



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Verkehr BAV**  
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050  
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

# Meteobasierte Vorbereitungsdauer von Zügen

Schlussbericht

**Johannes Estermann, SBB AG**

Trüsselstrasse 2, 3000 Bern 65, Schweiz, johannes.estermann@sbb.ch, www.sbb.ch

## **Begleitgruppe**

Stany Rochat, BAV  
Stefan Husen, BAV

## **Impressum**

Herausgeberin:  
Bundesamt für Verkehr BAV  
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)  
CH-3003 Bern

Programmleiter  
Stany Rochat, BAV

Projektnummer: 162  
Bezugsquelle  
Kostenlos zu beziehen über das Internet  
[www.bav.admin.ch/energie2050](http://www.bav.admin.ch/energie2050)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor –in oder sind ausschliesslich die Autoren –  
innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 19. September 2025

## Inhalt

Executive Summary in Deutsch .....	1
Executive Summary in einer zweiten Landessprache .....	2
Executive Summary in Englisch .....	2
1. Ausgangslage .....	3
2. Ziel der Arbeit .....	3
3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand .....	4
4. Ergebnisse .....	6
Spezifikation der meteobasierten Vorbereitungsdauer .....	6
Umsetzung der saisonale Vorbereitungsdauer .....	7
Implementierung der fahrplanbasierten Bereitstellzeit für die DPZ Flotte .....	7
Validierung der saisonalen Vorbereitungsdauer .....	8
Validierung der Energieeinsparung .....	11
5. Diskussion .....	12
6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen .....	12
Anhang .....	13

## Executive Summary in Deutsch

Das Ziel des Projekts **meteobasierte** Vorbereitungsdauer von Zügen war, den Energieverbrauch von SBB-Personenverkehrszügen während der Abstellperioden zu reduzieren, ohne den Kundenkomfort zu beeinträchtigen.

Dabei sollte die bisher **statische** Vorbereitungsdauer vor dem nächsten Einsatz fahrzeugspezifisch mittels thermischer Modelle und lokaler Meteodaten optimiert werden. Dieses Vorgehen erwies sich jedoch als wirtschaftlich nicht umsetzbar. Eine Validierung über lange Abstellzeiten war schwierig und eine Anbindung an externe Wetterdienste problematisch. Deshalb wurde der Ansatz auf eine **saisonale**, monatsabhängige Vorbereitungsdauer umgestellt.

Die Vorbereitungsdauer wurden anhand gemessener Aufheiz- und Abkühlverhalten je Flotte und Monat festgelegt. Die optimierte Vorbereitungsdauer reicht je nach Flotte und Monat von 30 bis 90 Minuten. Die saisonale Vorbereitungsdauer wurde im Sommer 2024 für die Flotten GTW und HVZ ausgerollt. Für die DPZ-Flotte ist die Integration zusammen mit dem Rollout der fahrplanbasierten Bereitstellung seit März 2025 im Probebetrieb.

Die Wirkung der Massnahmen wurde mit Energieverrechnungsdaten validiert. Die jährlichen Einsparungen betragen rund 1'076 MWh für die DPZ-Flotte, 158 MWh für die GTW-Flotte und 229 MWh für die HVZ-Flotte, etwa 30% höhere Einsparungen als für die komplexere, ursprünglich geplante meteobasierte Lösung prognostiziert war.

Die saisonale Vorbereitungsdauer konnte als kosteneffiziente Alternative zur ursprünglich geplanten meteobasierten Lösung eingeführt werden. Sie reduziert die Komplexität deutlich und erzielt sogar höhere Energieeinsparungen. Damit empfiehlt sie sich auch für den Rollout auf weiteren Flotten der SBB.

## Executive Summary en français

L'objectif du projet relatif au temps de préparation des trains **basé sur la météo** était de réduire la consommation d'énergie des trains de voyageurs CFF pendant les périodes de remisage, sans nuire au confort de la clientèle.

À cet égard, la durée de préparation **statique**, en vigueur jusqu'à présent, devait être optimisée en fonction du véhicule avant la prochaine utilisation à l'aide de modèles thermiques et de données météorologiques locales. Cette procédure s'est toutefois avérée peu réaliste sur le plan économique. Une validation sur de longues durées de remisage s'est avérée difficile et une connexion à des services météorologiques externes posait problème. C'est pourquoi l'approche a été adaptée à une durée de préparation **saisonnnière** et mensuelle.

La durée de préparation a été déterminée sur la base de mesures du comportement en chauffage et en refroidissement, par flotte et par mois. La durée de préparation optimisée varie de 30 à 90 minutes en fonction de la flotte et du mois. La durée de préparation saisonnière a été déployée à l'été 2024 pour les flottes GTW et HVZ. Pour la flotte DPZ, l'intégration est à l'essai d'exploitation en même temps que le déploiement de la mise à disposition basée sur l'horaire depuis mars 2025.

L'efficacité des mesures a été vérifiée sur la base des données de facturation de l'énergie. Les économies annuelles s'élèvent à environ 1076 MWh pour la flotte DPZ, 158 MWh pour la flotte GTW et 229 MWh pour la flotte HVZ, soit environ 30% supérieures aux économies prévues pour la solution basée sur la météo - plus complexe - prévue initialement.

La période de préparation saisonnière a pu être introduite en tant qu'alternative rentable à la solution basée sur la météo initialement prévue. Elle réduit considérablement la complexité et permet de réaliser des économies d'énergie plus importantes. Elle est donc également recommandée pour le déploiement sur d'autres flottes des CFF.

## Executive Summary in English

The aim of the project **weather-based preparation time** for trains was to reduce the energy consumption of SBB passenger trains during stabling periods without compromising customer comfort.

The previous **static preparation time** was to be optimised on a vehicle-specific basis by means of thermal models and local meteorological data before the next use. However, this procedure proved not to be economically feasible. Validation over long stabling times was difficult and connection to external weather services was problematic. The approach was therefore changed to a **seasonal**, monthly preparation time.

The preparation time was determined based on measured heating-up and cooling-down behaviour for each fleet and month. The optimised preparation time ranges from 30 to 90 minutes, depending on the fleet and month. The seasonal preparation time was rolled out in summer 2024 for the GTW and HVZ fleets. For the DPZ fleet, integration together with the rollout of timetable-based provisioning time has been in trial operation since March 2025.

The impact of the measures was evaluated with energy billing data. The annual savings amount to around 1,076 MWh for the DPZ fleet, 158 MWh for the GTW fleet and 229 MWh for the HVZ fleet, which proved to be around 30% higher than what was forecasted for the (more complex) weather-based solution originally planned.

The seasonal preparation time was introduced as a cost-effective alternative to the weather-based solution originally planned. It significantly reduces complexity and even achieves greater energy savings. This makes it also recommended for rollout on other SBB fleets.

## 1. Ausgangslage

Während längerer Abstellperioden von einigen Stunden bis hin zu mehreren Tagen ausserhalb von Betriebseinsätzen, werden die Heizungs- Lüftungs- und Kühlungsanlagen (HLK-Anlagen) von Eisenbahnfahrzeugen der SBB seit vielen Jahren im sogenannten Schlummerbetrieb ausgeschaltet, solange sich die Temperaturen im Fahrzeuginneren innerhalb eines tolerablen Bereichs befinden. Zur Frostfreihaltung werden Heizung und Lüftung erst bei Innenraumtemperaturen unterhalb von 10 bis 12 °C eingeschaltet. Oberhalb von 28 °C im Fahrzeuginneren wird die Lüftung ohne aktive Kühlung eingeschaltet. Gegenüber einer Abstellmethode, die Fahrgasträume immer für den Fahrgasteinsatz temperiert hält, lassen sich so erhebliche Mengen an Energie einsparen und die Lärmemission am Abstellort minimieren.

Jedoch ist eine termingerechte Heizung oder Kühlung der Personenverkehrszüge entscheidend, um den Kundenkomfort sicherzustellen. Nur so können Energiesparmassnahmen während der Abstellperioden nachhaltig umgesetzt werden. Dazu hat die SBB ab 2015 die fahrplanbasierten Bereitstellzeit (FBB) eingeführt, welche die Heizungs- Lüftungs- und Klimaanlage von SBB-Flotten vollautomatisch zu einer durch den Fahrplan definierten Zeit vor dem nächsten Einsatz weckt. Somit muss keine manuelle Bedienhandlung vor Ort auf den Fahrzeugen erfolgen und kurzfristige Änderungen im Fahrplan aufgrund von Störungen werden automatisch durch FBB berücksichtigt.

Je nach Leistungsfähigkeit der HLK-Anlagen ist die Vorbereitungsdauer per FBB bisher je Fahrzeugtyp auf die kältesten Nächte des Jahres ausgelegt und unabhängig von den tatsächlichen Umgebungsbedingungen immer gleich lang. Im Verlauf des Jahres ist jedoch häufig eine kürzere Vorbereitungsdauer ausreichend, um die Fahrgasträume der Flotten korrekt zu heizen oder zu kühlen. Somit besteht ein Energiesparpotenzial.

In diesem Projekt soll die Vorbereitungsdauer auf drei Flotten der SBB saisonal angepasst werden. So ist weiterhin eine ausreichende Heizung oder Kühlung für den Fahrgasteinsatz sichergestellt und gleichzeitig wird Energie gespart.

Die hier betrachteten Fahrzeugflotten stehen bei der SBB teilweise schon über 30 Jahre im Einsatz. Zusätzlich unterscheiden sich die Flotten in ihrer Systemarchitektur und den verfügbaren Daten und Signalen innerhalb der Fahrzeugleittechnik. Entsprechend wurde für die Steuerung der Vorbereitungsdauer eine Lösung gewählt, die sich auf unterschiedliche Flottentypen adaptieren lässt und gleichzeitig die Komplexität der jeweiligen Flotten berücksichtigt. Schlussendlich muss die Lösung auch wirtschaftlich umsetzbar sein, also eine Anpassung von vielen unterschiedlichen Systemen muss aus Kostengründen vermieden werden. Zur Übermittlung der fahrplanbasierten Bereitstellzeit an die Züge wurde die Fahrzeugplattform ausgewählt. Dieses IT-System ist für die Kundeninformation im Fahrzeug vorgesehen und über die Flotten der SBB einheitlich vorhanden. Über die Fahrzeugplattform werden die Bereitstellzeiten an die jeweiligen Züge übermittelt.

## 2. Ziel der Arbeit

Die bisher statisch definierte Vorbereitungsdauer der Fahrzeuge soll in diesem Projekt saisonal angepasst werden. Dazu muss die auf der Fahrzeugplattform angesiedelte Steuerung der Vorbereitungsdauer angepasst werden. Die Fahrzeugplattform ist primär zuständig für die Echtzeit-Fahrgastinformation. Der Kommunikationskanal der Fahrzeugplattform wird für den Empfang der Bereitstellzeitpunkte von der Zentrale genutzt. Anschliessend wird die Vorbereitungsdauer durch die Fahrzeugplattform berechnet.

Die Verkürzung der Vorbereitungsdauer werden für die Flotten DPZ, GTW und HVZ anhand des jeweiligen Fahrzeugaufheiz- und des Abkühlverhaltens bestimmt. Dabei muss ein negativer Einfluss auf den Kundenkomfort ausgeschlossen werden. Zusätzlich wird auf der Flotte DPZ die fahrplanbasierte Bereitstellzeit im Rahmen dieses Projektes zunächst eingeführt.

Die Wirkung der Energiesparmassnahmen werden anhand der Fahrzeugenergieverbrauchsdaten saisonal überprüft und entsprechende Nachweise erstellt.

### 3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

Aus den zentralen Dispositionssystemen der SBB werden Uhrzeit und Datum einer geplanten kommerziellen Zugfahrt mit Fahrgästen ausgelesen und als fahrplanbasierte Bereitstellungszeit an das jeweilige Fahrzeug gesendet. Damit kann sich das Fahrzeug durch Aktivierung seiner HLK-Anlage termingerecht auf die Fahrt vorbereiten. Mittels fahrplanbasierter Bereitstellungszeit werden seit dem Jahr 2015 die HVZ-Flotte, die Flotte GTW ab 2020 angesteuert. Die Fahrzeuge der DPZ-Flotte werden im Rahmen dieses Projekts mit FBB ausgerüstet. So können die Bedürfnisse der Fahrgäste nach angenehm temperierten Fahrgasträumen der Züge bei Fahrtantritt sowie Energiesparmassnahmen während der Abstellung in Einklang gebracht werden.

Im Gegensatz dazu werden Personenverkehrsfahrzeuge des Regionalverkehrs in Frankreich in Abhängigkeit der Aussentemperatur komplett abgeschaltet abgestellt. Die Züge stehen während der Abstellung zwar komplett stromlos, allerdings nur, solange die Temperaturen in einem moderaten Bereich sind. Sobald die Aussentemperatur zu hoch oder zu tief ist, werden die Züge eingeschaltet abgestellt, mit entsprechendem Energieverbrauch. Zusätzlich muss Personal bereitstehen, um die Fahrzeuge termingerecht vor dem nächsten Einsatz einzuschalten.

In Deutschland wird die nächste Abfahrtszeit durch das Lokpersonal bei der Abstellung auf den Fahrzeugen einprogrammiert. Anschliessend gehen die Fahrzeuge in den Schlumberbetrieb und bereiten sich später selbstständig auf die nächste Abfahrt vor. Eine Änderung im Fahrplan muss allerdings durch Bedienungshandlung auf den Fahrzeugen korrigiert werden.

Der Sollwert der Raumlufftemperatur wird für den kommerziellen Einsatz bei Heizbetrieb auf 22 °C geregelt. Im Schlumberbetrieb wird die Raumlufftemperatur jedoch nur auf 10 bis 12 °C geregelt, um den Frostschutz sicherzustellen und ein Einfrieren der Wasservorräte der WC-Anlagen zu verhindern. Steigt die Raumlufftemperatur im Sommer während des Schlumberbetriebs aufgrund von Sonneneinstrahlung und hoher Aussentemperatur über 28 °C, wird die Lüftung eingeschaltet. Im Schlumberbetrieb wird nicht aktiv gekühlt, so können die Anforderungen des Lärmschutzes an den Abstellorten und Energieeffizienzanforderungen berücksichtigt werden. Die Fahrzeuge der HVZ-Flotte verfügen über keine aktive Klimatisierung. Sie können bei hohen Raumlufftemperaturen nur die Drehzahl der Lüftungsventilatoren beeinflussen.

Durch das vom BAV geförderte Projekt 134 «D RTE 48610 Steuerung energieoptimierte Parkstellung Rollmaterial» wurden Empfehlungen zu funktionalen Anforderungen und Abläufen abgeben um abgestellte Fahrzeuge automatisiert in einen energie- und lärmoptimalen Betriebszustand zu überführen und automatisiert für die Vorbereitung des nächsten Einsatzes zu wecken.

Da während der Abstellperiode der Züge die HLK-Anlagen keine oder nur unzuverlässige Temperaturmesswerte der Fahrgasträume zur Verfügung stellen, soll die Fahrgastraumtemperatur durch thermische Modelle und standortbezogene Meteodaten abgeschätzt werden. Hinzu kommt, dass die Wagen der HVZ-Flotte über keine vernetzte Leittechnik zur Steuerung der HLK-Anlagen verfügen. Hier entscheidet jeder Wagen aufgrund seiner Sensorik für sich, welcher Betriebsmodus gewählt wird.

Auf einem Wagen HVZ-Flotte wurden in 2017 bereits Versuche mit standortbasierten Meteodaten durchgeführt. Die Meteodaten wurden genutzt, um das durch Aussentemperatur oder Sonneneinstrahlung bedingte Aufheizen der Fahrgasträume vorzuberechnen. Während der Heizperiode konnte so die Vorbereitungsdauer reduziert werden.

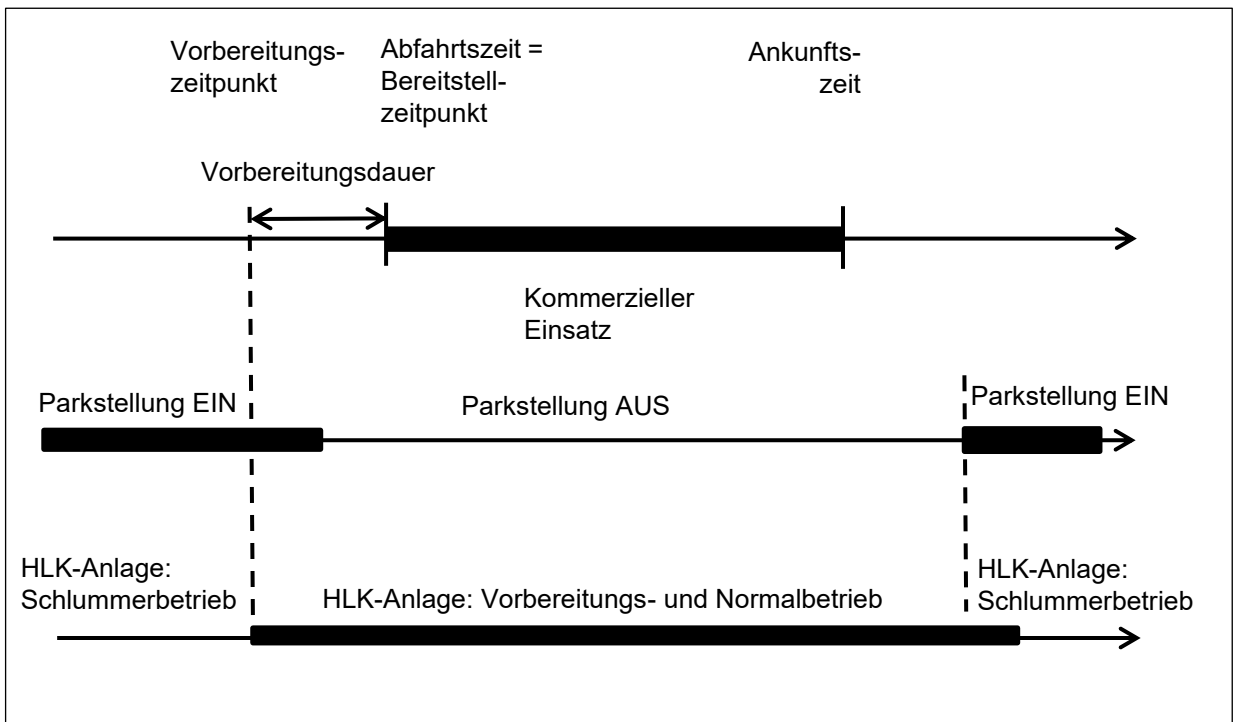


Abbildung 1: Zusammenhang von Vorbereitungszeit- und Bereitstellzeitpunkt.

Der Vorbereitungszeitpunkt ist die Uhrzeit, zu der die HLK-Anlage aus dem Schlummerbetrieb in den Vorbereitungs- oder Normalbetrieb wechselt (vgl. Abbildung 1). Der Vorbereitungszeitpunkt wird durch die Fahrzeugplattform auf Basis der fahrplanbasierten Bereitstellzeit berechnet. Der Bereitstellzeitpunkt wird über die Luftschnittstelle der Fahrzeugplattform (Teil des Kundeninformationssystems) an das jeweilige Fahrzeug übertragen. Das Parkstellungssignal wird durch die Bedienung des Lokpersonals gesteuert (Aktivierung des Führerstands). Die HLK-Anlage wertet diese Signale aus und steuert so ihre Betriebsmodi Schlummerbetrieb oder Vorbereitungs- und Normalbetrieb.

Bisher ist die Vorbereitungsdauer gemäss Tabelle 1 statisch auf den Fahrzeugen hinterlegt.

Tabelle 1: Bisherige Vorbereitungsdauer der Flotten für die Klimatisierung der Fahrgasträume.

Flotte	Bisherige Vorbereitungsdauer
DPZ	90 Min.
Domino	90 Min.
GTW	75 Min.
HVZ	90 Min.

## 4. Ergebnisse

### SPEZIFIKATION DER METEOBASIERTEN VORBEREITUNGSDAUER

Ursprünglich war ein Projektziel, die Innenraumtemperatur der Fahrzeuge mittels thermischer Modelle sowie lokalisierter Wetterdaten abzuschätzen. Die Berechnungen sollten jeweils auf dem einzelnen Fahrzeug durch die Fahrzeugplattform durchgeführt werden. Ist die Innenraumtemperatur bereits nahe am Sollwert für den Fahrgastbetrieb, so kann die Vorbereitungsdauer verkürzt werden, was zu einem Energiespareffekt führt. Entsprechend wurden thermischen Modelle je Fahrzeugtyp sowie eine Spezifikation zur Berechnung der meteobasierten Vorbereitungsdauer [2] erstellt. Die Hauptpunkte der Anforderungen für die thermischen Fahrzeugmodelle sind im Folgenden aufgelistet:

1. Die Vorbereitungsdauer der Fahrzeuge soll verkürzt werden, abhängig von der Aussentemperatur und der Sonneneinstrahlung, um den Energieverbrauch zu senken.
2. Um das Aufheiz- oder Abkühlverhalten der Fahrzeuge berechnen zu können, werden thermische Modelle erstellt und anhand von historischen Messungen überprüft.
3. Zum Ende eines Betriebseinsatzes ist die Fahrzeug-Innenraumtemperatur bekannt, da sie durch die HLK-Anlage eingeregelt ist. Nun muss in Abhängigkeit der aktuellen Aussentemperatur und der Sonneneinstrahlung (diese Meteodaten werden standortbasiert aus einer online Datenbank abgefragt) die erwartete Innenraumtemperatur iterativ für den nächsten Zeitschritt berechnet werden. Auf diese Weise ist die Innenraumtemperatur des Fahrzeugs jederzeit bekannt.
4. Sobald ein neuer Bereitstellzeitpunkt für das Fahrzeug vorliegt, wird anhand der aktuellen Innenraumtemperatur die minimal nötige Vorbereitungsdauer berechnet und die HLK-Anlage zum optimierten Vorbereitungszeitpunkt in den Vorbereitungs- oder Regelbetrieb geschaltet.
5. Die Änderung muss mit den Fahrzeugplattformen der Fahrzeugtypen HVZ, GTW, DPZ kompatibel sein.
6. Die Funktion muss deaktivierbar sein und einzelne Parameter der thermischen Fahrzeugmodelle wie beispielsweise die Temperaturkoeffizienten für das Aufheizen aufgrund von Sonneneinstrahlung müssen konfigurierbar sein.
7. Die Berechnung der optimierten Vorbereitungszeitpunkte erfolgt durch die Fahrzeugplattform. Die Fahrzeugplattform muss über entsprechende Softwareschnittstellen (APIs) die Meteodaten-Abfragen für ihren aktuellen Standort durchführen.
8. Es wurden verschiedene Meilensteine für die Entwicklung und Tests der Änderung festgelegt.

Die Umsetzung dieser Methode stiess im Verlauf jedoch aufgrund ihrer Komplexität an Grenzen. So war es nicht möglich, zu einem akzeptablen Verhältnis von Aufwand und Nutzen, die nötigen Algorithmen für die Bestimmung der Fahrgastraumtemperatur zuverlässig über den Verlauf der Abstelldauer einiger Tage zu prognostizieren. Auch die Abfrage von Meteodaten durch die jeweilige Fahrzeugplattform erwies sich aufgrund von komplexen Zugriffsberechtigungen als nicht skalierbar auf die Flotten. Beispielsweise hätte jede einzelne Fahrzeugplattform eines Fahrzeugs einen gültigen Zugriffstoken für den Meteodaten-Anbieter beziehen und bewirtschaften müssen.

Infolgedessen wurde der Fokus dieses Projektes dahingehend angepasst, dass die Vorbereitungsdauer monatlich in Abhängigkeit der Jahreszeit angepasst werden soll. Damit entfällt die komplexe Abfrage von standortbezogenen Meteodaten, um die Vorbereitungsdauer auf den Fahrzeugen zu steuern.

## UMSETZUNG DER SAISONALE VORBEREITUNGSDAUER

Die saisonalen Vorbereitungszeiten wurden mittels des Dokuments „Saisonale Vorbereitungszeiten“ [1] spezifiziert. Die Vorbereitungszeiten wurden je nach Monat variiert. Im Winter sind längere Vorbereitungszeiten erforderlich (Heizbedarf), während sie in den Übergangsjahreszeiten kürzer und im Sommer wieder länger sind (Kühlbedarf). Aus den Analysen des Vorheiz- und Vorkühlverhaltens der verschiedenen Fahrzeugtypen zu unterschiedlichen Jahreszeiten wird die Vorbereitungszeit je Fahrzeugtyp festgelegt. Tabelle 2 listet die spezifischen Vorbereitungszeiten in Minuten für die Fahrzeugtypen DPZ, GTW, HVZ und Domino auf, die zwischen 30 und 90 Minuten variieren, abhängig von der Leistungsfähigkeit der jeweiligen HLK-Anlagen der Fahrzeuge.

*Tabelle 2: Saisonale Vorbereitungszeiten je Flotte pro Monat in Minuten.*

	Jan	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
<b>DPZ</b>	90	90	70	45	30	45	60	45	30	45	75	90
<b>Domino</b>	90	90	70	45	30	45	60	45	30	45	75	90
<b>GTW</b>	45	45	30	30	45	45	45	30	30	30	45	45
<b>HVZ</b>	90	90	70	45	30	30	30	30	30	60	60	90

Es wurden spezifische Fälle untersucht, in denen die Fahrzeuge unter unterschiedlichen Wetterbedingungen ausgesetzt waren, um den Effekt der saisonalen Vorbereitungszeiten zu überprüfen.

Die saisonale Vorbereitungszeit wird als neue Funktion auf der Fahrzeugplattform im Release 1.72.0 im Sommer 2024 für die Flotten GTW und HVZ ausgerollt [5].

## IMPLEMENTIERUNG DER FAHRPLANBASIERTE BEREITSTELLZEIT FÜR DIE DPZ FLOTTE

Teil dieses Projekts war auch die Einführung der fahrplanbasierten Bereitstellungszeit auf der DPZ-Flotte. Diese Fahrzeuge verfügten bisher nicht über diese Funktion. Die Anforderungen für die Implementierung von FBB wurden in Dokument [1] spezifiziert. Ein wesentlicher Teil der Spezifikation betrifft die Kommunikation zwischen der Fahrzeugplattform auf dem jeweiligen Fahrzeug und der Zentrale, die erforderlichen Betriebszustände sowie die Vorbereitungszeit. Die Spezifikation beschreibt das Verhalten der Fahrzeuge während der verschiedenen Betriebszustände, wie beispielsweise dem Normalbetrieb oder dem Schlumberbetrieb. Es wird beschrieben, wie die Fahrzeuge auf unterschiedliche Einsätze vorbereitet werden und welche Parameter dabei berücksichtigt werden müssen, um eine effiziente Nutzung der Heizungs- und Klimaanlage zu gewährleisten.

Für die nötigen Anpassungen auf den Fahrzeugen wurden entsprechende Dokumente erstellt, jeweils für die betroffenen Komponenten Wagenleitgerät mit Schnittstelle zur Fahrzeugplattform sowie der wagenübergreifenden Steuerung der Betriebszustände der HLK-Anlagen. Für die Einführung der fahrplanbasierten Bereitstellung musste keine Hardware angepasst werden, sondern nur die Software der Fahrzeugsteuerung sowie die Kommunikationsprotokolle mit der Fahrzeugplattform. Ausführliche Tests wurden bereits 2020 durchgeführt und mehrere Fahrzeuge waren anschliessend in einem Probetrieb. Jedoch zeigten sich Fehler im Vorbereitungsbetrieb der HLK-Anlagen während des Rangierens, so dass eine weitere Spezifikation [3] zur Behebung der Fehler erstellt wurde.

Schlussendlich und mit einiger Verzögerung gegenüber den ursprünglichen Terminen wurden alle Softwarekomponenten auf einem DPZ-Fahrzeug integriert und nach einer Testphase im März 2025 in den Probetrieb gegeben.

## VALIDIERUNG DER SAISONALEN VORBEREITUNGSDAUER

Um die saisonale Vorbereitungsdauer zu überprüfen, wurden die Energieverrechnungsdaten der Fahrzeuge ausgewertet. Der Energieverbrauch wird dabei als Indikator verwendet, um den Wechsel der Fahrzeugbetriebszustände von Schlumberbetrieb in den Vorbereitungsmodus zu detektieren (dunkelblaue Linie in den folgenden Abbildungen). Der Zeitpunkt des Wechsels der Betriebsart wird mit der geplanten Abfahrtszeit des Fahrzeugs gemäss Dispositionssystem verglichen, siehe auch Abbildung 1. Der Vorbereitungszeitpunkt des Fahrzeugs ist an einer markanten Zunahme des Energieverbrauchs aufgrund der sich aktivierenden HLK-Anlage erkennbar. Neben dem Energieverbrauch kann aus den Verrechnungsdaten auch die Geschwindigkeit des Fahrzeugs ausgelesen werden (hellblaue Linie in den folgenden Abbildungen). Die Abfahrtszeit kann bestimmt werden, sobald sich die Fahrzeuggeschwindigkeit von 0 km/h ändert. Aus der zeitlichen Differenz zwischen dem Vorbereitungszeitpunkt (Energieverbrauch steigt an, aber Geschwindigkeit ist 0 km/h) und dem Abfahrtszeitpunkt (Geschwindigkeit steigt an) lässt sich die Vorbereitungsdauer ablesen. Dabei müssen Fälle ausgeklammert werden, bei denen ein Fahrzeug vor dem ersten kommerziellen Einsatz mittels Rangierbewegung aus dem Abstellbereich in den Bahnhof rangiert wurde. Mit dieser Methode konnte die Wirkung der saisonale Vorbereitungsdauer stichprobenartig zu verschiedenen Jahreszeiten auf verschiedenen Fahrzeugen überprüft und die korrekte Funktion bestätigt werden.

Zur Illustration werden im Folgenden einige Beispiele von Verbrauchsdaten der Flotten GTW und HVZ für unterschiedliche Jahreszeiten gezeigt.



Abbildung 2: Saisonale Vorbereitung der GTW 004, Abstellung am 22.08.2024 in Beinwil am See. Vorbereitungs-  
dauer von 5:00 - 5:30 Uhr, also 30 Minuten. Zum Vorbereitungszeitpunkt um 5:00 Uhr steigt der Energieverbrauch  
markant an. Planmässige Abfahrtszeit ist 5:28 Uhr, erkennbar am deutlichen Anstieg der Geschwindigkeit. Der  
Zeitintervall der Verbrauchsdaten ist 5 Minuten.



Abbildung 5. Saisonale Vorbereitung des GTW 009 am 18.11.2024. Die Vorbereitungsdauer startet um 5:15 Uhr, planmässige Abfahrt ist 6:00 Uhr. Die saisonale Vorbereitungsdauer beträgt 45 Minuten im November. Das Fahrzeug wird gegen 5:30 Uhr rangiert (hellblaue Linie steigt leicht an). Entsprechend steigt der Stromverbrauch in dieser Zeit ebenfalls leicht an. Zeitintervall der Verbrauchsdaten ist 5 Minuten.

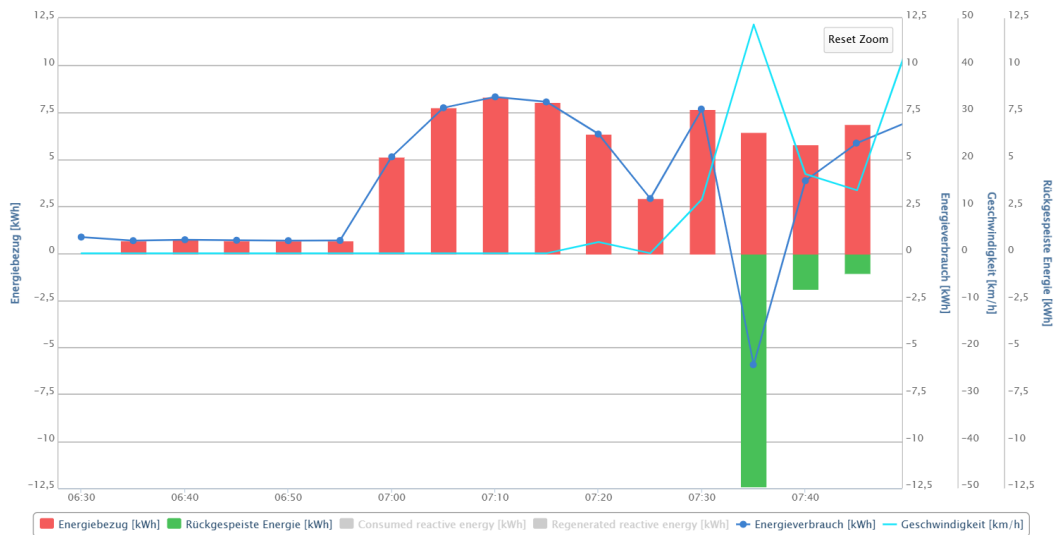


Abbildung 4: Saisonale Vorbereitung des GTW 009 am 13.10.2024. Vorbereitungsdauer der HLK-Anlage ist von 7:00 bis 7:30 Uhr, was einer Vorbereitungsdauer von 30 Minuten im Oktober entspricht. Planmässige Abfahrt des Fahrzeugs um 7:28 Uhr in Beinwil am See. Zeitintervall der Verbrauchsdaten ist 5 Minuten.

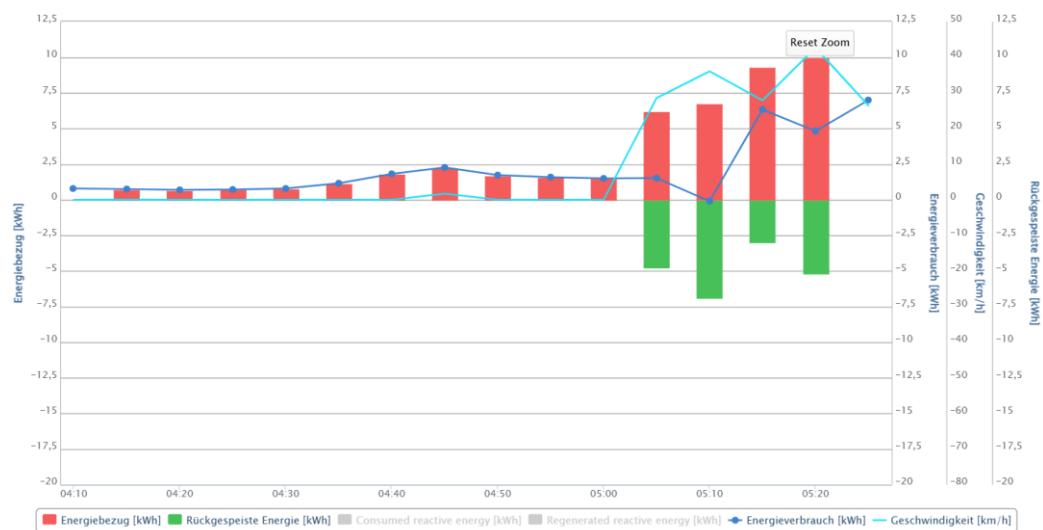


Abbildung 3: Saisonale Vorbereitung des GTW 004 vom 05.09.2024. Die Vorbereitungsdauer beträgt 30 Minuten, von 4:35 bis 5:05 Uhr. Dies entspricht der saisonalen Vorbereitungsdauer für den Monat September. Planmässige Abfahrt um 5:04 Uhr in Beinwil am See. Zeitintervall der Verbrauchsdaten ist 5 Minuten.

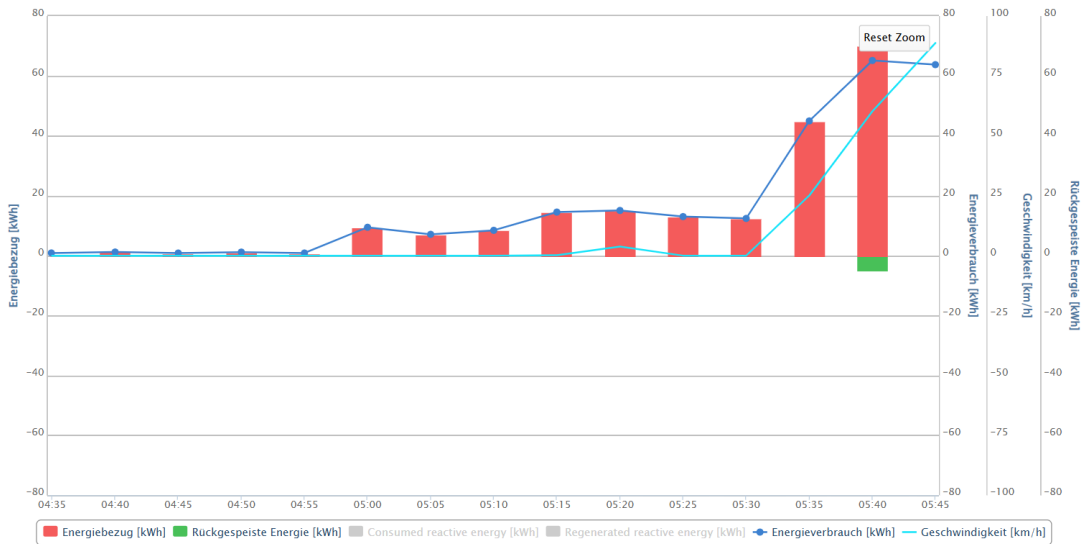


Abbildung 7: Saisonale Vorbereitung des HVZ mit Lok 420 214 vom 19.08.2024. Start der HLK-Anlage ist um 5:00 Uhr erkennbar. Planmässige Abfahrtszeit ist 5:31 Uhr. Daraus ergeben sich 30 Minuten Vorbereitungsbetrieb für den Monat August, was der Spezifikation entspricht. Zeitintervall der Verbrauchsdaten ist 5 Minuten.

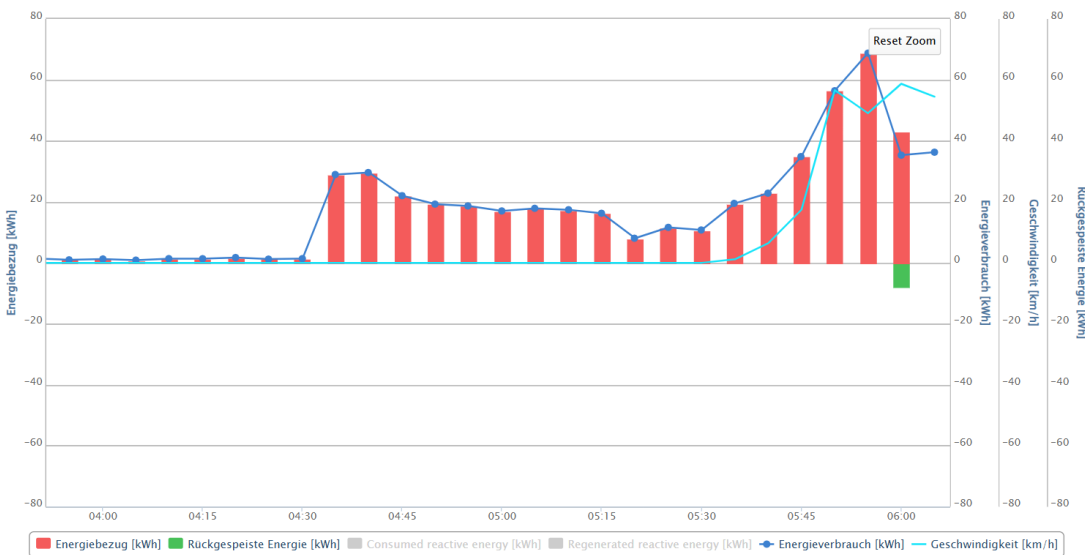


Abbildung 6: Saisonale Vorbereitung des HVZ mit Lok 420 214 am 19.11.2024. Start der HLK-Anlage ist um 4:35 Uhr. Planmässige Abfahrtszeit ist um 5:34 Uhr. Daraus ergeben sich 60 Minuten Vorbereitungsbetrieb im November, was der Spezifikation entspricht. Zeitintervall der Verbrauchsdaten ist 5 Minuten.

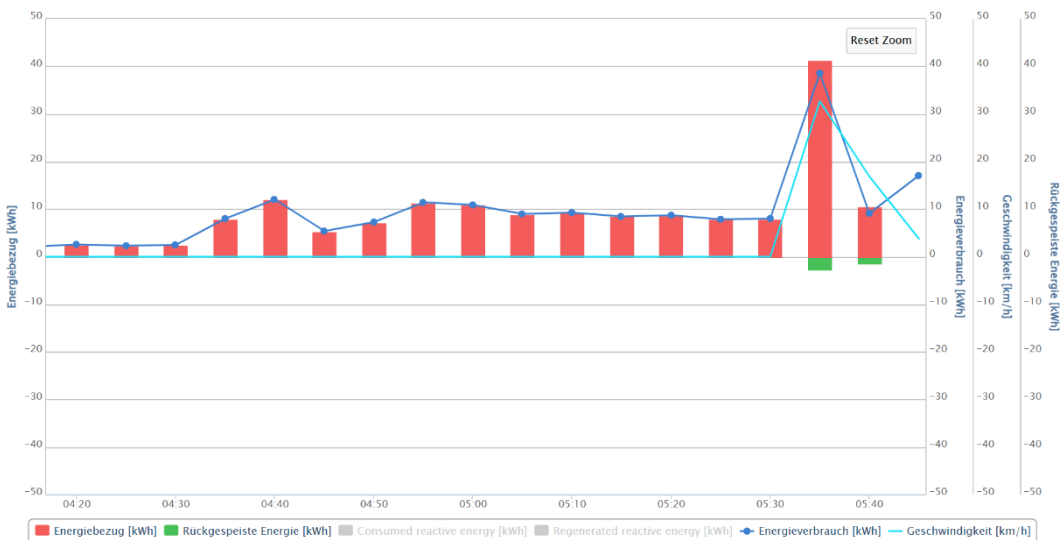


Abbildung 8: Saisonale Vorbereitung des HVZ mit Lok 420 214 am 23.10.2024. Start der HLK-Anlage um 4:35 Uhr. Planmässige Abfahrtszeit ist 5:30 Uhr. Daraus ergeben sich ca. 60 Minuten Vorbereitungsbetrieb im Oktober. Zeitintervall der Verbrauchsdaten ist 5 Minuten.

## VALIDIERUNG DER ENERGIEEINSPARUNG

Für die Berechnung der Energieeinsparung wurden ebenfalls die Verbrauchsdaten der Fahrzeuge ausgewertet. Entscheidend für die Energieeinsparung ist nicht der Verbrauch direkt ab dem Vorbereitungszeitpunkt, sondern der Energieverbrauch des thermisch bereits eingeschwungenen Fahrzeugs kurz vor dem ersten kommerziellen Einsatz. Durch die saisonale Vorbereitungsdauer steht das Fahrzeug länger im Schlumberbetrieb. Entsprechend muss der Energieverbrauch während der Schlumberbetriebs von der Energieeinsparung durch die saisonale Vorbereitungsdauer abgezogen werden.

Dazu wurde der Energieverbrauch der letzten 15 Minuten Vorbereitungsdauer vor Beginn der ersten Fahrt ausgewertet. Von dieser Energieeinsparung wird der mittlere Energieverbrauch der 15 Minuten aus der letzten Abstellphase vor dem Vorbereitungszeitpunkt abgezogen. Proportional zur tatsächlichen Vorbereitungsverkürzung wird die Energieeinsparung je Vorbereitungsvorgang berechnet.

Die Energieeinsparung wird anhand von Stichproben über alle Monate und Flotten ausgewertet. Dabei werden sowohl Vorbereitungsvorgänge nach der Nachtabstellung, als auch Vorbereitungsvorgänge im Tagesverlauf nach einer Abstellung der Fahrzeuge über den Mittag ausgewertet.

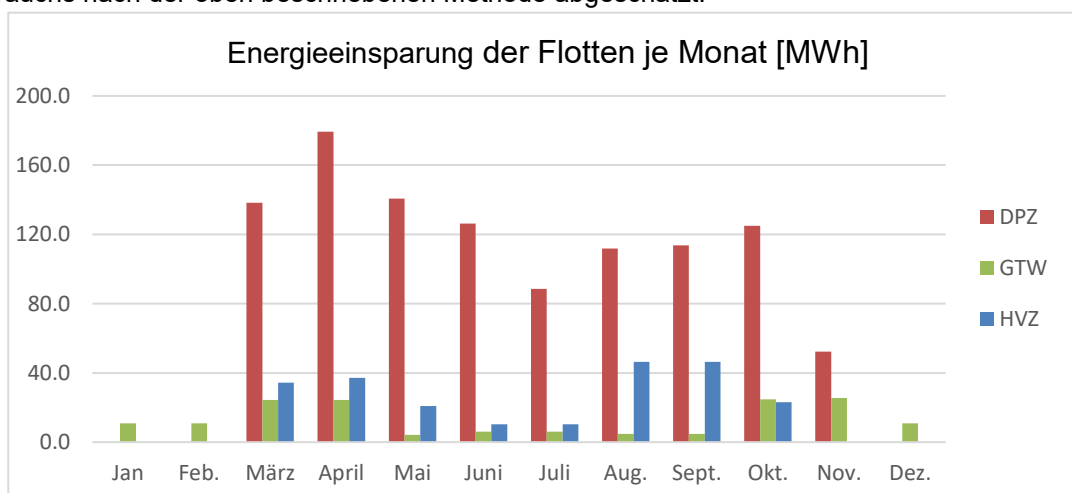
Zur Bestimmung der Häufigkeit des saisonalen Vorbereitens pro Monat wurde die Einsatzplanung der Flotten ausgewertet. Je nach Werktag oder Wochenende werden die Fahrzeuge in unterschiedlichen Mustern eingesetzt. Zudem sind im Regionalverkehr Abstellungen über den Mittag üblich, wenn die Kundennachfrage etwas zurückgeht und die Züge entsprechend verkürzt verkehren. Nach jeder Abstellung, die über 30 Minuten hinaus geht, wird vom landseitigen System eine fahrplanbasierte Bereitstellungszeit an das jeweilige Fahrzeug übermittelt.

Die Energieeinsparung ist zusammen mit der Häufigkeit des saisonalen Vorbereitens in Tabelle 3 aufgeführt. Abbildung 9 zeigt die monatliche Energieeinsparung je Flotte.

*Tabelle 3: Jährliche Energieeinsparung nach Flotten bzw. Fahrzeugen.*

	Anzahl Züge	Anzahl saisonale Vorbereitung pro Monat	Energieeinsparung je Flotte	Energieeinsparung je Fahrzeug
<b>DPZ</b>	113	3549	1076 MWh/Jahr Erwartete Energieeinsparung (*)	9.5 MWh/Jahr Erwartete Energieeinsparung (*)
<b>GTW</b>	17	464	158 MWh/Jahr	9.3 MWh/Jahr
<b>HVZ</b>	30	1043	229 MWh/Jahr	7.6 MWh/Jahr

(\*) Da die Flotte DPZ zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht vollständig mit der saisonaler Vorbereitungsdauer ausgerüstet ist, wird die erwartete Energieeinsparung anhand des bisherigen Energieverbrauchs nach der oben beschriebenen Methode abgeschätzt.



*Abbildung 9: Energieeinsparung je Monat für die Flotten DPZ, GTW und HVZ in MWh.*

## 5. Diskussion

Obwohl bereits 2017 ein erstes Prototypfahrzeug der Flotte HVZ mit meteobasierter Vorbereitung eingesetzt wurde, konnte die Technik nicht auf die Flotten skaliert werden. So war es nicht möglich, zu einem annehmbaren Kosten-Nutzen Verhältnis die Fahrgastraumtemperatur über die Abstelldauer einiger Tage zuverlässig zu berechnen. Auch wurde die Komplexität der nötigen Validierung zu Projektbeginn zu gering eingeschätzt und die Abfrage von Meteodaten durch die jeweilige Fahrzeugplattform erwies sich aufgrund von komplexen Zugriffsberechtigungen als nicht skalierbar auf die Flotten. Beispielsweise hätte jede einzelne Fahrzeugplattform eines Fahrzeugs einen gültigen Zugriffstoken für den Meteodaten-Anbieter beziehen und bewirtschaften müssen.

Infolgedessen wurde der Fokus des Projektes dahingehend angepasst, die Vorbereitungsdauer fix, monatlich, in Abhängigkeit der Jahreszeit zu steuern. Die saisonale Vorbereitungsdauer wurde ab Sommer 2024 auf den Flotten GTW und HVZ umgesetzt und ist für die DPZ-Flotte in der Testphase. Die Komplexität konnte deutlich reduziert werden. So wurde die Reduktion der Vorbereitungsdauer anhand von Temperaturmessreihen der Fahrzeuge bestimmt unter der Prämisse, für die durchschnittlichen Aussenlufttemperaturen der jeweiligen Monate eine ausreichende Vorkonditionierung zu erreichen.

Die Auswertung der Energieeinsparung der HVZ-Flotte lieferte etwa 30% höhere Energieeinsparung, wie ursprünglich prognostiziert wurde. Diese wird auf Ungenauigkeiten des Prognosemodells und der Verbrauchsauswertung zurückgeführt. Die grössere Energieeinsparung der Flotten GTW und DPZ (Energieeinsparung je Fahrzeug von 9.3, beziehungsweise 9.5 MWh/Jahr) gegenüber der HVZ-Flotte (7.6 MWh/Jahr/Fz) wird auf die aktive Kühlung (Klimatisierung) GTW und DPZ im Sommer zurückgeführt.

## 6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Mit einigem Aufwand konnte die Energieeffizienz von Eisenbahn-Personenverkehrsfahrzeugen während der Abstellung gesteigert werden. Dabei wurde zwar nur ein zeitlich kleiner Teil der Betriebsstunden optimiert, aufgrund der grossen Anzahl Fahrzeuge konnten aber doch erhebliche Einsparungen realisiert werden. Das ursprüngliche Ziel, auf Basis von lokalisierten Meteorinformationen die Vorbereitungsdauer der Fahrzeuge zu verkürzen, konnte nicht erreicht werden, da sich die Integration im Verhältnis zur Energieeinsparung als zu aufwändig erwies.

Die Umsetzung einer Vorbereitungsdauer in Abhängigkeit von der Jahreszeit erweist sich als kostengünstige Alternative und führte zu erheblichen Energieeinsparungen, die sogar über der ursprünglichen Prognose lagen. Trotz der technischen Herausforderungen konnten wichtige Meilensteine, wie die Implementierung der fahrplanbasierten Bereitstellungszeit auf der DPZ-Flotte erreicht werden. Die Anpassung des Projektfokus auf eine saisonale Steuerung der Vorbereitungsdauer erweist sich als machbar und effiziente Alternative.

Mit der Übertragung der gewonnenen Methoden und Erkenntnisse auf weitere Flotten kann in der Zukunft zusätzliche Energieeinsparungen realisiert werden. Mit den Fahrzeugen Domino, EW IV, EC und IC Bt bieten sich weitere Flotten innerhalb der SBB an, die heute bereits über eine fahrplanbasiert Vorbereitungsdauer verfügen. Diese Flotten werden um die saisonale Vorbereitungsdauer erweitert.

Auch eine vereinfachte Meteodaten-Integration soll in Zukunft überprüft werden. Voraussetzung ist, dass die Meteodaten innerhalb der SBB-Systeme einfacher verfügbar sind, etwa durch die Zwischenspeicherung der Meteodaten auf einem Server. Mit einfachen Fallunterscheidungen je nach Sonneneinstrahlung am Abstellort könnte die saisonale Vorbereitungsdauer nochmals verkürzt oder auch verlängert werden, ohne auf thermische Modelle der Fahrzeuge angewiesen zu sein.

## Anhang

- [1] Spezifikation saisonale Vorbereitungsdauer v1.23, Auszug, SBB AG, 14.02.2025
- [2] Software Requirements Specification Meteobasierte Vorbereitungszeit v1, SBB AG, 08.11.2018.
- [3] Lastenheft NDW fahrplanbasierte Bereitstellzeit FBB, AAZ 12669670 v1, Auszug, SBB AG, 08.06.2023
- [4] Lastenheft saisonale und meteobasierte Vorbereitungsdauer, SBB AG, 04.07.2024
- [5] Releasenote saisonales Vorbereiten CAA 20401712 v15, SBB AG, 12.11.2024
- [6] Auswertung Energieeinsparung saisonales Vorbereiten, SBB AG, 02.05.2025

\*\*\*