



Algorithmen für die Planung von Ladeinfrastrukturen mit minimaler Netzbelastung

(1) Energieproblem bei E-Bussen

Bei Bussen mit batterieelektrischem Antrieb treten folgende Probleme auf:

Batterien benötigen Raum
➤ weniger Platz für Passagiere

Batterien sind schwer
➤ zusätzliche Antriebsenergie erforderlich

Batterien haben beschränkte Kapazität
➤ Ladestationen werden benötigt

Das gleichzeitige Laden mehrerer Busse führt zu Leistungsspitzen im Stromnetz
➤ Stromnetz wird zeitweise stark belastet und tarifabhängig können zusätzliche Kosten entstehen

Lösungsansätze:

Einsatz kleinerer Batterien

➤ Installation mehrerer Ladestationen, die räumlich verteilt sind

➤ Einsatz eines dynamischen Lastmanagements, das gleichzeitiges Laden vieler Busse vermeidet

Ziel dieses Teilprojektes:

Ermittlung der kostengünstigsten Ladeinfrastruktur

Minimierung der Netzbelastung

(2) Fragestellungen

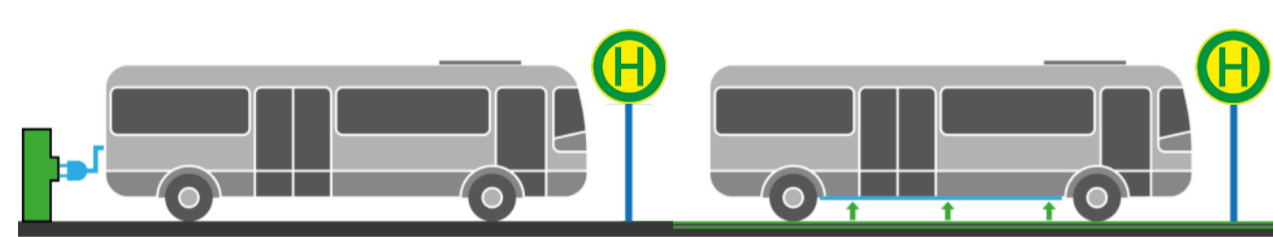
Bei gegebener Batteriekapazität sollen folgende Fragen beantwortet werden:

➤ Welche existierenden Haltepunkte müssen mit Ladeeinrichtungen ausgestattet werden?

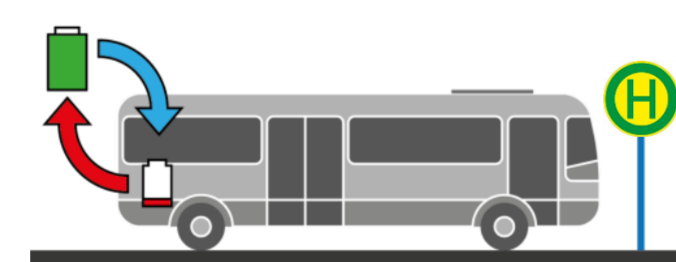
➤ Welche maximalen Ladeleistungen müssen an den einzelnen Ladestationen bereitgestellt werden?

➤ Wie kann aus einem gegebenen Umlaufplan und dem Energiebedarf der Busse eine optimale Ladeinfrastruktur berechnet werden?

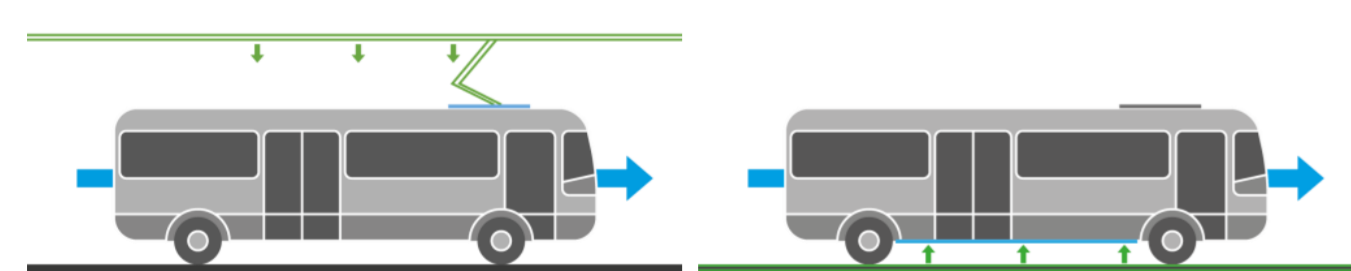
➤ Wie können alternative Lademethoden unterstützt werden?



Methode: Laden an Haltepunkten



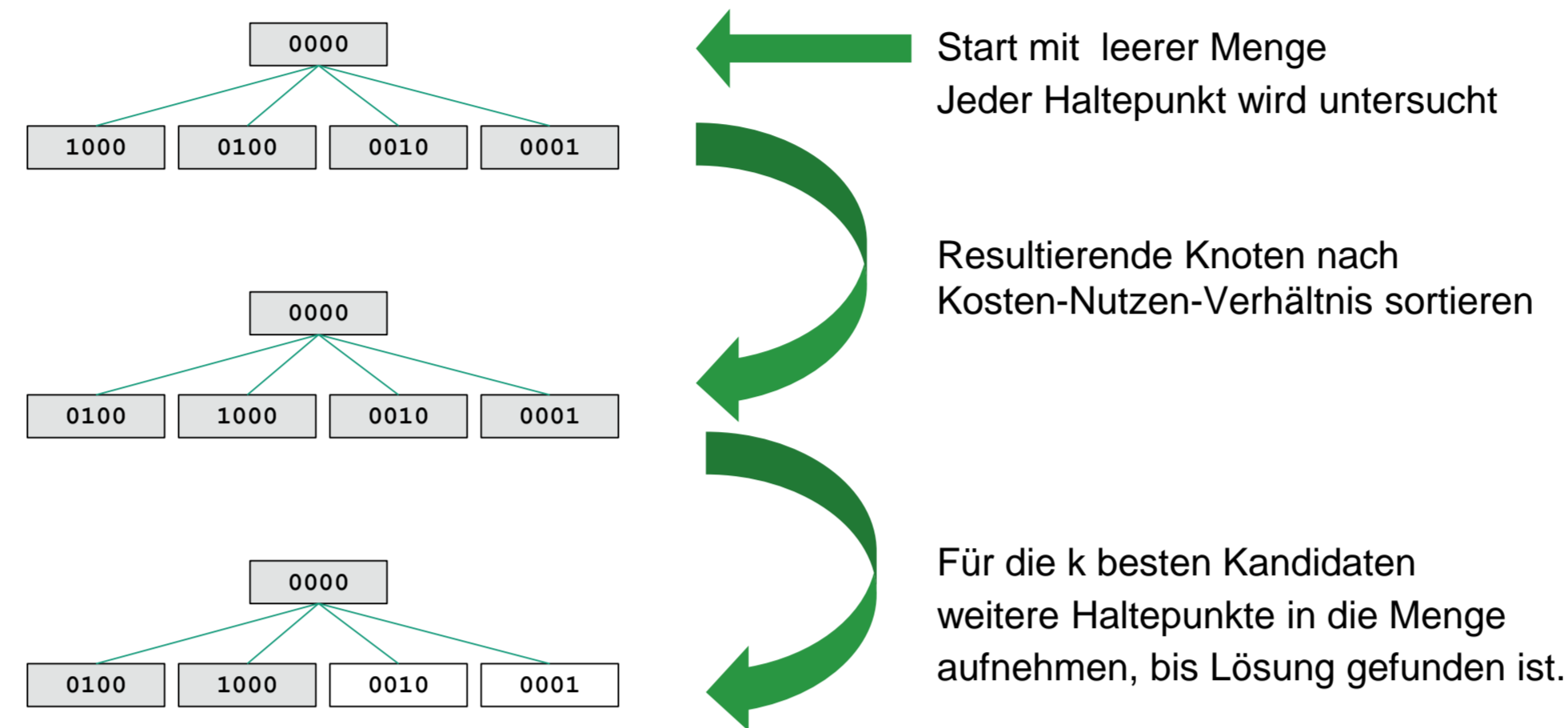
Methode: Batteriewechsel



Methode: Laden auf der Straße während der Fahrt und im Stillstand

(3) Methoden

Der Planungsalgorithmus basiert auf einem modifizierten und „Branch and Bound“-Algorithmus.



Entscheidend für ein gutes Laufzeitverhalten ist die Verzweigungsstrategie, die auf einer ereignisdiskreten Simulation und den jeweiligen Kosten basiert. Die aktuellen Ladezustände der Batterien aller Busse werden durch diese Simulation fortlaufend neu berechnet. Die wesentlichen Eingabeparameter sind der Umlaufplan und die Menge der Ladestationen. Die Simulation berechnet einen Grad für die Brauchbarkeit (*Nutzen*) der Lösung.

Für die Aufrüstung eines Haltepunktes zu einer Ladestation entstehen *Kosten*. Das *Kosten-Nutzen-Verhältnis* dient zur Steuerung der Menge der Ladestationen.

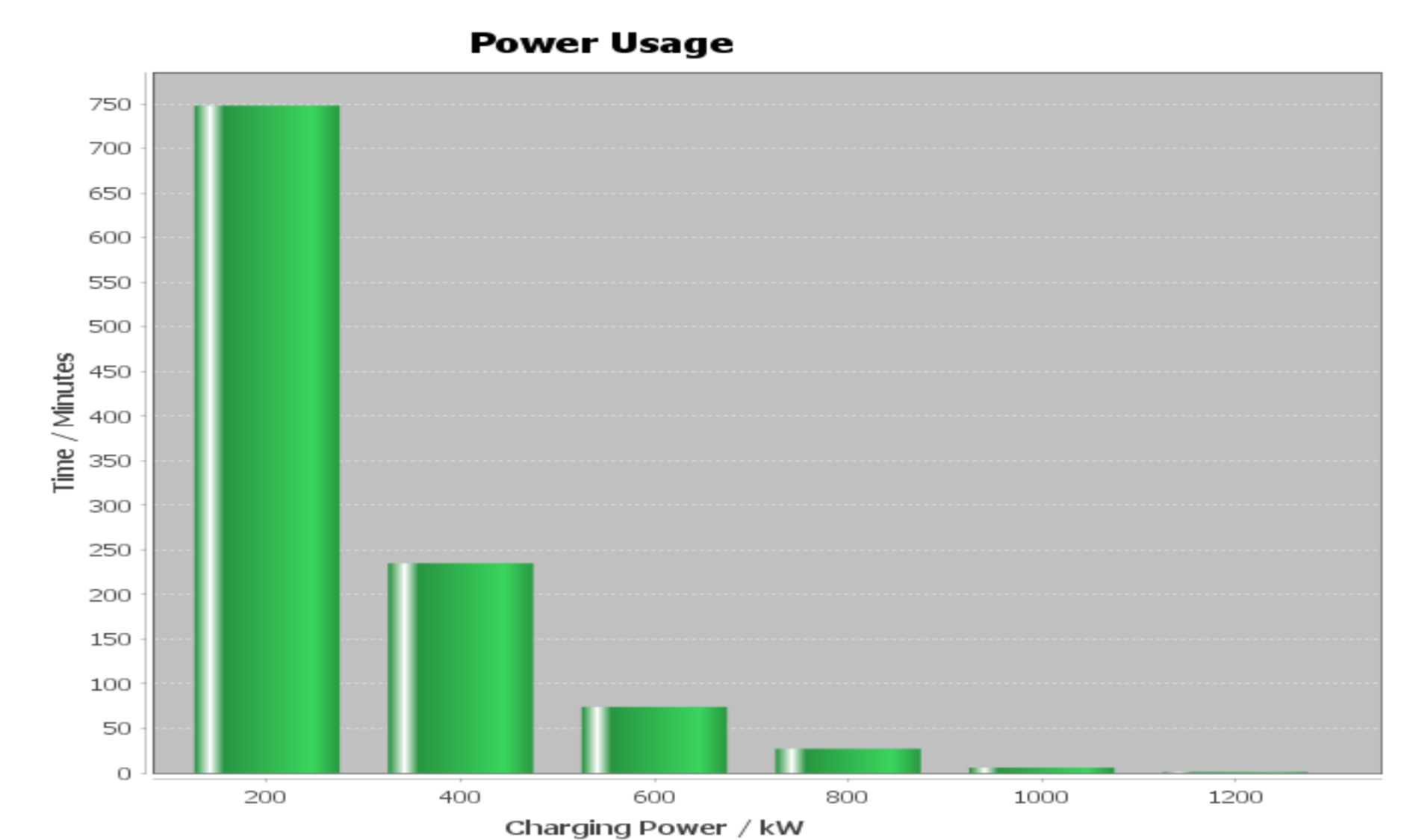
(5) Ergebnisse

Das Planungsverfahren berechnet in kurzer Zeit ein erstes Ergebnis. Dieses kann abgerufen oder weiter verbessert werden.

Die partiell-inkrementelle Simulation führt zu kurzen Berechnungszeiten.

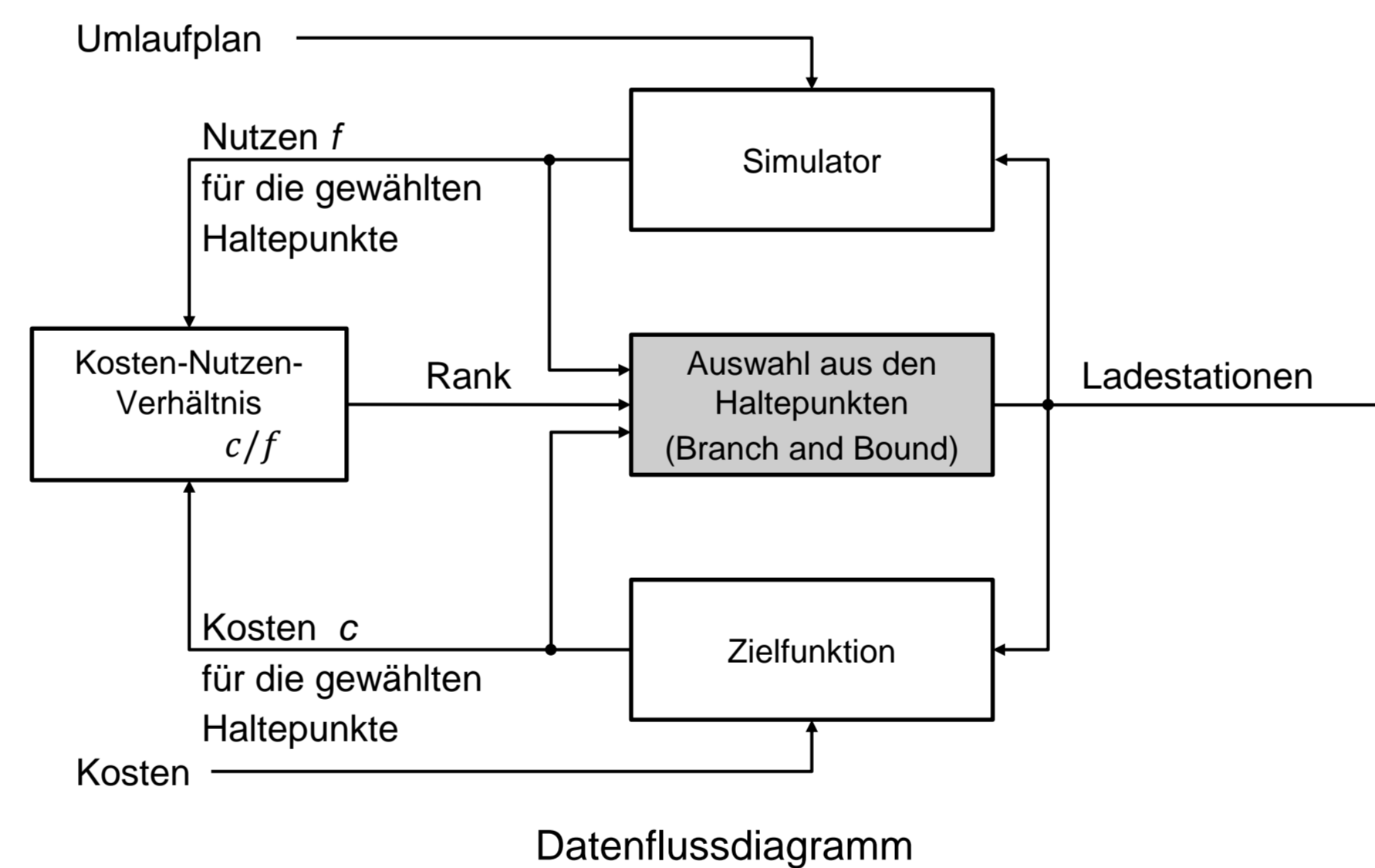
Für Braunschweig wurde für einen gegebenen Umlaufplan eine optimale Ladeinfrastruktur berechnet.

Das folgende Diagramm zeigt die kumulierten Ladeleistungen für einen Umlauf:



Histogramm der Dauer der Ladeleistungen für einen Umlauf

(4) Implementierung



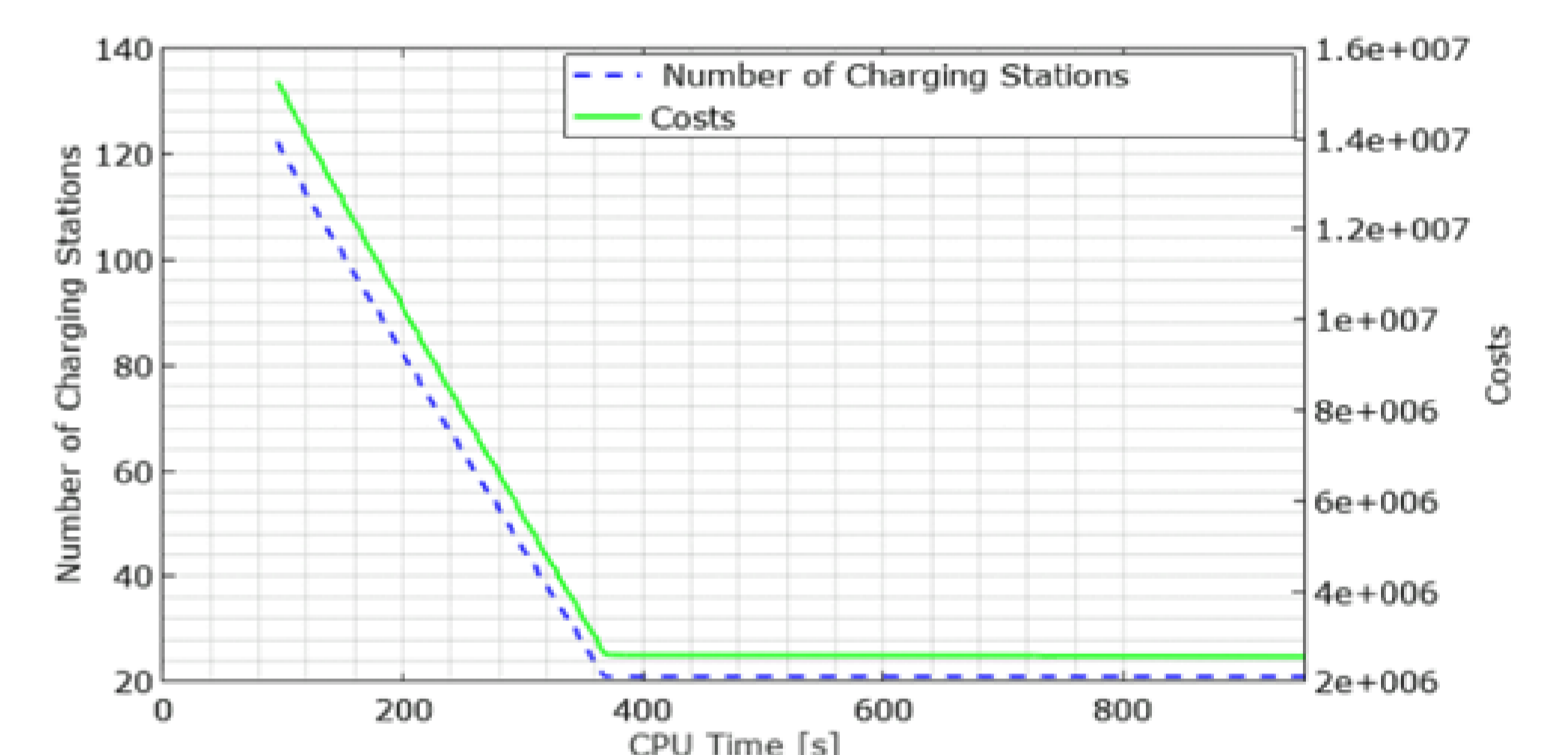
Das Datenflussdiagramm zeigt die Blöcke mit den wesentlichen Berechnungen und den Datenfluss zwischen ihnen.

Aus einer Menge von ausgewählten Haltepunkten wird ein gegebener Umlaufplan simuliert. Parallel dazu werden die Kosten für die Ausstattung der Haltepunkte mit Ladegeräten berechnet. Der graue Block stellt den Optimierungskern nach dem modifizierten Branch-and-Bound Verfahren dar.

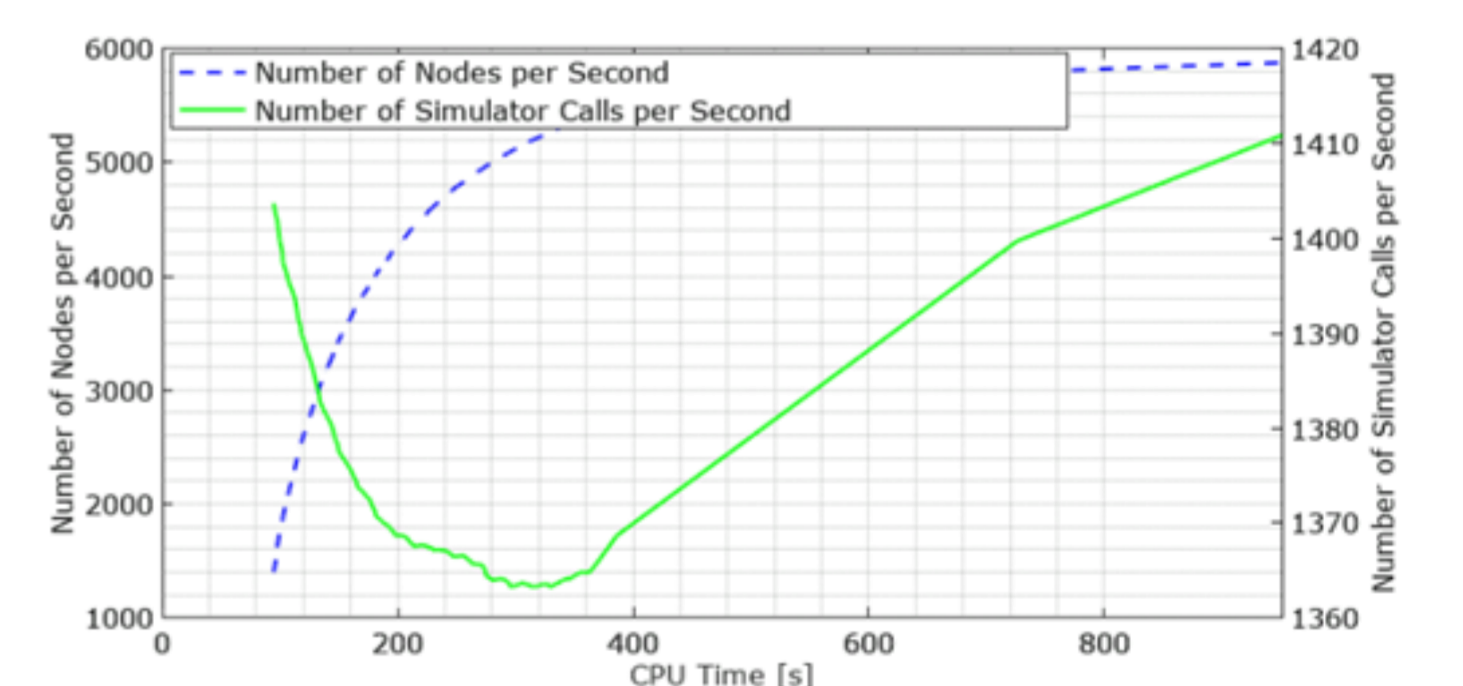
Die Vorteile der gewählten Architektur sind:

- Einfache Möglichkeit einer Parallelisierung der Berechnungen
- Der Simulator terminiert, sobald die Energie eines Busses unter ein Minimum fällt (partielle Simulation)
- Der Simulator nutzt Teilergebnisse aus vorherigen Berechnungen (inkrementelle Simulation)

(6) Ergebnisse und Ausblick



Verlauf des Anzahl der Ladestationen und der Kosten während der Planungszeit. Ergebnis sind 21 Ladestationen und Gesamtkosten von etwa 23 Mio. €



Verlauf der Bearbeitungsrate während der Planungszeit. Die Anzahl der bearbeiteten Infrastrukturen nähert sich dem Wert 6000/s und die Anzahl der Simulatorläufe bewegt sich um etwa 1400/s

Ausblick:

- Die Laufzeit des Planungsverfahrens und die Optimierungstiefe können durch Parallelisierung weiter verkürzt werden.
- Die Methoden „Batteriewechsel“ und „Laden während der Fahrt“ können durch Anpassung des Simulators ebenfalls berücksichtigt werden.

Publikationen

Vorstellung des Projektes und der jeweils erzielten Ergebnisse auf Konferenzen:



European Simulation and Modeling (2016, 2017, 2018)



Scientific and Technical Conference „Transport Systems. Theory and Practice“ (2016, 2017)



ITS World Congress (2017)



Industrial Simulation Conference (2018)

Partner



Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Projektbeginn: 01.01.2016

Projektende: 30.06.2019

Durchgeführt vom Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Dortmund



DLR Projektträger



Fraunhofer IML