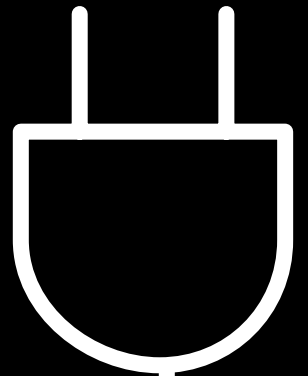
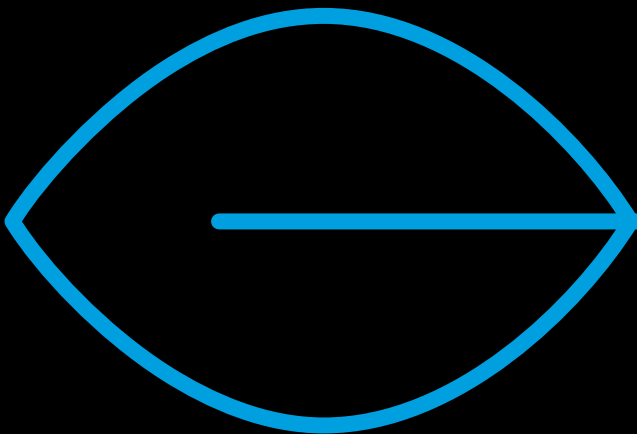


**Mission:  
Nachhaltige  
Mobilität.**



**GENOS**



## GENIOS berechnet Grundlagen für E-Bus Studie im Gebiet des Verkehrsverbund Ost Region (VOR), Österreich



Wie lassen sich der Einsatz von E-Bussen in einer bestimmten Region detailliert simulieren und wie würde der Einsatz von Wasserstoff-Bussen im Vergleich abschneiden? Die österreichische »Low Carb Mobility«-Studie hat dank GENIOS von MENTZ einige Antworten geliefert.

### Thema

E-Bus Studien im Gebiet des Verkehrsverbund Ost Region (VOR), Österreich

### Produkt

GENIOS

### Autoren

Florian Twaroch (MENTZ Austria GmbH) & Jürgen Zajicek (AIT; Austrian Institute of Technology GmbH, Center for Energy, Integrated Energy Systems, Integrated Transport Optimization)

### Ansprechpartner

Wilfried Düx  
duex@mentz.net

### Die Studie

Im Rahmen des Interreg-Projektes ATHU114 »Low Carb Mobility« hat der österreichische Verkehrsverbund Ost-Region (VOR) GmbH gemeinsam mit anderen Projektpartnern eine Studie zum Thema »Anforderungen an die Energiewirtschaft für alternative Antriebe im öffentlichen Verkehr« ausgeschrieben. Die Vergabe dieser Studie sollte zur Wissensgenerierung und als Grundlage für weitere Entscheidungen und Herangehensweisen zum differenzierten Einsatz von Fahrzeugen mit alternativem Antrieb im Bus- und Bahnverkehr dienen. Ein spezieller Fokus liegt dabei auf den Herausforderungen im Einsatz von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben im ÖPNV im Grenzraum Österreich-Ungarn und hierbei auf batterieelektrischen Fahrzeugen und Fahrzeugen mit Wasserstoffbrennzellen. Durch den vermehrten Einsatz energieintensiver Fahrzeuge im ÖPNV ergeben sich Herausforderungen für die Energiewirtschaft und Netze.

Gemeinsam mit den Energie- und Mobilitätsexperten des Austrian Institute of Technology (AIT) durfte die MENTZ GmbH als Unterauftragnehmer Analysen durchführen und Berechnungen von Umlaufplänen zur Studie beisteuern. Dabei kamen die Softwarelösungen DIVA 4 R19 und GENIOS zum Einsatz.

Das Optimierungsprodukt GENIOS ist eine Eigenentwicklung aus dem Hause MENTZ, auf Grundlage der Dissertation

von Dr. Roland Hesse, und das Ergebnis einer engen Zusammenarbeit zwischen der EFA- und der DIVA-Entwicklung. Unter der Leitung von Dr. Markus-Ludwig Wermer hat das Entwicklungsteam im letzten Jahr die vierte Generation von GENIOS herausgebracht, mit der nicht nur Fragestellungen aus dem ÖPNV gelöst werden können. Im Fokus dieses Beitrags steht das Plugin für Elektrofahrzeuge, welches im Rahmen der vorliegenden Studie eingesetzt wurde.

### Das Studiengebiet

Die angestellten Berechnungen wurden in zwei Gebieten durchgeführt. Einerseits sollten die Linien im Stadtgebiet und Großraum Schwechat hinsichtlich der Umstellung auf einen vollständigen batterieelektrischen Betrieb analysiert werden.

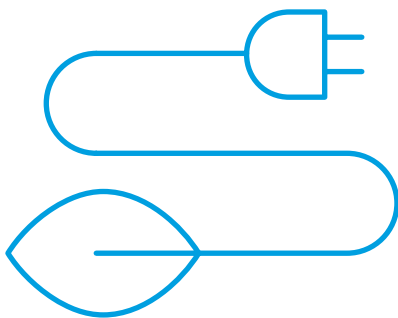
Andererseits wurde auch eine Untersuchung für Linien im Nordburgenland durchgeführt. Zunächst übermittelte der Auftraggeber Fahrpläne sowie Varianten, die mit Hilfe von DIVA 4 in der Release 19 als Liniengruppen aufbereitet wurden. Zum Zeitpunkt der Studieneinstellung war die Ausgestaltung des künftigen Angebots in den Untersuchungsgebieten politisch und planerisch noch nicht festgelegt. Die für die Studie getroffenen Annahmen sind daher theoretischer Natur und bilden nicht zwingend das zukünftige Angebot oder Standorte von Ladeinfrastruktur ab.

Für jede der Liniengruppen wurde ein ungestörter Fahrplan mit den Tagesarten

Montag bis Freitag Schule, Montag bis Freitag Ferien, Samstag sowie Sonn- und Feiertag definiert. Die Ferienregelungen von Niederösterreich und Burgenland wurden ebenso wie die entsprechenden Feiertage eingepflegt und beim Aufbau der Tagesarten für die Fahrplantabellen berücksichtigt. Für die Fahrten wurde über die Eigenschaft »bestellter Fahrzeugtyp« festgelegt, welche mit Elektro-Fahrzeugen und welche mit Dieselfahrzeugen geplant werden sollten. → (Abbildung 1)

The screenshot shows the DIVA Client interface. On the left, a file explorer displays a folder structure for 'Umlaufplanung' and 'Bestand Schwechat'. The main window shows a 'Fahrplan 97-218-2j21-92' with a table of routes. The table has columns for 'Hb.', 'Haltestellenname mit Ort', 'B.', 'Stw.', 'A.', and 'A.'. The routes listed include stops like 'Wien Simmering', 'Wien Zentralfriedhof 2.Tur', 'Wien Hauptvokäle', 'Schwechat Brauerei', 'Wien Kaisersdorf', 'Schwechat Wiener Straße', 'Schwechat 810/Fahrausplatz', 'Schwechat Hauptplatz', 'Schwechat Maschekgasse', 'Schwechat Mazzesgasse', 'Schwechat Metzgasse', and 'Schwechat Wälderstraße'.

**Abb. 1**  
Fahrplantabelle im DIVA Client wird synchron bearbeitet um den ungestörten Normalfahrplan für die Tagesarten MoFr Schule, MoFr Ferien, Samstag und Sonn- und Feiertag einzugeben. Diese bilden die Grundlagen für die weiterführende Umlaufplanoptimierung. An den entsprechenden Fahrten wird der E-Bus Fahrzeugtyp als bestellter Fahrzeugtyp gepflegt.



Im Gebiet Schwechat wurden so verschiedene Varianten definiert, die eine unterschiedlich intensive Nutzung von Elektrofahrzeugen vorsahen: Einmal sollten Verstärkerfahrten mit und ohne Elektrobus ausgeführt werden, einmal wurden Kurzführungen berücksichtigt, dann wieder längere Fahrwege. Varianten mit Teil- und Vollelektrifizierung wurden verglichen. Im Nordburgenland sollte ebenfalls untersucht werden, ob ein Betrieb von öffentlichen Busverkehren mit alternativen Antriebsformen möglich ist. Analog wurden entsprechende Tagesarten und Ereignisse mit Varianten der Fahrpläne abgebildet. Die modellierten Linien wurden auf das Straßennetzwerk der Graphenintegrationsplattform (GIP) abgebildet und georeferenziert. Es handelt sich dabei um ein digitales Verkehrsnetz Österreichs das der öffentlichen Verwaltung in standardisierter Form zur Verfügung steht. So konnten zuverlässig Fahrwege angelegt und ihre Längen bestimmt werden. Der DIVA-Georef-Service wurde auch genutzt, um die benötigten Leerfahrten für die Umlaufplanung zu bestimmen. → (Abbildung 2)

Nach der Definition der Fahrpläne und Festlegung, welche Fahrten elektrisch ausgeführt werden sollen, wurden potentiell gut gelegene Betriebshöfe für das jeweilige Studiengebiet ausgewählt. Da der Betreiber nicht bekannt ist, wird bei

der fiktiven Auswahl des Betriebshofes ein Punkt gesucht, der möglichst zentral liegt und Knotenpunkt zahlreicher Linien im Ausschreibungsgebiet ist. So werden in der Angebotsplanung die Anzahl und Länge der Leerfahrtenkilometer eher nach unten als nach oben abgeschätzt. Im tatsächlichen Betrieb können sich deutlich längere Anfahrtswege zur ersten Fahrgasthaltestelle ergeben. Mit dem GIS-basierten Routing von DIVA (Georef-Service) können rasch weitere Planungsszenarien, beispielsweise für andere mögliche Standorte eines neuen Depots, durchgespielt werden. Besonders hilfreich ist hier auch der Einsatz von Luftbildern, bei dem der Standort hinsichtlich verfügbarer Abstellflächen rasch beurteilt werden kann. Die Luftbilder können direkt in DIVA Web angezeigt werden.

Mittels eines benutzerdefinierten Attributs wurden an den ausgewählten Steigen Ladepunkte definiert. Diese können in den späteren Berechnungen direkt in GENIOS »ein-« und »ausgeschaltet« werden. Für die Untersuchungen im Raum Schwechat waren dies Punkte in Laxenburg und Himberg. Im Studiengebiet Nordburgenland wurden Ladepunkte zusätzlich in Zurnberg, Mönchhof, Frauenkirchen und Pamhagen angenommen. Mit diesen Grunddaten sollte nun eine Umlaufoptimierung mit den Anforderungen von Elektrofahrzeugen durchgeführt werden.

# Liniengruppe im Nordburgenland mit georeferenzierten Fahrwegen.

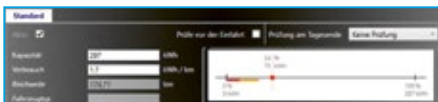
Das Gebiet reicht nördlich von Hainburg an der Donau bis südlich nach Pamhagen und von Eisenstadt bis nach Andau.



Abb. 2



**Abb. 3**  
Modellierung von konstantem vs. gestuftem Laden. Ladepunkte können zu- und weggeschaltet werden, so können verschiedene Ausbaustufen der Ladeinfrastruktur in der Angebotsplanung betrachtet und die Ergebnisse und Kennzahlen miteinander verglichen werden. Für jeden Ladepunkt kann additiv die Dauer der Inbetriebnahme des Ladepunktes berücksichtigt werden.



**Abb. 4**  
Parametrierung des GENIOS E-Bus Optimierung Moduls. Die Parameter können »on the fly« angepasst werden und erlauben den Vergleich verschiedener Szenarien.

### Parametrierung der Optimierungssoftware GENIOS

Im Rahmen der Umlaufoptimierung mit GENIOS können diverse Kennzahlen, wie zum Beispiel Depotkapazitäten, planerische Vorgaben zu Fahrzeugtyp und weiteren technischen Randbedingungen sowie auch Ladekapazitäten und Ladedauer bei Elektro-Bussen, etc. berücksichtigt werden. GENIOS errechnet automatisch für eine vom Anwender vorgegebene Fahrtenmasse einen Plan, welcher hinsichtlich der gewählten Kennzahlen geprüft und gebildet wird. Der Anwender kann vorhandene Richtlinien mittels Kosten übersteuern, sprich: vor der automatischen Verplanung bestimmte, vorgängig festgelegte Richtlinien deaktivieren oder deren Grenzen anders festlegen.

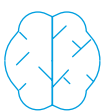
Desweiteren unterstützt die GENIOS Optimierungsoftware auch die Modellierung von »gestuftem Laden«. So können für bestimmte Ladezustände (State Of Charge – SOC) unterschiedliche Ladegeschwindigkeiten pro Ladepunkt im Netz angegeben werden. Diese Funktionalität wurde allerdings in der vorliegenden Studie nicht weiter eingesetzt. → (Abbildung 3)

Auf Wunsch wurde auch ein Toleranzkriterium umgesetzt, das verhindern soll, dass bei der Verplanung von Umläufen die volle Kapazität der Batterien ausgeschöpft wird.

Dies kann in GENIOS auf zwei Arten der Modellierung erreicht werden:

- 1) kann die GENIOS übergebene Batteriekapazität bereits niedriger angesetzt werden, sodass z. B. in jedem Fall eine Reserve von 20 Prozent verbleibt.
- 2) Außerdem erlaubt die Optimierungsoftware die absolute Angabe eines Kapazitätsschwellwerts inkl. einer erlaubten Toleranz (auch in absoluten Zahlen angeben), die wahlweise am Ende des Betriebstages oder aber auch erst am folgenden Betriebstag erreicht werden muss. So ergeben sich unterschiedliche Umlaufplanszenarien. → (Abbildung 4 und 5)

Zunächst wurde der Einsatz von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten und Ladebedarf untersucht. Hierbei konnte auch eine starke Abhängigkeit von den geographischen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet festgestellt werden. Während im Raum Schwechat ein vollelektrischer Betrieb mit den getroffenen Annahmen in verschiedenen Szenarien problemlos möglich war, konnte bei gleicher Parametrierung keine wirtschaftliche Lösung für das Untersuchungsgebiet im Nordburgenland gefunden werden. Bei einigen Lösungen blieben sogar Fahrzeuge auf der Strecke liegen, da keine besseren Ergebnisse im Lösungsraum gefunden wurden. Das Szenario der »zentralen Depotladung«



Die so erstellten Szenarien wurden einer Bewertung durch Energiewirtschafts-ExpertInnen des AIT unterzogen. Die folgende Tabelle stellt einige Ergebnisse für den in Abbildung 4 festgelegten Parametersatz dar:

Bestand	Umläufe	Fahrzeuge elektrisch	Fahrzeuge Diesel	Verbindungs-fahrten	Ein-/Ausfahrten	Länge der Leerfahrten	Umlaufzeit	Gesamt elektrisch	Produktiv elektrisch	Gesamt Diesel	Produktiv Diesel
1a	25	08	17	133	100	1320	250	250	966	3370	2420
1b	28	10	18	83	104	986	239	239	893	3320	2500
1c	25	16	09	60	106	1050	227	227	2180	1760	1210
2a	22	04	18	61	60	820	207	207	430	3650	2850
2b	23	07	16	66	74	853	222	222	973	3100	2310
2c	23	14	09	63	88	901	213	213	2080	1750	

**Abb. 5**  
Fünf Linien mit einer Fahrplanmasse von 270 Fahrten wurde verplant und verschiedene Formen des Mischbetriebs Diesel vs. E-Fahrzeuge untersucht. In einer Basisvariante wurden zunächst alle Linien mit Dieselfahrzeugen gerechnet. Die danach berechnete Variante 1 enthielt lang geführte Strecken mit a) zwei vollständig elektrisch betriebenen Linien b) zusätzlich Verstärkerfahrten weiterer drei Linien elektrisch betrieben und c) einer Elektrifizierung aller Linien. Bei den Varianten 2a–2c wurden analog Berechnungen auf kurz geführten Strecken durchgeführt.



**Abb. 6**  
Umlaufbildung im Nordburgenland: Schnell zeigte sich, dass nur mit stärkeren Batterien und gelegentlichem Zwischenladen ein sinnvolles Befahren möglich ist. Die Fahrzeuge müssen eine Reichweite von 300–350 km erreichen, um den vorgegebenen Fahrplan mit möglichst wenigen Fahrzeugen zu befahren.

wurde verworfen und die im Netz eingepflegten Ladepunkte wurden zugeschaltet, um einen Betrieb mit Gelegenheitsladung zu simulieren. So konnten auch für das Studiengebiet in Nordburgenland Lösungen ermittelt werden. → (Abbildung 6)

In einem abschließenden Szenario wurde auch der Einsatz von Fahrzeugen mit Wasserstoff-Antrieb untersucht. Die berechneten energiewirtschaftlichen Betrachtungen haben die jeweiligen Vor- und Nachteile der beiden alternativen Bus-Antriebssysteme, batterieelektrisch und Wasserstoff, für die betrachteten Fallbeispiele aufgezeigt. Der batterieelektrische Antrieb ist jedoch in den meisten Punkten dem Wasserstoff-Antrieb überlegen. Batterieelektrische Busse (BE) sind in der Anschaffung ca. 1,5-mal günstiger als H2-Busse. Außerdem sind die Investitions- und Betriebskosten für die Ladeinfrastruktur günstiger als die H2-Tankinfrastruktur und der batterieelektrische Antrieb ist darüber hinaus wesentlich weniger energieintensiv, da sowohl bei der Ladung als auch im Busantrieb viel weniger Energieverluste entstehen als bei der H2-Erzeugung und in der Brennstoffzelle im H2-Bus. Dieser Aspekt ist auch einer der wichtigsten Kostenfaktoren, da die Stromkosten einen wesentlichen Teil der Gesamtkosten ausmachen.

Die einzigen Aspekte, in denen die H2-Busse den BE-Bussen überlegen sind, sind ihre Reichweite und die schnelle Betankungszeit von etwa zehn Minuten.

Aus diesem Grund sind sie auch auf längeren Strecken (Bereich Nordburgenland), im Gegensatz zu den BE-Bussen, 1:1 wie Dieselbusse einsetzbar. Aufgrund dessen wäre eine Umstellung auf H2-betriebene Busse in diesem Fall günstiger als eine Umstellung auf BE-betriebene Busse. Berücksichtigt man jedoch zusätzlich die notwendige Infrastruktur zur Betankung der H2-Busse und besonders die mit dem Betrieb verbundenen Stromkosten, so ist ihre Überlegenheit in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit auch in diesem Fall ausgeräumt. Das Fallbeispiel im Nordburgenland zeigt somit die derzeit noch vorhandenen Limitierungen des Einsatzes von alternativen Antriebssystemen im Busbetrieb auf, da sowohl die Einschränkungen der Technologien mit der zu geringen Reichweite der BE-Busse im Regionalbereich und der geringen Energieeffizienz der H2-Erzeugung und der Brennstoffzellen als auch die hohen Kosten für eine Umstellung auf sowohl BE- als auch H2-Busse illustriert werden.

Detaillierte Ergebnisse können aus Platzgründen hier nicht dargestellt werden, insbesondere die energiewirtschaftlichen Betrachtungen zur Ladeinfrastruktur. Diese werden aber zum Nachlesen in der öffentlich zugänglichen Studie des Interreg-Projektes ATHU114 »Low Carb Mobility« nach Veröffentlichung durch den VOR zur Verfügung stehen. Der Link hierfür wird auf der MENTZ Homepage publiziert.

Aufgrund des begrenzten Zeitbudgets musste eine Auswahl getroffen werden und folgende Parameter fanden Eingang in die Optimierungsberechnung:

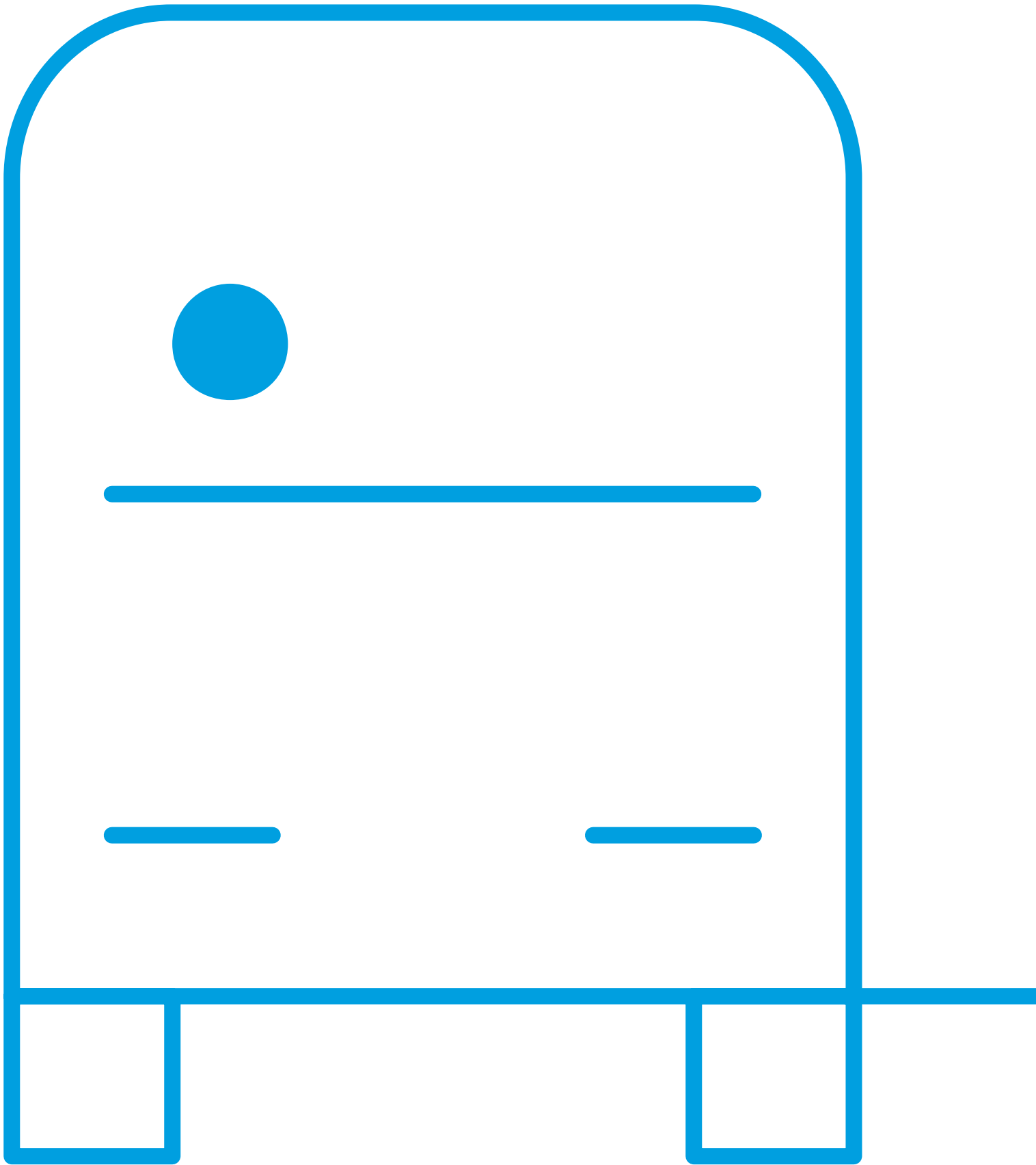
- 1) Batteriekapazität des Fahrzeugs
- 2) Verbrauch kWh/km
- 3) Ladegeschwindigkeit kWh/min

In gemeinsamer Recherche von AIT und MENTZ wurden Batteriekapazitäten folgender Fahrzeugtypen ermittelt:

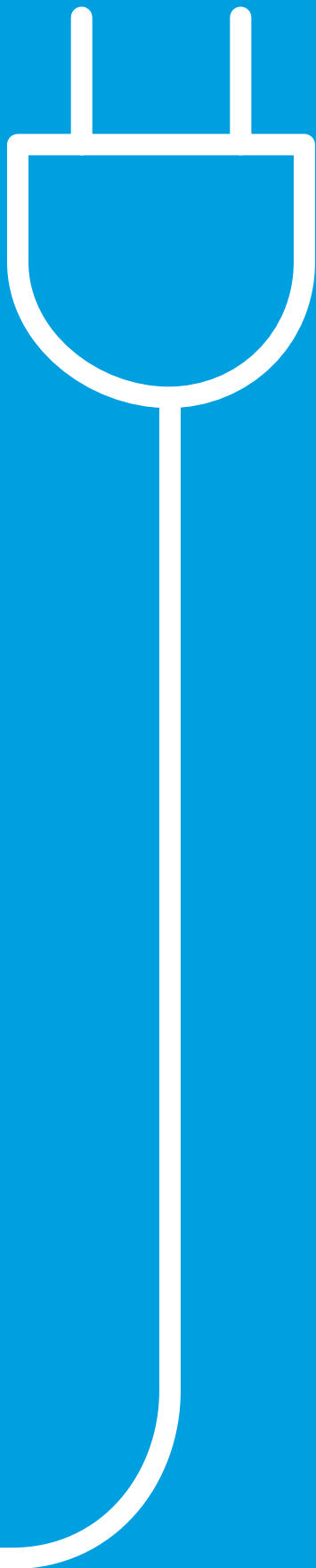
Modell	Kapazität (kWh)
BYD.....	348
Mercedes eCitaro .....	292
Solaris Urbino.....	240
VOLVO .....	470
VOLVO .....	565

Für die folgenden Berechnungen und nach Abstimmungsgesprächen wurden zunächst folgende Annahmen zu Verbrauch und Ladeleistung getroffen:

- 1) Angenommener Verbrauch: 1,7kWh/km
- 2) Ladeleistung: 3,2kWh/min oder 192 kW







## **Conclusio**

Die intensive Zusammenarbeit mit der AIT Austrian Institute of Technology GmbH und dem Verkehrsverbund Ost Region (VOR) haben ganz neue Blickwinkel eröffnet und waren ein bereicherndes Erlebnis, für das die MENTZ GmbH dankbar ist und das in anderen Projekten in ähnlicher Form fortgesetzt werden sollte. Die Berechnung der Umlaufpläne ist von zahlreichen Eingangsparametern abhängig. In den Szenarien Schwechat und Nordburgenland hat sich gezeigt, dass die Reichweite des Fahrzeuges eine sehr große Rolle spielt. Im Gegensatz zum Stadtverkehr ist hier eine Leerfahrt ins Depot zurück deutlich länger und damit teurer. Sobald Fahrzeuge mit geringerer Reichweite eingesetzt werden, steigt der Fahrzeugbedarf. Zwischenpunkte zum Laden helfen in jedem Fall, wenn Fahrzeuge mit geringerer Batteriekapazität eingesetzt werden.

Das vorgestellte Verfahren nutzt vorgegebene Fahrpläne und Betriebshöfe/Ladepunkte, deren Definition direkten Einfluss auf den Fahrzeugeinsatz hat. MENTZ wird in einer der zukünftigen Programmversionen von GENIOS auch eine »Trip Shifting« Funktion einsetzen. Diese erlaubt das Schieben von Fahrplanfahrten innerhalb gewisser Grenzwerte, um potentiell weitere Umläufe einzusparen.