sind in (Pape & al., 2023) überblicksmäßig dargestellt.



Abbildung 21: Zentrum in Straßburg: Hinter prägender Kunst wird die Einspeisung an „sensibler Stelle“ kaum wahrgenommen – Foto: U. v. Stockhausen

Mit diesem Vorgehen kann die Realisierungsdauer erheblich verkürzt werden. Inzwischen ist die vollständige Inbetriebnahme der Elektrifizierung der circa 210 km langen Strecken für das Jahr 2028 vorgesehen. Gründe für die Verzögerung gegenüber dem ursprünglichen Ziel 2026 sind die Lieferzeiten von Komponenten, insbesondere Transformatoren, sowie begrenzte Planungs- und Baukapazitäten für Oberleitungsanlagen. Nichtsdestotrotz stellte auch eine Realisierungsdauer von sieben Jahren einen in der jüngeren Vergangenheit in Deutschland unerreichten Wert dar.

Aus diesem Beispiel kann man lernen, dass

1. Mut zu innovativen Systemlösungen erfolgsfördernd sein kann,
2. auch die hier angewendeten regulatorischen Randbedingungen ein ganz entscheidender Erfolgsfaktor sind.

6.2 An die Verkehrspolitik gerichtet

6.2.1 Vollbahn

Derzeitige Förder- bzw. Finanzierungsaufgaben implizieren sehr viele Zusatzmaßnahmen in anderen Fachgebieten (LST, Gleispläne, ...) und machen die Elektrifizierung mindestens kompliziert, wenn nicht objektiv oder subjektiv unwirtschaftlich. Der alleinige Nutzen der Elektrifizierung an sich (Emissionsfreiheit, Effizienz, Fahrleistung, Erweiterung des leistungsfähigen elektrischen Netzes z.B. für Umleitungen) wird nicht ausreichend wertgeschätzt.

Große Branchenverbände wie der VDB (Verband der Bahnindustrie) und der VDV (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen) loben einerseits die politischen Willensbekundungen und Vorschläge, z.B. jene der sogenannten „Beschleunigungskommission Schiene“. Sie zielen insbesondere auf den Abbau an Bürokratie und die langfristige Finanzierung von Infrastrukturmaßnahmen. Andererseits müssen sie konstatieren, dass

die Realität immer noch weit hinter den Erwartungen zurückbleibt und quantitative Ziele bezüglich einer Steigerung des Elektrifizierungsgrades weit verfehlt wurden und werden.

<https://www.vdv.de/elektrifizierung-schienennetz.aspx>

https://bahnindustrie.info/fileadmin/Pressemitteilungen/230328_PM_SIFER.pdf

Die Autoren des vorliegenden Leitfadens können sich diesen Appellen nur anschließen. Eine sehr detaillierte Übersicht an sinnvollen Maßnahmen und ihren Hintergründen bietet die *Allianz pro Schiene*:

<https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/infrastruktur/elektrifizierung-bahn/>



Abbildung 22: Standardisierung ist bei Fahrleitungsanlagen wichtig, sie muss aber bei lokal begrenzten Strecken nicht um jeden Preis umgesetzt werden. Beispiel Steiermärkische Landesbahn – Foto: U. v. Stockhausen

Eine kurze Realisierungsdauer von Projekten kann ein Anreiz für die Politik sein, bestimmte Lösungen wie beispielsweise Batterietriebzüge zu wählen. Hier werden die langen und kostenintensiven Planungs- und Umsetzungszeiträume sowie der Fachkräftemangel im Bereich Oberleitungsplanung und -bau zum großen Nachteil und müssen aktiv bekämpft werden. Eine kontinuierliche langfristige Finanzierung sorgt für den Aufbau qualifizierter Fachkräfte.

Darüber hinaus ist im Spannungsfeld zwischen Standardisierung und lokalen Optima die Beantwortung folgender Forschungsfragen von Interesse:

- Welche Standards/Regelwerke sollten erweitert werden, um auch kostengünstigere Lösungen zuzulassen?
- Wo sollte hingegen eine Zusatzfinanzierung ermöglicht werden, um lokale Sonderlösungen zu vermeiden?
- Wann/in welchen Punkten sollte Bestandsschutz weiterhin gewährt werden?

Grundsätzlich ist aber festzuhalten, dass ein Fahrgastzuwachs stattfindet, wenn attraktive Verkehre angeboten werden. Und dieser Fahrgastzuwachs rechtfertigt dann auch auf vielen Nebenstrecken die Elektrifizierung; erfolgreich umgesetzte Beispiele sind z.B. die Breisgau-S-Bahn, die Strecke Dachau-Altomünster bei München oder die Schönbuchbahn im Süden Stuttgarts.

6.2.2 Stadtverkehr

Während Fahrstromanlagen von Stadtschnellbahnen aufgrund ihrer separierten Führung (außerhalb der wahrgenommenen Stadtlandschaft) weitgehend unabhängig von ästhetischen Diskussionen sind, gelten sie im Straßenbahnbereich als größte Angriffspunkte.

Hier ist es von Seiten der Politik wünschenswert, einen sachlichen und ausgewogenen Diskurs proaktiv zu unterstützen und ergebnisorientiert zu gestalten, sowie partikuläre Interessen und Meinungen als solche zu identifizieren. Es kann nicht sein, dass spezifische Kritik, die vielleicht nur aus Eitelkeit (oft ist die Beteiligung an der Diskussion wichtiger als ein konstruktiver Beitrag) und die darüber hinaus ohne konstruktive Vorschläge vorgetragen wird in der politischen Meinungsbildung dann einen so hohen Stellenwert erhält, dass jenseits der Sachebene Entscheidungen in eine negative Richtung umgekehrt werden oder in teure Kompromisslösungen münden.

Auch sollte eine Neubaumaßnahme gerade in sensiblen Bereichen im Stadtverkehr von Beginn an mit einer starken (durchsetzungsfähigen), in Bezug auf die Stakeholder und Träger öffentlicher Belange integrativen und intelligenten Projektorganisation unterstützt werden. Dies unterstreicht von Beginn an die Bedeutung des Projektes und vermeidet ein Scheitern an politischen und verwaltungstechnischen (Teil-)Zuständigkeiten.

Ziel allen Entscheidens und Handelns sollte am Ende ein robustes und auf lange Sicht gut zu betreibendes Gesamtsystem sein. Dies setzt in der Politik und insbesondere in der Projektorganisation ein entsprechendes Systemverständnis voraus.



Abbildung 23: Fahrleitung kann auch eine Chance für gelungene Stadtarchitektur sein – ein gutes Gesamtkonzept zahlt sich aus. Straßenbahnlinie T3 in Paris – Foto: Torsten Giesen

Wird diese Maxime auf politischer Ebene berücksichtigt, dann ist von Beginn an ein Rahmen geschaffen, um Lösungen konstruktiv und langfristig nachhaltig zu gestalten. Letzteres gilt für Neu- und Umbauvorhaben im städtischen Schienenverkehr allgemein und für den Bau von Fahrleitungsanlagen im Herzen der Städte im Besonderen. Warum sollte man also nicht einen Architekturwettbewerb für eine

- „schöne“ (will sagen „architektonisch wertvolle“),
- mit der Umgebung harmonisierende und
- technisch/betrieblich adäquate

Fahrleitungsanlage ausloben? Die Kosten für dieses Verfahren und das auszulobende Preisgeld werden sicher nur einen Bruchteil dessen darstellen, was gegenüber den dauerhaften Folgekosten durch halbherzige Kompromisslösungen oder den Fehlleistungskosten bei Scheitern des gesamten Projekts zu verbuchen sein wird. Gute Architektonische Lösungen haben Bestandskraft, prägen das Image der Stadt und ihrer Infrastruktur. Außerdem wirken sie in mehrfacher Hinsicht weiter, nämlich für die Realisierung weiterer Projekte und im Mindset der beteiligten Planer und Entscheider.



Abbildung 24: Bei bestehenden Systemen werden Fahrleitungsanlagen meist nicht in Frage gestellt, wie zum Beispiel beim Trolleybus in Genf – Foto: U. v. Stockhausen

6.2.3 Schaffung geeigneter Rahmen für ein erfolgreiches Projekt

Bei der Realisierung der (2-System-)Stadtbahnen um Karlsruhe („Karlsruher Modell“) wurde stets der systemische Gesamtvorteil in der Diskussion vorangestellt:

- Die Flexibilität beim jeweils an die (Betriebs-)Umgebung angepassten Bau der Betriebsanlagen und die damit verbundenen Vorteile, sowie
- die umsteigefreie Fahrt über mehrere Verwaltungs- und Systemgrenzen hinweg.

Diese Ziele wurden im Planungs- und Bauprozess stets so deutlich betont, dass die partikulären Argumente der Stadtplaner und -gestalter und Zuständigkeitshürden wenig Gewicht bekamen. Die durchgehende Zweisystem-Stadtbahn von Pforzheim bis in das enge Herz der Kurstadt Bad Wildbad im Schwarzwald zeigt, was möglich ist, wenn die Diskussion konstruktiv geführt, die Projektführung und Kompetenz richtig verortet und der Systemgedanke von Anfang an die Maxime des Handelns darstellt.



Abbildung 25: Bad Wildbad – Mehr als einen Draht braucht's nicht: Mit der 2-System-Stadtbahn ins Herz des Kurbetriebs – Foto: U. v. Stockhausen

Die Elektrifizierung im „Karlsruher Modell“ wurde u.a. durch „starke Einzelpersonen“ und in der Entscheidung und Realisierung sehr flache Strukturen erfolgreich umgesetzt. Diese sind in gewisser Weise ein Vorbild für die Adressaten unseres Papiers. Besser/professioneller scheinen aber „institutionelle Treiber“ zu sein, welche Projekte aus einer Hand abfahren können. Denn im Falle des „Karlsruher Modells“ (AVG/VBK) war von Vorteil, dass es für die Ausbauprojekte in der Regel einen starken Treiber gab, der alle wesentlichen Prozesse im Projekt für Fahrzeuge und Infrastruktur bündelte und hierfür über das relevante Gesamtsystem-Know-How verfügte und so in allen Fragen stets auf Augenhöhe eine adäquate, maßgeschneiderte Lösung erzielen konnte. Alles richtete sich nach dem Ziel, dass dem Fahrgast eine umsteigefreie Fahrt über mehrere Verwaltungs- und Systemgrenzen hinweg ermöglicht wird und dass eine langfristig technisch-wirtschaftliche Lösung umgesetzt wird.

7. Alternative Antriebe

Die Elektrifizierung von Bus- und Bahnfahrzeugen hat in den vergangenen Jahren deutlich Fahrt aufgenommen. Viele Neuausschreibungen zielen mittlerweile auf elektrische Fahrzeuge ab, um die Dieselflotten sukzessive abzulösen.

Abgesehen von der E-Mobility-Offensive bei Busbetrieben im ÖPNV sind diese Entwicklungen besonders im SPNV sichtbar, wobei die Ablösung der Dieselfahrzeuge aktuell hauptsächlich durch Fahrzeuge mit Batterie- und Wasserstoffantrieben geschieht (mit einem zahlenmäßigen Übergewicht von Batteriefahrzeugen). Die „klassische Elektrifizierung“ per Oberleitung nimmt hier nur einen kleinen Anteil ein. Auch im Busbereich sind diverse große Betreiber insbesondere in Metropolregionen stark in der Beschaffung von Batteriebussen sowie der zugehörigen Ladeinfrastruktur befasst. Der Wasserstoffantrieb ist auch hier aktuell nur in kleineren Stückzahlen vertreten.

Die Sektoren ÖPNV (speziell Bus) und SPNV verfügen allerdings über deutlich unterschiedliche Voraussetzungen. Der ÖPNV mit Tram und U-Bahn wird grundsätzlich mit elektrischen Fahrzeugen betrieben, welche per Oberleitung bzw. Seitenstromschiene versorgt werden, wohingegen der Busbetrieb der letzten Jahrzehnte bis auf wenige Ausnahmen auf Dieselfahrzeugen basierte. Im ersteren Fall ist dadurch ein passendes elektrisches Infrastrukturnetz vorhanden, wohingegen elektrische Infrastruktur oder Versorgung mit Wasserstoff für Busse erst neu errichtet werden muss. Dies führt zu einer Neugestaltung vieler Betriebshöfe und Werkstätten, auch müssen Personale neu geschult und (Instandhaltungs-) Prozesse angepasst werden. Zudem erreicht besonders bei größeren Verkehrsbetrieben häufig der Anschluss der Anlagen an das Energieversorgungsnetz seine Grenzen und ist selbst in Großstädten nicht immer leicht zu erweitern. Für die Nachladung von Batteriefahrzeugen werden bereits vorhandene Standards genutzt, aber insbesondere im Busbereich sind diese aufgrund des Vorherrschens von Dieselfahrzeugen und der dynamischen Marktentwicklung noch nicht durchgängig gegeben.

Die Errichtung von Oberleitungsinfrastruktur über Straßen insbesondere in dicht besiedelten Gebieten ist bislang hauptsächlich dem Trambetrieb zugeordnet. Elektrische Anlagen zum Betrieb von Oberleitungsbussen gehorchen ähnlichen Gesetzmäßigkeiten und sind abgesehen von hohen spezifischen Errichtungskosten auch immer mit einem deutlich sichtbaren Eingriff in den öffentlichen Raum verbunden. Gleichwohl liegen die Investitionen in Fahrzeuge mit alternativen Antrieben aufgrund der enthaltenen Batteriekosten über ihren Oberleitungspendants. Erfordert die Topographie ein häufiges Nachladen, so kommt sehr schnell das „In-Motion-Charging“ über Oberleitungsanlagen in Betracht, will man nicht durch ausgeprägte Ladepausen einen schlechten Flottenwirkungsgrad und damit einen schlechten Gesamtwirkungsgrad akzeptieren.

Im Vollbahnsektor wiederum wird der Fernverkehr größtenteils per Oberleitung elektrisch betrieben, auch im Nahverkehr (SPNV, inkl. S-Bahn) wird der große Teil der Verkehrsleistung auf diese Weise erbracht. Im Güterverkehr ist der Anteil geringer, aber auch hier wird wo immer möglich auf die Energieeinspeisung per Oberleitung gesetzt. Eine Versorgung großer Gebiete mit Bahnstrom ist also gegeben, dazwischen befinden sich verschieden große Inseln (meist im ländlichen Raum), die nicht mit Oberleitung überspannt sind. Zumindest mit Batteriefahrzeugen kann hier bestehende elektrische Infrastruktur mitgenutzt werden. Der Bedarf an zusätzlicher elektrischer Infrastruktur ist stark abhängig von regionalen Gegebenheiten und den zu erwartenden Betriebsprogrammen. Die Spannweite der angewendeten Versorgungssysteme reicht von der Errichtung von größeren Oberleitungsinseln über kleinere Ladestationen zu kleinen Anpassungen wie der Errichtung von zusätzlichen Elektranen. Wasserstofftankstellen müssen grundsätzlich komplett neu errichtet und deren Versorgung entsprechend sichergestellt werden. (Wissenschaftlicher Dienst des Bundestages, 2023)



Abbildung 26: Oberleitungsinsel in Tönning – Foto : U. v. Stockhausen

Im Gegensatz zum Betrieb mit Oberleitung ist die gegenseitige Abhängigkeit von Betriebsprogramm, Fahrzeug und Infrastruktur bei alternativen Antriebssystemen deutlich größer. Es werden bereits vorhandene Standards für die Nachladung von Batteriefahrzeugen genutzt. Von daher sollte die Etablierung neuer technischer Standards sorgfältig abgewogen werden.

Viele Einrichtungen zum Nachladen von Batteriefahrzeugen werden nach den jeweiligen Bedürfnissen des SPNV ausgerichtet, eine strategische Verknüpfung mit zukünftigen Bedarfen benachbarter Netze oder anderer Verkehrsarten wie beispielsweise dem Güterverkehr erfolgt aktuell nicht. Eine ähnliche Entwicklung erfährt das Thema Fahrzeugauslegung, indem neu angeschaffte Fahrzeuge, insbesondere was Batteriegrößen / Reichweiten angeht, ebenfalls hauptsächlich auf die konkreten regionalen Anforderungen ausgerichtet sind.

Eine kontinuierliche Energieversorgung, wie dies für reine Oberleitungsfahrzeuge der Fall ist, ist für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben nicht gegeben. Letztere unterliegen diversen Einschränkungen im Hinblick auf die erzielbare Reichweite, welche für BEMU-Fahrzeuge bei 80-120 km liegt. Dies schränkt die betriebliche Flexibilität ein, um im Störfall oder bei zukünftigen Anpassungen von Betriebsprogrammen passend reagieren zu können.

Alternative Antriebe zeichnen sich im Allgemeinen durch einen zum Teil deutlich geringeren Infrastrukturbedarf aus, was sich zum einen bei der Anschaffung wirtschaftlich günstig niederschlägt, zum anderen werden auch Vorläufe in Planungs- und Genehmigungsprozessen deutlich verkürzt. Allerdings sind mit den Kosten für eine Elektrifizierung häufig Nebenmaßnahmen wie Lärmschutz oder die Sanierung von Brücken oder Durchlässen verbunden. Letztere sind für die Elektrifizierung nicht zwingend notwendig, führen aber zu einer deutlichen Verteuerung von Projekten.



Abbildung 27: BEMU-Fahrzeug in Tönning – Foto: U. v. Stockhausen

Es zeichnet sich aktuell ab, dass in verschiedenen Netzen deutlich unterschiedliche Lösungen für Ladeinfrastruktur gewählt wurde. In Schleswig-Holstein sind Ladeunterwerke mit 16,7 Hz als Oberleitungsinselanlage ausgelegt (Deutsche Bahn AG, 2024). Die Niederbarnimer Eisenbahn wiederum setzt auf 50 Hz-Ladeinfrastruktur, teilweise auf eigenem Betriebsgelände mit niedriger Ladeleistung. (Niederbarnimer Eisenbahn, 2022), wobei insbesondere aufgrund langer Planungsvorläufe eine passgenaue Auslegung zum eigenen Bedarf eine Herausforderung ist. Zusätzlich ist eine Berücksichtigung späterer Bedarfe geboten, damit Verbesserungen der Verkehrsleistung noch ohne große Investitionen realisiert werden können. Nichtsdestotrotz müssen technische Sonderlösungen so gut als möglich vermieden werden, um eine universelle Nutzbarkeit zu gewährleisten.

Aktuell werden viele SPNV-Netze, welche bislang mit Dieselfahrzeugen betrieben wurden auf Fahrzeuge mit Energieversorgung über Batterie- oder Wasserstoff umgestellt. Diese Lösungen werden zudem als kurzfristig verfügbar angesehen. Dagegen wirken die hohen Vollelektrifizierungskosten und dem damit verbundenen Planungsaufwand als Lösungsansatz abschreckend. Grundsätzlich werden BEMU-/HEMU-Fahrzeuge einerseits als Übergangslösung für später vorgesehene Streckenelektrifizierungen gesehen, wofür gerade bei BEMU-Ladeinfrastruktur eine Weiternutzung für diesen Fall eingeplant werden sollte. Andererseits werden gerade bei Linien mit kleinen Fahrzeugen, niedrigem Fahrzeugbedarf und kurzen Distanzen alternative Antriebssysteme als Nischentechnologie betrachtet, die auch auf Dauer ausgelegt sein kann.

Fahrzeuge mit alternativen Antrieben sind im Vergleich zu ihren Pendanten mit reiner Versorgung per Fahrleitung mit Mehrkosten bei der Anschaffung und Fahrzeuginstandhaltung verbunden. Es zeigt sich hier eine Abhängigkeit der Eignung der unterschiedlichen Systeme vom jeweiligen Bedarf an Fahrzeugen bzw. von der Infrastruktur. Für den Bedarf von Linien mit kleinen Fahrzeuggrößen und großen Taktzeiten kann ein Betrieb mit alternativen Antrieben auch auf die Dauer sinnvoll sein. Sobald aber größere Fahrzeuge in engerer Taktung zum Einsatz kommen, ist dringend zu prüfen, ob eine Vollelektrifizierung nicht eine passende Alternative darstellt.

Das Prinzip hybrider E-Lokomotiven mit „Last Mile capability“ kommt mit zunehmender Performanz der Speicher und zunehmender Elektrifizierung von Güterstrecken wieder in Betracht, ist aber letztendlich nichts Neues. Auf großen elektrischen Industriebahnnetzen der Eisenverhüttung und Stahlherstellung, sowie im Bergbau war es üblich, dass die E-Loks für die letzten Meter ohne Fahrdrat oder zum abgebügelten Einfahren in spezifische Prozessanlagen zusätzlich über eine Traktionsbatterie (oder einen Dieselmotor) verfügten.

Wasserstoff und E-Fuels müssen mit erheblichem Aufwand aus regenerativ erzeugter Elektrizität erzeugt werden und sind damit (deutlich) teurer als die direkte Verwendung dieser Elektrizität oder deren Zwischenspeicherung in Akkumulatoren. Ihre Stärke liegt in der hohen Energiedichte. Folglich sind sie vorrangig für

diejenigen Verkehre attraktiv, die eine sehr hohe Reichweite benötigen ohne Möglichkeit zur Zwischenladung (z.B. Luftverkehr, Seeverkehr oder transkontinentaler Güterverkehr).

Parallel zur Entwicklung der Batterietechnologie im Automobilsektor ist auch für Busse und Schienenfahrzeuge von einer Erhöhung von Reichweiten und einer Senkung der Kosten auszugehen.

Im städtischen Schienennahverkehr werden „alternative Antriebe“ als die Ergänzung vorhandener Lösungen durch Energiespeicher verstanden. Die vorhandene Lösung ist dabei als E-Antrieb an der Fahrleitung realisiert. Je nach überwiegendem Anwendungsfall werden kommen Speicher mit hoher Leistungsdichte oder hoher Energiedichte in Betracht, bzw. eine geeignete Kombination davon. Die Auslegung erfolgt für gewöhnlich sehr spezifisch für den jeweiligen Anwendungsfall, um Mehrgewicht und Zusatzausrüstungen zu minimieren. Speicher mit hoher Leistungsdichte sind insbesondere dann gefragt, wenn es um die Kappung der Spitzenleistungsaufnahme geht, weil die bestehende Energieversorgung nicht genügend lieferfähig oder für Rückspeisung nicht bzw. nicht genügend aufnahmefähig ist. Werden Fahrten ohne Fahrleitung gewünscht, so sind in der Regel (im Verhältnis zum Gesamtnetz) sehr kurze Abschnitte zu überwinden. Betriebsweisen, die mit den E-Bussen (Depot oder Opportunity Charging) zu vergleichen sind und einen (weitgehenden) Verzicht auf Fahrleitungsanlagen vorsehen, sind für Straßenbahnen bislang nur von Einzelfällen in China und Qatar, sowie Nizza (Linie T2) bekannt.

Eine kontinuierliche Energiezuführung bei Straßenbahnen ohne klassische Fahrleitungsanlagen wurde in mehreren neuen Systemen realisiert (z.B. System APS von ALSTOM mit Stromschiensektionen im Gleis, die sukzessive unter dem Fahrzeug ein- bzw. ausgeschaltet werden).



Abbildung 28: Alstom Citadis 402 in Bordeaux – Foto: Marc Ryckaert; lizenziert unter CC-BY-3.0; https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d3/Bordeaux_Tram_R01.jpg

8. Zusammenfassung/Fazit

Wenn die Verkehrswende gelingen soll, brauchen wir nachhaltige, effiziente Lösungen im großen (möglichst bundesweiten) Maßstab. Je schneller und zuverlässiger die Elektrifizierung per Fahrleitung vorangetrieben wird, desto besser können auch Brückentechnologien passgenau (und migrationsfähig) umgesetzt werden. Diverse Ereignisse der letzten Jahre haben gezeigt, dass eine gute (elektrische) Ausrüstung auch wenig befahrener Strecken bei größeren Störungen von immensem Vorteil sein kann.

Eine differenzierte, sachliche Diskussion ist die Basis einer fundierten Entscheidung, dazu gehört auch eine Aufnahme der Bedenken, die von verschiedenen Stakeholdern geäußert werden. Im Rahmen der Stakeholderanalyse sowie der Nutzwertanalyse dieses Leitfadens finden sich viele Themen wieder, die in der öffentlichen Diskussion vorkommen können. Eine frühzeitige Beschäftigung mit Argumenten verschiedener Seiten kann es deutlich erleichtern, die Gegner mit Sachargumenten zu überzeugen und die Ziele zu erreichen. Dabei liegt eine Vielzahl an technisch ausgereiften Lösungen auf dem Tisch; bezüglich architektonischer Aspekte im urbanen Raum sind ebenfalls viele gelungene Beispiele vorhanden.

Elektrifizierungsprojekte gestalten sich in den aktuellen Planungs- und Finanzierungsstrukturen langwierig und schwerfällig. Dies muss jedoch nicht so bleiben, es wurden aus dem Bahnsektor heraus (z.B. über VDV, VDB, Allianz pro Schiene) diverse Vorschläge skizziert, wie sich diese Strukturen verbessern können. Dazu braucht es eine mutige und entschlossene Politik, die es auf sich nimmt, gegebenenfalls auch gegen Widerstände die bestehenden Herausforderungen zu analysieren und dann entsprechende Anpassungen an den Strukturen vorzunehmen. Vordringlich muss die Finanzierung der Streckenelektrifizierung langfristig gesichert und nach klaren Prinzipien geregelt sein.

Es steht jedoch zu erwarten, dass wir trotz aller Anstrengungen nicht beliebig schnell eine Entspannung sehen werden, sondern noch eine gewisse Zeit im bisherigen Prozessgefüge arbeiten müssen. Nichtsdestotrotz lohnt sich aufgrund der langfristigen Vorteile das Engagement für eine Elektrifizierung per Fahrleitung. Sinnvoll eingesetzt erlaubt sie ein Höchstmaß an Flexibilität sowie sehr energieeffizienten Bahnbetrieb.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Elektrifizierung von Verkehrswegen nicht nur eine technische, sondern vor allem eine gesellschaftliche Herausforderung ist. Der Diskurs soll angemessen geführt werden, darf aber nicht durch zu viele Details oder unterschiedliche Partikularinteressen erschwert werden. Vielmehr sollten wir uns auf die wesentlichen Fragen konzentrieren und uns der dringenden Notwendigkeit einer verstärkten Elektrifizierung bewusst werden. Nur durch eine sachliche, koordinierte und mutige Herangehensweise und eine langfristige Perspektive können wir die notwendigen Fortschritte erzielen und diejenigen Faktoren in den Vordergrund stellen, die für eine nachhaltige und zukunftsfähige Verkehrsinfrastruktur von entscheidender Bedeutung sind.

Quellenverzeichnis

Deutsche Bahn AG. (17. 12. 2024). *Letzte Ladeinsel für klimafreundliche Akkuzüge in Schleswig-Holstein in Betrieb genommen*. Von <https://www.deutschebahn.com/de/presse/presse-regional/pr-hamburg-de/aktuell/presseinformationen-regional/Letzte-Ladeinsel-fuer-klimafreundliche-Akkuzuege-in-Schleswig-Holstein-in-Betrieb-genommen-13198380> abgerufen

Jöhrens, J., Werner, M., Schill, W.-P., Ruscher, M., Allekotte, M., & Heining, F. (10 2024). *Komplementärtechnologien zu BEV-Lkw – ein techno-ökonomischer Vergleich*. Von https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Publikationen/0_nicht_in_Navigation/enERSyn_SP3_Komplementaertechnologien.pdf abgerufen

Las catenarias del Metrocentro serán desmontadas este fin de semana de cara a la Semana Santa. (18. März 2010). *Diario de Sevilla*.

Niederbarnimer Eisenbahn. (11. 11. 2022). *Vier Schnellladestationen für Batteriezüge*. Von <https://www.neb.de/aktuelles/details/nob2-vier-schnellladestationen-fuer-batteriezuge/> abgerufen

Pape, J., & al., e. (11 2023). Neuartige Bahnenergieversorgung für die schnelle Elektrifizierung der Eifelstrecken. *IRSA 2023: Tagungsband/proceedings*, S. 191-210.

Robertson, D. (Juni 2015). Optimising Trolley Assist. *International Mining*.

Stephan, A., & Werner, M. (07 2024). Autobahn unter (Gleich-)Strom – Was kommt auf uns zu? *Elektrische Bahnen*, S. 268-278.

TUD, FuE-Zentrum FH Kiel. (2024). *Whitepaper - Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs*. TU Dresden - Professur für Elektrische Bahnen; Forschungs- und Entwicklungszentrum FH Kiel GmbH. Von https://verkehrslage.vkw.tu-dresden.de/sites/default/files/Whitepaper_Dekarbonisierung%20des%20Stra%C3%9Feng%C3%BCterverkehrs.pdf abgerufen

Werner, M., Schiebel, M., & Stephan, A. (01-02 2024). DC-Elektrifizierung von Autobahnen - Einblicke in die Begleitforschung des Feldversuchs FeSH. *Elektrische Bahnen*, S. 18-28.

Wissenschaftlicher Dienst des Bundestages. (23. 02 2023). *Anschaffungskosten und Laufleistungen von Kraftomnibussen*. Berlin.

Anhang

Übrige Beispiele aus der NWA inkl. erklärender Texte, wie wir jeweils auf die Bewertung kommen.

Regionalverkehr II

Die Aufgabe sei folgendermaßen skizziert: Der Regionalverkehr in einem ausgedehnten Teilnetz ohne Bestandselektrifizierung soll „dekarbonisiert“ werden. Folglich stehen zur Entscheidung:

- „Ohne-Fall“: Einsatz von Akkuhybrid-Triebzügen „BEMU“ mit hoher Reichweite, deren Nachladung unter vereinzelt bestehender Fahrleitung oder an stationären Ladestationen erfolgt.
- „Mit-Fall“: Schaffung einer ausgedehnten Elektrifizierungsinselanlage, die durch regelmäßiges Nachladen in Fahrt den Einsatz von „normal dimensionierten“ BEMU ermöglicht.

Zunächst wird für diesen Fall die Relevanz der Bewertungsfaktoren folgendermaßen eingeschätzt (analog zum Beispiel in Kapitel 5, weil es sich um die gleiche Verkehrsart in ähnlicher Umgebung handelt):

Im Eisenbahnsystem unerlässlich sind die Eignung des Konzepts für den vorgesehenen Betrieb, dessen Stabilität (was auch den Reifegrad der eingesetzten Technologie beinhaltet) und die Deckung des Energiebedarfs. Aus Sicht des Bestellers spielen die „Total Cost of Ownership“ (Beschaffung, Instandhaltung und Energiebedarf der Fahrzeuge) sowie die Förderfähigkeit eine große Rolle, und nicht zuletzt die Umsetzungsdauer für die angestrebte Lösung.

Von untergeordneter Bedeutung sind die architektonische Wirkung einer Streckenelektrifizierung im ländlichen Raum, die Erhebung von Nutzungsdaten sowie die eventuell eingeschränkte Auswahl zwischen mehreren Anbietern, solange man die relevanten Spezifikationen erfüllt.

Der „Ohne-Fall“ hat seine Stärken lediglich im Bereich der Infrastruktur (Flächenbedarf, Realisierungszeitraum und Investitionen). Ausgeprägte Schwächen resultieren aus dem hohen Energiebedarf für die Überbrückung langer Distanzen, denn eine geeignete Sonderlösung beim Fahrzeug erhöht die Kosten und das technisch-betriebliche Risiko.

Der „Mit-Fall“ wurde grundsätzlich besser eingestuft, wobei auch hier nur wenige explizite Stärken identifiziert wurden (Fahrzeug- und Betriebskosten). Beiden Ansätzen ist die Problematik gemein, dass ein Einsatz von BEMU erforderlich ist und somit wenig Zusatznutzen für das Gesamtsystem Bahn generiert wird.

Folglich weist dieser Fall „mit Fahrleitung“ nur relativ zum Fall „ohne (neue) Fahrleitung“ (Bewertungstabelle) eine größere Anzahl Stärken auf. Absolut betrachtet (Tortendiagramme) überwiegen in beiden Fällen neutrale Einschätzungen, so dass möglicherweise eine weitere Variante in Betracht gezogen werden sollte.

Fernverkehr

In diesem Beispiel wird der Bestandssituation „Ohne-Fall“ (weitgehend elektrifiziertes Netz wie z.B. in Deutschland, aber mit spürbaren Lücken) die Option gegenübergestellt, die vorgenannten Lücken zu schließen und den überregionalen Verkehr somit vollelektrisch abwickeln zu können „Mit-Fall“.

Hier haben diejenigen Faktoren eine hohe Relevanz, die eine zuverlässige Umsetzung abbilden (Realisierungsdauer, betriebliche Eignung) sowie langfristig eine Amortisation der Investitionen sicherstellen (Leistungsbedarf, Flexibilität, Skaleneffekte, Betriebskosten). Eine Verbesserung des Betriebsprogramms wird nicht angestrebt, der Anblick elektrifizierter Hauptstrecken ist akzeptiert, und eine Finanzierbarkeit wird vorausgesetzt (sonst wäre die ganze Fragestellung obsolet).

Der „Ohne-Fall“ (Status Quo) hat absolut betrachtet keine Stärken, und verfehlt entweder das Nachhaltigkeitsziel oder erfordert spezielle Lösungen auf der Fahrzeugseite.

Der „Mit-Fall“ hat im direkten Vergleich selbstredend Schwächen im Bereich der Infrastruktur (Flächenbedarf, Realisierungszeitraum und Investitionen), bringt aber Pluspunkte in allen anderen relevanten Kriterien. Das unterstreicht eindrücklich die Sinnhaftigkeit, Bahnstrecken mit hoher Verkehrsleistung durchgehend zu elektrifizieren.

Trolleybus



Abbildung 29: Trolleybus Pescara – Foto: Mikołaj Bartłomiejczyk

Die Aufgabe sei folgendermaßen skizziert: Beim Trolleybus (Obus) werden zwei Fälle – und zwar ausgehend vom Status quo – untersucht.

- a) Ähnlich wie im Kapitel 5.6 beschriebenen Beispiel der Straßenbahn/Stadtbahn ist bei bestehenden Trolleybus-Systemen als Mit-Fall (3.1a) der Betrieb mit einer 100 % Abdeckung durch Fahrleitungsanlagen definiert. Hier verfügen die Trolleybusfahrzeuge allenfalls für einen Hilfsantrieb zur Bewegung in den Werkstätten, oder zur Räumung von Kreuzungen bei Havarie an Stromabnehmern oder Oberleitungsabschnitten. Der Hilfsantrieb ist demnach für normalen Fahrgastbetrieb nicht geeignet.

Der Fall a) ist für ausgedehnte Trolleybusnetze, wie sie in einigen großen Städten in Österreich (z.B. Salzburg), der Schweiz (z.B. Zürich), in Tschechien (z.B. Brno, Ostrava, Plzeň), in Ungarn (z.B. Budapest) und in Südamerika durchaus noch existieren, relevant, um eine „schleichende Erosion“ des klassischen Trolleybusbetriebes zu vermeiden. Als „Mit-Fall“ wird der klassische Trolleybusbetrieb mit nahezu 100% Fahrleitungsabdeckung vorgesehen, als „Ohne-Fall“ ein Trolleybusbetrieb mit Fahrleitungslücken – sei es aus architektonischen Gesichtspunkten, oder zur Vermeidung aufwendiger Fahrleitungsanlagen an Kreuzungen oder in Unterführungen etc. Die Schaffung nennenswerter Lücken im Fahrleitungsnetz impliziert die Verwendung von Batterietrolleybussen und damit höhere Fahrzeuganschaffungs-, Unterhalts-, und Betriebskosten. Einhergehend damit ist die Betriebsstabilität für den Ohne-Fall geringer zu bewerten, bei der Eignung für das Betriebsprogramm wird der Ohne-Fall günstiger bewertet, denn:

- Fahrleitungslücken implizieren die Verwendung von Batterietrolleybussen; damit sind Hybridfahrzeuge vorhanden, die Störungsfälle beherrschbarer machen
- Oder anders betrachtet muss für Störungsfälle – wie bei klassischen Trolleybusbetrieben üblich – keine Notreserve an Dieselnissen vorgehalten werden.

Der Mit-Fall besteht durch hohe Betriebsqualität und niedrige Betriebskosten, weil durch die Vermaschung ein energiesparender Betrieb realisiert werden kann und weil das Fehlen von zusätzlichen Ausrüstungen

(hier: Energiespeicher) die Fahrzeuggewichte und damit Energieverbräuche geringer sind.

Insofern gilt die im Kapitel 5.6 am Beispiel der Straßenbahn/Stadtbahn beschriebene Bewertung, welche die Nachteile durch die dann entstehende Inhomogenität aufzeigt. Der Einflussfaktor der Inhomogenität wird jedoch gegenüber dem Beispiel der Straßenbahn/Stadtbahn geringer bewertet, weil zugrunde gelegt wird, dass der Trolleybus in den meisten Anwendungsfällen nur ein Teilsystem mit gegenüber dem (oberleitungs-freien) Dieselbus darstellt. Damit ist stets der Tatbestand der Inhomogenität gegeben, womit also die relative Bewertung der Beeinträchtigung der Flotteninhomogenität durch Fahrleitungslücken grundsätzlich geringer ausfallen muss.

In Relativierung des vorher Gesagten ergeben sich andererseits schnell neue Anwendungsfälle, wenn Trolleybusse mit Batteriespeichern eingesetzt werden, weil bestehende Dieselbuslinien, die teilweise lange Strecken unter bestehenden Fahrleitungen betrieben werden, elektrisch betrieben und ohne Stillstandszeiten an einer Ladestation geladen werden können. Auch kann auf Fahrleitungsanlagen, die beim Trolleybus aufgrund der zweipoligen Fahrleitung systembedingt bei Abzweigen und Kreuzungen sehr komplex sind, punktuell verzichtet werden.

Aus den vorgenannten Gründen, und um auch den Nutzen und spezifischen Mehrwert von Batterietrolleybussystemen bei Neuanlagen gegenüber den Diesel- oder reinen Batteriebusssystemen herauszustellen wurde noch ein weiterer Fall (3.1.b) betrachtet, der als Aufgabe folgendermaßen skizziert sei:

- b) Dieser Fall definiert als Ohne-Fall den elektrischen Batteriebus mit Gelegenheits- und Depotladung, und der Mit-Fall sieht dann einen Batterietrolleybusbetrieb mit partiellen Oberleitungsanlagen dar.

Dieses System besteht in speziellen Fällen dann, wenn aufgrund einer schwierigen Topographie und/oder sehr langen Umläufen die Nachladung so dominant wird, dass die Fahrzeugstillstände durch Gelegenheits- und Depotladung zu umfangreich sind. Dies führt dazu, dass der Fahrzeugwirkungsgrad minimal ist und für das Betriebsprogramm Fahrzeugreserven von mehreren zusätzlichen Bussen erforderlich sind. Dann nämlich amortisieren sich die zusätzlichen Anlage- und Betriebskosten für Fahrleitungs- und Stromversorgungsanlagen, sowie Zusatzkosten an den Fahrzeugen durch den Trolleybetrieb gegenüber den Kosten für das Vorhalten zusätzlicher Reservefahrzeuge und schlechter Personal- und Fahrplanwirkungsgrade sehr schnell.

Wie schon im Fall a) beschrieben, bewirkt der mögliche Energieaustausch zwischen den Fahrzeugen über die Fahrleitungsanlage insgesamt geringere Energiekosten und im Vergleich kleinere Energiespeicher auf den Fahrzeugen. Die vorgenannten Argumente fließen in die Bewertungsfaktoren „Betriebsstabilität“, „Betriebskosten“ und „Nachhaltigkeit“ positiv gegenüber dem Ohne-Fall (E-Bus mit Depot- und Gelegenheitsladung) ein. Die Infrastrukturkosten, sowie die Beschaffungskosten müssen durch die zusätzlichen Anlagen und Fahrzeugausrüstungen schlechter bewertet werden, der „Return-of-Invest“ ergibt sich aber aus der entsprechend positiven Bewertung der Einflussfaktoren, wie „Betriebsstabilität“, sowie „Eignung bzw. Verbesserung des Betriebsprogramms“. Die Architektonische Wirkung wird im Mit-Fall aufgrund der partiell zu installierenden Fahrleitungsanlage als schlechter bewertet, aufgrund des hybriden Grundkonzeptes besteht eine gewisse Wahlfreiheit, die Fahrleitung von sensiblen Plätzen fernzuhalten.

Mining-Trucks

Die Aufgabe sei wie folgt beschrieben: Im Bergbau oder Tagebau muss eine sehr große Menge an Rohstoffen gewonnen und gefördert werden. Dabei ist die Strecke zwischen Abbau und Verarbeitung bzw. Verladung als ausgesprochene Punkt-zu-Punkt-Verbindung charakterisiert. Die Punkt-zu-Punkt-Verbindung ist zudem topographisch schwierig und stellt – was Leistungsfähigkeit (Förderleistung), Verfügbarkeit und Energiekosten betrifft – einen Kernprozess im gesamten Logistikprozess dar. Aufgrund der Förderleistung und des Abbaugeländes sind die LKWs („Mining Trucks“) ohnehin mit E-Antrieben versehen, verfügen nur (wegen der Flexibilität in einem ständig wandernden Abbaubereich) über einen Dieselgenerator oder einen Batteriespeicher.

Da die Leistungsabgabe der vorgenannten „Energiequellen“ an Bord naturgemäß begrenzt ist, andererseits der o.g. Punkt-zu-Punkt-Verkehr im Abbau immer mit Höhenüberwindung verbunden ist, bietet sich eine Fahrleitungsanlage geradezu an:

- Trolleybetrieb ist eine nur kleine Ergänzung zum bestehenden Fahrzeugkonzept
- Hohe Leistungsbereitstellung für Bergfahrten
- Hohe Rückspeisegrade und damit große energetische Gesamtwirkungsgrade durch die Rückspeisung talfahrender (ggf. zusätzlich Abraum förrender) LKWs
- Geringe Betriebskosten wegen Schonung des Dieselgenerators bzw. wegen der Möglichkeit geringere Batterieleistungen zu installieren (in-Motion-Charging)
- Verzicht auf zusätzliche lokale Batterienachladepunkte neben der linearen Ladung durch die Fahrleitung

Die o.g. Vor- und Nachteile berücksichtigend wurden die Einflussfaktoren wie „Betriebsstabilität“, sowie „Eignung bzw. Verbesserung des Betriebsprogramms“ entsprechend positiv bewertet, ebenso die „Betriebskosten“ wegen der wesentlich energieärmeren Betriebsweise ohne Fahrleitung. Lediglich die Infrastrukturkosten mussten aufgrund der zusätzlich zu installierenden Fahrleitungsanlage entsprechend negativ bewertet werden. Als Mit-Fall wurde den Bewertungen ein Versorgungsnetz mit Fahrleitungslücken, und als Ohne-Fall der konventionelle Betrieb ohne Fahrleitung zugrunde gelegt.

eHighway



Abbildung 30: eHighway-Versuchsanlage auf der Autobahn A1 – Foto: U. v. Stockhausen

Die Aufgabe sei wie folgt beschrieben und ähnelt der Bewertung bei den Mining Trucks, sowie dem Fall b) bei den Trolleybussen. Im Vergleich fällt aber die Bewertung der Infrastrukturkosten und der Fahrzeugkosten schlechter aus, da die heute hoch standardisierten Nutzfahrzeuge bei dieser Betriebsweise zusätzlich Fahrleitungs- und Energieversorgungsanlagen erfordern würden, sowie im LKW das elektrische Antriebssystem mit einem entsprechend leistungsfähigem Batteriesystem erweitert werden muss. Vorteile schlagen bei den Punkten „Verbesserung des Betriebsprogramms“ und bei „Nachhaltigkeit“ zu Buche. Ebenso wurde unter dem Kriterium „Förderfähigkeit“ eine entsprechende Bewertung vorgenommen – in der Annahme, dass diese bei großformatiger Fortführung des Programms eine entsprechend positiv wirkende Rolle spielen wird.

Verzeichnis der Abkürzungen

AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
AGT	Aufgabenträger
BEMU	Batterie-Elektrischer Triebwagen bzw. Triebwagen mit Energiespeicher
EIU	Eisenbahn-Infrastruktur-Unternehmen
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
FL	Fahrleitung
FV	Fernverkehr
LCC	Life Cycle Costs (Lebenszykluskosten)
OL	Fahrleitung
ÖPNV	Öffentlicher Personen-Nahverkehr (Schienenverkehr in Städten, unterliegt i.d.R. dem PBefG; Infrastruktur, Fahrzeuge und Betrieb i.d.R. in einer Hand)
PBefG	Personenbeförderungsgesetz
SPNV	Schienenpersonen-Nahverkehr (Schienenverkehr auf EIU außerhalb von Städten, unterliegt i.d.R. dem AEG)
UW	Unterwerk zur Umformung und Bereitstellung der Energie an der FL
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfung



Abbildung 31: Stadtbahn Freiburg – Foto: U. v. Stockhausen

Über die Energietechnische Gesellschaft im VDE (VDE ETG)

Die Energietechnische Gesellschaft im VDE (VDE ETG) bündelt mit über 9.000 Mitglieder die Fachkompetenz der Energietechnik von der Erzeugung, Übertragung, Verteilung bis hin zu den vielfältigen Anwendungsfeldern. Das umfangreiche Expert*innenwissen der rund 300 ehrenamtlichen Mitarbeiter*innen aus Industrie, Forschung, Versorgungsunternehmen, Hochschulen und Behörden, die in Fachbereichen, Fachausschüssen und Arbeitskreisen mitwirken, bildet die technisch-wissenschaftliche Basis für Veranstaltungen und Publikationen der Energietechnischen Gesellschaft im VDE.

Mehr Informationen unter <https://www.vde.com/etg>

Über den VDE

Der VDE, eine der größten Technologie-Organisationen Europas, steht seit mehr als 130 Jahren für Innovation und technologischen Fortschritt. Als einzige Organisation weltweit vereint der VDE dabei Wissenschaft, Standardisierung, Prüfung, Zertifizierung und Anwendungsberatung unter einem Dach. Das VDE Zeichen gilt seit mehr als 100 Jahren als Synonym für höchste Sicherheitsstandards und Verbraucherschutz.

Wir setzen uns ein für die Forschungs- und Nachwuchsförderung und für das lebenslange Lernen mit Weiterbildungsangeboten „on the job“. Im VDE Netzwerk engagieren sich über 2.000 Mitarbeiter*innen an über 60 Standorten weltweit, mehr als 100.000 ehrenamtliche Expert*innen und rund 1.500 Unternehmen gestalten im Netzwerk VDE eine lebenswerte Zukunft: vernetzt, digital, elektrisch.

Wir gestalten die e-diale Zukunft.

Sitz des VDE (VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik e.V.) ist Frankfurt am Main. Mehr Informationen unter www.vde.com

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.

Merianstraße 28
63069 Offenbach am Main
Tel. +49 69 6308-0
service@vde.com

VDE