

ATTRACTIVE

Autonomous Train TRansponder Alerting

Cross Track Intercepting VEHICLES

Schlussbericht



Bearbeiter: Prof. Dr. Martin Cichon, Carolin Lang,
Lukas Leicht (KIT)
Dr. Thomas Strang, Dr. Andreas Lehner (IoW)
Meet Modi, Marc Aulenkamp (PBV)

FKZ: 01F1190A (KIT)
01F1190B (IoW)
01F1190C (PBV)

Karlsruhe, März 2026

Hinweis zur Sprachform

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung weiblicher und männlicher oder Partizipien verwendender Sprachformen verzichtet, sofern es sich nicht um bestimmte Personen, sondern um Rollen handelt. Sämtliche Rollenbezeichnungen gelten selbstredend für Personen aller Geschlechter. Wir möchten die in den Texten des Berichts verwendete Form als geschlechtsneutral und wertfrei verstanden wissen.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	1
1.1	Aufgabenstellung.....	1
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde.....	6
1.4.1	Allgemein	6
1.4.2	Induktive Energieübertragung.....	9
1.4.3	Netzunabhängige Energieversorgungslösungen	9
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
2	Eingehende Darstellung	13
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	13
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	37
2.3	Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	39
2.4	Voraussichtlicher Nutzen.....	41
2.5	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	43
2.6	Erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses	44
A	Anhang	45
B	Abbildungsverzeichnis	47
C	Tabellenverzeichnis	49
D	Literaturverzeichnis	51

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ein Bahnübergang definiert sich gemäß Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) § 11 als „[...] höhengleiche Kreuzungen von Eisenbahnen mit Straßen, Wegen und Plätzen. [...]“.

Nach Angaben der Deutschen Bahn gab es im Jahr 2024 in Deutschland 13.540 Bahnübergänge. Von diesen verfügen lediglich zwei Drittel über eine technische Sicherungseinrichtung. [1]

Eine technische Sicherungseinrichtung bedeutet, dass der Übergang mit Halb- oder Vollschranken, mit Lichtzeichen oder einer Kombination von diesen ausgestattet ist. Gerade auf Nebenstrecken gibt es Bahnübergänge, die nichttechnisch gesichert sind. Das liegt daran, dass gemäß EBO auf eine technische Sicherung verzichtet werden darf, wenn der Bahnübergang wenig frequentiert ist. Um trotzdem eine ausreichende Sicherheit zu gewährleisten, müssen querende Züge abhängig von den Sichtbedingungen ihre Geschwindigkeit reduzieren und ihren Anspruch auf Vorrang gegebenenfalls mittels hörbarer Signale (Pfeifen) einfordern. [2]

Diese Art der Sicherung bringt Nachteile mit sich. Durch die notwendigen Brems- und Beschleunigungsvorgänge steigt der Energieverbrauch der passierenden Züge. Außerdem werden Anwohner durch die erhöhten Lärmemissionen – vor allem das Pfeifen der Fahrzeuge – gestört. [3] Des Weiteren ist die Wahrnehmung herannahender Züge sowie die daraus abzuleitende Handlung des Anhaltens durch Straßenverkehrsteilnehmer zwar rechtlich gegeben, aber faktisch häufig nicht oder nicht rechtzeitig umgesetzt und mündet in eine zu hohe Anzahl an Bahnübergangsunfällen. Im Jahr 2024 lag diese Anzahl bei 153 gemäß der Statistik der Bundestelle für Eisenbahnunfalluntersuchung [4]. Für zukünftige Automatisierung und Reaktivierung regionaler Bahnlinien erscheint die bisherige Art der nichttechnischen Sicherung ungeeignet.

Eine technische Unterstützung der nichttechnisch gesicherten Übergänge ist mit hohen finanziellen Hürden verbunden. Ein wesentlicher Kostentreiber sind dabei die Erdarbeiten, die im Zuge eines Netzanschlusses und der Verlegung der Sensorik anfallen. [5]

Deshalb wird im Rahmen des Projekts ATTRACTIVE ein kostengünstiger Ansatz untersucht, um solche Bahnübergänge technisch zu erweitern. Es geht darum, das Verhalten auf der Straßenseite positiv zu beeinflussen. Die entwickelte technische Unterstützung des Bahnübergangs hat zum Ziel, die Vorrangregelung von Eisenbahnfahrzeugen, wie sie sich aus den in Deutschland geltenden Regelwerken ergeben, für die Straßenverkehrsteilnehmer klarer ersichtlich werden zu lassen und gleichzeitig den Triebfahrzeugführern ein höheres Gefühl der Sicherheit durch Beachtung des Vorrangs zu geben.

Im Vorhaben wird daher eine innovative Assistenzfunktion zur Erhöhung der Sicherheit an bisher nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen an eingleisigen Strecken aufgebaut und deren Vor- und Nachteile wissenschaftlich untersucht. Hiermit wird vor allem die Umsetzbarkeit und Wirksamkeit eines in einer EBA-Studie [5] identifizierten Ansatzes erprobt. Darin geht es um die straßenseitige technische Unterstützung an Bahnübergängen.

Das Konzept sieht vor, StVO-konforme temporär aufgestellte Lichtsignalanlagen an einem Bahnübergang mithilfe von Transpondern auf den Schienenfahrzeugen zu aktivieren. Dadurch kann auf eine ortsfeste kabelgebundene Informationsübertragung verzichtet werden. Um darüber hinaus auch auf einen Netzanschluss verzichten zu können, soll im Rahmen des Projekts eine geeignete Energieversorgungslösung untersucht werden.

Übergeordnetes Ziel ist also der Nachweis der technischen Umsetzbarkeit des Konzepts im bestehenden Rechtsrahmen an Bahnübergängen von Nebenbahnen mit geringem straßenseitigen Verkehrsaufkommen. Dieses Ziel soll mit Daten über das tatsächliche Verkehrsaufkommen an den ausgewählten Bahnübergängen unterlegt werden, welche aus Datenschutzgründen mithilfe von Wärmebild-Kameras gewonnen werden.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Verbundprojekt wurde durch das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) gemeinsam mit den Unternehmen aus der Wirtschaft „Intelligence on Wheels“ (IoW) und „Peter Berghaus GmbH“ (PBV) als Konsortialpartner durchgeführt. Die Nebenstrecke Traunstein-Ruhpolding in Bayern diente als Versuchstrecke für das Vorhaben. Das primäre Eisenbahnverkehrsunternehmen für diese Strecke ist die Bayerische Regiobahn (BRB), die als assoziierter Partner das Projekt unterstützt hat.

Die erforderlichen fachlichen Ressourcen waren bei den Konsortialpartnern vorhanden und für das Projekt verfügbar. Projektbezogene Dienstreisen wurden über die bewilligten Mittel finanziert. Aufgrund spezifischer Anforderungen an die Schnittstellen des ATTRACTIVE-Ampelsystems wurde von IoW eine Adaptierung ihrer bestehenden Transponderlösung vorgenommen. Bei der Energieversorgungslösung wurde auf Komponenten des Ampelherstellers Peter Berghaus zurückgegriffen. Die für das Energieversorgungskonzept erforderlichen Mieten der Photovoltaikmodule sowie der Brennstoffzelle wurden über Projektmittel finanziert. Bei der Erstellung des Projektvideos wurde das Projektteam vom „Zentrum für Mediales Lernen“ des KIT unterstützt, das ebenfalls aus den bereitgestellten Projektmitteln finanziert wurde.

Für die Bearbeitung der einzelnen Aufgaben konnte auf Erfahrungen aus bisherigen Arbeiten des KIT im Bereich Energieversorgung von Schienenfahrzeugen und auf das vorhandene Systemwissen zu Schienenfahrzeug- und Bahnsystemtechnik zurückgegriffen werden. Die notwendige Softwareplattform zur Durchführung der Energieverbrauchssimulationen war bereits im Bestand des KIT.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben ATTRACTIVE startete zum 1. Juli 2024, wobei die geplante Projektlaufzeit sich auf 12 Monate bezog. Insgesamt umfasste das Projekt die folgenden sechs Aufgabenpakete:

- AP 1: Projektmanagement
- AP 2.1: Installations- und Vorbereitungsarbeiten Schienenfahrzeug
- AP 2.2: Interface-Entwicklung Transceiver-LSA
- AP 2.3: Installations- und Vorbereitungsarbeiten Bahnübergang
- AP 3: Betrieb und Auswertung
- AP 4: Dissemination und Exploitation

Das erste Arbeitspaket *Projektmanagement* umfasste dabei die Koordination des gesamten Projektablaufs sowie die organisatorische Abstimmung zwischen allen erforderlichen Stakeholdern während der gesamten Projektdauer. Hauptverantwortlich für dieses Arbeitspaket war das KIT als Konsortialführer. Das Arbeitspaket beinhaltete darüber hinaus auch die Organisation von Veranstaltungen sowie die Leitung der regelmäßigen Abstimmungstreffen, die in der Regel zweiwöchentlich stattgefunden haben. Außerdem war ein weiterer Bestandteil des Arbeitspakets die Berichterstattung und Öffentlichkeitsarbeit. Als Ergebnis liegt die Projektdokumentation vor.

Das zweite Arbeitspaket ist aufgeteilt in drei Unterarbeitspakete. Für das Arbeitspaket 2.1 *Installations- und Vorbereitungsarbeiten Schienenfahrzeug* ist die Firma Intelligence on Wheels hauptverantwortlich. Das Arbeitspaket umfasst die Anpassung und Bereitstellung von Transpondereinheiten für zwei Schienenfahrzeuge sowie die Organisation des Einbaus der Transpondereinheiten in Zusammenarbeit mit der BRB. Außerdem wird für das ATTRACTIVE-System eine digitale Streckenkarte des Schienennetzes erstellt. Für den Betrieb des Systems ist die Beantragung einer Funklizenz notwendig, was ebenfalls Teil des Arbeitspakets ist. Ein weiterer Bestandteil ist außerdem die Konzipierung und Auslegung einer geeigneten Energieversorgungslösung des Systems von Seiten des KIT. Das Ergebnis des Arbeitspakets sind die betriebsfähigen Transpondereinheiten in zwei Zügen, die digitale Streckenkarte sowie die erforderliche Funklizenz.

Das Arbeitspaket 2.2 *Interface-Entwicklung Transceiver-LSA* beinhaltet die Entwicklung einer Funkschnittstelle an den mobilen Lichtsignalanlagen für die an den Fahrzeugen verbauten Transpondereinheiten. Hauptverantwortlich für dieses Arbeitspaket ist Peter Berghaus GmbH in Zusammenarbeit mit Intelligence on Wheels. Im Rahmen des Arbeitspakets erfolgt zudem eine Entwicklung einer geeigneten Vorgehensweise zur Erfassung und Übermittlung von Straßenverkehrsdaten. Als Ergebnis liegt am Ende des Arbeitspakets eine funktionsfähige Schnittstelle zwischen den mobilen Lichtsignalanlagen und den Transpondereinheiten in den Zügen vor.

Hauptverantwortlich für das Arbeitspaket 2.3 *Installations- und Vorbereitungsarbeiten Bahnübergang* ist ebenfalls die Firma Peter Berghaus GmbH. Es beinhaltet die Ausstattung ausgewählter Bahnübergänge entlang der Versuchstrecke mit den mobilen Lichtsignalanlagen. Für die geplanten Verkehrszählungen werden automatisiert auswertende Kameras an ausgewählten Bahnübergängen in Betrieb genommen. Die gesammelten Verkehrsdaten werden an ein Portal angebunden und übermittelt. Das Ergebnis des Arbeitspakets sind die ausgestatteten Bahnübergänge mit den betriebsbereiten Lichtsignalanlagen.

Im dritten Arbeitspaket *Betrieb und Auswertung* werden Straßenverkehrsteilnehmer mit standardisierten Fragebögen hinsichtlich ihrer Meinung zu einer technischen Unterstützung von Bahnübergängen befragt. Zudem sollen die Befolgungsraten der Straßenverkehrsteilnehmer untersucht werden. Das Arbeitspaket beinhaltet außerdem die Konzipierung, die Untersuchung und den Test verschiedener netzunabhängiger Energieversorgungslösungen für das ATTRACTIVE-System. Außerdem muss der Betrieb der Lichtsignalanlagen an den Bahnübergängen koordiniert werden. Das Ergebnis des Arbeitspaketes sind Daten und Statistiken sowie die Auswahl einer geeigneten Energieversorgungslösung, wobei das KIT maßgeblich für das Arbeitspaket verantwortlich ist.

Das vierte und letzte Arbeitspaket ist die *Dissemination und Exploitation*. In diesem projektbegleitenden Arbeitspaket wird unter der Verantwortung des KIT wissenschaftlich, öffentlichkeitswirksam und vermarktungsvorbereitend die Projektergebnisse aufbereitet. Neben der Erstellung eines Projektvideos ist die Organisation der Abschlussveranstaltung zur Demonstration der Ergebnisse Bestandteil dieses Arbeitspakets. Als Ergebnis liegen am Ende des Arbeitspakets wissenschaftliche Publikationen, das Video sowie die Durchführung der Abschlussveranstaltung vor.

Außerdem wurden für die effektive Zielverfolgung im Projekt die folgenden Meilensteine festgelegt:

- M 1: Mindestens ein Fahrzeug ist ausgerüstet und funktional getestet (Ende Oktober 2024)
- M 2: Die Lichtsignalanlage ist an mindestens einem Bahnübergang aufgebaut und erfolgreich getestet (Ende Januar 2025)

Im Mai 2025 musste das Projekt kostenneutral bis Ende des Jahres 2025 verlängert werden. Dafür gab es mehrere Gründe, die auf externe, nicht vom Projektteam zu beeinflussende Faktoren zurückzuführen sind:

Zum Einbau der Transpondereinheiten in die Züge der BRB mussten diese dem laufenden Betrieb entnommen und in das BRB-Werk nach Augsburg überführt werden. Dies war von Seiten der BRB nicht vor Februar 2025 möglich. Somit war der Meilenstein M 1 erst im Februar 2025 erfüllt.

Außerdem erforderte der Betrieb der Transpondereinheiten in den Zügen ein externes Gutachten über deren Störfreiheit, eine sogenannte EMV06-Messung. Dieses Gutachten lag der BRB selbst erst im April vor und fiel erwartungsgemäß positiv aus (keine Störungen). Da noch eine abschließende Risikoabschätzung für den Betrieb der Transponder im Fahrgastbetrieb durch die BRB erforderlich war, bevor das System auf den Zügen in Betrieb genommen werden konnte, war ein Betrieb der Ampeln an der Strecke davor nicht sinnvoll.

Geplant war eine erste Inbetriebnahme des Systems am Bahnübergang Höpfling in Siegsdorf im Januar 2025, was dementsprechend auf April verschoben wurde. M 2 wurde im April 2025 erreicht, als das System mit abgedeckten Ampelköpfen funktional getestet wurde.

Dabei hat sich jedoch herausgestellt, dass der Eisenbahninfrastrukturbetreiber DB Regio-Netze weitere Prüfungen unterziehen und eine Einschätzung bezüglich des Betriebs der Lichtsignalanlage vornehmen muss, bevor eine Zustimmung zum öffentlichen Betrieb erteilt werden konnte. Die Ampeln an den übrigen Bahnübergängen konnten daher nicht wie

geplant aufgestellt und in Betrieb genommen werden, bis die Zustimmung durch den Infrastrukturbetreiber erfolgt ist. Zusätzlich war eine weitere Einschätzung durch das Eisenbahn-Bundesamt notwendig, die jedoch vergleichsweise kurzfristig erteilt wurde.

Der detaillierte Projektzeitplan kann aus dem Anhang entnommen werden.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde

1.4.1 Allgemein

Wie bereits in *1.1 Aufgabenstellung* einleitend beschrieben, gibt es in Deutschland über 13.540 Bahnübergänge. Hierbei wird grundsätzlich in zwei Arten der Bahnübergangssicherung unterteilt: Technisch gesicherte und nichttechnisch gesicherte Übergänge. Wann eine technische Sicherung notwendig ist, hängt vom täglichen kreuzenden Straßenverkehrsaufkommen ab und ist in der EBO festgelegt [6].

Bei Bahnübergängen mit technischer Sicherung werden die Straßenverkehrsteilnehmer durch technische Anlagen visuell – also durch Lichtzeichen und gegebenenfalls zusätzlich durch Schranken – auf ein sich näherndes Schienenfahrzeug aufmerksam gemacht [7].

Die Aktivierung dieser Bahnübergänge erfolgt oftmals über am Gleis verbaute Sensoren, die durch aufwändige Erdarbeiten installiert werden. Dies und die nach Standards von Eisenbahnnormen erforderliche Technik trägt dazu bei, dass die Kosten für die klassischen technischen Sicherungsmaßnahmen eines einzelnen Bahnübergangs hoch sind. In der Regel ist mit über 500.000 EUR zu rechnen. Diese Investition kann für die vielen wenig frequentierten Bahnübergänge nicht immer geleistet werden, sodass diese oftmals nicht-technisch gesichert bleiben. [8]

Bahnübergänge ohne technische Sicherung hingegen werden lediglich durch das Aufstellen von Andreaskreuzen und ankündigende Bakern gekennzeichnet, welche die Vorrangregelung der Schienenfahrzeuge anzeigen. Die Sicherung erfolgt hierbei eigenverantwortlich durch die Straßenverkehrsteilnehmer mittels Übersicht auf die Strecke. Dafür werden notwendige Sichtflächen freigehalten. Falls dies nicht möglich ist, kündigt sich das Schienenfahrzeug über Pfeifen in festgelegten Abständen an. [7], [9]

Ein zentraler Nachteil nichttechnisch gesicherter Bahnübergänge besteht darin, dass Züge diese häufig nur mit verminderter Geschwindigkeit passieren dürfen [6]. Des Weiteren ist die Wahrnehmung herannahender Züge sowie die daraus abzuleitende Handlung des Anhaltens durch Straßenverkehrsteilnehmer zwar rechtlich gegeben, aber faktisch häufig

nicht oder nicht rechtzeitig umgesetzt und mündet in eine zu hohe Anzahl an 153 Bahnübergangsunfällen im Jahr 2024 [4]. Für zukünftige Automatisierung und Reaktivierung regionaler Bahnlinien erscheint die bisherige Art der nichttechnischen Sicherung ungeeignet. Ferner werden durch das Pfeifen Anwohner und Tierwelt mit hohen Lärmemissionen belastet. In den folgenden beiden Abbildungen sind die unterschiedlichen Ausführungen eines Bahnübergangs dargestellt.



Abbildung 1: Technisch gesicherter Bahnübergang mit Vollschraken und Lichtsignalanlagen [10]



Abbildung 2: Nichttechnisch gesicherter Bahnübergang (eigenes Foto)

Mit welcher technischen Sicherung ein Bahnübergang ausgestattet werden muss, ergibt sich in Deutschland aus der EBO. Hierbei hängt davon ab, ob es sich um eine ein- oder mehrgleisige Strecke handelt, wie schnell das Schienenfahrzeug auf dem Streckenabschnitt fahren darf und von wie vielen Straßenverkehrsteilnehmern der Bahnübergang am Tag frequentiert wird. So darf ein Bahnübergang nichttechnisch gesichert bleiben, wenn dieser an einer eingleisigen Strecke liegt. Die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs darf 20 km/h beziehungsweise an Feld- und Waldwegen 60 km/h nicht überschreiten und es darf höchstens mäßiger Straßenverkehr vorliegen. Das heißt, es kreuzen pro Tag bis zu 2500 Fahrzeuge. [6]

Die technischen Anforderungen werden bei bundeseigenen Strecken durch die Technischen Richtlinien der Deutschen Bahn geregelt. Im Besonderen gilt für Bahnübergänge die DB-Richtlinie 815 „Bahnübergänge planen und Instand halten“. Diese wurde vom Eisenbahn-Bundesamt (EBA) als technisches Regelwerk anerkannt. [11]

Für nichtbundeseigene Bahnen gelten die Anforderungen in der „Bahnübergangsvorschrift für nichtbundeseigene Eisenbahnen“ (BÜV-NE). Diese befinden sich häufiger auf Nebenstrecken. In der BÜV-NE werden zwar Anforderungen an die Auslegung der Stromversorgung gegeben, dies gilt jedoch ausschließlich für eine Stromversorgung mit Netzanschluss. Die Versorgung eines Sicherungssystems ohne Netzanschluss wird in der Vorschrift nicht weiter berücksichtigt. [12]

Im Jahr 2019 wurden in Teilen des mFUND-Projekts „Rail2X - Smart Services“ Ansätze zur Verbesserung der Situation an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen gegeben. Hierbei wird eine Kommunikation zwischen Straßenfahrzeug und Bahnübergangsanlage beschrieben. Für dieses Konzept müssen allerdings alle Straßenfahrzeuge mit der erforderlichen Technik ausgerüstet sein, was nachteilig und in absehbarer Zeit nicht umsetzbar ist. [13]

Das im Jahr 2026 vorgestellte PeriLight-System versucht, durch Lichteffekte die Straßenverkehrsteilnehmer – insbesondere Autofahrer – zu mehr Aufmerksamkeit anzuregen. Diese konnte selbst in speziellen Probandensituationen jedoch nur bei der Hälfte der Fahrer erhöht werden. [5]

Bisherige mFUND-Projekte zu Steuerungen von Lichtsignalanlagen sind beispielsweise „KI4LSA“ und „KI4PED“. Hierbei stand jedoch ausschließlich der straßenseitige Verkehr im Fokus. [14], [15]

Im Rahmen des Projekts ALMODA wurde in einem Anwendungsfall ebenfalls ein Bahnübergang mit einer mobilen Straßenverkehrs-Lichtsignalanlage gesichert. Hierbei liegt der Fokus jedoch auf ortsfester Technik zur Erfassung vorbeifahrender Schienenfahrzeuge. Die Lichtsignalanlage wird in ALMODA von einer Sensorik angesteuert, die insbesondere unabhängig von bahnspezifischer Leit- und Sicherungstechnik ist. Es handelt sich um den komplementären Ansatz zu dem in ATTRACTIVE, wo keine ortsfeste Sensorik sondern Transponder in den Schienenfahrzeugen zur Ansteuerung der LSA verwendet werden. Das Projekt ALMODA wurde ebenfalls vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr gefördert. [16]

1.4.2 Induktive Energieübertragung

Eine Möglichkeit, ein System mit Energie zu versorgen, ist die induktive Energieübertragung. Hierbei erzeugt eine Primärspule durch einen Wechselstrom ein zeitlich veränderliches Magnetfeld. Dieses koppelt magnetisch mit einer Sekundärspule, in der gemäß Faradayschem Induktionsgesetz eine Spannung induziert wird. Die Effizienz der Übertragung hängt dabei wesentlich von Stromstärke, Frequenz und der Kopplung der Spulen ab. Die Energieübertragung erfolgt kontaktlos über das Magnetfeld zwischen der Sender- und der Empfangsspule. [17]

1.4.3 Netzunabhängige Energieversorgungslösungen

Es existiert bereits Forschung bezüglich netzunabhängiger Energieversorgung von Bahnübergängen. In einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2021 von der Cardiff University zusammen mit Network Rail in Großbritannien werden unterschiedliche Energy-Harvesting-Möglichkeiten miteinander verglichen. Darin soll eine Lichtsignalanlage elektrisch versorgt

werden, um einen nichttechnisch gesicherten Bahnübergang aufzurüsten. Die erste vorgestellte Lösung beinhaltet ein System mit Solarmodulen, einer Methanol-Brennstoffzelle sowie Blei-Säure-Batterien. Das zweite System nutzt zwei Solarmodule, eine Windturbine und eine Natrium-Nickel-Chlorid-Batterie. Die Aktivierung der Lichtsignalanlage erfolgt über konventionelle Achszähler. Es wird mit einem Energiebedarf von etwa 1,3 kWh/Tag gerechnet. [18]

Im Jahr 2024 wurde von der Tashkent State Transport University in Usbekistan ein Energieversorgungskonzept bestehend aus Photovoltaik in Kombination mit einem Energiespeicher zur Versorgung von Eisenbahnsignalen vorgestellt. Der Fokus lag hierbei auf einer höheren Zuverlässigkeit der Energieversorgung. Die Leistungsfähigkeit der Photovoltaiksysteme wurde für zwei Regionen in Usbekistan analysiert, wobei sowohl ein autarker als auch ein netzgekoppelter Betrieb betrachtet wurde. Es wird von einem Leistungsbedarf von 600 W für die Signale ausgegangen und einem Energiespeicher mit einer Kapazität von 3 kWh. Für die Solarmodule ist eine Fläche von 0,5 m² vorgesehen, womit die Autoren eine jährliche Ausbeute von etwa 938 kWh erwarten. [19]

Außerdem werden mit dem Industrial Area Crossing Signal System von O'Conner Engineering Inc. bereits Bahnübergangssignale für Industriegebiete in den USA kommerziell vertrieben. Diese werden mit Hilfe von Solarmodulen in Kombination mit einer Batterie mit Energie versorgt. Die dort eingesetzten Solarmodule erbringen eine Leistung von 90 W bis 140 W. Die verwendeten Batterien sind mit einer Kapazität von 110 Ah angegeben. Die Angabe zur Klemmenspannung fehlt, jedoch werden andere Komponenten des gleichen Systems mit 12 V Gleichspannung betrieben. [20]

Die Forschung zur induktiven Energieübertragung konzentriert sich vor allem auf Straßenfahrzeuge, die durch den Fahrweg geladen werden. Unterschieden wird zwischen stationärem Laden im Stand und dynamischem Laden während der Fahrt [21]. Für leichte Nutzfahrzeuge existieren Standards wie SAE J2954 sowie IEC 61980-1 bis -3 [22]. Für den Schienenverkehr liegen bislang keine normativen Vorgaben vor. Die benötigte fahrzeugseitige Infrastruktur wird durch Ladepads mit einer Leistung von bis zu 20 kW realisiert, wobei die Anzahl durch den Bauraum begrenzt ist [23].

Mehrere Forschungsprojekte evaluieren die technische Umsetzbarkeit induktiver Energieübertragung im Straßenverkehr. Im Projekt FABRIC wurden dynamische Ladevorgänge bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten untersucht – mit Wirkungsgraden von 62 % bei 30 km/h und 60 % bei 50 km/h. [24]

In Busan (Südkorea) wurde das quasi-dynamische Laden einer Straßenbahn mit Gummi-
bereifung erprobt. Auf bis zu 250 m langen Abschnitten konnten Übertragungsleistungen

bis 1 MW realisiert werden. Die Effizienz variiert jedoch stark mit der übertragenen Leistung – oberhalb von 350 kW steigt sie auf über 80 % bei einem Spulenabstand von 60 mm. [25] Projekte, in denen der Energiefluss umgekehrt wird und ein statisches System während der Vorbeifahrt geladen wird, sind nicht bekannt.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Bearbeitung der Arbeitspakete und der Erreichung der Arbeitsziele waren ein regelmäßiger Austausch und eine enge Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern während der gesamten Projektlaufzeit erforderlich. Zum fachlichen Austausch sowie der Bewertung von Zwischenergebnissen in der laufenden Forschung wurden regelmäßig Jour Fixes sowie Telefonkonferenzen durchgeführt. Bei Bedarf wurden außerdem bilaterale Gespräche zum fachlichen Abgleich der Projektarbeit durchgeführt.

Zum Austausch von Informationen wurde zwischen den Projektpartnern eine Datenaustauschplattform in Form einer Nextcloud geschaffen. Dadurch konnten Informationen schnell und effizient verteilt werden. Das Projektmanagement wurde hinsichtlich des Austausches, der Verwaltung und der Ablage von Daten, Zwischenergebnissen, Berichten und administrativen Unterlagen vereinfacht.

Des Weiteren war ein intensiver Austausch mit verantwortlichen Behörden (Eisenbahn-Bundesamt) sowie weiteren Stakeholdern wie den Gemeinden vor Ort oder das verantwortliche Eisenbahninfrastrukturunternehmen DB RegioNetz erforderlich. Besonders hervorzuheben ist hierbei das außergewöhnliche Engagement der Gemeinde Siegsdorf, die das Vorhaben maßgeblich unterstützt hat.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die erreichten Ziele aufgeschlüsselt nach Arbeitspaket dargestellt.

AP 1: Projektmanagement

Das erste Arbeitspaket *Projektmanagement* umfasst die Koordination des gesamten Projektablaufs sowie die organisatorische Abstimmung zwischen allen erforderlichen Stakeholdern. Das Arbeitspaket wurde begleitend über die gesamte Projektlaufzeit bearbeitet. Da das Projekt aufgrund von externen Gründen kostenneutral verlängert werden musste, endete das Arbeitspaket erfolgreich am 31.12.2025. Das KIT als Konsortialführer verantwortete dieses Arbeitspaket. Neben der Organisation von Treffen vor Ort leitete das KIT die regelmäßigen Abstimmungstreffen. Diese haben in der Regel online im zweiwöchigen Abstand stattgefunden. Neben der projektbegleitenden Dokumentation ist außerdem Bestandteil des Arbeitspakets die Koordination und Erstellung des Abschlussberichts. Dieser liegt mit dem Projektende vor.

AP 2.1 Installations- und Vorbereitungsarbeiten Schienenfahrzeug

Für das Arbeitspaket 2.1 *Installations- und Vorbereitungsarbeiten Schienenfahrzeug* war die Firma Intelligence on Wheels federführend. Dabei umfasst das Arbeitspaket folgende Inhalte: Die Entwicklung von Transpondereinheiten für zwei Schienenfahrzeuge sowie die Organisation des Einbaus der Transpondereinheiten in Zusammenarbeit mit der BRB. Außerdem wird für das ATTRACTIVE-System eine digitale Streckenkarte des Schienennetzes erstellt. Für den Betrieb des Systems ist die Organisation einer Funklizenz notwendig, was ebenfalls Teil des Arbeitspakets war. Ein weiterer Bestandteil ist die Konzipierung und Auslegung einer geeigneten Energieversorgungslösung des Systems von Seiten des KIT. Das Ergebnis des Arbeitspakets sind die funktionsfähigen Transpondereinheiten, die digi-

tale Streckenkarte sowie die erforderliche Funklizenz. Außerdem liegt ein Energieversorgungskonzept vor. Für die Bearbeitung des Arbeitspakets waren die Projektmonate eins bis fünf vorgesehen.

Bahnübergangsauswahl

Mit dem Start des Projekts wurde parallel dieses Arbeitspaket bearbeitet. Dafür erfolgte zunächst die Auswahl der Bahnübergänge an der Versuchstrecke. Für die Auswahl fand am 25. Juli 2024 eine gemeinsame Streckenbeschauung statt. Beteiligt waren hier Vertreter des Projektkernteam. Die Strecke wurde schienen- und straßenseitig abgefahren und die Bahnübergänge beziehungsweise Reisendenübergänge teilweise zu Fuß erschlossen. Die Bahnstrecke zwischen Traunstein und Ruhpolding verfügt über 21 Bahnübergänge, von denen 12 nichttechnisch gesichert sind. Anhand von vorher festgelegten Kriterien wurden diese anschließend hinsichtlich einer möglichst breiten Abdeckung von Herausforderungen bewertet.

Insgesamt wurden die Bahnübergänge anhand der folgenden Kriterien klassifiziert:

- Verkehrsart (Fußweg, Radweg, landwirtschaftlicher Verkehr...)
- Möglicher Empfang für eine Datenübertragung
- Qualität der Straße (asphaltiert, Feldweg, ...)
- Übersichtlichkeit / Einsehbarkeit aus Sicht des Triebfahrzeugführers
- Übersichtlichkeit / Einsehbarkeit aus Sicht des Straßenverkehrsteilnehmers
- Umgebung (Vegetation, Bebauung, etc.)
- Möglichkeiten für Energy-Harvesting

Von den insgesamt 12 nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen wurden 6 Bahnübergänge als besonders geeignet identifiziert. Ein Bahnübergang wurde zurückgebaut. Die restlichen Bahnübergänge wurden aufgrund von bestehender Übersichtlichkeit aus beiden Richtungen nicht weiter betrachtet. Für das Vorhaben als besonders relevant identifiziert wurden der Bahnübergang am „Schwimmbadweg“ (BÜ 5,2), der Bahnübergang am „Josefsweg“ (BÜ 5,3) sowie der Bahnübergang „Höpfling“ (BÜ 6,8). Die genauere Beschreibung kann der folgenden Tabelle 1 entnommen werden. Die Bahnübergänge befinden sich alle auf Gemeindegrund der Gemeinde Siegsdorf.

Tabelle 1: Auswahl Bahnübergänge Siegsdorf



Schwimmbadweg

- Einfache Kreuzung, einseitige Bebauung durch Wohnhäuser
- Radverkehr, verstärkt im Sommer
- Asphaltierte Straße
- Freie Fläche für PV-Module
- Einseitig schwer einsehbar
- Triebfahrzeugführer sehen Straßenverkehrsteilnehmer spät

Josefsweg

- 3-Wege-Kreuzung
- Altenheim in der Nähe (Luftlinie 60 m), Bebauung durch Wohnhäuser
- Beidseitig schwer einsehbar
- Weniger als 100 Schienenmeter vom Schwimmbadweg entfernt
- Freie Fläche für PV-Module vorhanden



Höpfling

- 3-Wege-Kreuzung, Brücke
- Radweg, privater, kommerzieller Verkehr
- Bahn-Haltestelle Höpfling
- Freie Fläche für PV-Module vorhanden
- Unfall am 11.04.22: Auto kollidiert mit Triebzug: Fahrerin übersieht Regionalzug

Konzipierung Energieversorgung

Als Untersuchungsort für die Analyse verschiedener Energy-Harvesting-Methoden wurde der Bahnübergang „Höpfling“ gewählt. Dieser befindet sich zwischen einer Brücke über den Fluss „Weiße Traun“ und einer T-Kreuzung zur Ruhpoldinger Straße. Südlich des Übergangs befindet sich die Haltestelle „Höpfling“, an der Züge aus beiden Richtungen halten. In Abbildung 3 kann die geografische Lage nachvollzogen werden.



Abbildung 3: Geografische Lage des Bahnübergangs „Höpfling“

Für die technische Unterstützung von Höpfling durch das ATTRACTIVE-System sind verschiedene Komponenten erforderlich. Das System basiert auf einer funkbasierten Kommunikation zwischen der fahrzeugseitigen Transpondereinheit und einer ortsfesten Steuereinheit. Nähert sich ein Zug dem Bahnübergang, so löst die Steuereinheit eine Primär-Lichtsignalanlage aus und schaltet sie nach erfolgter Überfahrt wieder ab. Zur vollständigen Absicherung des Übergangs werden zusätzlich 3 Sekundär-Lichtsignalanlagen eingesetzt, die das Signal der Primär-Einheit über Funk synchron übernehmen. Zur Reduzierung des Energieverbrauchs verfügt die Steuereinheit über einen Ruhemodus, der abends nach Überfahrt des letzten Zugs aktiv wird und morgens vor Überfahrt des ersten Zugs nach Fahrplan wieder abgeschaltet wird. Für die Energieverbräuche der benötigten Komponenten wird basierend auf Messungen an den prototypischen Komponenten von den in Tabelle 2 aufgeführten im Labor ermittelten Werten ausgegangen.

Tabelle 2: Energieverbräuche der betrachteten Komponenten

Komponente	Verbrauch im Leerlauf	Verbrauch im Betrieb
Steuereinheit tagsüber	28,7 W	32,6 W
Steuereinheit nachts	4,5 W	–
Primär-Lichtsignalanlage	6,6 W	7,8 W
Sekundär-Lichtsignalanlagen	$3 \cdot 4,2 \text{ W} = 12,6 \text{ W}$	$3 \cdot 5,4 \text{ W} = 16,2 \text{ W}$

Da die Energieverbräuche im Leerlauf und im Betrieb sowie tagsüber und nachts unterschiedlich sind, müssen plausible Annahmen getroffen werden, wann und wie lange die Bahnübergangssicherung ausgelöst wird und in den Ruhezustand geht. Zur Ermittlung des täglichen Energiebedarfs wurde das Kursbuch [26], [27] herangezogen, aus dem die Ankunftszeiten der Züge an der nahegelegenen Haltestelle „Höpfling“ abgeleitet wurden. Aufgrund des Fahrplans wurde angenommen, dass die Steuereinheit zwischen 05:30 Uhr und 23:30 Uhr aktiv ist und sich außerhalb dieser Zeiten im Ruhezustand befindet. Das entspricht einem Zeitraum von einer halben Stunde vor Passieren des ersten Zugs und einer halben Stunde nach Passieren des letzten Zugs. Darüber hinaus wird angenommen, dass jeder passierende Zug die Bahnübergangssicherung für 1 Minute aktiv hält. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass das dargestellte Lastprofil für alle Tage des Jahres repräsentativ ist. In Abbildung 4 kann das sich daraus ergebende Lastprofil über einen Tag nachvollzogen werden.

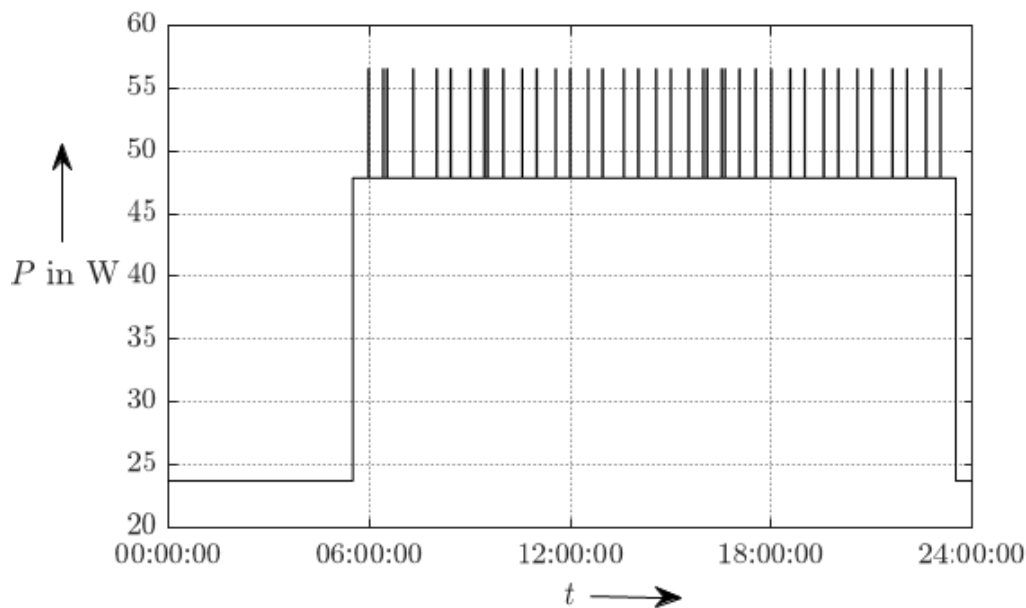


Abbildung 4: Lastprofil

Um das ATTRACTIVE-System netzunabhängig mit Energie versorgen zu können, kommen unterschiedliche Energieversorgungskonzepte in Frage. Ein Forschungsprojekt am Institut des KIT befasst sich mit der dynamischen induktiven Ladung von elektrisch angetriebenen Bussen. Die Idee für die ATTRACTIVE-Lösung war hierbei zunächst, den Energiefluss umzukehren und die Infrastruktur, also die mobile Lichtsignalanlage, durch ein vorbeifahrendes Fahrzeug zu laden. Es besteht die Möglichkeit, entweder durch die vorbeifahrenden Schienenfahrzeuge oder durch vorbeifahrende Straßenfahrzeuge zu laden.

Zunächst wurde theoretisch die induktive Energieübertragung durch Schienenfahrzeuge untersucht. Für jedes Schienenfahrzeug wird dabei eine Ausstattung mit fünf Ladepads angenommen. So kann eine Übertragungsleistung von 100 kW erreicht werden. Die übertragbare Energie ist das Produkt aus Übertragungsleistung und Ladezeit und hängt damit von der Leistungsfähigkeit der Ladeinfrastruktur und der Verweildauer des Fahrzeugs über den Ladepads ab. Mit sinkender Fahrzeuggeschwindigkeit erhöht sich also die übertragbare Energie bei konstanter Übertragungsleistung.

Die für das System angenommene Übertragungseffizienz liegt bei 75 %. Der Wert liegt unterhalb des Literaturwerts aus Südkorea, siehe Abschnitt 1.4, da von einem größeren Luftspalt und den Einfluss stählerner Radsätze auf das Magnetfeld ausgegangen wird. Bei einer angenommenen Durchfahrtsgeschwindigkeit von 30 km/h ergibt sich eine erforderliche Ladestrecke von 13,83 m, um die erforderliche Energiemenge zu übertragen. Pro Ladevorgang können so 46,08 Wh übertragen werden.

Der zeitliche Verlauf des Batterieladezustands bei einer auf 14 m aufgerundeten Ladestrecke wird in der folgenden Abbildung 5 gezeigt. Es sind zwei Szenarien zu sehen: 30 km/h bei Halt an der Station sowie 60 km/h bei Durchfahrt des Zugs. Im letztgenannten Szenario ist die verfügbare Energie nicht ausreichend, um den Bahnübergang zuverlässig mit ausreichend Energie zu versorgen.

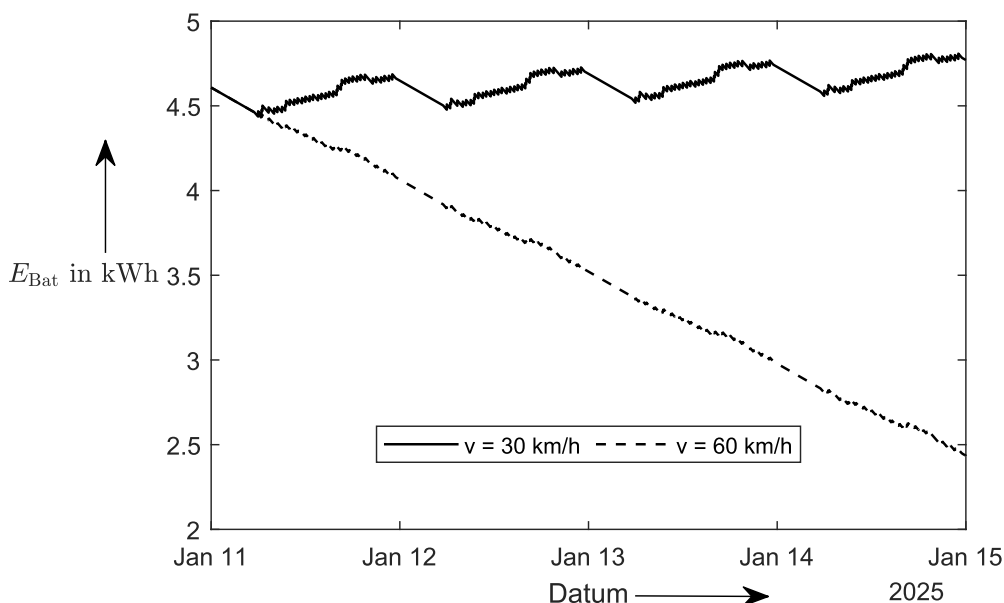


Abbildung 5: Energieübertragung durch Schienenfahrzeuge mit einer Ladestreckenlänge von 14 m

Für die zweite Möglichkeit – das Laden durch Straßenfahrzeuge – wird bei der theoretischen Analyse aufgrund des begrenzten Bauraums von einem einzelnen Ladepad pro Fahrzeug ausgegangen. Es wird eine Übertragungsleistung von 20 kW pro Fahrzeug angenommen [24]. Für die Berechnung werden Durchschnittswerte verwendet. Bei einer angenommenen Fahrgeschwindigkeit von 30 km/h – bedingt durch die Lage des Bahnübergangs nahe der Kreuzung – und einer durchschnittlichen Effizienz von 62 % (basierend auf dem Projekt FABRIC) ergibt sich ein realistisches Energieszenario.

Am Bahnübergang Höpfling ist die mögliche Länge der Ladestrecke durch die örtlichen Gegebenheiten auf 30 m begrenzt. Laut Verkehrskonzept beträgt die tägliche Verkehrsbelastung dort rund 400 Fahrzeuge [28]. Da künftig von einer Steigerung des Anteils an elektrischen Straßenverkehrsfahrzeugen ausgegangen wird, wird ein Anteil von 4 % der querenden Fahrzeuge als batterieelektrisch angenommen. Das liegt über dem deutschlandweiten Anteil von 3,3 % [29]. Weiterhin wird optimistisch angenommen, dass sämtliche batterieelektrischen Fahrzeuge über eine kompatible induktive Ladeinfrastruktur verfügen. In Abbildung 6 ist der Energiegehalt der Batterie über sechs Tage gezeigt.

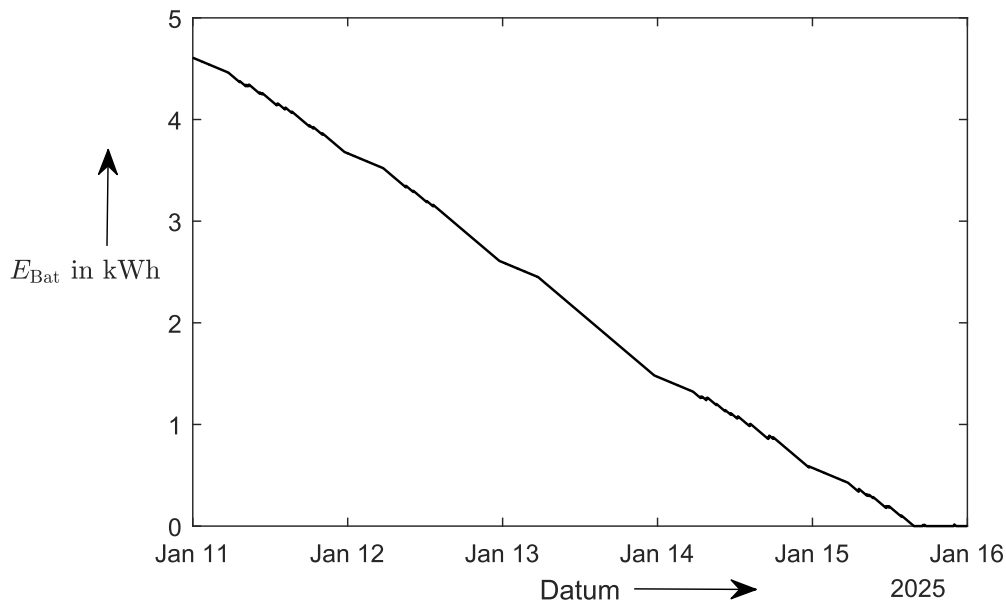


Abbildung 6: Energieübertragung durch Straßenfahrzeuge mit einer Ladestreckenlänge von 30 m

Diese 30 m lange Ladestrecke reicht unter den getroffenen Annahmen nicht aus, um den Bahnübergang dauerhaft zu versorgen – der Speicher entleert sich innerhalb weniger Tage. Um den Energiebedarf im betrachteten Lastfall (vier Lichtzeichen, eine Steuereinheit) zu decken, wäre eine Ladestrecke von mindestens 161,1 m erforderlich. Bei einem steigenden Anteil an ladenden Fahrzeugen kann diese Länge perspektivisch entsprechend reduziert werden.

Die theoretischen Untersuchungen haben gezeigt, dass induktive Energieübertragung durch Schienenfahrzeuge technisch realisierbar ist. Dies erfordert jedoch unter anderem eine flächendeckende Ausstattung der Schienenfahrzeuge mit entsprechender Energieübertragungseinrichtung und ist in der Praxis dennoch nicht ausreichend. Die induktive Energieübertragung durch Straßenfahrzeuge ist ebenfalls nur unter sehr spezifischen Voraussetzungen sinnvoll: Neben einer ausreichend hohen Anzahl kompatibler Fahrzeuge sind lange Ladestrecken erforderlich, was bauliche Umsetzung und Wirtschaftlichkeit erschweren. Als weiterer Aspekt muss die Akzeptanz seitens der Fahrzeughalter kritisch betrachtet werden, da deren Fahrzeuge durch die Energieabgabe selbst Reichweite opfern. Die Fahrzeuge müssten mit entsprechender Technik nachgerüstet werden und es muss geklärt werden, wer für den Strom finanziell aufkommt.

Darüber hinaus bestehen weitere Hürden in der rechtlichen Zulassung solcher Systeme. Ein Energieversorgungskonzept im Rahmen des Projekts testweise umzusetzen war aus den genannten Gründen nicht sinnvoll.

Deshalb wurde als weitere Lösung zunächst die Energieversorgung mittels Photovoltaikmodulen in Kombination mit einem Batteriespeicher untersucht. Dafür wird ermittelt, wie die Anlage – bestehend aus Photovoltaikmodulen und Batterien – dimensioniert werden muss, um den Energiebedarf der eingesetzten Komponenten zu decken. Eine schematische Darstellung des Systemkonzepts sowie dessen Komponenteneigenschaften sind in Abbildung 7 abgebildet.

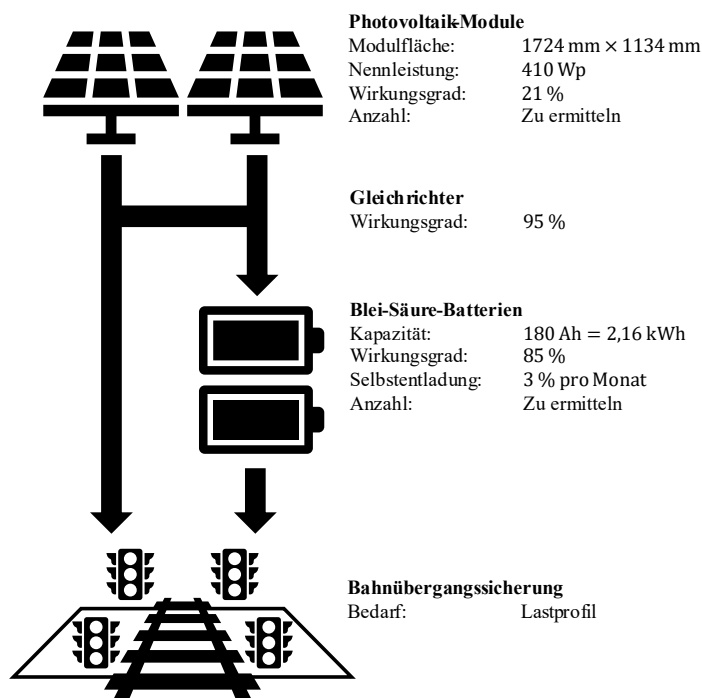


Abbildung 7: Schematischer Aufbau der Photovoltaikanlage

Für die Werte wurde sich an Herstellerdatenblättern orientiert sowie auf Literaturwerte bezogen. Bei den Wirkungsgraden des Gleichrichters und der Blei-Säure-Batterie wurde sich an [30] orientiert. Sie wurden so gewählt, dass sie zu den darin angegebenen Bereichen der Zellwirkungsgrade und Gesamtwirkungsgrade inklusive Umrichter passen. Der Wert für die monatliche Selbstentladung stammt ebenfalls aus einem in [30] angegebenen Bereich.

Um die von den Photovoltaikmodulen zur Verfügung gestellte Energie zu simulieren, wurde auf historische Einstrahlungswerte zurückgegriffen. Diese werden vom Deutschen Wetterdienst als Datensätze zur Global- und Diffusstrahlung online zur Verfügung gestellt, die von den verschiedenen Wetterstationen in Deutschland gemessen wurden [31].

Eine Analyse dieser Daten ergab, dass an der nächstgelegenen Wetterstation in den Wintermonaten von 2010 bis 2011 die geringste Einstrahlung im Vergleich zu allen anderen

verfügbaren Jahren zu verzeichnen war. Dieser Zeitraum diente daher als Vergleichszeitraum, auf den die Photovoltaikanlage ausgelegt wurde. Es wurde die Anzahl der Photovoltaikmodule sowie die benötigte Batterieanzahl für einen autarken Betrieb ermittelt.

Aufgrund des signifikanten Einflusses der Modulorientierung auf den Energieertrag wurden dabei folgende Parameter festgelegt:

- Der Anstellwinkel beträgt $\beta = 40^\circ$
- Die Module sind nach Süden ausgerichtet, also beträgt $\varepsilon = 180^\circ$

Außerdem wird davon ausgegangen, dass die Module zu keiner Zeit verschattet werden. Bezüglich des Anstellwinkels sei erwähnt, dass eine steilere Anstellung in den Wintermonaten mit tiefstehender Sonne zu einer größeren Ausbeute von Direktstrahlung führt. Andererseits nimmt mit steileren Winkeln auch die Ausbeute von Diffusstrahlung ab. Simulationen ergaben für dieses Szenario, dass die Gesamtausbeute bei einem Anstellwinkel von 40° höher ist als bei steileren Winkeln.

Aus den genannten historischen Einstrahlungsdaten wurden die Anteile der Direktstrahlung, Diffusstrahlung und reflektierter Strahlung berechnet. Unter Berücksichtigung des Anstellwinkels, der Ausrichtung und des Wirkungsgrades der Module konnte dann ein zeitabhängiges Profil elektrischer Leistung berechnet werden, die die Module zur Verfügung stellen. Für die Kombination $n_{\text{Module}} = 4$ und $n_{\text{Batterien}} = 4$, ergibt sich der in Abbildung 8 gezeigte Verlauf des Ladezustands der Batterien, wenn von einem initialen Ladestand von 90 % ausgegangen wird. In Phasen geringer solarer Einstrahlung reicht die durch die Photovoltaikmodule erzeugte Energie nicht aus, um den Bedarf vollständig zu decken. In diesen Zeiten wird aus der Batterie gespeist, wodurch der Ladestand teilweise deutlich abfällt. Allerdings ist der Ladestand stets positiv und außerhalb der in [30] angegebenen Entladetiefe von 70 bis 80 %. Durch den ungewöhnlich dunklen Vergleichszeitraum kann die Anlage mit dieser Kombination als ausreichend dimensioniert betrachtet werden.

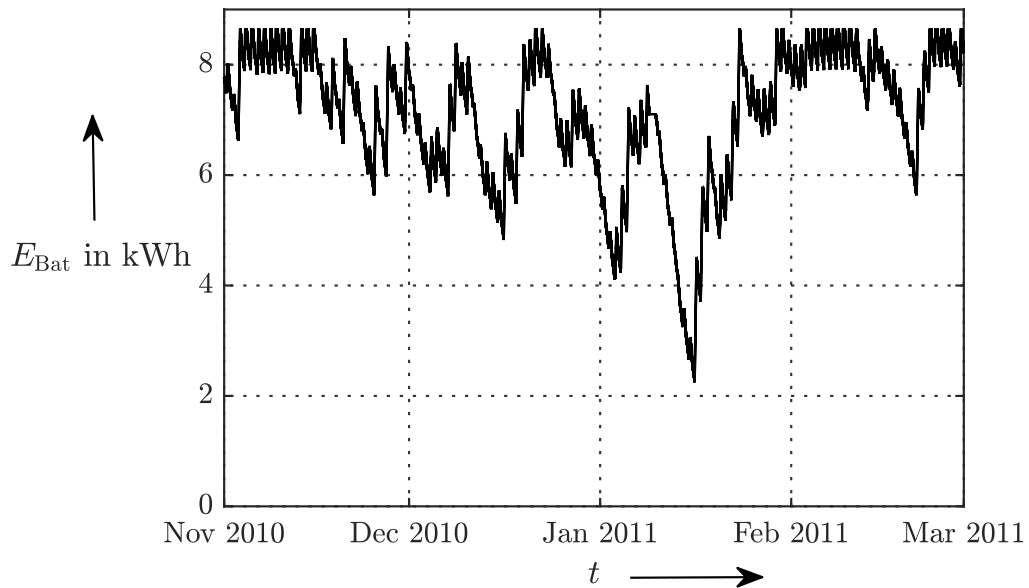


Abbildung 8: Verlauf des Ladezustands der Batterien

Der erforderliche Platzbedarf für einen netzautarken Betrieb mit Photovoltaikmodulen in Kombination mit Batteriespeichern ist sehr groß. Deshalb wurde eine Lösung zur kleineren Dimensionierung der Energieversorgung gesucht. Hierbei kam die Unterstützung des Systems mit Photovoltaik durch eine Brennstoffzelle in Frage.

Eine schematische Darstellung des Konzepts zur Versorgung des Bahnübergangs durch eine zusätzliche Brennstoffzelle wird in Abbildung 9 gezeigt.

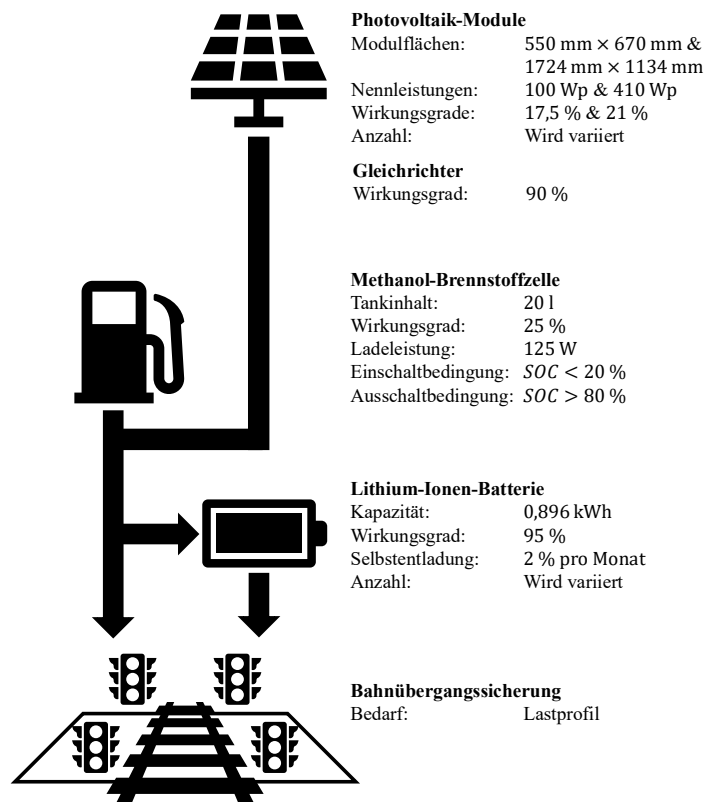


Abbildung 9: Schematischer Aufbau des Brennstoffzellensystems mit Photovoltaikunterstützung

Auch hier wurden die technischen Eigenschaften der eingesetzten Komponenten basierend auf den Herstellerdatenblättern gewählt sowie durch Literaturwerte ergänzt. Bei den Wirkungsgraden des Gleichrichters und der Lithium-Ionen-Batterie wurde sich an [30] orientiert. Sie wurden so gewählt, dass sie zu den darin angegebenen Bereichen der Zellwirkungsgrade und Gesamtwirkungsgrade inklusive Umrichter passen. Der Wert für die monatliche Selbstentladung stammt ebenfalls aus einem in [30] angegebenen Bereich.

Simulativ wurde zunächst der Autarkiegrad des Systems unter den gleichen Betriebsbedingungen wie zuvor für den ausschließlichen Betrieb mit einer Photovoltaikanlage bestimmt. Dafür wurde davon ausgegangen, dass der Methanoltank zu Beginn der Simulation voll ist. Sobald sein Füllstand unter 10 % beziehungsweise 2 l fällt, wird er wieder aufgefüllt. In Abhängigkeit der installierten PV-Modulleistung P_{ges} und der Batteriekapazität C_{ges} ergibt sich Autarkiegrad A , der in Abbildung 10 gezeigt ist.

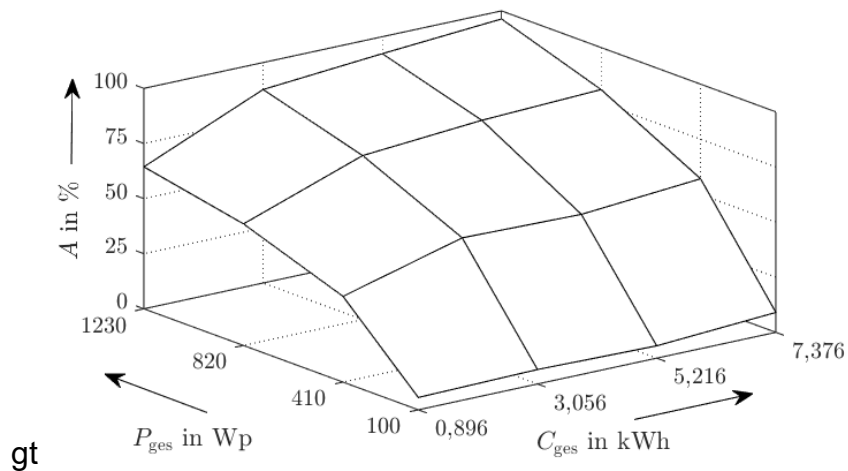


Abbildung 10: Autarkiegrad des Brennstoffzellensystems

Es ist erkennbar, dass der Autarkiegrad anfangs schnell steigt mit zunehmender Modulleistung und Batteriekapazität, für volle Autarkie jedoch überproportional mehr Module und Batterien benötigt werden.

Je höher der Autarkiegrad, desto geringer ist der Methanolverbrauch B und desto seltener muss der Tank neu aufgefüllt werden. In Abbildung 11 ist der simulierte durchschnittliche Verbrauch pro Tag in Abhängigkeit vom Autarkiegrad A gezeigt.

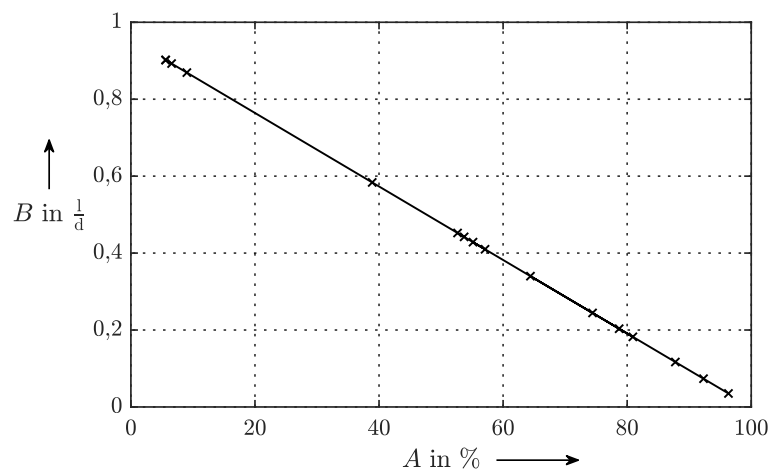


Abbildung 11: Täglicher Methanolverbrauch in Abhängigkeit vom Autarkiegrad

Bei einem Autarkiegrad von 5 % ist es etwa alle 20 Tage notwendig, den Tank aufzufüllen. Bei einer größeren Anlage mit einem Autarkiegrad von 80 % ist dies etwa alle 3 Monate notwendig.

Es wurde sich dafür entscheiden, potenzielle Tanknachfüllungen im Gegenzug zu kleineren Dimensionen der Energieversorgungslösung in Kauf zu nehmen und dieses Konzept physisch umzusetzen und im späteren Arbeitspaket 3 zu testen.

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden die Transpondereinheiten für zwei Schienenfahrzeuge der BRB konzipiert. Dafür wurden zwei bestehende Einheiten in einzelnen Komponenten ertüchtigt und funktional erweitert. Die erforderlichen Bauteile wurden beschafft, eingerüstet und im Labor einzeln und jede Fahrzeugeinheit als Gesamtsystem getestet. Für den Zugriff auf die Fahrzeugeinheiten im eingebauten Zustand wurde ein Fernwartungszugang über LTE eingerichtet, welcher für die Funktionalität der Transponder – insbesondere den periodischen Kommunikationsaustausch zwischen Fahrzeugen und zu den Lichtsignalanlagen über TETRA – jedoch nicht benötigt wird. Für die Lokalisierung der Fahrzeuge und die Berechnung von Bremswegen wurde eine digitale Streckenkarte (siehe 2D-Repräsentation in Abbildung 12, die Karte selbst ist wesentlich detaillierter) erstellt. Diese deckte nicht nur den Bereich zwischen Traunstein und Ruhpolding ab, sondern darüber hinaus auch weitere von den beiden Fahrzeugen regelmäßig befahrene Äste des Netzes. Ein Beispiel ist die Strecke zum Betriebswerk in Augsburg, wo die Transponder in die Fahrzeuge eingebaut wurden.

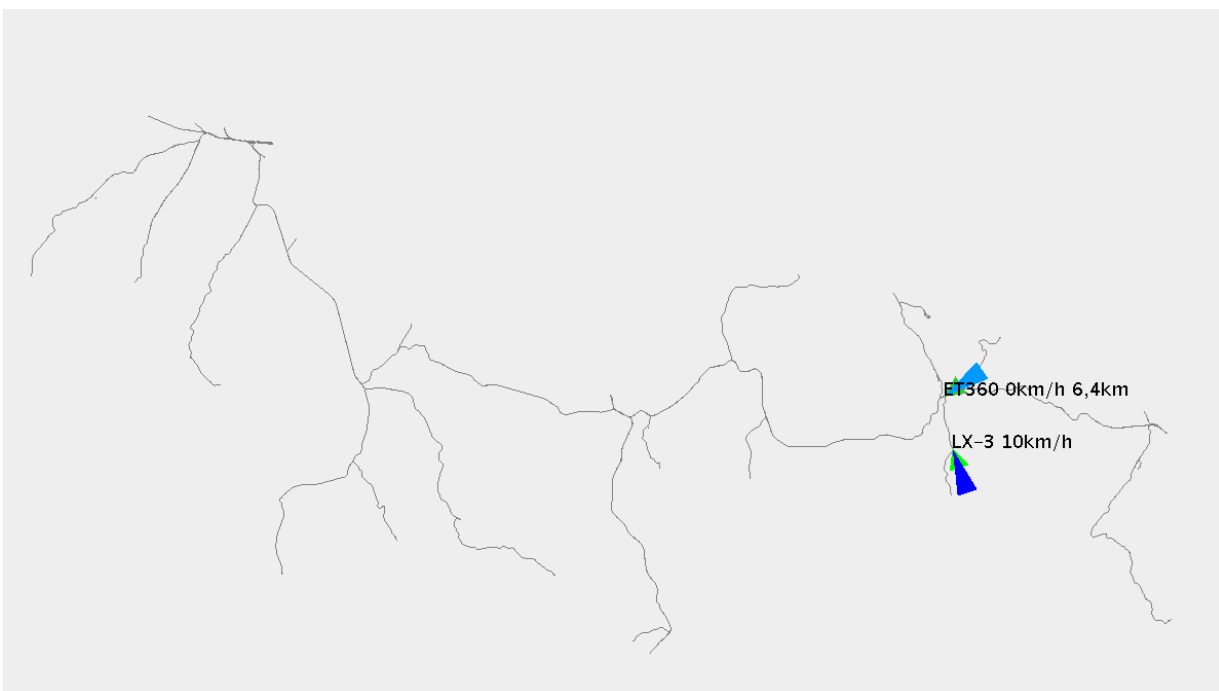


Abbildung 12: Digitale Streckenkarte

Die Funklizenz für das geschützte TETRA-Frequenzband wurde fristgerecht bei der Bundesnetzagentur beantragt und stand zum geplanten Einsatztermin zur Verfügung.

Der mit dem Arbeitspaket verbundene 1. Meilenstein: *Mindestens ein Fahrzeug ist Ende Oktober 2024 ausgerüstet und funktional getestet* erforderte den Einbau der Transpondereinheiten in die Züge. Dafür mussten die Züge der BRB einzeln aus dem laufenden Betrieb entnommen und in das BRB-Werk nach Augsburg überführt werden. Dies war von Seiten der BRB nicht vor Februar 2025 möglich, deshalb konnte der erste Meilenstein ebenfalls erst im Februar 2025 erfolgreich abgeschlossen werden.

Die in Abbildung 13 gezeigten Bilder sind beim Einbau der ersten Transpondereinheit ins BRB-Fahrzeug entstanden.



Abbildung 13: Einbau der Transpondereinheiten inkl. Antennen

AP 2.2 Interface-Entwicklung Transceiver-LSA

Das Arbeitspaket 2.2 *Interface-Entwicklung Transceiver-LSA* beinhaltet die Entwicklung eines Interface-Moduls an den mobilen Lichtsignalanlagen für die an den Fahrzeugen verbauten Transpondereinheiten. Hauptverantwortlich für dieses Arbeitspaket ist Peter Berghaus GmbH (PBV) in Zusammenarbeit mit Intelligence on Wheels (IoW). PBV stellte hierzu eine moderne Lichtsignalanlage aus ihrem Programm sowie eine Adapterbox zur Verfügung, über welche IoW die Anlage ansteuern und den aktuellen Status signaltechnisch sicher auslesen konnte. IoW hat dazu einen passenden Einschub konzipiert und gebaut, welcher in erster Näherung als ortsfester Zug-Transponder verstanden werden kann. Die folgende Abbildung 14 zeigt den Aufbau. Nähert sich ein Zug einem mit dieser ATTRACTIVE-Technik ausgestatteten Lichtsignalanlage an einem Bahnübergang, schaltet die

Lichtsignalanlage in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des Bremsvermögens des Zuges in Richtung des Straßenverkehrsteilnehmers auf „rot“ und nach dessen Vorbeifahren wieder auf „aus“ (aber nie „grün“). Hierdurch verstärkt sich für den Straßenverkehrsteilnehmer die Aufmerksamkeit auf den herannahenden Zug im Vergleich zu einem passiven Andreaskreuz und er verbleibt auch gedanklich im gewohnten Regelwerk der StVO („rot“: Stehenbleiben, „aus“: Trotzdem genau hinschauen).



Abbildung 14: Steuereinheit und LSA-Schnittstelle

Als Ergebnis lag am Ende des Arbeitspakets eine funktionsfähige Schnittstelle zwischen den mobilen Lichtsignalanlagen und den Transpondereinheiten in den Zügen vor. Für die Bearbeitung des Arbeitspakets waren die Projektmonate eins bis fünf vorgesehen.

Im Rahmen des Arbeitspakets erfolgt zudem eine Entwicklung einer geeigneten Vorgehensweise zur Erfassung und Übermittlung von Straßenverkehrsdaten. Für die Erfassung der Verkehrsdaten wurde geplant, eine thermische Kamera einzusetzen. So können die Straßenverkehrsteilnehmer datenschutzkonform gezählt werden und in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. Außerdem wurde zunächst eine Schnittstelle zur Berghaus-Connect-Plattform aufgebaut. Hierbei handelt es sich um ein Datenportal der Firma Peter Berghaus GmbH, mit dem Zweck, die Daten in Echtzeit zur Verfügung zu stellen. Die gezählten und kategorisierten Verkehrsarten können darüber ausgewertet werden.

In enger Zusammenarbeit zwischen Intelligence on Wheels und Peter Berghaus wurde die Schnittstelle für die Lichtsignalanlagen entwickelt.

Das Arbeitspaket konnte fristgerecht abgeschlossen werden.

AP 2.3 Installations- und Vorbereitungsarbeiten Bahnübergang

Für das Arbeitspaket 2.3 *Installations- und Vorbereitungsarbeiten Bahnübergang* ist die Firma Peter Berghaus GmbH verantwortlich. Es beinhaltet die Ausstattung ausgewählter Bahnübergänge entlang der Versuchstrecke mit den mobilen Lichtsignalanlagen. Für die geplanten Verkehrszählungen sollen Kameras an ausgewählten Bahnübergängen in Betrieb genommen werden. Die gesammelten Verkehrsdaten werden an ein Portal angebunden und übermittelt. Das Ergebnis des Arbeitspakets sind die ausgestatteten Bahnübergänge mit den betriebsbereiten Lichtsignalanlagen. Der Bearbeitungszeitraum für das Arbeitspaket umfasst die Projektmonate sechs bis acht.

Anschließend an die Bahnübergangsauswahl aus Arbeitspaket 2.1 fand an den ausgewählten Bahnübergängen „Schwimmbadweg“, „Josefsweg“ und „Höpfling“ im Februar 2025 eine weitere Begehung statt, um geeignete Positionen für die Lichtsignalanlagen sowie die Kameras zu identifizieren. Beteiligt waren hier neben dem Projektkernteam auch Vertreter des Bauhofs der Gemeinde Siegsdorf. Es wurde sich dafür entschieden, den Bahnübergang „Höpfling“ als erstes auszustatten. Für die Ausstattung des Übergangs lag von Seiten der Gemeinde eine Verkehrsrechtliche Anordnung vor. Geplant war eine Ausstattung des Bahnübergangs im April 2025, da von Seiten der BRB das erforderliche externe Gutachten zur EMV06-Messung nicht früher vorlag. Ein Betrieb der Ampeln an der Strecke war deshalb vorher nicht sinnvoll.

Während der Bearbeitungszeit des Arbeitspakets hat sich darüber hinaus herausgestellt, dass der Eisenbahninfrastrukturbetreiber DB RegioNetz zur ATTRACTIVE-Lösung weitere interne Prüfungen und eine Einschätzung bezüglich des Betriebs der Lichtsignalanlage vornehmen muss. Deshalb wurde zunächst nur die erste thermische Kamera für die Erfassung des Straßenverkehrs am Bahnübergang „Höpfling“ an einem extra dazu von der Gemeinde installierten Mast auf gemeindlichem Grund in Betrieb genommen. Dadurch konnte der Verkehr zunächst unabhängig vom ATTRACTIVE-System gezählt und klassifiziert werden. Die Zählung erfolgte vom 9. bis 14. April 2025. Der Verkehr wurde in 5 Kategorien eingeteilt: Leicht, Mittel, Schwer, Fahrrad und Fußgänger. Die Ergebnisse der Kameraauswertung wurden an das Portal der Firma Peter Berghaus übermittelt. Eine wöchentliche Verkehrsübersicht kann in Abbildung 15: Wöchentliche Verkehrsübersicht Abbildung 15 nachvollzogen werden. Diese Werte stimmen gut mit denen aus [28] überein, worin die tägliche Verkehrsbelastung bei rund 400 Fahrzeugen liegt.

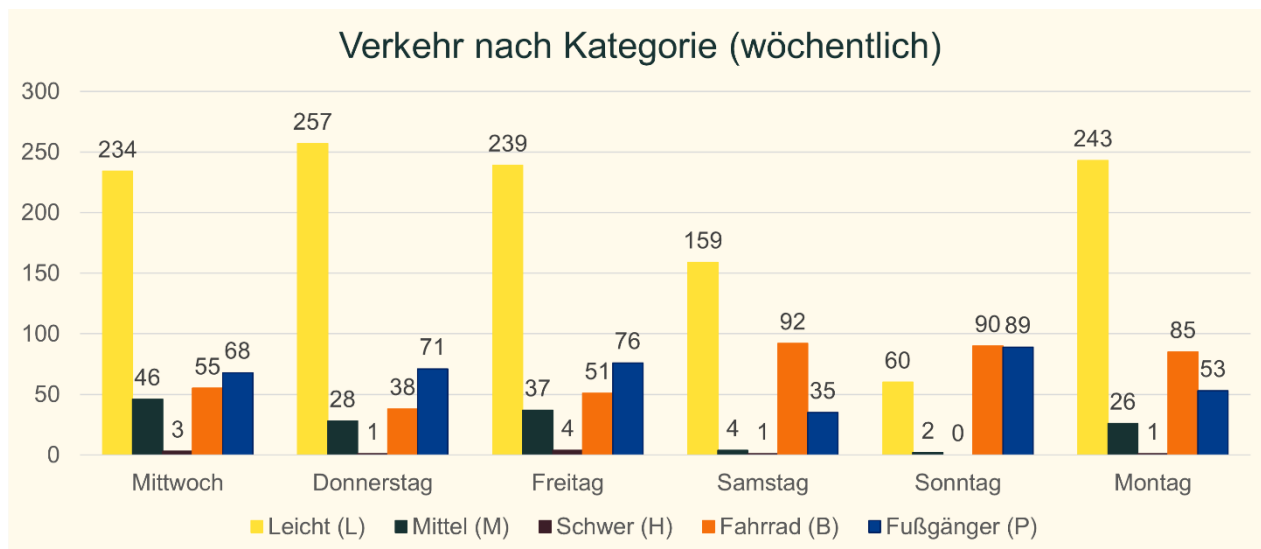


Abbildung 15: Wöchentliche Verkehrsübersicht

AP 3: Betrieb und Auswertung

Das dritte Arbeitspaket *Betrieb und Auswertung* umfasst die Befragung der Straßenverkehrsteilnehmenden bezüglich ihrer Meinung zu den nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen. Außerdem beinhaltet das Arbeitspaket die Koordination des Betriebs der Lichtsignalanlagen an den Bahnübergängen sowie die Auswertung der erfassten Daten. Als weiterer Bestandteil wird auch die Energieversorgungslösung des Systems betrieben und Messdaten aufgezeichnet. Das Ergebnis des Arbeitspakets sind Daten und Statistiken, wobei das KIT maßgeblich für das Arbeitspaket verantwortlich ist. Dafür waren die Projektmonate 7 bis 12 vorgesehen.

Geplant war zunächst eine zweiteilige Befragung der Straßenverkehrsteilnehmern sowie der Triebfahrzeugführer. Zunächst sollte vor Inbetriebnahme des ATTRACTIVE-Systems die Meinung der Straßenverkehrsteilnehmer und der Triebfahrzeugführer bezüglich des Sicherheitsempfinden an den nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen erfolgen. Anschließend soll während des Betriebs und nach einer gewissen Eingewöhnungszeit die Akzeptanz der technischen Unterstützung an den Bahnübergängen abgefragt werden.

Für den ersten Teil der Befragung wurde für die Straßenverkehrsteilnehmern ein standardisierter Fragebogen aufgesetzt. Dieser beinhaltete insgesamt 19 Fragen, wobei die folgenden Themen abgefragt wurden:

- Demografische Fragen
- Wohnort

- Überquerungsgrund des Bahnübergangs
- Verkehrsmittel
- Verständnis von Verkehrsregeln
- Wahrnehmung Pfeifsignal
- Sicherheitsempfinden

Die Befragung der Straßenverkehrsteilnehmer fand vor Ort am 9. und 10. Dezember 2024 statt. Als Software wurde die Befragungssoftware SoSci-Survey verwendet. Die Befragung wurde vorab in der Gemeinde-App angekündigt und erfolgte an den folgenden Orten: Schwimmbadweg, Rathausplatz und Bahnhof in Siegsdorf.

An der Befragung haben insgesamt 23 Personen teilgenommen, wobei das Alter der Befragten ein breites Spektrum abdeckte. Die Übersicht ist in Abbildung 16 zu sehen:

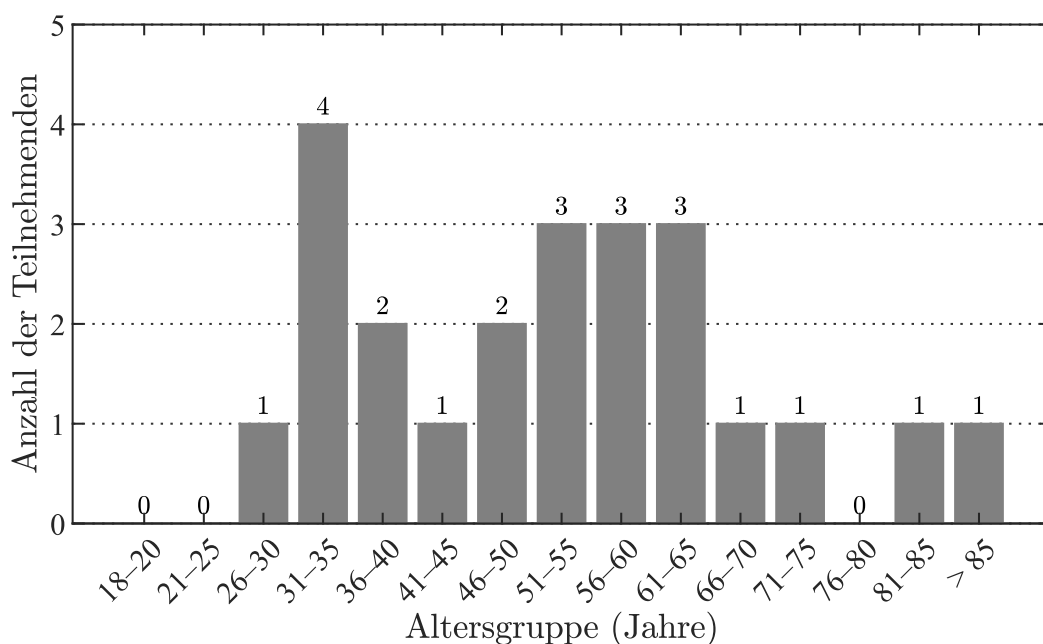


Abbildung 16: Übersicht über das Alter der Befragten

Als häufigste Überquerungsart gaben die Teilnehmer *zu Fuß* an. Einige Befragte gaben an, trotz pfeifenden und herannahenden Zuges den Übergang noch schnell zu Queren, weil der Zug als weit genug entfernt wahrgenommen wird. In diesem Fall kann die adaptive ATTRACTIVE-Lösung die geltende Regelung gut verdeutlichen.

Bei einer Abfrage der Verkehrsregeln gaben lediglich etwas weniger als die Hälfte die Regeln korrekt an. Außerdem wurde von der Mehrheit der Befragten das Pfeifen des Zugs

als zu laut und zu störend empfunden. Es ist zu empfehlen, dies weiter zu untersuchen und gegebenenfalls Lösungen zu prüfen, um die Anzahl der Pfeifanlässe zu reduzieren.

Besonders ist auch bei der Befragung hervorzuheben, dass sich 13 Personen – und damit mehr als die Hälfte – beim Queren des Bahnübergangs sich sicher fühlen. Gleichzeitig wurde eine zusätzliche Sicherung durch ein Lichtsignal oder eine Schranke trotzdem als positiv bewertet.

Für die Befragung der Triebfahrzeugführer wurde ebenfalls die Software SoSci-Survey verwendet. Der für die Befragung erstellte standardisierte Fragebogen umfasste insgesamt 13 Fragen, die folgende Themen abfragten:

- Demografische Fragen
- Erfahrung als Triebfahrzeugführer
- Stressempfinden an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen
- Pfeifen als Sicherheitsmaßnahme
- Herausforderung an der Strecke

Die Befragung fand als Online-Befragung statt. Dafür wurde ein Link über die BRB an die entsprechenden Triebfahrzeugführer verteilt. Der Befragungszeitraum lief über den gesamten Februar 2025. Insgesamt haben 16 Personen an der Umfrage teilgenommen. Die abgefragte Arbeitserfahrung der Triebfahrzeugführer hatte zum Ergebnis, dass fast zwei Drittel der Befragten lediglich über eine Berufserfahrung unter 5 Jahren verfügten. Das Ergebnis kann in Abbildung 17 nachvollzogen werden.

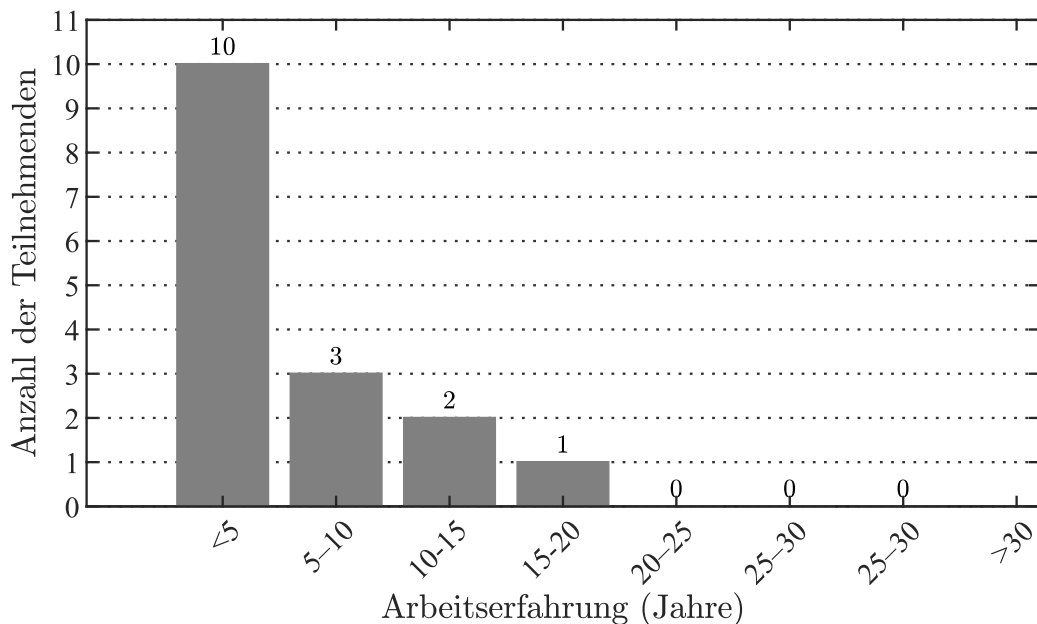


Abbildung 17: Verteilung der Arbeitserfahrung in Fünfjahresschritten

Als weiteres Ergebnis der Befragung liegt vor, dass das Pfeifen von den befragten Triebfahrzeugführern nicht als sinnvolle Maßnahme eingeschätzt wird, da dieses gerade von Straßenverkehrsteilnehmern ignoriert beziehungsweise die Verkehrsregeln nicht richtig beachtet werden. Das spiegelt sich auch in der Abfrage der Straßenverkehrsteilnehmer wider, da bei diesen über die Hälfte die Verkehrsregeln nicht korrekt wiedergeben konnte.

Die nichttechnisch gesicherten Bahnübergänge wurden darüber hinaus von allen Befragten als nicht ausreichend gesichert empfunden. Dies steht im Widerspruch zur Auffassung der Straßenverkehrsteilnehmer, die sich größtenteils beim Queren der Bahnübergänge sicher fühlen. Außerdem würde bei einer Mehrheit der Befragten eine zusätzliche Sicherung der Übergänge dazu beitragen, dass sich das Sicherheitsempfinden verbessern würde sowie die Fahraufgabe erleichtert würde.

Während der Projektlaufzeit hat es sich herausgestellt, dass für den Einbau der Transpondereinheiten in die Züge ein externes Gutachten über deren Störfreiheit – eine sogenannte EMV06-Messung – erforderlich war. Dieses Gutachten lag der BRB selbst erst im April 2025 vor, fiel aber positiv aus, also ohne Störungen. Da allerdings noch eine abschließende Risikoabschätzung für den Betrieb der Transponder im Fahrgastbetrieb durch die BRB erforderlich war, bevor das System auf den Zügen in Betrieb genommen werden konnte, war ein Betrieb der Ampeln an der Strecke davor nicht sinnvoll. Geplant war eine erste Inbetriebnahme des Systems am Bahnübergang Höpfling in Siegsdorf im Januar

2025, was dementsprechend auf April verschoben wurde. Der zweite Meilenstein: *Die Lichtsignalanlage ist Ende Januar 2025 an mindestens einem Bahnübergang aufgebaut und erfolgreich getestet* musste deshalb ebenfalls auf April verschoben werden, obwohl das ATTRACTIVE-System betriebsbereit vorlag.

Die betriebsbereiten Ampeln an den Bahnübergängen konnten nicht wie geplant in Betrieb genommen werden, bis die Zustimmung durch den Infrastrukturbetreiber erfolgte. Deshalb verzögerte sich die Projektlaufzeit. Darüber hinaus war eine weitere Einschätzung durch das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) notwendig. Das ATTRACTIVE-System konnte dem EBA im Juli 2025 vorgestellt werden, wobei die Einschätzung sowohl kurzfristig als auch positiv ausfiel.

Trotz dieser Einschätzung war aufgrund weiterer Bedenken des Eisenbahninfrastrukturbetreibers ein dauerhafter Betrieb des Systems nicht möglich. Deshalb konnten weder die Befolungsraten und deren permanente Übertragung an die Mobilithek noch eine weitere Befragung der Straßenverkehrsteilnehmer bezüglich der Akzeptanz des neuartigen Systems erfolgen.

Es konnte sich jedoch gemeinsam mit dem Infrastrukturbetreiber auf einen Testtag am 1. Dezember 2025 zur Demonstration der technischen Wirksamkeit des ATTRACTIVE-Systems unter Auflagen geeinigt werden. In der folgenden Abbildung 18 ist das System im eingeschalteten Zustand zu sehen.



Abbildung 18: Einsatz des ATTRACTIVE-Systems

Da ein dauerhafter Betrieb an der Versuchstrecke nicht möglich war, konnte die geplante Energy-Harvesting-Lösung nicht an einem Bahnübergang getestet werden. Es wurde sich dafür entschieden, den Aufbau auf einem abgeschlossenen Gelände durchzuführen. Der Versuch fand vom 5. bis 18. Dezember 2025 in Kürten bei der Firma Berghaus auf dem Betriebsgelände statt. Da die Auslegung für den Bahnübergang „Höpfling“ vorgenommen wurde, wurde ein Versuchsaufbau mit vier Lichtsignalanlagen, davon eine Primär- und 3 Sekundär-Lichtsignalanlagen, gewählt. Als Energiequellen dienten ein 100-Wp-Solarpanel sowie eine Methanol-Brennstoffzelle. Deren Tank ist bei Versuchsstart vollständig aufgefüllt. Außerdem verfügt die Primär-Lichtsignalanlage über die Steuereinheit von Intelligence on Wheels, sodass diese, wie an dem Bahnübergang, eingeschaltet werden kann. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 19 abgebildet.



Abbildung 19: Versuchsaufbau der Energy-Harvesting-Messung

Während des Versuchs wurden der Ladezustand der Batterie, die Akkuspannung sowie der Methanolverbrauch gemessen. Im Durchschnitt lag dieser bei 0,84 l pro Tag. Dieses Szenario wurde in der Simulation zuvor auch untersucht. Der dort berechnete Autarkiegrad liegt gemäß Abbildung 10 bei etwa 5 %, bei der nach Abbildung 11 ein Verbrauch von

etwa 0,9 Litern pro Tag vorhergesagt wurde. Mit dem real gemessenen Verbrauch von 0,84 Litern pro Tag ergibt sich also eine gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen.

AP 4: Dissemination und Exploitation

Das letzte Arbeitspaket ist die *Dissemination und Exploitation*. In diesem projektbegleitenden Arbeitspaket werden unter der Verantwortung des KIT wissenschaftlich, öffentlichkeitswirksam und vermarktungsvorbereitend die Projektergebnisse aufbereitet. Neben der Erstellung eines Projektvideos ist Bestandteil dieses Arbeitspakets die Organisation der Abschlussveranstaltung zur Demonstration der Ergebnisse. Als Ergebnis liegen am Ende des Arbeitspakets wissenschaftliche Publikationen, das Video sowie die Durchführung der Abschlussveranstaltung vor.

Alle genannten Ziele wurden folgendermaßen erreicht: Die Ergebnisse der Untersuchung für eine netzunabhängige Energieversorgung wurden im November 2025 auf dem 5. International Railway Symposium Aachen (IRSA 2025) vor Fachpublikum vorgestellt. Die Ergebnisse wurden anschließend im zugehörigen Tagungsband im Januar 2026 veröffentlicht.

Am 1. Dezember 2025 konnte erfolgreich die technische Funktionsfähigkeit des ATTRACTIVE-Systems gezeigt werden. Die Demonstration fand unter Anwesenheit wichtiger Stakeholder. Darunter der Bürgermeister der Gemeinde Siegsdorf, Vertreter des Eisenbahninfrastrukturbetreibers DB RegioNetz und weiteren Interessenten. In Abbildung 20 ist das System im Einsatz gezeigt.



Abbildung 20: Öffentliche Demonstration des ATTRACTIVE-Systems

Die Abschlussveranstaltung fand erfolgreich am 5. Februar 2026 statt, dem erstmöglichen Termin nach Projektabschluss. Teilgenommen haben dabei alle Projektpartner sowie Vertreter des Projektträgers.

Das Projektvideo wurde projektbegleitend erstellt und am 11. Februar 2026 auf dem Videoportal YouTube veröffentlicht (<https://www.youtube.com/watch?v=uefFUVpX3NE>).

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Teilvorhaben KIT

Die wichtigsten Positionen der verwendeten Projektmittel können in fünf Bestandteile aufgeteilt werden: Die anteilmäßig größte Position waren die Personalmittel auf Position 0812 *Beschäftigte*. Diese waren erforderlich für die Bearbeitung der Projekthalte. Das beinhaltete unter anderem die Projektorganisation, die Konzipierung und Durchführung der Befragungen sowie die Auslegung und Simulation eines netzunabhängigen Energieversorgungskonzepts.

Der zweitgrößte Anteil des Gesamtbudgets war für die Durchführung der Messung des Energy-Harvesting-Konzepts erforderlich. Diese wird der Position *0834 Mieten und Rechnerkosten* zugeschrieben.

Den drittgrößten Anteil stellte Position *0822 Beschäftigungsentgelte* dar. Darin sind wissenschaftliche Hilfskräfte berücksichtigt, die bei der Durchführung des Vorhabens unterstützt haben.

Aufgrund dessen, dass die Versuchstrecke zwischen Traunstein und Ruhpolding lag, waren für die Bearbeitung der Projekthinhalte Dienstreisen erforderlich. Das spiegelt sich im viertgrößten Anteil der Projektmittel in Position *0846 Dienstreisen* wider.

Bei der Erstellung des Projektvideos wurde das KIT durch das KIT-zugehörige Zentrum für mediales Lernen unterstützt. Dafür wurde der fünftgrößte Anteil in Position *0835 Vergabe von Aufträgen* aufgewendet.

Weitere detaillierte Informationen können außerdem dem zahlenmäßigen Verwendungsnachweis entnommen werden.

Teilvorhaben IoW

Die vom Projektträger für IoW in ATTRACTIVE vorgesehenen Mittel waren im Oktober 2025 und damit noch vor Ende des Verlängerungszeitraums vollständig ausgeschöpft. Dennoch hat IoW weitere Personal- und Sachmittel für die abschließende Bearbeitung des Projekts aus eigenen Mitteln beigesteuert, um bestmögliche Projektergebnisse zu erzielen. Die inkludiert zum Beispiel auch eine Beistellung der Fahrzeugausrüstungen, die zur Bearbeitung des Projekts zwingend notwendig waren, aber nicht über das Projekt finanziert werden konnten.

Weitere detaillierte Informationen können außerdem dem zahlenmäßigen Verwendungsnachweis entnommen werden.

Teilvorhaben PBV

Die im Rahmen des Teilvorhabens für PBV vorgesehenen Mittel wurden planmäßig eingesetzt und im Verlauf der Projektlaufzeit vollständig ausgeschöpft. Dies erfolgte im Einklang mit dem Projektfortschritt sowie den definierten Arbeitspaketen.

Aufgrund externer Einflüsse, insbesondere regulatorischer Anforderungen und verzögerter Freigaben durch beteiligte Akteure, kam es zu einer kostenneutralen Verlängerung der Projektlaufzeit. Unabhängig davon konnte PBV alle geplanten technischen Arbeiten erfolgreich abschließen.

Über die bewilligten Fördermittel hinaus hat PBV zusätzliche Personal- und Sachressourcen aus eigenen Mitteln eingebracht, um die technische Umsetzung und den erfolgreichen Abschluss des Vorhabens sicherzustellen. Dies umfasste insbesondere:

- Bereitstellung von Systemkomponenten und technischer Ausrüstung
- Aufwände im Bereich der Systemintegration und Softwareanpassung
- Unterstützung bei Installation und Vorbereitung der Versuchsinfrastruktur vor Ort (inkl. baustellenbezogener Tätigkeiten)
- Reisekosten und logistische Aufwände im Zusammenhang mit Inbetriebnahme, Abstimmung und Testbetrieb

Diese zusätzlichen Leistungen waren erforderlich, um trotz der eingeschränkten betrieblichen Rahmenbedingungen die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems unter Realbedingungen nachzuweisen und die Projektergebnisse in der geforderten Qualität bereitzustellen.

Insgesamt wurden die verfügbaren Mittel effizient eingesetzt und das Teilvorhaben unter den gegebenen Rahmenbedingungen erfolgreich umgesetzt.

2.3 Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Teilvorhaben KIT

Die für das Vorhaben zur Verfügung stehenden Ressourcen waren für das Projekt ATTRACTIVE angemessen. Das Forschungsprojekt und die damit verbundenen Forschungsarbeiten waren notwendig, um die technische Machbarkeit des neuartigen Ansatzes zur technischen Unterstützung an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen zu demonstrieren. Ein wichtiger Bestandteil war hierbei die Koordination und Kommunikation zwischen den notwendigen Stakeholdern. Als Konsortialführer wurden dafür die notwendigen Personalmittel aufgewendet.

Als weiterer Bestandteil wurde unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten das Energieversorgungskonzept untersucht und konzipiert. Dank der zur Verfügung gestellten Mittel konnte neben der Auslegung auch ein mehrwöchiger Test des ausgelegten Systems durchgeführt werden.

Mit Hilfe der Projektmittel konnte erfolgreich ein Projektvideo erstellt werden. Dieses trägt maßgeblich zur Wissenskommunikation bei. Darüber hinaus macht es öffentlichkeitswirksam auf die Problematik an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen aufmerksam.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass der Bedarf an günstigeren Lösungen zu technischer Unterstützung dieser Bahnübergänge besteht. Durch die ATTRACTIVE-Lösung kann eine kostengünstige Nachrüstung eines nichttechnisch gesicherten Bahnübergangs erfolgen.

Teilvorhaben loW

Bei der zu entwickelnden Lösung handelt es sich um ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Software-Architekturen auf hochwertiger, für den robusten Einsatzzweck zertifizierter Hardware mit dem Ziel, eine sicherheitsrelevante Lösung für die betrieblichen Wechselwirkungen zweier Verkehrsträger (Straße/Schiene) mit unterschiedlichen Betriebsregelungen zu schaffen. Hierbei setzen sowohl die Kenntnis der zum Einsatz kommenden Komponenten, der funktionalen Anforderungen wie auch der betrieblichen Regelungen eine ausreichend große Expertise voraus. Die Komplexität der Konzeptentwicklung, des Zusammenwirkens der unterschiedlichen Module der Software-Architektur, die zum Einsatz kommende Multi-Broadcast-Netzwerkcommunication sowie die herausfordernde sicherheitsrelevante Algorithmik setzen sowohl fundiertes Grundlagenwissen in den Bereichen Informatik und Netzwerktechnik als auch große Erfahrung in der praktischen Umsetzung gepaart mit fachspezifischem Wissen der Abläufe im Eisenbahnumfeld voraus.

Teilvorhaben PBV

Die für das Teilvorhaben PBV zur Verfügung stehenden Ressourcen waren für die übernommenen Aufgaben angemessen. Die Entwicklungsarbeiten im Rahmen von AP 2.2 waren notwendig, da für die LSA-seitige Anbindung an das loW-Transpondersystem keine fertige Lösung am Markt verfügbar war. PBV hat daher eine eigene Empfangsperipherie (embedded Controller/Interface-Modul) entwickelt und in die MPB-5000-Lichtsignalanlage integriert, die das Transpondersignal des loW-Transceivers empfängt und die LSA sicher in den Zuständen „rot“ und „aus“ steuert. Diese Eigenentwicklung erforderte spezifisches Fachwissen in den Bereichen Embedded Systems, Funktechnik und Lichtsignalsteuerung sowie eine enge technische Abstimmung mit Intelligence on Wheels.

Die digitale Anbindung der MPB 5000 an die Berghaus-Connect-Plattform war ein wertvoller ergänzender Beitrag: Sie ermöglicht die Fernüberwachung des Betriebsstatus der Lichtsignalanlagen sowie die Auswertung der erfassten Verkehrsdaten und schafft damit die operative Grundlage für einen zuverlässigen Feldbetrieb über das Projektende hinaus.

Die Arbeiten im Rahmen von AP 2.3 – Standortbegehungen, Aufstellplanung, Kamerainbetriebnahme und Koordination mit der Gemeinde Siegsdorf sowie dem Bauhof vor Ort – erforderten einen erheblichen organisatorischen Aufwand, der durch die bewilligten Pro-

jektmittel angemessen gedeckt werden konnte. Die kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit war ausschließlich auf externe regulatorische Faktoren zurückzuführen und spiegelt keine Fehlplanung seitens PBV wider.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen

Im Rahmen des Projekts wurden Daten generiert. Zum einen konnte eine zweiteilige Befragung durchgeführt werden. Geplant ist eine Bereitstellung der Umfrageergebnisse im Laufe des Jahres 2026 in der Mobilthek. Im Rahmen der Befragung konnten mithilfe von standardisierten Fragebögen Straßenverkehrsteilnehmende bezüglich ihrer Meinung und ihres Empfindens an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen befragt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass sich Anwohnende und Straßenverkehrsteilnehmende durch das Pfeifen gestört fühlen. Außerdem ist aufgefallen, dass mehr als die Hälfte der Befragten die Fragen zum korrekten Verhalten am Bahnübergang nicht richtig beantwortet haben. Diese Ergebnisse liefern Hinweise, dass sowohl bezüglich des Pfeifens als auch Maßnahmen zum korrekten Verhalten am Bahnübergang erforderlich sind. So kann diese Befragung als Grundlage für eine größere, deutschlandweit angelegte Studie dienen, um das menschliche Empfinden an Bahnübergängen zu untersuchen.

Außerdem konnte im zweiten Teil der Befragung die Sichtweise der Triebfahrzeugführer abgefragt werden. Es hat sich herausgestellt, dass nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge einen Stressfaktor für jene darstellt. Auch hier konnte das Potenzial einer notwendigen Verbesserung aufgezeigt werden.

Eine abschließende Befragung zur Akzeptanz des ATTRACTIVE-Systems konnte nicht durchgeführt werden. Da mit den beteiligten Stakeholdern lediglich ein Kompromiss zu einem Testversuchstag gefunden werden konnte, war ein dauerhafter Betrieb des ATTRACTIVE-Systems nicht möglich. Aufgrund dessen konnten auch keine dauerhafte Übertragung der Verkehrsteilnehmer am Bahnübergang sowie deren Befolungsraten aufgezeichnet und an die Mobilthek übertragen werden.

Darüber hinaus konnten alle Projektpartner im Rahmen des Projekts Kompetenzen im Bereich Bahnübergänge aufbauen. Außerdem wurden die Kompetenzen des KIT im Bereich der Energieversorgung weiter ausgebaut, insbesondere bei der Durchführung von Simulationen. Durch die notwendige Kooperation mit Partnern aus Industrie, Politik und Behörden haben sich für das Institut neue wichtige Bindungen ergeben.

Teile der Projektergebnisse werden in den Vorlesungen des Instituts Fahrzeugsystemtechnik des KIT – darunter Bahnsystemtechnik sowie Innovations- und Projektmanage-

ment im Schienenfahrzeugbau – präsentiert. Im Laufe des Projekts wurden mehrere Abschlussarbeiten zu den Themen aus dem Förderprojekt betreut. Die Ergebnisse des Projekts fließen ebenfalls in eine Promotionsarbeit ein. Die erworbene Expertise des KIT kann nach Projektende genutzt werden, um weitere Forschungsprojekte zum Thema Bahnübergänge durchzuführen. Ein Anschlussprojekt noch mit Beginn im Jahr 2026 ist geplant.

Es ist außerdem geplant, die Verkehrszählung, die im April 2025 am Bahnübergang „Höpf-ling“ in Siegsdorf stattgefunden hat, der Mobilithek zur Verfügung zu stellen.

Eine in diesem Projekt gewonnene Erkenntnis liegt darin, dass es herausfordernd ist, Betreiber von Eisenbahninfrastrukturen (EIU) von Innovationen zu überzeugen - selbst wenn größere Kostenvorteile den Vorbehalten gegenüberstehen. Die Gemeinden jedoch, auf deren Gebiet heute noch nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge betrieben werden, haben sowohl ein großes Interesse an kostengünstigeren Sicherungsanlagen als auch auf Änderungen im Betriebsablauf. Konkret bedeutet dies eine Reduktion von Pfeifanlässen an solchen Bahnübergängen. Auch die Betreiber der auf den Infrastrukturen verkehrenden Eisenbahnfahrzeuge (EVU) haben Interesse an Lösungen wie die in ATTRACTIVE, wenn-gleich sie für die Sicherung der Bahnstrecken bereits an den Streckenbetreiber im Rahmen der Trassenbepreisung bezahlen. Hier gibt es also ein kompliziertes Geflecht von Zuständigkeiten und Zahlungsverpflichtungen zu adressieren.

Im Bahnumfeld stellt die kurzfristige Verwertung von technologischen Innovationen eine grundsätzliche Herausforderung dar. Selbst ein hohes Einsparpotential gegenüber existierenden (Teil-)Lösungen (hier der Leit- und Sicherungstechnik), einfaches Handling durch eingewiesenes Fachpersonal (z. B. Baustellen-Ausrüster) und anderen Vorteilen steht ein Festhalten an seit Jahrzehnten im Einsatz bewährter Technik entgegen. Dennoch haben insbesondere die betroffenen Gemeinden ein hohes Interesse an einer Verstetigung der im Projekt erarbeiteten Lösung bekundet. Die loW hat mit der Integration ihrer Technik in die Ansteuerung der Lichtsignalanlage des Lieferanten eine hervorragende Position geschaffen, die Technik als Verbundsystem zu verwerten. Die Praxistauglichkeit im Dauerbetrieb wurde in ATTRACTIVE für einen mehrwöchigen Betrieb „unter einer Haube“ eruiert. Erfreulicherweise ist es loW jedoch bereits während der Laufzeit von ATTRACTIVE im Jahr 2025 gelungen, einen Ausrüstungsvertrag bei einem Betreiber für 20 Fahrzeugtransponder und fünf BÜ-Ansteuerungen im Europäischen Ausland zu erhalten, was im Eisenbahnumfeld ein sehr schneller Erfolg bedeutet. Dieser Auftrag kann als unmittelbaren Verwertungserfolg von ATTRACTIVE gewertet werden.

2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Thematik einer technischen Unterstützung oder Low-Cost-Lösungen im Bereich der Bahnübergangssicherungen wird von anderen vor allem industriell untersucht. Der Fokus liegt hier auf einer schlanken Ausgestaltung der Systeme. International gibt es hier schon einige Beispiele wie das System MICRO des Herstellers Innolutions in der Schweiz. Die Innolutions-Lösung setzt sich aus einem Andreaskreuz sowie einer integrierten Lichtsignalanlage zusammen. Die Ampel besteht aus zwei Kammern, sodass eine gelb-rot Anzeige möglich ist. Der Hersteller wirbt mit einem hohen Safety-Integrity-Level (SIL 3), wobei die Aktivierung des Systems noch über das Überfahren von Gleisschaltmitteln erfolgt. [5]

Ein weiterer Ansatz ist ein Low-Cost-System aus Norwegen. Der Hersteller Wavetrain setzt hierbei auf die Aktivierung durch ortsfeste Mikrophone. Diese werden infrastrukturseitig an der Schiene installiert. Sobald ein Zug sich nähert, werden von den Sensoren Schwingungen im Gleis registriert. Das signalisiert der Lichtsignalanlage die Aktivierung. Auch hier besteht das System aus einem Andreaskreuz mit integrierter Lichtsignalanlage. Das System wird vor allem mit einem einfachen und schnellen Aufbau beworben. Im September 2024 wurde das System auf der InnoTrans vorgestellt. [32]

Während der Laufzeit von ATTRACTIVE wurde in Japan ein ähnliches System zur Unterstützung eines nichttechnisch gesicherten Bahnübergangs untersucht. Hier werden die Bahnübergänge mit einer Anzeige nachgerüstet, die wiederum durch den Zug aktiviert werden können. Die Kommunikation ist hierbei WLAN-basiert. [33]

Weitere Entwicklungen gibt es bezüglich assistierender Systeme beim Queren von Bahnübergängen. Hier setzt beispielsweise das australische Projekt Boomtime an. Im Rahmen dieses Projekts wurde eine App entwickelt und untersucht, die den Nutzern eine Zeitprognose anzeigt, wie lange keine Schließung der Schranken erwartbar ist. Das erleichtert vor allem mobilitätseingeschränkten Straßenverkehrsteilnehmern die Entscheidung, ob der Bahnübergang noch sicher gequert werden kann. Die Information über die Positionsdaten des Zuges werden aktuell aus Open-Data-Quellen bezogen. [34]

Der im Januar 2026 in der Fachzeitschrift Signal und Draht veröffentlichte Artikel: *Digitaler Bahnbetrieb: Potenziale und Herausforderungen* von Eric Schöne diskutiert die Potenziale an Bahnübergängen für einen digitalen Bahnbetrieb. Es wird gezeigt, dass weiterhin die Notwendigkeit einer technischen Nachrüstung von Bahnübergängen besteht, gerade im Hinblick auf eine zukünftige Automatisierung des Bahnsystems. [35]

2.6 Erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die gewonnenen Erfahrungen und Ergebnisse wurden bzw. werden im Rahmen folgender Konferenzen und Veröffentlichungen präsentiert.

Konferenzen

Am 19. und 20. November 2025 wurde am 5. International Railway Symposium Aachen (IRSA 2025) teilgenommen. Daraus ging im Januar 2026 folgende Veröffentlichung hervor:

Lang, C.; Leicht, L.; Ziesel, P.; Zdarsky, A.; Cichon, M. G.: Konzepte zur netzunabhängigen Energieversorgung für eine alternative Sicherung von Bahnübergängen 2026. Proceedings of the 5th International Railway Symposium Aachen (IRSA 2025). Ed.: N. Nießen, 459–475, RWTH Aachen University

Fachzeitschriften

Weiterhin ist ein Beitrag mit dem Fokus auf der Energieversorgung in der Eisenbahntechnischen Rundschau (ETR) in der Ausgabe 6 im Juni 2026 geplant.

Darüber hinaus sollen weitere Projektergebnisse im Laufe des Jahres 2026 in einer anderen Fachzeitschrift publiziert werden.

Weitere öffentlichkeitswirksame Tätigkeiten (Auswahl)

Am 28.02.2025 wurde der Beitrag Gemeinde Siegsdorf beteiligt sich an Forschungsprojekt „Sicherung unbeschränkter Bahnübergänge“ im Siegsdorfer Gemeindekurier, Ausgabe 2 veröffentlicht.

Nach erfolgreicher Demonstration des ATTRACTIVE-Systems wurde im Dezember 2025 ein LinkedIn-Post verfasst: <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7401895156825874432/>

Das Projektvideo kann seit dem 09.02.2026 unter folgendem Link <https://www.youtube.com/watch?v=uefFUVpX3NE> aufgerufen werden.

A Anhang

Projektplan

	M1					M2					M3					M4				M5				M6												
	KW 27	KW 28	KW 29	KW 30	KW 31	KW 32	KW 33	KW 34	KW 35	KW 36	KW 37	KW 38	KW 39	KW 40	KW 41	KW 42	KW 43	KW 44	KW 45	KW 46	KW 47	KW 48	KW 49	KW 50	KW 51	KW 52										
Arbeitspakete																																				
AP 1 - Projektmanagement																																				
Laufendes Projektmanagement	Kick Off																												MS1							
AP 2.1 - Installations- und Vorbereitungsarbeiten Schienenfahrzeug																																				
Erstellung digitale Strecke																																				
Erstellung Frequenzantrag																																				
Bau, Parametrierung und Test von zwei Transpondereinheiten																																				
Einrüstung Transpondertechnik																																				
Prototyp Energieharvesting																																				
AP 2.2 - Interface-Entwicklung Transceiver-LSA																																				
Entwicklung Transceiver für LSA																																				
Anbindung Portal zur zeitnahen Übermittlung von Straßenverkehrsdaten																																				
AP 2.3 - Installations- und Vorbereitungsarbeiten am BU																																				
Auswahl der BU																																				
Beschaffung von ggf. Genehmigungen für BU																																				
Inbetriebnahme Kamera Verkehrsteilnehmer																																				
Installations und Tests an BU																																				
Test ortsfester Harvesting Einrichtung																																				
AP 3 - Betrieb und Auswertung																																				
Betrieb der ausgerichteten BUS																																				
Erfassung der Straßen- und Schienenverkehre																																				
Statistiken zum Einsparpotential "Pfeifanfänger"																																				
Einholung Erfahrungswerte Betreiber, Lokführer, Anwohner																																				
Durchführung standardisierter Befragung Verkehrsteilnehmer																																				
Analyse neuartige Energieübertragungsmethode																																				
Auswertung der erfassten Daten																																				
AP 4 - Dissemination und Exploitation																																				
Erstellung wissenschaftlicher Publikationen																																				
Video																																				
Vorbereitung und Durchführung der Abschlussveranstaltung																																				

	M7				M8				M9				M10				M11				M12											
	KW 1	KW 2	KW 3	KW 4	KW 5	KW 6	KW 7	KW 8	KW 9	KW 10	KW 11	KW 12	KW 13	KW 14	KW 15	KW 16	KW 17	KW 18	KW 19	KW 20	KW 21	KW 22	KW 23	KW 24	KW 25	KW 26	KW 27					
Arbeitspakete																																
AP 1 - Projektmanagement																																
Laufendes Projektmanagement					MS2																								AV			
AP 2.1 - Installations- und Vorbereitungsarbeiten Schienenfahrzeug																																
Erstellung digitale Strecke																																
Erstellung Frequenzantrag																																
Bau, Parametrierung und Test von zwei Transpondereinheiten																																
Einrüstung Transpondertechnik																																
Prototyp Energieharvesting																																
AP 2.2 - Interface-Entwicklung Transceiver-LSA																																
Entwicklung Transceiver für LSA																																
Anbindung Portal zur zeitnahen Übermittlung von Straßenverkehrsdaten																																
AP 2.3 - Installations- und Vorbereitungsarbeiten am BU																																
Auswahl der BU																																
Beschaffung von ggf. Genehmigungen für BU																																
Inbetriebnahme Kamera Verkehrsteilnehmer																																
Installations und Tests an BU																																
Test ortsfester Harvesting Einrichtung																																
AP 3 - Betrieb und Auswertung																																
Betrieb der ausgerüsteten BUS																																
Erfassung der Straßen- und Schienenverkehre																																
Statistiken zum Einsparpotential "Pfeifanfänger"																																
Einholung Erfahrungswerte Betreiber, Lokführer, Anwohner																																
Durchführung standardisierter Befragung Verkehrsteilnehmer																																
Analyse neuartige Energieübertragungsmethode																																
Auswertung der erfassten Daten																																
AP 4 - Dissemination und Exploitation																																
Erstellung wissenschaftlicher Publikationen																																
Video																																
Vorbereitung und Durchführung der Abschlussveranstaltung																																

B Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Technisch gesicherter Bahnübergang mit Vollschranken und Lichtsignalanlagen [10].....	7
Abbildung 2: Nichttechnisch gesicherter Bahnübergang (eigenes Foto)	8
Abbildung 3: Geografische Lage des Bahnübergangs „Höpfling“	16
Abbildung 4: Lastprofil.....	18
Abbildung 5: Energieübertragung durch Schienenfahrzeuge mit einer Ladestreckenlänge von 14 m	19
Abbildung 6: Energieübertragung durch Straßenfahrzeuge mit einer Ladestreckenlänge von 30 m	20
Abbildung 7: Schematischer Aufbau der Photovoltaikanlage	21
Abbildung 8: Verlauf des Ladezustands der Batterien	23
Abbildung 9: Schematischer Aufbau des Brennstoffzellensystems mit Photovoltaikunterstützung	24
Abbildung 10: Autarkiegrad des Brennstoffzellensystems.....	25
Abbildung 11: Täglicher Methanolverbrauch in Abhängigkeit vom Autarkiegrad.....	25
Abbildung 12: Digitale Streckenkarte	26
Abbildung 13: Einbau der Transpondereinheiten inkl. Antennen.....	27
Abbildung 14: Steuereinheit und LSA-Schnittstelle	28
Abbildung 15: Wöchentliche Verkehrsübersicht	30
Abbildung 16: Übersicht über das Alter der Befragten	31
Abbildung 17: Verteilung der Arbeitserfahrung in Fünfjahresschritten	33
Abbildung 18: Einsatz des ATTRACTIVE-Systems.....	34
Abbildung 19: Versuchsaufbau der Energy-Harvesting-Messung.....	35
Abbildung 20: Öffentliche Demonstration des ATTRACTIVE-Systems	37

C Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswahl Bahnübergänge Siegsdorf	15
Tabelle 2: Energieverbräuche der betrachteten Komponenten	17

D Literaturverzeichnis

- [1] „Deutsche Bahn Daten&Fakten 2024“, Deutsche Bahn AG, Berlin.
- [2] „§ 11 EBO - Einzelnorm“. Zugegriffen: 6. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/ebo/__11.html
- [3] von N. Häußinger, „Wenn das Pfeifen nervt ...“, Tegernseerstimme. Zugegriffen: 10. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://tegernseerstimme.de/wenn-das-pfeifen-nervt/>
- [4] Bundesstelle für Eisenbahnuntersuchung, „Jahresbericht 2024“, Okt. 2025. Zugegriffen: 31. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.eisenbahn-unfalluntersuchung.de/SharedDocs/Downloads/BEU/Jahresberichte/Jahresbericht_2024.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- [5] J. Oelsner und J. Bruder, „Analyse Optimierungspotential Bahnübergangssicherung“, EBA Forschungsbericht, Apr. 2019. Zugegriffen: 26. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Downloads/DZSF/Veroeffentlichungen/Forschungsberichte/2019/EBA_Forschungsbericht_2019-04_Anlagen.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- [6] „§ 11 EBO - Einzelnorm“. Zugegriffen: 6. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/ebo/__11.html
- [7] E. Schöne, „Bahnübergänge“, in *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*, L. Fendrich und W. Fengler, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2019, S. 673–709. doi: 10.1007/978-3-662-56062-4_13.
- [8] „Detailseite - Universität Passau“. Zugegriffen: 24. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ird.uni-passau.de/eisenbahnrechts-datenbank/detailseite/olg-frankfurt-am/19-02-2020/4-u-67-18>
- [9] *Straßenverkehrs-Ordnung (StVO)*. 2024.

- [10] „Richtiges Verhalten am Bahnübergang | Runter vom Gas“. Zugegriffen: 4. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.runtervomgas.de/ratgeber-und-service/artikeluebersicht/richtiges-verhalten-am-bahnuebergang/>
- [11] „EBA - Homepage - BÜ-Leitfaden“. Zugegriffen: 4. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Infrastruktur/Bahnuebergaenge/21_bue_leitfaden.html
- [12] F. Christ u. a., *VDV BÜV- NE:Vorschrift für die Sicherung der Bahnübergänge bei nichtbundeseigenen Eisenbahnen*, VDV-Schrift 363, August 2020.
- [13] „Rail2X-Smart Services – Anwendungen der Car2X-Technologie im Bahnverkehr“. Zugegriffen: 2. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dlr.de/de/ts/forschung-und-transfer/projekte/rail2x-smart-services>
- [14] „Projekt KI4LSA: Künstliche Intelligenz für LichtSignalAnlagen“, Institutsteil für industrielle Automation INA
 des Fraunhofer IOSB. Zugegriffen: 2. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iosb-ina.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/maschinelles-lernen/forschungsthemen-und-projekte/projekt-KI4LSA.html>
- [15] „KI4PED“, Institutsteil für industrielle Automation INA
 des Fraunhofer IOSB. Zugegriffen: 2. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iosb-ina.fraunhofer.de/de/aktuelles_news/2021/ki4ped.html
- [16] „Alpiner Mobilitäts-Datenraum Inntal - ALMODA“. Zugegriffen: 31. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/mFUND/KI-Projekte/almoda.html>
- [17] A. Triviño-Cabrera, J. M. González-González, und J. A. Aguado, *Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Foundations and Design Approach*. in Power Systems. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-26706-3.
- [18] A. Jeyanathan, S. Chew, D. Stevenson, und L. Cipcigan, „Whole Life Costing of Off-Grid Power Supplies for Rail Level Crossing Safety Systems“, in *2021 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Aug. 2021, S. 1–6. doi: 10.1109/UPEC50034.2021.9548187.
- [19] A. V. Ablayeva, N. V. Yaronova, und O. O. Ruzimov, „Ensuring a Reliable Power Supply for Railway Traffic Lights Using Renewable Energy Sources“, in *2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Sep. 2024, S. 600–604. doi: 10.1109/UralCon62137.2024.10718877.

- [20] „Railroad Crossing Signals“. Zugegriffen: 10. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oconnerengineering.com/Railroad-Crossing-Signals.html>
- [21] Mauro Feliziani, Tommaso Campi, Silvano Cruciani, und Francesca Maradei, *Wireless Power Transfer for E-Mobility : Fundamentals and Design Guidelines for Wireless Charging of Electric Vehicles*. Amsterdam: Academic Press, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.redi-bw.de/db/ebsco.php/search.ebsco-host.com/login.aspx%3fdirect%3dtrue%26db%3dnlebk%26AN%3d3451950%26site%3dehost-live>
- [22] D. Barth, „Mathematische Methoden für die effiziente Auslegung und den Betrieb induktiver Batterieladesysteme“. Zugegriffen: 12. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000157668>
- [23] S. Lee, J. Huh, C. Park, N.-S. Choi, G.-H. Cho, und C.-T. Rim, „On-Line Electric Vehicle using inductive power transfer system“, in *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Sep. 2010, S. 1598–1601. doi: 10.1109/ECCE.2010.5618092.
- [24] „Final Report Summary - FABRIC (FeAsiBility analysis and development of on-Road charging solutions for future electric vehicles) | FP7“, CORDIS | European Commission. Zugegriffen: 27. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://cordis.europa.eu/project/id/605405/reporting>
- [25] G. Lee, M. Y. Kim, S.-G. Lee, und J. H. Kim, „Operational Verification of Semi-dynamic Wireless Power Transfer in Light-Rail Transit Systems“, *IEEE Trans. Transp. Electrification*, Bd. 11, Nr. 1, S. 348–358, Feb. 2025, doi: 10.1109/TTE.2024.3390569.
- [26] DB InfraGO AG, „Kursbuch der KBS 953 nach Ruhpolding“. 2025. Zugegriffen: 3. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://kursbuch.bahn.de/hafas/kbview.exe/dn/KB953_H_Taeglich_F_Bayern__24__31__12__G22112024.pdf?filename=KB953_H_Taeglich_F_Bayern__24__31__12__G22112024.pdf&orig=sS
- [27] DB InfraGO AG, „Kursbuch der KBS 953 nach Traunstein“. 2025. Zugegriffen: 18. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://kursbuch.bahn.de/hafas/kbview.exe/dn/KB953_R_Taeglich_F_Bayern__24__31__12__G22112024.pdf?filename=KB953_R_Taeglich_F_Bayern__24__31__12__G22112024.pdf&orig=sS

- [28] PLANUNGSGESELLSCHAFT STADT-LAND-VERKEHR GmbH, „Verkehrsgutachten Siegsdorf“, München, Feb. 2017. Zugegriffen: 4. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.rathaus-siegsdorf.de/fileadmin/Dateien/PDF-Dateien/Verkehrsgutachten_gesamt.o.pdf
- [29] „Krafftahrt-Bundesamt - Umwelt“. Zugegriffen: 19. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Umwelt/umwelt_node.html;jsessionid=AAD8E5EF4385DDB5115717CDEADD4DEB.live11313
- [30] T. Aundrup *u. a.*, „Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene“, VDE Verband der Elektrotechnik, Mai 2015.
- [31] „Index of /climate_environment/CDC/observations_germany/climate/10_minutes/solar/historical/“. Zugegriffen: 10. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/10_minutes/solar/historical/
- [32] „Wavetrain - Unique and smart upgrade of level crossings“. Zugegriffen: 25. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wavetrain.no/product/>
- [33] N. Nießen, C. Schindler, und R. Pfaff, „IRSA 2025 : Tagungsband/proceedings: Aachen, Germany 19-20 November 2025“, RWTH Aachen University, RWTH-2026-00357, 2026. doi: 10.18154/RWTH-2026-00357.
- [34] „Boomtime-COMPLEMENTARY INFORMATION ABOUT BOOMGATECLOSURE TIMES“,
- [35] E. Schöne, „Digitaler Bahnbetrieb: Potenziale und Herausforderungen für Bahnübergänge“, Nr. 001-002/26, Feb. 2026.