

FreeE-Bus Wissenstransfer-workshop

FHV, Dornbirn

21. Januar 2026

Organisatorisches

Herzlich Willkommen!



Abbildung 1: Copyright: Mathis
Fotografie

- ▶ Das **Buffet** ist eröffnet!
- ▶ Wo ist die **Toilette**? Ein Stock tiefer ist der Weg ausgeschildert.
- ▶ **WLAN:** User: wifi-event, Passwort: 0z6yb6ri. Siehe Pultsteher.
- ▶ **Fotos:** OK?
- ▶ **Projektwebseite:**
<https://calc.labs.fhv.at/~freeebus/> inkl. Präsentationen und Links
- ▶ **Ziel des Workshops:** gegenseitiger Wissenstransfer
 1. Projektbericht
 2. Feedback einholen: Diskussionen, Pinnwand
 3. Kooperationen aufbauen

Das Projekt FreeE-Bus im Überblick

- ▶ **Fördergeber:** Interreg ABH
- ▶ **Zeit:** 1. März 2023 bis zum 30. Juni 2026
- ▶ **Partner:**
 - ▶ Fachhochschule Vorarlberg (FHV)
 - ▶ Hochschule Ravensburg-Weingarten (RWU)
 - ▶ illwerke vkw inkl. vkw vlotte (VKW)
 - ▶ Verkehrsverbund Vorarlberg (VVV)
 - ▶ E-VO eMobility (EVO)
 - ▶ Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ, assoziiert)
- ▶ **Ziel:** optimiertes Lademanagement von E-Bussen im ÖPNV
- ▶ **Themen:** Verbrauch, Reichweite, Spitzenlast, Kosten, Daten, IT, Umsetzung
- ▶ **Methoden:** Messungen, Simulationen, Optimierungen, prototypische Umsetzung
- ▶ **Ergebnisse:** Praxisberichte, Open Source Code für Umsetzer, Webseite, Publikationen

Agenda

Zeit ca.	Thema	Vortragende
09:00 – 09:15	Begrüßung und Überblick	FHV-Organisation
09:15 – 09:45	Routenmatching, Verbrauchssimulation	RWU
09:45 - 10:45	Lastmanagement	FHV
10:45 – 11:15	PAUSE inkl. Kaffee, Gebäck und Obst	
11:15 – 11:45	Prototypische Umsetzung	RWU, FHV, EVO
11:45 – 12:00	Wissenstransfer: Webseite, Github etc.	FHV
12:00 - 13:00	MITTAGESSEN	
13:00 – 14:00	Keynote: 2025 das Jahr der E-Busse	VVV, VKW, vlotte, VN
14:00 – 14:30	Diskussion zur Keynote	
14:30 – 15:00	Ausblick: Projekt ENABLE, Feedback	FHV

Feedback bitte!

Was interessiert Sie?

- ▶ Welche **Tools** würden Sie am meisten unterstützen?
- ▶ Für welche Ihrer Entscheidungen benötigen Sie Unterstützung in Form einer **Datenanalyse, Simulation oder Optimierung**?
- ▶ Welche Größen außer Kosten bestimmen Ihren **Betrieb** und Ihre **Investitionen**?
- ▶ Welche **Besonderheiten** haben wir bisher nicht berücksichtigt?
- ▶ Wer möchte beim Folgeprojekt **ENABLE Daten liefern** und mit uns analysieren?



! Pinnwand

Tabelle der Themen, die im Projekt FreeE-Bus bearbeitet werden und im Folgeprojekt ENABLE geplant sind:

- ▶ **Bewertung der Themen mit insgesamt 6 Punkten**
- ▶ **Ergänzungen einfügen und bewerten**



Fahrtenmatching und Verbrauchssimulation

Präsentation der RWU von Arne Hitz und Leonard Schmitz:
[FreeE-Bus_2026_01_21_Fahrtenmatching+Verbrauchssimulation.pdf](#)

Verbrauchsmodellierung und Simulationen

Präsentation der FHV von Kevin Kaspar:

[FreeE-Bus_2026_01_21_Verbrauchsmodellierung+Simulationen.pdf](#)

Datenstruktur

Präsentation der FHV von Dominik Bauer:
FreeE-Bus_2026_01_21_Datenstruktur+Heuristik.pdf

Lastmanagement: Wozu, Was, Wie?

! Was interessiert? => Zielgrößen und Modellumfang

- ▶ **Spitzenlast** minimieren: Maximum aller 15-Minuten-Mittel
- ▶ **Betriebskosten** minimieren: Energie- und Leistungskosten
- ▶ **robuster Betrieb**: SOC-Buffer, Unsicherheiten abfangen
- ▶ **Synergien**: PV, stat. Speicher, THG-Quote, Flexibilität verkaufen
- ▶ **Investitionskosten** minimieren: Anschlussleistung, Ladeninfrastruktur, Auslastung, Ausbaufähigkeit, Förderungen

💡 Was kann man steuern? => Entscheidungsvariablen

- ▶ **Ladeleistungen** der Busse über einen definierten Zeitraum
- ▶ **Ladepunktzuweisung, Tourenplanung und -zuweisung**
- ▶ **Auslegung der Flotte und der Ladeinfrastruktur**

🔥 Welchen Spielraum hat man? => Nebenbedingungen

- ▶ **Fzg.-Batterien**: Kapazität und max. Ladeleistung, Ladekurve, Wirkungsgrad
- ▶ **Umlaufplan**: Ladefenster und Verbräuche
- ▶ **Ladeinfrastruktur**: Kapazität und max. Ladeleistung, diskrete Ladeleistungen, Wirkungsgrad

Lastmanagement: unser Ansatz

💡 Algorithmen

- ▶ **interpretierbare und parametrisierbare Modelle und Algorithmen, keine KI**
- ▶ **Simulation -> Heuristik -> MILP Optimierung -> robuste Lösungen**
- ▶ **Simulationen als Vergleich und Input für Optimierungen**

🔥 Aktuelle Outputs der Algorithmen

- ▶ **Lastgänge:** aggregiert und pro Bus/Ladestation/Ladepunkt
- ▶ **SOC-Verläufe** aller Busse
- ▶ **Betriebskosten** bzgl. Energie- und Leistungspreisen
- ▶ **Ladepunktzuteilungen**

ℹ️ Beispieldatensatz

- ▶ **VBZ:** 1 Depot mit 37 Bussen über 1 Tag mit geg. Ladepunktzuordnung
- ▶ **Start-SOC = End-SOC = 100 %**

Heuristik

Präsentation der FHV von Dominik Bauer:
FreeE-Bus_2026_01_21_Datenstruktur+Heuristik.pdf

💡 Abkürzung

MILP bedeutet **Mixed Integer Linear Programming**, auf Deutsch: gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung.

💡 Abkürzung

MILP bedeutet **Mixed Integer Linear Programming**, auf Deutsch: gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung.

Minibeispiel: Lade einen Bus (300 kWh, 150 kW) in 2 Stunden kostenoptimal von 0 auf 200 kWh. Preise: 0.15 €/kWh in der ersten Stunde, 0.1 €/kWh in der zweiten Stunde.

💡 Abkürzung

MILP bedeutet **Mixed Integer Linear Programming**, auf Deutsch: gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung.

Minibeispiel: Lade einen Bus (300 kWh, 150 kW) in 2 Stunden kostenoptimal von 0 auf 200 kWh. Preise: 0.15 €/kWh in der ersten Stunde, 0.1 €/kWh in der zweiten Stunde.

Entscheidungsvariablen: Ladeleistungen p_1, p_2 (kW) für die erste und zweite Stunde.

$$\begin{aligned} & \text{minimiere die Zielfunktion} && 0.15p_1 + 0.1p_2 \\ & \text{unter den Nebenbedingungen:} && p_1 + p_2 = 200 \\ & && 0 \leq p_1, p_2 \leq 150 \end{aligned}$$

💡 Abkürzung

MILP bedeutet **Mixed Integer Linear Programming**, auf Deutsch: gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung.

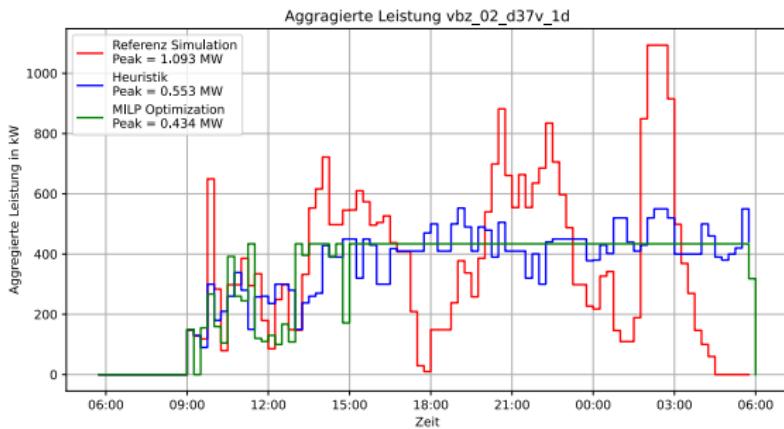
Minibeispiel: Lade einen Bus (300 kWh, 150 kW) in 2 Stunden kostenoptimal von 0 auf 200 kWh. Preise: 0.15 €/kWh in der ersten Stunde, 0.1 €/kWh in der zweiten Stunde.

Entscheidungsvariablen: Ladeleistungen p_1, p_2 (kW) für die erste und zweite Stunde.

$$\begin{aligned} & \text{minimiere die Zielfunktion} && 0.15p_1 + 0.1p_2 \\ & \text{unter den Nebenbedingungen:} && p_1 + p_2 = 200 \\ & && 0 \leq p_1, p_2 \leq 150 \end{aligned}$$

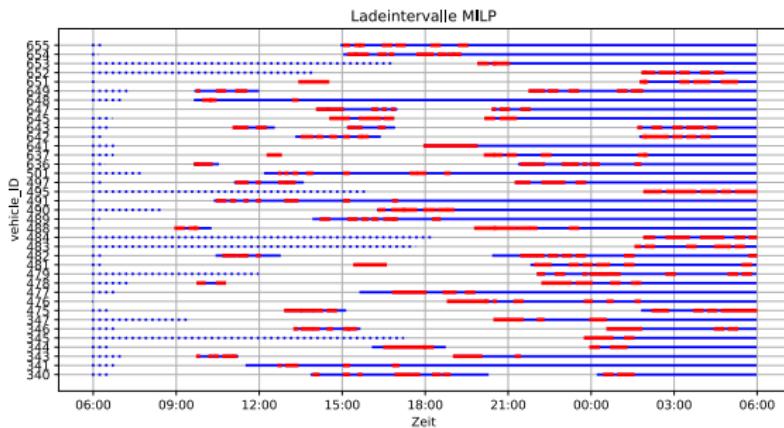
- ▶ **Vorteile vom MILP:** flexible Modellierung, optimal
- ▶ **Nachteile von MILP:** Rechenzeit kann bei vielen ganzzahligen Entscheidungsvariablen oder großem Modellumfang sehr lang sein

MILP: Spitzenlastenminimierung 1/2



- ▶ **Zielfunktion:**
Minimieren des maximalen 15-Minuten-Lastmittels
- ▶ **MILP:**
 - ▶ Optimum: 0,434 MW
 - ▶ Min. SOC: 32,69 % bei VH_ID 652

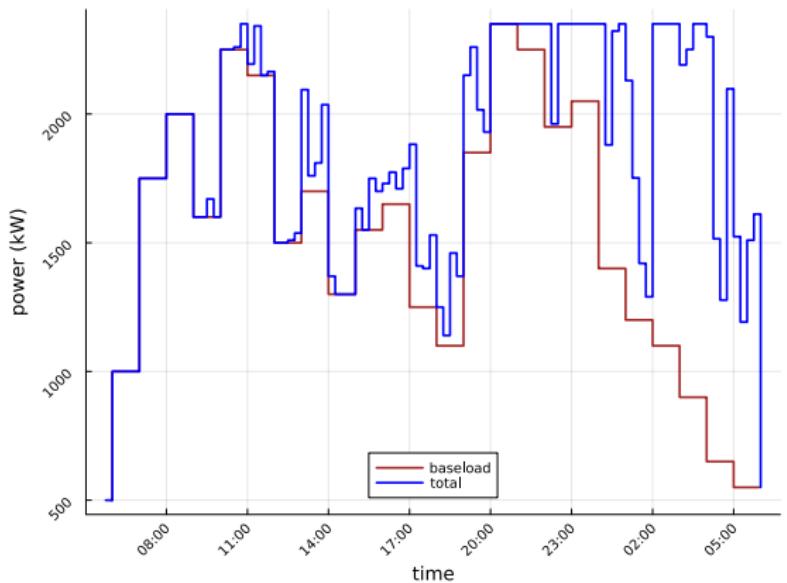
MILP: Spitzenlastenminimierung 2/2



Beachte: Die Ladezeiten sind fragmentiert.

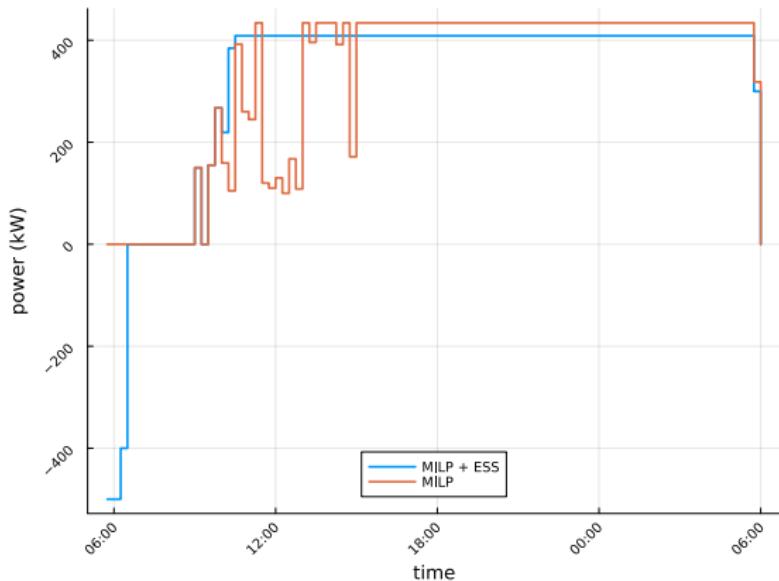
Grund: Es gibt (noch) keine Nebenbedingungen oder zweite Zielfunktionen, die das einschränken bzw. bestrafen.

MILP: Spitzenlast mit Baseload



- ▶ Zielfunktion:
Minimiere
Gesamtspitzenlast
von Laden +
Baseload
- ▶ MILP: Min. SOC:
1,18 % bei VH_ID
651!

MILP: Spitzenlast mit stat. Speicher



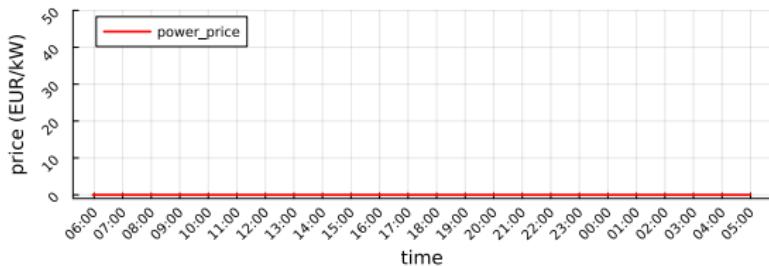
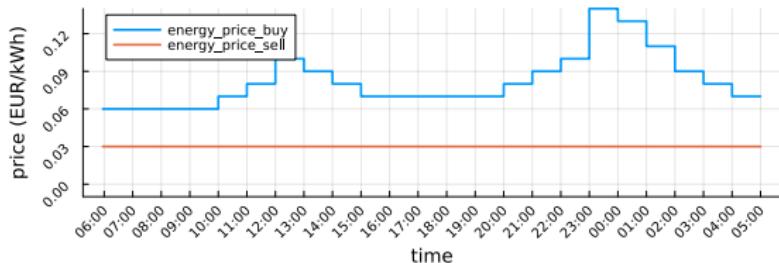
Energy Storage System (ESS):

- ▶ Kapazität: 500 kWh
- ▶ Max. Leistung: 500 kW

Spitzenlasten:

- ▶ ohne ESS: 0,434 MW
- ▶ mit ESS: 0,409 MW

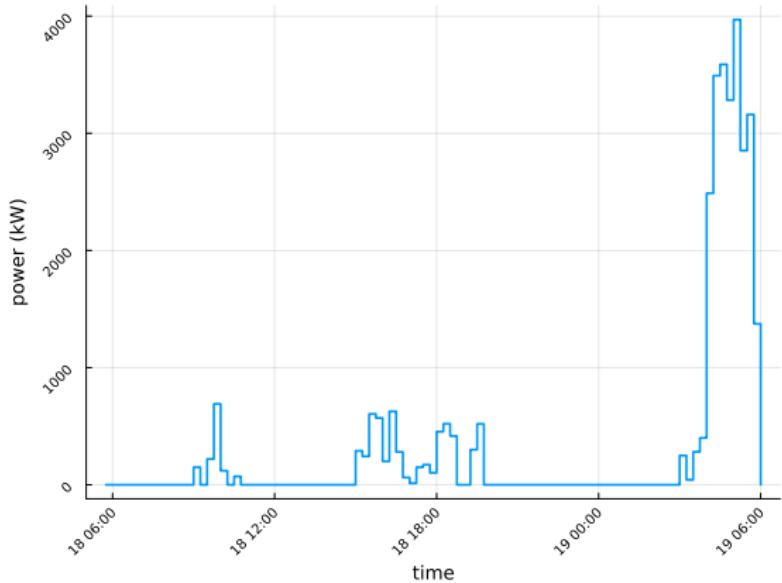
MILP: Energiepreise 1/2



Beachte:

- ▶ Kein Leistungspreis (EUR/kW) pro Monat
- ▶ Unterschiedliche Energiepreise für Bezug und Einspeisung

MILP: Energiepreise 2/2



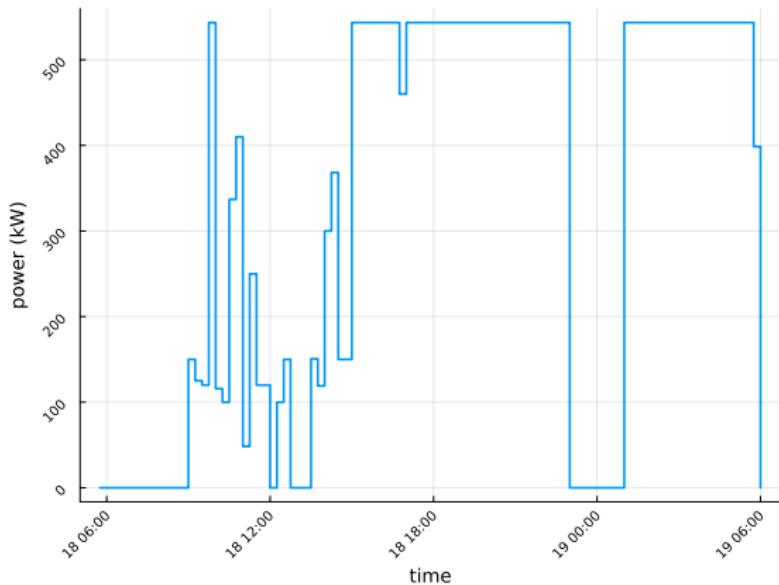
Kostenvergleich:

- ▶ Simulation: 712,82 EUR
- ▶ MILP: 559,05 EUR

Beachte:

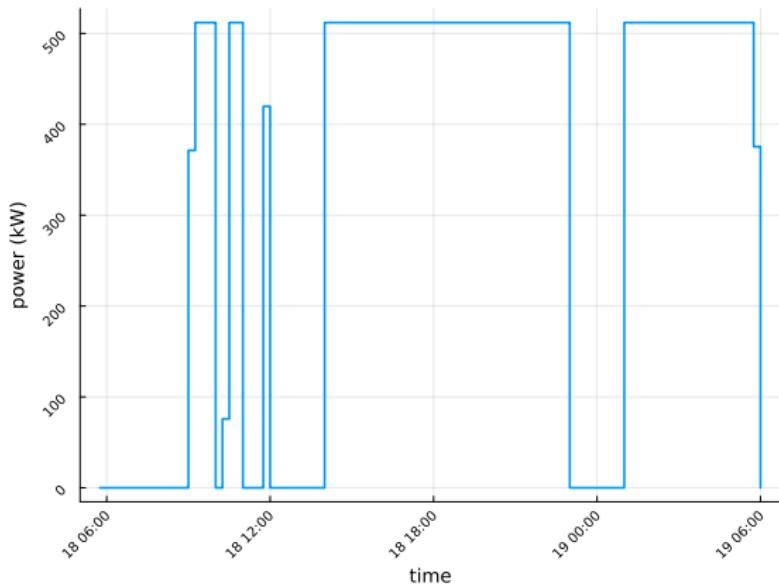
- ▶ Spitzenlast: 3,970 MW!
- ▶ Minimum SOC: 0,71 % bei VH_ID 475!

MILP: Energie- und Leistungspreise



- Leistungspreis: 10 EUR/kW pro Monat**
 - ▶ Spitzenlast: 0,543 MW
 - ▶ Minimum SOC: 32,69 % bei VH_ID 652
- Kostenvergleich:**
 - ▶ Simulation: 1051,03 EUR
 - ▶ MILP: 813,08 EUR

MILP: E+L Preise mit ESS



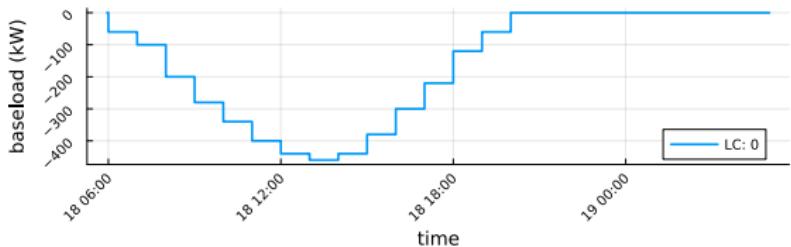
- ▶ Spitzenlast: 0,512 MW
- ▶ Minimum SOC: 32,69 % bei VH_ID 652

Kostenvergleich:

- ▶ Simulation: 1051,03 €
- ▶ MILP ohne ESS: 813,08 €
- ▶ MILP mit ESS: 795,39 €

MILP: E+L Preise mit ESS und PV

PV kann als negative Baseload modelliert werden.



- ▶ Spitzenlast: 0,512 MW
- ▶ Minimum SOC: 32,69 % bei VH_ID 652

Kostenvergleich:

- ▶ Simulation: 1051,03 €
- ▶ MILP ohne ESS: 813,08 €
- ▶ MILP, ESS: 795,39 €
- ▶ MILP, ESS, PV: 555,37 €

Robuste Optimierung

Präsentation der FHV von Florian Knolle:
[FreeE-Bus_2026_01_21_Robuste_Optimierung.pdf](#)

PAUSE



Prototypische Umsetzung

Präsentation der RWU, FHV und EVO von Arne Hitz, Kevin Kaspar und Christoph Egger:

- ▶ FreeE-Bus_2026_01_21_Prototypische_Umsetzung_Teil-1.pdf
- ▶ FreeE-Bus_2026_01_21_Prototypische_Umsetzung_Teil-2.pdf

- ▶ **Projektwebseite:**
 - ▶ Link: <https://calc.labs.fhv.at/~freeebus/>
 - ▶ ist noch in Arbeit
 - ▶ Präsentationen werden hier noch abgelegt
- ▶ **GitHub Repo FHV:**
 - ▶ Link: <https://github.com/erc-fhv/open-ev-fleet>
 - ▶ wird noch erweitert
 - ▶ csv-Datensätze von VVV und VBZ => **Danke!**
- ▶ **GitHub Repo RWU:**
 - ▶ Link: https://github.com/Ultralenny/FreeEBus_FhrzSimu_RWU_Interreg

MITTAGESSEN



Food and Drink
Bon appetit!

Keynote

Präsentation von vorarlberg netz, VVV, illwerke vkw und vkw vlotte:

- ▶ FreeE-Bus_2026_01_21_Keynote_Vlbg-Netz.pdf
- ▶ FreeE-Bus_2026_01_21_Keynote_VVV.pdf
- ▶ FreeE-Bus_2026_01_21_Keynote_illwerke-vkw-vlotte.pdf

Ausblick: Folgeprojekt ENABLE: Elektrische Nutzfahrzeuge - Auslegung, Betrieb, Ladeinfrastruktur und Energieversorgung



Eckdaten

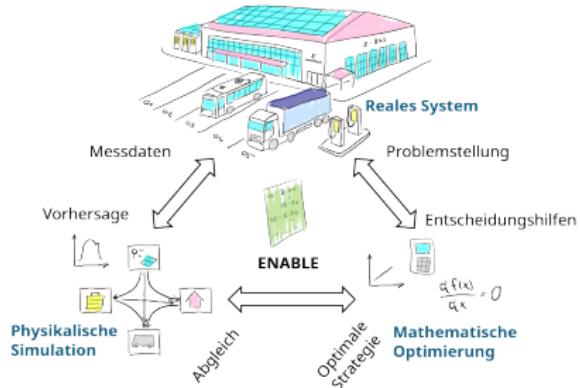
- ▶ Fördergeber: interreg ABH
- ▶ Start: 1. März 2026
- ▶ Dauer: 3 Jahre
- ▶ Partner: FHV, RWU, HS Kempten, Gebr. Weiss, Haslach Bus
- ▶ **44 assoziierte Partner:** VBZ, EIV, EZA, EA St. Gallen, Kempower, VDV, Mentz, STAG, ZF etc.



Themenerweiterungen

- ▶ **Modellierung:** Wirkungsgrade, Leistungsstufen etc.
- ▶ E-Busse und **E-LKW**
- ▶ Verbrauch, Batteriealterung
- ▶ Touren- und Fahrzeugzusammenstellungen
- ▶ Touren- und Ladepunktzuweisung
- ▶ Auslegung der Ladeinfrastrukturen
- ▶ **umfassendes Lastmanagement:** Grundlasten, dynamische Stromtarife, stat. Speicher, PV
- ▶ **Unsicherheiten und Updates**

ENABLE: Ansatz, Methoden und Output



- ▶ **Methoden:** Datenmonitoring und -analysen, modellbasierte Simulationen und Optimierungen, Veranstaltungen, bilaterale Zusammenarbeit
- ▶ **Output:** Referenzprojekte, Open Source Tools für Umsetzer, Webseite mit interaktiven Tools, Publikationen

Was interessiert Sie?

- ▶ Welche **Tools** würden Sie am meisten unterstützen?
- ▶ Für welche Ihrer Entscheidungen benötigen Sie Unterstützung in Form einer **Datenanalyse, Simulation oder Optimierung**?
- ▶ Welche Größen außer Kosten bestimmen Ihren **Betrieb** und Ihre **Investitionen**?
- ▶ Welche **Besonderheiten** haben wir bisher nicht berücksichtigt?
- ▶ Wer möchte beim Folgeprojekt **ENABLE Daten liefern und mit uns analysieren**?



! Pinnwand

Tabelle der Themen, die im Projekt FreeE-Bus bearbeitet werden und im Folgeprojekt ENABLE geplant sind:

- ▶ **Bewertung der Themen mit 5 insgesamt Punkten**
- ▶ **Ergänzungen einfügen und bewerten**

