

Markus Gödker | Jacob Stahl | Tobias Reins
Jan Heidinger | Thomas Franke

Implementierung eines Reichweitenmanagementsystems für Elektrobusse

Ein Leitfaden

Markus Gödker | Jacob Stahl
Tobias Reins | Jan Heidinger
Thomas Franke

Implementierung eines Reichweitenmanagementsystems für Elektrobusse

**Markus Gödker | Jacob Stahl | Tobias Reins | Jan Heidinger
Thomas Franke**

Implementierung eines Reichweitenmanagementsystems für Elektrobusse

Ein Leitfaden

Tectum Verlag

Open Access Publikation gefördert im Rahmen des Projekts NuR.E durch das Programm HWT Energie und Klimaschutz der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH)



Gesellschaft für Energie und
Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Auflage 2020

© Markus Gödker | Jacob Stahl | Tobias Reins | Jan Heidinger | Thomas Franke

Publiziert von

Tectum – ein Verlag in der

Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG

Waldseestraße 3-5 | 76530 Baden-Baden

www.tectum-verlag.de

Gesamtherstellung:

Tectum – ein Verlag in der

Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG

Waldseestraße 3-5 | 76530 Baden-Baden

ISBN (Print) 978-3-8288-4527-5

ePDF 978-3-8288-7574-6

ePub 978-3-8288-7575-3



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung – Nicht kommerziell –
Keine Bearbeitungen 4.0 International Lizenz.

Vorwort

Dieser Leitfaden beschreibt Ansatzpunkte zur Implementierung von Assistenzsystemen im Kontext Reichweitenmanagement von Elektrobussen im ÖPNV. Es entstand im Rahmen des Forschungsprojekts NuR.E (Nutzerzentriertes Reichweitenmanagement Elektrobusse) an der Universität zu Lübeck, gefördert durch das Programm HWT Energie und Klimaschutz der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH).

In den folgenden Kapiteln wird beschrieben,

- wie ein begleitendes Reichweitenmanagementsystem den Betrieb von Elektrofahrzeugen ökologisch und ökonomisch optimieren kann,
- welche Ausgangslage für ein solches System geschaffen werden sollte,
- welche Assistenzansätze das Fahrpersonal und andere Stakeholder unterstützen können und
- wie ein Beispielsystem aussehen und eingerichtet werden kann.

Die Beschreibung und Dokumentation des NuR.E Demonstratorsystems dient als Vorbild zur Anwendung in einem ÖPNV-Setting oder zum Transfer der Erkenntnisse in weitere Elektromobilitäts-Anwendungen (z. B. in der Logistik). Das zur Implementierung des Demonstratorsystems notwendige Installations-Paket finden Sie unter <https://gitlab.com/IngPsyDev/nur.e>. Zusätzliche Informationen zu dem Installations-Paket finden Sie im Anhang I dieses Leitfadens. Wir danken unserem Projektpartner Stadtverkehr Lübeck für die Unterstützung.

Zielgruppe

Die Inhalte dieses Berichts richten sich an Unternehmen des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) – insbesondere deren Zuständige für Management, Informationstechnik und Elektromobilität – die den Einsatz von batterie-elektrisch betriebenen Bussen im öffentlichen Nahverkehr untersuchen, planen oder bereits gestartet haben. Darüber hinaus soll der Leitfaden allen Interessierten aus Politik, Wissenschaft und Forschung einen Überblick über die Möglichkeiten des nutzerzentrierten Reichweitenmanagements geben.

Disclaimer

Die gezeigten Ansätze sind im Rahmen des Forschungsprojekts NuR.E entstanden und in Teilen empirisch untersucht und validiert. Sie erheben jedoch weder Anspruch auf Vollständigkeit noch sind sie etablierte Maßnahmen für ein effizientes und effektives Reichweitenmanagement. Vielmehr sollen sie als Anreiz dienen, um eigene Lösungen für die spezifischen, unternehmerischen Herausforderungen zu liefern.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
Herausforderungen	1
Lösungsansätze und Zielsetzung	3
Grundlagen	7
Elektrofahrzeuge	7
Anzeigegerät	8
Datenlogging	9
Datenübertragung	10
Datengrundlage	10
Zusammenfassung & Checkliste/Prozess	11
Datenverarbeitung	13
Explorative Datenanalyse	13
Echtzeitverarbeitung	14
Asynchrone Datenverarbeitung	16
Zusammenfassung & Checkliste/Prozess	17
Datenverwertung	19
Assistenzsysteme	19
Reporting	29
Zusammenfassung & Checkliste/Prozess	31

Nutzereinbindung und Evaluation	33
Einbindung des Fahrpersonals	33
Einbindung weiterer Stakeholder	36
Zusammenfassung & Checkliste/Prozess	37
Systemarchitektur	39
Anzeigetablet	40
Client-Server-Architektur	41
Datenbankarchitektur	43
Anhang	45
I. Einrichtung & Installation	45
II. Weiterführende Informationen	53
III. Tabellen	60
Literaturverzeichnis	63

Einleitung

Linienbusse verursachen nach Flugzeugen und Personenkraftwagen die drittmeisten klimaschädlichen Emissionen pro Personenkilometer¹. Ein Technologiewechsel ist vor diesem Hintergrund eine zentrale Stellschraube im Kampf gegen den Klimawandel. Unternehmen stehen vor der Herausforderung, in etablierten organisatorischen Prozessen in Bezug auf Liniennetz und Fahrplan den technischen Herausforderungen der Elektromobilität Rechnung zu tragen. Ein Reichweitenmanagementsystem kann bei der Umstellung unterstützen.

Herausforderungen

Die Elektrifizierung von Busflotten des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) stellt eine zentrale Bestrebung im Kontext Energie und Klimaschutz dar. Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) schätzt, dass die Zahl der im Einsatz befindlichen Elektrobusse im ÖPNV von ca. 100 (Stand: 13.02.2019) in den nächsten Jahren auf ca. 900 steigt². Gerade in Schleswig-Holstein ist die effiziente Nutzung des regional erzeugten Windstroms eine große Chance. Darüber hinaus liegen für städtisch geprägte Verkehrsverbünde die Vorteile der Flotten-Elektrifizierung in der Reduzierung des innerstädtischen Verkehrslärms so-

-
- 1 Umweltbundesamt (2020, 11. März). Emissionsdaten [Online Artikel]. Abgerufen von https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#verkehrsmittelvergleich_personenverkehr am 03.07.2020.
 - 2 VDV (2019, 13. Februar). Zwischenbilanz Elektrobusse im ÖPNV [Online Artikel]. Abgerufen von <https://www.lok-report.de/news/deutschland/verkehr/item/9557-vdv-zwischenbilanz-elektrobusse-im-oepnv.html> am 10.10.2019.

wie der lokalen Stickoxid- und Feinstaubbelastung. Dadurch stehen Busunternehmen allgemein und insbesondere das Fahrpersonal vor neuen Herausforderungen.

Die knappen Reichweitenressourcen und die hohen Anschaffungspreise von Elektrobussen stellen eine Barriere für die breite Einführung dieser Technologie dar. Zwar bieten bereits heute auf dem Markt erhältliche Elektrobusse technisch mögliche Reichweiten von bis zu 250 km, mit denen theoretisch ca. 70% der Umläufe in einer typischen Großstadt wie Lübeck abgedeckt werden könnten. Demgegenüber steht jedoch ein mehr als doppelt so hoher Anschaffungspreis im Vergleich zu konventionell angetriebenen Dieselnissen. Eine Amortisierung des höheren Anschaffungspreises durch die niedrigeren Betriebskosten pro Kilometer kann dadurch begünstigt werden, dass die Batteriegröße an die tatsächlichen Anforderungen angepasst wird und die elektrisch zurückgelegten Kilometer möglichst maximiert werden.

Eine zentrale Herausforderung der Maximierung der genutzten Kilometer stellen die sogenannten psychologischen Reichweitemschwelen³ dar (Abbildung 1). Diese führen dazu, dass die technisch mögliche Reichweite auf eine tatsächlich genutzte Reichweite reduziert wird. Durch intransparente und unverständliche Anzeigen im Bus wird ein substanzieller Anteil der Batteriekapazität als Sicherheitspuffer vorgehalten und bleibt damit ungenutzt. Darüber hinaus ist die effizientere Nutzung der technischen Reichweite aufgrund mangelnder Systemunterstützung bei Kompetenzerwerb und Handlungssteuerung für das Fahrpersonal meist herausfordernd.

3 Franke, T., & Krems, J. F. (2013). Interacting with limited mobility resources: Psychological range levels in electric vehicle use. *Transportation Research Part A*, 48, 109–122.

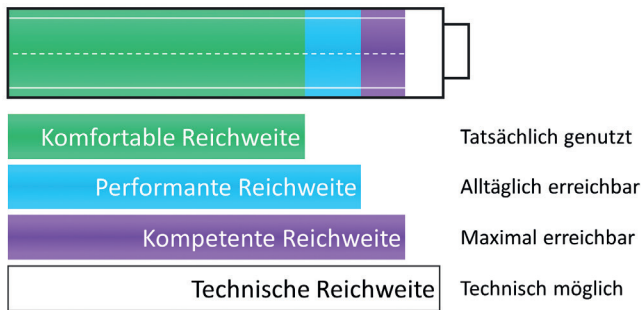


Abbildung 1: Psychologische Reichweiteschwellen⁴

Zusammengefasst kann ein nutzerzentriertes Reichweitenmanagement also wesentlich dazu beitragen, die komfortablen Reichweiten von Elektrobusen durch Reduzierung der Unsicherheiten anzupassen und für das Fahrpersonal transparenter darzustellen und damit letztendlich die nutzbare Reichweite zu steigern.

Lösungsansätze und Zielsetzung

Um den Betrieb von Elektrobusen in ÖPNV Betrieben zu ermöglichen, werden aktuell vor allem wirtschaftliche Real-Tests durchgeführt, in denen Elektrobusse Umläufe – also die geplante Gesamtstrecke eines Fahrzeugs an einem Tag – von Dieseln übernehmen. Das Thema Reichweite wird als organisatorische Herausforderung in der Umlaufplanung angesehen, was dazu führt, dass das Fahrpersonal kaum für das Thema sensibilisiert wird. Ansatzpunkte für die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit sind damit meist die Automatisierung des Betriebshofmanagements, die Fortschrittlichkeit des Batteriesystems und der Betrieb der Ladeinfrastruktur.

⁴ Franke, T., & Krems, J. F. (2013). Interacting with limited mobility resources: Psychological range levels in electric vehicle use. *Transportation Research Part A*, 48, 109–122.

In dieser Betrachtungsweise wird ein wichtiger Faktor für die Energieeffizienz von technischen Systemen vernachlässigt: der Mensch⁵.

Schon heute liefern die meisten Elektrobusse bereits umfangreiche Fahrdaten und -informationen und können diese auch an Herstellerdatenbanken versenden. Das Unternehmen ViriCiti (<https://viriciti.com/de/>) nutzt diese Daten aus Elektrobussen um ÖPNV-Betrieben und Busherstellern Informationen zu Lade- und Fahrzeiten, aber auch Energieverbräuchen auf bestimmten Routen zu liefern. Zusätzlich können individuelle Berichte des Fahrpersonals erstellt werden, die laut ViriCiti zu einer Reichweitensteigerung von bis zu 30% führen können⁶.

In Anbetracht der unterschiedlichen psychologischen Reichweitschwellen (s. o.) kann aber angezweifelt werden, ob allein ein solcher Bericht bereits zu einer Reichweitensteigerung führt. Vielmehr sollte ein nutzerzentriertes System alle psychologischen Reichweitschwellen adressieren und dadurch versuchen, die Reichweite zu erhöhen. Das bedeutet konkret, dass das System ...

1. ... durch Trainings, Lernanwendungen oder eine handlungsnahen Assistenz die Energieeffizienz der Fahrweise und damit die kompetente Reichweite erhöht.
2. ... durch streckenbezogene Energieeffizienz-Informationen und die Darstellung des Zusammenhangs von Energie und anderen Zielen (z. B. Fahrgastkomfort, Zeit) die performante Reichweite erhöht.
3. ... durch transparentere, nachvollziehbare, verständliche und anpassbare Anzeigen das Verständnis für Reichweiten und damit die komfortable Reichweite erhöht.

5 Franke, T., Görges, D., & Arend, M. G. (2019, September). The Energy Interface Challenge. Towards Designing Effective Energy Efficiency Interfaces for Electric Vehicles. In *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 35–48). ACM.

6 ViriCiti (2019, 19. Dezember). Dienstleistungen für Elektrofahrzeuge [Website]. Abgerufen von <https://viriciti.com/de/telematics-electric-vehicles/> am 19.12.2019.

Im nachfolgenden Leitfaden wird eine Methode der Entwicklung eines nutzerzentrierten Reichweitenmanagements am Beispiel des NuR.E Demonstratorsystems beschrieben, das diese Ziele adressiert. Als Benutzerschnittstelle ist ein Tablet im Elektrobus verbaut. Die Fahrdaten werden über den Hersteller an das NuR.E System übermittelt und dort weiterverarbeitet, sodass sie für die Realisierung von Fahreranzeigen im Tablet verwendet werden können. Entscheidend ist die nutzerzentrierte Entwicklung der Anzeigen, also die Einbindung des Fahrpersonals und weiteren Stakeholdern.

Grundlagen

Zur Umsetzung der in diesem Handbuch vorgestellten Ansätze und Lösungen müssen einige Grundvoraussetzungen erfüllt sein oder geschaffen werden, die in diesem Kapitel definiert werden.

In Abbildung 2 ist eine mögliche Infrastruktur dargestellt, deren Komponenten in den folgenden Kapiteln erläutert werden. Die Komponenten, die im Kapitel behandelt werden sind zur besseren Veranschaulichung farblich hervorgehoben. In diesem Kapitel sind es also der Bus, das Anzeigegerät, der Bordcomputer sowie die Verbindung vom Bordcomputer zum Server.

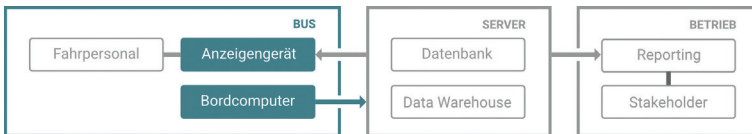


Abbildung 2: Übersichtsgrafik – Grundlagen

Elektrofahrzeuge

Wir gehen im weiteren Verlauf des Leitfadens davon aus, dass die betroffenen Elektrofahrzeuge bereits verfügbar sind bzw. bereits die Entscheidung für den Hersteller und das Modell getroffen wurde. Teilweise sind für die Durchführung der Schritte Absprachen mit dem Automobilhersteller notwendig.

Falls Sie sich noch über die Beschaffung (Förderprogramme, Automobilhersteller, Modellreihen, etc.) informieren müssen oder wollen, können unter anderem folgende Links als Startpunkte dienen:

- <https://www.electrive.net/>
- <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/sofortprogramm-saubere-luft-2017-2020.html>
- <http://www.foerderdatenbank.de/>

Anzeigegerät

Eine wesentliche Komponente des Systems ist die im Bus eingesetzte Anzeige-Hardware, mit der das Fahrpersonal mit dem System interagiert. Sowohl bei der Wahl dieser, als auch bei der Positionierung im Bus sind verschiedene Faktoren zu bedenken.

Um eine uneingeschränkte Sicht im Cockpit des Fahrpersonals und somit die Fahrgastsicherheit zu gewährleisten wird eine Anzeige mit einer Displaygröße von 8–8.4 Zoll empfohlen. Darüber hinaus bietet sich ein 3:2 oder 4:3 Bildverhältnis an, da Displays mit diesem Format im Portraitmodus (vertikale Displayausrichtung) über mehr Darstellungsfläche in der Breite verfügen, als Displays im sonst handelsüblichen 16:9 Format. Die beeinträchtigungsfreie Installation der Hardware kann zudem unterstützt werden, indem diese an der vorderen Trägerstange („A-Säule“) des Busses, links vom Fahrer-Cockpit, montiert wird.

Des Weiteren wird empfohlen, Anzeigen mit einer Auflösung von mindesten FullHD (1920x1080 Pixel) zu nutzen. Die damit verbundene hohe Pixeldichte ermöglicht auf technischer Seite eine sehr genaue und detaillierte Visualisierung von Informationen, während auf der Seite des Nutzers eine scharfe Darstellung von Schrift, Symbolen und Formen gewährleistet wird. Zwei weitere wichtige Aspekte für eine gute Lesbarkeit sind ein hoher Kontrastwert (mindestens 7:1 nach WCAG⁷) sowie eine hohe Displayhelligkeit (mindestens 400 Nits).

7 WCAG (2019, 19. Dezember). Erfolgskriterien der Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.0 [Online Artikel]. Abgerufen von <https://www.barrierefreies-webdesign.de/richtlinien/wcag-2.0-erfolgskriterien/kontrast-erhoeht.html> am 19.12.2019.

Um die Bereitstellung des Assistenzsystems möglichst simpel zu halten, ist die Nutzung eines Kiosk-Modus zu empfehlen. In diesem Modus können von einem Administrator (oder auch vom Benutzer selbst) nicht benötigte Funktionen deaktiviert und zuvor definierte Inhalte auf dem Display fixiert werden. Auf diese Weise ist es möglich, dass das Fahrpersonal lediglich das Assistenzsystem angezeigt bekommen. Ein Kiosk-Modus verhindert darüber hinaus, dass die Benutzenden versehentlich eine Anzeige minimieren, schließen, oder eine Taste drücken.

Datenlogging

Um die Datenerhebung zu ermöglichen, muss ein Gerät zur Erfassung und Übertragung der Sensordaten (im Folgenden „Bordcomputer“ genannt) im Bus installiert werden. Sollte bereits ein solcher Bordcomputer in den betroffenen Fahrzeugen vorhanden sein, muss geklärt werden, wie der Zugriff auf die Daten für ein Reichweitenmanagementsystem ermöglicht werden kann.

Sollte noch kein Bordcomputer installiert sein, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Datenerfassung zu realisieren:

1. Vollständige eigene Realisierung mit einem universellen Gerät, wie z. B. dem Raspberry PI
2. Verwendung eines für diesen Anwendungsfall ausgelegten Bordcomputer, wie z. B. vom Hersteller Axotec
3. Kauf einer Gesamtlösung, wie z. B. von ViriCiti

Die Lösungen unterscheiden sich vor allem durch die Faktoren Aufwand und Individualisierbarkeit. Ein vollständiges eigenes System bietet die meisten Möglichkeiten zur Individualisierung, wie z. B. eine direkte Übertragung der Daten an das Tablet, erfordert allerdings auch einen sehr hohen Aufwand und das notwendige Fachwissen. Im Gegensatz dazu erfordert eine Gesamtlösung den geringsten zeitlichen Aufwand, bietet aber auch weniger Möglichkeiten zur Individualisierung. Hierbei gibt es keine allgemeingültige Empfehlung und für die letztendliche Entscheidung sollte eine Kosten-Nutzenanalyse für den spezifischen Anwendungsfall durchgeführt werden.

Datenübertragung

Bei der Entwicklung eines komplexen Systems empfiehlt es sich generell, einzelne Teilsysteme nur lose miteinander zu koppeln. So können problemlos unterschiedliche Technologien genutzt werden und Änderungen in einem System vorgenommen werden, ohne Anpassungen an anderen Systemen vornehmen zu müssen.

Die Übertragung der Daten vom Bordcomputer kann unterschiedliche Formen annehmen, wobei das eigentliche Ziel der Daten der eigene Webserver und das Anzeigegerät sind. Ideal wäre eine direkte Verbindung von allen drei Systemen. Damit wären Echtzeitsysteme und Datensicherung möglich. Die direkte Verbindung vom Bordcomputer zum Anzeigegerät ist allerdings nicht immer möglich. In diesem Fall müssen die Daten vom Webserver auf das Anzeigegerät übertragen werden. Auch die direkte Verbindung von Bordcomputer und eigenem Webserver ist nicht immer möglich. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn der Bordcomputer bereits vom Bushersteller in einem bestehenden System genutzt wird. Dann müssen die Daten vom Server des Busherstellers auf den eigenen Server übertragen werden. Je nachdem, welche Verarbeitungsschritte hier durchgeführt werden, kann eine signifikante Latenz zwischen Assistenzsystem und Bordcomputer entstehen. Diese Latenz sollte aufgezeichnet und überwacht werden, damit sie in der Konzeption des Assistenzsystems berücksichtigt werden kann.

Datengrundlage

Neben der Anschaffung der Fahrzeuge, Sicherstellung des Datenloggings und der Übertragung muss auch geprüft werden, ob alle notwendigen Datenkanäle erfasst und in ausreichend hoher Frequenz geloggt werden. Grundsätzlich reichen wenige Basiskanäle aus, um alle relevanten Kennzahlen selbstständig zu berechnen. In manchen Fällen ist es hilfreich, im Fahrzeug selbst berechnete Werte zu kennen (z. B. die dort angezeigte Reichweite), um diese mit eigenen Rechnungen zu vergleichen. Die Auflistung im Anhang III (Tabelle 1) unterscheidet daher in Basiskanäle

(must-have), Zusatzkanäle (should-have) und Kontrollkanäle (good-to-have). Die Frequenz, in der diese Fahrzeugdaten geloggt und übermittelt werden, sollte 1 Hz nicht unterschreiten. Für manche, sehr direkte Assistenzanwendungen (z. B. Manöver-Feedback während der Fahrt) sind 5–10 Hz ideal.

Neben den Fahrzeugdaten gibt es auch Kontextinformationen, die bei der Gestaltung von Assistenzmodulen hilfreich sein könnten. Die folgende, unvollständige Liste führt auf, welche Art Informationen hilfreich sein können, um die Fahrzeugdaten zu kontextualisieren (eine Linienfahrt entspricht einer Fahrt von Endstation zu Endstation auf einer speziellen Buslinie):

- Haltestellen (z. B. GPS-Daten zum exakten Tracking von Linienfahrten)
- Aktueller/Heutiger Umlauf eines Fahrzeugs (z. B. geplanter Ablauf von Linienfahrten, geplante Gesamtstrecke)
- Schichtpläne (z. B. wann & wo auf einem Umlauf ein Wechsel des Fahrpersonals stattfindet)

Diese Art von Informationen müssen selbstverständlich nicht sekundlich geloggt werden. Es sollten aber bereits frühzeitig die Optionen intern oder mit dem/den Partnerunternehmen geklärt werden, wie und welche Kontextinformationen genutzt werden können.

Zusammenfassung & Checkliste/Prozess

Für die folgenden Anwendungsschritte müssen bestimmten Grundvoraussetzungen erfüllt sein, die in diesem Kapitel erläutert wurden. Stellen Sie sicher, dass Sie jeden Punkt der folgenden Checkliste abhaken können.

- ☐ **Die betroffenen Elektrofahrzeuge sind verfügbar bzw. spezifiziert,**
d. h. es wurden ein oder mehrere Automobilhersteller und Fahrzeugmodelle definiert und es besteht Kontakt zum Hersteller bzw. es gibt einen technischen Ansprechpartner.
- ☐ **Es wurde ein stabiles und robustes Datenlogging etabliert,**
d. h. eine Logginglösung wurde beschafft, integriert und liefert kontinuierlich Daten.
- ☐ **Alle relevanten Basisdatenkanäle werden zuverlässig erfasst,**
d. h. die im Kapitel beschriebenen Kanäle wurden identifiziert, validiert und werden in der geforderten Frequenz geloggt.
- ☐ **Die Anzeige von Assistenzsystemen für das Fahrpersonal wurde ermöglicht,**
d. h. es wurde ein geeignetes Anzeigegerät beschafft und installiert.
- ☐ **Die Übertragung der Daten wurde sichergestellt,**
d. h. es gibt einen festgelegten Weg, wie die Daten vom Bordcomputer auf den eigenen Webserver und zum Anzeigegerät gelangen.

Datenverarbeitung

Nachdem die Datengrundlage geschaffen wurde, müssen die ankommenden Daten für die weitere Verwendung verarbeitet werden. Falls möglich sollte dafür zunächst eine explorative Datenanalyse durchgeführt werden. Die eigentliche Datenverarbeitung lässt sich in zwei Kategorien einteilen: Echtzeit-Verarbeitung und asynchrone Verarbeitung.

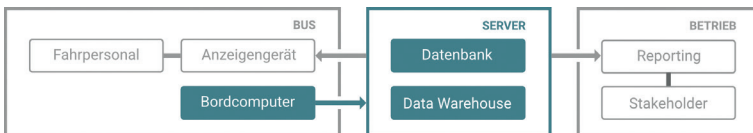


Abbildung 3: Übersichtsgrafik – Datenverarbeitung

Explorative Datenanalyse

Falls es zu Beginn dieser Phase bereits eine Datengrundlage gibt, sollte zunächst eine explorative Datenanalyse durchgeführt werden. Deren Ziel ist es, einen Eindruck von der Struktur und Qualität der Daten in Bezug auf Vollständigkeit und Korrektheit zu bekommen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollten in einem zentralen Dokument (im Folgenden „Logbuch“ genannt) festgehalten werden. In diesem sollten möglichst alle, aber zumindest alle relevanten Kanäle der Rohdaten beschrieben werden. Dazu gehören: eine Verbindung des Namens des Kanals zu einem verständlichen Namen, eine plausible Reichweite von Werten, die der Kanal annehmen kann und eine optionale Beschreibung des Kanals.

Zunächst muss ein geeignetes Tool zur Untersuchung der Daten gewählt werden. Das wohl bekannteste Tool zur Datenauswertung ist Microsoft Excel. Alternativ existieren Programmiersprachen, die sich vollständig (R) oder teilweise mit bestimmten Libraries (Python mit Pandas) auf Datenauswertung spezialisiert haben. Diese Programmiersprachen haben gegenüber Excel einige Vorteile: Sie sind in der Lage auch größere Datenmengen zu verarbeiten, Datenauswertungen sind besser reproduzierbar und der entstehende Code kann eventuell wiederverwendet werden. Der Nachteil ist ein erhöhter Aufwand in der Einarbeitung, dieser kann sich mittel- und langfristig aber lohnen. Bei der Wahl des Tools sollte vor allem das Vorwissen in der Arbeitsgruppe berücksichtigt werden.

Echtzeitverarbeitung

Das Ziel der Echtzeitverarbeitung ist es, die Daten mit möglichst wenig Latenz und möglichst hoher Qualität vom Bordcomputer auf das Tablet zu übermitteln. Wie oben beschrieben lässt sich ein Umweg über einen Webserver nicht immer vermeiden und ist für eine zentrale Überwachung notwendig. Zunächst müssen die Rohdaten für eine spätere Verarbeitung gespeichert werden. Außerdem müssen die Rohdaten validiert und dann abgeglichen werden. Grundsätzlich lässt sich jede für den Server geeignete Programmiersprache nutzen. Solange die Performance kein Problem darstellt, kann die gleiche Programmiersprache wie in der explorativen Datenauswertung verwendet werden, wodurch sich möglicherweise Code wiederverwenden lässt.

Speicherung

Nach der Übertragung muss sichergestellt werden, dass die übertragenen Daten gespeichert werden. Die Wahl der Datenbank sollte hier vor allem von der Skalierung des Systems abhängen. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass kein verteiltes System zur Speicherung der Daten nötig ist. Dann kann eine relationale Datenbank wie MySQL oder PostgreSQL verwendet werden. Die Datenbank für die Speicherung der Daten sollte auf das Schreiben und nicht auf das Abrufen der Daten ausgelegt sein. Zur Indexierung der Daten bietet sich der Timestamp der Roh-

daten an. Außerdem ist es sinnvoll einen Timestamp beim Empfang der Daten zu speichern, um die Latenz zwischen Bordcomputer und Webserver beobachten zu können.

Validierung der Fahrdaten

Bei der Validierung der Fahrdaten sollte auf Erkenntnisse aus der explorativen Datenanalyse und das dort entstandene Logbuch zurückgegriffen werden. Viele der Datenkanäle können nur Werte aus einem begrenzten Wertebereich annehmen. Beispielsweise kann der Ladestand der Batterie nicht über ihre maximale Kapazität steigen und die gefahrenen Kilometer nicht negativ sein. Dieses Wissen sollte so gut wie möglich genutzt werden, um Fehler frühzeitig zu erkennen und letztendliche Fehler in der Anzeige zu vermeiden. Weiterhin sollten die ankommenden Daten auf ihre Reihenfolge geprüft werden. Dies kann mithilfe des Logging Timestamps realisiert werden. Letztlich sollte das System einen Ausfall des Loggings erkennen und Client-Systemen entsprechende Informationen bereitstellen, damit diese angemessen reagieren können. Falls möglich, sollte ein automatisches Reporting an die für den Bordcomputer Verantwortlichen Personen stattfinden, damit das Problem schnellstmöglich behoben werden kann.

Aggregation und Augmentierung der Fahrdaten

Nach der Validierung der Fahrdaten können die Rohdaten aggregiert und augmentiert werden. Grundsätzlich ist dies sowohl auf dem Server und dem Client möglich. Beide Möglichkeiten bieten Vor- und Nachteile:

Die Aggregation auf dem Server ist vor allem dann sinnvoll, wenn mehrere Client Systeme diese Daten benötigen. Damit muss die Verarbeitung nur einmal stattfinden. Auch sehr rechenintensive Verarbeitungen sollten – wegen der leistungsstärkeren Hardware – auf dem Server durchgeführt werden.

Ein Nachteil der Aggregation und Augmentierung auf dem Server ist, dass solch ein *State* auf dem Server gehalten werden muss. Solange das System nicht verteilt ist sondern auf einem einzelnen Server basiert, stellt dies kein Problem dar. Muss das System später auf mehrere Server verteilt werden, kann dies allerdings zu Problemen führen. Falls möglich ist also eine Verarbeitung, die einen *State* auf dem Server nötig macht, zu vermeiden.

Inhaltlich gibt es viele Möglichkeiten die Rohdaten zu erweitern. Inwiefern das sinnvoll ist, hängt von den Zielen der Clientsysteme ab. Zwei sinnvolle Beispiele sind: Die Verarbeitung von GPS-Daten um Haltestellen zu erkennen und die Aggregation vom Verbrauch über eine zurückliegende Strecke / Zeit.

Verfügbarmachung durch eventbasiertes Publishing

Für die weitere Verwertung der Echtzeitdaten müssen die nun verarbeiteten Daten für Client-Systeme zur Verfügung gestellt werden. Hierfür bietet sich eine eventbasierte Architektur an. Hierbei können einzelne Event Streams (also z. B. der Datenstrom eines Bordcomputers) von Client-Systemen abonniert werden. Somit kann pro Bus ein Event Stream erstellt werden, wobei die sich jeweils in dem Bus befindende App nur diesen Stream zu abonnieren braucht. Eine zentrale App, wie z. B. eine Übersicht der Ladestände aller Busse kann wiederum alle Streams abonnieren. Auch das Erweitern der Systemarchitektur durch neue Anwendungen wird so ermöglicht. Für Systeme, die nicht mehr als einen Server benötigen, bietet sich Redis als Lösung an. Muss das System auf mehrere Server verteilt werden, kann Apache Kafka eine geeignete Wahl sein.

Asynchrone Datenverarbeitung

Unter die asynchrone Datenverarbeitung fallen alle Verarbeitungsschritte, die nicht in Echtzeit geschehen. Diese können einmalig oder regelmäßig in unterschiedlichen Zeitabständen stattfinden.

Data Warehouse

Ein Data Warehouse ist eine Datenbank, die Daten in einer für Anfragen spezialisierten Form bereitstellt. Hierfür werden die Daten mithilfe von Batch Jobs verarbeitet. Batch Jobs sind automatisierte Datenverarbeitungsprogramme, die regelmäßig zu bestimmten Zeitpunkten stattfinden. Das Ziel ist es, die Daten in geeigneter Form zu aggregieren und augmentieren, um Anfragen zu beschleunigen.

Wie genau die Daten aggregiert werden, ist abhängig von den Anforderungen. Einige sinnvolle Aggregationen sind beispielsweise:

- Aggregation einzelner Linienfahrten
- Aggregation von Umläufen einzelner Busse
- Verbrauch auf bestimmten Linien/Linienabschnitten
- Wöchentliche/Monatliche/Quartalsmäßige Analysen

Das Ziel eines solchen Data Warehouses ist die bessere Verfügbarkeit der Daten. Diese können dann effizient von anderen Systemen, wie z. B. einem Reporting Tool genutzt werden.

Prädiktive Modelle

Mit Hilfe von Machine Learning ist es möglich auf Basis der Daten prädiktive Modelle zu erstellen. Gerade im Bus-Betrieb bieten sich hier durch die immer gleichen Strecken Möglichkeiten, die nicht bei allen Elektrofahrzeugen gegeben sind. Ein Beispiel für eine sinnvolle Prädiktion ist beispielsweise eine Vorhersage, mit welcher Akkuladung ein Bus eine Strecke beendet. Hierfür geeignete Libraries sind z. B. Scikit-Learn (Python), Pytorch (Python) und Keras / Tensorflow (R und Python).

Zusammenfassung & Checkliste/Prozess

Bevor die Rohdaten – wie im nächsten Kapitel beschrieben – in Assistenzsystemen verwertet werden können, müssen sie vorverarbeitet werden. Dabei kann zwischen der Vorbereitung für Echtzeit- und asynchro-

nen Anwendungen unterschieden werden. Stellen Sie sicher, dass Sie für Echtzeitanwendungen jeden Punkt der folgenden Checkliste abhaken können.

- ☐ **Es wurde ein Logbuch angelegt und für relevante Personen verfügbar gemacht,**
d. h. es existiert ein Dokument, z. B. in Form einer Tabelle, in dem Informationen über Datenkanäle festgehalten werden.
- ☐ **Alle Daten werden nach der Übertragung zuverlässig gespeichert,**
d. h. es wurde eine geeignete Datenbank gewählt und im Rahmen der Echtzeitverarbeitung die Speicherung realisiert.
- ☐ **Alle Daten werden vor der Veröffentlichung validiert,**
d. h. es ist sichergestellt, dass Daten korrekt und in der richtigen Reihenfolge dargestellt werden.
- ☐ **Echtzeit-Daten werden mit einer eventbasierten Technologie veröffentlicht,**
d. h. es wurde eine geeignete Technologie gewählt und in die Echtzeitverarbeitung integriert.

Für weitere Anwendungen sollten zudem die folgenden Punkte bestätigt werden können:

- ☐ **Eine explorative Datenanalyse wurde durchgeführt und die Ergebnisse im Logbuch festgehalten,**
d. h. die Daten wurden grundlegend auf ihre Qualität und Besonderheiten untersucht und die Ergebnisse im Logbuch festgehalten.
- ☐ **Es wurden Skripte erstellt und ihre automatisierte Ausführung ermöglicht,**
d. h. Prädiktionsmodelle können trainiert und ein potenzielles Data Warehouse gefüllt werden.
- ☐ **Es wurde eine API für das Data Warehouse entwickelt,**
d. h. Client Systeme können die Daten des Data Warehouses effizient nutzen.

Datenverwertung

Wurden die Daten abschließend vorverarbeitet, können sie in Form von Assistenzsystemen oder Reporting-Werkzeugen verwertet werden. Im folgenden Kapitel werden verschiedene Ansätze für solche Systeme beschrieben, die in Teilen auch in der exemplarischen Systemarchitektur (vgl. Anhang I) zum Tragen kommen.

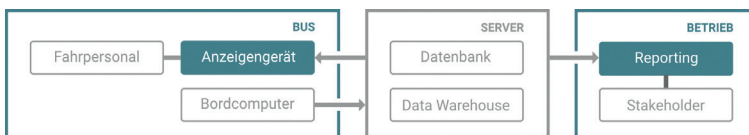


Abbildung 4: Übersichtsgrafik – Datenverwertung

Assistenzsysteme

Werden die Fahrdaten in Echtzeit erfasst, bietet sich neben der regelmäßigen asynchronen Datenauswertung auch eine dynamische Live-Verwertung an. Je nach Güte der Daten (Messfrequenz & -genauigkeit) sind verschiedene Assistenzsysteme denkbar, die das Fahrpersonal, Disponenten und weitere Stakeholder bei der Reichweitenabschätzung unterstützen oder bei der Umsetzung energieeffizienter Fahrweisen als Hilfestellung dienen können. Grundvoraussetzung hierfür ist ein stabiler Datenstrom und eine geringe Latenz zwischen der Erfassung am Fahrzeug, der Verwertung auf einem Server und der Darstellung auf einem Endgerät (in der Regel wiederum im Fahrzeug).

Variationen in der Darstellung von Werten, die im Rahmen des Projekts nicht weiter untersucht wurden, sind die Auflösung der Werte (Anzahl der Kommastellen) sowie die Energieeinheiten (Wh, Ah). In den dargestellten Konzepten wird mit kWh (Akkuladung), kWh/km (Verbrauch) und km (Reichweite) gearbeitet, insbesondere für den Verbrauch wären aber durchaus andere Einheiten denkbar (z. B. Wh/km, kWh/100 km, km/kWh, etc.). Die Reichweite wird auf 100 m, die Akkuladung auf 100 Wattstunden genau dargestellt. Der Verbrauch wird auf 2 Nachkommastellen gerundet.

Reichweitenabschätzung

Die berechnete Restreichweite von Elektrofahrzeugen verhält sich sprunghafter und unvorhersehbarer (volatiler) und reagiert teils stärker auf situative Veränderungen als dies bei konventionellen Verbrennerfahrzeugen der Fall ist⁸. Viele verschiedene interne und externe Einflüsse spielen dabei eine Rolle. Hinzu kommt, dass der Umgang mit elektrischer Energie im Rahmen der Mobilität für viele Menschen noch ungewohnt ist und mentale Modelle der Abhängigkeiten und Zusammenhänge noch ausgebildet werden müssen. Beide Faktoren tragen einen signifikanten Teil dazu bei, dass Nutzer von Elektrofahrzeugen – egal ob als aktives Fahrpersonal oder passiv als Disponent – in der Ab- und Einschätzung der verfügbaren (Rest-)Reichweite mit Unsicherheiten umzugehen haben, was schlussendlich eine zu niedrige komfortable Reichweite zur Folge hat (Abb. 1).

Durch die Aufbereitung verfügbarer Fahrdaten zu handlungsintegrierten Informationen können diese Aspekte adressiert und potenzielle Unsicherheiten reduziert werden⁹. Dabei gibt es verschiedene Ansätze, um

-
- 8 Franke, T., Görges, D., & Arend, M. G. (2019, September). The Energy Interface Challenge. Towards Designing Effective Energy Efficiency Interfaces for Electric Vehicles. In *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 35–48). ACM.
 - 9 Franke, T., Neumann, I., Bühler, F., Cocron, P., & Krems, J. F. (2012). Experiencing range in an electric vehicle: Understanding psychological barriers. *Applied Psychology*, 61(3), 368–391.

die Entwicklung akkurater, mentaler Reichweitenmodelle zu unterstützen:

- Darstellung der verbleibenden Reichweite
- Berechnung der verbleibenden Reichweite
- Verknüpfung von Verbrauchs- und Reichweitendaten
- Nutzung von Heuristiken zur Repräsentation der Reichweite

In den folgenden Abschnitten werden die unterschiedlichen Ansätze anhand exemplarischer, konzeptioneller Entwürfe erläutert.

Darstellung der verbleibenden Reichweite

Ein Standard bezüglich der Anzeige von reichweitenbezogenen Informationen hat sich bis heute nicht etabliert. Nur die Anzeige der Akkuladung als Prozentzahl und Batteriesymbol sowie der Restreichweite (ohne Berechnungshinweise) scheint übergreifend in allen Modellen bereitgestellt zu werden (vgl. Abbildung 5). Es ist jedoch ein Trend zu anpassbaren Instrumententafeln zu erkennen, womit tendenziell auch mehr Informationen zur Reichweite selektiv zur Verfügung stehen könnten.



Abbildung 5: Die Darstellung der Reichweite als numerische Angabe der Akkuladung und Restreichweite¹⁰

Als einfachste (aber womöglich effizienteste) Form der Reichweitenassistentz kann die numerische Angabe der Reichweite visuell ergänzt werden. Da die Fahrstrecke im Kontext des ÖPNV in der Regel jederzeit bekannt ist, bieten sich Darstellungen an, welche die Reichweite auf die verbleibende Fahrstrecke abbilden. Denkbar wäre z. B. eine Darstellung des geplanten Umlaufs (der Tagesstrecke eines Fahrzeugs) bzw. der verbleibenden Fahrstrecke, in der die Restreichweite (Spanne) farblich hervorgehoben wird (inklusive möglicher Unsicherheiten der Prognose). Für den Nutzer wäre klar erkennbar, a) wo er sich befindet, b) was noch

10 Nissan (2018, 22. Juni). Leaf Features. Abgerufen von <https://www.nissanusa.com/vehicles/electric-cars/leaf/features.html> am 22.06.2018.

vor ihm liegt und c) wie die Reichweite einzuschätzen ist (min./max. Prognose als farbliche Marker).

Eine andere Möglichkeit, die verbleibende Umlaufstrecke mit der Restreichweite in Kontext zu setzen, könnte eine Anzeige des Reichweitenpuffers darstellen: wie viel Kilometer verbleiben nach Abschluss des Umlaufs? Und wie verändert sich diese Zahl im Verlauf der Fahrt? Ist der Verbrauch höher als üblich, verringert sich der bei der Planung des Umlaufs angesetzte Puffer. Liegt der Verbrauch niedriger, baut sich wieder mehr Reichweitenpuffer auf. Die Berechnung der Prognose könnte auf Daten aus vergangenen Umläufen basieren. In Abbildung 6 wird der aktuelle Reichweitenpuffer zusammen mit der Indikatorampel dargestellt (grün – unkritisch; gelb – kritisch; rot – Ziel wird nicht erreicht). Über die Einblendung der Reichweite und Reststrecke kann der Reichweitenpuffer direkt verifiziert werden.

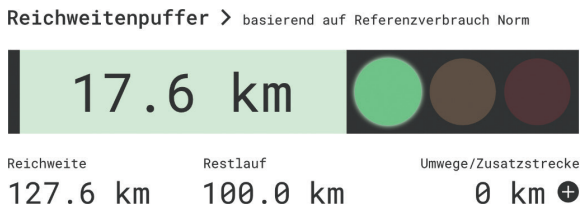


Abbildung 6: Darstellung des aktuellen Reichweitenpuffers mit Indikatorampel

Wie bereits erläutert ist die Reichweitenangabe eine Vorhersage und immer mit einer Unsicherheit behaftet. Diese Unsicherheit sollte kenntlich gemacht werden, um auch im mentalen Modell des/der Fahrer:in berücksichtigt werden zu können. Eine Darstellungsmöglichkeit wäre, die Abweichung der Vorhersage von der Realität darzustellen, beispielsweise als SOLL-Linie (Prognose).

Berechnung der verbleibenden Reichweite

Die Restreichweite basiert auf einer vermeintlich einfachen Rechnung: Akkuladung dividiert durch einen Referenzverbrauch. Während die Akkuladung eine feste Größe ist, die keinen Interpretationsspielraum lässt,

kann der Verbrauch variieren: welche Zahl sollte als Referenz angelegt werden und liefert die hilfreichste Restreichweite?

Wichtig ist in diesem Kontext die Unterscheidung zwischen einem Verbrauchswert und einem Referenzwert. Aus Sicht der Handlungsintegration sollte der Nutzer keine abstrakt wirkende Zahl auswählen, sondern mit Referenzen (z. B. ‚Verbrauch auf letzten 5 km‘) arbeiten – welcher Verbrauchswert hinter diesen Referenzen steht, ist letztlich nicht relevant. Andererseits ist die Berechnung weniger transparent und ein reichweitenbezogenes Situationsmodell wird möglicherweise beeinträchtigt, wenn nicht klar ist, welche Referenz für welchen Verbrauchswert steht. Welcher Ansatz hier die optimalen Ergebnisse in Bezug auf Systemvertrauen und komfortable Reichweite liefert, gilt es in der Praxis zu evaluieren. Im Folgenden sind verschiedene Konzepte dargestellt, die beide Varianten mit einbeziehen. Ein potenzielles Interface könnte dem Fahrpersonal die Möglichkeit geben, die Reichweitenberechnung (ergo den Referenzverbrauch) zu manipulieren, um auf die aktuelle Situation reagieren zu können und jederzeit eine maximal hilfreiche Vorhersage zu erhalten. Abbildung 7 zeigt beispielhaft ein Interface, mit welchem der angesetzte Verbrauch über einen Schieberegler angepasst werden kann. Verschiedene Referenzwerte (Durchschnittsverbrauch auf dieser Linienfahrt bzw. auf der ersten/zweiten/dritten Linienfahrt des heutigen Tages; Normverbrauch des Fahrzeugs) werden auf einer kontinuierlichen Skala dargestellt – das Fahrpersonal kann also einen konkreten Verbrauchswert auswählen, aber sich gleichzeitig an Referenzwerten orientieren. Die Berechnung der Reichweite aus Akkustand und Verbrauch wird transparent dargestellt und unterstützt das Fahrpersonal beim Verständnis der verbleibenden Reichweite.

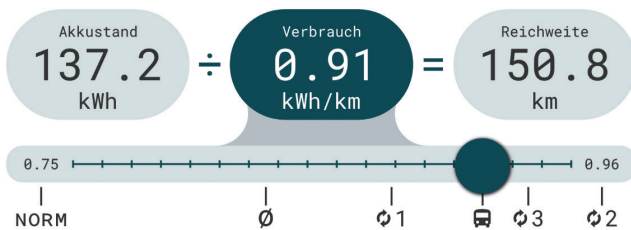


Abbildung 7: Anpassbares Reichweiteninterface

Verknüpfung von Verbrauchs- und Reichweitendaten

Neben der transparenten Darstellung und Berechnung der Restreichweite bietet sich – insbesondere im sehr strukturierten Linienverkehr – die Verknüpfung von Verbrauchs- und Reichweitendaten an. Eine naheliegende Möglichkeit wäre zum Beispiel, den Durchschnittsverbrauch auf Linienfahrten zu messen und als Feedback aufzubereiten. Das Fahrpersonal kann so einordnen, ob der Verbrauch kleiner gleich der Norm ist oder ob es Abweichungen nach oben gibt, welche die erwartete Reichweite reduzieren könnten. Abbildung 8 zeigt ein Interface, dass solch einen Vergleich bietet. Da die Reststrecke jederzeit bekannt ist, kann in Kombination mit der Akkuladung genau bestimmt werden, wieviel Energie pro Kilometer noch zur Verfügung steht. Dieser maximale Verbrauch pro Kilometer kann dem Fahrpersonal in Form eines Verbrauchslimits dargestellt werden. Zusammen mit dem Verbrauch auf einzelnen Linienfahrten kann so eingeschätzt werden, ob die angestrebte Reichweite gefährdet ist oder ob ein Verbrauchspuffer bleibt.

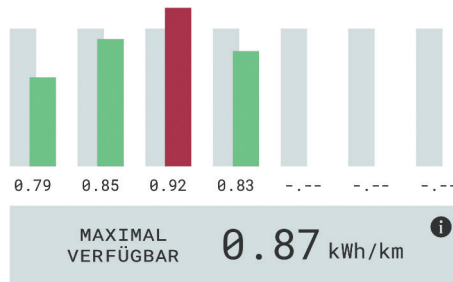


Abbildung 8: Verbrauchsvergleich Interface

Die einzelnen Linienfahrten lassen sich auch granularer auflösen, um Verbrauchsspitzen und auch die Fahrten untereinander besser einordnen zu können. Abbildung 9 zeigt ein Anzeigenkonzept, das den Verbrauch im Verlauf einer Linienfahrt als Verbrauchsprofil darstellt. Einzelne Linienfahrten können zu- und abgeschaltet werden, die aktuelle Fahrt wird fortwährend angezeigt und „wächst“ von links nach rechts.

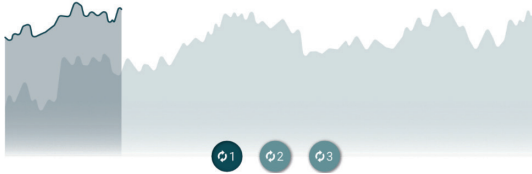


Abbildung 9: Verbrauchsprofil Interface

Nutzung von Heuristiken zur Repräsentation der Reichweite

Ein etwas anderen Ansatzpunkt zur Visualisierung der verbleibenden Restreichweite ist die Nutzung von Heuristiken, also der Beschränkung auf die Kerninformationen, die zur schnellen, einfachen und genauen Beurteilung der aktuellen Reichweitesituation notwendig sind. Ausgangsgedanke hierbei ist, die schon stark beanspruchten kognitiven und zeitlichen Ressourcen des Fahrpersonals im ÖPNV nicht durch noch mehr Informationen überzustrapazieren. Die folgenden Konzepte sollen exemplarisch die Übersichtlichkeit und das Potenzial von Heuristiken veranschaulichen, durch die Kombination von alltagsnahen, anschaulichen und motivational ansprechenden Visualisierungen die unmittelbare Erfahrbarkeit der Reichweite im Handlungskontext zu erhöhen. Das erste Konzept (Abbildung 10) verknüpft die Metapher eines Batterietesters mit einer Ampel. Letzteres stellt den aktuellen Reichweitenpuffer als Signal dar. Sobald das grüne bzw. gelbe Segment leer ist schaltet die Ampel von Grün auf Gelb bzw. Gelb auf Rot. Steht die Ampel auf Rot, gibt der Füllstand des roten Segments das Ausmaß des negativen Puffers an, also wie viel mehr Reichweite notwendig wäre, um den Umlauf abzuschließen.

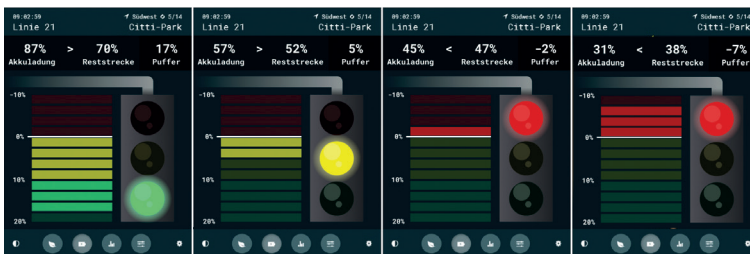


Abbildung 10: Reichweiten-Ampel

Einen etwas spielerischen Ansatz verfolgt das zweite Heuristik-Konzept (Abbildung 11), dass auf die positive motivationale Wirkung der Gamification setzt. Mobilitätsressource und Mobilitätsanforderung werden hier durch zwei Busse dargestellt, die „Kopf-an-Kopf“ um die Wette fahren. Liegt der blaue Bus vorn, reicht die Energie zur Bewältigung der Fahrstrecke aus. Der Abstand beider Busse gibt das Ausmaß des Unterschieds von Mobilitätsressource und Mobilitätsanforderung (also den Pufferwert) an.

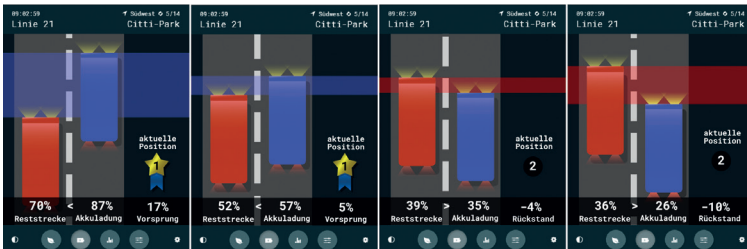


Abbildung 11: Reichweiten-Rennen

Energieeffizientes Fahren

Energieeffizientes Fahren ist insbesondere im Linienbetrieb ein vielschichtiges Thema. Es sollte vermieden werden, dass Assistenzsysteme zum energieeffizienten Fahren ohne die Unterstützung des Fahrpersonals im Reichweitenmanagementsystem umgesetzt werden (siehe auch Kapitel Nutzereinbindung und Evaluation). Vorbehalte entstehen meist durch die Sorge, dass dadurch das Fahrpersonal überwacht bzw. kontrolliert wird, oder zusätzliche Arbeitsbelastung durch die Verpflichtung der Überwachung des eigenen Fahrstils entsteht. Ein Assistenzsystem zum energieeffizienten Fahren sollte also so entwickelt und anschließend kommuniziert werden, dass vier Vorbedingungen beachtet werden:

1. Es werden keine Fahrdaten personenbezogen gespeichert und ausgewertet. (z. B. nicht: „Frau Müller verbraucht 0,98 kWh/km.“)
2. Es werden keine Vergleiche zwischen einzelnen Personen gezogen. (z. B. nicht: „Frau Müller verbraucht weniger als Herr Meyer.“)

3. Die Nutzung des Assistenzsystems zum energieeffizienten Fahren stellt keine zusätzliche Arbeitsbelastung dar. (Nutzung in den Pausen, Nutzung am Anfang/Ende des Dienstes, sehr einfache und unkomplizierte Nutzung während des Dienstes)
4. Die Nutzung des Assistenzsystems ist immer optional. (Das System lässt sich abschalten.)

Auch unter Einhaltung dieser Vorbedingungen lässt sich ein nützliches Assistenzsystem zum energieeffizienten Fahren entwickeln. Die Zielstellung ergibt sich in erster Linie aus den psychologischen Reichweitschwellen (siehe Kapitel Herausforderungen). Die kompetente Reichweite ergibt sich nämlich aus dem maximal effizienten Fahren, zu dem eine Fahrer:in imstande ist. Die performante Reichweite ergibt sich aus der kompetenten Reichweite reduziert durch die Effizienzeinbußen aufgrund der Herausforderungen im täglichen Linienbetrieb. Die performante Reichweite wird also auch von mehreren sich z. T. widersprechenden Zielen (Zeitdruck, Fahrgastkomfort, Wetter, Verkehrslage) beeinflusst. Dass gerade in diesen Situationen die Unterschiede des Fahrpersonals in der energieeffizienten Fahrweise deutlich werden, zeigen Felddaten aus der NuR.E Studie: Der Verbrauch auf einer bestimmten Strecke zu gleichen Tages- und Jahreszeiten variiert um ca. $\pm 10\%$. Bei einem Elektrobuss mit 180 km Gesamtreichweite bedeutet das eine Reichweitspanne von 160–200 km. Zielstellungen für ein Assistenzsystem sind deshalb dem Fahrpersonal energieeffiziente Fahrweisen zu vermitteln (→ Erhöhung der kompetenten Reichweite) und dem Fahrpersonal bei der Umsetzung der Fahrweisen im tatsächlichen Linienbetrieb zu vereinfachen (→ Erhöhung der performanten Reichweite).

Vermittlung energieeffizienter Fahrweisen

Die Vermittlung der energieeffizienten Fahrweisen kann beispielsweise in Fahrerschulungen, Schulungsfahrten oder im Linienbetrieb durch die Anzeige erfolgen. Eine Anzeige hat den Vorteil, das mentale Modell des Fahrpersonals durch eine zeitnahe und damit handlungsnahe Rückmeldung anpassen zu können. Konkret bedeutet das, dass während der Fahrt die Fahrweise aufgezeichnet und durch sinnvolle Metriken (Berechnungsweisen) in verständliche Indikatoren (oder: Hinweis-Informationen) umgewandelt und möglichst ablenkungsfrei visualisiert wird. Ein Beispiel

einer solchen Anzeige ist in Abbildung 12 zu sehen. In dieser Anzeige werden vier Indikatoren (Gesamtverbrauch, Beschleunigungseffizienz, Schwungaussnutzung und Bremsen im Rekuperationsbereich) durch bestimmte Berechnungen (siehe Gödker, Herrmann & Franke, 2018¹¹ für genauere Informationen) jeweils ein Wert zugeordnet. Diese Werte werden jeweils für die letzten fünf Kilometer berechnet und mit dem Wert der fünf Kilometer davor verglichen. Der Vergleich wird durch Farben schnell erkennbar visualisiert. Eine Statistikanzeige erlaubt einen weiteren Vergleich mit historischen Daten sowie genauere Informationen. Durch die Nutzung der Anzeige über einen längeren Zeitraum ist ein Beobachten, Einordnen und damit schließlich auch Verbessern des eigenen Fahrverhaltens möglich. Diese Anzeige zielt also speziell auf die situationsübergreifende Energieeffizienz (kompetente Reichweite).

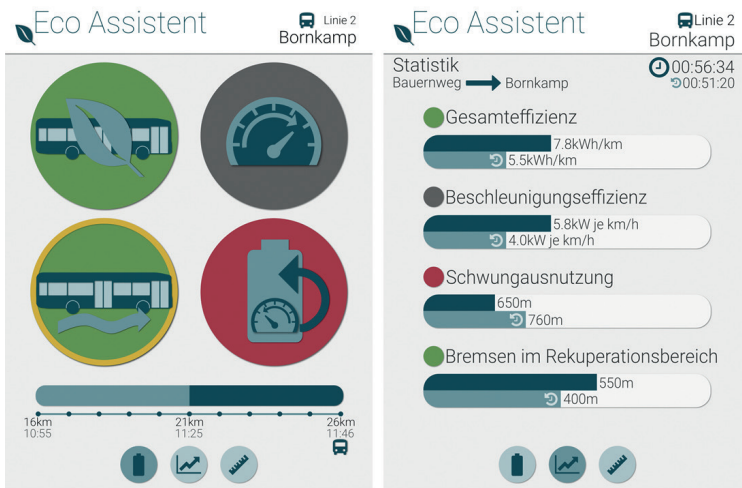


Abbildung 12: Der Eco Assistant¹²

- 11 Gödker, M., Herrmann, D., & Franke, T. (2018). User perspective on eco-driving HMI for electric buses in local transport. *Mensch und Computer 2018-Tageungsband*.
- 12 Gödker, M., Herrmann, D., & Franke, T. (2018). User perspective on eco-driving HMI for electric buses in local transport. *Mensch und Computer 2018-Tageungsband*.

Das Beispielsystem *Eco Assistent* ist ein Prototyp, der im NuR.E Projekt in einer frühen Iterationsstufe entstanden ist. Die Evaluation ergab einige Ansatzpunkte zur Verbesserung der Anzeige, die sich prototypisch auch auf andere Anzeigen zum energieeffizienten Fahren übertragen lassen.

Zum einen muss bei jeder neuen Anzeige untersucht werden, ob die Menge der Informationen einerseits groß genug ist um aussagekräftig und ausreichend detailliert zu sein, und andererseits gering genug, um die kognitive Belastung und Ablenkungswirkung in dem Rahmen zu halten, dass eine Nutzung ungefährlich ist. Dies lässt sich durch die Durchführung von Videostudien (1. Schritt) und Feldstudien (2. Schritt) testen.

Um die performante Reichweite zu verbessern, also die Fähigkeit, vorhandene energieeffiziente Fahrweisen auch umzusetzen, können Rückmeldungen zur Fahrweise in Bezug zu definierten Streckenabschnitten gegeben werden. So könnten die Werte der Metriken aller Fahrer:innen in einem bestimmten Streckenabschnitt (z. B. zwischen zwei Haltestellen oder auf einer Landstraße / in einem Stadtteil) in einer Datenbank anonym gesammelt werden. Bei der Fahrt dieses Streckenabschnitts kann dann ein Wert gebildet und mit den bisherigen Werten in Beziehung gesetzt werden. Dadurch versteht man besser, wie energieeffizient die Fahrweise in diesem speziellen Abschnitt war.

Weitere Möglichkeiten für Indikatoren und Metriken befinden sich im Anhang III (Tabelle 2).

Reporting

Neben der direkten Unterstützung des Fahrpersonals durch Reichweitenanzeigen im Fahrzeug sind auch die Disponenten in der Leitstelle eine wichtige Zielgruppe, die sich mit der (aktuellen/verbleibenden) Reichweite aller eingesetzten Elektrofahrzeuge auseinandersetzt. Die Hauptaufgaben der Disponenten, z. B. die Einhaltung des Fahrplans und Organisation des reibungslosen Ablaufs, werden maßgeblich von der Reichweite der Elektrobusse beeinflusst. Um hier einen Überblick über

die Fahrzeugzustände zu erhalten und mögliche Engpässe frühzeitig zu erkennen, können die geloggtten Fahrdaten durch manuelle Datenauswertungen oder in einer (Web-)Anwendung (im Folgenden „Dashboard“ genannt) für diese Zielgruppe aufbereitet werden.

Manuelle Datenauswertung

Ein Sonderfall der manuellen Datenauswertung ist die bereits beschriebene explorative Datenanalyse. Dabei wurden Themen wie der Import der Daten und die Wahl eines geeigneten Tools diskutiert. Diese Diskussionen sind auch für die allgemeine, manuelle Datenauswertung gültig.

Manuelle Datenauswertungen werden vorgenommen um die oben genannten Aufgaben der Disponenten zu unterstützen. Hierfür werden für die Entscheidung wichtige Faktoren errechnet und geeignet visualisiert. Sollte die gleiche Auswertung wiederholt geschehen, ist es sinnvoll, die notwendigen Datenverarbeitungen als Batch Job zu automatisieren und die Ergebnisse und Visualisierungen in ein Dashboard (siehe folgendes Kapitel) zu integrieren.

Dashboard

Für das Dashboard sind letztlich nur wenige Echtzeit-Datenkanäle relevant:

- die aktuelle Restreichweite
- die verbleibende Umlaufstrecke
- ein daraus resultierender Reichweiten-Puffer

Zusätzlich zu den Echtzeitdaten können auch historische Daten (auf Basis des Data Warehouse) und Prädiktionen bereitgestellt werden. Beispielsweise kann der Verbrauch von Bussen auf einer bestimmten Strecke angezeigt werden, um eine Einsatzplanung der Busse zu ermöglichen.

Durch die Integration von historischen und Echtzeitdaten ist es möglich, alle verfügbaren Informationen an einem Ort zu sammeln. Falls möglich, sollten diese Daten direkt in eine bereits vorhandene Lösung integriert werden, sodass kein Bruch in der Benutzung entsteht. Hierfür müssen individuelle Absprachen und Anfragen mit den jeweiligen Softwareanbietern durchgeführt werden.

Andernfalls gibt es für die Erstellung einer eigenen Lösung unterschiedliche Möglichkeiten. Grafana (<https://grafana.com/>) ist beispielsweise ein System, das die Erstellung von Dashboards mit relativ geringem Aufwand ermöglicht. Alternativ kann eine eigene Lösung entwickelt werden, die eine größere Individualisierbarkeit ermöglicht, aber auch einen größeren Aufwand erfordert. Hierbei können Libraries zur Visualisierung, wie z. B. D3.js für Diagramme und Leaflet für interaktive Karten verwendet werden.

Zusammenfassung & Checkliste/Prozess

In diesem Kapitel wurden Reporting- und Assistenzansätze beschrieben, welche auf Basis der gesammelten Daten verschiedenen Stakeholdern Informationen im Rahmen des Reichweitenmanagements geben können. Die prototypischen Konzepte lassen sich in zwei Kategorien einteilen: Echtzeitsysteme, die während dem Betrieb Feedback liefern, und Reporting-Werkzeuge, die zur regelmäßigen Auswertung der Fahrdaten und Optimierung des Betriebs herangezogen werden können.

Die folgenden Möglichkeiten sollten für die Realisierung eines effizienten Reichweitenmanagements in Betracht gezogen werden:

- ☐ **Ein manuelles, regelmäßiges Reporting zu den relevanten Kennzahlen,**
d. h. die geloggte Fahrdaten die vergangenen Tage/Wochen/Monate werden im Hinblick auf zuvor definierte Kennzahlen ausgewertet und so Stellschrauben aufgedeckt.
- ☐ **Ein Echtzeit-Monitoring relevanter Kennzahlen in Form eines Disponenten-Dashboards,**
d. h. die geloggten Fahrdaten werden aufbereitet und auf einem Dashboard ausgespielt, was in der Leitstelle zum Monitoring und zur Entscheidungsunterstützung herangezogen werden kann.
- ☐ **Ein Echtzeit-Assistenzsystem im Fahrzeug zur direkten Unterstützung des Fahrpersonals in der Reichweitenabschätzung,**
d. h. die geloggten Fahrdaten des aktuellen Fahrzeugs werden aufbereitet und in Form eines Unterstützungssystem zur Optimierung der Reichweitenabschätzung im Fahrzeug angeboten.
- ☐ **Ein Echtzeit-Assistenzsystem im Fahrzeug zur direkten Unterstützung des Fahrpersonals im energieeffizienten Fahren,**
d. h. die geloggten Fahrdaten des aktuellen Fahrzeugs werden verarbeitet und in Form von EcoDriving Indikatoren dem Fahrpersonal als Feedback angeboten.

Nutzereinbindung und Evaluation

Die Einbindung der Nutzer (Fahrpersonals und weitere Stakeholder) ist ein elementarer Bestandteil in der Entwicklung und Umsetzung eines nutzerzentrierten Reichweitenmanagementsystems. Das bedeutet in erster Linie die Durchführung von Nutzerstudien, aber auch das Einholen von Feedback und das konsequente Kommunizieren von Vorhaben z. B. im Rahmen von Betriebsversammlungen oder in Aushängen.

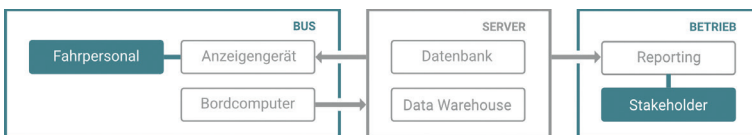


Abbildung 13: Übersichtsgrafik – Nutzereinbindung und Evaluation

Einbindung des Fahrpersonals

Durch die Einbindung des Fahrpersonals wird es ermöglicht, Anforderungen an das System zu spezifizieren und Konzepte und Prototypen zu testen. Das bedeutet konkret, dass beispielsweise die psychologischen Reichweitenschwellen messbar gemacht werden um die Nützlichkeit eines Systems zu evaluieren, dass visuelle oder kognitive Überforderungen oder Ablenkungsquellen, die eine Integration des Systems in den Arbeitsplatz unmöglich machen, identifiziert werden oder auch dass die Gebrauchstauglichkeit insgesamt sowie die User Experience erhöht werden.

Die wissenschaftliche Methode, die hinter diesem Vorgehen steht, ist der menschenzentrierte Gestaltungsprozess, der im Teil 210 der DIN EN ISO 9241¹³ als „Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme“ definiert ist. Der Prozess besteht aus mehreren zirkulär angeordneten Teilschritten (Abbildung 14), die in Wiederholungen bearbeitet werden (Iterationen). In der Norm sind explizit Nutzerstudien zur Ableitung von Anforderungen und zur Durchführung von Evaluationen genannt. Wie umfangreich und häufig die einzelnen Iterationen durchgeführt werden, ergibt sich aber nicht nur aus der Norm selbst, sondern orientiert sich an organisatorischen und inhaltlichen Rahmenbedingungen (z. B. technische Gegebenheiten, Verfügbarkeit von Nutzerstichproben).

Die Durchführung von wissenschaftlichen Nutzerstudien ist im universitären Kontext Normalität. Im Bereich des Betriebs von ÖPNV sind Studien, die über Mitarbeiterbefragungen hinausgehen, eher selten. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass die meisten Nutzer noch nie an einer Nutzerstudie teilgenommen haben und die Vorgehensweise sehr unbekannt ist. Dies muss sowohl in der Planung und Akquise als auch in der Durchführung der Nutzerstudien beachtet werden.

13 ISO 9241-210:2010. (2010). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme. (ISO 9241-210:2010). DIN Deutsches Institut für Normung e. V. <https://doi.org/10.1007/s00738-009-0685-2>

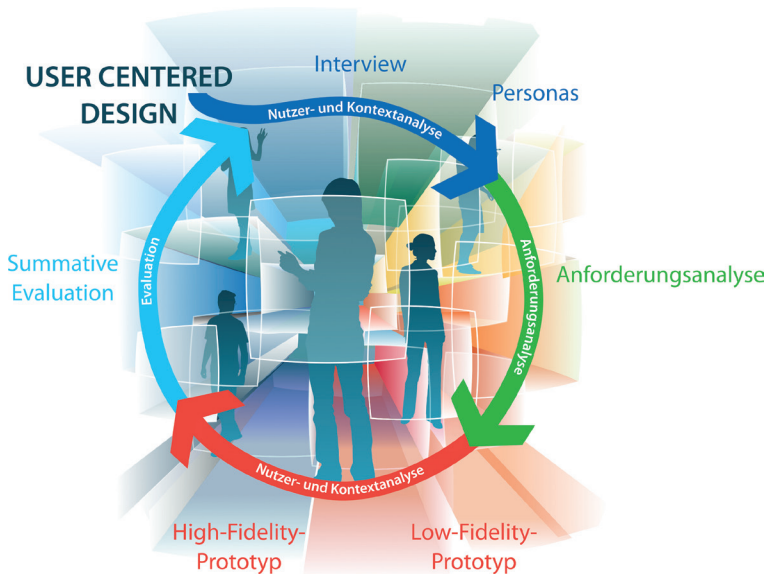


Abbildung 14: Der User Centered Design Prozess, Bild: Nicole Jochems

Mögliche Arten der Nutzerstudien sind Interviews, Fragebogen-Studien und auch Feldstudien. In frühen Iterationen sowie zur Ableitung von Anforderungen eignen sich eher qualitative Methoden und (Experten) Interviews. Diese liefern reichhaltigere aber weniger objektive Ergebnisse. Bei der konkreten Überprüfung von Anforderungen an ein System und zum Vergleich von Systemvarianten sollten quantitative Methoden in Form von Fragebögen und Feldstudien durchgeführt werden. Zwei Beispielnutzerstudien werden im Anhang II beschrieben.

Die Durchführung von Nutzerstudien mit dem Fahrpersonal des ÖPNV geht mit besonderen Herausforderungen an die Akquise, die Konstruktion von Materialien und das Vorgehen einher. Anders als im universitären oder Büro-Kontext hat das Fahrpersonal keinen eigenen PC-Arbeitsplatz und auch nur selten überhaupt Zugang zu einem geteilten PC-Arbeitsplatz. Dadurch ist die Durchführung von Online-Fragebögen am Arbeitsplatz nicht möglich. Des Weiteren befinden sich das Fahrpersonal nur kurze Zeit auf dem Betriebshof, und startet meist direkt ihre

Schicht im Bus bzw. Verlassen den Betriebshof kurze Zeit nach Beendigung der Schicht. Zusammengefasst ist die Durchführung von Fragebogen-Studien im regelmäßigen Schichtbetrieb nahezu unmöglich. Eine Möglichkeit besteht darin, das Ausfüllen der Fragebögen in die Freizeit und damit zum Fahrpersonal nach Hause zu verschieben. Die Erfahrung zeigt hier, dass die Teilnahmebereitschaft auch bei vergleichsweise hohen Anreizen (10 € Amazon-Gutschein für 45 Min Fragebogen) sehr gering ist und für quantitative Analysen nicht ausreicht.

Als vielversprechende Lösung hat sich die Durchführung von Nutzerstudien während gesetzlich verpflichtenden Weiterbildungs-Schulungen herausgestellt. Hier sitzt das Fahrpersonal meist in mittelgroßen Gruppen in ruhiger Arbeitsatmosphäre für einen halben oder ganzen Tag. Mit Anreizen wie einer Gutscheinverlosung und dem Mitbringen von Snacks für den Schultag entsteht eine kooperative Atmosphäre. Meist ist ein Beamer und eine Leinwand vorhanden, auf dem man Studienmaterial wie Videos oder Bilder präsentieren kann. Feldstudien bieten sich aufgrund der vorhandenen Möglichkeit des Datenloggings an, sind aber dennoch mit Herausforderungen verbunden. Besonders die Zuordnung von Fahrdaten und subjektiven Daten muss im Hinblick auf Datenschutz und dem organisationalen Druck verantwortungsbewusst und in enger Absprache mit dem Betriebsrat durchgeführt werden. Die entstehenden Fahrdaten werden stark von nicht-kontrollierbaren Umweltfaktoren (Wetter, Verkehr) beeinflusst und sind nicht manipulierbar oder steuerbar. Dieser Aufwand sollte mit der Möglichkeit Prototypen in Videostudien zu evaluieren abgewogen werden.

Einbindung weiterer Stakeholder

Neben dem Fahrpersonal selbst sollten bei dem Vorhaben ein nutzerzentriertes Reichweitenmanagement aufzubauen weitere Stakeholder eingebunden werden. Das Fahrschulpersonal sollte über das Vorhaben informiert sein und kann Hinweise zu Vorgaben und Lehrbuch-Meinungen zu einer energieeffizienten Fahrweise im Elektrobus geben. Bei der Durchführung von Nutzerstudien in den Schulungen ist die Fahrschule die erste Ansprechpartnerin.

Der technische Dienst bzw. die IT-Abteilung des ÖPNV Unternehmen müssen ebenfalls informiert werden. Durch die IT können Schnittstellen zum Betriebshofmanagement, zu Bus-, Verkaufs- und Zeitplandaten hergestellt werden. Datenverarbeitungen müssen mit der IT-Abteilung besprochen werden.

Die Verwaltung muss über die Durchführung von Nutzerstudien informiert werden und kann bei der Abfrage von Schichtplänen, bei der Organisation von Interviewstudien und bei der Beschaffung von Materialien und Aufwandsentschädigungen helfen. Team- bzw. Fahrdienstleiter:innen stellen einen Kommunikationskanal zu dem Fahrpersonal selbst dar, indem sie Flyer verteilen, Kontaktdaten austauschen oder Antwortzettel einsammeln.

Disponenten sollten ständig über den aktuellen Stand des Systems Bescheid wissen, da sie im Zweifel die ersten Ansprechpartner bei Problemen des Fahrpersonals sind. Hilfreich ist die Spiegelung der aktuellen Anzeige aus dem Bus auf eine Disponenten-Anzeige und eine Checkliste, was bei Ausfall oder häufigen Fehlern des Systems zu tun ist.

Der Betriebsrat sollte über die gesamte Laufzeit des Vorhabens ein enger Austauschpartner sein und über den aktuellen Stand des Vorhabens regelmäßig informiert werden. Die Durchführung von Studien, Veränderungen am Arbeitsplatz (Fahrsitz im Bus) sind mitbestimmungspflichtig und müssen daher in jedem Fall mit dem Betriebsrat abgesprochen werden. Darüber hinaus kann der Betriebsrat die Kommunikation zum Fahrpersonal ermöglichen, z. B. durch Vorstellungen auf der Betriebsversammlung.

Zusammenfassung & Checkliste/Prozess

Zur Entwicklung nach DIN EN ISO 9241-210 muss das Fahrpersonal eingebunden und Nutzerstudien durchgeführt werden. Diese ermöglichen die Überprüfung des Reichweitenmanagements auf Gebrauchstauglichkeit, Motivation und Erhöhung der psychologischen Reichweitschwellen. Zur Durchführung dieser Studien eignen sich Schulungstermine. Weitere Stakeholder müssen ebenfalls eingebunden werden.

Diese Vorgänge sind zentral für die Umsetzung eines nutzerzentrierten Reichweitenmanagements. Stellen Sie sicher, dass Sie möglichst jeden Punkt der folgenden Checkliste abhaken können.

- ☐ **Alle relevanten Stakeholder sind eingebunden,**
d. h. Betriebsrat, Verwaltung, IT-Abteilung, Disponenten und Fahrschule sind informiert.
- ☐ **Das Fahrpersonal wurde vom Vorhaben in Kenntnis gesetzt,**
d. h. auf einer Betriebsversammlung oder durch einen Aushang wurde das Vorhaben vorgestellt.
- ☐ **Ein Konzept zur Durchführung von Nutzerstudien ist aufgestellt,**
d. h. relevante Fragen (z. B. wo, wie und mit wem werden Nutzerstudien von wem durchgeführt?) sind geklärt.
- ☐ **Zielkriterien zur Überprüfung des Reichweitenmanagements sind aufgestellt,**
d. h. die Nutzerstudien werden so konzipiert und durchgeführt, dass Rückschlüsse auf relevante Zielkriterien (z. B. Gebrauchstauglichkeit, Motivation, psychologische Reichweitenschwellen, Energieverbrauch) gezogen werden können.

Systemarchitektur

In diesem Kapitel wird exemplarisch die im Rahmen des NuR.E-Projekts entwickelte Systemarchitektur beschrieben. Je nach Anforderungen an das System, kann sich jedoch auch durchaus eine andere Systemarchitektur besser eignen. Die einzelnen Bausteine der in diesem Projekt umgesetzten Systemarchitektur und die Zusammenhänge zwischen diesen, sind in Abbildung 15 schematisch dargestellt.

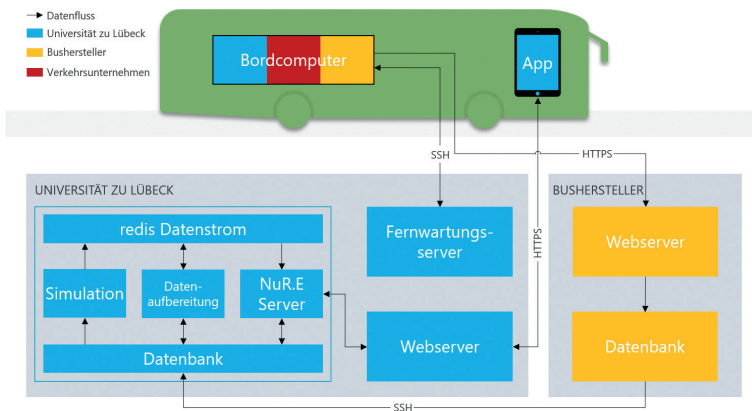


Abbildung 15. NuR.E Systemarchitektur

Nicht alle dargestellten Komponenten sind für eine korrekte Funktionsweise des Demonstratorsystems notwendig. Der Fernwartungs-server ist speziell auf den Bordcomputer abgestimmt und dient nur zur Fehleranalyse bei Problemen mit der Datenübertragung zwischen dem Bus und

der Datenbank des Busherstellers. Aus Sicherheitsgründen ist diese Funktionalität vom Rest des NuR.E-System abgekapselt.

Auch die Daten-Simulation ist keine essentielle Komponente des Systems. Sie unterstützt ausschließlich die Entwicklung des Systems, indem beispielsweise bestimmte Szenarien oder Fahrmanöver gezielt getestet werden können. Dies hat sich während der Entwicklung als enorm hilfreich erwiesen.

In den folgenden Unterkapiteln werden einzelne Komponenten der Systems näher beschrieben und wesentliche Konzepte erklärt. Zudem werden mögliche alternative Herangehensweisen kurz diskutiert.

Anzeigetablet

Als Anzeigegerät wurde im NuR.E Projekt ein iPad Mini gewählt. Das Tablet erfüllt alle oben beschriebenen Anforderungen an Displaygröße, Pixeldichte, Helligkeit und Kontrast. Weiterhin bietet Apple mit dem Supervised Mode einen sehr umfangreichen Kiosk-Modus: Schaltet man diesen Modus über die Apple Entwickler- und Management-Tools frei, stehen umfangreiche administrative Funktionen zur Verfügung. Der Single App Mode erlaubt es beispielsweise, eine App auszuwählen, die permanent geöffnet bleibt. Der Benutzer hat in diesem Modus keinerlei Möglichkeiten, die zuvor festgelegte App zu schließen. Zudem bietet der Single App Mode den Vorteil, dass auch nach einem Neustart des Gerätes sofort wieder die zuvor festgelegte App automatisch geöffnet wird. Der Single App Mode funktioniert nur mit Standalone-Applikationen. Es gibt jedoch eine ganze Reihe an Apps, die in einem integrierten Browser eine zuvor festgelegte Website anzeigen können. Eine solche App in Kombination mit dem Single App Mode bietet so die vielversprechendste Lösung. Als problematisch erwiesen sich jedoch die Updates von Apple, die regelmäßig zu Problemen mit dem Single App Mode geführt haben. Daher sollten automatische Updates auf dem Gerät deaktiviert werden.

Auf Android sind derartige Lösungen (zum Zeitpunkt dieses Projektes) leider nicht, beziehungsweise nur in einer eingeschränkten Form, verfügbar.

Im Praxistest hat sich ein iPad Mini im Single App Mode in Kombination mit der App Kiosk Pro Plus als eine für das NuR.E-System geeignete Grundlage erwiesen. Diese bietet umfangreiche Konfigurationsmöglichkeiten und auch eine JavaScript-API, mit der auch der Zugriff auf verschiedene Geräte-Funktionalitäten möglich ist. So können über die API beispielsweise verschiedene Sensordaten ausgelesen werden.

Client-Server-Architektur

Dieses Kapitel beschreibt die wesentlichen Konzepte und Ideen der Client-Server-Architektur sowie die verwendeten Programmiersprachen. Dabei wird auch auf deren Vor- und Nachteile eingegangen, sowie mögliche Alternativen diskutiert.

Frameworks und Programmiersprachen

Die erste Version der Client App wurde mit purem JavaScript, HTML und CSS geschrieben. Es kam kein Framework zum Einsatz. Dadurch konnten zwar recht schnell gute Ergebnisse erzielt werden, die Wartbarkeit und die Erweiterbarkeit waren jedoch nur bedingt gegeben. Für den Node-Server als Backend verhielt es sich ähnlich.

In einer zweiten Iteration wurden dahingehend größere Änderungen vorgenommen. Der Node-Server stellt keine klassische REST-API zur Verfügung, sondern setzt auf die noch relativ neue GraphQL-Technologie. Bei einer GraphQL-API erhält der Client mehr Kontrolle über seine API-Requests. Die API wurde mit Apollo-Framework umgesetzt. Apollo stellt zudem automatisch einen GraphQL-Playground zur Verfügung, mit dem die Schnittstelle auf einfache Art und Weise und ohne externe Tools getestet werden kann.

Für die Client-App wird das JavaScript-Framework Vue.js genutzt. Alternativ wären auch andere JS-Frameworks, wie zum Beispiel React oder Angular denkbar gewesen. Vue.js zeichnet sich aber vor allem durch eine schnelle Erlernbarkeit aus und bietet so einen einfacheren Einstieg für noch wenig erfahrene Entwickler.

Die Verwendung eines Frameworks hat zudem das gleichzeitige Arbeiten an mehreren Interface-Prototypen deutlich vereinfacht.

Implementierung

Für den Einsatz im Bus wird ein iPad Mini genutzt, welches mit einer speziellen Halterung fest im Bus installiert ist und über den Bus durchgehend mit Strom versorgt wird. Der Anwendungsserver ist mit Node.js implementiert und stellt eine GraphQL-API nach außen zur Verfügung. Neben regulären HTTP-Requests ist auch eine Kommunikation über einen Websocket möglich. Dadurch können Nachrichten ohne die durch ein Polling entstehende Verzögerung direkt vom Server an den Client gesendet werden. Dies ist vor allem dann sinnvoll und auch notwendig, wenn die Client-App auf Echtzeitdaten angewiesen ist.

Durch die strikte Trennung von Client und Server kann die GraphQL-API natürlich auch ohne Probleme in Kombination mit einer anderen, selbst entwickelten, Client-App genutzt werden.

Der Node-Server erhält die Fahrdaten der Busse über eine Redis-Instanz. Für jeden Bus existiert ein separates *Topic*, in welchem die Fahrdaten gepublisht werden. Über die GraphQL-API kann jeder Client dann entsprechend das für ihn relevante *Topic* subscriben. Durch die Nutzung von Redis spielt die Herkunft der Daten keine Rolle, es muss nur sichergestellt werden, dass die Fahrdaten in einem bestimmten Format im entsprechenden Topic gepublisht werden. In diesem konkreten Anwendungsfall werden die Fahrdaten vom Bus an den Hersteller gesendet und dort in einer MySQL-Datenbank gespeichert. Diese Datenbank wird auf einen Server der Universität zu Lübeck gespiegelt. Zusätzlich läuft ein Node-Script, welches ankommende Daten aufbereitet und schlussendlich im Redis-Topic veröffentlicht und so dem NuR.E-Anwendungsserver zur Verfügung stellt. Für die Nutzung des Codes muss dementsprechend möglicherweise zunächst ein Skript geschrieben werden, welches die Fahrdaten über Redis dem NuR.E-Anwendungsserver zur Verfügung stellt. Redis dient somit als Brücke zwischen dem Anwendungsserver und den Datenquellen. Auch die Simulation ist im Wesentlichen nur eine

weitere Datenquelle und published die Fahrdaten im entsprechenden Topic.

Datenbankarchitektur

Auf dem MySQL-Server liegen drei Datenbanken: *vehicleData*, *processedVehicleData* und *nureData*. Die *vehicleData*-Datenbank bildet das Gegenstück zur Datenbank des Buserstellers. Alle Fahrdaten werden automatisch in diese Datenbank übertragen. Die Daten werden bereinigt, aufbereitet und anschließend in der *processedVehicleData*-Datenbank gespeichert. Diese beiden Datenbanken sind ausschließlich für die Datenübertragung notwendig und werden gegebenenfalls nicht benötigt, sofern die Daten auf eine andere Art und Weise übertragen werden. Die hier zum Einsatz kommende Art der Datenübertragung ist in keinster Weise optimal. Durch die IT-Infrastruktur des Buserstellers gab es jedoch keine umsetzbaren Alternativen.

Viel wichtiger für das NuR.E-System ist die *nureData*-Datenbank. In dieser werden systemrelevante Daten abgelegt. Dazu zählen unter anderem Benutzerdaten, von dem Fahrpersonal über das Tablet abgegebenes Feedback und vom Tablet aufgezeichneten Sensordaten.

Anhang

I. Einrichtung & Installation

Dieses Kapitel enthält eine Schritt-für-Schritt Anleitung zur Nutzung des im Rahmen des Projekts entwickelten Demonstratorsystems. Je nach Art der Datenübertragung sind unter Umständen umfassende Erweiterungen des Programmcodes für die Inbetriebnahme notwendig.

What's in the Package?

Die ZIP-Datei enthält neben dem Code des NuR.E-Systems auch verschiedene Konfigurationsdateien. Diese müssen nicht zwingend genutzt werden, können aber als Orientierung dienen. Zusätzlich liegt eine .sql-Datei bei, welche das für das Demonstratorsystem genutzte Datenbankschema widerspiegelt. Das Datenbankschema ist sehr konkret auf das Demonstratorsystem und die Art und Weise der Datenübertragung zugeschnitten und muss angepasst werden.

Das ZIP-Archiv enthält die folgenden Ordner:

client-app

Enthält den Source Code der Client-App. Um mit diesem arbeiten zu können, müssen zunächst mit dem Befehl *npm install* alle Abhängigkeiten installiert werden. Anschließend kann mit dem Befehl *npm run build* ein dist-Verzeichnis erzeugt werden, welches dann auf den Webserver kopiert werden kann.

server

Enthält sowohl den Source Code für die GraphQL-API als auch für die Datenaufbereitung:

- cockpit-server
- lean-data-processing-service

Auch hier müssen jeweils mit *npm install* zunächst die notwendigen Abhängigkeiten installiert und der Code mit *npm run build* kompiliert werden.

configs

Enthält die folgenden Konfigurationsdateien und Vorlagen:

- nginxConfig
Enthält eine beispielhafte NGINX-Konfiguration. Um diese zu nutzen, müssen der *server_name* geändert und ein SSL-Zertifikat hinzugefügt werden.
- exampleKioskSettings.xml
Konfigurationsdatei für die Kiosk Pro App. Dient nur als Vorlage, eine genaue Anleitung zur Nutzung ist dem Kapitel *Tablet-Konfiguration* zu entnehmen.
- datenbank_schema.sql
SQL-Datei die automatisch alle relevanten Tabellen erzeugt. Je nach vorhandenen Daten-Kanälen müssen die Tabellen noch angepasst werden.

Hardwareanforderungen

In erster Linie wird ein iPad Mini benötigt. Das entwickelte Interface ist für dieses Gerät optimiert und funktioniert auf anderen Geräten unter Umständen nur eingeschränkt. Sollte also ein anderes Gerät genutzt werden, sind gegebenenfalls noch Änderungen am Code der Client-App

notwendig. Für die Installation im Bus ist zudem eine entsprechende Halterung notwendig, mit welcher das Tablet so im Bus positioniert werden kann, sodass es die Sicht des Fahrpersonals nicht behindert, aber dennoch einfach zu betrachten und zu bedienen ist. Bestenfalls ist die Halterung auch diebstahlsicher. Das iPad benötigt natürlich auch eine Internetverbindung. Sollte dies nicht über einen bereits im Bus vorhandenen WLAN-Hotspot möglich sein, muss das iPad zusätzlich mit einer SIM-Karte mit ausreichend Datenvolumen ausgestattet werden. Neben einer Internetverbindung ist auch eine durchgehende Stromversorgung notwendig.

Zusätzlich zu dem iPad ist auch ein Server für die Datenbank und den Anwendungsserver notwendig. Je nach Anzahl der Busse sind die Hardwareanforderungen an diesen unterschiedlich hoch. Für den Testbetrieb mit einem einzelnen Bus wurde ein v-Server mit 1GB Ram sowie einer Intel Xeon E5420-CPU mit einer Taktung von 2,5 GHz genutzt. Dieser Server war im Schnitt zu etwa 2% ausgelastet.

Einrichtung des Servers & Softwareinstallation

Für den Server empfiehlt sich die Nutzung eines Debian-Derivates, wie z. B. Ubuntu, als Betriebssystem. Das System wurde ausschließlich auf einem Ubuntu-Server getestet. Auf anderen Betriebssystemen sind gegebenenfalls Änderungen notwendig.

Auf einem frischen Ubuntu-Server müssen zunächst die folgenden Pakete installiert werden:

- MySQL Server
- Node.js
- Redis
- PM2 (optional)
- Webserver (z. B. NGINX)

Für alle diese Pakete findet sich eine Vielzahl an Installationsanleitungen im Internet. Das Paket PM2 ist optional und sorgt dafür, dass das NuR.E-System nach jedem Server-Neustart automatisch wieder gestar-

tet wird. Dies kann jedoch auch anders gelöst werden. Auch muss nicht zwingend NGINX verwendet werden, es eignen sich durchaus auch Alternativen wie beispielsweise Apache. Für NGINX liegt jedoch eine Beispielkonfiguration bei.

Nach der grundlegenden Einrichtung müssen sowohl Server- als auch Client-Code auf den Server kopiert werden. Anschließend im Server-Verzeichnis mit dem Befehl *npm install* alle notwendigen Abhängigkeiten installieren.

Datenbank-Konfiguration

Die Konfiguration der Datenbank hängt vor allem davon ab, wie die Fahrdaten der Busse in das System gelangen. Das ist vorrangig vom Hersteller des Busses anhängig. Im Falle des entwickelten Demonstratorsystems werden die Fahrdaten zunächst an der Hersteller gesendet und dort in einer MySQL-Datenbank abgelegt. Das Übertragen der Daten von dort ans das NuR.E-System gestaltete sich aufgrund der IT-Infrastruktur des Busherstellers erstmal schwierig. Als einzig mögliche Lösung mussten die Daten mit Hilfe der MySQL Federated Storage Engine¹⁴ übertragen werden. Der große Vorteil dieser Methode besteht darin, dass keine Eingriffe in die IT-Infrastruktur des Herstellers erforderlich sind und nur minimale Änderungen der Datenbank notwendig sind. Es müssen lediglich neue Tabellen angelegt werden, welche die Federated Storage Engine nutzen. Sieht das Datenbankschema für jeden Bus eine Tabelle vor, muss entsprechend für jeden Bus eine weitere Tabelle angelegt werden. Dies war hier der Fall. Über MySQL-Trigger werden die Daten dann, sobald sie vom Bus gesendet und in der jeweiligen Tabelle abgelegt wurden, automatisch in die entsprechende Federated-Tabelle kopiert.

Für jede Federated-Tabelle in der Datenbank des Herstellers, muss dann eine Zieltabelle mit dem gleichen Schema in der NuR.E-Datenbank existieren. Über die Federated Storage Engine werden die Daten vollautomatisch in diese übertragen. Die Tabellen in der NuR.E-Datenbank dür-

14 Für weitere Informationen siehe: <https://dev.mysql.com/doc/refman/8.0/en/federated-storage-engine.html> (abgerufen am 19.12.2019)

fen dabei nicht die Federated Storage Engine nutzen, es können dementsprechend ganz reguläre InnoDB- oder MyISAM-Tabellen dafür erstellt werden. Werden die Rohdaten anschließend nicht mehr benötigt, kann auch die Blackhole-Engine genutzt werden. Dann werden die Daten nicht gespeichert, sondern nur ins Binary Log geschrieben. Dies spart Platz und benötigt weniger CPU-Leistung. Damit der Node-Server neue Datenpunkte möglichst verzögerungsfrei bekommt, gibt es im wesentlichen zwei Möglichkeiten. Zum einen kann über ein Polling der entsprechenden Tabellen herausgefunden werden, ob ein neuer Datensatz hinzugekommen ist. Diese Methode ist jedoch, was die benötigte Rechenleistung angeht, relativ aufwendig. Zudem entsteht dadurch eine zusätzliche Latenz. Eine bessere Variante ist das *Binary Log*. Das Binary Log schreibt jede auftretende Änderung in der Datenbank oder in spezifizierten Tabellen in eine Textdatei. Der Node-Server kann auf dieses Binary Log dann einen *Listener* setzen, der über alle Änderungen automatisch und ohne große Verzögerung informiert wird. Das Binary Log muss zunächst in der MySQL-Konfigurationsdatei aktiviert werden. Es empfiehlt sich zudem, nur die relevanten Tabellen auch zu loggen, um unnötige Last auf den MySQL-Server zu vermeiden.

Diese Lösung funktioniert grundlegend sehr gut. Für den Betrieb von Systemen mit Echtzeit-Daten sollte und muss die Datenübertragung aufgrund der so entstehenden Latenz jedoch anders gelöst werden. Wie bereits angesprochen kann das beste Ergebnis erzielt werden, wenn die Daten vom Bus direkt an einen Endpoint des NuR.E-System gesendet werden, von dem aus die Daten dann weiterverarbeitet werden können.

Neben der speziell für die Datenübertragung notwendigen Konfiguration, sind bei einer erstmaligen Einrichtung eines MySQL-Servers die Einstellungen auf die Hardware anzupassen. Außerdem muss für das NuR.E-System ein Benutzerkonto mit Lese- und Schreibrechten für sämtliche genutzten Datenbanken eingerichtet werden.

Anbindung anderer Datenquellen

Das NuR.E-System ist darauf ausgelegt, auch mit anderen Datenquellen arbeiten zu können. Bei der Anbindung neuer Datenquellen müssen je-

doch einige Dinge beachtet werden. Zunächst müssen die Daten in das System gelangen. Dazu kann beispielsweise ein Service entwickelt werden, der nur die Daten annimmt und aufbereitet und anschließend über Redis dem NuR.E-System zur Verfügung stellt. Durch die Nutzung von Redis spielt es keine Rolle, mit welchen Programmiersprachen dieser Service entwickelt wird, solange ein Redis-Client¹⁵ für die gewählte Programmiersprache verfügbar ist.

Nachdem der Service die Daten angenommen hat, müssen die Datenkanäle gemappt werden. Für eine korrekte Funktionsweise des Systems werden die folgenden Datenkanäle benötigt:

- QRemain_Ah (Batterieladestand in Ah)
- UInvL_V (Spannung linke Batterien in V)
- UInvR_V (Spannung rechte Batterien in V)
- PMot_kw (Motorleistung in kW)
- STravel_km (Zurückgelegte Strecke in km)

Die Fahrdaten müssen dann in Form eines JSON-Strings über Redis im Topic „vehicleData“ gepublished werden. Das JSON-Objekt hat zwei Felder. Das Feld „tablename“ enthält die ID des Busses, das Feld „data“ die eigentlichen Fahrdaten.

Tablet-Konfiguration

Bei der Konfiguration des Tablets müssen einige Dinge beachtet werden. So muss sichergestellt werden, dass auch nach einem Neustart des Tablets automatisch der Browser mit der entsprechenden URL geöffnet wird. Ein Neustart kann zum Beispiel dann auftreten, wenn der Akku über Nacht leerläuft. Weiterhin sollten alle Hardware-Tasten deaktiviert und die Nutzung auf den Browser mit der entsprechenden Webseite limitiert werden. Um dies zu realisieren gibt es viele verschiedene Möglichkeiten. Die besten Ergebnisse liefert eine Kombination aus dem *Single App Mode* und der *Kiosk Pro Plus*-App. Daher werden an dieser Stelle die für eine

15 Liste verfügbarer Redis-Clients: <https://redis.io/clients> (abgerufen am 19.12.2019)

korrekte Konfiguration des Single App Mode und der Kiosk Pro Plus App notwendigen Schritte beschrieben.

Für die Konfiguration des Single App Mode ist ein MAC sowie die kostenlose Software *Apple Configurator 2* notwendig. Für die korrekte Konfiguration des Single App Mode müssen folgende Schritte befolgt werden:

1. iPad über USB mit dem MAC verbinden
2. Im Apple Configurator mit der rechten Maustaste auf das iPad klicken und „Prepare“ auswählen
3. „Manual Configuration“ und „Supervise Devices“ auswählen und den Anweisungen folgen
4. In den iPad-Einstellungen den Sperrbildschirm deaktivieren
5. Im Apple Configurator mit der rechten Maustaste auf das iPad klicken und „Advanced -> Start Single App Mode“ auswählen
6. Kiosk Pro Plus auswählen und anschließend auf „Options“ klicken
7. Motion, Volume Buttons, Side Switch, Sleep/Wake Button und Auto Lock deaktivieren
8. Kiosk Pro Plus konfigurieren

Für die Basiskonfiguration kann die beiliegende Konfigurationsdatei genutzt werden. Diese muss auf einem Webserver abgelegt werden. Anschließend muss in den *Kiosk Pro Settings* die Option „Remote Settings Control“ aktiviert und konfiguriert werden¹⁶. Nachdem die Kiosk Pro Settings mit dem Server synchronisiert wurden, muss die Option vorerst wieder deaktiviert werden. Nun können die Kiosk Pro Settings so angepasst werden, wie sie benötigt werden.

Im folgenden sind alle relevanten Einstellungen, welche modifiziert werden müssen, aufgelistet:

- UniqueiPadID
Wird zur Identifizierung des Busses genutzt

16 Für weitere Informationen siehe: <https://docs.kioskproapp.com/article/747-remote-settings-control> (abgerufen am 19.12.2019)

- settingsPassCode
- homePage
Hat die Form `https://example.com?id=username&token=password`
- externalSettingsFile
Hat die Form `https://example.com/kiosk_settings/$UniqueiPadID$.xml?token=password`

Ist die Konfiguration abgeschlossen, können die Einstellungen exportiert werden. Die so entstehende XML-Datei kann die auf dem Webserver liegende Datei ersetzen. Zum Schluss kann die Option „Remote Settings Control“ wieder aktiviert werden. Dadurch können Änderungen an der Konfiguration auch aus der Ferne aufgespielt werden. Wichtig ist, dass Änderungen an der Konfiguration nun nur noch über die auf einem Webserver liegende XML-Datei möglich sind. In der App vorgenommenen Änderungen werden vom Server wieder überschrieben, sofern die Option Remote Settings Control aktiviert ist. Der Name der XML-Datei sollte der UniqueiPadID entsprechen.

Verknüpfung aller Komponenten

Um die einzelnen Komponenten miteinander zu verknüpfen, müssen entsprechend alle IPs/URLs und Zugangsdaten angepasst werden. In der folgenden Liste sind alle notwendigen Anpassungen aufgelistet.

- Sowohl im cockpit-server als auch im data-processing-service befinden sich config-Verzeichnisse mit Konfigurationsdateien. Hier müssen die Zugangsdaten zur Datenbank eingetragen werden.
- Im lean-cockpit-Verzeichnis muss in den .env-Dateien die IP/URL der GraphQL-API eingetragen werden. Sollte die Client App nicht im root-Verzeichnis liegen, muss gegebenenfalls noch die PUBLIC_PATH-Variable angepasst werden. Ist die App unter `www.example.com/nure` erreichbar, muss PUBLIC_PATH den Wert `„/nure“` haben.
- Die Authentifizierung des Clients läuft über einen Query-String in der URL. Wird die App mit der URL `www.example.com?id=`

user&token=password aufgerufen, werden die Werte „user“ und „password“ zur Authentifizierung genutzt. Dementsprechend muss dafür auch ein entsprechender Eintrag in der „Users“-Tabelle vorhanden sein. Das Passwort muss dabei als md5-Hash gespeichert werden. Auch die ID des Busses muss im Query-String mit Parameter „busId“ angegeben werden. Die URL mit allen Query-Parametern kann in der Kiosk Pro App als „Homepage“ eingetragen werden.

Live-Betrieb

Für den Live-Betrieb müssen zunächst alle relevanten Services gestartet werden. Dies beinhaltet den MySQL-Server, Redis, den data-processing-Service sowie den NuR.E-Anwendungsserver. Zusätzlich muss sichergestellt sein, dass sowohl Server als auch Client von außen über den Webserver erreichbar sind. Nach dem erfolgreichen Starten aller Services kann auf dem Tablet das NuR.E-System aufgerufen werden. In einem ersten Schritt muss die zu fahrende Umlaufstrecke in Kilometern angegeben werden. Anschließend ist das Assistenzsystem einsatzbereit. Das Fahrpersonal wird automatisch zu Beginn der Fahrt aufgefordert, die Umlaufstrecke erneut einzugeben.

II. Weiterführende Informationen

Verbrauchswertberechnung

Grundsätzlich lässt sich der Verbrauch eines Fahrzeugs auf zwei Arten darstellen: in Form eines Momentanverbrauchs oder eines Durchschnittsverbrauchs über einer Referenzperiode. Der Momentanverbrauch gibt eine direkte Rückmeldung zum Verbrauch in diesem Moment, also der vom Motor gelieferten elektrische Leistung zum Zeitpunkt der Messung. Der Wert zeigt maximal transparent, was in diesem Moment ‚verbraucht‘ wird. Es ist aber auch stark volatil (bei der Beschleunigung ist der Wert sehr hoch, beim Rekuperieren sogar negativ, da Energie generiert wird) und es lassen sich nur indirekt Rückschlüsse auf den durchschnittlichen Verbrauch des Fahrzeugs ziehen.

Aus diesem Grund wird in den meisten Fahrzeugen ein Durchschnittsverbrauch über einer Referenzperiode angegeben. Statt einer Momentbetrachtung wird eine Referenzperiode herangezogen – die letzten 5 Kilometer, die letzten 10 Minuten, die letzte Fahrt auf dieser Strecke – und die dort verbrauchte Energie als Durchschnittsverbrauch angezeigt.

Neben diesen beiden Methoden kann auch eine dritte Möglichkeit genutzt werden: eine Verbrauchsprognose basierend auf dem geplanten Streckenprofil und äußeren Einflüssen. Im Gegensatz zu dem Momentanverbrauch (gegenwärtige Daten) und dem Durchschnittsverbrauch über eine Referenzperiode (vergangene Daten) wird hierbei versucht, zu erwartende Einflüsse einzubeziehen und daraus einen Verbrauch abzuleiten. Im Gegensatz zum Individualverkehr bietet der ÖPNV hier klare Vorteile, da die geplante Strecke genau bekannt ist und auch Umwelteinflüsse (Verkehr, Fahrgastaufkommen, etc.) durch Erfahrungswerte besser eingeschätzt werden können.

Für Verbrauchswerte, sowohl ein Momentanverbrauch zu einem Zeitpunkt X als auch ein Durchschnittsverbrauch über eine Referenzperiode, gibt es verschiedene Berechnungswege. Um konsistente Ergebnisse und Vergleichswerte zu erhalten, sollte frühzeitig eine Variante definiert für die Realisierung von Assistenzsystemen definiert werden. Im Folgenden werden drei Varianten vorgestellt.

Verbrauch über Akkuladung

Eine Möglichkeit der Verbrauchsberechnung ist, die Differenz der Akkuladung zwischen zwei Zeitpunkten zu bestimmen und in das Verhältnis zur zurückgelegten Strecke zu setzen. Beispiel: bei Zeitpunkt A liegt eine Restakkukapazität von 100 kWh vor. Eine Stunde später (Zeitpunkt B) verbleiben noch 80 kWh und es wurden 50 km zurückgelegt. Der Verbrauch beträgt somit 20 kWh auf 50 km, also 0,4 kWh/km. Ein Momentanverbrauch könnte über eine kürzere Referenzperiode extrapoliert werden, z. B. eine Minute.

Verbrauch über Leistung & Distanz

Eine zweite Möglichkeit bietet die am Motor anliegende Leistung. Sie kann über einen Zeitraum hinweg summiert werden und ergibt so einen Verbrauch über diesen Zeitraum.

Verbrauch über Leistung & Geschwindigkeit

Ein direkterer Ansatz ergibt sich durch die Hochrechnung der Leistung. Hierbei wird nicht die Vergangenheit betrachtet (zum Beispiel der letzte Kilometer), sondern die aktuell anliegende Leistung hochgerechnet. Die Leistung an den beiden letzten Datenpunkten wird wieder gemittelt und mit der Dauer des Datenpunktes multipliziert. Die resultierenden kWh werden durch die zurückgelegte Distanz (in Kilometern) dividiert und somit auf einen Kilometer normiert (kWh/km).

Diese Zahl ist stark schwankend, da jeder Beschleunigungs- oder Rekuperationsvorgang direkt abgebildet wird.

Beispiele für Nutzerstudien

Anforderungsanalyse: Qualitative Interviewstudie + Fragebogen

Zur Analyse wie die Reichweiteninteraktion im Elektrobus stattfindet, also wie die Reichweite bewertet und gesteigert wird und welche Einflüsse dies erschweren bzw. unterstützen können, wurde eine Interviewstudie mit 10 Busfahrer:innen (2 weiblich; Alter: $M = 48.4$; $SD = 10.8$) mit Elektrobus Erfahrung (Fahrstunden: $M = 14.6$; $SD = 8.8$) durchgeführt. Die Interviewstudie dauerte insgesamt ca. 20 Minuten und beinhaltete sowohl Interviewfragen als auch quantitative Fragen auf einem Fragebogen. Die Fragen des Interviews zielten auf die Schwierigkeiten in der Abschätzung der Reichweite, die Kommunikation mit der Leitstelle, die gewünschten Informationen und die Strategien/Barrieren der Reichweitensteigerung ab. Im Fragebogen wurde neben demographischen Daten auch abgefragt zu welchen Dienstzeitpunkten (z. B. Dienstbeginn, bei Wendepausen) am meisten Zeit und am meisten Bedarf für Reichweiteninformationen besteht. Außerdem wurde eine Skala zur Eco-Driving

Motivation abgefragt. Die Teilnehmer:innen erhielten zu einem späteren Zeitpunkt einen weiteren Fragebogen (ca. 10 Minuten), in dem die *subjective range competence*-Skala¹⁷ und die komfortable Reichweite¹⁸ abgefragt wurde. Im Anschluss an die Nutzungskontextanalyse wurde ein erster Prototyp durch ein Video präsentiert und mithilfe von vier Fragen evaluiert (ca. 10 Minuten).

Die quantitativen Daten wurden mit SPSS bereinigt und ausgewertet, die Interviewantworten wurden transkribiert und mit der thematischen Analyse nach Braun und Clarke¹⁹ ausgewertet. Durch die thematische Analyse werden angesprochene Themen kodiert, zusammengefasst und als Struktur angeordnet. Die finale Struktur ist in Abbildung 16 zu sehen.

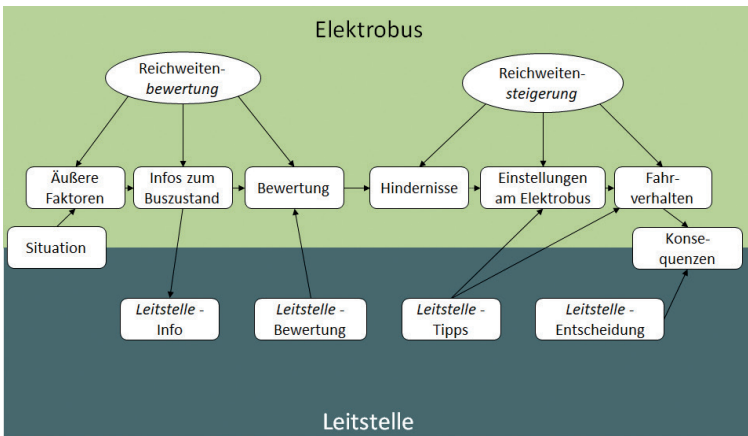


Abbildung 16. Themen der Reichweiteninteraktion im Elektrobus im ÖPNV

- 17 Franke, T., & Krems, J. F. (2013). Interacting with limited mobility resources: Psychological range levels in electric vehicle use. *Transportation Research Part A*, 48, 109–122.
- 18 Franke, T., Günther, M., Trantow, M., Rauh, N., & Krems, J. F. (2015). Range comfort zone of electric vehicle users – concept and assessment. *IET Intelligent Transport Systems*, 9(7), 740–745.
- 19 Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101.

Die Bewertung der Reichweite wird durch äußere Faktoren wie Fahrgastaufkommen oder dem Wetter erschwert. Andererseits werden Informationen zum Buszustand (z. B. Ladestand) als hilfreich empfunden und für die Bewertung herangezogen. Eine Reichweitensteigerung wird aus Sicht eines Teils des Fahrpersonals durch Hindernisse wie der Verkehrssituation erschwert. Die Reichweite kann sowohl durch Einstellungen am Elektrobuss (Nebenverbraucher) als auch durch das Ändern des Fahrverhaltens gesteigert werden. Der gesamte Interaktionsprozess wird durch die Kommunikation mit der Leitstelle begleitet. Daneben gibt es noch einige Besonderheiten, die die Reichweiteninteraktion im ÖPNV charakterisieren. Zum einen wird der Elektrobuss an einem Tag von drei Fahrer:innen gefahren, die sich die Batterieladung, durch die abwechselnde, gemeinsame Nutzung, teilen und somit die nachfolgenden Fahrer von den vorherigen abhängig sind. Außerdem gaben manche Fahrer:innen an, dass im ÖPNV kaum Steigerungspotential vorhanden ist, da bereits sparsam gefahren wird, und die Fahrer nichts weiter an dem Fahrverhalten ändern können.

Das Fahrpersonal gab an, dass sie die meiste Zeit für Informationen zur Reichweite zum Dienstbeginn ($M = 5:30$ min; $SD = 1:06$ min) und während der Wendepausen ($M = 2:12$ min; $SD = 1:06$ min) haben. Der meiste Bedarf (Skala: 1 = „gar kein Bedarf“ bis 4 = „hoher Bedarf“) bestehe aber während der Ablösung eines Kollegen ($M = 3,3$; $SD = 1,1$), zum Dienstbeginn ($M = 3,2$; $SD = 1,1$) und während der Wendepausen ($M = 2,9$; $SD = 0,9$). Wenn die aktuelle Reichweitenanzeige 100 km Restreichweite anzeigen würden, würde das Fahrpersonal mit gutem Gefühl noch $M = 70,5$ km ($SD = 9,6$) fahren (ComfDist100). Bei einer angezeigten Restreichweite von 50 km noch $M = 27,0$ km ($SD = 5,4$; ComfDist50).

Bei der subjective-range-competence Skala (SRC) wurde durchschnittlich ein Skalenwert von $M = 3,6$ ($SD = 0,6$) erreicht. In den Zusammenhangsmaßen der Variablen erreichte nur der Zusammenhang zwischen ComfDist50 und der bisherigen Linienbuserfahrung das Signifikanzniveau ($r = -.70$; $p < .05$) und der Zusammenhang von Motivation und ComfDist100 ($r = .76$; $p < .05$). Der Zusammenhang zwischen ComfDist100 und der SRC verfehlt das Signifikanzniveau knapp ($r = .56$; $p = .09$) und könnte möglicherweise bei einer größeren Stichprobe signifikant werden.

Die Ergebnisse deuten auf ein großes Unterstützungspotential durch nutzerzentrierte Systeme hin. Die komfortable Reichweite von ca. 70 km (von 100 km) zeigt wie groß der Sicherheitspuffer sein müsste, bevor das Fahrpersonal ein zusätzlichen Belastungsfaktor im Alltag erfahren würden. Die Themen der Reichweiteninteraktion (Abbildung 16) sollten bei der Einführung eines Systems unbedingt mitbetrachtet werden.

Evaluation von Systemkomponenten – Online-Experiment

Primäres Ziel dieser Evaluation ist die Beantwortung der Forschungsfrage: „Inwieweit kann das Vertrauen in die Reichweitenangabe durch Transparenz und Anpassbarkeit der Berechnung der Reichweitendarstellung erhöht werden?“ Für die Evaluation lassen sich zwei Hypothesen ableiten:

1. Eine transparente Darstellung der Reichweitenberechnung hat im Vergleich zu einer Reichweitenangabe, deren Herleitung nicht erkenntlich ist, einen signifikanten positiven Effekt auf das subjektive Vertrauen in die Reichweitenangabe und die komfortable Reichweite.
2. Die Möglichkeit, die Reichweitenberechnung zu anzupassen, hat im Vergleich zu einer Reichweitenangabe, die nicht angepasst werden kann, einen signifikanten positiven Effekt auf das subjektive Vertrauen in die Reichweitenangabe und die komfortable Reichweite.

Die Studie wurde als Teil einer umfassenderen Online-Evaluation im Rahmen des Forschungsprojekts NuR.E in Form eines Fragebogens konzipiert. Vier kurze Videos ergänzen die textuellen Fragen und stellen Konzepte sowie den Kontext der Studie animiert dar. Die Zielgruppe der Befragung sind Elektroautofahrer (BEV); auf eine Evaluation mit Elektrobushfahrer:innen musste zeitlich und organisatorisch bedingt verzichtet werden.

Zur Akquise wurden fünf Facebookgruppen und fünf Foren mit Bezug zur Elektromobilität herangezogen, in denen ein Einladungstext und der Link zur Online-Evaluation gepostet wurden. Die Facebook-Beiträge

wurden um ein Logo ergänzt. Dadurch sollte die Sichtbarkeit des Beitrags und damit die Zahl der Leser erhöht werden.

Der A/B-Test bestand aus drei Varianten, die im Within-Subject-Design (Messwiederholungsdesign) getestet wurden. Um Reihenfolgeeffekte zu minimieren, wurden die Varianten randomisiert präsentiert. Anzeige A war eine numerische Angabe der Reichweite ohne weitere Informationen. Anzeige B enthielt Zusatzinformationen zur Reichweitenberechnung, welche die Reichweitenangabe transparenter gestaltete. Anzeige C bot schließlich die Möglichkeit, Einfluss auf die Berechnung zu nehmen und den Referenzverbrauch selbst zu wählen. Alle drei Anzeigenkonzepte wurden zunächst in jeweils einem Video erläutert. Anschließend wurden die abhängigen Variablen *Vertrauen* und *komfortable Reichweite* mittels 5 bzw. 2 Items erfasst, die bereits in einer anderen Studie in diesem Kontext eingesetzt wurden.

Die Ergebnisse des A/B-Tests wurden mittels einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung (repeated-measures ANOVA) in R analysiert. Die Anzeige in ihren drei Varianten bildete dabei den Faktor, der in jeder Messung verändert wurde. Die Signifikanz des Effekts zwischen den Anzeigevarianten wurde mittels Kontrasten bestimmt, um Rückschlüsse auf beide unabhängigen Variablen (UVs) zu erhalten. Eine Aussage über die Effektstärke wurde schließlich durch Pearson's r getroffen.

Ein erster Blick auf die deskriptiven Werte der Vertrauen-Skala zeigte das Bild, welches auch in den Hypothesen formuliert wurde: Das angegebene Systemvertrauen in die Reichweitenangabe war bei einer transparenteren (Anzeige B, $M = 4.05$, $SD = 1.10$) und anpassbaren Reichweitenberechnung (Anzeige C, $M = 4.63$, $SD = 1.04$) höher als bei einer reinen Reichweitenangabe als Zahl (Anzeige A, $M = 3.68$, $SD = 1.13$).

Mauchly's Test gab an, dass die Voraussetzung der Sphärizität verletzt wurde ($\chi^2(94) = .71$, $p < .001$), Greenhouse-Geisser relativierte dies jedoch ($W = .71$, $p < .001$). Die ANOVA zeigte, dass der Effekt signifikant war ($p < .001$), und zwar laut der betrachteten Kontraste sowohl zwischen Anzeige A und B ($p < .001$), Anzeige B und C ($p < .001$) und An-

zeige A und C ($p < .001$). Der Effekt war in beiden Fällen mittel ausgeprägt.

Bei der komfortablen Reichweite schien der Effekt ähnlich stark ausgeprägt wie bezüglich des Systemvertrauens. Die Mittelwerte der Anzeigen A und B wiesen einen geringfügig kleineren Unterschied auf als zwischen Anzeige B und C.

Auch hier zeigte Mauchly's Test eine Verletzung der Sphärizität an ($\chi^2(94) = .55, p < .001$) und Greenhouse-Geisser berichtete ($W = .69, p < .001$). Die ANOVA wies ebenfalls einen signifikanten Effekt aus ($p < .001$), der auch in den beiden Kontrasten zu finden war ($p_{AvsB} < .001; p_{BvsC} < .001$). Pearson's r zufolge war der Effekt stärker ausgeprägt als bei der Vertrauens-Skala ($r = .40$ bzw. $r = .45$), aber immer noch mittel.

III. Tabellen

Tabelle 1: Auflistung der Datenkanäle

#	Kanal	Einheit (ideal)	Relevanz
1	Datum	DD.MM.YYYY	must-have
2	Zeit	HH:MM:SS,ms	must-have
3	Geografische Breite	Dezimalgrad	must-have
4	Geografische Länge	Dezimalgrad	must-have
5	Verbleibende Ladung	Ah	must-have
6	Leistung (am Motor anliegend)	kW	must-have
7	Spannung der Akkus	V	must-have
8	Drehzahl des Motors	rpm	must-have
9	Status der Zündung	codiert	should-have
10	Gaspedalstellung	Prozent	should-have
11	Bremspedalstellung	Prozent	should-have
12	Geschwindigkeit nach GPS-Daten	km/h	good-to-have

13	Fahrtrichtung nach GPS-Daten	Dezimalgrad	good-to-have
14	State of Charge / Akkuladung	Prozent	good-to-have
15	Genutzte Ladung (gesamt)	Ah	good-to-have
16	Generierte Ladung (gesamt)	Ah	good-to-have
17	Geschwindigkeit laut Fahrtenschreiber	km/h	good-to-have
18	Geschwindigkeit laut Tacho	km/h	good-to-have
19	Beschleunigung	m/s	good-to-have
20	Gefahrene Kilometer	Km	good-to-have
21	Verbleibende Reichweite	Km	good-to-have
22	Verbrauch pro Kilometer	kWh/km	good-to-have

Tabelle 2. Indikatoren und Metriken für energieeffizientes Fahren

#	Indikator	Berechnungslogik der Metrik	Erklärung
1	Gesamteffizienz	$\text{zurückgelegte Strecke} \div (\text{Ladestand}_{\text{Start}} - \text{Ladestand}_{\text{Ende}})$	Zeigt das Verhältnis von zurückgelegten Kilometer und der verbrauchten Energie an. Je besser die Energieeffizienz desto größer der Wert.
2	Energieverbrauch	$\Sigma \text{Energieverbrauch pro Datenpunkt} \div \Sigma \text{zurückgelegte Strecke pro Datenpunkt}$	Berechnet den Energieverbrauch. Je höher der Wert desto schlechter die Energieeffizienz.
3	Beschleunigungseffizienz	$\frac{\text{Über alle Beschleunigungen hinweg: } \Sigma \text{ Geschwindigkeitszuwachs}}{\div \Sigma \text{ aufgewendete Leistung}}$	Zeigt das Verhältnis von dem Geschwindigkeitszuwachs und der dafür aufgewendeten Energie an. Je besser die Energieeffizienz, desto höher der Wert.
4	Schwungausnutzung	$\text{Streckenabschnitt ohne Gas- oder Bremspedal} \div \text{Gesamte Strecke}$	Zeigt das Verhältnis der Gesamtstrecke und der Streckenabschnitte, die ohne Benutzung des Gas- oder Bremspedals zurückgelegt wurden, an. Je besser die Energieeffizienz, desto höher der Wert.
5	Bremsen im Rekuperationsbereich	$\text{Streckenabschnitt im Rekuperationsbereich} \div \text{Gesamte Strecke}$	Zeigt das Verhältnis der Gesamtstrecke und der Streckenabschnitte, die im Rekuperationsbereich zurückgelegt wurden, an. Je besser die Energieeffizienz, desto höher der Wert.

#	Indikator	Berechnungslogik der Metrik	Erklärung
6	Beschleunigungsintensität	$(\sum \text{Beschleunigung in m/s}^2) \div \text{Distanz}$	= Seltenes und sanftes Beschleunigen. Zeigt die „Gesamtheit“ der Beschleunigungen an. Dieser Wert ist ein reiner „Verhaltens“-Wert und schließt den Energieverbrauch aus der Berechnung aus. Je besser die Energieeffizienz desto geringer der Wert.
7	Entschleunigungsintensität	$(\sum \text{neg. Beschleunigung in m/s}^2) \div \text{Distanz}$	= Seltenes und sanftes Verzögern. Zeigt die „Gesamtheit“ der Bremsvorgänge an. Dieser Wert ist ein reiner Verhaltens-Wert und schließt den Energieverbrauch aus der Berechnung aus. Je besser die Energieeffizienz desto geringer der Wert.
8	Energieflussintensität	$(\sum \text{Leistung} \times \text{Dauer}) \div \text{Distanz}$	= Vorausschauendes Fahren. Berechnet die Fläche unter der Kurve der am E-Motor anliegenden Leistung (sowohl positiv als auch negativ). Dadurch wird eine ruhige Fahrweise mit wenigen und sanften Be- und Entschleunigungen angezeigt. Je besser die Energieeffizienz desto geringer der Wert.

Literaturverzeichnis

- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative research in psychology*, 3(2), 77–101. doi: 10.1191/1478088706qp0630a
- Franke, T., Görges, D., & Arend, M. G. (2019, September). The Energy Interface Challenge. Towards Designing Effective Energy Efficiency Interfaces for Electric Vehicles. In *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 35–48). doi: 10.1145/3342197.3344526
- Franke, T., Günther, M., Trantow, M., Rauh, N., & Krems, J. F. (2015). Range comfort zone of electric vehicle users—concept and assessment. *IET Intelligent Transport Systems*, 9(7), 740–745. doi: 10.1049/iet-its.2014.0169
- Franke, T., & Krems, J. F. (2013). Interacting with limited mobility resources: Psychological range levels in electric vehicle use. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 48, 109–122. doi: 10.1016/j.tra.2012.10.010
- Franke, T., Neumann, I., Bühler, F., Cocron, P., & Krems, J. F. (2012). Experiencing range in an electric vehicle: Understanding psychological barriers. *Applied Psychology*, 61(3), 368–391. doi: 10.1111/j.1464-0597.2011.00474.x
- Gödker, M., Herrmann, D., & Franke, T. (2018). User perspective on eco-driving HMIs for electric buses in local transport. *Mensch und Computer 2018-Tagungsband*. doi: 10.18420/muc2018-mci-0382
- ISO 9241-210:2010. (2010). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme. (ISO 9241-210:2010). DIN Deutsches Institut Für Normung e.V. doi: 10.1007/soo738-009-0685-2

- Nissan (2018, 22. Juni). Leaf Features. Abgerufen von <https://www.nissanusa.com/vehicles/electric-cars/leaf/features.html> am 22.06.2018.
- Umweltbundesamt (2020, 11. März). Emissionsdaten [Online Artikel]. Abgerufen von https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#verkehrsmittelvergleich_personenverkehr am 03.07.2020.
- VDV (2019, 13. Februar). Zwischenbilanz Elektrobusse im ÖPNV [Online Artikel]. Abgerufen von <https://www.lok-report.de/news/deutschland/verkehr/item/9557-vdv-zwischenbilanz-elektrobusse-im-oepnv.html> am 10.10.2019.
- ViriCiti (2019, 19. Dezember). Dienstleistungen für Elektrofahrzeuge [Website]. Abgerufen von <https://viriciti.com/de/telematics-electric-vehicles/> am 19.12.2019.
- WCAG (2019, 19. Dezember). Erfolgskriterien der Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.0 [Online Artikel]. Abgerufen von <https://www.barrierefreies-webdesign.de/richtlinien/wcag-2.0-erfolgskriterien/kontrast-erhoeht.html> am 19.12.2019.