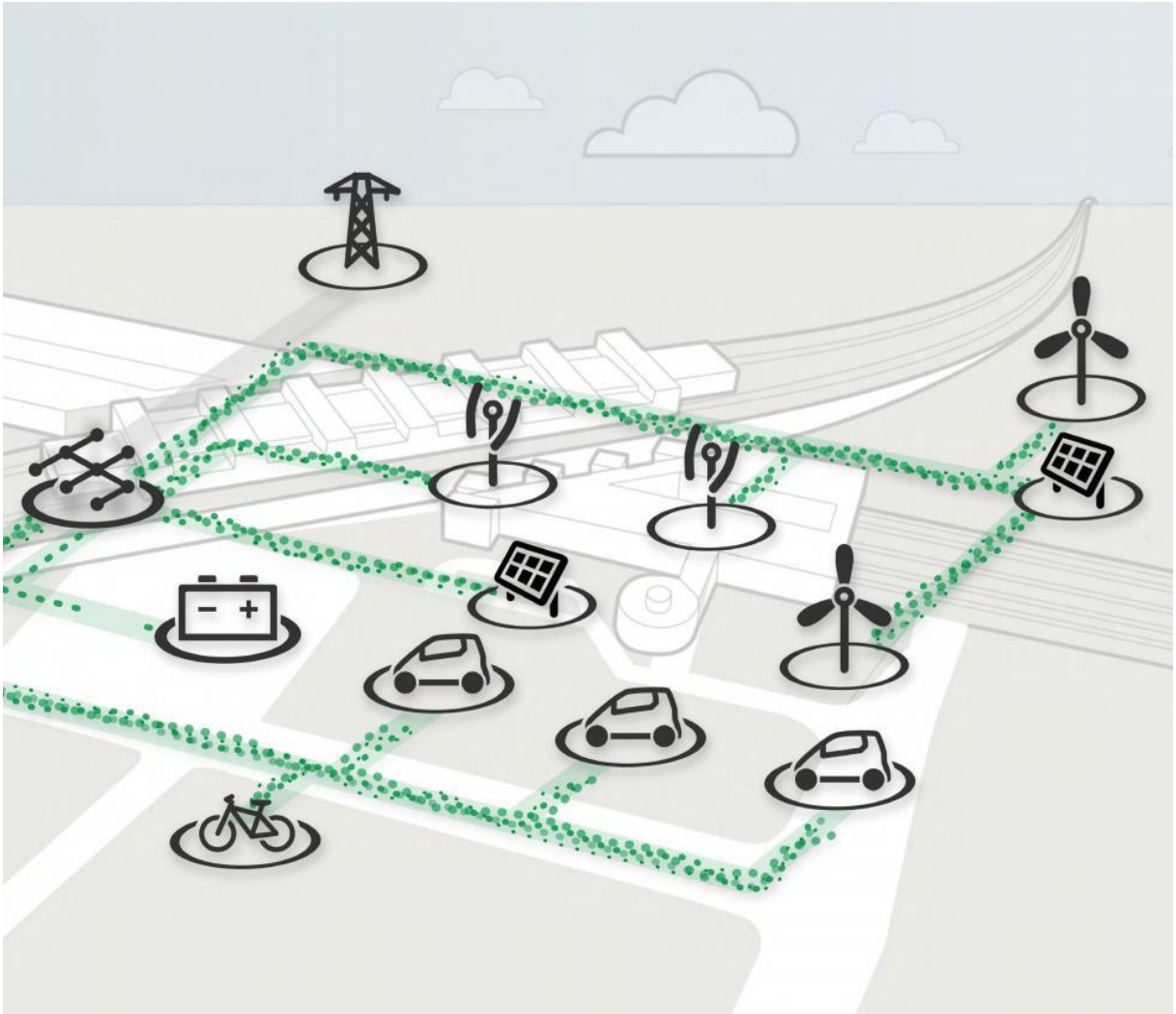
Abschlussbericht

B2 - Intelligente Mobilitätsstation: Themenbahnhof „Vernetzte Mobilität und Energie“



Abschlußbericht

Projekt: Verbundprojekt B2-IMS
Themenbahnhof „Vernetzte Mobilität und Energie“
(Schaufensterprojekt B2)

Förderkennzeichen:	**Zuwendungsempfänger:**
16SBB006H	DB Station & Service AG
	Alcatel-Lucent Deutschland AG
	HaCon Ingenieurgesellschaft mbH
16SBB006A	InnoZ GmbH
16SBB006D	Reiner Lemoine Institut gGmbH
16SBB006G	Schneider Electric Deutschland GmbH
	DB Energie (assoziierter Partner)
	DB Fuhrpark (assoziierter Partner)

Laufzeit des Vorhabens:	01.03.2013 – 30.06.2016
Berichtszeitraum:	01.03.2013 – 30.06.2016
Datum:	29.09.2016
Seitenzahl:	127

Gefördert durch:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)
Invalidenstr. 44
10115 Berlin

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Autorenliste

DB Station & Service AG

Althoff, Rudolf

Alcatel-Lucent Deutschland AG

Wünstel, Klaus

HaCon Ingenieurgesellschaft mbH

Twele, Heike

InnoZ GmbH

Schelewsky, Marc

Reiner Lemoine Institut gGmbH

Arnhold, Oliver

Möhrke, Fabian

Nerling, Jannes

Pieniak, Norman

Schaller, Florian

Wanitschke, Alexander

Schneider Electric Deutschland GmbH

Röger, Paul

Sigulla, Johannes

Fraunhofer IIS

Meyer, Steffen

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis 7

1 Executive Summary 9

2 Zielstellung des Verbundprojektes 12

2.1 Gesamtziel des Verbundes 12

2.2 Aufgaben der einzelnen Partner 13

2.2.1 Partner DB Station&Service AG 13

2.2.1.1 AP 1 - Projektkoodination 13

2.2.1.2 AP 2 - Mobilität 14

2.2.2 Partner Schneider Electric GmbH 15

2.2.3 Partner InnoZ GmbH 17

2.2.4 Partner Reiner Lemoine Institut gGmbH 18

3 Ergebnisse des Verbundprojekts 21

3.1 Darstellung in Bezug zum Arbeitsplan 21

3.2 Erzielte Ergebnisse der Verbundpartner 22

3.2.1 Leistungen des Partners DB Station&Service 22

3.2.1.1 AP 1 - Projektkoordination 22

3.2.1.2 AP 2 - Mobilität 23

3.2.2 Leistungen des Partners Schneider Electric 25

3.2.3 Leistungen des Partners InnoZ 29

3.2.4 Leistungen des Reiner Lemoine Institut 37

3.2.4.1 Aufbau der Kleinwindenergieanlagen 37

3.2.4.2 Leistungsflussanalyse - Modellierung und Simulation von Energiesystemen im Kontext der E-Mobilität 39

3.2.4.3 Untersuchung der Netzaufnahmefähigkeit am Bahnhof Südkreuz 63

3.2.4.4 Auswertung der Elektrofahrzeugdaten und Vergleich mit Buchungsdaten 70

3.2.4.5 Demonstration 74

4 Darstellung wesentlicher Abweichungen zum Arbeitsplan 76

5 Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik..... 78

6 Verwertung, Zukunftsaussichten und weiterer F&E-Bedarf..... 80

6.1 Rechtliche Rahmenbedingungen für die Errichtung von Kleinwindenergieanlagen..... 80

6.2 Rechtliche Rahmenbedingungen, Geschäftsmodelle und Topologieauslegung für Microgrids..... 80

6.3 Carsharing-Konzept..... 81

6.4 Indoor-Navigation 81

6.5 Veröffentlichungen, Vorträge 82

7 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms..... 84

8 Abbildungsverzeichnis..... 86

9 Tabellenverzeichnis 90

10 Literaturverzeichnis 92

A Anhang..... I

A.1 Informationen zur vertikalen Kleinwindenergieanlage KD VK-58..... I

A.1.1 Vermessung der Leistungskennlinie..... I

A.1.2 Darstellung der Kosten für die installierten vertikalachsigen KWEA II

A.2 Validierung des PV-Modells des Simulationstools Smooth.....IV

A.3 Berechnung der Key-Performance-Indikatoren (KPI) VI

A.3.1 Levelized Cost of Electricity (LCOE).....VI

A.3.2 Levelized Cost of Mobility (LCOM) VII

A.3.3 Spezifische Treibhausgasemissionen der Energiebereitstellung und der Elektrofahrzeuge.....VII

A.3.4 Energetische und zeitliche Autarkie.....VIII

A.4 Annahmen für Leistungsflussanalyse X

A.5 Erläuterung des Simulationstools XVII

A.6 Robustheitsanalyse XIX
A.7 Untersuchung der Netzaufnahmefähigkeit am Bahnhof Südkreuz (Ergänzungen) XX
A.7.1 Ermittlung der Stark- und Schwachlastfälle XX
A.7.2 Modellierung und Simulation des Netzes..... XXII
A.8 Abschlussbericht Alcatel Lucent XXIV
A.9 Abschlussbericht HaCon XXV
A.10 Abschlußbericht Fraunhofer Institut XXVI
A.11 Whitepaper des AK Indoor-Navigation..... XXVII
A.12 Ergebnisse des Cognitive Walkthrough XXVIII
A.13 Skizze Kraftzentrum Bahnhof XXIX
A.14 Ergebnisse der Kurzbefragung XXX
A.15 Ergebnis Kundenfeedback..... XXXI

Abkürzungsverzeichnis

Äq.	-	Äquivalent
BEV	-	Battery Electric Vehicle (dt.: Batterielektrisches Fahrzeug)
BLE	-	Bluetooth Low Energy
Cap	-	Capacity (dt.: Kapazität)
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
DLR	-	Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum
EA	-	energetische Autarkie
EE	-	Erneuerbare Energie
EEA	-	Erneuerbare Energieanlagen
eMo	-	Berliner Agentur für Elektromobilität
EUREF	-	Europäisches Energieforum
GZF	-	Gleichzeitigkeitsfaktor
IKT	-	Informations- und Kommunikationstechnologie
IMS	-	Intelligente Mobilitätsstation
InnoZ	-	Innovationszentrum für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel (InnoZ) GmbH
KPI	-	Key Performance Indicator (dt.: Leistungskennzahl)
KWEA	-	Kleinwindenergieanlagen
kWp	-	Kilowatt Peak
kVA	-	Kilovoltampere
LCE	-	Life Cycle Emission (dt.: Emissionen im Lebenszyklus)
LCOE	-	Levelized Cost of Electricity (dt.: Stromgestehungskosten)
LCOM	-	Levelized Cost of Mobility (dt.: Mobilitätskosten)
LIS	-	Ladeinfrastruktur
MG	-	Microgrid
MS	-	Mittelspannung
NAP	-	Netzanschlusspunkt
NS	-	Niederspannung

NSHV	-	Niederspannungshauptverteilung
NVP	-	Netzverknüpfungspunkt
ÖPNV	-	Öffentlicher Personennahverkehr
OV	-	Optimierungsvariante
PAPI	-	Paper And Pencil Interview
PVA, PV-Anlage	-	Photovoltaik-Anlage
RLI	-	Reiner Lemoine Institut gGmbH
RONT	-	Regelbarer Ortsnetztransformator
SCADA	-	Supervisory Control and Data Acquisition
SQL	-	Structured Query Language
TA	-	Zeitliche Autarkie
THG	-	Treibhausgas
UMTS	-	Universal Mobile Telecommunications System

1 Executive Summary

Das Projekt konnte das im Namen verankerte Ziel, die „Vernetzte Mobilität und Energie“ in hervorragender Weise umsetzen. Voraussetzung dafür war der Standort Berlin Bahnhof Südkreuz, der mit seinen umgebenden Flächen noch genügend Erweiterungspotential bot sowie die Möglichkeit der Verknüpfung mit dem Projekt „eBus-Berlin“ der BVG.

Das außergewöhnliche an diesem Standort ist die physische Verbindung der unterschiedlichen Verkehrsangebote

- Nahverkehrs-eBus
- Sharing Elektrofahrzeuge
- Sharing Pedelecs
- Öffentliche Ladestation für Individualverkehr

in unmittelbarer Nähe zueinander auf dem Bahnhofsvorplatz.

Der Aufbau eines Microgrid innerhalb des Bahnhofsgeländes, welches verschiedene Erzeuger erneuerbarer Energie, Speicher und die genannten Mobilitätsangebote vernetzt, demonstriert einzigartig die Interaktion von Erneuerbarer Energie und Mobilität.

Durch das B2-IMS Projekt ist eine hohe Motivation im Unternehmen DB Station&Service AG entstanden, über ergänzende Projektaktivitäten den Wert der Innovationen durch die Konzentration im Bahnhof Südkreuz deutlich zu steigern. Alle Innovationen sind etwa ab Mitte der Projektlaufzeit unter dem Begriff „Zukunftsbahnhof Berlin Südkreuz“ zusammengefasst worden. Diese weiteren Angebote haben das Mobilitätsangebot zusätzlich erweitert und tragen damit ebenfalls zu den verkehrpolitischen Zielen der Verkehrverlagerung und –verbesserung bei. Zum einen ist zwischen dem Bahnhofsgebäude und dem Parkplatz für die e-Mobile die Fernbus-Haltestelle entstanden und als zusätzliche Mobilitätsmöglichkeit wurde eine Ridesharing-Station errichtet. Auf dem Bahnsteig 3/4 sind die dort verkehrenden Züge in Echtzeit auf mehreren Displays mit ihrer aktuellen Wagenreihung angezeigt. Und auf dem Mobilitätsmonitor wird dem Reisenden die Vielfalt der Mobilitätsangebote außerhalb der klassischen Bahnwelt gezeigt, jedes Carsharing Angebot rund um den Bahnhof, die Fernbusse mit den Echtzeit-Daten und die Pedelecs.

Im Parkraummanagement wurden Innovationen zur Erhöhung des Kundennutzens umgesetzt. Für das beschrankte Parkdeck Süd wird die voraussichtlich verfügbare Anzahl an Stellplätzen prognostiziert, so dass man vor Reisebeginn herausfinden kann, zu welchem Zeitpunkt Stellplätze verfügbar sind. Zudem werden Parkraum-

Daten der DB BahnPark über eine OpenData-API auch Dritten zur Verfügung gestellt. Die Stellplätze des Parkdecks Süd können auch online gebucht werden. Für Stellplätze an unbeschrankten Standorten am Bf. Südkreuz können die Parkgebühren über das Smartphone bezahlt werden.

Auch informatorisch wurden die Angebote miteinander vernetzt. Über eine eigene IMS-App für Android-Betriebssysteme wurden alle Angebote über ein Informationssystem miteinander vernetzt. Das Besondere dabei ist die Indoor-Routing und -Navigationsfunktion, die den Nutzer im Bahnhof Berlin-Südkreuz beim Wechsel zwischen den verschiedenen Bahngleisen, den Bushaltestellen und weiteren POIs begleitet.

Die Microgrid-Station ist mit dem ca. 57 m^2 großen Solardach und der darunter befindlichen Batteriestation das auffällige Kernstück der Vernetzung. Diese ist umgeben von Ladestationen für den elektromobilen Individualverkehr sowie Pedelecs und der induktiven Ladestation des Elektrobusses. So wird den Kunden der DB und anderen Reisenden die Möglichkeit gegeben, mit emissionsfreien Fahrzeugen ihre innerstädtischen Ziele zur erreichen. Die Elektrobusse der Linie 204 tragen zusätzlich dazu bei, den Individualverkehr auf den öffentlichen Nahverkehr zu verlagern und gelten als erster Test für das Vorhaben der BVG, den Busbestand sukzessive zu elektrifizieren. Bei der Planung und der Realisierung der gesamten Infrastruktur des Energiesystems und der Carsharing-Station wurde auf eine leicht zu realisierende spätere Erweiterbarkeit geachtet.

Während der Bauphase wurden einzelne Meilensteine erreicht, die für die Präsentation des Vorhabens in der Öffentlichkeit wichtige Termine darstellten. Die hohe Geschlossenheit, mit der das Projekt ab Anfang 2014 umgesetzt wurde, ist der Entscheidung zu verdanken, das Projekt mit einem vollverantwortlichen Projektmanager zu besetzen.

Die Anforderungen eines F&E-Projekts sind grundsätzlich andere als die eines Linien-Projekts. Das F&E- Projekt geht von unsicheren Realisierungsszenarien aus und nutzt neue Technologien, die eine gewisse Volatilität und Planungsunsicherheit mit sich bringen. Diese Unsicherheit widerspricht den Linien-Projekten in mehreren Belangen. Die sehr restriktiven Vorgaben des Eisenbahn-Baurechts und der internen Vorgaben behinderten den Fortschritt des Projekts.

Die gesamte technische Ausrüstung, Microgrid, Ladeinfrastruktur, Solaranlagen und Windenergieanlagen funktionieren seit der Inbetriebnahme mit hoher Zuverlässigkeit. Die Energieerzeugung ist zu allen Zeiten ausreichend; das komplette Entladen der Batterie wird zu Forschungszwecken angestoßen.

Im Bahnhofsgebäude werden für das Publikum auf Präsentationsmodulen die Ziele des Projekts, die Wirkungsweise des Microgrid, die Vernetzung der Mobilität und die Entwicklung der Indoor Navigation gezeigt.

In den vergangenen zwölf Monaten wurde die Microgrid-Station zwanzigmal durch Fachbesuchergruppen frequentiert. Zu jedem einzelnen Ereignis gab es positive Rückmeldung.

Die im Projekt entstandene Infrastruktur wird als voll funktionsfähige Ladestation für Elektromobilität und als Datenlieferant für zukünftige Anlagen im Bahnumfeld weiter betrieben. Sichergestellt wird der Betrieb über die neu gegründete Gesellschaft inno2grid GmbH, die sich aus einigen Partnern des B2-IMS Projekts zusammensetzt.

2 Zielstellung des Verbundprojektes

2.1 Gesamtziel des Verbundes

Im Rahmen des Schaufensters mit seiner Vielzahl von Anwendungsfällen für Elektromobilität steht das Vorhaben B2 – Intelligente Mobilitätsstation: Themenbahnhof „Vernetzte Mobilität und Energie“ für die Entwicklung und die parallele Erprobung erneuerbarer Energie zur Versorgung von e-Flotten aus der Perspektive eines herstellerunabhängigen Mobilitätsproviders, der umfassende Mobilitätsleistungen anbietet und den Endkunden transparente Nutzungsprozesse und –Infrastrukturen dafür bereitstellt.

Ziel des Projektes ist es, ein aus mehreren elektrischen Komponenten zusammengesetztes lokales Microgrid zu erstellen. Durch die **direkte örtliche Anbindung** an den Bahnhof Südkreuz ist die Öffentlichkeitswirksamkeit und damit der "Schaufenster"-Charakter des Projektes gegeben. Über die **Wirkungsweise des Microgrids** unterrichtet eine interaktive Ausstellung in der Bahnhofshalle, bei der die Steuerung des Microgrids im Simulationsmodus selbst übernommen werden kann.

Zentrales Erkenntnisziel bei den **Mobilitätsaktivitäten** ist die Nutzung elektrischer Straßenfahrzeuge (Autos und Fahrräder) als Teil einer intermodalen Angebotslandschaft, um auf diese Weise die Attraktivität öffentlicher Verkehrsmittel zu verbessern und durch die ergänzende Nutzung von Bahnen und Bussen die CO_2-Bilanz des Verkehrssektors zu verbessern. Die Fahrzeuge werden dazu in unterschiedlichen Formaten angeboten, jedoch immer unter der Maßgabe des Sharing-Modells, um auf diese Weise die Komfortansprüche an Mobilität mit den Notwendigkeiten einer nachhaltigen Verkehrslandschaft zu verbinden. Entscheidender Erfolgsfaktor für die Wirtschaftlichkeit ist die erfolgreiche Integration der Fahrzeuge in die sich wandelnden Energienetze.

Aus energetischer Sicht ist die heutige isolierte Betrachtung der Bahnhöfe als reine Energieverbraucher nicht mehr zeitgemäß; die zukünftige Wertung von Bahnhöfen auch als Energieproduzenten ist mit Fakten zu untermauern. Im öffentlichen Raum existiert aber bisher nur ein Bruchteil der künftig benötigten Speichermedien. Wesentlicher Hebel kann dabei die Elektromobilität sein, in dem die Batterien der Elektroautos in die Netzstrukturen eingebunden werden. Die Erforschung der gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen lokaler Erzeugung, unterschiedlichen mobilen Speichern im öffentlichen Realbetrieb ist ein Schwerpunkt bei der Erkenntniszielstellung des Projektes.

Schließlich wird im Projekt ein Indoor-Navigationssystem erforscht und erprobt, das auf Basis einer hohen Ortungsgenauigkeit eine Indoor-Navigation für den Bahnhof

Berlin-Südkreuz realisiert und dieses in ein **umfassendes Auskunfts-und Orientierungssystem** integriert. Damit wird gewährleistet, dass am „intelligenten Bahnhof der Zukunft“ nicht nur innovative Mobilitätsangebote bereitgestellt werden, sondern diese in einer gemeinsamen, nutzerfreundlichen Informationsplattform integriert werden. Damit wird den Nutzern der Zugang zu verschiedenen Mobilitätsdiensten erleichtert und auch eine größere Auslastung dieser Angebote erzielt. Die energetische Betrachtung des Gesamtsystems wird dabei um wesentliche Informationen zu Nutzerpräferenzen und kleinräumlichen Bewegungsmustern ergänzt.

2.2 Aufgaben der einzelnen Partner

2.2.1 Partner DB Station&Service AG

2.2.1.1 AP 1 - Projektkoodination

Ziel

Ziel des Arbeitspaketes (AP1) ist die gesamte inhaltliche und administrative Koordination des Projektes und die damit verbundene Planung, Umsetzung, Kontrolle und Kommunikation der übergeordneten Aktivitäten zur Sicherung des Projekterfolges. In diesem Zusammenhang erfolgten sowohl die inhaltlichen Verzahnungen zu anderen Schaufensterprojekten (A4, D1, D3,…) sowie der Austausch mit den übergeordneten Stellen (eMo, Bundesministerien, Projektträger, Land Berlin etc.).

Aufgaben

Das AP1 übernahm die inhaltliche und administrative Koordination sowie Steuerung des Projektes. Dies beinhaltete die Organisation und Durchführung von Lenkungskreissitzungen und Projekttreffen, sowie die Kontrolle und ggf. Steuerung der AP-internen Arbeiten. Die Projektkoordination gewährleistete einen inhaltlich fokussierten und formal möglichst reibungslosen Verlauf des Projektes. Im Ergebnis wurden die benötigte Dokumentation intern (Vorlagen, Lenkungskreis, AP-Leiter) sowie extern (eMo, Projektträger, Fördergeber) sichergestellt.

Darüber hinaus ist die Projektkoordination erste Anlaufstelle für externe Anfragen (Presse, Akteure, Interessenten). Ebenfalls wird die projektbezogene Öffentlichkeitsarbeit aus diesem AP entwickelt, abgestimmt und gesteuert. Das AP1 dokumentiert in Abstimmung mit den Partnern bestehende Barrieren und Hindernisse und überführt diese in den wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Diskurs. Basierend auf den Erkenntnissen des Projektes soll dem Fördergeber bei der flächendeckenden Einführung und Weiterentwicklung der Elektromobilität in Deutschland unterstützende Hinweise aus der praktischen Umsetzung geboten werden.

Das AP dokumentiert den Arbeitsfortschritt des gesamten Projektes und verwaltet und archiviert die aus dem Prozess hervorgehenden Projektdaten. Der Fördergeber erhält in regelmäßigen Zeitabständen Zwischenberichte und am Ende des Projektes einen aggregierten Abschlussbericht.

2.2.1.2 AP 2 - Mobilität

Ziel

Ziel des AP2 ist Entwicklung des Bahnhofs Südkreuz zu einer inter- und multimodalen Verkehrsdrehscheibe von elektrisch betriebenen Verkehrsmitteln. Für dieses Ziel sollten die eCarsharing und Pedelecangebote sichtbar platziert und möglichst einfach in Reiseketten integriert werden und als neue interoperable Verkehrsmitteloptionen am Bahnhof etabliert werden. Der Bahnhof Südkreuz sollte als ein Standort in die flächendeckenden eCarsharing- und Pedelecangebote (Schaufenster-Vorhaben A4 – Elektrische Flotten mit einem Standort am Bahnhof Südkreuz) integriert werden. Eine weitere Zielsetzung besteht in der Erprobung der induktiven Ladetechnik.

Aufgaben

Zur Durchführung des AP 2 wurde zunächst ein Teilkonzept Mobilität für die Intelligente Mobilitätsstation erstellt, auf dessen Basis die Detailkonzeption und Spezifikation (Aufgabenverteilung, Zeitplan, detaillierte Meilensteine etc.) erfolgte. In Workshops standen dabei die intermodale Ausgestaltung der einzelnen Mobilitätskomponenten und deren Verknüpfung zu einem Gesamtangebot im Vordergrund.

In Zusammenarbeit mit der DB Fuhrparkgruppe wurden die für diesen Standort in Projekt A4 geplanten Elektroautos und Pedelecs im Realbetrieb am Bf. Südkreuz eingesetzt und getestet. Dabei wurde die bisher auf dem Parkplatz Süddeck befindliche e-Flinkster-Station an einen gut sichtbaren Standort am Hauptvorplatz verlegt. Die Pedelec-Station wurde ebenfalls neu platziert, so dass sich im Zusammenhang mit den Energieanlagen ein für den Nutzer einladendes Gesamtbild ergibt, das auch den reibungslosen Übergang zu Bahn und Bus berücksichtigt.

Die notwendige Ladeinfrastruktur wurde aus dem Arbeitspaket 3 bzw. über die Projekte aus dem Handlungsfeld Ladeinfrastruktur erstellt und in die lokale Infrastruktur eingebunden. Dabei werden für den öffentlichen Betrieb neue Komponenten im Testbetrieb unter Realbedingungen im öffentlichen Raumes erprobt.

Die Grundauslegung des Microgrids basiert auf einer simulationsgestützten Untersuchung, wobei technische, ökonomische und ökologische Kriterien einen bestmöglichen Kompromiss bilden sollen. Die ersten Ergebnisse der Simulation flossen dann direkt in die Umsetzung der Mobilitätskomponenten eCarsharing und Pedelec des Microgrids ein.

Im Betrieb wurden die Abläufe analysiert und die Schnittstellen zwischen Öffentlichem Verkehr, eCarsharingsystemen und dem Energiesystem sowie zu den Buchungs- und Dispositionstools erforscht und optimiert. Das RLI unterstützt und berät dabei aus wissenschaftlicher Sicht und verwendet die Daten zur Auswertung im AP 5.

2.2.2 Partner Schneider Electric GmbH

AP3 Energie

Ziel

Ziel dieses AP war die energetische Optimierung im Bahnhof Südkreuz durch Installation eines Microgrid zur Maximierung des Grünstromanteils der intermodalen, elektrischen Flotten sowie die Versorgung des 50 Hz Netzes im Bahnhofsgebäude mit Reststrom aus dem Microgrid. Hierfür sollen neue Komponenten im und am Bahnhof installiert und im Rahmen einer Dreifach-Vernetzung von (e-)Mobilität, Energie und IKT intelligent verbunden. Ein weiteres Ziel ist die Vernetzung mit weiteren Schaufensterprojekten wie D1 IPIN sowie D3 – Micro Smart Grid EUREF.

Aufgaben

Im Arbeitspaket 3 wurde die Erweiterung des eCarsharing-Angebotes im Zusammenhang mit einer induktiven Taxiladestelle geplant, elektrochemischen Speichern und den regenerativen Energien Sonne und Wind umgesetzt.

Mit der im AP 2 erstellten Simulation berechnete das RLI verschiedene Auslegungsvarianten und variierte dabei z.B. das Verhältnis von installierter Leistung der erneuerbaren Energien (bei kWKA auch Variation der Turmhöhe) zur Kapazität der Speicher und zur Anschlussleistung der Fahrzeuge. Mit den gemessenen Verbrauchsdaten der Fahrzeuge und den aus den Wetterdaten berechneten erneuerbaren Energieerträge wurden Konzepte zur Basisauslegug des Microgrids erstellt. Ziel dieser Konzeption ist das technische und wirtschaftliche Optimum im Zusammenspiel der Erzeuger, Speicher und Elektrofahrzeuge im Microgrid. Die technische Detailauslegung des Microgrids und deren Komponenten wurde federführend von der Firma Schneider Electric umgesetzt. Ziel der industriellen Forschungsaktivitäten in diesem Arbeitspaket werden Produkte sowohl auf Hardware- als auch auf Softwarebasis sein, welche zukünftig in Bahnhöfen und anderen öffentlichen Gebäuden eingesetzt werden können. Der Einsatz dieser Technik verschafft der Infrastruktur die notwendige Intelligenz, um Teilkomponenten technisch und wirtschaftlich sinnvoll in ein Microgrid integrieren zu können.

Alle Anlagen zur Energiebereitstellung, -speicherung und -nutzung werden in einem Monitoring überwacht. Das Monitoringkonzept wurde in Abstimmung mit den Part-

nern, insbesondere dem RLI, erarbeitet. Von großer Bedeutung sind dabei die Daten- und Übergabeschnittstellen an das AP5 zur wissenschaftlichen Auswertung der Messungen.

In enger Verzahnung mit der wissenschaftlichen Auswertung findet eine technische Auswertung aus Sicht der Industrie statt. Diese Auswertung von Schneider Electric umfasst folgende Detailberichte:

- Kalenderbericht
- Profilbericht
- Verbrauchsbericht
- Spitzenlastbericht
- Leistungsfaktorbericht (elektrisch)
- kVA-Bericht
- Load-Shaping-Bericht
- Energie-Mix

Diese stehen einerseits in einer SQL-Datenbank zur Verfügung und andererseits bieten Dashboards innerhalb der ClearSCADA die Möglichkeit diese auszuwerfen.

Außerdem wurden die Änderungen im Nutzungsverhalten sowie Einflüsse, die aus der Abnutzung von technischen Anlagen resultieren, protokolliert und energetisch betrachtet. Diese Ergebnisse wurden ebenfalls in elektronischer Form den Projektpartnern zur weiteren Auswertung zur Verfügung gestellt.

Das Arbeitspaket 3 stellte sich als ausgesprochen infrastrukturlastiges Arbeitspaket dar. Nach technischer Klärung von Standortfragen der Forschungs- und Demonstrationsobjekte, insbesondere der günstigen Aufstellung der Windanlagen, wurden, auch durch die Erstellung von Machbarkeitsanalysen, weitestgehend alle Infrastrukturthemen umgesetzt.

Das AP3 beschäftigte sich mit der elektrischen Infrastruktur am Bahnhof, insbesondere des Microgrids mit den erneuerbaren Energieerzeugern, dem Speicher und der Ladeinfrastruktur für Fahrzeuge. Dazu zählte auch die Integration des stationären Speichers und der Anbindung an die Leitwarte.

Folgende Arbeiten wurden im AP3 durchgeführt:

- Technische Machbarkeitsanalyse: Erfassung Bestand und künftiger Energiebedarf
- Konzeption eines energetischen Gesamtkonzepts unter Berücksichtigung von Stromerzeugung, Verteilung-/Speicherung und –Verbrauchs und dem Ziel der Optimierung des Grünstromverbrauchs aus lokal zu errichtenden erneuerbaren Energiequellen (Windenergie, Solar) (Microgrid-Ansatz) und Integration der Verteilungsanlagen (Schaltanlagen, Schalter, Messgeräte)

- Entwicklung und Implementierung der erforderlichen Komponenten
- (Test-)betrieb und Optimierung des Gesamtsystems und der Systemkomponenten.
- Integration eines Li-Ionen Speichersystems speziell für den Anwendungsfall großer Infrastrukturen
- Aufstellung einer Pedelec Ladeeinheit
- Steuerungstechnische Integration der gesamten elektrischen Infrastruktur für die Beladung von Elektroautos und der regenerativen Einspeisung in das ClearSCADA-Leitsystem
- Weitere Tests des Steuerungssystems und Anpassung der Algorithmen sowie Datenauswertung
- Der Aufbau von zwei Horizontalachs-Windenergieanlagen konnte in der zur Verfügung stehenden Zeit leider nicht durchgeführt werden.

2.2.3 Partner InnoZ GmbH

AP 4 Indoor Navigation

Ziel

Ziel ist die Umsetzung einer umfassenden Positionierungs- und Navigationsapplikation für den Bahnhof Berlin Südkreuz als Erweiterung des DB Navigators. Die Applikation soll Nutzern des Bahnhofs eine lückenlose Navigation zu POIs, Gleisen und sogar Gleisabschnitten ermöglichen. Zudem soll der Übergang vom geschlossenen Umsteigeobjekt zum Bahnhofsvorplatz zu den Haltestellen im Bahnhofsumfeld umgesetzt werden. Damit wird ein Indoor-Navigationssystem geschaffen, dass eine lückenlose Informationskette von Eintritt in den Bahnhof bis in den Zug bzw. umgekehrt ermöglicht.

Aufgaben

Das AP „Indoor-Navigation“ ergänzt bestehende Erfahrungen, insbesondere um Erkenntnisse zur Erweiterung des WLAN-basierten Ansatzes um auf Bluetooth Low Energy (BLE) basierende Technologien.

Innerhalb des Projekts wird zunächst eine Indoor-Lokalisierung umgesetzt, auf deren Basis und unter Nutzung der hohen Ortungsgenauigkeit eine Indoor-Navigation für den Bahnhof Berlin-Südkreuz realisiert wird und dieses in ein umfassendes Auskunftssystem integriert.

In einem weiteren Schritt wird die Indoor-Lokalisierung auf WLAN-Basis um einen BLE-basierten Ansatz erweitert. Die Integration von zwei unterschiedlichen WLAN-Ansätzen – die Lösung von Alcatel-Lucent (ALUD) und Fraunhofer IIS – sowie die

Erweiterung um die BLE-Lösung ist technisches Neuland. Ziel ist die Umsetzung einer hybriden Ortung die als Referenz eines interoperablen Ansatzes der Indoor-Navigation dienen kann.

Die einzelnen Arbeitsschritte umfassen:

- Erweiterung des HAFAS-Auskunftssystems zur Einbindung der digitalen Karte des Bahnhofs Südkreuz in das ÖV-Routing
- Anbindung der durch Alcatel-Lucent bereitgestellten Lokalisierungskomponente auf WLAN-Basis
- Entwicklung und Implementierung einer Indoor-Navigation für den Bahnhof Berlin Südkreuz
- Einbindung der entwickelten Indoor-Navigationskomponente in eine F+E-Version (IMS-App) für Android-Betriebssysteme
- Erweiterung der WLAN-basierten Ortungskomponente um BLE-basierte Lokalisierungsmodule
- Integration beider Lokalisierungsmodule in das awiloc-System von Fraunhofer IIS
- Integration der awiloc-library in das HAFAS-System

2.2.4 Partner Reiner Lemoine Institut gGmbH

AP 5 - Wissenschaftliche Begleitung

Ziel

Ziel des AP ist die wissenschaftliche Betreuung des Projektes und die umfassende Auswertung der Erkenntnisse und Ergebnisse auf Basis eines im ersten Schritt zu entwickelnden technischen und wissenschaftlichen Begleitforschungs-Gesamtkonzeptes. Eine wesentliche Zielsetzung ist dabei die Beforschung von Nutzerverhalten. Ein weiteres Ziel besteht in der angemessenen öffentlichkeitswirksamen Außendarstellung der Projektinhalte sowie des Projektes als Teil des Schaufensters Berlin/Brandenburg.

Aufgaben

Das RLI ist für das Arbeitspaket der technischen und wissenschaftlichen Begleitforschung verantwortlich. In regelmäßigen AP-Sitzungen stimmt das RLI das Gesamtvorgehen des Forschungsprojektes mit den Partnern ab. Es wurde eine übergeordnete Kooperation mit allen APs verwirklicht.

Im ersten Schritt dieses Arbeitspaketes erfolgte die Aufarbeitung der Datengrundlage durch eine intensive Recherche. Neben der Auswertung von Fachliteratur, Statistiken

und weiteren Datenquellen wurde außerdem ein enger Dialog mit den beteiligten Partnern aus der Wirtschaft geführt.

Die Arbeitspakete 2 und 3 stellen die erforderlichen Messdaten für die technisch-wissenschaftliche Auswertung zur Verfügung. Die Auswertung erfolgt auf Basis der in AP2 erstellten Simulationsumgebung. Quantitativ werden die spezifischen Treibhausgasemissionen (g CO2-Äq./km) für die Fahrzeuge in zeitlicher Abhängigkeit der Verfügbarkeit erneuerbarer Energie errechnet (Well-to-Wheel-Analyse). Eine Gegenüberstellung dieser Emissionen mit den von der EU geforderten Grenzwerten (bisher noch Tank-to-Wheel) zeigt den ökologischen Nutzen der Elektrofahrzeuge im praktischen Carsharing-Einsatz. Weiterhin wurden die Mobilitätskosten (Levelized Cost of Mobility [€/km]) errechnet. Analog hierzu wurden im Elektrizitätssektor die spezifischen CO2-Emissionen und Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Electrictiy[1]) bestimmt.

Ergänzend zum ökologischen Nutzen ist die Wirkung von Vernetzung lokal erzeugter Energie und integrierter Mobilitätsdienstleistungen unter Einschluss von Elektrofahrzeugflotten auf die Nutzerakzeptanz sowie Auswirkung auf das Image und die Kundenbindung untersucht worden. Dies wird mit einem multimethodalen Ansatz unter der Federführung des InnoZ ermittelt. Die spezifischen Methoden wurden in Abhängigkeit vom Projektfortschritt ausgewählt und umgesetzt. Ausgangspunkt bildete die Aufarbeiteung des Forschungsstandes „implizites Wissen“ als Grundlage zur Entwicklung des Forschungsdesigns. Eine PAPI-befragung vor Ort bildete den nächsten Schritt zur Ermittlung der Aufenthaltsqualität am Bahnhof. Schließlich wurde mit einer QR-Code-Befragung abschließend die Wirkung und Wahrnehmung spezifischer Informationsangebote am Bahnhof ermittelt. Damit sollte die kundenspezifische Wahrnehmung der Vernetzung lokal erzeugter Energie mit dem Angebot des eCarsharings und der Integration in den Bahnhof nachgezeichnet werden.

Des Weiteren wurden die Ladevorgänge und die Integration stationärer und mobiler Speicher in einem Energiesystem mit erneuerbaren Energien untersucht. Das RLI bezieht dabei die eigenen Auswertungen auf eine Leistungsflussanalyse im Jahresverlauf. Die Auswertung zur Netzstabilität (z.B. Leistungsfaktorbericht, kVA-Bericht, Load-Shaping-Bericht etc.) wurde von der Firma Schneider im Rahmen des AP3 bereitgestellt. Die zuvor in den AP´s 2 und 3 getroffenen Annahmen zur Grundauslegung des Microgrids wurden mit den Messdaten abgeglichen und Eingangsparameter angepasst.

In der mit der Hilfe der Ergebnisse der technischen und wissenschaftlichen Begleitforschung verifizierten Simulationsumgebung werden Szenarien zur weiteren Verknüpfung von lokal erzeugter regenerativer Energie und Elektromobilität erstellt. Die-

[1] Vgl. Short,W. et al (1995).

se Szenarien orientieren sich an den politischen Zielstellungen der Bundesregierung (2020 → 1.Mio. E-Fahrzeuge, 2022 → Atomausstieg und 2050 → 80 % erneuerbare Energien im Bereich Elektrizität). Optional können weitere Szenarien berechnet werden. Mittelbar können daraus Handlungsempfehlungen für die Politik und die Wirtschaft abgeleitet werden.

Die erarbeiteten Ergebnisse wurden in Form von Disseminationen und Vorträgen auf Fachkonferenzen veröffentlicht. Eine umfangreiche Auflistung zu Veranstaltungen und Veröffentlichungen folgt in Kapitel 6.5.

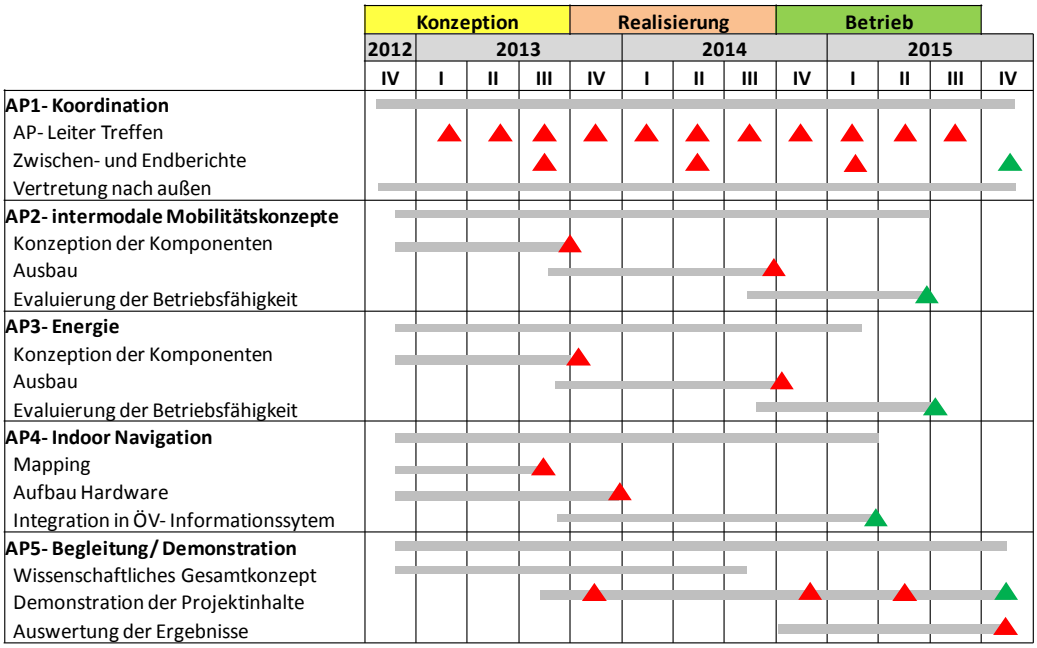
3 Ergebnisse des Verbundprojekts

3.1 Darstellung in Bezug zum Arbeitsplan

Die unter der Projektleitung der DB Station&Service AG stehenden Entwicklungsarbeiten im Projekt wurde Anfang 2014 mit der Neubesetzung des Projektleiters gestartet. Bis zu diesem Zeitpunkt lagen keine verwertbaren Arbeitsergebnisse vor. In relativ kurzer Zeit wurde ein Aktivitätenplan aufgestellt, der anschließend eigenverantwortlich in den Arbeitspaketen abgearbeitet wurde. Durch diese Vorgehensweise gelang es, den großen Zeitverzug wieder auszugleichen.

Bis zur InnoTrans im September 2014 wurde das Microgrid auf dem neu angelegten e-Parkplatz soweit fertig gestellt, daß der Fachbesucher eine bereits produzierende Anlage besichtigen konnte. Der weitere Ausbau folgte im Winter 2015 mit der Installation der Speicherbatterie. Die durch das Arbeitspaket 5 zu erbringenden Auswertungen des Energieflusses konnten nicht mehr in dem geplanten Umfang bis 31.12.2015 durchgeführt werden, sodaß diese in die Verlängerung bis 30.06.2016 verlagert und im Zuge des Aufstockungsantrages noch um weitere Untersuchungen ergänzt wurden. Es konnten Teile der Aufbauleistung, welche für die Auswertung notwendig gewesen wären, nicht mehr zeitgerecht umgesetzt werden. Es wurden Lösungen erarbeitet um diese zu kompensieren.

Tabelle 1: ursprünglicher Zeitplan



Im Bereich der Indoor Navigation wurde zunächst die technische Umsetzung über eine WLAN Infrastruktur etabliert. Die Ergebnisse der Ortung auf WLAN Basis waren jedoch wegen der wenigen Fingerprints nicht verwertbar. Das Projekt hatte sich da-

rauf hin mit dem Zuwendungsgeber entschlossen, die Infrastruktur nochmal neu auf Basis der Bluetooth Technologie aufzubauen. Der Umbauaufwand war sowohl physikalisch als auch logisch umfangreich, weshalb das Projekt um ein halbes Jahr verlängert wurde. Die auf dieser Basis heute vorliegenden und sichtbaren Ergebnisse haben den Mehraufwand gerechtfertigt.

Die energietechnische Seite des Projekts wurde zu den Meilensteinen, mit Ausnahme der Batterie und der leistungsstärkeren KWEA, realisiert. Trotzdem war das Microgrid betriebsbereit und produzierte Energie seit dem 4. QTL 2014. Die Demonstration war eingeschränkt zur InnoTrans im 3.QTL 2014 bereit und im 1.QTL 2015 im Bahnhof Südkreuz an vier Screens aktiv. Die Indoor Navigation musste aufgrund der schlechten Testergebnisse nochmals aufgebaut werden; das neue Release ist in Juni 2016 fertig gestellt.

3.2 Erzielte Ergebnisse der Verbundpartner

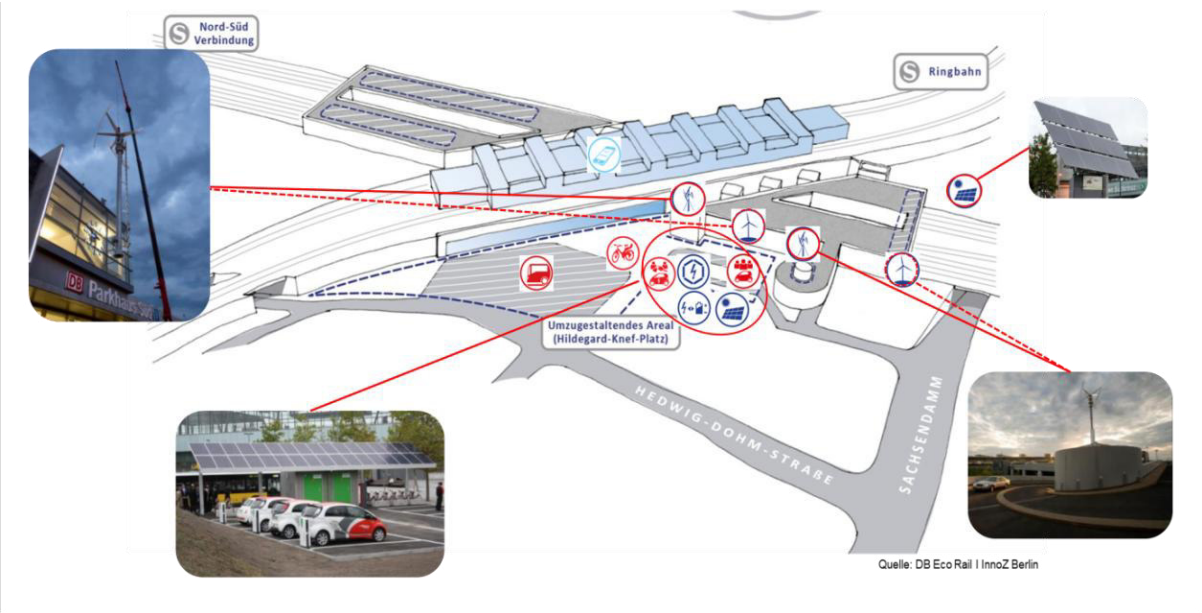


Abbildung 1: Erstellte e-Module am Bahnhof Südkreuz

3.2.1 Leistungen des Partners DB Station&Service

3.2.1.1 AP 1- Projektkoordination

Das Arbeitspaket stellt die gesamte inhaltliche und administrative Koordination des Projektes und die damit verbundene Planung, Umsetzung, Kontrolle und Kommunikation der übergeordneten Aktivitäten zur Sicherung des Projekterfolges sicher. In diesem Zusammenhang erfolgen sowohl die inhaltlichen Verzahnungen zu anderen

Schaufensterprojekten (A4, D1, D3,…) sowie der Austausch mit den übergeordneten Stellen (eMO, Bundesministerien, Projektträger, Land Berlin etc.).

Die Wahrnehmung der Nahtstelle zu den relevanten Stellen der DB Regelorganisation ist eine wichtige Aktivität gewesen, um die Leistungen der konzernexternen Projektpartner auf dem Bahnhof Südkreuz abgestimmt und koordiniert durchführen zu lassen. Zur zeitnahen Kontrolle der auszuführenden Projektarbeiten wurden im Jahr 2014 Steuer- und Lenkungskreise eingerichtet. Die auf Regionalleiterebene stattgefundenen Steuerkreise haben zwanzig und die auf Vorstandsebene stattgefundenen Steuerkreise haben fünf Mal stattgefunden. Das Ziel dieser Entscheidungsrunden war die Beschleunigung und die Unterstützung des Projekts in kritischen Situationen sowie die Nachhaltung der eingesetzten Budgetmittel.

Einige Ziele mussten im Projektverlauf durch die Veränderung der Partnerstruktur aufgegeben bzw. neu formuliert werden, ohne jedoch das Gesamtziel des Verbundprojekts B2 IMS „Vernetzte Mobilität und Energie“ in Frage zu stellen. Beispielhaft ist an dieser Stelle die Aufgabe der Induktionstechnik für PKW durch Bombardier zu nennen. Durch die Einbindung des B2 Projekts und weiterer Projektaktivitäten in den Programmrahmen „Zukunftsbahnhof Südkreuz“ konnte das B2 Projekt in einem größeren Rahmen auch in der Öffentlichkeit positiv dargestellt werden.

Das Projektmanagement war über die gesamte Laufzeit des Projekts besetzt, die Leistung wurde nur zum Teil abgerechnet. Die Notwendigkeit ergab sich aus nachgelagerten, nicht zeitkritischen Aktivitäten, wie beispielsweise Abrechnungsprüfung, Detailplanung sowie aufwendigen Abstimmungen und koordinativen Tätigkeiten zum e-Bus Vorhaben.

3.2.1.2 AP 2- Mobilität

Der Schwerpunkt in dem von DB Station&Service AG verantworteten AP2 lag in der Planung und Umsetzung des e-Parkplatzes als Grundlage für das Microgrid. Die geschaffene Fläche bietet gesamt 10 Parkplätze mit Lademöglichkeit. Davon wurden sechs für die eCarsharing-Flotte vorgesehen, die vier weiteren wurden über Eigenmittel finanziert und stehen der Öffentlichkeit zur Verfügung. Eine Ladestation wurde in 2015 gegen eine Schnellladesäule im Rahmen des Projekts „Fast E“ ausgetauscht.

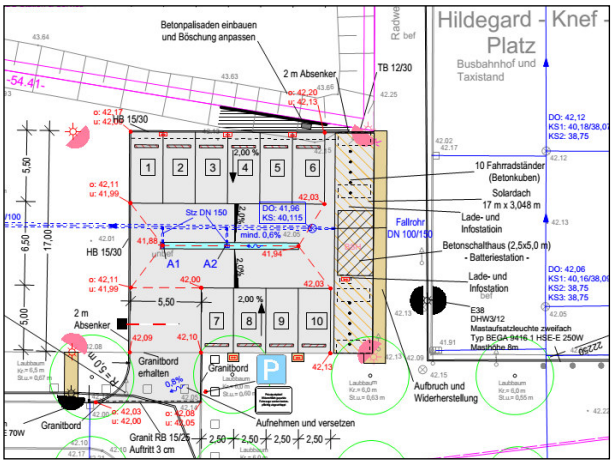


Abbildung 2: Grafik Lageplan Solar-Car-Shelter Bahnhof Südkreuz Berlin

Einen Schwerpunkt in 2005 bildete die Schaffung einer Induktionsinfrastruktur für die BVG-Buslinie 204. Dabei stand die Festlegung einer geeigneten Fläche im Vordergrund. Die Induktionsladefläche wurde in unmittelbarer Nähe des Microgrid (MG) auf dem angrenzenden Hildegard-Knef-Platz geschaffen. Ausschlaggebend für den Standort waren operative Prämissen der BVG und möglichst kurze Kabelführungen zum Bestandsnetz und MG.

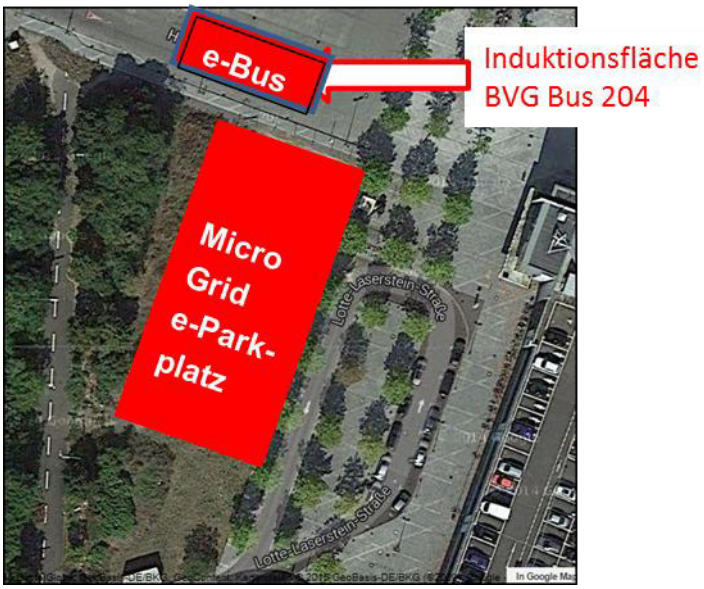


Abbildung 3: Microgrid-Station und Induktionsfläche[2]

Nachdem der Partner Bombardier seine Entwicklung von Induktivmodulen für PKWs und damit seine Mitarbeit in dem Projekt in 2014 eingestellt hatte, wurde die Realisie-

[2] EUCON

rung der Induktiv-Ladefläche für die Buslinie 204 der BVG am Bahnhof Südkreuz mit allen Verantwortlichen der BVG beschlossen.

Diese wurde im ersten Halbjahr 2015 in unmittelbarer Nähe zur Microgrid-Station umgesetzt. Bei der Planung der Microgrid-Station wurde bereits die Einbindung der Induktiv-Ladefläche weitestgehend berücksichtigt. In der ursprünglichen Planung sollte die Induktionsladefläche elektrotechnisch direkt mit dem MG verbunden werden. Aufgrund einer nachträglichen Änderung der technischen Vorgaben durch den Hersteller Bombardier musste die Planung der Kabelführung und des Anschlusses grundlegend überarbeitet werden.

Durch die Konzentration von alternativen Energieerzeugern und –verbrauchern ist ein Hotspot am Bahnhof Südkreuz entstanden, der in dieser Form einzigartig ist. Die Buslinie 204 wurde am 31.August 2015 in Betrieb genommen.

Der operative eCarsharing Betrieb (Die Fahrzeuge wurden aus dem Schaufenster Vorhaben A4 bereitgestellt) durch DB Fuhrpark wurde zum Ende 2014 aufgenommen, der Betrieb der Pedelecs im Sommer 2015. Darüber hinaus stehen derzeit zehn Leihfahrräder von Call-a-bike zur Verfügung. Während der Wintermonate ist der Betrieb von Pedelecs jedoch eingestellt.

Die Vermietungsintensität ist sowohl bei den Elektrofahrzeugen als auch bei den Pedelecs noch schwach ausgeprägt. Bei den Pedelecs liegt es wahrscheinlich an der einmaligen Situation in Berlin und der damit verbundenen Inflexibilität, bei den Elektrofahrzeugen an der mangelnden Bekanntheit.

Zur Erhöhung der Auslastung der eCarsharing-Flotte und zur Erhöhung der Attraktivität der Elektromobilität wurde in Zusammenarbeit mit dem DB Personenverkehr ein neues integriertes Angebot für Berlin erarbeitet, das ein Fernbahnticket mit dem e-Carsharing als eine Einheit vermarktet. Das Angebot ist Anfang 2016 aktiv in den Markt eingeführt worden. Die Akzeptanz des neuen Angebots wird über Monitoring-Maßnahmen nachgehalten.

Der e-Parkplatz wurde im Laufe des Jahres 2015 um eine Schnellladesäule erweitert, die für den individuellen Bedarf ausgelegt ist und damit auch das Ziel der Erhöhung der Bekanntheit der e-Mobilitätslösung am Südkreuz verfolgt.

Für das Arbeitspaket 2 steht Schneider Electric als Projektierungsunterstützung der Elektroinfrastruktur im Projekt zur Verfügung.

3.2.2 Leistungen des Partners Schneider Electric

AP 3 - Energie

Die Firma Schneider Electric hat im AP 3 als hauptverantwortlicher Projektleiter die Projektaktivitäten koordiniert und gesteuert. Sie hat das Microgrid geplant und errich-

tet. Der Partner Reiner Lemoine Institut hat im AP 3 die Windenergieanlagen geplant und erichtet.

Neben der Leitung des Arbeitspakets 3 führte Schneider Electric eine technische Analyse des Ist- Zustands der Elektroinfrastruktur auf dem Bahnhof Südkreuz durch. Weiterhin führte Schneider Electric eine Umsetzungsplanung durch, die dann in der Realisierung der technischen Komponenten von Speicherung, Verteilung und Steuerung der Microgrid Komponenten mündete.

Die technische Detailauslegung des Microgrids und deren Komponenten wurde federführend von der Firma Schneider Electric umgesetzt. Ziel der industriellen Forschungsaktivitäten in diesem Arbeitspaket waren Produkte sowohl auf Hardware- als auch auf Softwarebasis, welche zukünftig in Bahnhöfen und anderen öffentlichen Gebäuden eingesetzt werden können. Der Einsatz dieser Technik verschaffte der Infrastruktur die notwendige Intelligenz, um Teilkomponenten technisch und wirtschaftlich sinnvoll in ein Microgrid integrieren zu können.

Der Bahnhof hat ein eigenständiges Leitsystem erhalten, welches im Weiteren mit dem System am EUREF zu einem „Virtuellen Kraftwerk“ verbunden wurde. Grund ist die Einbindung von realen Nutzerinformationen, diese sollen zunächst auf lokalen Systemen ausgewertet werden und danach anonymisiert an das „Virtuelle Kraftwerk“ übergeben werden.

Diese Technologie eignete sich auch gerade in Hinblick auf die spätere Verwertung besser, um die Akzeptanz der Datenerhebung im Microgrid Kontext zu erhöhen.

Weiterhin wurden Erzeugungsprognosen für das Steuerungs- und Regelungskonzept eingebunden. Die Prognose der Solaranlage wurde in den Steuerungsalgorithmus integriert. Damit bestand die Möglichkeit optimierte Batterieansteuerungen aufgrund prognostizierter Bedarfe zu entwickeln. Durch die Prognose der regenerativen Erzeugung wird der Erzeugungsgang schon ausgeglichen bevor die Erzeugungspitze auftritt. Dies bedeutet ein besseres Regelverhalten des gesamten Microgrids. Grundlage hierfür ist ein „Guthaben“(Ladezustand) in der Batterie, welches es ermöglicht solche Szenarien zu bedienen.

Schneider Electric war maßgeblich an der Installation einer nachführbaren PV-Anlage beteiligt. Eine weitere Überdachungslösung wurde am Bahnhof Südkreuz installiert. Alle Anschlusskomponenten wurden in einem seperaten Container auf dem Bahnhofvorplatz implementiert. Diese Verortungssituation erlaubte desweiteren eine bessere visuelle Vermarktung des Schaufensterprojektes.

Microgrid und elektrische Ausstattung e-Parkplatz

Es wurden 10 Parkplätze zu je einem Ladepunkt für Elektrofahrzeuge erstellt. Dabei teilen sich die Ladepunkte gleichmäßig auf 5 Ladesäulen auf. Der Solar-Car-Shelter

bietet Unterschlupf für eine Batteriestation inklusive aller technischen Einrichtungen wie Solarwechselrichter, Schaltschränke sowie seit dem ersten Quartal 2015 auch einem Speichersystem. Des Weiteren können unter dem Dach, wie in Abbildung 4 zu sehen, Abstell- und Lademöglichkeiten für 10 Pedelecs in Anspruch genommen werden. Die freistehende und zu jeder Seite offene Stahlunterkonstruktion des Solar-Car-Shelters lässt eine öffentliche sowie allseitige Begehung zu. Durch eine solare Einstrahlungsfläche von ca. 57m² und durch Verwendung konventioneller Glas-Folie-Solarmodule wird eine Gesamtleistung von 8,5 kWp erzielt. Abbildung 3 zeigt die Anordnung der Parkplätze, der Batteriestation sowie den Car-Shelter mit den schematisch dargestellten Ladepunkten für die Pedelecs.

Abbildung 4: Ansicht Batteriestation unter Solardach

Die erzeugte Solarenergie wird konventionell in das vorgelagerte Niederspannungsnetz eingespeist, um teilweise die angeschlossenen Elektrofahrzeuge und / oder Pedelecs zu laden. Sofern kein Ladevorgang ansteht, wird die Energie durch ein AC-gekoppeltes 50kWh Li-Ionen-Batteriespeichersystem aufgenommen und zur späteren Verwendung zwischengespeichert. Da der Batteriespeicher aufgrund der begrenzten Kapazität keine Ladevorgänge von mehreren Fahrzeugen vorhalten kann, wird dieser vorrangig zur Lastglättung, auch Peakshaving genannt, verwendet. Durch

die bestehende Möglichkeit der modularen Erweiterung, in Form von Batteriekapazität sowie Lade- und Entladeleistung, ist ein Einsatz über die Lastglättung hinaus jedoch durchaus denkbar.

Der Projektverlauf hat gezeigt, dass für die Carsharingstation auf dem Bahnhof Südkreuz die PV-Anlage in Verbindung mit dem Speichersystem bei der aktuellen Nutzungsrate der Ladestationen noch ausreicht. Bei einer weiteren Zunahme der Elektromobilität wird es an vergleichbaren Standorten jedoch notwendig sein, weitere lokale Erzeuger inklusive Speicher anzuwenden, um den lokalen Verbrauch möglichst emissionsarm zu versorgen. Die Datenerfassung, Überwachung sowie Steuerung aller Lade-, Entladevorgänge sowie Verbraucher- und Erzeugermanagement wurde, wie in Abbildung 5 zu sehen, durch die Schneider Electric StruxureWare SCADA Expert ClearSCADA realisiert. Die Anbindung an das SCADA-System erfolgte zu Beginn über eine UMTS-Anbindung an den EUREF Campus in Berlin. Im weiteren Projeklverlauf wurde durch das RLI eine WLAN-Richtfunkverbindung zum EUREF Campus aufgebaut, was somit weitere Betriebskosten gesenkt hat. Ein intelligenter Algorithmus, der nun eine Erzeugungsprognose integriert, ermöglicht eine Planung des Erzeugungs- und Lastverhaltens, um so einen optimalen Betrieb unter Anwendung unterschiedlicher Key Performance Indicators zu ermöglichen. Im Projekt Intelligente Mobilitätsstation wurde hauptsächlich ein Algorithmus zur Maximierung des Eigenverbrauchs angewendet. Alternativ können bei weiteren Zukunftsbahnhöfen jedoch auch Direktlieferungs- oder Direktvermarktungsszenarien entstehen.

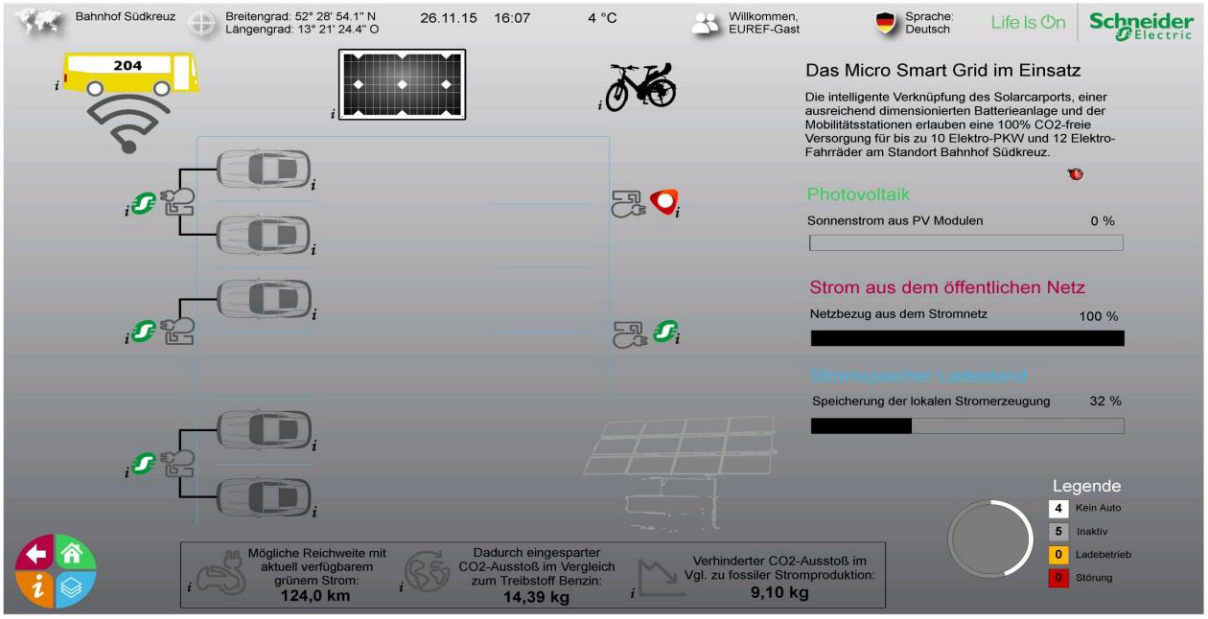


Abbildung 5: ClearSCADA Visualisierung Intelligente Mobilitätsstation

Bezüglich des sicheren Betriebes der gesamten Anlage ist speziell auf die Batteriestation zu achten. Um diesen gewährleisten zu können, wurde ein Sicherheitskonzept zum Thema Batterieraumbelüftung, Sicherheitsabstände sowie Brandschutz auf Grundlage folgender Normen und Richtlinien erstellt:

- DIN EN 50272-2 (Sicherheitsanforderungen an Batterien und Batterieanlagen, Stationäre Batterien),
- AGI Arbeitsblatt J31-1 (Elektrotechnische Anlagen, Bautechnische Ausführung von Räumen für Batterien Batterieräume),
- ASR A2.3 (Technische Regel für Arbeitsstätten),
- DIN VDE 0105 Teil 1 Abschnitt 3.2.3 und 3.2.4. (Sicherheitsstandards im Umgang mit elektrischen Anlagen),
- DIN VDE 0100-729 (Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art - Bedienungsgänge und Wartungsgänge) sowie eine
- Standortanalyse des Microgrid mit Schwerpunkten Blei- und Lithium-Ionen-Batterie durch das KKI (Kompetenzzentrum Kritische Infrastrukturen GmbH).

3.2.3 Leistungen des Partners InnoZ

Das Innovationszentrum für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel (InnoZ) GmbH hat das AP 4 geleitet und im AP 5 als Partner mitgearbeitet. Dabei wurden die im Folgenden dargestellten Leistungen erbracht und Ergebnisse erzielt.

AP 4 - Navigation

Das InnoZ hat das AP 4 geleitet und koordiniert. Wesentliche Aufgabe bestand in dem Ziel, die Umsetzung einer hybriden Ortung unter Nutzung unterschiedlichen Lokalisierungstechnologien, zu erreichen. Diese Aufgabe brachte aus folgenden Gründen eine besondere Herausforderung mit:

- Der assoziierte Partner Nokia hat die zugesagte Unterstützung des Projekts sehr frühzeitig auf das Unternehmen Quuppa übertragen und dann innerhalb der ersten Projektmonate vollständig eingestellt. Dadurch wurde ein wesentliches Entwicklungsziel in diesem AP – die Umsetzung einer hybriden Ortung basierend auf den Ansätzen von WLAN und BLE – gefährdet.
- Der Partner Alcatel-Lucent hat seine Aktivitäten nicht über die volle Projektlaufzeit aufrechterhalten können, da nach einer Konzernrichtlinie die Aktivitäten im Be-

reich Ortungs- und Lokalisierungstechnologien nicht weiter verfolgt werden sollten. (Abschlussbericht Alcatel Lucent – Anlage A.8) In der letzten Projektphase wurde zudem der Konzern mit dem Unternehmen Nokia verschmolzen, wodurch ein vorzeitiger Ausstieg des Partners aus dem Projekt und damit einhergehend eine Beendigung auch der betrieblichen Leistungen (Serverbetrieb) resultierte.

- Eine Erweiterung der WLAN-Infrastruktur innerhalb des Bahnhofs, die für eine sinnvolle Anwendung im Bereich der Indoor-Navigation unabdingbar gewesen ist, mit Kosten veranschlagt wurde, die im Projekt nicht abbildbar waren. Eine erforderliche Erweiterung der WLAN-Infrastruktur konnte zunächst nur durch das informelle einbeziehen der Betreiber von Ladengeschäften im Bahnhof erreicht werden. In einem zweiten Schritte erfolgte jedoch ein Ausbau des WLAN-Netzes mit Unterstützung von DB Station&Service, in dem an den Bahnhofsuhren neue WLAN-Hotspots verbaut wurden.

Trotz dieser Schwierigkeiten konnten die technologischen Ziele, d.h. die Umsetzung eines hybriden Lokalisierungsmoduls erreicht werden. Maßgeblich dazu beigetragen haben folgende Gründe:

- InnoZ konnte den Partner Fraunhofer IIS, mit dem bereits eine Kooperation bestand, als Technologiepartner für das Projekt gewinnen. Das Fraunhofer IIS verfügt mit der awiloc-Technologie über ein Lokalisierungsmodul, das unterschiedliche Lokalisierungstechnologien integrieren kann, so z.B. WLAN und BLE. Die Integration dieser awiloc-lib (Library-Datei) in das HAFAS-System (Informationssystem der Firma HaCon) (Abschlussbericht HaCon Anlage A.9) wurde bereits in einem anderen Projekt (DIMIS) technologisch durchgeführt, so dass hier keine zusätzlichen Aufwände erzeugt wurden.
- Im Laufe des Projekts hat das Thema „Indoor-Navigation“ eine besondere Konjunktur erfahren und genießt heute deutlich mehr Aufmerksamkeit als zu Beginn des Projekts. Diese erhöhte Aufmerksamkeit zeigt sich auch in dem Aufbau einer umfassenden und leistungsstarken BLE-Infrastruktur im Bahnhof Berlin-Südkreuz durch DB Station&Service, die auch dem Projekt bereitgestellt wurde. Nur auf dieser Grundlage war eine Umsetzung und Realisierung des hybriden Ortungsmoduls möglich. Partner für die Schaffung einer Datenbasis war in diesem Zusammenhang das Fraunhofer Institut, den Abschlussbericht finden Sie in der Anlage A.10.

InnoZ hat diese Aktivitäten koordiniert, moderiert und gesteuert. Dies erfolgte auf Grundlage regelmäßiger Arbeitstreffen und Telefonkonferenzen. Das InnoZ hat bei administrativen Aufgaben (Berichte, Anträge) unterstützt und damit die Umsetzung der Ziele beigetragen. Zudem hat InnoZ über den AK Indoor-Navigation zur Vernetzung der Partner und Kommunikation der Arbeitsergebnisse beigetragen. Der AK

Indoor-Navigation hat während der Projektlaufzeit 6 Sitzungen durchgeführt und dabei gemeinsam mit zahlreichen Partnern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Forschung ein Whitepaper verfasst, in dem die F+E-Aktivitäten im Projekt IMS (Entwicklung einer hybriden Ortung) in ein übertragbares Konzept überführt wurden. Im Ergebnis wurde eine Referenzarchitektur zur Sicherstellung der Interoperabilität im Bereich der Indoor-Navigation entwickelt (s. Whitepaper des AK Indoor-Navigation in Anlage A.11).

Als weiteres Ergebnis des Arbeitskreises wurde die Informationsvermittlung bearbeitet. Auch hier konnten zahlreiche Ergebnisse aus dem Projekt IMS (AP 4) einfließen. Die Umsetzung einer geeigneten Informationsdarstellung erfolgte auf Grundlage von Bahnhofplänen (Schemata), die angereichtet wurden mit drei-dimensionalen Darstellung des Bahnhofs aus dem Tool „WorldInsight“ der DB Systel. InnoZ hat dieses System für verschiedene Zwecke im Projekt IMS nutzbringend eingesetzt, u.a. für eine Unterstützung der Orientierung im Bahnhof durch die Erweiterung der Indoor-Navigation mit fotorealistischen Abbildungen. HaCon konnte diese Bilder in die Indoor-Navigation integrieren (s.

Abbildung 6).

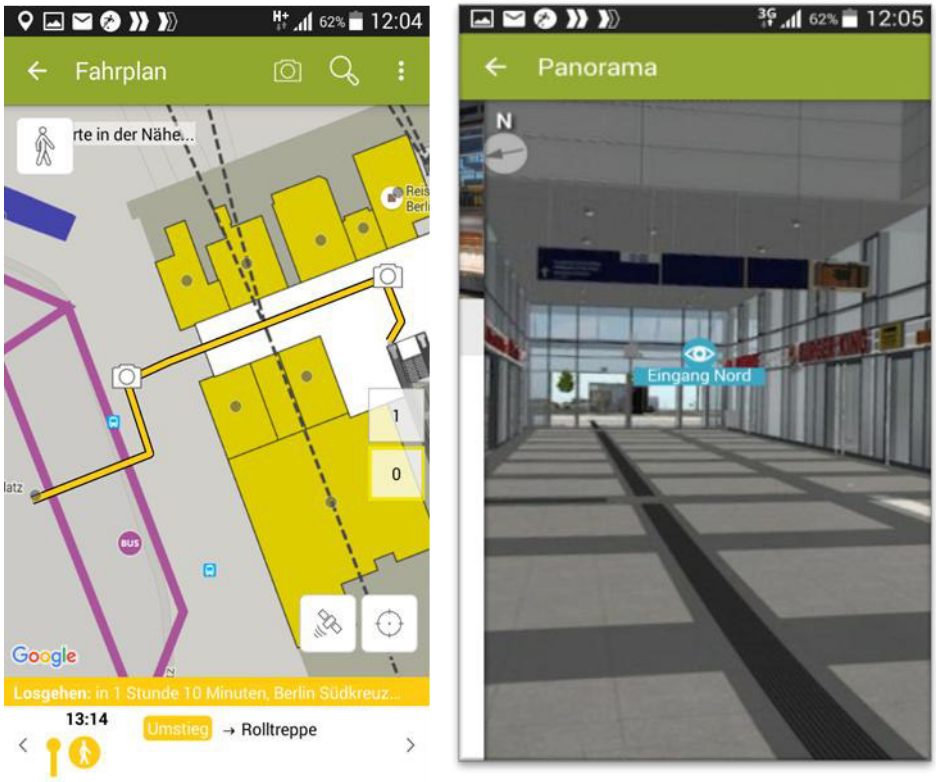


Abbildung 6: Durch einen „Touch“ auf die Fotosymbole können fotorealistische Darstellung des jeweiligen Bahnhofbereichs aufgerufen werden (Screenshots aus IMS-App)

Die wissenschaftliche Begleitung der App-Entwicklung in Form von Usability-Tests wurde aufgrund der engen Kopplung an den Gegenstand (App) im AP4 durchgeführt. damit konnte sichergestellt werden, dass die jeweiligen Personen (App-Entwickler, Usability-Tester) in einem engen Setting kooperieren und Usability-Defizite möglichst effizient behoben werden konnten.

Das InnoZ verfolgt ein mehrstufiges Verfahren bei Usability-Begleitungen, wobei in einem ersten Schritt ein Cognitive Walkthrough durchgeführt wird und erst in den folgenden Phasen Nutzertests. Ein Cognitive Walkthrough ist eine expertenorientierte Introspektionsmethode, die sich im Gegensatz zum empirischen Ansatz der Nutzertests auf einer rein analytischen Basis durchgeführt wird. Bei diesem Verfahren begibt sich ein erfahrener Usability-Experte in die Rolle eines hypothetischen Nutzers und spielt verschiedene Nutzungsszenarien durch, um auf erste Usability-Defizite aufmerksam zu werden. Dieses Verfahren ist besonders gut geeignet, um im Vorfeld von Nutzertests ein funktionstüchtiges und testtaugliches System zu erarbeiten. Die Ergebnisse des Cognitive Walkthrough wurden an HaCon übergeben, um entsprechende Anpassungen an der Applikation vorzunehmen. Die Ergebnisse des Cognitive Walkthrough sind in Anlage A.12 angehängt. Die Nutzertests wurden nicht in diesem Projekt durchgeführt. Das IMS Projekt konnte hier auf die Ergebnisse des Projekts DIMIS zurückgreifen und musste hierfür keine Mittel aufwenden.

AP 5: Demonstrator

Im Rahmen des AP 5 wurden verschiedene projektbegleitende Aktivitäten ausgeführt: a) Wissenschaftliche Begleitung des Projekts (ohne App) und b) Aufbau eines Demonstrators unter Nutzung der WorldInsight-Technologie.

Wissenschaftliche Begleitforschung

Der Fokus der ersten Arbeiten der wissenschaftlichen Begleitung lag auf der Aufarbeitung des Forschungsstandes zum Themenfeld implizites Wissen im Kontext von Innovationsprozessen sowie – daraus abgeleitet – der Konkretisierung des Untersuchungsdesigns für den weiteren Projektverlauf. Die Relevanz dieses Forschungsfeldes liegt darin begründet, dass insbesondere technikgetriebene Innovationen oft eindimensional von Seiten der Unternehmen geplant und implementiert werden. Das fertige Produkt wird in der Folge durch den Nutzer erst am Markt bewertet. Dies birgt das hohe Risiko, dass das fertige Produkt an den Bedürfnissen des Nutzers vorbeigeht und hohe Entwicklungsaufwände abgeschrieben werden müssen.

Am hier gestellten Innovationszusammenhang „Bahnhof“ sind neben dem Anbieter (Bahnhofsmanagement) und Nutzer (Reisende) noch weitere Stakeholder beteiligt, namentlich die Mitarbeiter der Stadtentwicklung sowie die Anwohner und Verbraucher. Das InnoZ verfolgt einen Innovationsansatz, der diese divergierenden Akteurs-

gruppen, die sich durch ihre je spezifische Bedürfnis- sowie Sinnstrukturen auszeichnen, bereits in frühen Phasen der Produkt- und Dienstleistungsentwicklung berücksichtigt, in einen diskursiven Austausch bringt und somit gleichberechtigt am Entwicklungsprozess beteiligt. Die symmetrische Berücksichtigung dieser Akteursgruppen vereint partizipatorische Elemente mit klassischen Innovationsmethoden und schafft durch eine ständige Rückkopplung zwischen Nutzer, Anbieter und politischen Steuerungsorganen höhere Erfolgssicherheit für die zu entwickelnde Problemlösung.

Bei diesem diskursiv und partizipatorisch angelegten Ansatz spielt die Kategorie Wissen eine besondere Rolle und zwar nicht nur in ihrer explizierbaren, verbalisierbaren und objektivierbaren Form (explizites Wissen), sondern vielmehr in ihrer vordiskursiven Erscheinung als implizites Wissen, welches in Handlungsabläufen und -routinen eingebettet ist. Für den Mobilitätssektor ist dieser Aspekt von besonderer Bedeutung, da alltägliches Verkehrsverhalten hochgradig routinisiert ist und meist die Nutzungsmotive und Wertungen den einzelnen Nutzer nicht bewußt sind.

Anknüpfend an die klassischen Definitionen von Ryle (1971) und Polanyi (1985) kann implizites Wissen als eine Form des Wissens beschrieben werden, das vorreflexiv, an Erfahrungen gebunden und in körperlichen Praxen routinisiert ist. Tacit knowing, wie es Polanyi 1958 erstmals beschrieb, „knowing how“ (Ryle [1949] 1969) oder „knowing-in-action“ [1], zielt auf das intuitive Können eines Akteurs, dass dieser nicht mehr aktiv reflektiert. Vielmehr handelt er intuitiv richtig. Als Wissen, das in Handlungen eingebunden ist und somit einen stark performativen Charakter hat (vgl. [2], kann es als nicht- oder vor-diskursiv beschrieben werden.

Der Wert dieses nicht-verbalisierten Wissens liegt für Innovationsprozesse darin begründet, dass die ihm inhärente Normativität „die Anschlussfähigkeit und Fortsetzbarkeit sozialen Handelns garantiert, weil sich entlang dieser impliziten Normativität sozialer Praktiken bestimmt, welche Interpretationen angemessen sind und welche nicht.“ [3]. Um das oben beschriebene Risiko von Innovationsprozessen – ein neues Produkt oder eine Dienstleistung wird am Markt nicht angenommen, da es den Bedürfnissen des Nutzers vorbeigeht – zu minimieren, sollte die Anschlussfähigkeit des Neuen an die Handlungsroutinen der Akteure ein Ziel im Entwicklungsprozess sein. Die im Rahmen des Projekts geplante Weiterentwicklung der verschiedenen Funktionalitäten des Bahnhofs Südkreuz tangiert sowohl funktionale (Einkaufen, Mobilität etc.) als auch normative Fragen (Umweltschonung, soziale Funktion innerhalb eines Quartiers). Kulturelle Anschlussfähigkeit setzt daher voraus, dass wir in der Lage sind, implizite Wissensanteile sämtlicher am Prozess beteiligten Akteure offenzulegen und von einer performativen in eine diskursive Form zu übersetzen. Die Offenle-

gung und das Verstehen impliziter Wissensanteile ist somit eine notwendige Vorstufe eines partizipativen und diskursiven Innovationsprozesses.

Auf der Grundlage der systematischen Auseinandersetzung mit der Bedeutung verschiedener Wissenskategorien für die Entwicklung von Innovationen wurde ein Konzept für eine Methodentriangulation entwickelt. Der Fokus wurde dabei in der Konzeption der methodischen Umsetzung insbesondere auf so genannten empathischen Methoden wie etwa Cultural Probes, ethnographische Interviews und teilnehmender Beobachtung gelegt, um das implizite Wissen der hier relevanten Akteursgruppen offenzulegen. Anschließend wurden co-creation Formate realisiert, in denen sowohl Akteure aus Politik und Wirtschaft als auch Bahnhofsnutzer und -anwohner in einem kollaborativen Prozess Gestaltungsansätze für den Bahnhof Südkreuz entwickelten und validierten (s. Anlage A.13).

In einem weiteren Schritt wurde eine Studie zum Verkehrsverhalten sowie der Wahrnehmung innovativer Mobilitätsangebote von Reisenden vor Ort durchgeführt. Ziel war es die bisherigen Aktivitäten und Ergebnisse des Projekts auf einer übergeordneten, grobkörnigen Ebene Ausschnitthaft zu evaluieren und daraus Abschätzungen auf deren Wirkung schließen zu können.

Die Studie basierte auf einem zweiseitigen, standardisierten paper-and-pencil-Fragebogen (PAPI), mit dem die Interviewenden am 07.09.15 und 08.09.15 eine Vielzahl von Interviews direkt im Feld, d.h. vor und im Bahnhof, durchführten. Der Erhebungszeitraum beschränkte sich auf die Stunden zwischen 09:00 Uhr und 17:00 Uhr. Gemäß des Projektvorhabens hatte die Studie folgende Themen zum Schwerpunkt:

1. Anlass und Aufenthaltshäufigkeit am Bahnhof
2. Orientierung am Bahnhof
3. Wahrnehmung von Mobilitätsdienstleistungen
4. Soziodemografie

Der erste Schwerpunkt verfolgt ein allgemeines Erkenntnisinteresse, um im weiteren Verlauf der Befragung die gegebenen Antworten der Probanden bewerten zu können. Die Punkte zwei und drei bilden den inhaltlichen Schwerpunkt und wurden teilweise offen abgefragt und im Nachgang geclustert. Der vierte Punkt dient wiederum der Einordnung der Befragten.

Eine Darstellung der Ergebnisse befindet sich in Anlage A.14 zu diesem Bericht.

IMS-Demonstrator

Als Beitrag für den IMS-Demonstrator auf dem Bahnsteig der Ringbahn wurde auf Basis des WorldInsight-Modells des Bahnhofs ein Erklärstück konzipiert, das mit animierten Pfaden durch das 3D-Modell des Bahnhofs die verschiedenen Objekte

am Bahnhof erläutert. Dazu wurden Erklärtexte zu den Objekten verfasst und in das Modell integriert. Die Besucher konnten sich so über alle Objekte und deren Positionierung am Bahnhof informieren und einen plastischen Eindruck der innovativen Tätigkeiten am Bahnhof gewinnen (s. Abbildung 7 und Abbildung 8).

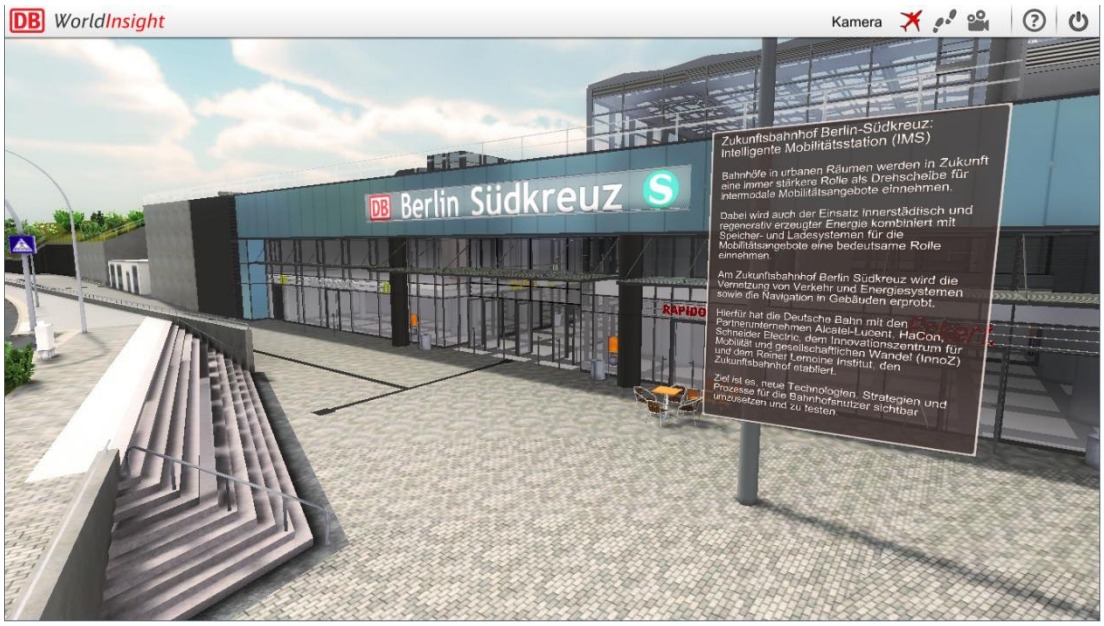


Abbildung 7: Fotorealistische Darstellung des Bahnhofseingangs mit Erklärungstafel zur näheren Erläuterung

Abbildung 8: Visualisierung des Innenbereichs, damit der Bahnhofsbesucher nähere Informationen auch zu den im Projekt IMS installierten Komponenten erhält

Das InnoZ hat als letzten Beitrag im AP 5 eine Befragung unter den Bahnhofsbesuchern durchgeführt, wie weit die Demonstratoren und die neuen Informationssysteme (Wagenstandanzeiger, Mobilitätsmonitor) wahrgenommen und genutzt werden. Im Dezember 2015 wurde eine entsprechende QR-Code-Befragung (Quick Response Code) konzipiert. Ziel war es, mehr darüber zu erfahren wie die Reisenden am Bahnhof Südkreuz die Demonstratoren wahrnehmen und bewerten. Dabei war die These leitend, dass insbesondere technikaffine und innovative Personen an der Befragung teilnehmen werden, die im Verlauf des weiteren Projektes ggf. in die Weiterentwicklung der Inhalte der Demonstratoren einbezogen werden können.

Im Rahmen der Befragung wurde zunächst der Kontext für den Aufenthalt am Bahnhof Südkreuz erhoben, die Demonstratoren durch die Teilnehmer nach spezifischen Merkmalen bewertet, offenes Feedback zu den Demonstratoren erfragt und sozio-demografische Daten erhoben. Der Fragebogen wurde in Zusammenarbeit mit DB Station&Service und RLI entwickelt, anschließend programmiert und ein Aufkleber mit QR-Code konzipiert. Es wurde für jeden Demonstrator ein eigener Fragebogen und entsprechender QR-Code entwickelt, um ein Demonstratoren-spezifisches Feedback zu erhalten (s. Abbildung 9).

Mittels eines im Smartphone integrierten oder per Applikation installierten Scanners, kann der Betrachter der Demonstratoren den Fragebogen aufrufen und an der Befragung teilnehmen. Für Personen ohne QR-Code-Scanner auf dem Smartphone, wurde ein verkürzter URL-Link auf dem Aufkleber platziert, um die Fragebogen-Webseite ggf. auch händisch über den mobilen Internetbrowser aufrufen zu können.

Abbildung 9: Aufkleber für die QR-Code-Befragung zum Kundenfeedback zu den Demonstratoren „Mobilitätsmonitor“ und „Indoor-Navigation“.

Die Befragung wurde Ende Februar 2016 offiziell abgeschlossen. Die bis zu diesem Zeitpunkt erhobenen Daten stellen die Grundlage für den Ergebnisbericht in Anlage A.15 dar.

3.2.4 Leistungen des Reiner Lemoine Institut

AP 3 - Energie

3.2.4.1 Aufbau der Kleinwindenergieanlagen

Auf dem Gelände des Bahnhofs Berlin Südkreuz wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens zwei vertikalachsige Kleinwindenergieanlagen vom Typ KD VK-58 im April 2014 aufgestellt und in Betrieb genommen. Die KD-Anlagen konnten aufgrund ihres geringen Gewichts und der kleinen Aufstellfläche direkt in den Gebäudekomplex des Parkdecks Süd integriert werden.

Abbildung 10zeigt die beiden vertikalachsigen KWEA auf der Auffahrtspindel (links) und dem nördlichen Treppenhaus des Parkdecks Süd. Die Anlagen haben eine Nennleistung von je 1 kW, eine Anlaufwindgeschwindigkeit von 3 m/s, geringe Schallemissionen (im städtischen Gebiet sehr relevant) und Nabenhöhen von ca. 20 m.

Abbildung 10: Kleinwindenergieanlagen KD VK-58 auf der Auffahrtsspindel (links) und dem Treppenhaus am Bahnhof Berlin Südkreuz (rechts) [Quelle: RLI)

In Vorbereitung auf die Errichtung der Anlagen wurden verschiedene Gutachten und Untersuchungen durchgeführt. Ziel war die Bewertung von:

- Schwingungseintrag der Kleinwindenergieanlagen in die Gebäude,
- Schattenwurf und Geräuschimmissionen sowie
- Standsicherheit und Sicherheitsaspekte aufgrund der Nähe zu Fernbahngleisen und Oberleitungen.

Die elektrische Anbindung der KWEA erfolgte jeweils am Treppenhaus und in der Spindel der Auffahrt an das örtliche DB-Netz. Eine Zusammenführung mit den weiteren installierten Komponenten des MGs konnte aus infrastrukturellen Gründen nicht umgesetzt werden. In der Modellierung und Simulation wurde dagegen ein gemeinsamer Anschluss angenommen. Entgegen vorheriger Erwartungen haben sich trotz der relativ freien Anströmung aus Süd- und Westrichtung (Bereich der Hauptwindrichtung) für die KWEA sehr geringe Erträge von je ca. 100 kWh/a in den zwei Jahren ihres Betriebs eingestellt. Die vertikalen Anlagen gelten als geeignet für turbulente Anströmungen, die im städtischen Bereich typisch sind. Dennoch beeinträchtigen die leichte Begrünung im Umfeld und das Bahnhofsgebäude im Osten der Standorte die Windverhältnisse maßgeblich.

Die nachträgliche Integration der KWEA am Standort erforderte einen erheblichen Materialaufwand für die Unterbaukonstruktionen, was durch die Berücksichtigung bei einem Gebäudeneubau vermieden werden kann. Am untersuchten Standort wurde für die Anlagen demnach eine energetische Amortisationszeit von weit mehr als den üblichen zwanzig Betriebsjahren nachgewiesen, siehe dazu auch Tabelle 2. Die spezifischen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) liegen weit über dem Wert des deutschen Strommix' von 535 g CO_2-Äq./kWh [4].

Tabelle 2: Ökologische Kennwerte am Südkreuz [Quelle: RLI]

	Treppenhaus	Spindel	Potential
Kumulierter Energieaufwand in MWh	16	26,8	6,5
Energetische Amortisationszeit in a	62,3	104,1	4,9
THG-Emissionen in g CO_2-Äq./kWh	1.056	1.785	190

Weiterhin erschweren die hohen Zusatzkosten der nachträglichen Integration den wirtschaftlichen Betrieb der vertikalen Anlagen, auch da bereits die spezifischen Kosten (€/kW) von vertikalachsigen KWEA gegenüber horizontalen Anlagen höher sind. Dadurch ergaben sich Stromgestehungskosten von 6,21 €/kWh für die Anlage auf der Spindel bzw. 6,55 €/kWh für die Anlage auf dem Treppenhaus gegenüber ca. 0,8 €/kWh für einen windreichen Standort ohne den erheblichen Mehraufwand für die Installation (siehe in Tabelle 2 „Potential“).

Fazit: Der nachträgliche Aufbau von Kleinwindenergieanlagen an den Bestandsgebäuden der DB AG führte bei der Planung zu einem zeitlichen Mehraufwand, da sowohl die Statik des Gebäudes erneut geprüft als auch geeignete Maßnahmen zur Schwingungsentkopplung getroffen werden mussten. Des Weiteren ergaben sich hohe Kosten für die individuelle Anpassung der Tragstruktur der KWEA und eine aufwendige Montage. Aufgrund der hohen spezifischen Kosten des gewählten Anlagentyps (€/kW) und des eher geringen Energieertrags im innerstädtischen Gebiet ist folglich zu empfehlen, KWEA bereits beim Bau der Gebäude zu berücksichtigen.

Dies ermöglicht eine optisch ansprechendere Einbindung in das Gesamtkonzept von Gebäuden und eine kostengünstigere Umsetzung, da die Anlagen mit den entsprechend vorhandenen Baumaschinen errichtet werden können, siehe hierzu auch Anhang A.1.2.

AP 5 – Wissenschaftliche Begleitforschung

Das Begleitforschungs-Gesamtkonzept wird vom Reiner Lemoine Institut (RLI) verantwortet und umfasst die wissenschaftliche Begleitung/Beratung der Projetpartner bei der Durchführung des Umsetzungsprojektes und die Außendarstellung am Standort wie auch auf Konferenzen. Es ergeben sich drei Teilarbeitspakete:

- technisch-wissenschaftliche Begleitforschung der Energie- und Mobilitätsangebote und deren Bewertung nach Key-Performance-Indikatoren,
- Beforschung von Nutzerverhalten und –akzeptanz,
- Darstellung der Ergebnisse in wissenschaftlichen Publikationen und am Bahnhof selbst mithilfe des Demonstrators.

Das RLI nahm zur AP- und partnerübergreifenden Kommunikation regelmäßig an den Projekttreffen teil und koordinierte die Inhalte aus wissenschaftlicher Sicht. Anfang 2016 führte das RLI mit allen Partnern einen Workshop zum Soll-Ist-Vergleich der Forschungsergebnisse durch und übergab die aufbereiteten Ergebnisse an die Projektpartner.

3.2.4.2 Leistungsflussanalyse - Modellierung und Simulation von Energiesystemen im Kontext der E-Mobilität

Allgemein

Die Elektrifizierung des öffentlichen wie auch privaten Verkehrs z.B. durch den Einsatz von Elektrobussen, die Umrüstung von Carsharing-Flotten wie auch im privaten Bereich bedarf eine zunehmende Kopplung des Verkehrs- mit dem Energiesektor. Dabei muss der zusätzliche elektrische Energiebedarf durch batterieelektrische Fahrzeuge für die Einhaltung der ausgeschriebenen Klimaziele der EU und Deutschlands vor allem durch Erneuerbare Energie bedient werden [5, 6]. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde ein Microgrid (MG) aufgebaut, um den Energiebedarf der Elektromobilität am Bahnhof Berlin Südkreuz zu decken und das übergelagerte Netz zu entlasten. Der Hauptnutzen des MGs sollte vorrangig in der elektrischen Versorgung lokaler Verbraucher (hier: Carsharing-Elektrofahrzeuge und Call a Bike-Pedelecs) mit lokal erzeugter regenerativer Energie liegen. Abbildung 11 umfasst die Komponenten, die im Projekt geplant und in der Simulation zur Untersuchung ökologischer und ökonomischer Aspekte abgebildet und berücksichtigt wurden. Die Pedelecs sind nicht enthalten, da bereits in der Planung ihre messtechnische Erfassung

nicht berücksichtigt wurde und die geringen Batteriekapazitäten der E-Fahrräder gegenüber den E-Fahrzeugen und der stationären Batterie für die Auslegung nicht relevant waren.

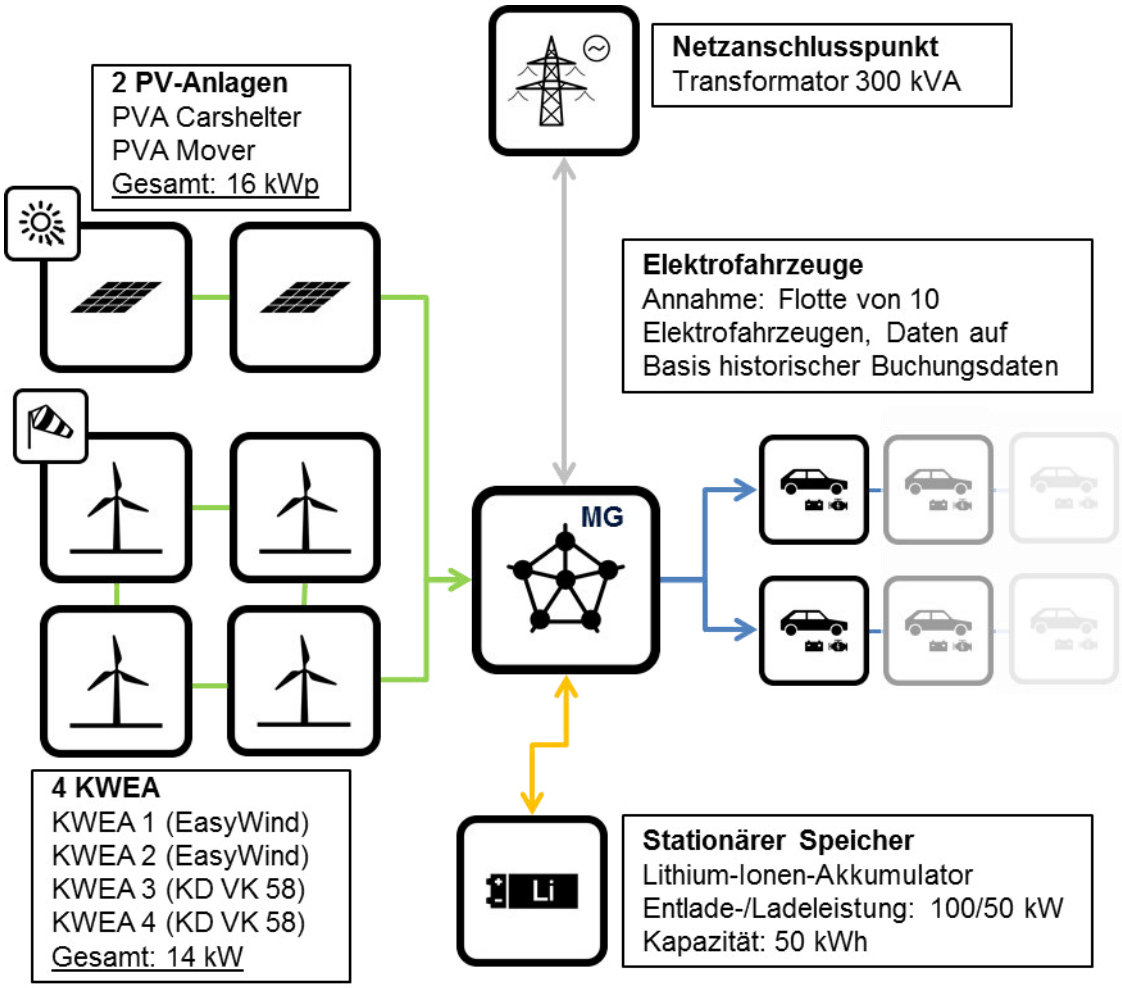


Abbildung 11: Umfang des im Simulationstool abgebildeten Microgrids (MGs)

Ziel der Modellierung und Simulation des MGs ist die Ermittlung von optimalen MG-Dimensionierungen anhand definierter KPI, siehe Tabelle 3. Dafür wurde ein multikriterielles Mehrzieloptimierungsverfahren auf Basis von evolutionären Algorithmen angewendet. Mittels einer eingehenden Parameterrecherche wurden die Komponenten des MGs im Simulationsmodell abgebildet. Dabei wurden sowohl technische als auch wirtschaftliche Parameter berücksichtigt. Die Simulationen erfolgten in 1h-Zeitschritten, für die die Energiebereitstellung bzw. -aufnahme jeder Komponente berechnet wurde. Die zugrunde liegenden Klimadaten stammen aus Datenbanken des DLR [7, 8].

Tabelle 3: Key Performance Indicators, Berechnung und Beschreibung siehe Anhang A.3

Key Performance Indicators (KPI)	Zeichen	Einheit
Levelized Cost of Electricity	*LCOE*	€/kWh
Levelized Cost of Mobility	*LCOM*	€/km
Spezifische Treibhausgasemissionen der Energiebereitstellung	LCE_{MG}	g CO_2-Äq./kWh
Spezifische Treibhausgasemissionen der Elektrofahrzeuge (Well-to-Wheel)	LCE_{BEV}	g CO_2-Äq./km
Energetische Autarkie des MGs	*EA*	%
Zeitliche Autarkie des MGs	*TA*	%

Beschreibung der Komponenten

Das MG am betrachteten Standort dient in erster Linie der Versorgung von **Batterie-elektrischen Fahrzeugen (BEV)**, die an 10 Ladepunkten geladen werden können. Für die Simulation wurde eine synthetische Lastkurve auf Basis von Buchungsdaten von Fahrzeugen der Firma DB Fuhrpark („Flinkster“) generiert, da keine repräsentativen Messdaten einer Carsharing-Station zur Verfügung standen. Demnach wurde das Ende einer Buchung als Startpunkt für die Ladung des Fahrzeugs um die verfahrene Energiemenge angenommen. Die erforderliche Lademenge wurde auf Basis der in den Buchungsdaten enthaltenen Fahrdistanz und dem spezifischen Verbrauch gemittelt über gängige Elektrofahrzeuge berechnet. Die Eckdaten der synthetischen Last sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Eckdaten der Lastkurve für Elektromobilität, weitere Daten im Anhang A.4

Fahrleistung pro BEV und Jahr	9.903 km
Gesamtfahrleistung pro Jahr	99.027 km
Energiemenge pro Jahr	14.854 kWh
Spezifischer Verbrauch	0,15 kWh/km
Maximale Ladeleistung	3,68 kW

Charakteristisch für die synthetische Ladekurve ist die Häufung von Ladung in den Abendstunden und am Wochenende. Dies hat Auswirkungen auf die Wahl einer MG-Topologie mit einem hohen Anteil Eigenversorgung, da häufig in den Abendstunden Energie bereitgestellt werden muss. Dies kann eher durch Windenergie- als durch PV-Anlagen oder aber auch durch Batteriespeicher gewährleistet werden. Weitere Parameter zur Berechnung der Levelized Cost of Mobility z.B. für die Ladeinfrastruktur aber auch die Kosten für die Fahrzeuge befinden sich im Anhang A.4.

Um das energetische Potential für **Kleinwindenergieanlagen** zu ermitteln und den Beitrag von KWEA für die KPI des MGs bewerten zu können, wurden die im Projekt geplanten KWEA vom Typ Amperius VK-58 (im Folgenden KWEA 3 und 4) und Easywind 6 AC (im Folgenden KWEA 1 und 2) mit den Leistungskurven der Hersteller sowie den entsprechenden Kosten abgebildet. Die angenommene Leistungskurve für die VK-58 wurde auf Basis von Messdaten aus dem Parallelprojekt D3 validiert, siehe Anhang A.1. Die Modellierung des Systems wurde entsprechend den anfänglichen Planungen vorgenommen, weshalb der Nicht-Aufbau der zwei horizontalen KWEA nicht berücksichtigt wurde, auch um die Auswirkungen eines horizontalachsigen Anlagentyps auf die KPI des Energiesystems zu untersuchen. Die wichtigsten Werte zu den KWEA sind in Tabelle 5 enthalten, weitere Daten im Anhang A.4 dargestellt.

Tabelle 5: Eckdaten der Kleinwindenergieanlagen, weitere Daten im Anhang A.4

	KWEA 1 & 2	**KWEA 3 & 4**
Nennleistung	je 6 kW	je 1 kW
Einschaltwindgeschwindigkeit	3 m/s	3,5 m/s
Nabenhöhe	20 m	20 m
Rotordurchmesser	6 m	2,4 m

Des Weiteren wurden zwei **Photovoltaikanlagen** modelliert, die am betrachten Standort an der Südseite des Parkdecks (der „Mover“) und auf die Batteriestation an der Carsharing-Station positioniert wurden. Der Mover konnte im Projekt nicht messtechnisch erfasst und auch nicht physisch in das MG integriert werden. Die angenommenen Werte zur Modellierung sind im Anhang A.4 hinterlegt.

Tabelle 6: Eckdaten der PV-Anlagen

	Mover	**Car-Shelter**
Nennleistung	7,5 kW	8,5 kW
Neigungswinkel	15°	30°
Investitionskosten	4.000 €/kW	5.205 €/kW
Zelltyp	Mono-CSI	Poly-CSI

Als elektrischer Energiespeicher wurde eine **Lithium-Ionen-Batterie** im Projekt vorgesehen und so auch in der Simulation abgebildet. Diese wurde in räumlicher Nähe zur Carsharing-Station errichtet und dient der Energieversorgung der E-Ladesäulen. Die Batterie wird mit der Energie der PV-Anlage, die auf der Batteriestation montiert wurde, gespeist. Die maßgeblichen Parameter sind im Anhang A.4 zu finden.

Tabelle 7: Eckdaten der Li-Ionen-Batterie

Kapazität	50 kWh
Lade-/Entladeleistung	50 kW/100 kW
Zulässiger SOC-Bereich	15 – 95 %
Investitionskosten	2.748 €/kWh
Lade-/Entladewirkungsgrad	95 %/ 95 %

Simulationstool

Außerdem sind **Aufbau und Betrieb des MGs** durch Investitions- und Betriebskosten sowie weitere Kenndaten für die Infrastruktur berücksichtigt, siehe Anhang A.4. Modellierung und Simulation findet in einem dreiteiligen selbstentwickelten Programm unter Berücksichtigung der Optimierung von Topologie und Betriebsführung sowie der Übertragbarkeit statt, siehe Anhang A.5. Die Steuerung der MG-Komponenten wird im Simulationsmodell auf Basis einer Energiebilanz über die *n* MG-Komponenten, die elektrische Energie bereitstellen oder aufnehmen, sowie die Netzanbindung vorgenommen:

$$\sum_{k=1}^{n} E_{k,t} = 0 \qquad (1)$$

Priorität bei der Steuerung der Komponenten im Simulationsmodell hat dabei die Deckung des Energiebedarfs der Elektrofahrzeuge an den E-Ladesäulen. Wird zu einem Zeitschritt mehr Energie bereitgestellt als durch elektrische Lasten aufgenommen, lädt zunächst der Batteriespeicher. Sollte der Batteriespeicher nicht weiter beladen werden können, wird überschüssige Energie in das übergeordnete Netz eingespeist. Analog dazu wird bei Unterdeckung der Last durch die Einspeisekomponenten zunächst der Batteriespeicher entladen. Sollte dies nicht möglich sein oder die auftretende Last nicht vollständig gedeckt werden können, wird zusätzlich elektrische Energie aus dem übergeordneten Netz bezogen.

Auf die Steuerung der Einspeisekomponenten (PVA und KWEA) wird kein Einfluss genommen, d.h. bei auftretender Einspeisung wird diese innerhalb des MGs oder des übergeordneten Netzes abgenommen.

Die Steuerung des MGs hat also zum Ziel, bereits eine möglichst hohe Energiebedarfsdeckung durch die Eigenversorgung des MGs zu erzielen, sodass die Ladung der Elektrofahrzeuge mit hohem Anteil regenerativer Energie erfolgt.

Diskussion des geplanten MGs

Als Bestimmung des Referenzfalls wurde der geplante Aufbau des MGs am Bahnhof Berlin Südkreuz analysiert, da ein ausreichende Vermessung der installierten Kom-

ponenten über mindestens ein Jahr nicht möglich war und außerdem einige Komponenten aufgrund infrastruktureller Probleme nicht messtechnisch erfasst werden konnten. Die Laufzeit des MGs wurde auf 20 Jahre angesetzt (i.d.R. die Lebensdauer der Erzeugertechnologien). Die Standortbedingungen, d.h. solare Einstrahlung und Windaufkommen, wurden nicht variiert, sodass die Energiebereitstellung bzw. -aufnahme jeder Komponente in jedem Jahr gleich ist. Als Grundlage dienten die Wetterdaten des DLR vom Jahr 2005. Diese Vereinfachung wurde getroffen, da im Fokus der Betrachtungen der Einfluss der MG-Topologie und –Betriebsführung auf die oben aufgeführten KPI stand. Ebenso wurde der Ladebedarf der BEV am Bahnhof Berlin Südkreuz als über die Jahre konstant angenommen. In einer weiteren Untersuchung wurde die MG-Auslegung bei Zunahme der Elektromobilität gesondert bewertet.

Die Kostenannahmen für die Technologien basieren auf Rechercheergebnissen in 2016. Etwaige Kostensenkung für die Anschaffung von Ersatzbatterien im betrachteten Zeitraum werden nicht berücksichtigt. Die berechneten Stromgestehungskosten werden in den Grafiken mit dem nivellierten Industriestrompreis der nächsten zwanzig Jahre verglichen.

Eine weitere Annahme der Modellierung ist die Vernachlässigung des elektrischen Netzes, d.h. der verlustfreie Austausch von elektrischer Energie innerhalb des MG. Im Wesentlichen ist dies bedingt dadurch, dass die Topologie des elektrischen Netzes im Projektverlauf nicht umgesetzt wurde und die Details für die Modellierung unbekannt waren. Grundsätzlich erhöht sich der Energiebedarf des MGs bei Berücksichtigung der Verlustleistung. Aufgrund der geringen Distanzen zwischen den Komponenten, der damit verbundenen geringen Leitungslängen und der geringen installierten Leistung der MG-Komponenten wird die Verlustleistung vernachlässigt.

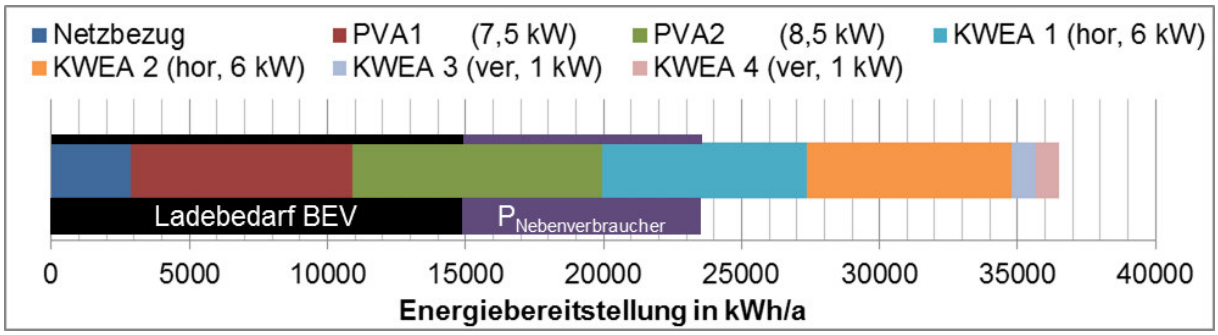


Abbildung 12: Berechnete jährliche Energiebereitstellung der einzelnen Energieerzeuger sowie Netzbezug zur Deckung des synthetischen Ladebedarfs der Elektromobilität (keine Messung)

Die Leistungsflussanalyse des geplanten MG am Standort zeigt zunächst, dass der angenommene Ladebedarf der Elektromobilität durch die installierten Erneuerbare Energieanalgen (EEA) mit 33,6 MWh erzeugte elektrischer Energie bilanziell gedeckt werden kann, siehe dazu Abbildung 12. Dennoch ist aufgrund der zeitlichen Ver-

schiebung von Erzeugung und Energiebedarf Netzbezug mit ca. 2,9 MWh erforderlich. In Abbildung 13 wird deutlich, dass Netzbezug vor allem dann erforderlich ist, wenn die PV-Leistung gering ist, z.B. in den Herbst- und Wintermonaten.

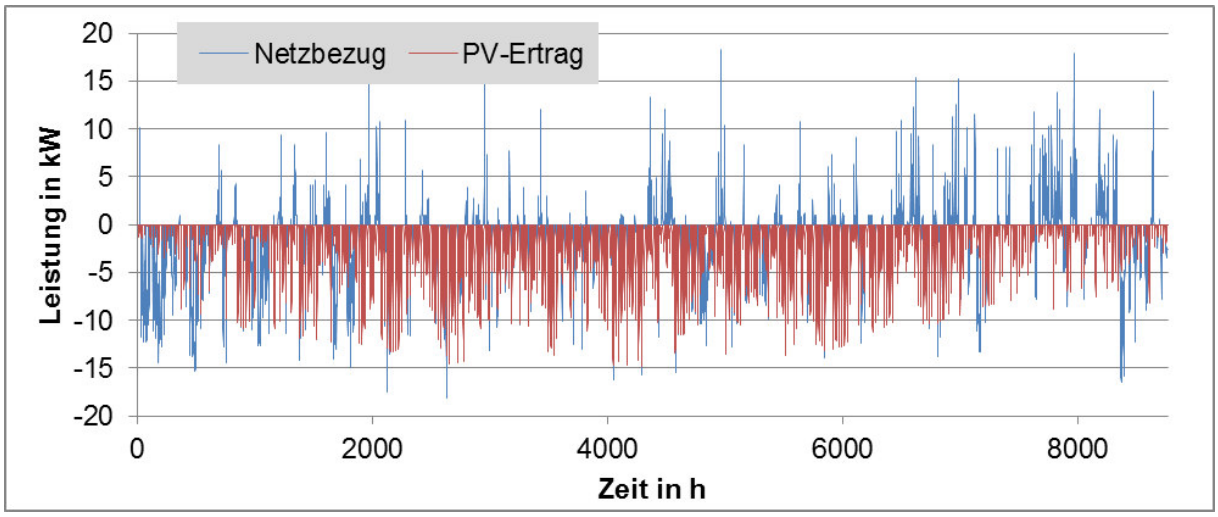


Abbildung 13: Zeitlicher Verlauf des PV-Ertrags (negativ), dem Netzbezug (positiv) und der Netzeinspeisung (negativ) nach Simulation

Hinzu kommt ein verhältnismäßig hoher Energiebedarf für die Steuerung und ihre Konditionierung (Nebenverbraucher), sodass der Gesamtstrombedarf von 14,85 MWh auf 23,61 MWh ansteigt. Die Investitions- und Betriebskosten des Systems werden über die Betriebslaufzeit von 20 Jahren berechnet und münden in der Berechnung der KPI von *LCOE* und *LCOM*. Die Annuität auf Basis der Projektkosten beläuft sich auf 78.263 € und hat einen *LCOE* von 5,27 €/kWh zur Folge. Die hohen Kosten ergeben sich aufgrund der zu Beginn des Forschungsprojektes üblichen Kosten für die verwendeten Innovationstechnologien und die erforderlichen Maßnahmen bei der nachträglichen Integration von EE-Technologien in Bestandsbauten. Für die weiteren Betrachtungen wurden daher Kosten für das geplante MG und die Komponenten eingeführt, die im Zeitraum des Projektes z.B. für die stationäre Batterie erheblich gesunken sind und voraussichtlich weiter fallen werden, siehe Anhang A.4. In Tabelle 8 sind die KPI dargestellt und es wird bereits durch die Anwendung der nun marktüblichen Kosten eine deutliche Reduzierung des *LCOE* um mehr als 60 % erreicht. Der *LCOM* reduziert sich in geringerem Maße, da die Infrastruktur- und Fahrzeugkosten gegenüber dem *LCOE* einen deutlich größeren Einfluss haben. Die THG-Emissionen liegen mit 155,2 g CO_2-Äq./kWh weit unterhalb vom Wert für deutschen Strommix 2015.

Tabelle 8: Berechnete KPI des Referenzszenarios „MG 0“ am Bahnhof Berlin Südkreuz

KPI	MG-geplant	MG-marktüblich
Annuität	78.263 €	29.409 €
LCOE	5,27 €/kWh	1,98 €/kWh
LCOM	1,31 €/km	0,82 €/km
LCE_{MG}	155,2 g CO_2-Äq./kWh	
LCE_{BEV}	23,3 g CO_2-Äq./km	
EA	69,6 %	
TA	70,7 %	

Der hohe Beitrag der erneuerbaren Energieanlagen hat auch auf die spez. Treibhausgasemissionen der Elektrofahrzeuge einen erheblichen mindernden Effekt. Mittels Well-to-Wheel-Analyse werden im geplanten Ausbauszenario spezifische THG-Emissionen von ca. 23,3 g CO_2-Äq./km erzielt und somit die für 2020 bzw. 2021 herausgegebenen Tank-to-Wheel-Grenzwerte bereits unterschritten. Entsprechend der EU-Verordnung Nr. 443/2009 [9], die 2014 nochmals novelliert wurde, liegt der Grenzwert für den durchschnittlichen CO_2-Ausstoß bei 95 g CO_2-Äq./km ab 2021 für die europäische Flotte der PKW-Neuzulassungen. Für Elektrofahrzeuge werden nach [10] keine Emissionen gemessen, sodass sie als emissionsfrei gelten. Ebenso dürfen Fahrzeuge, die weniger als 50 g CO_2-Äq./km emittieren, ab 2020 für mehrere Jahre mehrfach für den CO_2-Ausstoß der Fahrzeugflotte angerechnet werden. Für die Flotten der Fahrzeughersteller bedeutet dies, dass Elektrofahrzeuge den Flottendurchschnitt deutlich senken. Innerhalb einer umfassenden Well-to-Wheel-Analyse mit Berücksichtigung des Fahrzeugs wird sogar deutlich, dass Elektrofahrzeuge bei Ladung des oben angeführten MG-Stroms mit 80,3 g CO_2-Äq./km bereits jetzt weitaus weniger spezifischen THG-Emissionen aufweisen als konventionelle Fahrzeuge mit ca. 170 g CO_2-Äq./km [11].

Die energetische Autarkie des Referenzszenarios beträgt 69,6 %. Das MG ist vom übergeordneten Netz demnach im erhöhtem Maße abhängig, da sowohl überschüssige Energie ausgespeist (ca. 13 MWh) und andererseits in der kalten Jahreszeit (mit geringem PV-Ertrag) Strom aus dem Netz bezogen werden muss. Die zeitliche Autarkie im Referenzszenario ist mit 70,7 % etwas höher. Es wird deutlich, dass für einen höheren Autarkiegrad der Energiespeicher sowohl für die bereitgestellte Energie aus den (ungesteuerten) erneuerbaren Energieanlagen im MG als auch für die vollständige jährliche Deckung der elektrischen Last durch die Elektrofahrzeuge größer dimensioniert sein muss, siehe dazu auch folgende Untersuchungen zur Optimierung von MG.

Abbildung 14 veranschaulicht den Anteil der Komponenten an der Energiebereitstellung, den Kosten sowie den THG-Emissionen. Der Batterie wird keine Energiebereitstellung

zugeordnet, da sie nur der temporären Speicherung dient und nicht als Erzeuger gilt. Aufgrund der Verteilung der THG-Emissionen innerhalb ihres Lebenszyklus auf das sogenannte „First Life“ im Projekt und einen möglichen Folgeeinsatz außerhalb des Projektes im „Second Life“ sind die ökologischen Belastungen durch die Batterie mit 8 % an den gesamten THG-Emissionen gering. Die Kosten dagegen belaufen sich auf ca. 50 % der Gesamtkosten, auch weil die Batterie mit einer vorhergesehenen Lebensdauer von ca. 6 Jahren mehr als zweimal innerhalb der Betriebszeit des MGs von 20 Jahren ersetzt werden muss. Ein möglicher Weiterverkauf wurde nicht berücksichtigt. Die finanzielle Belastung durch die Batterie kann dadurch demnach noch gemindert werden. Der Netzbezug hat den größten Anteil an der ökologischen Belastung, jedoch einen nur sehr geringen Anteil an der Energiebereitstellung. Bei allen Erzeugeranlagen mit Ausnahme der vertikalen KWEA 3 und KWEA 4 ist der prozentuale Anteil an der Energiebereitstellung höher als ihr Beitrag zu den Gesamt-THG-Emissionen ist. Die ökologische Bilanz der vertikalen KWEA wird hauptsächlich durch den erhöhten Materialaufwand für die spezielle Unterkonstruktion und die damit verbundenen höheren THG-Emissionen gemindert.

Planung und Betrieb des MGs und der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) tragen mit ca. 9 % zu den Kosten bei und dürfen bei der Kalkulation nicht unberücksichtigt bleiben, auch wenn hier nicht zwangsläufig mit einem Skaleneffekt zu rechnen ist.

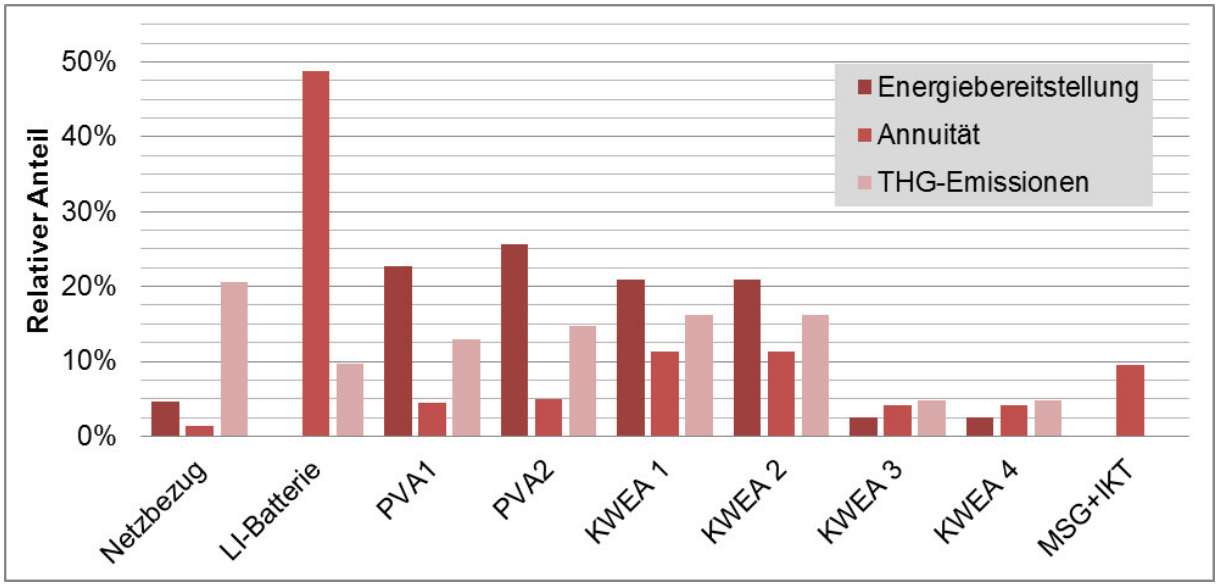


Abbildung 14: Relativer Vergleich der Energiebereitstellung, Kosten und THG-Emissionen der einzelnen Komponenten innerhalb einer Betriebszeit von 20 Jahren nach Simulation

Die Vergütung für eingespeiste Energie beträgt für die KWEA 8,2 €ct/kWh und für die PVA 12,56 €ct/kWh, siehe Anhang A.4. Im besten Fall würde bei einer gleichzeitigen Einspeisung aller Komponenten in das überlagerte Netz nach [12] die eingespeiste Energie nach der Komponente mit dem höchsten Vergütungssatz vergütet, in diesem

Fall also die PVA. Im angenommenen Maximalfall, in dem die gesamte regenerative erzeugte Energie in das überlagerte Netz eingespeist wird, beträgt der Erlös durch die Vergütung etwa 1.600 €/a. Die Annuität würde in diesem Fall auf ca. 27.800 € sinken. Aufgrund der unklaren finanziellen und rechtlichen Regelungen für den Betrieb eines MG wird im Folgenden die Vergütung daher nicht berücksichtigt. Die Situation vor Ort stellt sich weiterhin derart dar, dass die DB Energie GmbH sowohl Anlagenbetreiber der MG-Komponenten, d.h. auch von PVA und KWEA, als auch Energieversorger des Bahnhofs Berlin Südkreuz ist, in dessen Verteilung Überschüsse aus dem MG eingespeist werden. Eingespeiste Energie wird also zunächst in ein anderes Netz des gleichen Energieversorgers eingespeist, genutzt und daher nicht vergütet. Erst Überschüsse, die über die Verbindungsstationen von der bahneigenen Stromverteilung zum öffentlichen Netz (Betreiber: Stromnetz Berlin) eingespeist werden, könnten vergütet werden. Aufgrund vergleichsweise großen Energiebedarfs am Bahnhof Berlin Südkreuz tritt dieser Fall voraussichtlich nicht ein.

MG-Optimierung zur Kostensenkung und Verbesserung der ökologischen Bilanz

Das geplante Ausbauszenario MG 0 am Bahnhof Berlin Südkreuz mit den kennzeichnenden KPI, siehe Tabelle 8, diente als Referenz für die folgende Optimierung mittels der in [13] entwickelten Methodik. Die durchgeführten Simulationen sollten demnach die Potentiale zur Senkung der Kosten und THG-Emissionen sowie zur Erhöhung der Autarkie aufzeigen. Die Methodik umfasst eine Optimierung der Topologie und Betriebsführung des MG, die die Variation der installierten Leistungen und Kapazitäten der Energieerzeuger und –speicher beinhaltet, siehe dazu auch Anhang 0. Die Varianten der Optimierung umfassen:

- Optimierungsvariante 1 (OV 1), in der mittels Topologieoptimierung die Netzentlastung erhöht wird,
- Optimierungsvariante 2 (OV 2) mit Drosselung der EEA zur weiteren Kostensenkung und
- Optimierungsvariante 3 (OV 3) mit Netzeinspeisung statt Drosselung zur Senkung der spezifischen THG-Emissionen.

Die Bestimmung der Obergrenze für die PV-Anlage orientiert sich an der Fläche der Parkdecks am Bahnhof Berlin Südkreuz. Weitere Aufstellflächen in der Umgebung bestehen ebenfalls, wurden jedoch nicht explizit berücksichtigt. Die Obergrenze für die Windenergieanlagen unterliegt einer Abschätzung des Flächenaufkommens am Standort. In erster Linie soll die Relevanz der Windenergie in Ergänzung zur Energiegewinnung aus PV-Anlagen bewertet werden. Inwiefern eine größere Stückzahl an KWEA am Standort tatsächlich aufgestellt werden kann und dadurch außerdem der Ertrag der Anlagen untereinander noch beeinträchtigt wird, wurde in den folgen-

den Untersuchungen nicht berücksichtigt. Die Grenzen der Variationen sind Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Auflistung der Parametervariationen für die Optimierung

Optimierungsparameter	Wertebereich
PVA – Installierte Leistung [kWp]	0 … 3.200
Horizontale KWEA – installierte Leistung [kW]	0 … 20
Vertikale KWEA – installierte Leistung [kW]	0 … 20
Batterie – installierte Kapazität [kWh]	0 … 9.000

Im MG am Bahnhof Berlin Südkreuz bezieht sich die Betriebsführungsoptimierung vorrangig auf die Drosselung der installierten EEA. Dies ist dann sinnvoll, wenn aus Kostengründen bspw. anteilig Batteriekapazität durch Überbebauung von EEA ersetzt werden soll.

Optimierungsziele waren anfangs die Minimierung der Stromgestehungs- und folglich Mobilitätskosten, sowie die Erhöhung der Autarkie oder auch Selbstversorgung des MGs vor dem Hintergrund, die lokal auftretenden erhöhten Lasten und Energiebedarfe durch die Elektromobilität auch lokal zu decken und damit das übergeordnete Netz bzw. den Netzanschlusspunkt zu entlasten.

Die Untersuchung verschiedener möglicher MG-Konfigurationen (nach Optimierungsvariante 1, siehe auch Anhang A.5) führte zu der Erkenntnis, dass Autarkie und Stromgestehungskosten im klaren Widerspruch zueinander stehen, siehe dazu auch Abbildung 15. Je unabhängiger das MG vom übergeordneten Netz sein soll, desto höher sind die Investitions- und folglich auch die Betriebskosten für die vor allem steigende Batteriekapazität. Wie in Tabelle 10 zu sehen, ist zur bilanziellen Deckung des Ladebedarfs bereits eine installierte EE-Leistung von ca. 23 kW_p ausreichend. Mit zunehmendem Anspruch an die Autarkie muss die Batteriekapazität steigen, damit die Energie der EEA in ausreichendem Maße gespeichert werden kann, da die Ladung der BEV zeitversetzt auftritt.

Tabelle 10: Auslegung der Komponenten eines MGs nach Optimierungsvariante 1 (OV 1)

Parameter	Kennzahl
Windleistung	Ø 7 kW
PV-Leistung	Ø 16 kW
Batteriekapazität	60 – 3.600 kWh

Die Optimierung OV 1 zeigt, dass die Kosten gegenüber dem geplanten MG („MG 0“) geringfügig verringert werden können, bei gleichzeitiger Steigerung der Autarkie um etwa 3 Prozentpunkte, siehe Abbildung 15 - rote Punkte. Dies wird durch die Reduzierung der Windleistung erreicht, die im Vergleich zur PV-Leistung sehr teuer ist. Die weitere Steigerung der Autarkie über 85 % hinaus ist jedoch nur durch einen enormen Zubau von Batteriekapazität von bis zu 3,6 MWh zu erreichen. Dadurch werden die Investitions- und folglich die Stromgestehungskosten erheblich erhöht, wodurch weiterhin kein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist.

Drosselung von EEA zur Vermeidung kostenintensiver Batteriekapazität

Der Anspruch erhöhter Energieautarkie an ein MG konnte innerhalb der ersten Optimierungsvariante nur durch hohe Stromgestehungskosten aufgrund sehr hoher zu installierender Batteriekapazität erreicht werden. In der zweiten Optimierungsvariante wurde aus diesem Grund die Abregelung von EEA in Betracht gezogen, wodurch jedoch auch die Volllaststunden der Anlagen gemindert werden. Für Windenergieanlagen hat das keinen erheblichen nachteiligen Effekt, da sich mit der Einsatzzeit auch die Belastungen auf Rotor, Antriebstrang und Turmstruktur verringern und die Anlagen folglich länger betrieben werden können. PV-Anlagen jedoch sind weiterhin vor allem der durch Sonneneinstrahlung erzeugten Hitze ausgesetzt, sodass von einer merklichen Verlängerung der Betriebszeit nicht ausgegangen werden kann.

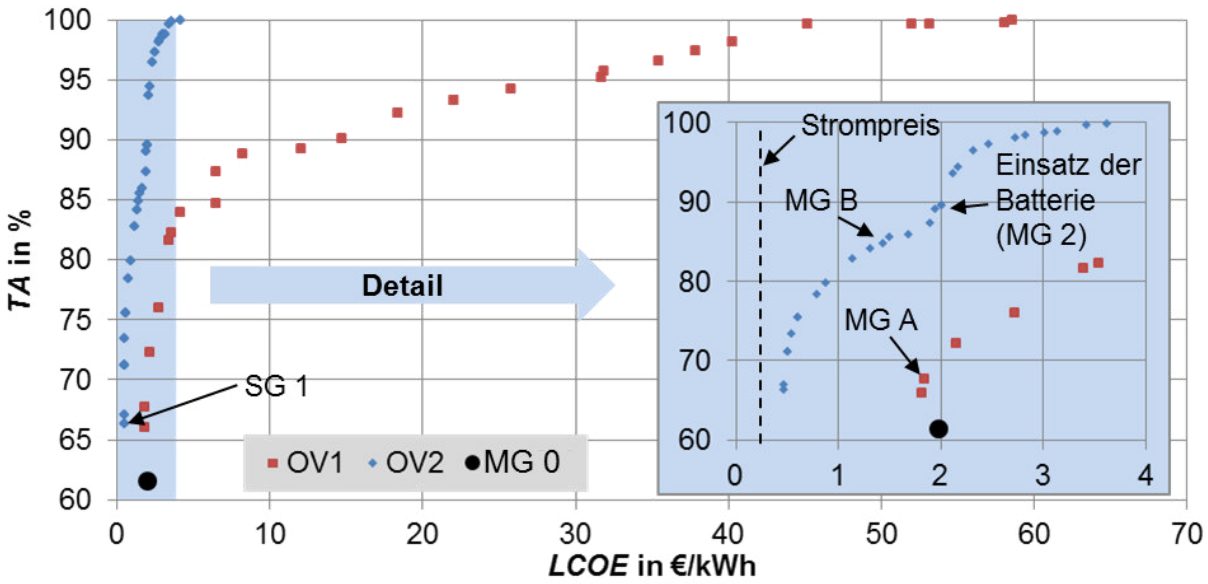


Abbildung 15: Vergleich der zeitlichen Autarkie über den spezifischen Systemkosten für Microgrids mit (OV2) und ohne (OV1) Drosselung der EE-Anlagenleistung; Weiterhin hohe Kosten erfordern zusätzliche Maßnahmen für eine wirtschaftliche Betriebsweise eines Microgrids; Erläuterung zu hervorgehobenen Microgrids folgt im Text; markierter Strompreis repräsentiert den nivellierten Industriestrompreis über 20 Jahre

Die Optimierung mit EE-Drosselung (OV 2) führt zu erheblichen Reduzierungen der Stromgestehungskosten, wie in Abbildung 15 zu sehen. Der *LCOE* kann bei einer *TA* von ca. 70 % von etwa 2 €/kWh auf 0,5 €/kWh gesenkt werden. Dies liegt darin begründet, dass ein kleines PV-System aufgebaut wird, dessen erzeugter Strom je nach Ladebedarf direkt den BEV zugeführt wird. Für die Zeiträume, in denen keine BEV an der Ladeinfrastruktur angeschlossen sind, werden die PV-Anlagen abgeschaltet, sodass kein überschüssiger Strom erzeugt und ins übergeordnete Netz eingespeist wird (das per Definition die Autarkie des Systems mindern würde). Teure Batteriekapazität wird bei dieser Betriebsweise des MGs demnach erst ab einem Autarkiegrad von ca. 89 % erforderlich (MG 2), jedoch sind die Stromgestehungskosten an diesem Punkt für einen wirtschaftlichen Betrieb bereits nicht mehr darstellbar.

Die Mobilitätskosten (*LCOM*) liegen bei Versorgung durch reine PV-Systeme bei 0,59 (MG 1) bis 0,81 €/km. Die Kosten steigen weit weniger stark als der *LCOE*, da bei geringem jährlichem Ladebedarf vor allem die Infrastrukturkosten, so z.B. für die Ladesäulen, dominieren, die nicht Teil der Optimierung waren. Demnach verdoppelt sich hier der *LCOM* lediglich bei einem jedoch 16-mal höheren *LCOE*. Bei einem Vergleich mit den Mobilitätskosten eines konventionell angetriebenen Vergleichsfahrzeugs von ca. 0,30 €/km [14] wird deutlich, dass die Elektrifizierung eines Fuhrparks aktuell wirtschaftlich noch nicht konkurrenzfähig ist. Politische Anreizprogramme wie eine Kaufprämie und die weiter sinkenden Investitionskosten für BEV (vor allem durch Kostensenkung der Batterien) führen perspektivisch zu einer preislichen Angelichung.

Die spezifischen THG-Emissionen liegen bei reinen PV-Systemen noch bei knapp unter 500 g CO_2-Äq./kWh, siehe dazu auch MG 1 in Tabelle 10. Durch den Einsatz der Batterie werden diese deutlich auf ca. 55 % des Wertes des deutschen Strommix‘ gesenkt, siehe z.B. MG 2. Die THG-Emissionen für den gefahrenen Kilometer (Well-to-Wheel) liegen bei der Optimierungsvariante OV 2 i.d.R. weit unterhalb des bereits angesprochenen Grenzwertes von 50 g CO_2-Äq./km, sodass die Vorteile eines lokalen Energiesystems aus ökologischer Sicht hier selbst bei einer Well-to-Wheel-Betrachtung bereits gegeben sind. Dieser Zusammenhang kann entscheidend für die Elektrifizierung von Fuhrparks und Flotten sein, wenn der Hauptantrieb in der Verbesserung der ökologischen Bilanz der Autos bzw. des Unternehmens liegt.

Tabelle 11: Auslegungsparameter und KPI der Microgrids mit verschiedenen Betriebsstrategien und auch Ladebedarfen; Diskussion von OV 3 und OV 3 (+) folgt weiter unten

# OV	-		2		3	3 (+)	
Konfiguration	**Kein MG**	**MG 0**	**MG 1**	**MG 2**	**MG 3**	**MG 4**	**MG 5**
E_{Bedarf} *in MWh/a*	14,85					742,7	
LCOE in €/kWh	0,25	1,98	0,47	1,94	0,79	0,27	0,40
LCOM in €/km	0,56	0,82	0,59	0,81	0,64	0,50	0,52
TA in %	64,5	61,5	67	89,1	78,5	26,3	50,3
$P_{wind,ges}$ in kW	0	14	0	6	6	55	120
$P_{pv,ges}$ in kW	0	16	5	28	23	208	585
Cap_{bess} in kWh	0	50	0	60	0	20	160
LCE_{MG} in g CO_2-Äq./kWh	535	155	486	295	169	381	299
LCE_{BEV} in g CO_2-Äq./km*	80,3	23,3	72,9	44,3	25,4	57,2	44,9

* Well-to-Wheel-Berechnung

Einfluss der Betriebsstrategie auf Topologie und Robustheit des Energiesystems

Die in OV 2 eingeführte Änderung der Betriebsstrategie führt, wie in Abbildung 15 dargestellt, zu einer erheblichen Kostenreduktion. Dies ist vor allem darin begründet, dass teure Batteriekapazität durch die Überbauung von EE-Anlagenleistung teilweise ersetzt wird. Die zulässige Betriebsstrategie hat demnach erheblichen Einfluss auf die notwendige Topologie des Energiesystems. Dies wirft automatisch die Frage der Zuverlässigkeit/Robustheit des Systems auf, da die Effektivität von PV-Anlagen von verschiedenen Parametern wie Azimut- und Neigungswinkel abhängen, der Ertrag der Windenergieanlagen besonders durch die Nabenhöhe beeinflusst wird und maßgebliche Auswahlkriterien für Batterien die kalendarische Lebenszeit und die Lade-/Entladerate sind. In der folgenden Betrachtung wurde demnach untersucht, welchen Einfluss die komplette Substitution der Batterie von MG A zu MG B, siehe Tabelle 12, durch höhere installierte EE-Leistung auf die Stabilität des MGs haben.

Tabelle 12: Vergleich der zwei Konfigurationen MG A und MG B zeigt, dass die Änderung der Betriebsstrategie zur Kostenreduktion bei gleichzeitiger Zunahme der Autarkie führt.

# OV	Konfiguration	*LCOE* in €/kWh	*TA* in %	$P_{wind,ges}$ in kW	$P_{pv,ges}$ in kW	Cap_{bess} in kWh
1	MG A	1,84	67,7	6	16	60
2	MG B	1,31	84	12	56	0

Im Rahmen einer Monte-Carlo-Simulation wurde durch Variation verschiedener Parameter, die fertigungs- und auch planungsbedingt variieren können (siehe Tabelle 23), das Systemverhalten der MG untersucht und der Einfluss der entsprechenden Parameter bewertet.

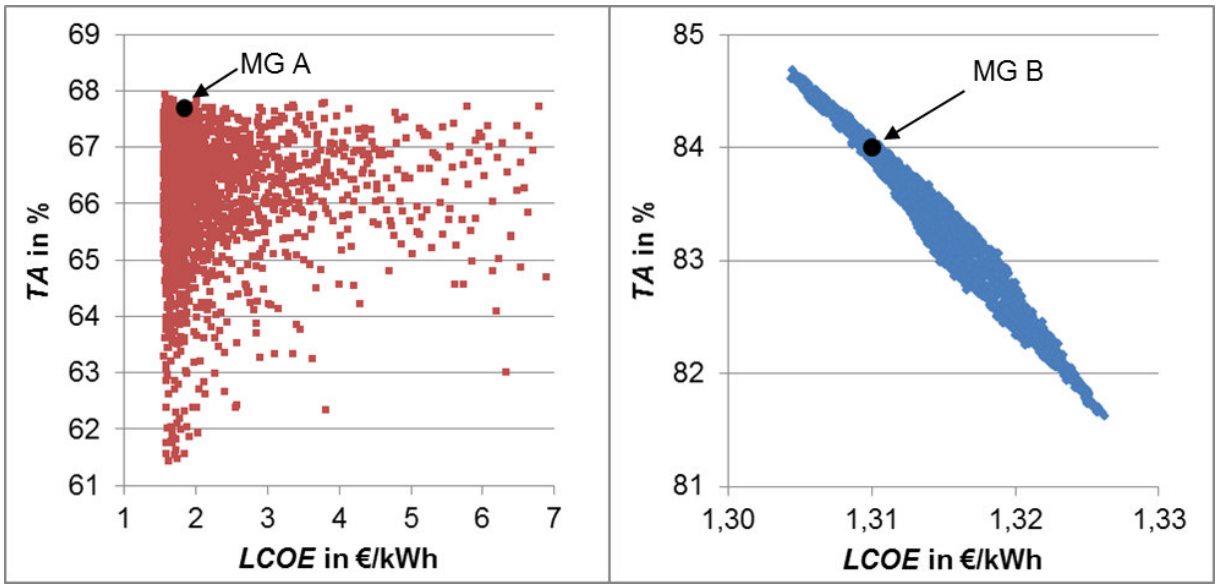


Abbildung 16: Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass MG B ohne Batterie deutlich geringer auf Abweichungen der Auslegungsparameter der EE-Technologien reagiert. Die Batterie hat demnach maßgeblichen Einfluss auf die Robustheit eines Energiesystems

In Abbildung 16 wird die Streuung der KPI von MG A (links) und MG B (rechts) dargestellt. Die Variation der Auslegungsparameter hat auf die KPI von MG A einen sehr großen Einfluss, sodass die Autarkie um ca. 6 Prozentpunkte sinken und der *LCOE* um ca. 6 €/kWh steigen kann, sobald die entscheidenden Parameter der installierten Technologien von den Referenzwerten (MG A) abweichen. Durch die Substitution der Batterie wird die Streuung folglich deutlich reduziert (siehe MG B). Der *LCOE* schwankt innerhalb von ca. 2 €Cent/kWh und die Autarkie mit etwa drei Prozentpunkten. Die Robustheitsanalyse hat als wesentliche Einflussfaktoren die Nabenhöhe der Kleinwindenergieanlage und die kalendarische Lebensdauer der Batterie identifiziert, siehe Anhang A.6. Mit sinkender Lebensdauer der Batterie erhöhen sich demnach die annuitätischen Kosten für ihre Anschaffung. Außerdem folgt mit Abnahme der Nabenhöhe eine deutlichere Beeinträchtigung des Ertrags der Kleinwindenergieanlagen, als es die Ausrichtung der PV-Anlage auf den PV-Ertrag hat. Die Robustheit von MG B basiert demnach auf der sehr hohen installierten PV-Leistung und wird nur geringfügig durch die vergleichsweise geringe installierte Windleistung beeinträchtigt.

Die Robustheitsanalyse zeigt, dass Abweichungen zwischen Auslegung und ursprünglichen Annahmen komponentenabhängig unterschiedlich starke Einflüsse auf

die Güte des MGs haben. Demnach beeinträchtigt gerade die Batterie bei unvorhergesehener Batteriecharakteristik den Umsetzungserfolg des MG. Im Sinne der Robustheit ist eine Überdimensionierung und bedarfsgerechte Abregelung von EEA im betrachteten Szenario vorzuziehen

Ist Energieautarkie eines Microgrids ein geeignetes Optimierungsziel?

Die Kostenoptimierung hat PV-Systeme als geeignete Energieversorgung für Ladeinfrastruktur von BEV bei geringem jährlichem Ladebedarf von hier ca. 15 MWh hervorgebracht. Jedoch liegen die THG-Emissionen noch weit über dem Wert sowohl des deutschen EE-Mix mit ca. 105 g CO_2-Äq/kWh [15] als auch des im Projekt geplanten Systems MG 0 mit 155 g CO_2-Äq./kWh. Die Einführung von Batterien ermöglicht bei autarken Energiesystemen ab einem bestimmten Punkt eine deutliche Senkung der THG-Emissionen. Dennoch stellt sich die Frage, inwiefern Energieautarkie eines lokalen Energiesystems ökonomisch und ökologisch sinnvoll ist.

In der dritten Optimierungsvariante OV 3 wurde demnach in Betracht gezogen, die EE-Erzeugeranlagen der in den nach OV 2 identifizierten MG bei Überproduktion nicht abzuregeln, sondern deren überschüssige Energie in das übergelagerte Netz einzuspeisen. Auf den ersten Blick widerspricht das dem oben erwähnten Anspruch an ein lokales Energiesystem, das öffentliche Netz zu entlasten. Am untersuchten Standort, dem Bahnhof Berlin Südkreuz, ist das MG jedoch an das DB-eigene Stromnetz angeschlossen, dass sowohl die hohen Lasten des Bahnhofsgebäudes/-geländes als auch des DB-Schienenverkehrs bedient. Eine erhöhte Einspeisung der Energie aus EEA aus dem MG in das übergeordnete DB-Netz ist demnach lediglich durch die Anschlussleitung des MGs limitiert, siehe dazu auch Kapitel 3.2.4.3**.**

In Abbildung 17 sind die spezifischen THG-Emissionen für MG-Konfigurationen der Optimierungsvarianten OV 2 und OV 3 dargestellt. Die Topologien der MG mit gleichem *TA* sind identisch, jedoch führt die Erhöhung der nutzbaren Energiemenge aus den EEA durch die Netzeinspeisung in OV 3 erwartungsgemäß zu einer deutlichen Senkung der spezifischen THG-Emissionen (g CO_2-Äq./kWh). Die mit der EE-Anlagenleistung generell steigende THG-Belastung des Systems geht einher mit einer Zunahme des Ertrags im Energiesystem (OV 3). Dadurch wird der Netzstrom soweit verdrängt, dass sein Einfluss auf die ökonomische Bilanz ab einem *TA* von ca. 85 % keinen besonderen Einfluss mehr hat. In OV 2 konnte die Hinzunahme einer Batterie noch eine erhebliche Senkung der THG-Emissionen hervorrufen, da überschüssiger Strom der EEA in der Batterie gepuffert werden und Netzbezug weiter reduziert werden konnte. Durch den deutlich erhöhten Energieertrag der ungedrosselten EEA in OV 3 ist dieser Sprung nicht mehr vorhanden.

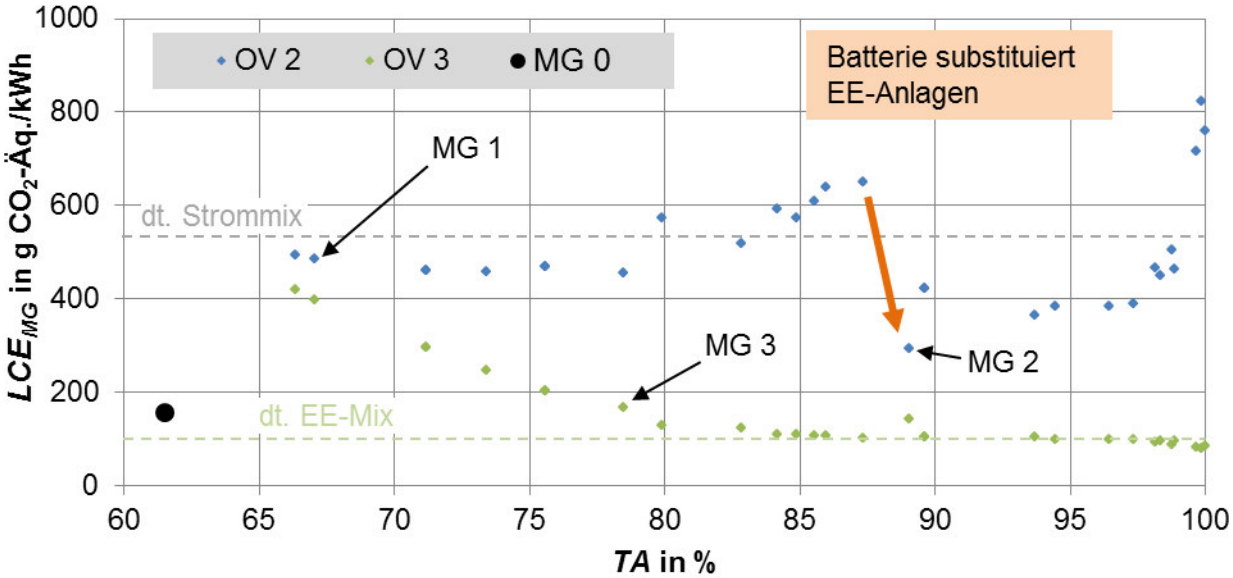


Abbildung 17: Die Netzeinspeisung überschüssiger Energie (OV3) als Gegenmaßnahme zur Abregelung von EEA (OV 2) führt zu einer deutlichen Reduzierung der spezifischen THG-Emissionen auf das Niveau des deutschen EE-Mix.

Die MG-Betriebsführung, wie sie in OV 3 vorgesehen wurde, führte wie erwartet zur Verbesserung der ökologischen Bilanz der Energiesysteme. Grundsätzlich kann sich für den Betreiber des MGs zusätzlich ein ökonomischer Vorteil durch die Netzeinspeisung ergeben, der in OV 3 aufgrund der konservativen Annahme einer Nicht-Vergütung des eingespeisten Stroms unberücksichtigt bleibt. Am untersuchten Standort ist dieses Szenario allerdings auch nicht anwendbar, da wie oben bereits erwähnt, das übergeordnete Netz DB-eigen ist und überschüssiger Strom beim Betreiber verbleibt, der dementsprechend seinen Netzbezug für die Versorgung des Bahngeländes und –gebäudes sowie weiterer Verbraucher reduzieren kann.

Die Optimierung des Energiesystems zeigt erhebliches Potential sowohl für eine Kosteneinsparung bei der Energiebereitstellung und den Mobilitätskosten als auch hinsichtlich der Reduzierung der Umweltbelastungen durch die Versorgung von batterieelektrischen Fahrzeugen, die an den Ladesäulen an der Carsharing-Station geladen werden. Bei Vollversorgung der BEV mit deutschem Strommix entstehen Belastungen von ca. 160 t Treibhausgasemissionen im betrachteten Zeitraum von 20 Jahren. Bereits das geplante MG 0 hat eine Reduzierung der THG-Emissionen um knapp 70 % zur Folge. Abbildung 18 zeigt darüber hinaus eine deutliche Senkung der Stromgestehungskosten um mehr als 50 % bei gleichzeitiger Senkung der THG-Emissionen (MG 2 nach MG 3). Maximal mögliche THG-Einsparungen gegenüber dem Szenario ohne MG betragen durch die Optimierung mit OV 3 (MG 3) über 60 % THG-Emissionen. Dabei wird ein Großteil des erzeugten Stroms aus dem MG auch den im DB-eigenen Netz angeschlossenen Verbrauchern zugeführt.

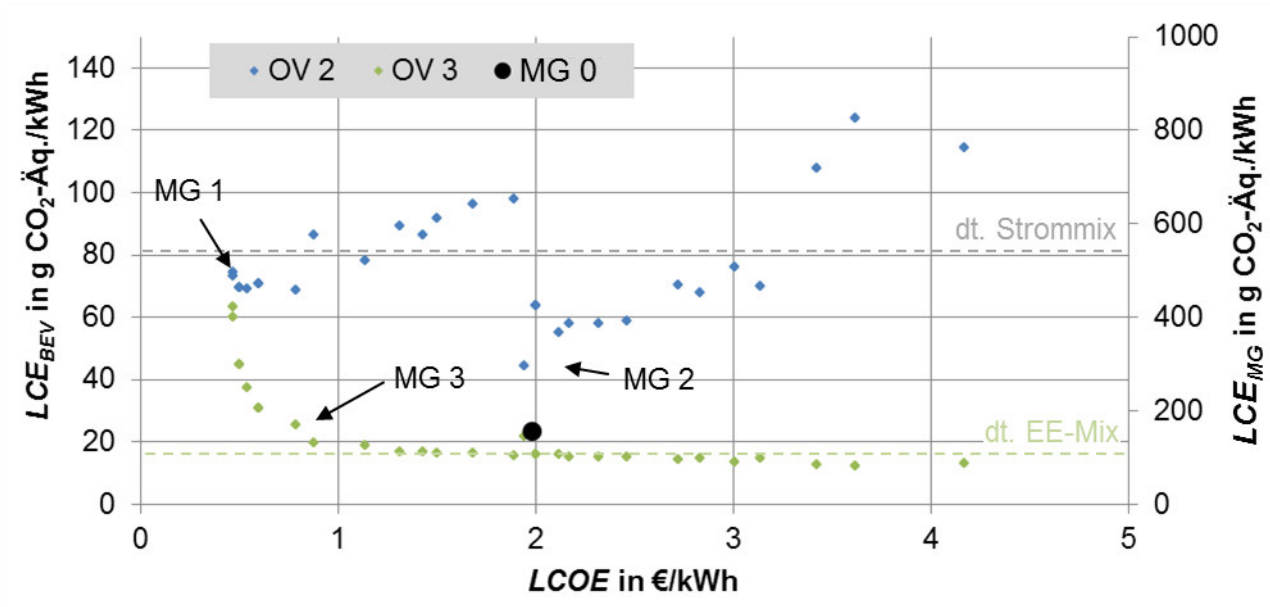


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen THG-Emissionen und Stromgestehungskosten für die Optimierungsvarianten OV 2 und OV 3; OV 3 bietet eine Senkung der THG-Emissionen bei gleichzeitiger deutlicher Reduzierung der Stromgestehungskosten um etwa 50 %.

Die spezifischen THG-Emissionen für die Fahrzeuge sinken im gleichen Zuge auf bis zu 12 g CO_2-Äq./km und liegen damit bei einem Viertel des oben erwähnten Grenzwertes für die bevorzugte Behandlung innerhalb von Fahrzeugflotten. Das unterstreicht abermals die hohe Bedeutung von MG als lokale Energiesysteme für die Versorgung von Elektrofahrzeugflotten.

Einfluss steigender Mobilitätsnachfrage durch das E-Mobilitätsziel 2020

Die bisherigen Untersuchungen konnten das Potential für die Senkung der THG-Emissionen unterstreichen. Sowohl die Stromgestehungskosten als auch die Mobilitätskosten mit 0,79 €/kWh bzw. 0,64 €/km, siehe MG 3 in Tabelle 11, sind jedoch gerade aufgrund eines verhältnismäßig geringen jährlichen Energiebedarfs für die BEV noch zu hoch. Aus diesem Grund wurde im weiteren Verlauf ein Zukunftsszenario in Anlehnung an das ausgeschriebene Ziel der Bundesregierung entworfen. Demnach sollen bis zum Jahr 2020 eine Million Elektroautos auf deutschen Straßen fahren [16]. Für die Mobilitätsstation Bahnhof Berlin Südkreuz bedeutet dies eine erhebliche Steigerung des Energiebedarfs, den es durch das MG zu decken gilt. Auf Basis der Annahme eines 50-fach größeren Ladebedarfs (im Vergleich: ca. 20.000 BEV auf dt. Straßen in 2015) wurde der Lastgang der bereits betrachteten Mobilitätsszenarien modifiziert und das MG mittels Optimierung der KPI erneut ausgelegt. Es wurde angenommen, dass sich die Lasten zeitlich stärker verteilen, siehe auch [17] und die Lastspitzen im Stundenmittel um etwa den Faktor 20 erhöhen, siehe dazu Abbildung 19.

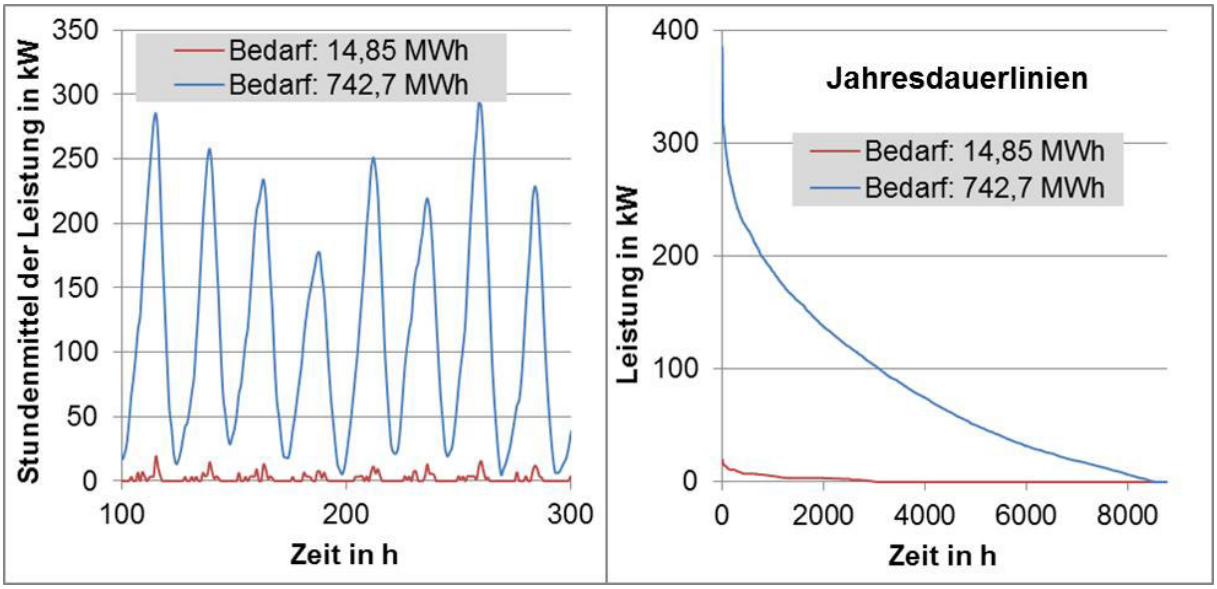


Abbildung 19: Links – zeitlicher Verlauf des Ladebedarfs der Elektromobilität mit stärkerer zeitlicher Verteilung bei erhöhtem Bedarf; Rechts – Jahresdauerlinie mit deutlicher Steigerung der stündlichen Leistungsmittelwerte und Abnahme der Zeiten ohne Ladebedarf; Es wird von einem Zubau der Ladepunkten von 10 auf 200 ausgegangen.

In Abbildung 20 ist der Autarkiegrad über den Stromgestehungskosten für MG mit geringem (OV 3) und 50-fach höherem Ladebedarf (OV 3 (+)) dargestellt. Bei Zunahme des Ladebedarfs am Bahnhof werden relative Kosteneinsparungen für die Energiebereitstellung von bis zu 53 % erreicht. Dies liegt vor allem an einer höheren zeitlichen Übereinstimmung von Stromerzeugung durch die EEA und dem Ladebedarf durch die BEV. Begünstigend wirkt sich weiterhin die Verstetigung des Ladebedarfs aus, wie in Abbildung 19 – links zu sehen, da der hohe PV-Ertrag im MG zu einem höheren Anteil direkt in die BEV geladen wird und die Notwendigkeit einer Zwischenspeicherung durch eine Batterie abnimmt. Eine weitere Folge ist die Senkung der Mobilitätskosten auf bis zu 0,50 €/km (MG 4). Dies wird nicht nur begünstigt durch die reduzierten Stromgestehungskosten, sondern auch durch die relativ (zu den Gesamtstromkosten gesehen) geringeren Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur. Aufgrund der zeitlich besseren Verteilung des Ladeaufkommens werden die Lastspitzen bei der angenommenen 50-fach höheren Ladebedarf nur um den Faktor 20 erhöht. Die Ladeinfrastruktur muss demnach in einem geringen Maße ausgebaut werden, als es die Steigerung des Ladebedarfs dies annehmen lässt.

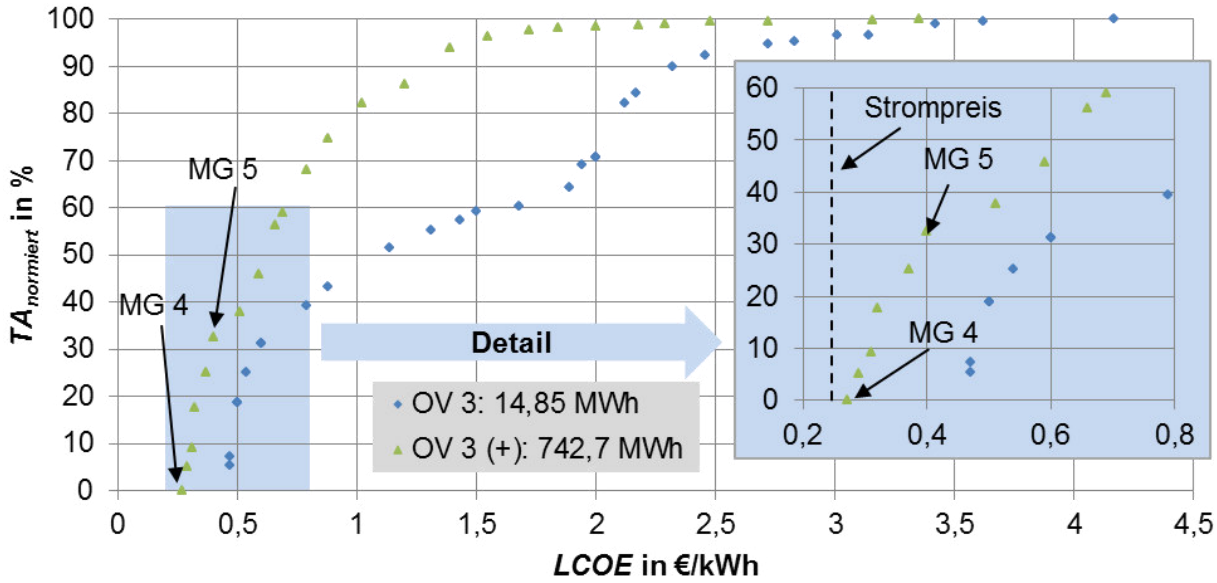


Abbildung 20: Höherer Ladebedarf bewirkt Senkung des LCOE vor allem im oberen Autarkiebereich; Autarkiegrad wurde hier für anschaulichen Vergleich normiert.

Die Zunahme des Ladebedarfs hat nur einen geringen Einfluss auf die spezifischen THG-Emissionen, wie in Abbildung 21 zu sehen. Der qualitative Verlauf der Kurven für OV 3 und OV 3 (+) ist annährend gleich. Die Werte liegen grundsätzlich unterhalb derer des dt. Strommix. MG 4 und MG 5 weisen im Speziellen aufgrund des erhöhten Ladebedarfs geringere *LCOE* bzw. *LCOM* bei gleich bleibenden THG-Emissionen auf. MG 4 nährt sich darüber hinaus dem Strompreis und damit der Netzparität an.

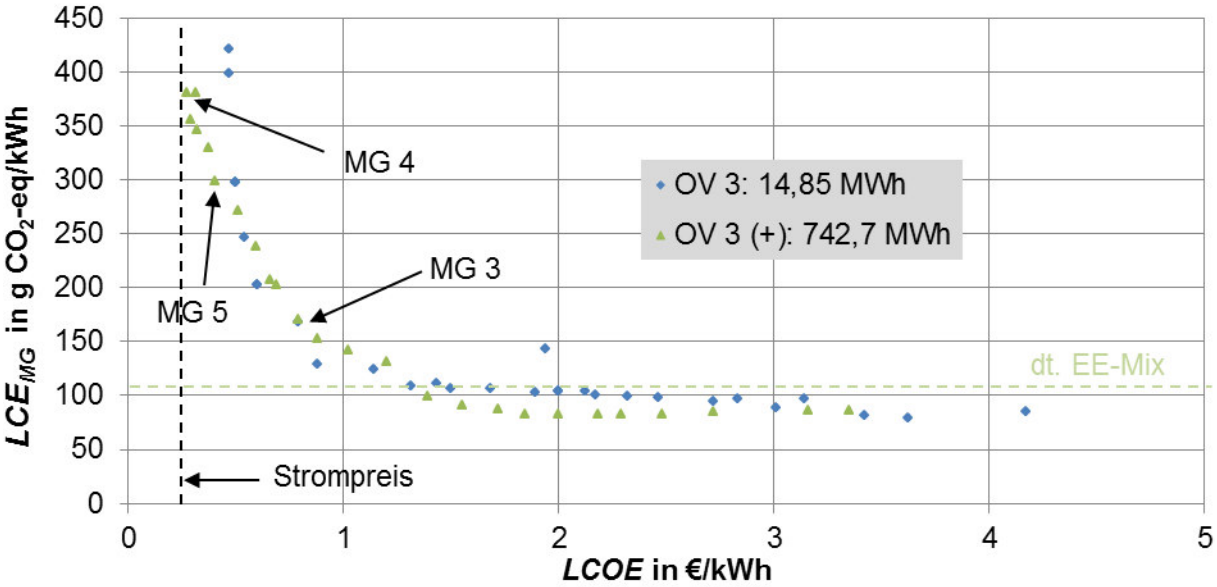


Abbildung 21: Vergleich der spezifischen THG-Emissionen für Systeme zur Deckung geringer Ladebedarfe (OV 3) und hoher Ladebedarfe (OV 3 (+)) an der Carsharing-Station am Bahnhof Berlin Südkreuz

Zusammenfassung der Ergebnisse für den Individualverkehr

Die Elektromobilität wird in den nächsten Jahren weiter zunehmen. Dieser zusätzliche elektrische Energieverbrauch wird die weitere Ausgestaltung des Energieversorgungssystems maßgeblich beeinflussen. Die Kombination aus Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge und einem dezentralen Energiesystem, wie es am Bahnhof Berlin Südkreuz errichtet wurde, gewinnt demnach an Relevanz sowohl für eine nachhaltige Versorgung von BEV als auch für die Unterstützung des überregionalen Stromnetzes. Die Anwendungsgebiete erstrecken sich dabei nicht nur auf den öffentlichen Raum sondern auch auf:

- Gewerbegebiete zur Versorgung der BEV von Mitarbeitern, wie auf dem EUREF-Campus in Berlin,
- Unternehmen mit großen Fuhrparks (mit z.B. Flurfahrzeugen),
- Wohnquartiere, in denen die Anwohner zunehmend auf Elektromobilität umsteigen werden usw.

Eine der größten Motivationen beim Umstieg auf ein Elektrofahrzeug ist die Reduzierung der THG-Emissionen gegenüber einem konventionellen Fahrzeug. Bereits die Verwendung von dt. Strommix verringert die Emissionen für den Antrieb um etwa 30% (Well-to-Wheel-Wert exkl. THG-Emissionen für Herstellung des BEV, Tank-to-Wheel-Wert für konv. Fahrzeug), siehe auch Abbildung 22. Dieser ökologische Vorteil wird jedoch durch steigende Mobilitätskosten begleitet, da sich Elektrofahrzeuge gegenüber vergleichbaren konventionellen Fahrzeugen durch höhere Investitionskosten auszeichnen. Die Inanspruchnahme der aktuellen Kaufprämie von 4.000 € bewirkt Einsparungen von lediglich ca. 7 €Cent/km. Das Referenzfahrzeug wurde in unten stehender Abbildung mit einem Ford Ka 1.2 verglichen (Preis: 9.900 € nach [14]). Die spezifischen THG-Emissionen der Fahrzeuge (Well-to-Wheel) liegen mit Verwendung von dt. Strommix („kein MG“) jedoch bei noch sehr hohen 80 g CO_2-Äq./km.

Folglich müssen Microgrids nicht nur den Anspruch an die Netzentlastung bedienen sondern durch die Bereitstellung lokal erzeugter Erneuerbarer Energie die ökologische Bilanz von Elektroautos verbessern. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die THG-Emissionen durch eine fein abgestimmte Topologie und eine geeignete Betriebsstrategie bei annährend konstantem *LCOM* um ca. 50 % gesenkt werden können, siehe Abbildung 22.

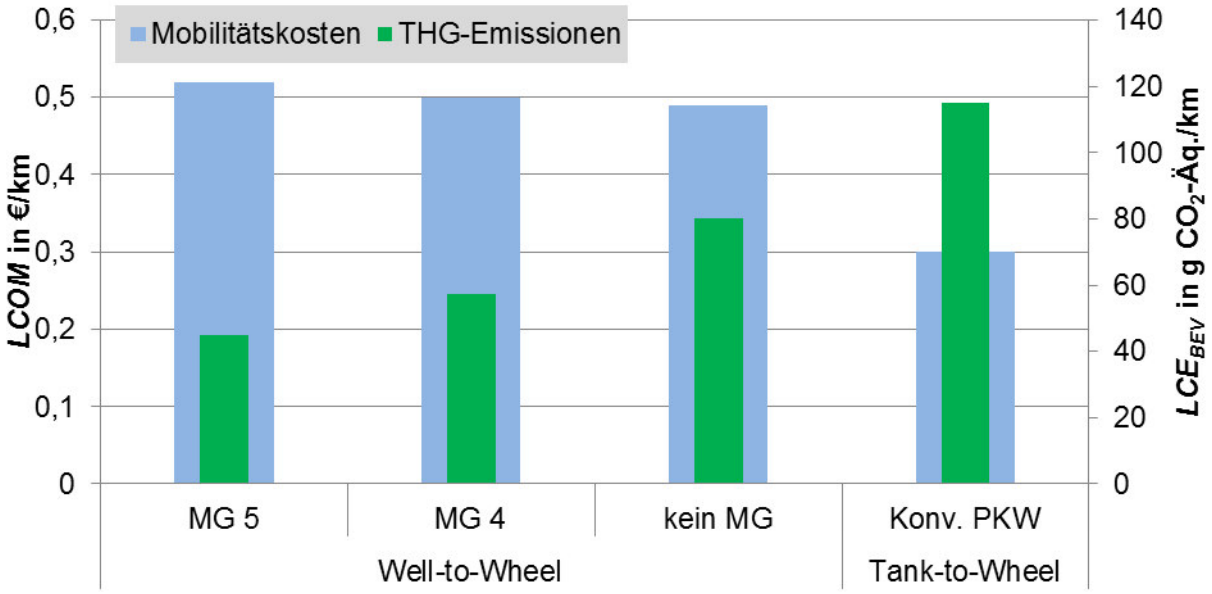


Abbildung 22: Die Mobilitätskosten (aus OV 3 (+)) für die optimierten MG 4 und 5 gleichen den Kosten für die Ladung mit dt. Strommix (kein MG). Die THG-Emissionen für die Antriebsleistung können durch ein optimiertes Microgrid jedoch halbiert und gegenüber dem konventionellen Vergleichsauto beinahe auf ein Drittel gesenkt werden.

Mit der zunehmenden Elektrifizierung im Verkehrssektor wird der Gesamtenergiebedarf in Deutschland weiter steigen. Zur Erreichung der ökologischen Ziele muss der zusätzliche Energiebedarf vor allem durch EE-Anlagen gedeckt werden. Diese Anforderung aus der Sektorkopplung von Verkehr und Energie wird ebenso begleitet durch den angestrebten Atomausstieg bis 2022, sodass der Ausbau Erneuerbarer Energie durch verschiedene Maßnahmen und Akteure umgesetzt werden muss. Die hier vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass mit dem Einsatz eines MGs nicht nur der lokale Energiebedarf durch die Elektromobilität gedeckt, sondern darüber hinaus auch ein erheblicher Beitrag zur gesamtdeutschen Stromversorgung geleistet werden kann. MG-Betreibern kann demnach eine erhöhte Bedeutung in der zukünftigen Stromversorgung zuteilwerden. Dabei ist die optimale Auslegung eines MGs durch die vorgestellten Optimierungsmethoden sowohl hinsichtlich der Topologie als auch der Betriebsführung für den wirtschaftlichen Erfolg entscheidend. Darüber hinaus werden mit der Netzeinbindung die spezifischen THG-Emissionen deutlich verringert. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, lokale Energieerzeugung und öffentliche Stromerzeugung sinnvoll zu kombinieren.

Diese mögliche Entwicklung wird begleitet von finanziellen Zusatzbelastungen durch die EEG-Umlage, die dem MG-Betreiber anteilig (perspektivisch 40 %) auf den eigenverbrauchten Strom seiner EEA angerechnet wird. Demgegenüber steht die Einspeisevergütung, die der Betreiber durch die Direktvermarktung generieren muss. Maßgeblich für den wirtschaftlichen Erfolg sind jedoch vor allem der sinnvolle Einsatz

der Batterie (durch z.B. Lastspitzenkappung), die weiteren Preissenkungen für die EE-Technologien und die optimale Topologieauslegung und Betriebsführung.

Die absolute lokale Energieautarkie von Microgrids ohne Verbrauchsmanagement ist nach aktuellem Stand ökologisch nicht sinnvoll und ökonomisch nicht tragbar, da die Autarkie nur durch kostenintensive Batteriekapazität oder erhebliche Drosselung der EEA erreicht wird. Durch die weitere Preissenkung der EEA und der Batterie kann eine allgemeine Kostensenkung erwartet werden. Dennoch müssen lokale Energiesysteme alternative Aufgaben übernehmen, um wirtschaftlich tragfähig zu sein. Dabei bieten sich Betriebsstrategien an, in denen Batterien in erster Linie als Leistungsspeicher anstatt als Energiespeicher eingesetzt werden, um die Lastspitzen zu kappen und den Leistungspreis zu senken. Entsprechende Analysen fanden bereits im Rahmen von [18] statt und unterstreichen das wirtschaftliche Potential (hier: im Falle einer Autobahntankstelle). Unter den aktuellen Rahmenbedingungen lohnt sich der Einsatz von Batterien vor allem am Markt für Primärregelleistung zur Frequenzhaltung. Hierdurch wird jedoch nicht automatisch eine Entlastung bei Einspeise- oder Bezugsspitzen geschaffen. Ein weiteres netzdienliches Potenzial von Speichern liegt in der dynamischen Spannungshaltung durch Q(U)-Regelung, um die Wirkleistungsaufnahmefähigkeit des Netzes als auch der lokalen Verbraucher zu erhöhen [19].

Betrachtung des Öffentlichen Nahverkehrs

In einer weiteren Untersuchung wurde der öffentliche Nahverkehr betrachtet. In einem Parallelprojekt zum B2-IMS wurde die Alltagstauglichkeit von Elektrobussen untersucht. Dafür wurde die Buslinie 204 zwischen dem Bahnhof Zoologischer Garten und dem Bahnhof Berlin Südkreuz mit insgesamt 4 Bussen elektrifiziert. Um die generellen Systemkosten dieser Elektrifizierungsmaßnahme zu bewerten, wurde dieses Szenario unabhängig vom Individualverkehr untersucht.

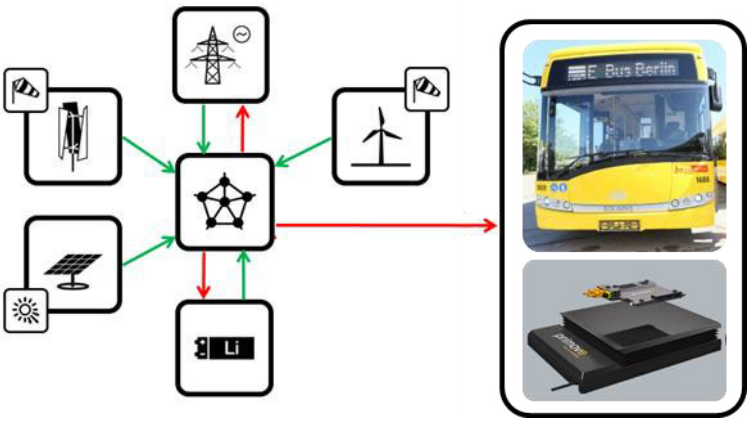


Abbildung 23: Betrachtete Komponenten des Microgrids für das ÖPNV-Szenario (Quelle: oben [20], unten [21])

Die Auswertung des Fahrplans ergab einen Energiebedarf von 163 MWh pro Jahr. Dabei wurde vorausgesetzt, dass die Busse an beiden Endhaltstellen am Zoo und am betrachteten MG am Bahnhof Berlin Südkreuz geladen werden. Die Ladung erfolgt über eine Induktionsladestation. Die Randbedingungen für das MG hinsichtlich Fixkosten und Betriebskosten werden aus den vorangegangenen Szenarien übernommen. Lediglich die Zusammensetzung der Ladeinfrastruktur und die Kosten für die Fahrzeuge wurden angepasst, siehe Anhang A.4.

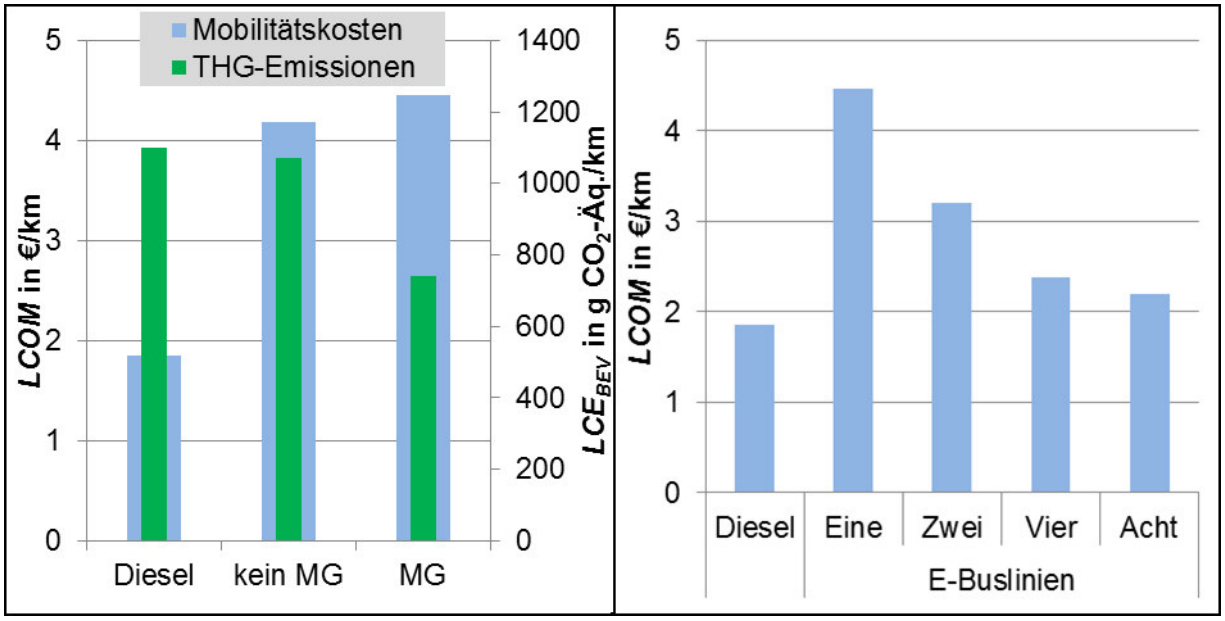


Abbildung 24: links: Die Umweltbelastungen werden erst durch die Unterstützung mit einem Microgrid bestehend aus PV-Anlagen und Batterie deutlich reduziert; rechts: Die Elektrifizierung der Buslinien senkt die Mobilitätskosten perspektivisch auf das Niveau von dieselbetriebenen Bussen.

Die Untersuchung einer Buslinie mit vier Elektrobussen zeigt, dass durch die Einführung eines MGs zur Teilversorgung, bestehend aus PV-Anlagen und Batterie, eine Senkung der spezifischen Treibhausgasemissionen um ca. 30 % im Vergleich zu einem Dieselbus [22] erzielt wird. Die Mobilitätskosten liegen jedoch noch deutlich über den aktuellen Fahrkosten für einen Dieselbus, siehe Abbildung 24. Die Erhöhung des Ladebedarfs durch die Elektrifizierung weiterer Buslinien führt perspektivisch zu einer Senkung der Mobilitätskosten auf das Niveau von Dieselbussen. Die mögliche Etablierung von E-Bussen und die damit verbundene Senkung der Anschaffungskosten von derzeit noch mehr als 500.000 € kann zukünftig demnach ökologisch und ökonomisch die Vorteile gegenüber konventionellen Bussen verstärken. Auch hier sollte der Fokus auf PV-Batterie-Systemen liegen, die in erster Linie die Lastspitzen kompensieren, das Netz entlasten und den Leistungspreis gering halten.

Die zunehmende Elektrifizierung des straßengebundenen ÖPNV durch Elektrobusse wie in Berlin oder andernorts birgt neben der elektrischen Versorgung mit Strom aus

EEA die zusätzliche Herausforderung, den Einfluss auf die aktuellen Fahrpläne so gering wie möglich zu halten. Dafür ist es erforderlich, die E-Busse schnell und zuverlässig an Endhaltestellen, wie auf der Berliner Buslinie 204, oder während kurzer Stopps an den Haltestellen zu laden. Die Schnellladung an Zwischenhaltstellen (Opportunity Charging) ermöglicht den Einsatz kleiner Batteriekapazitäten in den Bussen mit geringerer Batteriebeanspruchung und damit die Senkung deren Investitionskosten [23]. Jedoch müssen an vielen strategisch relevanten Punkten im Busliniennetz aufwendige Umbauten unternommen werden. Zusätzlich sind kleinere MG erforderlich, die die Energie bereitstellen und durch die entsprechende Steuerung die Lastspitzen reduzieren, um den Leistungs- bzw. Strompreis gering zu halten. Die Installation von Ladestationen lediglich an den Endhaltestellen erfordert die Installation weniger jedoch größer dimensionierter MG und Ladeinfrastrukturen (mit Leistungen von aktuell 200 kW [23]). Dies kann wiederum zu einer Kostenreduktion der Energiebereitstellung durch die Erhöhung des Ladebedarfs führen, wie es in Abbildung 24 dargestellt ist.).

Es zeigt sich hier ein klarer Bedarf weiterer Untersuchungen, die sowohl die geeignete Ausstattung der Busse als auch die Positionierung der dezentralen Energiesysteme umfassen. Demnach müssen für ein ökonomisch und ökologisch sinnvolles System die Busflotte und die Energiebereitstellung inkl. Ladeinfrastruktur gemeinsam betrachtet werden.

MG-Betreiber wie die DB Energie am Bahnhof Berlin Südkreuz sind bereits jetzt in der Lage die Elektrifizierung des öffentlichen Personennahverkehrs zu unterstützen. Denn durch die Bereitstellung der überschüssigen, für die Carsharing-Station nicht erforderlichen, Energie können wichtige Synergien nicht nur zur Effizienzsteigerung des MG-Betriebs entstehen. Busbetreiber können lokal erzeugten Strom beziehen und auf den Aufbau eines eigenen Energiesystems verzichten. MG-Betreibern eröffnen sich durch die zusätzlichen Lasten weitere Einnahmequellen. Darüber hinaus wird der Eigenverbrauch des aus EEA erzeugten Stroms maßgeblich erhöht.

3.2.4.3 Untersuchung der Netzaufnahmefähigkeit am Bahnhof Südkreuz

Ziel der Untersuchung war es, die maximale Anschlussleistung von Ladeinfrastruktur (LIS) für Elektrofahrzeuge und Erneuerbare Energieanlagen (EEA) für die IMS am Bahnhof Südkreuz zu ermitteln. Begrenzt wird die Anschlussleistung und somit ein weiterer Ausbau von LIS und EEA durch ein einzuhaltendes Spannungsband an den Netzverknüpfungspunkten (NVP) und die maximale Betriebsmittelbelastung der einzelnen Netzkomponenten (Leitungen/Kabel, Transformatoren, etc.).

Zulässige Werte und Grenzen der Netzspannung des elektrischen Netzes sind in der DIN EN 50160 [24] festgeschrieben. Nach dieser Norm muss die Netzspannung in 95 % der 10-Minuten-Mittelwerte am Netzanschlusspunkt (NAP) innerhalb von

± 10 % der Nennspannung liegen. Für den Anschluss von Energieanlagen sind zusätzlich die Richtlinien VDE AR N 4105 [25] für das Niederspannungsnetz und die Mittelspannungsrichtlinie des BDEW (BDEW MSR [25]) für das Mittelspannungsnetz zu beachten. Diese besagen, dass am NAP der Energieanlagen die statische Spannung nicht mehr als 3 % (VDE AR N 4105) bzw. 2 % (BDEW MSR) im Vergleich zum unbelasteten Fall steigen darf.

Um die maximale Anschlussleistung von LIS und EEA zu ermitteln, wurden Lastflussberechnungen durchgeführt. Dabei wurden die Anschlussleistungen der LIS und der EEA schrittweise erhöht bis entweder ein Spannungsgrenzwert oder die Betriebsmittelbelastung einer Netzkomponente erreicht wurde. Die Vorgehensweise zur Ermittlung der maximalen Netzaufnahmefähigkeit wird ebenfalls in [26], [27] und [28] beschrieben. Des Weiteren wurden Betriebsmittel und Betriebsstrategien untersucht, die eine Erhöhung der Netzaufnahmefähigkeit ermöglichen. Dazu gehören:

- das gesteuerte Laden von Elektrofahrzeugen in Zeiten hoher Einspeisung durch EEA,
- der netzdienliche Einsatz eines Batteriespeichers, der in Abhängigkeit der Last- bzw. Einspeisesituation be- und entladen werden kann
- und der Einsatz eines regelbaren Ortsnetztransformators (RONT), der es ermöglicht das Spannungsniveau im unterlagerten Netz stufenweise zu erhöhen oder zu verringern, um somit evtl. Spannungsbandverletzungen einzelner NVP entgegen zu wirken.

Niederspannungsnetz Bahnhof Südkreuz

Die Daten des elektrischen Netzes am Bahnhof Südkreuz wurden von der DB Energie GmbH und von der Schneider Electric GmbH (Daten des MGs) bereitgestellt. Enthalten sind Informationen über Kabeltypen und –längen, Netz-Knoten und -Sammelschienen sowie Informationen zum übergelagerten Mittelspannungsnetz, bspw. die Kurzschlussleistung des Netzanschlusspunktes. Auf Basis dieser Daten wurde das Netz mit einigen Vereinfachungen im Netzberechnungsprogramm PSS®SINCAL modelliert (Abbildung 25). Detailliertere Informationen zur Modellierung und anschließenden Simulation können dem Anhang 0 entnommen werden.

Es wird ersichtlich, dass das Netz aus zwei Transformatoren, also redundant, gespeist wird. Die Sammelschiene des MGs ist über ein Kabel an der Niederspannungshauptverteilung (NSHV) angeschlossen. An der Sammelschiene des MGs sind die MG-Komponenten des Bahnhofs-Vorplatzes angeschlossen. Dies umfasst die Elektrofahrzeug- und Pedelec-LIS, die PVA auf dem Carport sowie den elektrochemischen Batteriespeicher. Die Elektrofahrzeug-LIS besteht derzeit aus fünf Ladesäulen mit insgesamt 10 Ladepunkten (8x AC 22 kW_{el}, 1x AC 43 kW_{el} und 1x DC 50 kW_{el}). Die übrigen Verbraucher des Bahnhof-Komplexes wurden zu einer Gesamtlast

zusammengefasst. Anders als bei den Leistungsflussanalysen in Abschnitt 3.2.4.2, bei denen sämtliche EEA berücksichtigt wurden, die zum Planungskonzept gehören, liegt der Fokus der Netzkapazitätsanalyse auf einer Analyse des Microgrids auf dem Bahnhofsvorplatz. Die übrigen EEA (KWEA und PVA-Mover) sind über separate Verteilstränge an der NSHV angeschlossen und wurden nicht berücksichtigt.

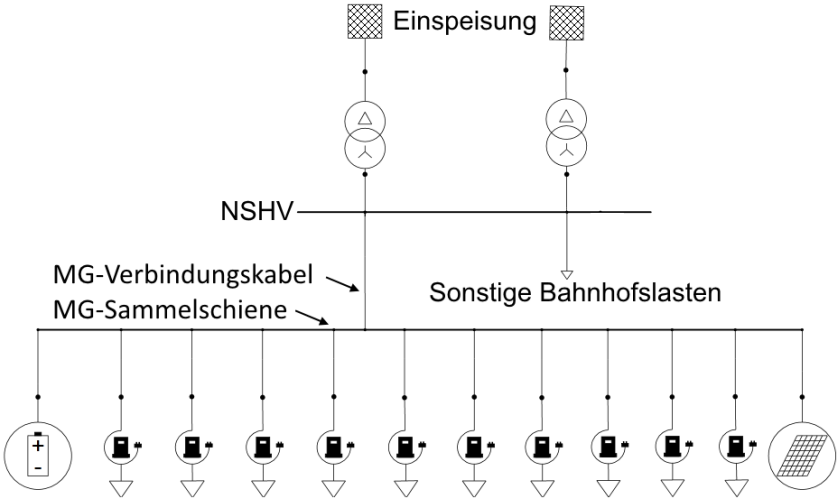


Abbildung 25: Vereinfachtes Modell des Niederspannungsnetzes am Bahnhof Südkreuz (eigene Darstellung)

Szenarien

Ein weiterer Ausbau der LIS und der EEA ist von der derzeitigen Auslastung des Netzes am Bahnhof Südkreuz abhängig. Aus diesem Grund wurden die Lastgänge für den Schwach- sowie den Starklastfall der relevanten Komponenten ermittelt (Anhang A.7.1).

Der maximale Zubau weiterer LIS wird durch den Starklastfall begrenzt, da die Netzbelastung durch zusätzliche Ladeleistung zunimmt. Im Gegensatz dazu wird der maximale Zubau von EEA durch den Schwachlastfall begrenzt, da die Abnahme der Einspeiseleistung nur begrenzt durch die Lasten im Netz genutzt werden kann, was ebenfalls zu erhöhter Netzbelastung führt.

In der folgenden Tabelle sind die durchgeführten Simulationsszenarien aufgelistet.

Tabelle 13: Szenarien für Lastflussanalysen

	Bezeichnung	Szenariobez.
Steigerung der inst. Leistung von EEA im Schwachlastfall	Referenzszenario EEA	1_{Ref_EEA}
	Referenzszenario EEA + Max. Ladung von BEV	$2_{Ref_EEA+BEV}$
	Referenzszenario EEA + Einsatz ESS[3]	$3_{Ref_EEA+ESS}$
Steigerung der Ladeleistung von BEV im Starklastfall	Referenzszenario BEV	4_{Ref_BEV}
	Referenzszenario BEV + Max. Einspeisung durch EEA	$5_{Ref_BEV+EEA}$
	Referenzszenario BEV + Einsatz von ESS	$6_{Ref_BEV+ESS}$

Neben den jeweiligen Referenzszenarien (1_{Ref_EEA} & 4_{Ref_BEV}) wurden wie eingangs erwähnt weitere Optionen zur Erhöhung der Netzaufnahmefähigkeit untersucht. Die hier durchgeführten Szenarien zeigen das Potential für die Netzaufnahmefähigkeit. Es wird angenommen, dass diese Szenarien eintreten können. In der Praxis bedeutet das, dass Elektrofahrzeuge in der Zeit hoher Einspeisung durch EEA gesteuert geladen werden können bzw. der Batteriespeicher der jeweiligen Netzsituation entsprechend be- und entladen werden kann. Der Betrieb der Komponenten und damit die Berücksichtigung der hier zu Grunde gelegten Betriebsweise obliegen dem MG-Betreiber.

Der Einsatz eines RONTs hat sich bei den Lastflussanalysen für das Netz am Bahnhof Südkreuz als nicht sinnvoll herausgestellt und wurde bei den Szenarien daher nicht aufgeführt. Das Potential eines RONTs wird im Zusammenhang der Ergebnisse jedoch diskutiert.

Ergebnisse

In Abbildung 26 sind die Ergebnisse für die maximalen Einspeiseleistungen bzw. Ladeleistungen dargestellt. Im Vergleich zu den aktuell auftretenden Einspeise- bzw. Ladeleistungen zeigen die jeweiligen Referenzszenarien ein deutliches Steigerungspotential auf. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die hier als aktuell angegebenen Einspeise- und Ladeleistungen nicht den tatsächlich installierten Anschlussleistungen entsprechen sondern den maximal auftretenden Einspeise- und Ladeleistungen. Auf Basis von aufgezeichneten Messwerten am Bahnhof Südkreuz wurden Gleichzeitigkeitsfaktoren (GZF) für die Einspeiseleistung der PVA und der Ladeleistung von BEV ermittelt (Anhang A.7.1). Ein GZF ist das Verhältnis von tatsächlich auftretender Leistung zur installierten Leistung.

[3] ESS: Energiespeicher (engl.: **E**nergy **S**torage **S**ystem)

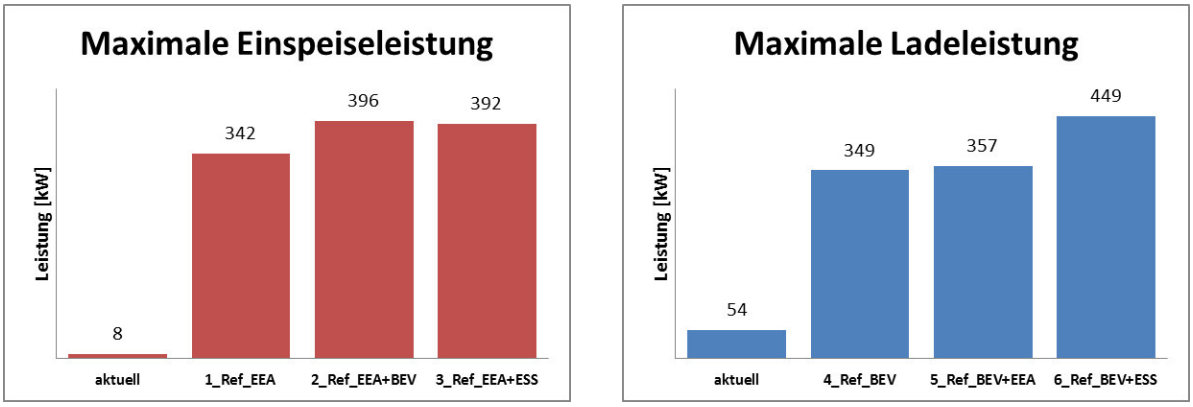


Abbildung 26: Ergebnisse der maximalen Einspeiseleistung durch EEA und der maximalen Ladeleistung durch BEV. Für die aktuellen Einspeise- bzw. Ladeleistungen wurden Gleichzeitigkeitsfaktoren (GZF) berücksichtigt.

Für EEA wurde ein GZF von 0,9 (PV-Anlage) und für die LIS von 0,2 ermittelt. Unter Berücksichtigung der GZF ergibt sich in den Referenzszenarien eine maximale Anschlussleistung für PV-Anlagen (PVA) von 380 kW_p und für LIS von 1.745 kW. Die Anschlussleistung beträgt derzeit 8,5 kW_p für die PVA und 269 kW für die LIS. Die Anschlussleistung der PVA könnte folglich um etwa das 45-fache und der LIS um mehr als das 6-fache gesteigert werden ohne dass es eines Netzausbaus bedarf. Geht man allerdings von dem ungünstigsten, jedoch auch unwahrscheinlichen Fall aus, dass sämtliche Ladepunkte zur gleichen Zeit voll ausgelastet sind, könnte die Anschlussleistung der LIS lediglich um etwa 30 % gesteigert werden.

Die Begrenzung für die maximale Einspeise- und Ladeleistung ist in allen Szenarien die Betriebsmittelbelastung des Verbindungskabels zwischen MG und NSHV. Die derzeitige Netzauslastung ist durch die elektrische Last der Bahnhofsgebäude -und Anlagen geprägt. Hohe Lasten wirken spannungssenkend auf ein elektrisches Netz. Hohe Einspeiseleistungen wirken dem entgegen, sodass die Spannungssenkung durch die hohen Lasten kompensiert wird. Folglich kam es bei den Szenarien der Einspeisesteigerung zu keinen Spannungsproblemen. Etwas anders hat es sich bei den Szenarien der Ladeleistungssteigerung dargestellt. Zwar wurde die Steigerung auch in diesen Szenarien durch die Betriebsmittelbelastung des Verbindungskabels begrenzt, die Spannung an der MG-Sammelschiene ist jedoch stark abgefallen und lag nur noch knapp oberhalb der Spannungsgrenze nach DIN 50160.

Im Vergleich zu den Referenzszenarien wird deutlich, dass sowohl der netzdienliche Einsatz des Batteriespeichers als auch das gesteuerte Laden Potential haben die Netzaufnahmefähigkeit zu steigern. Aufgrund der Topologie des MGs bzw. der Tatsache, dass sowohl PVA, LIS und Batteriespeicher an der gleichen Sammelschiene angeschlossen sind, führt der Bezug von Ladeleistung und das Beladen des Batteriespeichers bei gleichzeitig gesteigerter Einspeiseleistung (Szenario $2_{EEA_Ref+BEV}$ & $3_{EEA_Ref+ESS}$) zu einer Entlastung des MG-Verbindungskabels, da ein Teil der erhöh-

ten Einspeiseleistung direkt genutzt wird und nicht über das MG-Verbindungskabel transportiert werden muss. Analog verhält es sich bei gesteigerter Ladeleistung und gleichzeitiger Einspeisung durch EEA und dem Entladen des Batteriespeichers. In diesem Fall wird ein Teil der Ladeleistung durch die EEA und den Batteriespeicher gedeckt, wodurch sich die zu transportierende Leistung über das MG-Verbindungskabels reduziert bzw. das Potential einer weiteren Steigerung der Ladeleistung erhöht wird. Anhand dieses Zusammenhangs lassen sich auch die quantitativen Ergebnisse der Szenarien $2_{EEA_Ref+BEV}$ & $3_{EEA_Ref+ESS}$ sowie $5_{BEV_Ref+EEA}$ & $6_{BEV_Ref+ESS}$ erklären. Der Batteriespeicher verfügt über eine Ladeleistung von 50 kW_p und eine Entladeleistung von 100 kW_p. Demnach kann die Einspeiseleistung in etwa um die maximale Ladeleistung des Batteriespeichers und die Ladeleistung der BEV in etwa um die maximale Entladeleistung des Batteriespeichers erhöht werden. Analog verhält es sich mit dem gesteuerten Laden. Die maximale Einspeiseleistung der EEA kann bei gleichzeitigem Bezug der aktuell maximalen Ladeleistung von etwa 54 kW (P_{Nenn}*GZF = 269 kW * 0,2) um dessen Betrag erhöht werden (Szenario $2_{EEA_Ref+BEV}$). Folglich fällt eine weitere Steigerung der Ladeleistung bei gleichzeitiger Einspeisung der aktuell maximalen Einspeiseleistung eher gering aus, da die PVA lediglich eine Leistung von 8,5 kW_p aufweist (Szenario $5_{BEV_Ref+EEA}$).

Einsatz eines RONTs zur Steigerung der Netzaufnahmefähigkeit

Wie eingangs erläutert, bietet ein RONT unter bestimmten Umständen ebenfalls das Potential die Netzaufnahmefähigkeit zu steigern. In den betrachteten Szenarien wurde die Netzaufnahmefähigkeit durch das MG-Anschlusskabel begrenzt und somit ein netzdienlicher Einsatz eines RONTs nicht gegeben. In Abbildung 27 ist der Spannungsverlauf von der Netzeinspeisung bis zur MG-Sammelschiene für das Referenzszenario 4_{BEV_Ref} und unterschiedlichen Leitungslängen zwischen NSHV und MG dargestellt.

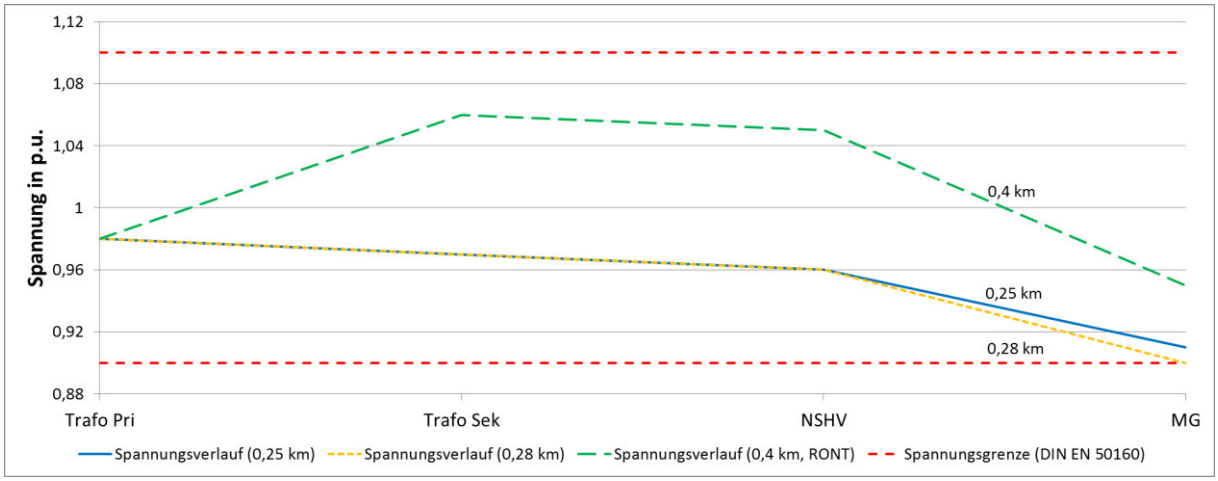


Abbildung 27: Spannungsverlauf von der Netzeinspeisung bis zur Microgrid-Sammelschiene für das Referenzszenario 4 mit unterschiedlichen Leitungslängen zwischen NS- und Microgrid-Sammelschiene sowie des Einsatzes eines RONTs

Das MG-Anschlusskabel weist laut eines Netzplanes der DB Energie GmbH eine Länge von 0,25 km auf. Es wird ersichtlich, dass die Spannung an der MG-Sammelschiene auf etwa 0,91 p.u.[4] zwar stark abfällt, sich jedoch noch in den Grenzen der DIN EN 50160 befindet. In einem bereitgestellten Dokument von Schneider Electric (Single Line Diagramm des MGs) wird das MG-Anschlusskabel hingegen mit „ca. 0,4 km“ angegeben. Eine maximale Ladeleistung von 349 kW, wie im Referenzszenario 4_{BEV_Ref} ermittelt und bei dem die maximale Betriebsmittelbelastung des MG-Anschlusskabels erreicht wird, führt ab einer Leitungslänge von etwa 0,28 km bei gleichbleibenden Querschnitt des Kabels zu einer Verletzung des Spannungsbandes (Abbildung 27). Das heißt, ab einer bestimmten Leitungslänge, in diesem Fall >0,28 km, wird die Spannungsgrenze erreicht, bevor die maximale Betriebsmittelbelastung der MG-Anschlussleitung überschritten wird. Sofern das MG-Anschlusskabel z.B. tatsächlich eine Länge von 0,4 km aufweist, könnte die Ladeleistung im Referenzszenario 4 lediglich auf 311 kW anstatt 349 kW gesteigert werden. In diesem Fall könnte ein RONT, durch eine Erhöhung der Spannung an der Trafo-Sekundärseite, die Netzaufnahmefähigkeit weiter steigern. In Abbildung 27 (grüne Kennlinie) ist der Spannungsverlauf von der Netzeinspeisung bis zur MG-Sammelschiene bei einer Länge des MG-Anschlusskabels von 0,4 km sowie des zusätzlichen Einsatzes eines RONTs, der die Spannung auf der Trafo-Sekundärseite auf 1,06 p.u. anhebt dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Anhebung der Spannung auf der Trafo-Sekundärseite ebenfalls zu einer Anhebung der Spannung an der MG-Sammelschiene führt. In diesem Szenario kann die Ladeleistung trotz einer Länge des MG-Anschlusskabels von 0,4 km auf etwa 352 kW gesteigert werden bis die maximale Betriebsmittelbelastung des Kabels erreicht wird. Der Einsatz eines

[4] p.u. (per unit) ist eine Einheit, die sich auf die Bemessungs-/Soll- oder Nenngröße bezieht.

RONTs ist demnach immer dann netzdienlich, wenn hohe Leistungen über lange Leitungswege übertragen werden müssen.

Fazit und Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Netzaufnahmefähigkeit unter Nutzung des Spannungsbandes nach DIN EN 50160 noch deutlich Kapazität für den Anschluss von EEA als auch von BEV-LIS an der MG-Sammelschiene zulässt. Für die Erhöhung der Anschlussleistung von EEA als auch für LIS wird deutlich, dass die maximale Betriebsmittelbelastung des Verbindungskabels von MG- zu NS-Sammelschiene den begrenzenden Faktor darstellt.

Es hat sich gezeigt, dass sich die Netzaufnahmefähigkeit durch eine Kopplung von gleichzeitiger Einspeisung durch EEA und Leistungsbezug der LIS sowie des netzdienlichen Einsatzes des Batteriespeichers weiter steigern lässt, da hierdurch das Verbindungskabel zwischen NS- und MG-Sammelschiene entlastet wird.

Sofern Spannungsgrenzen nach DIN EN 50160 im MG verletzt werden bevor die maximale Betriebsmittelbelastung einzelner Komponenten (Kabel, Transformatoren) überschritten wird, kann ein RONT die Netzaufnahmefähigkeit weiter steigern. Im Fall des MGs am Bahnhof Südkreuz ist dies aktuell nicht der Fall. Sofern jedoch weitere EEA oder LIS an der MG-Sammelschiene angeschlossen werden, die sich nicht in unmittelbarer Nähe zu dieser befinden und somit lange Kabellängen voraussetzen, müsste im Einzelfall geprüft werden, ob ein RONT in diesen Fällen zweckdienlich ist.

In weiteren Untersuchungen kann die Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit der hier beleuchteten Szenarien untersucht und quantifiziert werden.

Allgemeingültige Handlungsempfehlungen für den Auf- und Ausbau von MGs bestehen in den bereits erläuterten Maßnahmen, die eine Steigerung der Netzaufnahmefähigkeit zulassen. Da die Topologie und der Netzzustand (Transformatorleistung, Leitungslängen, Leitungsquerschnitte, etc.) jedes Netzes variieren, muss die Wirksamkeit der verschiedenen Maßnahmen im Einzelfall überprüft werden. Bei zukünftigen Netzplanungen von MGs sollten in jedem Fall netzdienliche Maßnahmen wie der Einsatz eines Batteriespeichers, das steuerbare Laden von Elektrofahrzeugen in Zeiten hoher Einspeiseleistungen durch EEA sowie der Einsatz eines RONTs berücksichtigt werden.

3.2.4.4 Auswertung der Elektrofahrzeugdaten und Vergleich mit Buchungsdaten

Seit ca. 08/2015 ist die Ladeinfrastruktur (LIS) des MGs am Bahnhof Südkreuz installiert und in Betrieb. Für die Analyse wurden die Messdaten sämtlicher Ladepunkte im Zeitraum von 08/2015 bis 03/2016 verwendet. Bei der Auswertung dieser Daten stand neben den Erkenntnissen zum Ladeverhalten der Nutzer der Vergleich zwi-

schen synthetisch erstellter Lastkurve und tatsächlichem Lastverhalten im Vordergrund. Die synthetisch erstellte Lastkurve wurde aus Buchungsdaten von DB Fuhrpark (Standort Südkreuz) abgeleitet und war Grundlage der Simulationsbetrachtungen, da die ersten verwertbaren Messdaten erst zum Projektende zur Verfügung standen und für die Berechnung der KPIs und MG-Optimierungen Daten für ein volles Jahr benötigt wurden. Dies wurde bereits in Abschnitt 3.2.4.2 erläutert.

Anhand von Abbildung 28 wird ersichtlich, dass die gemessenen Lastgänge im Vergleich zu den synthetischen Lastgängen ein sehr heterogenes Bild liefern.

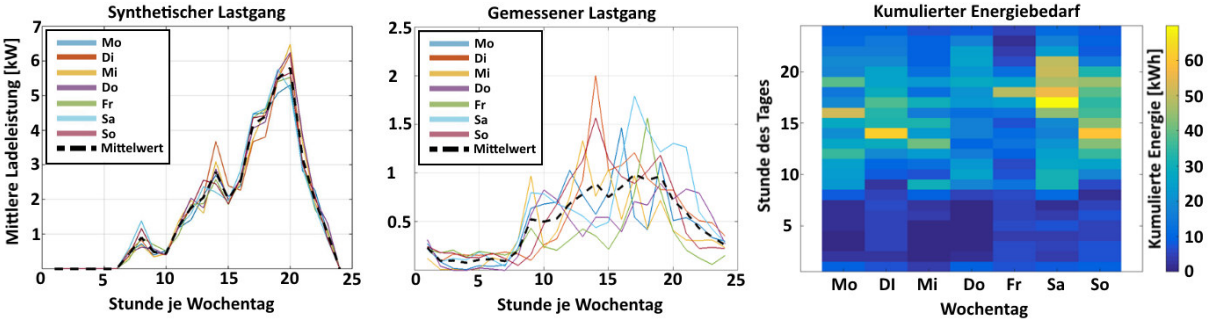


Abbildung 28: Mittlere Ladeleistungen in Abhängigkeit von Uhrzeit und Wochentag des synthetischen (links) und gemessenen (Mitte) Lastgangs der Ladesäulenleistung. Des Weiteren ist die kumulierte Energie der gemessenen Lastgänge aller Ladepunkte als Heatmap dargestellt (rechts)

Der Verlauf des synthetischen Lastgangs stellt sich für jeden Wochentag sehr ähnlich dar. Bei dem gemessenen Lastgang sind die Ladeleistungen in Abhängigkeit des Wochentags sehr unterschiedlich. Diese starken Schwankungen sind auf den verhältnismäßig kurzen Auswertezeitraum sowie die geringe Nachfrage des Carsharing-Angebots zurückzuführen. Mit zunehmender Akzeptanz der Elektromobilität und Bekanntheit des Angebots ist zu erwarten, dass sich die Messdaten homogenisieren. Vergleicht man den Gesamtverlauf, so zeigt sich zwischen synthetischen und gemessenen Lastgang ein sehr ähnlicher Verlauf mit Morgen-, Mittags- und Abendspitze. Die jeweiligen mittleren Leistungsspitzen fallen jedoch bei den synthetischen Lastgängen mit bis zu 6 kW im Vergleich zu maximal 1 kW bei den Gemessenen deutlich höher aus. Die Heatmap (Abbildung 28, rechts, gemessene Daten) verdeutlicht nochmals, dass der größte Energiebedarf der LIS in den Mittags- und Abendstunden und im speziellen am Wochenende besteht.

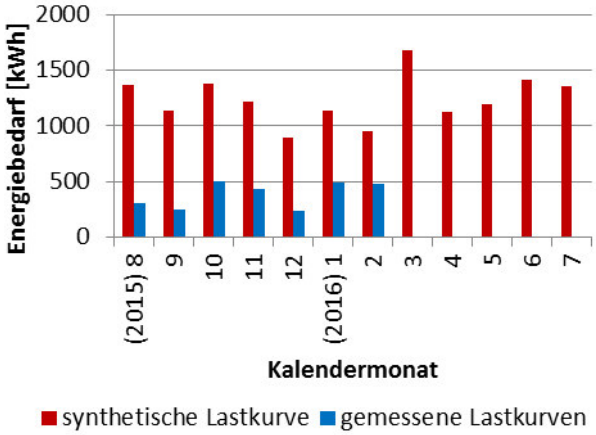


Abbildung 29: Vergleich des kumulierten Energiebedarfs der synthetischen und gemessenen Lastkurven

Die Überschätzung, das heißt die Annahme deutlich höherer Gesamtleistungen bei den synthetischen Lastgängen führt in der Konsequenz zu einem erheblich größeren Energiebedarf des synthetischen Lastgangs (Abbildung 29). Für die synthetischen Lastgänge wurden darüber hinaus maximale Ladeleistungen pro Ladung von 3,7 kW angenommen.

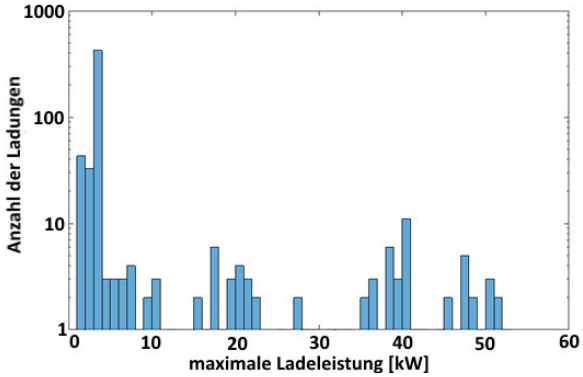


Abbildung 30: Maximale Ladeleistung pro Ladevorgang (gemessene Daten)

In

Abbildung 30 sind die maximalen Ladeleistungen pro Ladevorgang der gemessenen Daten abgebildet. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei der Ordinate um eine logarithmische Darstellung handelt. Auch bei den gemessenen Daten zeigt sich, dass die maximale Ladeleistung am häufigsten 3-4 kW beträgt. Bei der Carsharing-flotte am Bahnhof Südkreuz handelt es sich um C-Zeros, die bei einphasiger Ladung (Wechselstrom) mit maximal 3,7 kW geladen werden, wodurch sich diese Häufigkeit erklären lässt. Die C-Zeros unterstützen zwar auch eine Schnellladung mit bis zu 50 kW (Gleichstrom), dies wird jedoch lediglich von einer der 5 Ladesäulen unter-stützt [29]. Die maximalen Ladeleistungen der Ladesäulen betragen 22 kW (Schneider Electric) bzw. 43 kW_{AC} und 50 kW_{DC} (efacec fast charger). Diese

hohen Ladeleistungen werden verhältnismäßig selten in Anspruch genommen. Des Weiteren treten maximale Ladeleistungen durch BEV auf, die sich in einem Leistungsbereich befinden, der zwischen den maximalen Ladeleistungen der Ladesäulen und unter 3 kW liegt. Dies deutet darauf hin, dass oftmals Fahrzeuge geladen werden, die zu Ladebeginn einen Batterieladestand (SOC) von über 80 % aufweisen, da die maximal mögliche Ladeleistung in einem SOC-Bereich zwischen etwa 80 % und 100 % stark abnimmt [30]. Folglich kommt es häufig zu relativ kurzen Fahrten, was im urbanen Bereich auch zu erwarten ist.

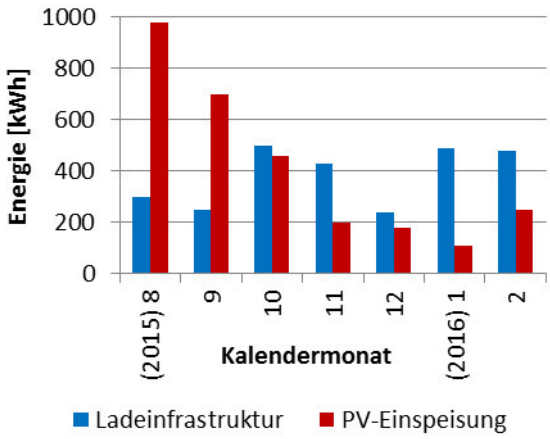


Abbildung 31: Gegenüberstellung des monatlichen Energiebedarfs der Ladeinfrastruktur und der PV-Einspeiseleistung

In Abbildung 31 ist der Energiebedarf der LIS der PV-Einspeisung gegenübergestellt. Bezogen auf die monatlichen Energiebilanzen ist in den Sommermonaten eine Deckung des LIS-Energiebedarfs durch die PVA gegeben. Summiert über alle Monate des Auswertezeitraums übersteigt auch der Gesamtertrag der PVA den Energiebedarf der LIS. Unter der Annahme, dass sich die Nachfrage des Carsharing-Angebots und der Elektromobilität im Allgemeinen zukünftig erhöhen wird, könnte sich diese Bilanz in naher Zukunft ändern. Hinzu kommt, dass sich der zeitliche Verlauf der Einspeiseleistung nicht gänzlich mit dem zeitlichen Verlauf des Ladebedarfs deckt. Wie bereits aus Abbildung 28 hervorging, ist der Ladebedarf in den Vormittags- und Nachmittagsstunden nicht unerheblich und deckt sich mit den maximalen Einspeiseleistungen. In den Abendstunden ist der Bedarf an Ladeleistung jedoch am höchsten und die PV-Einspeiseleistung eher gering, da die PVA mit einer Süd-Südost-Ausrichtung installiert wurde. Der vorhandene Batteriespeicher könnte dazu genutzt werden um die zeitliche Differenz zwischen maximaler Einspeisung und maximalen Ladebedarf auszugleichen. In der aktuellen Betriebsführung wird der Batteriespeicher jedoch für den Ausgleich von Lastspitzen eingesetzt und nicht um große Energiemengen zwischen zu speichern. Neben der optimalen Auslegung und Betriebsführung des Batteriespeichers könnte es ggf. sinnvoll sein die Ausrichtung der PVA an

das Ladelastprofil anzupassen. Im Falle der IMS hieße dies, eine eher westlich ausgerichtete PVA oder alternativ eine Ost-West-PVA um eine möglichst kontinuierliche Einspeiseleistung über den gesamten Tag zu erreichen.

Zusammenfassend lässt sich nach aktueller Datenlage festhalten, dass das Ladeverhalten an der IMS noch mit großen Schwankungen in Abhängigkeit des Wochentages verbunden ist. Der durchschnittliche Tagesverlauf des Leistungsbezugs entspricht jedoch in etwa dem synthetischen Lastgang, der als Basis für die Simulationen diente. Der wesentliche Unterschied besteht in der Höhe des Leistungsbezugs. In den Simulationen wurde daher eine insgesamt höhere Last angenommen als es sich derzeit darstellt. Dies wird als unproblematisch angesehen, da bei den simulativen Betrachtungen primär die Identifikation qualitativer Zusammenhänge im Vordergrund stehen. Hinzu kommt, dass die Daten aufgrund des noch recht „jungen“ Angebots der Carsharing-Station als nicht repräsentativ angesehen werden können und sich in naher Zukunft die Ladeleistungen erhöhen könnten.

Neben dem Vergleich zwischen gemessenen und synthetischen Daten konnte gezeigt werden, dass die meisten Ladevorgänge in den Abendstunden und am Wochenende stattfinden. Schnellladungen sind im Falle der IMS am Bahnhof Südkreuz noch die Ausnahme. Die C-Zeros, welche die Carsharingflotte bilden, unterstützen zwar Schnellladungen mit 50 kW_{DC}, es steht jedoch lediglich eine Schnellladesäule zur Verfügung. Dadurch finden die meisten Ladungen an den übrigen Ladesäulen mit entsprechend geringeren Ladeleistungen statt.

Weiterhin zeigen die Messwerte, dass Zeiten des maximalen Ladebedarfs nicht mit den Zeiten maximaler Energiebereitstellung durch PVA übereinstimmen. Dies zeigt, wie wichtig die Dimensionierung und Betriebsführung des Batteriespeichers sowie die Dimensionierung und Ausrichtung der PVA für die Planung eines MGs sind.

3.2.4.5 Demonstration

Zur Demonstration der Projektinhalte sowie zur Veranschaulichung der Funktionsweise des vor Ort installierten Microgrids wurden im April 2015 Präsentationsmodule installiert. Das RLI konzipierte und realisierte einen interaktiven, mit dem eigenen Smart-Phone bedienbaren, Demonstrator, anhand dessen sich die Besucher das Prinzip des Microgrid erläutern lassen können. Zur Steigerung der Attraktivität wurde das Konzept Anfang 2016 noch einmal überarbeitet. Neben der interaktiven Darstellung des Microgrids wurde ein Spiel implementiert um auch den jüngeren Gästen des Bahnhofs das Prinzip des intelligenten Netzes spielerisch zu vermitteln. Ebenso wurden die Anzeigen im Demomodus überarbeitet und durch Animationen ergänzt sowie die Inhalte des Demonstrators auch im Englischen bereitgestellt.

Die Präsentationsmodule wurden intensiv bei den Führungen der DB und des RLI genutzt.

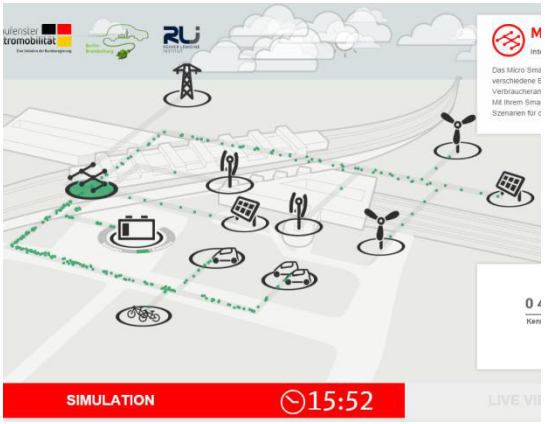


Abbildung 32: Auf dem Ringbahnsteig des Bahnhofs bietet der Demonstrator Interessierten die Möglichkeit, mit Ihren Smartphones das Microgrid kennenzulernen und in einer Simulation selbst zu steuern. Wie im Bild unten rechts zu erkennen, werden bereits die Leistungsflüsse im Microgrid dargestellt. Reisende können ihr Wissen testen und sich in dem entwickelten Microgrid-Spiel mit anderen messen (oben rechts).

4 Darstellung wesentlicher Abweichungen zum Arbeitsplan

Durch den Ausstieg der Firma Bombardier aus dem Projekt und damit aus der Weiterentwicklung eines **Induktion-Schnellladesystems für PKW** konnte dieser Teil nicht am Bahnhof Südkreuz umgesetzt werden. Da alle Beteiligten ein hohes Interesse hatten, die Technologie am Südkreuz zu präsentieren, wurde noch im Jahr 2014 mit der Umplanung begonnen. Gemeinsam mit der BVG wurde beschlossen, die Linienführung 204 für den eBus vom Bahnhof Zoo zum Bahnhof Südkreuz zu nutzen. Als Alternativlösung zu der PKW-Induktionsladung ist direkt neben der Microgrid-Station die Induktionsladefläche für den Linienbus entstanden.

Die Planung der **Horizontal-Windräder** am Bahnhof Südkreuz nahm praktisch die gesamte Projektlaufzeit ein. Das eingeplante Budget reichte nicht aus, um die Planung insgesamt abzuschließen und wird mit Eigenmitteln finalisiert werden. Bei der Planung wurden Restriktionen aus dem öffentlichen Baurecht und aus dem Eisenbahn-Baurecht berücksichtigt. Dies führte zu der Festlegung eines kostspieligen Standorts für die Horizontal-Windräder und zu einer extrem langen Planungszeit. Die heutige Aufbau-Planung für den Bahnhof Südkreuz sieht vor, die Horizontal-Windräder in der energetischen Erneuerung des Bahnhofgebäudes zusammen mit der kompletten Solarausstattung der beiden Parkplätze beidseits des Empfangsgebäudes ab 2017 aufzubauen.

In der Energiebilanz des Microgrids machten sich die fehlenden Energiequellen nicht negativ bemerkbar. Für zukünftige Realisierungen in einem ähnlichen Umfeld sind die langen Planungszeiten zu berücksichtigen oder alternative kostengünstigere Varianten zu wählen.

Im Zusammenhang mit der Planung des Aufbaus der horizontalen Windkraftanlagen sollte auch die Planung zur Installation eines **Wettermessmastes** erfolgen. Als sich abzeichnete, dass die Planung der KWEA komplexer ausfiel als erwartet, nahm das RLI die simultane, aber von den KWEA losgelöste Planung auf. Es stellte sich heraus, dass die am Treppenhaus vorgesehene Installtion aus brandschutz- und blitztechnischer Sicht nur unter enormen finanziellem Aufwand umzusetzen sei. Auf Grund der vergleichseweise geringen Projektlaufzeit wurde sich gegen diese Kostenintensiven Maßnahmen entschieden und weitere, teilweise temporären Aufstellarten geplant und vorgestellt. Aber auch diese konnten den hohen Auflagen nicht gerecht werden. Um die Projektziele weiterhin zu erreichen hat das RLI die Modelle zur Jahressimulationen anhand von Messergebnissen vom EUREF-Campus validiert. Diese wurden rechnerisch und durch Berücksichtigung der standortspezifischen Gegebenheiten an die Verhältnisse des Bahnhofs angepasst.

Die **Indoor Navigation** war in der ersten Phase ausschließlich auf einer WLAN-Infrastruktur aufgebaut. Mit den realisierbaren WLAN-Routern war keine zufriedenstellende Ortung möglich, weshalb das Projekt in der 2. Phase mit einer Beacon Infrastruktur ergänzt wurde. Das ursächliche Problem bei der WLAN-Infrastruktur stellen nicht die einzelnen Router dar, sondern die notwendigen Stromanschlüsse. Üblicherweise sind im Bahnhofsgebäude Stromanschlüsse nur an vorher geplanten Orten vorhanden und weitere müssen speziell geplant und verlegt werden. Diese Voraussetzung führt dazu, daß die Installationskosten explodieren würden, insbesondere wenn die Ausrüstung aller relevanten Bahnhöfe in der Bundesrepublik ansteht.

Die Ausrüstung des Bahnhofsgebäudes mit BLE-Beacons (BLE - Blue Tooth Low Energy) wurde mit Eigenmitteln durchgeführt. Die Beacons werden mit Batterien betrieben, und müssen auch deswegen regelmäßig gewartet werden. Insgesamt ist diese technische Variante kostengünstig und liefert im Normalbetrieb auch nutzbare Daten. Als Nachteil ist die geringe Sendeleistung zu erwähnen, besonders an architektonisch schwierigen Stellen, zum Beispiel hohe Decken in einer Halle. Die gewählte technische Lösung ist die zurzeit einzige, die wirklich im Routinebetrieb brauchbare Ergebnisse liefert. Das zeigten auch die Ergebnisse von alternativen Lösungsansätzen, wie der Ortung über Magnetfelder.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Technologie für die Zwecke der Indoor Navigation noch nicht so ausgereift ist, wie es gerne von der Industrie dargestellt wird. Im Projekt wurden wertvolle Erfahrungen gemacht und letztlich auch eine funktionierende Anwendung realisiert. Die Einsatzmöglichkeiten werden für den Einsatz in weiteren Bahnhöfen berücksichtigt.

5 Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik

Der Status Quo bei der Planung von großen Bahnhofsanlagen ist geprägt von dem Primat der technischen Funktionalität aus Sicht der **Kernaufgabe „Ein- und Aussteigen“** ergänzt um die Anforderungen des „Shopping im Vorbeilaufen“. Intelligente Energienutzung, intermodale Hubfunktion und digitale Navigation spielen bei der Planung zunehmend eine Rolle und müssen bei Bedarf für alle Bestandsbauten im Nachgang suboptimal nachgerüstet werden. Einzelne Komponenten werden für sich genommen bereits in isolierten Neuplanungen eingebaut. Es existiert aber bisher kein gesamthaftes, alle drei Grundbausteine umfassendes Erprobungsprogramm mit Konnex zum Realbetrieb. Übertragbare Forschungserfahrungen zu sammeln, die einen neuen Stand der Wissenschaft und Technik für die Überarbeitung des intermodalen Gesamtsystems und auch für die Optimierung der Teilkomponenten der einzelnen Projektpartner darstellen, ist ein Ziel des Projektes.

Aus Mobilitätssicht lautet eine wesentliche Forschungsfrage:

- In welcher Weise können Elektromobilitätskonzepte Teil einer modernen Stadtlandschaft werden?

Die Umsetzung des Elektromobilitätskonzepts am Bahnhof Südkreuz ist nach unseren Informationen weltweit das einzige Vorhaben in dieser umfassenden Form. Insofern können sich die Vergleiche lediglich auf die Einzelkomponenten beziehen.

Grundsätzlich sind alle Komponenten auf dem neuesten Stand der Technik. In der Speichertechnologie wird in verschiedenen Technikbereichen eine intensive Weiterentwicklung betrieben. Hieraus lassen sich für die Zukunft Effekte in wirtschaftlicher und technologischer Sicht erwarten. Es bleibt zu beobachten, in wie weit sich die Weiterentwicklungen auswirken und hier eine wirtschaftlich fundierte Entscheidung zu treffen wäre.

Das Microgrid Konzept wie es am Bahnhof Südkreuz umgesetzt ist, bewährt sich im täglichen Umgang. Es funktioniert ohne Störungen, die eMobile sind aufgrund der Steuerungssoftware zur richtigen Zeit aufgeladen und der Strom, der für die eMobilität nicht benötigt wird, geht in das Bahnhofsnetz. Die rein technische Beurteilung fällt sehr positiv aus und es ist denkbar, eine Microgrid Lösung in einem größeren Volumen ohne Bedenken zu realisieren.

Die industrielle Entwicklung fordert Ladeinfrastruktur, die einen wählbaren Ladestrom und zeitlich fernsteuerbare Ladevorgänge ermöglicht, um damit die optimale Ausnutzung der regenerativen Energien und der Energiespeicher zu gewährleisten. Im Projekt B2 wird das direkte Zusammenspiel von Photovoltaik und einer neuen Carsharing-Station im öffentlichen Raum unter realen Betriebsbedingungen erforscht, um

die Auslegung der Solarflächen und der Energiespeicher weiter zu optimieren. Ziel der Optimierung ist die deutliche Reduzierung der spezifischen CO^2-Emissionen (Well-to-Wheel) der Fahrzeuge.

Die Ortung basiert auf der Auswertung der Feldstärke von Access Points (AP) (Fingerprint). Die Fläche eines Bahnhofs muß dafür komplett in die Ausleuchtung mit Access Points einbezogen werden. Dafür ist eine gewisse Anzahl an installierten Access-Points notwendig. Zusätzlich ist eine konstante Feldstärke Voraussetzung für eine genaue Ortung. Die verwendeten Access-Points sind im Bahnhof Südkreuz zu einem Teil Bestandteil normaler Kommunikationsinfrastruktur (rd. 30 öffentliche und individuelle WLAN Access-Points). Zum größeren Teil sind es speziell für den Zweck der Ortung eingesetzte Bluetooth Access-Points (rd. 300 AP). Diese technische Architektur erlaubt die Einbeziehung sämtlicher verfügbarer Access-Points und erhöht damit die Genauigkeit der Ortung. Das Projekt ist durch die Kombination von allen verfügbaren Sendern für eine absehbare Zeit zukunftssicher aufgestellt. Weltweit existiert eine Vielzahl von Indoor-Navigations-Projekten, die auf unterschiedliche Technologien setzen. Für die Anwendung im Bahnhof war entscheidend, eine Technik einzusetzen, die auch mit den vielen Abstrahlungen aus dem Bahn-Verkehr noch voll funktionsfähig bleibt.

Die Positionsbestimmung beim spezifischen Ansatz von Alcatel-Lucent basiert auf der Auswertung der Feldstärke von WLAN Access Points. Zunächst wird dafür während der Kalibrierungsphase die Feldstärke in Abhängigkeit von der Position ermittelt und in einer serverbasierten Datenbank (Fingerprint-Datenbank) hinterlegt. Ein mobiles Endgerät misst die Feldstärke der WLAN-Access-Points im regulären Betrieb und bestimmt durch den Vergleich der aktuellen Messwerte mit den Werten in der Fingerprint-Datenbank die Position des mobilen Endgerätes. Durch Verwendung intelligenter Algorithmen, z.B. Berücksichtigung von Feldstärkeschwankungen, und entsprechender Konditionierung der Fingerprint-Datenbank wird die Genauigkeit der Ortung erhöht.

6 Verwertung, Zukunftsaussichten und weiterer F&E-Bedarf

6.1 Rechtliche Rahmenbedingungen für die Errichtung von Kleinwindenergieanlagen

Die Installation der Kleinwindenergieanlagen am Bahnhof Berlin Südkreuz wurde von erschwerten Bedingungen begleitet, die sich aus der unklaren Rechtsgrundlage im urbanen Umfeld und zusätzlich aus den sicherheitsrelevanten Anforderungen aus dem Bahn-Betrieb ergaben. Im Besonderen die Errichtung der horizontalen Kleinwindenergieanlagen konnte aus eben diesen Gründen innerhalb der Projektlaufzeit nicht durchgeführt werden. Gemeinsam mit den erhöhten Planungskosten und erforderlichen Anpassungen der Tragstruktur der KWEA an die Gegebenheiten vor Ort ist ein wirtschaftlicher Betrieb in diesem Kontext nur schwer zu erreichen. Es besteht erhöhter Bedarf einer länder- aber auch bundesweiten Vereinheitlichung des Genehmigungsprozesses für KWEA, die bislang nicht gegeben ist [31] und herstellerseitig ebenso nachhaltige Konzepte zur Integration von KWEA in Bestandsbauten.

6.2 Rechtliche Rahmenbedingungen, Geschäftsmodelle und Topologieauslegung für Microgrids

Die Attraktivität für die dezentrale Energieversorgung von Einzelakteuren durch ein MG ist aufgrund der rechtlichen und finanziellen Rahmenbedingungen aktuell noch nicht sehr hoch. Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass die Elektrifizierung des Straßenverkehrs ökonomische Fortschritte mit sich bringt. Die Umsetzung eines MGs zur Unterstützung dieses Prozesses ist aus volkswirtschaftlicher Sicht dringend notwendig, muss aber durch Veränderungen in der Rechtsgrundlage für den Betrieb eines MGs, die Speicherung von eigenerzeugtem Strom und die Netzeinbindung begleitet werden. Dies öffnet den Raum, um lokale Energiesysteme im gesamtheitlichen Kontext zu untersuchen und hinsichtlich der Topologieauslegung und Betriebsführung zur Versorgung mit verschiedenen Energieträgern (Strom, Gas, etc.) zu optimieren. Demnach muss die Betrachtung über die Elektromobilität hinausgehen und so z.B. am Bahnhof Berlin Südkreuz dessen Energiebedarf (Strom und Wärme) und auch die anliegenden Verbraucher des ÖPNV mit einbeziehen. In diesem Kontext stellt sich die Frage, inwiefern sich die Ergebnisse aus den Leistungsflussanalysen auf verschiedene Bahnhofsklassen übertragen lassen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich die Stromgestehungskosten eines MGs mit zunehmendem Ladebedarf der Elektromobilität verringern lassen. Demnach könnte die zusätzliche Einbindung des elektrischen Energiebedarfs des Bahnhofs ökonomische Vorteile mit sich bringen. Mittels Bedarfsprofilen für verschiedene Bahnhofsklassen könnten konkrete Aussagen darüber getroffen werden, ab welcher Bahnhofsklasse die Integration eines Microgrids zu empfehlen ist bzw. wie die Anlagenbestandteile des MGs in Abhängigkeit der Bahnhofsklasse optimal auszulegen sind.

Eine weitere Frage, die sich in diesem Zusammenhang aufdrängt, ist, ab welcher Größe ein MG, wie das am Bahnhof Südkreuz, unter berücksichtigung zukünftiger Preisentwicklungen wirtschaftlich und ökologisch tragbar ist. Entscheidend für die Durchsetzung lokaler MGs sind geeignete und kompetitive Geschäftsmodelle. Wie ein optimales Geschäftsmodell zukünftig aussehen sollte, lässt sich aktuell nicht zufriedenstellend beantworten. Die Versorgung von zusätzlichen Busflotten und Fremdverbrauchern könnten das Geschäftsmodell tragfähig machen. Solange Graustrom jedoch stets günstiger ist als lokal erzeugter Strom, bedarf es alternativer Anreize damit sich ein Geschäftsmodell dieser Art durchsetzen kann. Um geeignete Anreize zu identifizieren bedarf es weiterführender Untersuchungen.

6.3 Carsharing-Konzept

Die Attraktivität der angebotenen eCarsharing Modelle leidet im direkten Vergleich mit den herkömmlichen Verbrenner-Modellen. Die im Schaufenster-Projekt eingesetzten Modelle haben nicht die Attraktivität, um ein sogenanntes „lifestyle“-Gefühl zu entfachen, was jedoch erforderlich erscheint, um dem Nutzer von e-Mobility das Gefühl eines Entrepreneurs und Anerkennung zu geben. Interessant wäre ein Vergleich eines „lifestyle eModells“, wenn es denn überhaupt eins gäbe, mit einem „Vernunft eModell“ am gleichen Standort. Der Erfolg von car2go und drivenow begründet sich sicher zum großen Teil mit dem Angebot attraktiver Modelle.

Aus Beobachtungen ist das Marketing um die eMobilität sehr gering, in der Folge der Bekanntheitsgrad des Angebots sehr niedrig. Das neue integrierte Angebot der DB mit flinkster connect könnte ein neuer Ansatz sein. Es ist noch zu frisch auf dem Markt verfügbar, um hier bereits Tendenzen erkennen zu können.

Die Datenvernetzung ist zwar bedeutend vorangeschritten, allerdings besteht immer noch Handlungsbedarf. Allein auf das relativ kleine Anwendungsbeispiel Südkreuz bezogen, ist die Datenlieferung der einbezogenen eCarsharing-Flotte noch nicht optimal für den Betrieb des Microgrid gelöst. An dieser Stelle muß eine Standard Datenschnittstelle für alle e-Fahrzeuge geschaffen werden, um den Energiebedarf rechtzeitig und optimiert an den Ladesäulen eines Microgrid bereitzustellen. Die Relevanz der Datenversorgung wird durch die Vernetzung von Mobilität und Energieversorgung an dieser Stelle besonders wichtig. Hier muss zukünftig mehr Entwicklungsarbeit geleistet werden, will man die CO_2-Einsparung optimieren, die Anschlußsicherheit zwichen Individual- und öffentlichem Verkehr gewährleisten, Staus in Ballungsgebieten vermeiden etc..

6.4 Indoor-Navigation

Die realisierte Indoor-Navigation kann in zwei Szenarien genutzt werden:

- Während der Reisevorbereitung

- Während der Reise im Bahnhof.

Es ist zu erwarten, dass der erste Nutzungsfall der häufigere sein wird. Also bei gut informierten Reisenden, die sich bei Ankunft im Bahnhof bereits Kenntnisse angeeignet haben. Die Nutzung Im Bahnhof könnte unter Zeitdruck, in Bewegung, mit Gepäck und anderen Reaktions-Einschränkungen erschwert sein. Es wird sehr stark vom Kundenverhalten abhängen, wie die Indoor Navigation tatsächlich genutzt wird. Es wäre sinnvoll, das Verhalten der Nutzer mit der Indoor-Navigation zu analysieren, um die Oberfläche der Anwendung gegebenenfalls bedarfsorientiert anzupassen. Die Führung der Nutzer ist für die Akzeptanz der Indoor-Navigation sehr entscheidend. Diese Testverfahren lassen sich nur mit einer fertigen Oberfläche durchführen, deshalb wird hier eine gewisse iterative Vorgehensweise notwendig sein, für die der Einsatz weiterer F&E Mittel sinnvoll eingesetzt wäre.

6.5 Veröffentlichungen, Vorträge

Veröffentlichungen

AutorInnen	Titel	Erschienen in
(RLI) Alexander Wanitschke, Florian Schaller, Robin Göbel, Norman Pieniak	Kleinwindanlagen für Bahnhof im urbanen Raum	EP Elektro Praktiker, Ausgabe 05_2015
(InnoZ) Hartmann, Detlef/Marc Schelewsky/Klaus Wünstel/Lena Damrau/Vlado Handziski/Bernhard Müller-Beßler/Manuel Friedrich	Indoor-Navigation. Whitepaper zur Sicherstellung der Interoperabilität und Empfehlungen zur Visualisierung einer Indoor-Navigation.	InnoZ, Berlin
(InnoZ) Jonuschat, Helga/Korinna Stephan/Marc Schelewsky (2015)	Understanding multimodal and intermodal mobility	Sustainable Urban Transport. Published online: 14 May 2015; 149-176.

Vorträge

Referent	Titel des Vortrags	Veranstaltung	Ort
(RLI) Fabian Grüger	Posterpräsentation der Projektergebnisse auf Konferenzstand	ATZlive Konferenz „Netzintegration der Elektromobilität“ 1. Internationale ATZ Fachtagung; 30.05. – 1.6.	Deutschland, Berlin
(RLI) Florian Schaller	Showcase Project – Intelligent Mobility Station Berlin Südkreuz	Metropolitan Solutions Konferenz „Smart Solutions for Urban Challenges“, 22.05.2015	Deutschland, Berlin
(RLI) Florian Schaller	Interaction of Electric Vehi-	Synergetic Develop-	China, Peking

	cles with Renewable Energy	ment of New-energy Power Generation and Electric vehicles, 01.07.2016	
(RLI) Florian Schaller	Präsentation der Projektergebnisse an Stand (Demonstrator/Projektflyer)	New Mobility / Schaufenster Ergebniskonferenz	Deutschland, Leipzig
(RLI) Florian Schaller	Ergebnispräsentation auf Konferenzstand	„Das Elektroauto – Extravaganz für wenige oder automobile Zukunft? Fach- und Ideenkonferenz der Bundesregierung	Deutschland, Berlin
(RLI) Jannes Nerling	Vorstellung der Projektergebnisse in einem Kurzvortrag und auf einem Konferenzstand	Stadtwerke 2016 – 20. Euroforum Jahrestagung, 19.04 – 21.04 2016	Deutschland, Berlin
(RLI) Norman Pieniak	Kleinwindenergieanlagen im urbanen Bereich am Beispiel des Bahnhof Südkreuz	Pinie EV, 03/2016	Deutschland, Berlin
(InnoZ) Marc Schelewsky	Nutzergerechte Darstellungsformen und Möglichkeiten der Interoperabilität	AK Indoor-Navigation am 03.06.2013	Deutschland, Berlin
(InnoZ) Marc Schelewsky	Navigation im Mobilitätsbereich	BMVI am 26.06.2014	Deutschland, Berlin
(InnoZ) Marc Schelewsky	Ansatzpunkte Indoor-Navigation	Keynote DB-Workshop am 08.07.2014	Deutschland, Berlin
(InnoZ) Marc Schelewsky	Indoor-Navigationssysteme	Konferenz TelematicsPro am 11.07.2014	Deutschland, Berlin
(InnoZ) Marc Schelewsky	Neue Mobilitätskozepte	Lehrveranstaltung der HTW am 04.02.2015	Deutschland, Berlin
(InnoZ) Marc Schelewsky	Mobilitätsplattformen	Vortrag Senat Hamburg, Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation am 04.06.2015	Deutschland, Hamburg
(InnoZ) Marc Schelewsky	Anwendungsszenarien für Indoor-Navigation im Bahnhof	AK Indoor-Navigation am 09.06.2015	Deutschland, Berlin

7 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms

Die Förderbekanntmachung „Schaufenster Elektromobilität“ der vier Ministerien BMWi, BMVBS, BMU und BMBF fordert, einen Beitrag zum Ziel der Bundesregierung zu leisten: Entwicklung Deutschlands zum Leitanbieter für Elektromobilität. Durch die „Schaufenster Elektromobilität“ sollen Kräfte, Wissen und Erfahrungen systemübergreifend gebündelt und elektromobile Aktivitäten fokussiert vorangetrieben werden.

1. Im Projekt wird insgesamt und in den jeweiligen Teilbausteinen ein systemischer Ansatz verfolgt. Es geht um die integrative Betrachtung des Gesamtsystems bestehend aus den Teilsystemen Energie, Elektrofahrzeug, Öffentlicher Verkehr sowie aus dem Steuerungs- und Informationssystem, der wichtigen Schnittstelle zum Endkunden. Der Fokus liegt nicht auf den technischen Detailausprägungen neuer innovativer Einzellösungen, sondern auf der Vernetzung aller Komponenten zu einem neuen Gesamtangebot mit ökologisch und ökonomisch definierten Komponenten. Das Ziel liegt also in der intelligenten Kombination von teils vorhandenen Strukturen und Produkten mit neuartigen technischen Einzellösungen hin zu einer höherwertigen Nutzungsintensität und -qualität im öffentlichen Verkehr.
2. Aufgrund der Beobachtungen während der Projektlaufzeit läßt sich eine direkte Beeinflussung der Kunden durch eine Microgrid-Station zu höherer Nutzung von e-mobilen Angeboten nicht belegen. Der Kunde, der ein eMobil nutzen möchte, ist bereits sensibilisiert für den umweltfreundlichen Verkehr oder er ist ein „Ausprobierer“, der bei einer passenden Gelegenheit die eMobilität einmal ausprobieren möchte. Dabei spielt es keine Rolle, ob der notwendige Strom aus einer Microgrid Quelle kommt oder aus einer nur indirekt sauberen Quelle. Die Kombination aus einer Installation Microgrid und der eMobilität ist für sich kein Anreiz zur Nutzung der eMobilität.
3. Was aber festgestellt werden muß, ist der Tatbestand, daß die Microgrid Technologie fehlerfrei auch bei komlexeren Anwendungsfällen betrieben werden kann. Somit lässt sich auch bei Ausweitung der eMobilität die Netzbelastung auf dem bisherigen Status belassen, bzw. kann weiter sinken, wenn das Konzept auf die komplette Bahnhofsstruktur umgesetzt werden kann. Hierbei wird der Bahnhof zukünftig stärker die Rolle der Mobilitätsstation übernehmen, um die Belastung der Straßen im Ballungsraum in Grenzen zu halten und die Infrastruktur grundsätzlich für den Individualverkehr mit dem öffentlichen Verkehr zu erweitern und zu vernetzten. In diesem Kontext ist das Angebot von Ladestationen und eSharing am Bahnhof eine logische Weiterentwicklung. Die kritische Komponente kommt dabei nicht aus der technischen Betrachtung. Sie kommt ausschließlich aus der individuellen Einstellung des Verbrauchers: bin ich bereit, das Wagnis

eMobilität auf mich zu nehmen mit begrenzter Reichweite, fehlender Transparenz über Lademöglichkeiten und des subjektiven Gefühls des Eingeschränktseins.

4. Für eine weitere Umsetzung des Energiewechsels und der eMobilität ist es richtig, in solche Projekte zu investieren, die eine funktionierende und sinnvolle Fusion der beiden Komponenten beweisen. Es muß noch verstärkt auf die leichte Handhabbarkeit der eMobilität hingearbeitet werden und das bedeutet vor allem die Datenvernetzung zu erweitern. Hier dreht sich die Informationsversorgung vordringlich um die Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten im Detail: wo, wie erreichbar; mit Anschluß an ein öffentliches Verkehrsnetz, welcher Anschluß, etc..
5. Für den Weiterbetrieb der Microgrid-Station am Südkreuz und EUREF hat sich eine Servicegesellschaft aus den Projektbeteiligten InnoZ, Schneider electric und DB Energie gegründet, die sich auf den Betrieb und den Aufbau von Microgrid Architekturen konzentriert. Damit ist ein wesentlicher Baustein für den Betrieb der Microgrid Anlagen gelegt worden, da kein Eigner einer solchen Anlage das Spezialwissen haben wird oder aufbauen möchte. Insofern schließt sich auf dem Gebiet der Technik ein weiteres „weißes Feld“.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erstellte e-Module am Bahnhof Südkreuz 22

Abbildung 2: Grafik Lageplan Solar-Car-Shelter Bahnhof Südkreuz Berlin.....24

Abbildung 3: Microgrid-Station und Induktionsfläche.....24

Abbildung 4: Ansicht Batteriestation unter Solardach.....27

Abbildung 5: ClearSCADA Visualisierung Intelligente Mobilitätsstation 28

Abbildung 6: Durch einen „Touch“ auf die Fotosymbole können fotorealistische Darstellung des jeweiligen Bahnhofbereichs aufgerufen werden (Screenshots aus IMS-App).....31

Abbildung 7: Fotorealistische Darstellung des Bahnhofseingangs mit Erklärungstafel zur näheren Erläuterung 35

Abbildung 8: Visualisierung des Innenbereichs, damit der Bahnhofsbesucher nähere Informationen auch zu den im Projekt IMS installierten Komponenten erhält 35

Abbildung 9: Aufkleber für die QR-Code-Befragung zum Kundenfeedback zu den Demonstratoren „Mobilitätsmonitor“ und „Indoor-Navigation“. 36

Abbildung 10: Kleinwindenergieanlagen KD VK-58 auf der Auffahrtsspindel (links) und dem Treppenhaus am Bahnhof Berlin Südkreuz (rechts) [Quelle: RLI) 37

Abbildung 11: Umfang des im Simulationstool abgebildeten Microgrids (MGs) 40

Abbildung 12: Berechnete jährliche Energiebereitstellung der einzelnen Energieerzeuger sowie Netzbezug zur Deckung des synthetischen Ladebedarfs der Elektromobilität (keine Messung) 44

Abbildung 13: Zeitlicher Verlauf des PV-Ertrags (negativ), dem Netzbezug (positiv) und der Netzeinspeisung (negativ) nach Simulation 45

Abbildung 14: Relativer Vergleich der Energiebereitstellung, Kosten und THG-Emissionen der einzelnen Komponenten innerhalb einer Betriebszeit von 20 Jahren nach Simulation.....47

Abbildung 15: Vergleich der zeitlichen Autarkie über den spezifischen Systemkosten für Microgrids mit (OV2) und ohne (OV1) Drosselung der EE-Anlagenleistung; Weiterhin hohe Kosten erfordern zusätzliche Maßnahmen für eine wirtschaftliche Betriebsweise eines Microgrids; Erläuterung zu hervorgehobenen Microgrids folgt im Text; markierter

Strompreis repräsentiert den nivellierten Industriestrompreis über 20 Jahre 50

Abbildung 16: Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass MG B ohne Batterie deutlich geringer auf Abweichungen der Auslegungsparameter der EE-Technologien reagiert. Die Batterie hat demnach maßgeblichen Einfluss auf die Robustheit eines Energiesystems 53

Abbildung 17: Die Netzeinspeisung überschüssiger Energie (OV3) als Gegenmaßnahme zur Abregelung von EEA (OV 2) führt zu einer deutlichen Reduzierung der spezifischen THG-Emissionen auf das Niveau des deutschen EE-Mix. 55

Abbildung 18: Zusammenhang zwischen THG-Emissionen und Stromgestehungskosten für die Optimierungsvarianten OV 2 und OV 3; OV 3 bietet eine Senkung der THG-Emissionen bei gleichzeitiger deutlicher Reduzierung der Stromgestehungskosten um etwa 50 %. 56

Abbildung 19: Links – zeitlicher Verlauf des Ladebedarfs der Elektromobilität mit stärkerer zeitlicher Verteilung bei erhöhtem Bedarf; Rechts – Jahresdauerlinie mit deutlicher Steigerung der stündlichen Leistungsmittelwerte und Abnahme der Zeiten ohne Ladebedarf; Es wird von einem Zubau der Ladepunkten von 10 auf 200 ausgegangen. 57

Abbildung 20: Höherer Ladebedarf bewirkt Senkung des LCOE vor allem im oberen Autarkiebereich; Autarkiegrad wurde hier für anschaulichen Vergleich normiert. 58

Abbildung 21: Vergleich der spezifischen THG-Emissionen für Systeme zur Deckung geringer Ladebedarfe (OV 3) und hoher Ladebedarfe (OV 3 (+)) an der Carsharing-Station am Bahnhof Berlin Südkreuz 58

Abbildung 22: Die Mobilitätskosten (aus OV 3 (+)) für die optimierten MG 4 und 5 gleichen den Kosten für die Ladung mit dt. Strommix (kein MG). Die THG-Emissionen für die Antriebsleistung können durch ein optimiertes Microgrid jedoch halbiert und gegenüber dem konventionellen Vergleichsauto beinahe auf ein Drittel gesenkt werden. 60

Abbildung 23: Betrachtete Komponenten des Microgrids für das ÖPNV-Szenario (Quelle: oben [20], unten [21]) 61

Abbildung 24: links: Die Umweltbelastungen werden erst durch die Unterstützung mit einem Microgrid bestehend aus PV-Anlagen und Batterie deutlich reduziert; rechts: Die Elektrifizierung der Buslinien senkt die Mobilitätskosten perspektivisch auf das Niveau von dieselbetriebenen Bussen. 62

Abbildung 25: Vereinfachtes Modell des Niederspannungsnetzes am Bahnhof Südkreuz (eigene Darstellung) 65

Abbildung 26: Ergebnisse der maximalen Einspeiseleistung durch EEA und der maximalen Ladeleistung durch BEV. Für die aktuellen Einspeise- bzw. Ladeleistungen wurden Gleichzeitigkeitsfaktoren (GZF) berücksichtigt. 67

Abbildung 27: Spannungsverlauf von der Netzeinspeisung bis zur Microgrid-Sammelschiene für das Referenzszenario 4 mit unterschiedlichen Leitungslängen zwischen NS- und Microgrid-Sammelschiene sowie des Einsatzes eines RONTs 69

Abbildung 28: Mittlere Ladeleistungen in Abhängigkeit von Uhrzeit und Wochentag des synthetischen (links) und gemessenen (Mitte) Lastgangs der Ladesäulenleistung. Des Weiteren ist die kumulierte Energie der gemessenen Lastgänge aller Ladepunkte als Heatmap dargestellt (rechts) 71

Abbildung 29: Vergleich des kumulierten Energiebedarfs der synthetischen und gemessenen Lastkurven 72

Abbildung 30: Maximale Ladeleistung pro Ladevorgang (gemessene Daten) 72

Abbildung 31: Gegenüberstellung des monatlichen Energiebedarfs der Ladeinfrastruktur und der PV-Einspeiseleistung 73

Abbildung 32: Auf dem Ringbahnsteig des Bahnhofs bietet der Demonstrator Interessierten die Möglichkeit, mit Ihren Smartphones das Microgrid kennenzulernen und in einer Simulation selbst zu steuern. Wie im Bild unten rechts zu erkennen, werden bereits die Leistungsflüsse im Microgrid dargestellt. Reisende können ihr Wissen testen und sich in dem entwickelten Microgrid-Spiel mit anderen messen (oben rechts). 75

Abbildung 33: Leistungskennlinie der KD VK-58 auf Basis von Messwerten im Vergleich zu in Simulationen angenommenen synthetischen Werten I

Abbildung 34: Windgeschwindigkeitsverteilung am EUREF zur Veranschaulichung des geringen Auftretens hoher

Windgeschwindigkeiten im Stadtgebiet (Messdaten von 07/2015 – 04/2016) II

Abbildung 35: Zusammensetzung der Kosten für die vertikalachsigen Anlagen am Bahnhof Berlin Südkreuz und im Vergleich die Kosten für die Standardausführung der KD VK-58 III

Abbildung 36: Vergleich von gemessener und simulierter Einspeiseleistung IV

Abbildung 37: Abweichung zwischen simulierter und gemessener PV-Leistung als Heatmap (links) und als Scatterplot mit allen Daten (Mitte) sowie mit bereinigten Daten (um Azimut von -180° bis -40°) (rechts) V

Abbildung 38: Dreiteiliger Algorithmus zur Modellierung, Simulation, Optimierung und Robustheitsanalyse bzw. Übertragbarkeit von MG-Topologien und Betriebsstrategien XVII

Abbildung 39: Überblick über die untersuchten Optimierungsvarianten und MG-Konfigurationen XVIII

Abbildung 40: Wesentliche Faktoren und Entscheidungsregionen, die die KPI nachteilig beeinflussen XIX

Abbildung 41: Gesamte Ladeleistung der 5 Ladesäulen im Südkreuz-MG vom 01.08.15 bis 01.12.15 XX

Abbildung 42: Summierte Wirkleistungen beider Messpunkte an den Leistungsschaltern von Transformator 11 und Transformator 12 am Bhf. Südkreuz XXI

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: ursprünglicher Zeitplan 21

Tabelle 2: Ökologische Kennwerte am Südkreuz [Quelle: RLI] 38

Tabelle 3: Key Performance Indicators, Berechnung und Beschreibung siehe Anhang A.3 41

Tabelle 4: Eckdaten der Lastkurve für Elektromobilität, weitere Daten im Anhang A.4 41

Tabelle 5: Eckdaten der Kleinwindenergieanlagen, weitere Daten im Anhang A.4 42

Tabelle 6: Eckdaten der PV-Anlagen 42

Tabelle 7: Eckdaten der Li-Ionen-Batterie 43

Tabelle 8: Berechnete KPI des Referenzszenarios „MG 0“ am Bahnhof Berlin Südkreuz 46

Tabelle 9: Auflistung der Parametervariationen für die Optimierung 49

Tabelle 10: Auslegung der Komponenten eines MGs nach Optimierungsvariante 1 (OV 1) 49

Tabelle 11: Auslegungsparameter und KPI der Microgrids mit verschiedenen Betriebsstrategien und auch Ladebedarfen; Diskussion von OV 3 und OV 3 (+) folgt weiter unten 52

Tabelle 12: Vergleich der zwei Konfigurationen MG A und MG B zeigt, dass die Änderung der Betriebsstrategie zur Kostenreduktion bei gleichzeitiger Zunahme der Autarkie führt. 52

Tabelle 13: Szenarien für Lastflussanalysen 66

Tabelle 14: Annahmen für Finanzierungskonzept der Elektromobilität und Infrastruktur X

Tabelle 15: Kennwerte der BEV und Ladeinfrastruktur XI

Tabelle 16: Kennwerte der E-Busse und Ladeinfrastruktur XII

Tabelle 17: Kennwerte der KWEA XIII

Tabelle 18: Kennwerte der PVA XIV

Tabelle 19: Kennwerte des Lithium-Ionen-Energiespeichers XV

Tabelle 20: Werte für übergeordnete MG-Komponenten XVI

Tabelle 21: Zusätzliche Kennwerte des MGs XVI

Tabelle 22: Beschreibung der angewandten Optimierungsvarianten XVIII
Tabelle 23: Parametervariation in der Monte-Carlo-Simulation XIX

10 Literaturverzeichnis

[1] D. Schoen, „The Reflective Practitioner," Basic Books, New York, 1983.

[2] C. Ernst und H. Paul, „Präsenz und implizites Wissen. Zur Interdependenz zweier Schlüsselbegriffe der Kultur- und Sozialwissenschaften," Transcript, Bielefeld, 2013.

[3] E. Loenhoff, „Implizites Wissen. Epistemologische und handlungstheoretische Perspektiven," Velbrück Wissenschaft, Weilerwist, 2012.

[4] P. Icha und G. Kuhs, „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015," Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2016.

[5] Bundesregierung Deutschland, „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung," Bundesregierung Deutschland, Berlin, 2010.

[6] Europäische Kommission, „Weißbuch Verkehr - Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem," Europäische Kommission, 2011.

[7] T. Huld, M. Suri und E. D. Dunlop, „Geographical variation of the conversion efficiency of crystalline silicon photovoltaic modules in Europe. Progress in Photovoltaics: Research and Applications," 2008.

[8] P. Stackhouse und C. Whitlock, „Surface meteorology and solar energy (SSE) release 6.0. Langley: Earth Science Enterprise Program. NASA SSE 6.0, http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/," National Aeronautic and Space Administration (NASA), Langley, 2008.

[9] „VERORDNUNG (EG) Nr. 443/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES," Amtsblatt der Europäischen Union, 2009.

[10] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE), *Regelung Nr. 101,* Amtsblatt der Europäischen Union, 2012.

[11] BMUB, *Wie klimafreundlich sind Elektroautos?,* Berlin: BMUB, 2015.

[12] S. Herz und F. Valentin, „Rechtsgutachterliche Stellungnahme zur Vermarktung und Nutzung von Strom in abgegrenzten Arealen," von Bredow Valentin Herz

Partnerschaft von Rechtsanwälten mbB, Berlin, 2015.

[13] A. Wanitschke, „Multi-Objective Optimization of Micro Grids using Evolutionary Algorithms," Berlin, 2014.

[14] Ford, „Ford Ka - Preisliste," [Online]. Available: http://www.ford.de/cs/BlobServer?blobtable=MungoBlobs&blobcol=urldata&blobheadervalue1=attachment%3Bfilename%3D%22Ford_Ka%2B_Preisliste.pdf%22&blobheadervalue2=abinary%3Bcharset%3DUTF-8&blobheadername1=Content-Disposition&blobheadername2=MDT-Type&blobhead.

[15] M. Faltenbacher, O. Vetter, A. Rock und J. Grafestätter, „StatuSbericht 2015 /16 Hybrid- und Elektrobus-Projekte in Deutschland," BMVI, Berlin, 2016.

[16] Die Bundesregierung, „Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung," 2009.

[17] P. Nobis, F. Samweber und S. Fischhaber, *Netzstabilität mit Elektromobilität,* Wien: 9. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2015.

[18] A. Wanitschke und O. Arnhold, *Multi-objective optimization of an Autobahn BEV charging station supplied by renewable energy,* Montreal: Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 2016.

[19] E. Gaudchau, M. Resch und A. Zeh, „Quartierspeicher - Definition, rechtlicher Rahmen und Perspektiven," *Ökologisches Wirtschaften,* pp. 26-27, Juni 2016.

[20] S. Pilick, „Elektro-Busse der BVG fahren wieder – vielleicht," dpa, 2016. [Online]. Available: http://www.tagesspiegel.de/berlin/oeffentlicher-verkehr-berlin-elektro-busse-der-bvg-fahren-wieder-vielleicht/12817638.html.

[21] Bombardier, „PRIMOVE for e-cars," 2016. [Online]. Available: http://primove.bombardier.com/applications/e-car.html.

[22] Umweltbundesamt (Hrsg.), „Daten zum Verkehr," Dessau, 2012.

[23] A. Kunith, R. Mendelevitch, A. Kuschmierz und D. Goehlich, „Optimization of fast charging infrastructure for electric bus transportation – Electrification of a city bus network," EVS29 Symposium, Montréal, Québec, Canada, 2016.

[24] D. I. f. N. e. V. DIN, „Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks; German version EN 50160:2010 + Cor. :2010," 2010.

[25] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), „Technische

Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz," 2008.

[26] G. Kerber, „Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsverteilnetzen für die Einspeisung aus Photovoltaikkleinanlagen," TU München, 2011.

[27] J. Scheffler, „Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten," TU Dresden, 2002.

[28] C. Schwaegerl, M. Bollen, i. K. Karou und A. Yagmur, „Voltage control in distribution systems as a limitation of the hosting capacity for distributed energy resources," in *18th Int. Conf. Exhib. Electr. Distrib. (CIRED)*, Turin, 2005.

[29] CITROËN Deutschland GmbH, „CITROËN C-Zero Preisliste," Köln, 2016.

[30] W. Prüggler, „Konzeption von Vehicle to Grid bezogenen Entwicklungsstrategien für österreichische Entscheidungsträger," Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2013.

[31] B. Müller, N. Pieniak und J. Fiukowski, „Kleinwindenergieanlagen, die Genehmigungslage in Deutschland und deren Einsatz an Bildungseinrichtungen," Reiner Lemoine Insititut gGmbH, Berlin, 2015.

[32] P. Bertheau, P. Blechinger, C. Cader und C. Breyer, „Geographic, technological and economic analysis of isolated diesel grids to assess the upgrading potential with renewable energies – A case study of Tanzania," in *Proc. 2nd International Conference on Micro Perspectives for decentralized energy supply*, 2013.

[33] P. Blechinger, R. Seguin, C. Cader, P. Bertheau und C. Breyer, „Assessment of the Global Potential for Renewable Energy Storage Systems on Small Islands," *Energy Procedia,* 2014.

[34] H. Jun, D. Changhong und H. Wentao, „Optimal sizing of distributed generation in micro-grid considering Energy Price Equilibrium point analysis model," in *8th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* , 2013.

[35] M. Marzband, R. K. Zarrin, A. Sumper und A. Baghramian, „Economic Cost Analysis of Standalone hybrid Microgrid with minimum COE using HOMER," in *Majelsi J. Energy Management*, 2013.

[36] C. Kost, J. Mayer, J. Thomsen, N. Hartmann, C. Senkpiel, S. Philipps, S. Nold, S. Lude, N. Saad und T. Schlegl, „Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies," Fraunhofer ISE, Freiburg, 2013.

[37] W. Short, D. J. Packey und T. Holt, „A manual for the economic evaluation of

energy efficiency and renewable energy technologies," National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado (USA), 1995.

[38] „Levelized Cost of Mobility als anwendungsorientierte Kennzahl in der Automobilbranche," TCW, 16 06 2014. [Online]. Available: http://www.tcw.de/news/levelized-cost-of-mobility-als-anwendungsorientierte-kennzahl-in-der-automobilbranche-714. [Zugriff am 2 11 2015].

[39] O. Arnhold, M. Hlusiak, F. Möhrke und C. Breyer, „Mobility Concepts Using Excess Power from Proposed Renewable Energy Supply System on Graciosa Island, Azores Archipelago," in *6th International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition*, Berlin, 2011.

[40] J. e. a. Schmidt, „Regional energy autarky: Potentials, costs and consequences for an Austrian region," *Energy Policy,* pp. 211-221, August 2012.

[41] J. Weniger, J. Bergner, T. Tjaden und V. Quaschning, „Dezentrale Solarstromspeicher für die Energiewende," HTW Berlin, Berlin, 2015.

[42] D. Hsu, P. O'Donoughue, V. Fthenakis, G. Heath, H. Kim, P. Saywer, J. Choi und D. Turney, *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation: Systematic Review and Harmonization,* University Yale, USA: Journal of Industrial Ecology, 2012.

[43] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) , „dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030," Berlin, 2012.

[44] „Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014)," [Online]. Available: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eeg_2014/gesamt.pdf.

[45] FGW e.V., „Abschlussbericht "Erhöhung der Verfügbarkeit von Windkraftanlagen"," [Online]. Available: http://wind-fgw.de/pdf/EVW_Abschlussbericht_%F6ffentlich.pdf. [Zugriff am 17 12 2015].

[46] ADAC e.V., „Autokatalog - Detail: Citroen C-Zero Tendance," April 2016. [Online]. Available: https://www.adac.de/infotestrat/fahrzeugkauf-und-verkauf/neuwagenberater/autokatalog/detail.aspx?mid=237400&bezeichnung=citroen-c-zero-tendance.

[47] RWE Effizienz GmbH, „RWE eMobility Preisliste," RWE, Dortmund, 2012.

[48] „BYD Auto Electric Bus," Plug In America, April 2016. [Online]. Available:

http://www.pluginamerica.org/vehicles/byd-auto-electric-bus.

[49] P. Frank, M. Friedrich und J. Schlaich, „Betriebskosten von Busverkehren schnell und genau ermitteln, Der Nahverkehr," Alba Fachverlag, Düsseldorf, 2008.

[50] FGW e.V., „Abschlussbericht "Erhöhung der Verfügbarkeit von Windkraftanlagen"," [Online]. Available: http://wind-fgw.de/pdf/EVW_Abschlussbericht_%F6ffentlich.pdf. [Zugriff am 17 12 2015].

[51] H. Kondziella, T. Bruckner und e. al., *Stromspeicher für die „Energiewende" – eine akteursbasierte Analyse der zusätzlichen Speicherkosten,* Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.

A Anhang

A.1 Informationen zur vertikalen Kleinwindenergieanlage KD VK-58

A.1.1 Vermessung der Leistungskennlinie

Die in den Simulationen angenommene Leistungskennlinie für die vertikalen Kleinwindenergieanlagen stimmt mit der vermessenen Leistungskennlinie im unteren Geschwindigkeitsbereich sehr gut überein. Im oberen Bereich ab 10,5 m/s sind jedoch deutliche Abweichungen zu erkennen. Einerseits wird stark unterschätzt, andererseits auch stark überschätzt. Aufgrund des seltenen Auftretens dieser hohen Windgeschwindigkeiten gerade im Stadtgebiet ist dieser Einfluss jedoch für die Untersuchungen und Berechnungen auf Basis der durchgeführten Simulationen zu vernachlässigen, siehe auch

Abbildung 34: Windgeschwindigkeitsverteilung am EUREF zur Veranschaulichung des geringen Auftretens hoher Windgeschwindigkeiten im Stadtgebiet (Messdaten von 07/2015 – 04/2016)

.

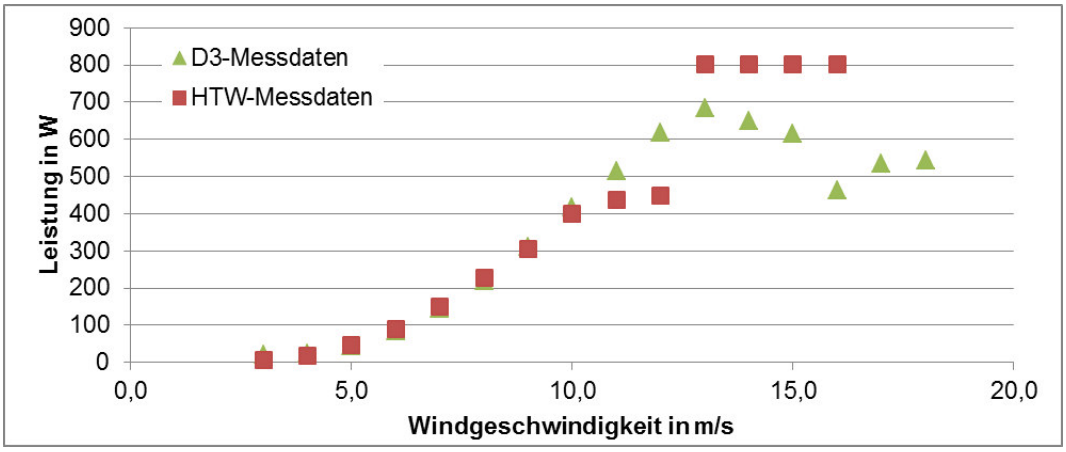


Abbildung 33: Leistungskennlinie der KD VK-58 auf Basis von Messwerten im Vergleich zu in Simulationen angenommenen synthetischen Werten

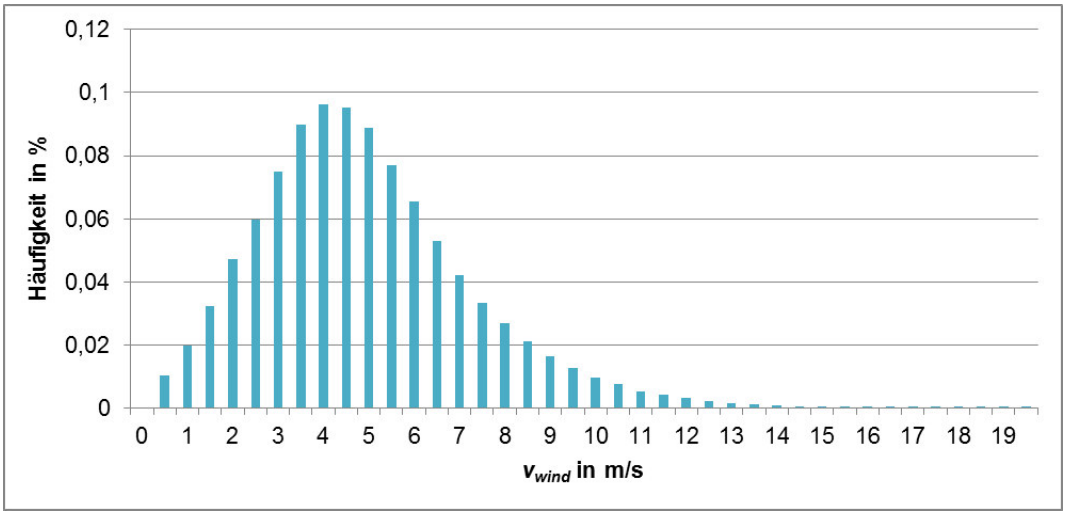


Abbildung 34: Windgeschwindigkeitsverteilung am EUREF zur Veranschaulichung des geringen Auftretens hoher Windgeschwindigkeiten im Stadtgebiet (Messdaten von 07/2015 – 04/2016)

A.1.2 Darstellung der Kosten für die installierten vertikalachsigen KWEA

Im Projekt mussten erhebliche Mehrkosten bei der Installation der KWEA aufgewendet werden, da die Anlagen nachträglich auf Bestandsbauten der DB AG errichtet wurden und die standardisierte Ausführung der Anlage nicht geeignet war. Massive Stahlträger wurden als Unterkonstruktion für die Aufstellung auf dem Treppenhaus und der Auffahrtspindel angefertigt und waren für bis zu 35 % der Gesamtkosten verantwortlich gegenüber 12 % bei Standardausführung. Außerdem mussten Krane zur Errichtung eingesetzt werden, wodurch sich die Kosten auf das Achtfache des Referenzfalls erhöhten. In Abbildung 35 werden die Projektkosten mit denen für die Standardausführung verglichen. Die Kapitalkosten bei der Standardausführung (Referenz) beziehen sich auf ein Finanzierungskonzept inkl. Darlehen über 10 Jahre. Diese Kosten fielen innerhalb des Projektes aufgrund der Förderung nicht an. Der Vergleich unterstreicht das Einsparpotential für die Errichtung von KWEA direkt beim Bau eines Gebäudes, wenn die vorhandenen Baumaschinen zur Installation der KWEA eingesetzt werden können.

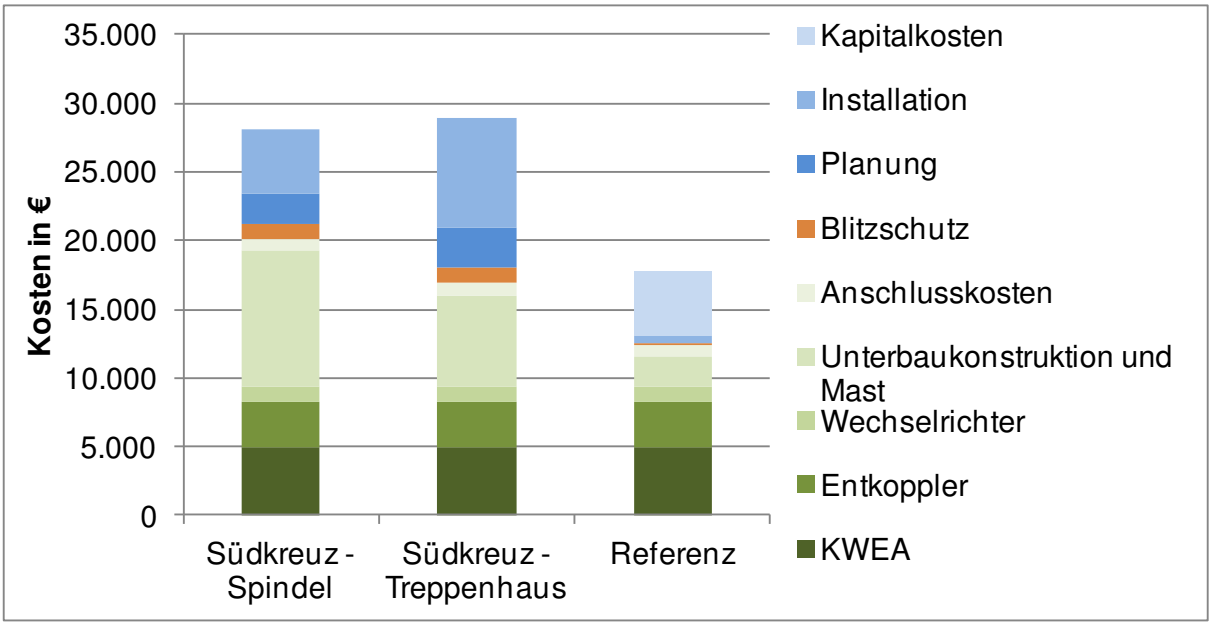


Abbildung 35: Zusammensetzung der Kosten für die vertikalachsigen Anlagen am Bahnhof Berlin Südkreuz und im Vergleich die Kosten für die Standardausführung der KD VK-58

A.2 Validierung des PV-Modells des Simulationstools Smooth

Messdaten der eingespeisten Leistung der PVA IMS sowie die Globalstrahlung, gemessen oberhalb der PVA, standen für den Zeitraum vom 20.05.16 bis 17.06.2016 zur Verfügung, sodass die Validierung des PV-Modells auf Basis der Parameter und Messdaten der PVA durchgeführt wurde. Die Validierung erfolgte durch einen Vergleich der simulativ erzeugten Einspeiseleistung, auf Basis der gemessenen Globalstrahlung, mit der gemessenen Einspeiseleistung der PVA. Notwendige Eingangsgrößen für eine Simulation des PV-Modells sind unter anderem die Globalstrahlung und die Direktnormalstrahlung. Da bei der IMS lediglich eine Messung der Globalstrahlung stattfindet, musste die Zeitreihe für die Direktnormalstrahlung synthetisch erstellt werden. Hierfür wurde eine Funktion einer OpenSource Toolbox (PV_LIB Toolbox 1.2) für Matlab verwendet, die auf Grundlage verschiedener Eingangsgrößen (Globalstrahlung, Sonnenstand, Tag des Jahres,..) die Direktnormalstrahlung anhand spezieller Algorithmen berechnet.

In Abbildung 36 sind gemessene und simulierte PV-Leistung für drei ausgewählte Tage gegenübergestellt.

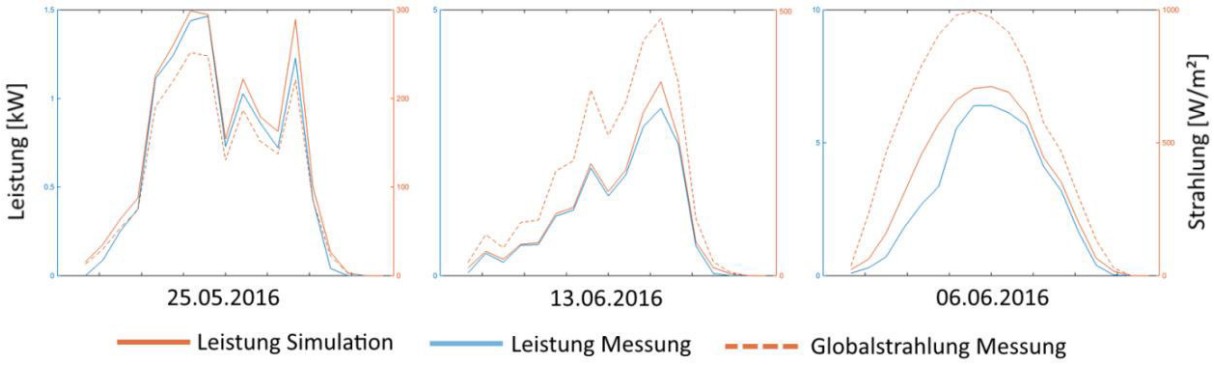


Abbildung 36: Vergleich von gemessener und simulierter Einspeiseleistung

Der 25.05.2016 sowie der 13.06.2016 bilden eher bewölkte Tage mit geringen Einstrahlungswerten und hauptsächlich diffuser Strahlung ab. Die Abweichung von gemessener und simulierter PV-Leistung ist in diesem Fall sehr gering. Am 06.06.2016, ein eher wolkenloser Tag, ist speziell in den Morgenstunden eine deutliche Abweichung zwischen simulativer und gemessener PV-Leistung zu beobachten. In den Nachmittags- und Abendstunden ist die Übereinstimmung hingegen verhältnismäßig genau. Östlich der PVA befinden sich das Bahnhofsgebäude sowie das Parkdeck. Des Weiteren befinden sich vereinzelte Bäume in der Nähe der PVA. Dies lässt Grund zu der Annahme, dass die gemessene PV-Leistung aufgrund von Teilverschattungen in den Morgenstunden geringer ausfällt als die simulierte PV-Leistung. Insgesamt werden die PV-Erträge in der Simulation daher etwas überschätzt.

Die Differenz zwischen simulativer und gemessener PV-Leistung in Abhängigkeit des Sonnenstands geht aus der Heatmap in Abbildung 37 nochmals in visualisierter Form hervor. Anhand der Farbskala wird die größte Abweichung (weiß) in den Vor-

mittagsstunden ersichtlich. Im Scatterplot (Mitte) ist für jeden Zeitschritt die simulierte über der gemessenen PV-Leistung dargestellt. Sofern eine komplette Übereinstimmung der simulierten mit der gemessenen PV-Leistung bestünde, würden sämtliche Datenpunkte auf der 0 %-Kennlinie liegen. Es zeigt sich jedoch eine insgesamt relativ große Streuung mit Abweichungen um bis zu +50 % aufgrund der bereits erläuterten Umstände. Im Scatterplot (rechts) wurden die Datenpunkte für einen Azimutbereich von -180° bis -40° entfernt. Dieser Azimutbereich deckt in etwa die Morgen- und Vormittagsstunden ab, in denen vermutlich Teilverschattungen vorliegen. Es zeigt sich, dass sich die Streuung der Datenpunkte deutlich reduziert und ein Großteil der Datenpunkte eine maximale Abweichung von +20 % und im Durchschnitt von etwa +10 % aufweist.

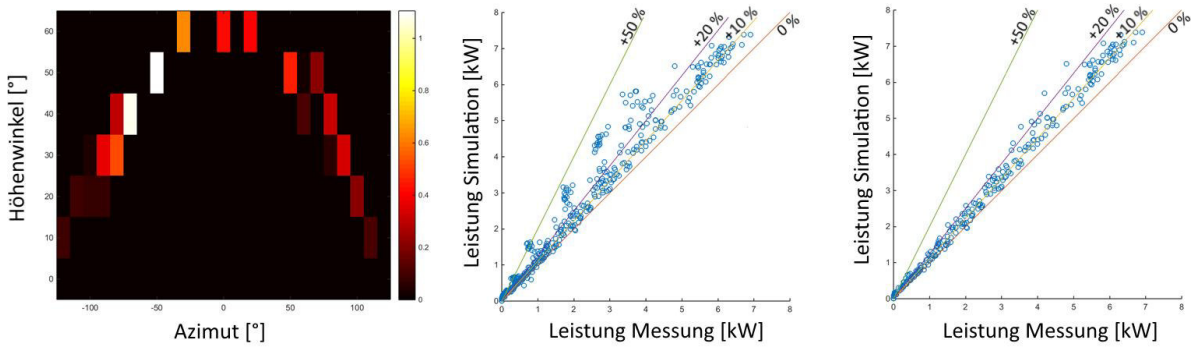


Abbildung 37: Abweichung zwischen simulierter und gemessener PV-Leistung als Heatmap (links) und als Scatterplot mit allen Daten (Mitte) sowie mit bereinigten Daten (um Azimut von -180° bis -40°) (rechts)

Die simulativen PV-Leistungen fallen unabhängig möglicher Teilverschattungen, welche im Simulationsmodell nicht berücksichtigt werden, höher aus als die gemessenen PV-Leistungen. Mögliche Ursachen hierfür sind Abweichungen beim angenommenen Wirkungsgrad, leichte Verschmutzungen der PV-Module sowie Ungenauigkeiten, wie der exakten Ausrichtung der PVA, der geringen Simulationszeitschritte (stündlich) und der synthetisch erstellten Zeitreihe der Direktnormalstrahlung. Aufgrund der diskutierten Umstände und Ungenauigkeiten ergibt sich für den betrachteten Zeitraum eine um etwa 20 % höhere eingespeiste Energie im Simulationsmodell. Da bei dem Forschungsprojekt und den Simulationen qualitative Erkenntnisse im Vordergrund stehen, wird die quantitative Abweichung zwischen den PV-Erträgen als akzeptabel eingeschätzt.

Abschließend lässt sich festhalten, dass das PV-Modell anhand der Messwerte erfolgreich validiert werden konnte. Bis auf Sonnenstände, in denen Verschattungen vorliegen, ist die Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter PV-Leistung verhältnismäßig genau.

A.3 Berechnung der Key-Performance-Indikatoren (KPI)

A.3.1 Levelized Cost of Electricity (LCOE)

LCOE ist eine häufig verwendete Kennzahl, um die Wirtschaftlichkeit einer Microgrid-Energiebereitstellung zu bewerten. Umfangreiche Literatur zu Berechnung und Verwendung von LCOE [32, 33, 34, 35, 36, 37] ist verfügbar.

Um Investitions- und jährliche Betriebs-/Wartungsausgaben für die energiebereitstellenden Komponenten bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung zu berücksichtigen, wird die Annuitätenmethode angewandt. Die Gesamt-MG-Annuitäten werden durch die nutzbare elektrische Energie, d.h. den jährlichen Energiebedarf der Elektrofahrzeuge, dividiert. Der jährliche Energiebedarf ist in allen Simulationsszenarien gleich. Daher wird ein Kennwert erzeugt, mit dem der ökonomische Wert der verschiedenen Microgrid-Setups beurteilt und verglichen werden kann.

LCOE berechnet sich wie folgt [37]:

$$LCOE = \frac{\text{Capex}\cdot\text{CRF(WACC,N)}+\text{Opex}}{E_{demand}} \tag{2}$$

$$CRF(WACC, N) = \frac{WACC*(1+WACC)^N}{(1+WACC)^N-1} \tag{3}$$

$$WACC = \frac{E}{E+D}\cdot k_E + \frac{D}{E+D}\cdot k_D \tag{4}$$

Gleichung (2): Levelized Cost of Electricity (LCOE) für elektrische Energiesysteme. Bedeutung der Abkürzungen: Investitionsausgaben (engl. Capital expenditures (Capex)); Kapitalrückgewinnungsfaktor (engl. capital recovery factor (CRF)); Gewichteter durchschnittlicher Kapitalkostensatz (engl. weighted average cost of capital (WACC)); Projektlaufzeit (N); Jährliche Betriebs- und Wartungskosten (engl. operation and maintenance expenditures per year (Opex)); Jährlicher Energiebedarf (E_{demand})

Gleichung (3): Kapitalrückgewinnungsfaktor (CRF). CRF setzt sich aus dem gewichteten durchschnittlichen Kapitalkostensatz (WACC) und der Projektlaufzeit (N) zusammen.

Gleichung (4): Gewichteter durchschnittlicher Kapitalkostensatz (WACC). Abkürzungen: Eigenkapital (E), Fremdkapital (D), Eigenkapitalzins (k_E), Fremdkapitalzins (k_D). Es ist ersichtlich, dass nur die Anteile an Fremd- und Eigenkapital zur Berechnung des WACC benötigt werden.

A.3.2 Levelized Cost of Mobility (LCOM)

In starker Analogie zu LCOE ist LCOM eine Kennzahl, die verwendet werden kann, um die Wirtschaftlichkeit des Aufbaus und Betriebs einer Elektrofahrzeugflotte zu bewerten (vgl. [38]). Dieser Wert beinhaltet sowohl die Investition in und den Betrieb der Batterieelektrischen Fahrzeuge (engl. Battery Electric Vehicles, BEV) als auch Installation und Betrieb der notwendigen Elektrofahrzeug-Ladeinfrastruktur (engl. Electric Vehicle Supply Equipment, EVSE) und berücksichtigt entstehende MG-LCOE als variable Betriebskosten bei Ladung der Fahrzeuge.

LCOM berechnet sich wie folgt [39]:

$$LCOM = \frac{\mathrm{Capex}_{BEV} \cdot \mathrm{CRF}(\mathrm{WACC}, \mathrm{N}_{BEV})_{BEV} + \mathrm{Opex}_{\mathrm{BEV,fix}} + \mathrm{Opex}_{\mathrm{BEV,var}} + \mathrm{Capex}_{EVSE} \cdot \mathrm{CRF}(\mathrm{WACC}, \mathrm{N}_{EVSE})_{EVSE} + \mathrm{Opex}_{EVSE,fix}}{\mathrm{FD}} \quad (5)$$

Gleichung (5): Levelized cost of mobility (LCOM) für Elektrofahrzeugflotten. Abkürzungen: Investitionsausgaben für Elektrofahrzeuge (Capex_{BEV}), Kapitalrückgewinnungsfaktor Elektrofahrzeuge (CRF_{BEV}, siehe Gl. (4)), Gewichteter durchschnittlicher Kapitalkostensatz (WACC, siehe Gl. (5)), Fahrzeuglebensdauer (N_{BEV}), Jährliche Betriebs- und Wartungskosten für Elektrofahrzeuge ($\mathrm{Opex}_{BEV,fix}$), Jährliche Betriebskosten für Fahrzeugladung ($\mathrm{Opex}_{BEV,var}$, entspricht LCOE x Gesamtladebedarf), Investitionsausgaben für EVSE (Capex_{EVSE}), EVSE-Lebensdauer (N_{EVSE}), Kapitalrückgewinnungsfaktor EVSE (CRF_{EVSE}), jährliche Kosten für Instandhaltung der Ladeinfrastruktur ($\mathrm{Opex}_{EVSE,fix}$), Jährliche zurückgelegte Strecke der Fahrzeugflotte (engl. Fleet distance, FD).

A.3.3 Spezifische Treibhausgasemissionen der Energiebereitstellung und der Elektrofahrzeuge

Um die ökologischen Auswirkungen der MG-Stromerzeugung zu bewerten, sind die spezifischen Treibhausgasemissionen der Energiebereitstellung u.a. zur Deckung des Ladebedarfs der BEV ein sinnvoller Wert. Die Energiebereitstellung umfasst sowohl die nutzbare elektrische Energie der EE-Erzeugungsanlagen als auch den erforderlichen Netzbezug. Die nutzbare Energie ist nur ein Teil des Gesamtertrags der EEA, der sich auf die Deckung des Ladebedarfs und die ausgespeiste Energie bezieht. Etwaige Energie zur Versorgung der Nebenverbraucher im MG mindert die nutzbare Energie. Die entstehenden Emissionen des MG-Strommixes können anschließend mit den Emissionen anderer Energietechnologien verglichen werden. Die Systemgrenze zur Berücksichtigung der Treibhausgasemissionen der Erneuerbare-Energie-Anlagen ist dabei nicht auf den Betrieb beschränkt, sondern beginnt bereits bei der Produktion der Anlagen. Daher ist der Energiebeitrag aus diesen Anlagen nicht CO_2-emissionsfrei, sondern richtet sich nach berechneten Technologiewerten, siehe Anhang A.4.

Auch wenn der angenommene Energiebedarf der E-Fahrzeuge im Basisszenario bilanziell durch die Erträge der installierten Erzeugertechnologien gedeckt werden kann, ist dennoch Netzbezug erforderlich. Der LCE_{MG} setzt sich dementsprechend aus dem THG-Aufwand für die EEA im MG und dem Netzbezug zusammen und wir auf den Ladebedarf der BEV und die ausgespeiste elektrische Energie bezogen:

$$LCE_{MG} = \frac{E_{Netz} \cdot LCE_{Netz} \cdot t + \sum_{c=1}^{n} M_{THG,c}}{(E_{BEV} + E_{Aus}) \cdot t} \quad (6)$$

mit dem jährlichen Netzbezug E_{Netz}, dem CO_2-Äauivalent für den dt. Strommix LCE_{Netz}, der Betriebszeit t, den Emissionsbelastungen aus dem Lebenszyklus der installierten energiebereitstellenden und –speichernden Komponente $M_{THG,c}$ (in Tonnen), dem jährlichen Ladebedarf der Elektrofahrzeuge E_{BEV} und der jährlich ausgespeisten Energie E_{Aus}.

Die spezifischen THG-Emissionen der Elektrofahzeuge werden wie folgt berechnet:

$$LCE_{BEV} = LCE_{MG} \cdot c_{BEV} \quad (7)$$

mit dem spezifischen Energiebedarf der Elektrofahrzeuge (C_{BEV}).

A.3.4 Energetische und zeitliche Autarkie

In der Literatur sind verschiedene Untersuchungen zur Autarkie von Energiesystemen auf unterschiedlicher regionaler Skala durchgeführt worden [40, 41]. Um die energetische, bilanzielle Autarkie des MGs zu berücksichtigen, wird der KPI „Energetische Autarkie (EA)“ eingeführt und wie folgt berechnet:

$$EA = 1 - \frac{E_{MV,Supply} + E_{MV,Feedin}}{E_{MG,Generation} + E_{MG,Demand}} \quad (8)$$

Gleichung (8): Energetische Autarkie (EA). Abkürzungen: Jährliche bezogene elektrische Energie aus dem überlagerten Netz ($E_{MV,Supply}$), Jährliche eingespeiste elektrische Energie in das überlagerte Netz ($E_{MV,Feedin}$), jährliche elektrische Energiebereitstellung des MGs ($E_{MG,Generation}$), jährlicher elektrischer Energiebedarf des MGs ($E_{MG,Demand}$).

Neben dem Netzbezug ist in Ergänzung zur Definition in [41] auch die Einspeisung in das überlagerte Netz der energetischen Autarkie abträglich; für eine hohe energetische Autarkie sollte also die elektrische Energiebereitstellung auf den Energiebedarf gut abgestimmt sein.

Durch die energetische Autarkie ist der Grad an zeitaufgelöster Autarkie, d.h. wie hoch der Netzbezug oder die Netzeinspeisung zu einem Zeitschritt ist, nicht ausreichend abgebildet. Daher wird die zeitbasierte Autarkie eingeführt, die sich wie folgt berechnet:

$$TA = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i(P_{PCC}=0)}{\sum_{i=1}^{n} t_i} \tag{9}$$

Gleichung (9): Zeitliche Autarkie (*TA*). Abkürzung: Leistung am Netzanschlusspunkt (P_{PCC}), Zeitschritte pro Jahr (*n*).

A.4 Annahmen für Leistungsflussanalyse

Tabelle 14: Annahmen für Finanzierungskonzept der Elektromobilität und Infrastruktur

Kennwert	Wert	Einheit
Anteil Eigenkapital	40[5]	%
Anteil Fremdkapital	60[6]	%
Verzinsung Eigenkapital	3[7]	%
Verzinsung Fremdkapital	8[8]	%

[5] Bei angenommener Installation und Betrieb durch einen MG-Betreiber
[6] Bei angenommener Installation und Betrieb durch einen MG-Betreiber
[7] Üblicher Wert
[8] Üblicher Wert

Tabelle 15: Kennwerte der BEV und Ladeinfrastruktur

Kennwert	Wert	Einheit
Anzahl BEV – niedriger Ladebedarf	10[9]	
Anzahl BEV – hoher Ladebedarf	500	
Flottenparameter		
Durchschnittliche Fahrleistung pro BEV	9.903	km/a
Investitionsausgaben eines BEV	19.390[10]	€
Variable Betriebskosten BEV	LCOE x Spez. Energiebedarf x Fahrleistung[11]	€/a
Fixe Betriebskosten BEV	1.000	€/a
Lebensdauer BEV	8	a
Spez. Energiebedarf BEV	0,15[12]	kWh/km
Infrastrukturparameter		
Investitionsausgaben Infrastruktur – niedriger Ladebedarf	76.975[13]	€
Fixe Betriebskosten Infrastruktur – niedriger Ladebedarf	3.849[14]	€/a
Investitionsausgaben Infrastruktur – hoher Ladebedarf	1.462.525[15]	€
Fixe Betriebskosten Infrastruktur – hoher Ladebedarf	73.127[16]	€/a
Lebensdauer Infrastruktur	10[17]	a

[9] Angenommen nach Planung: 10 Ladepunkte
[10] Referenzauto: Citroen C-Zero
[11] Die variablen Betriebskosten richten sich nach den Kosten für die geladene Energie.
[12] Mit Unsicherheiten aufgerundet nach [48]
[13] Ermittlung durch Eigenrecherche [49]
[14] 5 % der Investitionsausgaben, üblicher angesetzter Wert
[15] Ermitlung durch Eigenrecherche [49] – Faktorisierung des Wertes für niedrigen Bedarf mit ca. 20
[16] 5 % der Investitionsausgaben, üblicher angesetzter Wert
[17] Wert bereitgestellt durch Partner Schneider Electric.

Tabelle 16: Kennwerte der E-Busse und Ladeinfrastruktur

Kennwert	Wert	Einheit
Anzahl E-Busse	4[18]	
Flottenparameter		
Durchschnittliche Fahrleistung pro E-Bus	40.056[19]	km/a
Investitionsausgaben eines E-Bus	500.000[20]	€
Variable Betriebskosten BEV	LCOE x Spez. Energiebedarf x Fahrleistung[21]	€/a
Fixe Betriebskosten BEV	6.687[22]	€/a
Lebensdauer BEV	12[23]	a
Spez. Energiebedarf BEV	2,0[24]	kWh/km
Infrastrukturparameter		
Investitionsausgaben Infrastruktur – niedriger Ladebedarf	250.000[25]	€
Fixe Betriebskosten Infrastruktur – niedriger Ladebedarf	12.500[26]	€/a
Lebensdauer Infrastruktur	10[27]	a

[18] Nach Aussage der BVG
[19] Eigenberechnung nach Auswertung der Fahrpläne und Routen
[20] Annahme nach [51]
[21] Die variablen Betriebskosten richten sich nach den Kosten für die geladene Energie.
[22] Berechnung entsprechend [50]
[23] entsprechend [50]
[24] Erkenntnis aus Parallelprojekt „eBus Berlin“ mit A.Kunith, TU Berlin
[25] Erkenntnis aus Parallelprojekt „eBus Berlin“ mit A.Kunith, TU Berlin
[26] 5 % der Investitionsausgaben, üblicher angesetzter Wert
[27] Wert bereitgestellt durch Partner Schneider Electric

Tabelle 17: Kennwerte der KWEA

Komponente / Kennwert	KWEA 1 Parkdeck Süd	KWEA 2 Parkdeck Süd	KWEA 3 Spindel	KWEA 4 Treppenhaus	**Einheit**
Typ	EasyWind 6AC	EasyWind 6AC	Amperius VK-58	Amperius VK-58	
Wechselrichter-Wirkungsgrad	-[28]	-	97	97	%
Nabenhöhe	20	20	18	20	m
Lebensdauer[29]	20	20	20	20	a
Fixe Betriebskosten[30]	340	340	125[31]	125	€/a
Spez. Investitionskosten[32] - Projektkosten	5.833	5.833	25.993	25.653	€/kW
Spez. Investitionskosten - marktüblich	5.704	5.704	12.515	12.515	€/kW
Anteil Eigenkapital	40	40	40	40	%
Anteil Fremdkapital	60	60	60	60	%
Verzinsung Eigenkapital	3	3	3	3	%
Verzinsung Fremdkapital	8	8	8	8	%
Spez. Treibhausgasemissionen[33]	14,11	14,11	4,19	4,19	t CO_2-Äq.
Vergütung[34]	0,082	0,082	0,082	0,082	€/kWh

[28] Die Anlagen des Typs EasyWind sind über einen Asynchronmotor direkt (ohne Umrichter) mit dem Stromnetz verbunden
[29] Nach z.B. [47]
[30] Annahme der Betriebskosten mit 1% der Investitionskosten
[31] Aus Erfahrungswerten
[32] Anhand von Rechnungen ermittelt.
[33] Nach Eigenrecherche
[34] Nach [41]; Mittlerer Wert unter der Annahme von 20 Jahren Anlagen-Laufzeit. Die Vergütung der Anlagen wird in Szenarien nicht berücksichtigt.

Tabelle 18: Kennwerte der PVA

Komponente / Kennwert	**PVA Mover**	**PVA Carport**	Einheit
Zelltyp	Mono-CSI	Poly-CSI	
Azimut-Winkel	0[35]	21	°
Aufstellungs-Winkel	15	30	°
Wechselrichter-Wirkungsgrad	97	98,2	%
Anlagenhöhe	5	5	m
Installierte Leistung	7,5	8,5	kWp
Fixe Betriebskosten	200	260	€/a
Spez. Investitionskosten - Projektkosten	4.000[36]	5.205[37]	€/kWp
Spez. Investitionskosten - marktüblich	1.695	1.695	€/kWp
Lebensdauer	20	20	a
Anteil Eigenkapital	40	40	%
Anteil Fremdkapital	60	60	%
Verzinsung Eigenkapital	3	3	%
Verzinsung Fremdkapital	8	8	%
Spez. Treibhausgasemissionen [42]	1,5	1,5	t CO_2-Äq./kWp
Vergütung[38]	0,1256	0,1256	€/kWh

[35] 0 Grad entspricht einer südlichen Ausrichtung; positive Werte werden entlang des Uhrzeigersinns gezählt.
[36] Nach Datenblatt bei Neukauf
[37] Wert bereitgestellt durch Partner Schneider Electric
[38] Nach [41]; Mittlerer Wert unter der Annahme von 20 Jahren Anlagen-Laufzeit. Die Vergütung der Anlagen wird in Szenarien nicht berücksichtigt.

Tabelle 19: Kennwerte des Lithium-Ionen-Energiespeichers

Komponente / Kennwert	**Lithium-Ionen-Batteriespeicher**	Einheit
Technologie	Lithium-Ion (Nickel-basiert)	
Wirkungsgrad Beladung	95[39]	%
Wirkungsgrad Entladung	95	%
C-Rate	2[40]	kW/kWh
Kapazität	50	kWh
Spez. Investitionskosten - Projektkosten	2.748[41]	€/kWh
Spez. Investitionskosten - marktüblich	1.345[42]	€/kWh
Fixe Betriebskosten	2.000	€/a
Kalendarische Lebensdauer	10	a
Anteil Eigenkapital	40	%
Anteil Fremdkapital	60	%
Verzinsung Eigenkapital	3	%
Verzinsung Fremdkapital	8	%
Selbstentladung	24	%/a
Untere SOC-Grenze	15	%
Start-SOC	50	%
Obere SOC-Grenze	95	%
Standby-Leistung Wechselrichter	1	kW
Spez. Treibhausgasemissionen [42]	75	kg CO_2-Äq./kWh

[39] Nach Datenblatt
[40] Nominale Nennleistung: 105 kVA, hier gekürzt auf 100 kW/kVA
[41] Wert bereitgestellt durch Partner Schneider Electric
[42] Nach [53]

Tabelle 20: Werte für übergeordnete MG-Komponenten

Komponente / Kennwert	Installation und Betrieb Microgrid	Informations- und Kommunikations-Technologie (IKT)	Einheit
Investitionskosten	10.000[43]	5.000[44]	€
Betriebskosten	1.000	500	€/a
Lebensdauer	20	20	a
Anteil Eigenkapital	40	40	%
Anteil Fremdkapital	60	60	%
Verzinsung Eigenkapital	3	3	%
Verzinsung Fremdkapital	8	8	%

Neben den beschriebenen Komponenten gibt es weitere Kennwerte, die für die Modellierung und Simulation des MGs von Interesse sind. Diese sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 21: Zusätzliche Kennwerte des MGs

Kennwert	Wert	Einheit
Spezifische Treibhausgasemissionen Netzbezug	535[45]	g CO_2-äq./kWh
Nivellierter Strompreis - Netzbezug	0,25[46]	€/kWh

[43] Abgeschätzter generischer Wert. Durch zukünftige Erfahrungswerte können hier genauere Annahme getroffen werden
[44] Wie 23
[45] Hochgerechneter Wert für Deutschland 2015 nach [1]
[46] Steigerung des Industriestrompreises über die Laufzeit des MG berücksichtigt

A.5 Erläuterung des Simulationstools

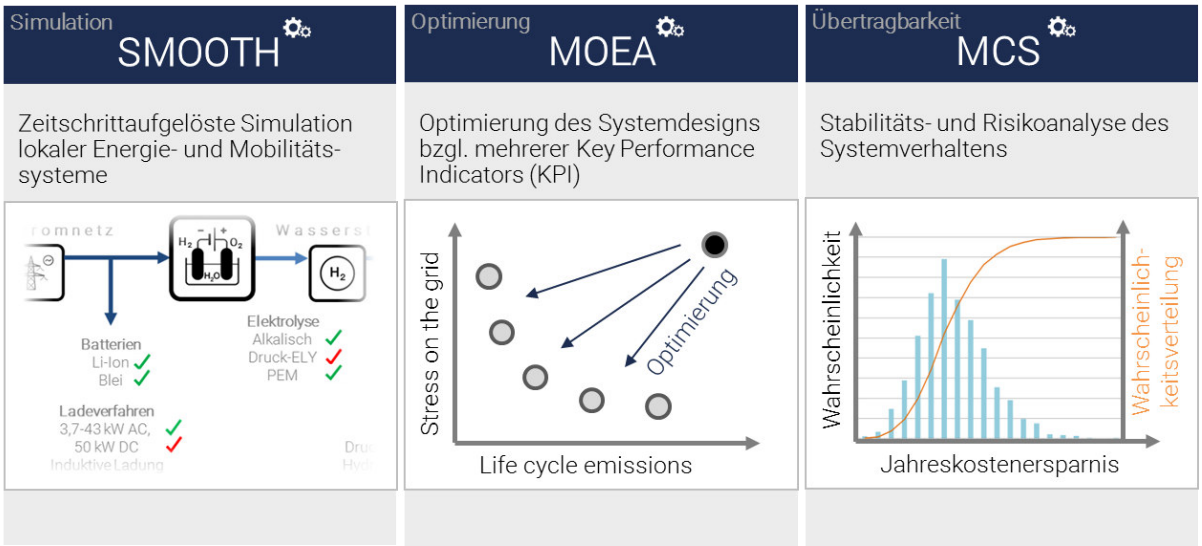


Abbildung 38: Dreiteiliger Algorithmus zur Modellierung, Simulation, Optimierung und Robustheitsanalyse bzw. Übertragbarkeit von MG-Topologien und Betriebsstrategien

Das im Parallelprojekt „D3 – Micro Smart Grid EUREF“ entwickelte Simulationstool dient der Untersuchung lokaler, hybrider, regenerativer Energiesysteme mit batterie- und wasserstoffelektrischer Mobilität. Dafür werden in SMOOTH die Komponenten des Systems nicht-linear und multi-modal modelliert. Komponenten können bspw. sein:

- PV-Anlagen
- Windenergieanlagen
- Batteriespeicher
- BHKW
- Elektrolyseur

Übliche Zeitschritte sind 15 Minuten bis zu mehreren Stunden. Mit Hinblick auf einen vertretbaren zeitlichen Aufwand für die Simulationen in den hier angeführten Untersuchungen wurde die zeitliche Auflösung auf 1h gesetzt. Für eine Jahressimulation wurde dies als geeignet angesehen auch da sämtliche Wetterdaten in 1h-Auflösung vorlagen. Inwiefern dadurch der Einfluss von erhöhten Lastspitzen beim Energiebedarf der Elektromobilität unberücksichtigt bleibt, konnte hier nicht weiter beurteilt werden.

Innerhalb von SMOOTH können bereits die Leistungsflüsse simuliert und analysiert werden. MOEA nutzt dies als Grundlage für eine heuristische Optimierung, bei der mehrere Optimierungsziele definiert werden können. Ziel ist die Topologie- und Betriebsführungsoptimierung und Berücksichtigung z.B. der Stromgestehungskosten, Autarkie, THG-Emissionen usw. Das dritte Element MCS bewertet anschließend die Stabilität der Systeme hinsichtlich der Auslegungsparameter, sodass eine qualitative Aussage über die Robustheit der Systeme in Abhängigkeit von der Varianz z.B. des

Neigungswinkels von PV-Anlagen oder der Batteriekapazität eines stationären Speichers getroffen werden kann. Dies ermöglicht ebenfalls die Bewertung des Potentials, die ausgelegten Systeme auch an anderen Standorten wirtschaftlich zu betreiben (Übertragbarkeit).

Tabelle 22: Beschreibung der angewandten Optimierungsvarianten

OV 1	Topologie- und Betriebsführungsoptimierung nach KPI für geringen Ladebedarf mit Einsatz großer Batterien
OV 2	Topologie- und Betriebsführungsoptimierung nach KPI mit EE-Drosselung für geringen Ladebedarf
OV 3	Topologie- und Betriebsführungsoptimierung nach KPI ohne EE-Drosselung für geringen Ladebedarf; Netzeinspeisung der Autarkie nicht abträglich (entgegen der Definition, siehe Anhang)
OV 3 (+)	Topologie- und Betriebsführungsoptimierung nach KPI ohne EE-Drosselung für hohen Ladebedarf; Netzeinspeisung der Autarkie nicht abträglich (entgegen der Definition, siehe Anhang)

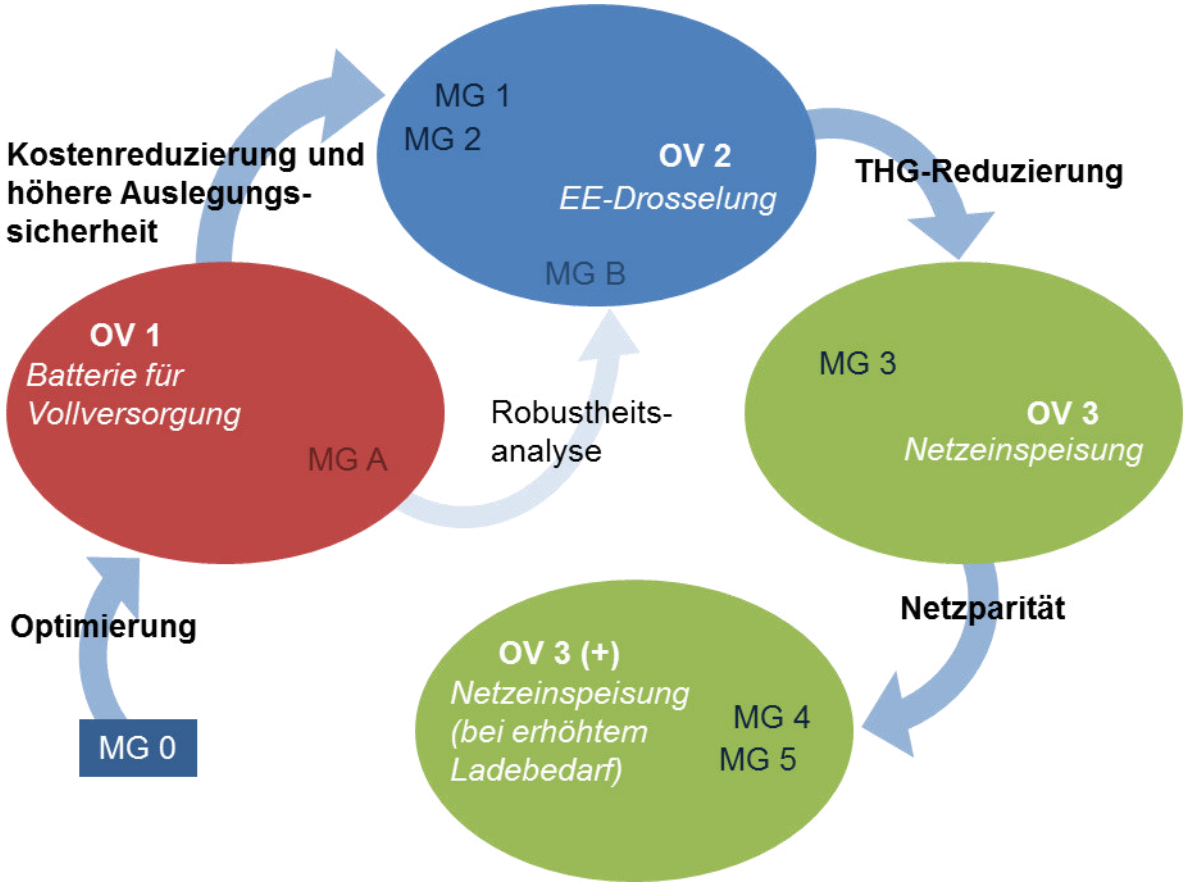


Abbildung 39: Überblick über die untersuchten Optimierungsvarianten und MG-Konfigurationen

A.6 Robustheitsanalyse

Tabelle 23: Parametervariation in der Monte-Carlo-Simulation

KWEA EasyWind	Nabenhöhe	m	10 ... 20
PV-Anlage	Azimuthwinkel	°	90 ... 270
PV-Anlage	Neigungswinkel	°	20 ... 40
Batterie	Kalendarische Lebenszeit	a	1 ... 20
Batterie	Maximale Lade- und Entladerate	-	1 ... 3

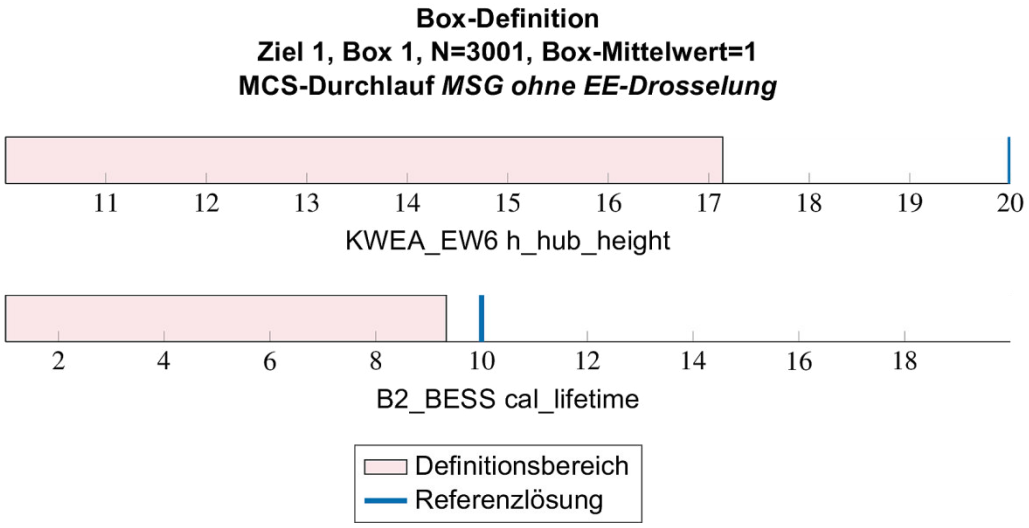


Abbildung 40: Wesentliche Faktoren und Entscheidungsregionen, die die KPI nachteilig beeinflussen

A.7 Untersuchung der Netzaufnahmefähigkeit am Bahnhof Südkreuz (Ergänzungen)

A.7.1 Ermittlung der Stark- und Schwachlastfälle

Ein weiterer Ausbau der LIS und der EEA ist von der derzeitigen Auslastung des Netzes am Bahnhof Südkreuz abhängig. Aus diesem Grund wurden die Lastgänge für den Schwach- sowie den Starklastfall der relevanten Komponenten ermittelt.

Für die Betrachtungen standen mehrere Datenreihen zur Verfügung. Seit August 2015 sind Messwerte für die Komponenten PVA Carport, LIS und Energiespeicher im Vorhaben aufgezeichnet worden. Insbesondere die Messwerte der PVA Carport als auch der LIS sind für diese Betrachtungen von Interesse, da aus den Messwerten der Gleichzeitigkeitsfaktor (GZF) dieser Komponenten abgeleitet werden kann. Der GZF beschreibt nach DIN VDE 0100-300 das Verhältnis von maximal benötigter Leistung zur installierten Leistung. Für Straßentunnelbeleuchtungen z.B. ist der GZF üblicherweise 1 – hier entspricht die maximale auftretende Leistung der Anschlussleistung. Bei anderen Anwendungen, z.B. für ein Ein-Familien-Haus, ist die Anschlussleistung üblicherweise größer als die maximal auftretende Leistung, um z.B. eine Reserve für weitere Anschlüsse übrig zu haben.

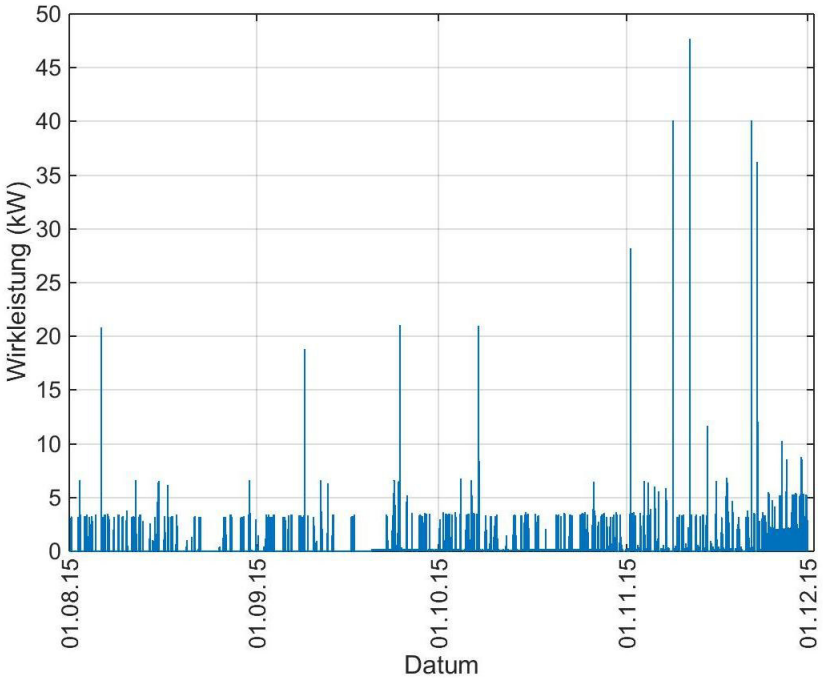


Abbildung 41: Gesamte Ladeleistung der 5 Ladesäulen im Südkreuz-MG vom 01.08.15 bis 01.12.15

Für PV-Anlagen ist der GZF i.d.R. kleiner 1, da bei Zeiten mit möglicher max. Leistung (im Sommer) Wirkungsgradverluste an den Modulen durch hohe Temperaturen auftreten. Für die Elektrofahrzeug-LIS ist die Gleichzeitigkeit abhängig von der Nutzung der Infrastruktur. Aufgrund der geringen Durchdringung der Automobilland-

schaft mit Elektrofahrzeugen, insbesondere bei öffentlichen Stellplätzen mit mehreren Ladesäulen, gibt es für den GZF hier kaum Erfahrungen. Bei den hier vorhandenen 10 Ladepunkten ist ein GZF von 1 (alle Ladepunkte sind belegt und die Fahrzeuge laden mit der jeweiligen max. Leistung) unwahrscheinlich, u.a. auch dadurch, dass die an 8 Ladepunkten verfügbare max. Ladeleistung von 22 kW_{el} nur von wenigen Fahrzeugmodellen geladen werden kann. In der folgenden Abbildung ist die summierte Lade-Wirkleistung aller Ladepunkte zu sehen.

Insgesamt beträgt die Anschlussleistung der LIS 269 kW_{el}, der im Messzeitraum aufgenommene Maximalwert der Wirkleistung beträgt 47,7 kW_{el} (bei einer Ladung am DC-Ladepunkt). Es wird ersichtlich, dass nur selten gleichzeitig an mehreren Ladepunkten geladen wird. Für den Messzeitraum beträgt der LIS-GZF daher 0,1773. Um bei den Betrachtungen einen Sicherheitsfaktor zu berücksichtigen, ist mit einem GZF von 0,2 gerechnet worden. Für die PV-Anlage Carport ergibt sich mit einer analogen Methodik ein GZF von 0,9. Für Kleinwindenergieanlagen wird ein GZF von 1 angenommen.

Durch die DB Energie GmbH wurden Wirk- und Blindleistungsmesswerte, gemessen an den Leistungsschaltern der Transformatoren, für den Zeitraum vom 24.07.2014 bis 10.05.2015 in ¼-stündlicher Auflösung zur Verfügung gestellt. Eine Übersicht der summierten Wirkleistungen beider Messpunkte ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

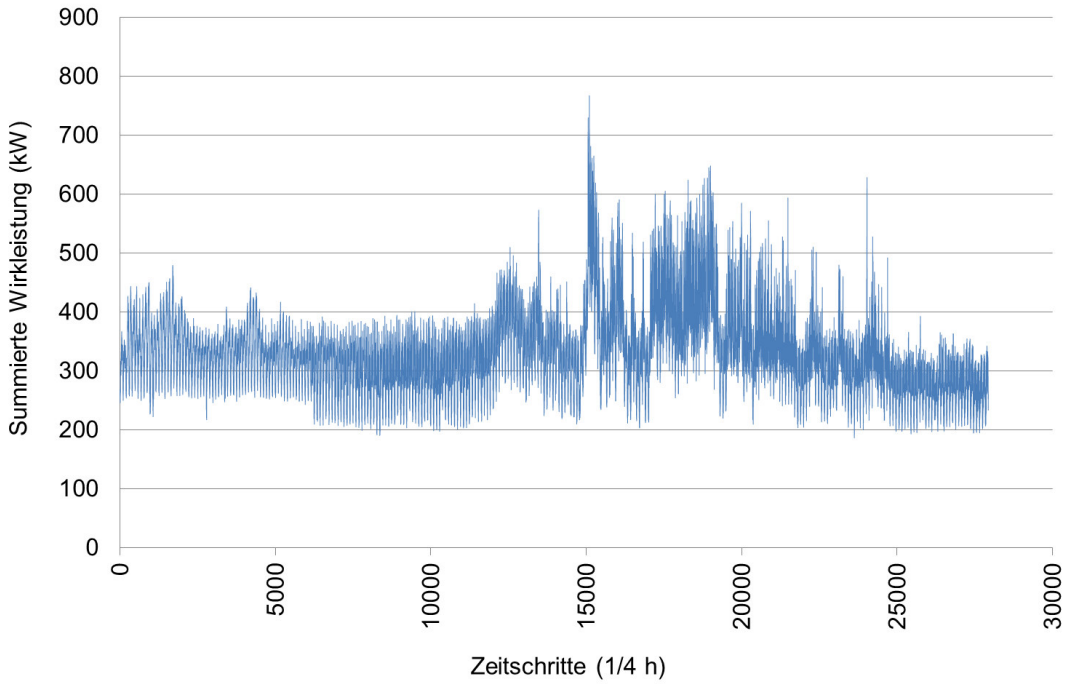


Abbildung 42: Summierte Wirkleistungen beider Messpunkte an den Leistungsschaltern von Transformator 11 und Transformator 12 am Bhf. Südkreuz

Die maximal auftretende Wirkleistung beträgt 762 kW, die minimal auftretende Wirkleistung 186,5 kW. Diese beiden Punkte bilden den Starklast- und den Rückspeise-Fall ab.

A.7.2 Modellierung und Simulation des Netzes

Für die Lastflussanalysen wurde das Niederspannungsnetz bis zu den Transformatoren in der Netzberechnungssoftware *PSS®SINCAL* abgebildet. Die elektrischen Lasten der Abgänge des Südkreuz-Niederspannungsnetzes neben dem MG wurden in den oben beschriebenen Messdaten der Transformator-Leistungsschalter zusammengefasst betrachtet. Das *PSS®SINCAL*-Modell wurde zur einfacheren Bearbeitung anschließend in das Matlab-basierte Simulationsmodell *Matpower* überführt. Das vereinfachte Netz wurde bereits in Abbildung 25 dargestellt.

Sofern keine Informationen über das Spannungsniveau am Übergang vom Mittelspannungsnetz zum Niederspannungsnetz vorliegen, wie es beim Netz des Bahnhof Südkreuz der Fall ist, müssen geeignete Annahmen für die Aufteilung des zulässigen Spannungsbandes getroffen werden. In der dena-Verteilnetzstudie wurde das Spannungsband beispielsweise auf ±4 % für die MS-Ebene, ±2 % für die MS/NS-Umspannebene und ±4 % für die NS-Ebene aufgeteilt [43]. Im Fall des NS-Netzes am Bahnhof Südkreuz ist aufgrund der zentralen Lage von einer relativ konstanten Spannung der MS-Ebene auszugehen. Auf Basis dieser Annahme wurden daher ein Spannungsniveau von ±2 % der Nennspannung für die Oberspannungsseite des MS/NS-Transformators festgelegt. Das heißt, dass im Schwachlastfall eine Spannung von 1.02 p.u. und im Starklastfall eine Spannung von 0.98 p.u. als Basis für die Spannung am Netzeinspeisepunkt dient.

Für den Ausbau der EEA und der BEV-LIS wurden die jeweiligen Anschlusskabel zur MG-Sammelschiene vernachlässigt, da angenommen wird, dass diese mit geringem Aufwand gewechselt werden können. Bei einer Berücksichtigung dieser Kabel unter Erhöhung der hier angeschlossenen Leistung würden diese die Netzaufnahmefähigkeit wesentlich beschränken. Daher fokussierte sich die Analyse auf die Netzkomponenten von der MG-Sammelschiene bis zur Mittelspannung. Aufgrund der Netztopologie am Netzabschnitt des MGs (Strahlennetz) wurde eine Änderung der Netztopologie nicht weiter untersucht; dies würde bei einer vorliegenden Vermaschung und der potentiellen Erhöhung des Vermaschungsgrades sinnvoll sein.

Das P-Q-Verhalten bei der Erhöhung der eingespeisten Leistung entspricht den Vorgaben nach VDE-AR-N 4105. Bei Einspeiseleistung von bspw. mehr als 13,8 kVA muss eine P-cos (φ)–Kennlinie eingehalten werden; hier ist bei maximaler Wirkleistungseinspeisung ein cos(φ) von 0,9 zu realisieren. Kennlinien und weitere Informationen können der Norm entnommen werden.

Für die Validierung des Modells sind zu einem Zeitpunkt P- und Q-Werte für alle Energieanlagen sowie U- und cos(φ)-Werte an den Sammelschienen erforderlich.

Dies war zum Untersuchungszeitpunkt zu keinem Zeitpunkt der Fall und kann bei entsprechender Datenlage wiederholt werden. Es konnten jedoch Daten entsprechend interpoliert werden. Mit Hilfe von gemessenen Daten der LIS und der PVA sowie der Spannung an der MG-Sammelschiene konnte das Modell validiert werden. Die Modellergebnisse bei entsprechender Parametrierung entsprachen den interpolierten Messdaten mit hoher Genauigkeit.

A.8 Abschlussbericht Alcatel Lucent

schaufenster elektromobilität
Eine Initiative der Bundesregierung

FuE-Programm "Schaufenster Elektromobilität" der Bundesregierung	
Schlussbericht für Teilvorhaben in B2 / Arbeitpaket 4	
Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: *B2 - Intelligente Mobilitätsstation: Themenbahnhof „Vernetzte Mobilität und Energie“* Arbeitspaket: *AP4 - Indoor-Navigation* Teilvorhaben der Alcatel-Lucent Deutschland AG	
Laufzeit des Vorhabens: vom: 01.03.2013	bis: 31.03.2016
Schaufenster:	*Internationales Schaufenster Elektromobilität Berlin-Brandenburg*
Zuwendungsempfänger: Alcatel-Lucent Deutschland AG	Förderkennzeichen: 16SBB006C

1. Executive Summary

Goals of Alcatel-Lucent in work package 4 of the IMS-project have been realization and provision of localization process and modules for smart phones ending up in a combined solution for an indoor-navigation system and related user interface.

The realized application was intended to cover specific areas of the railway station Südkreuz/Berlin. The approach for the localization system is based on collection and evaluation of field strengths of WIFI radio signals of WLAN access points by a Fingerprinting method. During a calibration phase field strengths related to the various access points are determined together with the related local position, the respective data set is stored in a Fingerprint database. To allocate the current position in the railway station the mobile user terminal scans the field strengths of the surrounding WLAN access points and sends them to the remote server/data base. The related local position is then determined by comparing fingerprints as stored in the database with the currently recorded fingerprint signal, taking benefit of intelligent algorithms and filter mechanisms, and is finally sent back to the mobile terminal.

Definition of the overall system architecture for realization of the indoor-localization system was performed in cooperation with related project partners. The complete system for indoor-navigation mainly consists of the components for indoor-localization/evaluation of the position, for routing (calculation of the best suited path between starting and end point) and the underlying map (containing precise and relevant local data). We developed the component for indoor-localization consisting of the functional blocks WLAN Measurement, Localization Algorithms, Fingerprint Database and Fingerprint filtering algorithms. Those functionalities were integrated in the server/database. In addition, an Application-Programming Interface (API) was developed by Alcatel-Lucent for communication and data exchange between the user terminal and the server/database delivering the localization information to the terminal.

The API software was transferred to the partners HaCon und IIS/FHG to enable API-integration in the user terminals. Using the WIFI infrastructure newly installed at the Südkreuz station (by Deutsche Bahn) together with further WiFi access points already existing in the railway station, we achieved a mean precision for determining the positioning of better than 10m (for 80% of measurements better than 15m), facing severe disturbance of the WIFi signals by e.g. arriving/ departing trains.

Interoperability of localization methods of Alcatel-Lucent and IIS/FHG was successfully tested after integration of the respective localization methods in a common user application.

2. Zielstellung des Verbundprojektes

2.1. Gesamtziel des Verbundes

Die verkehrs- und energiepolitische Landschaft in Deutschland steht vor großen Herausforderungen. Die Umstellung des auf großen Energieerzeugungsanlagen beruhenden Versorgungssystems zu einem Energiesystem auf Basis regenerativer Energiequellen mit starken dezentralen Tendenzen ist gesellschaftlicher Konsens. Damit stehen neben den Stromnetzen aber auch die Verkehrssysteme vor intensiven Anpassungsaufgaben. Die künftigen Systeme müssen nicht nur „smart" sein, es wird auch ein gesamthafter systemischer Blick auf die sektorenübergreifenden Schnittstellen notwendig, um diese Aufgaben zu lösen. Energie- und Transportanlagen von morgen werden komplexer als jemals zuvor sein und damit zusätzlicher Steuerungsleistungen bedürfen. Wenn sich die damit verbundenen wissenschaftlichen, technischen und sozialen Herausforderungen lösen lassen, ergeben sich auch neue Geschäftsmodelle. Energie- und Verkehrswende müssen zusammen gedacht und umgesetzt werden.

Eine besondere Rolle kommt bei all diesem den Bahnhöfen zu. Bahnhöfe der Zukunft sind mehr als Ein- und Ausstiegspunkte des Eisenbahnverkehrs. Sie werden sich in Folge der oben beschriebenen Änderungsprozesse immer stärker zu sog. „Multi-Modal-Arenen" entwickeln, in denen der Nutzer als Nachfrager der vernetzten ökologisch verträglichen Mobilität deren einzelne Bausteine als Gesamtangebot erfahren kann und in ihrer Nutzung geleitet wird.

Aus diesen Überlegungen heraus sollte im Rahmen des Gesamt-Vorhabens ein Indoor-Navigationssystem erforscht und erprobt werden, das auf Basis einer hohen Ortungsgenauigkeit eine Indoor-Navigation für den Bahnhof Berlin-Südkreuz ermöglicht. Vorgesehen war außerdem die Integration in ein umfassendes Auskunfts- und Orientierungssystem. Damit sollte gewährleistet werden, dass am „intelligenten Bahnhof der Zukunft" nicht nur innovative Mobilitätsangebote bereitgestellt werden, sondern diese in einer gemeinsamen, nutzerfreundlichen Informationsplattform integriert werden. Damit wird den Nutzern der Zugang zu verschiedenen Mobilitätsdienste erleichtert und auch eine größere Auslastung dieser Angebote erzielt.

2.2. Teilziele und -aufgaben des Zuwendungsnehmers Alcatel-Lucent Deutschland AG im Arbeitspaket 4

Ziele in Arbeitspaket 4 waren Realisierung und Bereitstellung einer umfassenden Lokalisierungs-Applikation für den Bahnhof Berlin Südkreuz. Der Einsatz dieser Applikation soll Nutzern des Bahnhofs eine lückenlose Navigation zu Points-of-Interest (POIs), Gleisen/Gleisabschnitten ermöglichen. Damit sollte ein Indoor-Navigationssystem geschaffen werden, das eine lückenlose Informationskette von Eintritt in den Bahnhof bis in den Zug bzw. umgekehrt ermöglicht.

Arbeitsschritte/Arbeitsinhalte der Alcatel-Lucent Deutschland AG:

- **Spezifikation Systemanforderungen:**

Die Definition des Use Cases erfolgte unter der Annahme einer Genauigkeitsanforderung von 5-10m auf Basis eines Gebäudeabschnittes. Voraussetzung war das Vorliegen von routingfähigen und georeferenzierten Gebäude- und Geländekarten für diesen Gebäudeabschnitt. Ferner wurde von einer maximalen Anzahl von 100 gleichzeitigen Nutzern ausgegangen. Für die notwendige IT-Infrastruktur mussten sich die WLAN Access-Points im ausgeschalteten Power Saving Modus befinden und für die Positionsbestimmung wurde die vorhandene Serverinfra-struktur verwendet. Zusätzliche Anforderungen, die sich aus dem Betrieb mit einfahrenden Zügen ergeben, waren zu berücksichtigen.

- **Architektur und Schnittstellen:**

Die Definition der Gesamt-Architektur für die Realisierung der Indoor-Navigation und Darstellung mittels einer Smartphone-App sollte durch Alcatel-Lucent zusammen mit den beteiligten Projektpartnern erfolgen. Für die Navigationslösung wurden die Komponenten Lokalisierung (zur Findung der Position), Routing/Navigation (Berechnung der Strecke vom aktuellen Punkt zum Ziel) und Karten (Darstellung der Strecke) benötigt. Für dieses System war die Indoor-Lokalisierungskomponente zu entwickeln, die sich aus den funktionalen Blöcken WLAN Measurement, Localization Algorithms und Fingerprint (FP) Database (DB) zusammensetzt.

Für die Gesamtintegration und die Datenhaltung waren die Positionsdaten und weitere notwendige Daten durch Alcatel-Lucent entsprechend aufzubereiten und über ein API (Application-Programming Interface) zur Verfügung zu stellen. Eine Anpassung der Architektur an die Anforderungen des Use Cases des Schaufenster-Projektes war erforderlich. Die Architektur sollte modular aufgebaut und hinsichtlich Interoperabilität mit anderen Lokalisierungs-Verfahren erweiterbar sein.

- **Aufbau Infrastruktur und Fingerprint Datenbank:**

Zunächst sollten Untersuchungen der WLAN Access Points bezüglich deren Anzahl, deren Verteilung und Störanfälligkeit erfolgen. Dafür waren die vorhandenen WLAN-Access-Points zu analysieren. Ferner sollte Anpassungen der Infrastruktur basierend auf Know-How aus anderen Projekten bei dem verantwortlichen Infrastrukturbetreiber in Auftrag gegeben werden. Die notwendige Software sollte auf der vorhandenen Serverinfrastruktur (Backend) installiert und in Betrieb genommen werden. Eine Anpassung der Genauigkeit der WLAN-Lokalisierung anhand der aktuellen Gegebenheiten und somit mehrmalige Aufnahme der Fingerprint-Datenbank waren durchzuführen.

- **Software Entwicklung:**

Die Positionsbestimmung sollte auf dem vorhandenen Backend durchgeführt werden. Die notwendige Software war entsprechend den Gegebenheiten an eine stark variierende Umgebung anzupassen und eventuelle Schnittstellen für Fremdsysteme zur Verfügung zu stellen. Eine Verbesserung der Genauigkeit sollte auch unter Verwendung zusätzlicher Algorithmen erfolgen. Diese waren den Bedingungen entsprechend anzupassen und um zusätzliche Features zu erweitern (Filter und Plausibilitätschecks).

Weiterer Bestandteil der Software-Entwicklung war die Integrationsunterstützung der WLAN-basierten Lokalisierung in eine einheitliche Android-App. Die Lokalisierungslösung sollte Funktionsaufrufe für den Zugriff innerhalb dieser App zur Verfügung stellen,

- **Kartenmaterial:**

Entsprechend den Erfordernissen des WLAN basierten Lokalisierungsalgorithmus, der Umgebung und des verfügbaren routingfähigem Kartenmaterials waren Abstimmungen/Abgleiche und zusätzlich die Geo-Referenzierung durchzuführen.

- **Tests:**

Die durchzuführenden Tests sollten sowohl Einzeltest der Module, des Systems als auch die Unterstützung bei Ende-zu-Ende Tests umfassen. Zusätzlich zu den Tests im Entwicklungslabor wurden folgende Tests am Bahnhof Südkreuz als erforderlich angesehen:

  - Statische Tests: Prüfen der integrierten Funktionsblöcke, Untersuchung externer Störeinflüsse, Verifizierung von Algorithmen-Optimierung anhand von Vor-Ort-Tests, Tests unter Nutzung des integrierten APIs (HaCon)
  - Dynamische Tests mit sich bewegenden Nutzern

3. Ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse des Teilprojektes

3.1. Aufgabenstellung, Überblick

Ziel von Alcatel-Lucent im Arbeitspaket 4 des IMS-Projektes war es, ein Lokalisierungsverfahren für ein Smartphone bereitzustellen, das eine Indoor-Navigationslösung mit Nutzer-Interface anbietet. Die Anwendung sollte definierte Bereiche des Bahnhofes Berlin Südkreuz abdecken. Die Positionsbestimmung basiert hier auf einer Erfassung und Auswertung der Feldstärke von WIFI-Funksignalen von WLAN Access-Points mittels eines Fingerprint-Verfahrens.

Zunächst wird dafür während der Kalibrierungsphase die Feldstärke in Abhängigkeit von der Position ermittelt und in einer serverbasierten Datenbank (Fingerprint-Datenbank) hinterlegt. Ein mobiles Endgerät misst später die Feldstärke der WLAN-Access-Points und bestimmt durch den Vergleich der aktuellen Messwerte mit den Werten in der Fingerprint-Datenbank die Position des Endgerätes. Durch Verwendung intelligenter Algorithmen z.B. Berücksichtigung von Feldstärkeschwankungen und entsprechender Konditionierung der Fingerprint-Datenbank wird die Genauigkeit der Ortung erhöht. Folgende Aufgaben waren dazu im Projekt zu bewältigen:

- Erstellung der Architektur für die Gesamt-Realisierung der Indoor-Navigation
- Einrichten der Datenbank zur Aufnahme der Messdaten und der Erzeugung der Fingerprint-Karte und Implementierung der erforderlichen Auswerte-Algorithmen
- Entwicklung des Konzeptes und der Software für das API zum Datenaustausch mit dem Smartphone; Übergabe der API-Software an die Projektpartner
- Verfahren zur Berechnung der Nutzer-Koordinaten: Entwicklung und Test

Am Bahnhof Südkreuz Berlin wurden umfangreiche Tests zur Indoor-Lokalisierung basierend auf Funkmessungen mit Smartphones durchgeführt. Mit der im Projekt installierten Infrastruktur (von der Deutschen Bahn installierte Access-Points) sowie zusätzlichen vorhandenen privaten Access Points erreichen wir im Bahnhof Südkreuz stellenweise eine mittlere Genauigkeit von besser als 10m (für 80% der Messwerte besser als 15m) trotz störender Einflüsse der ein/abfahrenden Züge und ständig wechselnder Nutzer-Ströme.

Der Nachweis der Interoperabilität der Ortsbestimmungsverfahren von Alcatel-Lucent und dem Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS/FHG) wurden durch Integration der verschiedenen Verfahren und einer kombinierten Nutzer-Anwendung erbracht.

3.2. Systemkonzept und Architektur

Die Definition der Gesamt-Architektur für die Realisierung der Indoor-Navigation und Darstellung mittels einer Smartphone-App erfolgte durch Alcatel-Lucent zusammen mit den beteiligten Projektpartnern. Für die Navigationslösung werden die Komponenten Lokalisierung (zur Findung der Position), Routing/Navigation (Berechnung der Strecke vom aktuellen Punkt zum Ziel) und Karten (Darstellung der Strecke) benötigt.

Für dieses System war von uns die Indoor-Lokalisierungskomponente zu entwickeln, die sich aus den funktionalen Blöcken WLAN Measurement, Localization Algorithms und Fingerprint (FP) Database (DB) zusammensetzt. Die einzelnen Blöcke werden dann als Anwendungen auf mobilen Endgeräten ausgeführt. Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau der gesamten Indoor-Navigationslösung mit den Schnittstellen zu den Modulen des Partners HaCon. In

diesem Ansatz übernahm Alcatel-Lucent die Realisierung des Lokalisierungsmoduls mit den dargestellten Komponenten, HaCon die Integration und Auswertung mit der Nutzerschnittstelle.

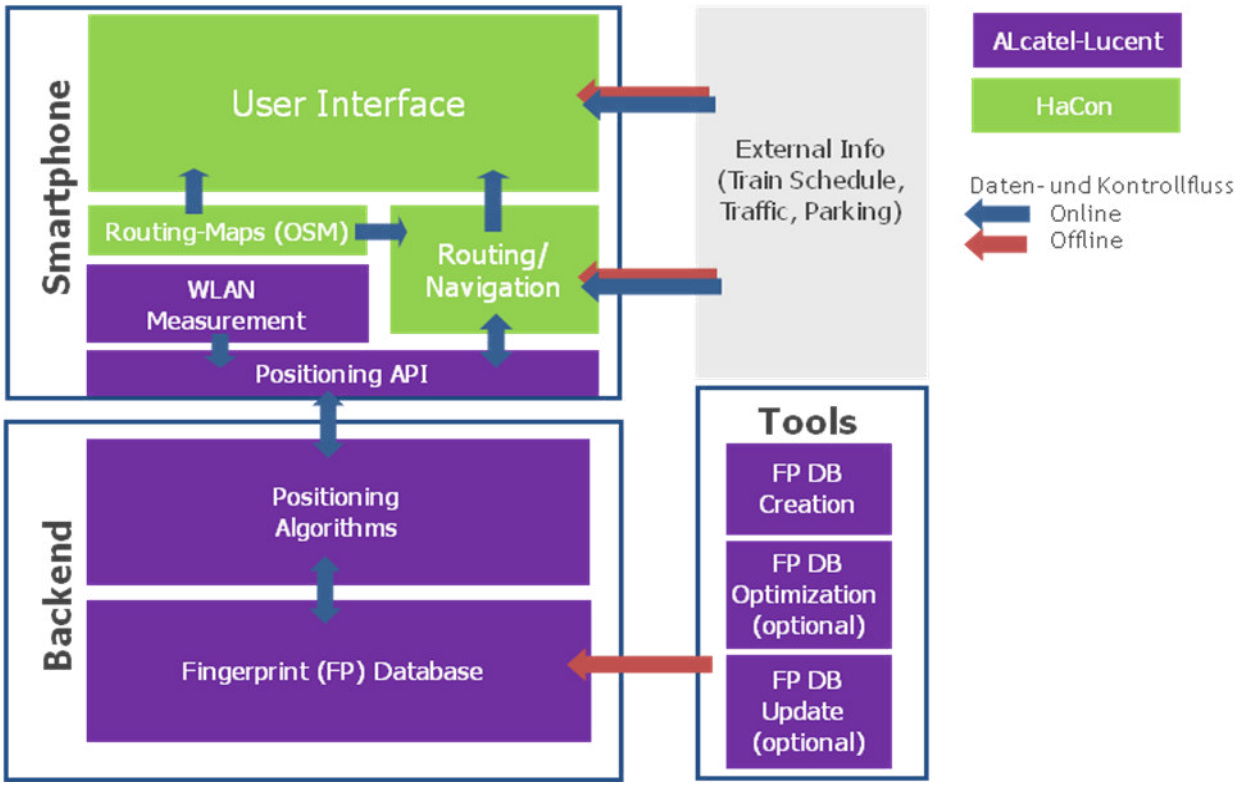


Abbildung 1: Architektur-Überblick

Die Möglichkeit des Überganges von einem Positionierungsverfahren zu einem anderen wird in Abbildung 2 verdeutlicht. In diesem erweiterten Konzept können die implementierten Verfahren gleichzeitig oder wechselweise aktiviert und abgefragt werden. Ein Entscheidungsalgorithmus kann jetzt festlegen, welches der Ergebnisse an die übergeordneten Schichten weitergeleitet wird. Für solche Entscheidungen können verschiedene Parameter genutzt werden (z.B. Genauigkeitsklassen der Verfahren, Plausibilität der Ergebnisse oder Berücksichtigung des Ortes nach grober Positionsschätzung).

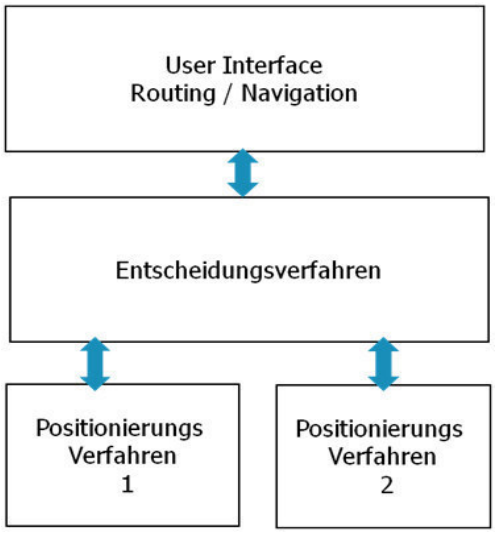


Abbildung 2:

Funktionsblöcke zum Umschalten zwischen verschiedenen Positionierungs-verfahren

Zur Realisierung der Interoperabilität verschiedener Ortsbestimmungsverfahren war das Konzept von Abbildung 1 in geeigneter Weise zu erweitern. Dies erfolgte zusammen mit den Projektpartnern HaCon und IIS/FHG.

Der prinzipielle Aufbau der interoperablen Indoor-Navigationslösung mit den Schnittstellen zu den Modulen der Partner HaCon und IIS/FHG wird in Abbildung 3 dargestellt. Für eine ausführliche Beschreibung dieser Architektur wird auf den Beitrag von IIS/FHG verwiesen.

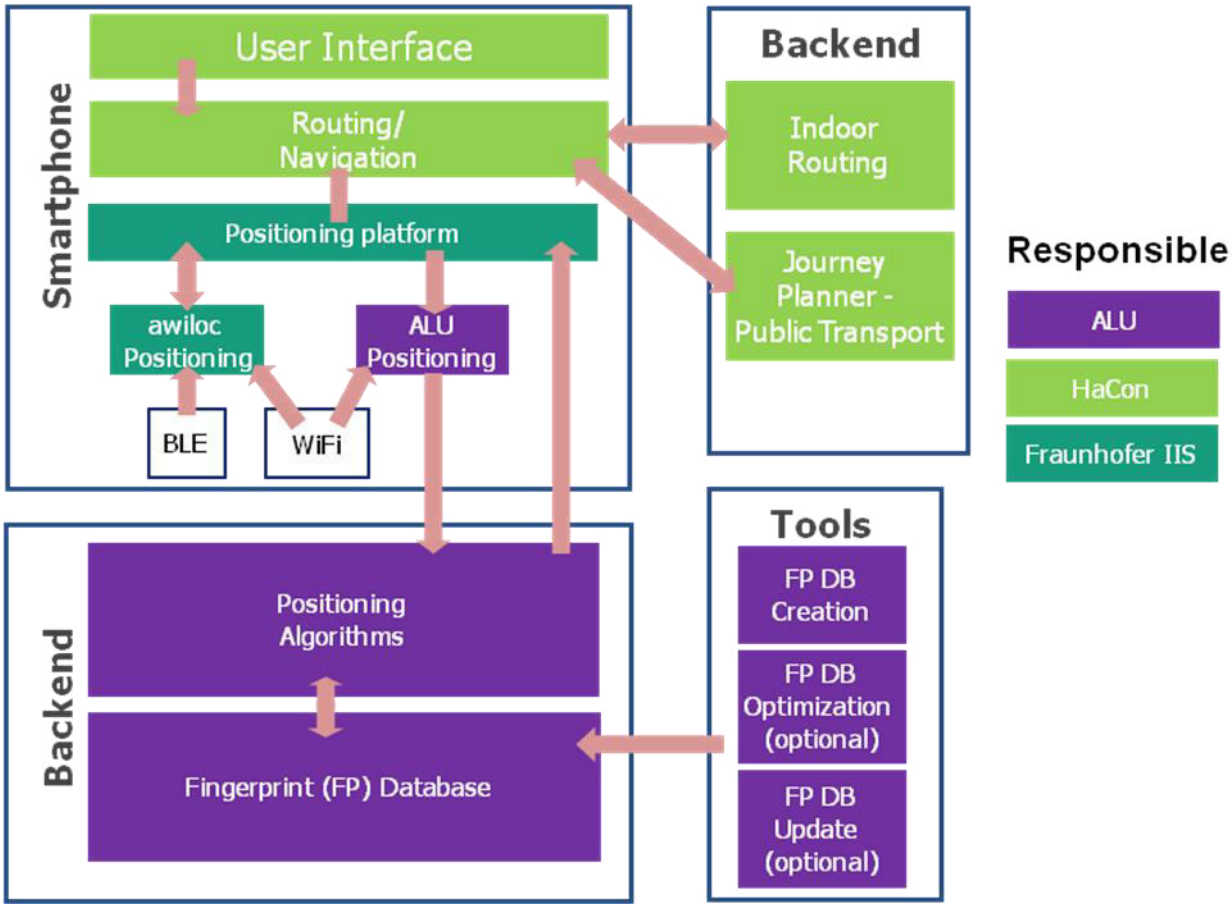


Abbildung 3: Architektur mit Funktionsblöcken zum Umschalten zwischen verschiedenen Positionierverfahren (BLE: Bluetooth Light Energie Verfahren)

3.3. Realisierung der Funktionsblöcke

Die Realisierung und Bereitstellung der im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten Funktionsblöcke ist Thema dieses Abschnitts.

3.3.1. Karte mit Bahnhofsinfrastruktur

Geplant war die Installation von 23 WLAN Access-Points an ausgesuchten Postionen (rote Punkte in Abbildung 4). Das war aufgrund fehlender Stromversorgung nicht möglich. Es wurden daher 13 Access-Points zum großen Teil in Geschäften und Büros installiert (grüne Punkte in Abbildung 4). Die Abdeckung ist damit nicht wie ursprünglich erwartet, auch offene, geschlossene bzw. sich öffnende Türen haben sicher Einfluss auf die Feldausbreitung. Die eingestellten Parameter der neuen Access-Points sind konstant einschließlich der Sende-

leistung. Diese Access-Points laufen unter der Regie der Deutsch Bahn, ihre Namen (SSIDs) beginnen mit „DB …“. Diese Access-Points werden als „DB Access-Points“ bezeichnet.

Es wurden weiterhin in Bereichen (z.B. Bahnsteige), die in unserer Positionierung nicht erfasst werden, DB Access-Points installiert. Da diese teilweise bis in die ausgemessenen Bereiche strahlen, können sie für die Positionierung mit berücksichtigt werden. Außerdem gibt es etwa 130 private WLAN Access-Points auf dem Bahnhof. Obwohl über diese nichts bekannt ist, wurden ca. 40 für die weitere Nutzung ausgewählt, die sich bei Tests als relativ konstant erwiesen haben. Diese verbessern teilweise das Ergebnis, als wirklich zuverlässig können sie jedoch nicht betrachtet werden.

Zum Erfassen der Datenbank wird die Karte entsprechend Abbildung 4 verwendet. Diese wurde mit Hilfe von Google geo-referenziert. Sie ist aber im Inneren nicht maßstabgerecht, wodurch sich systematische Positionierungsfehler ergeben. Andere geo-referenzierte Karten waren leider zu spät verfügbar, um diese fristgemäß verwenden zu können. Deren Detaillierungsgrad war außerdem zu gering, um eine genaue Datenerfassung zu unterstützen.

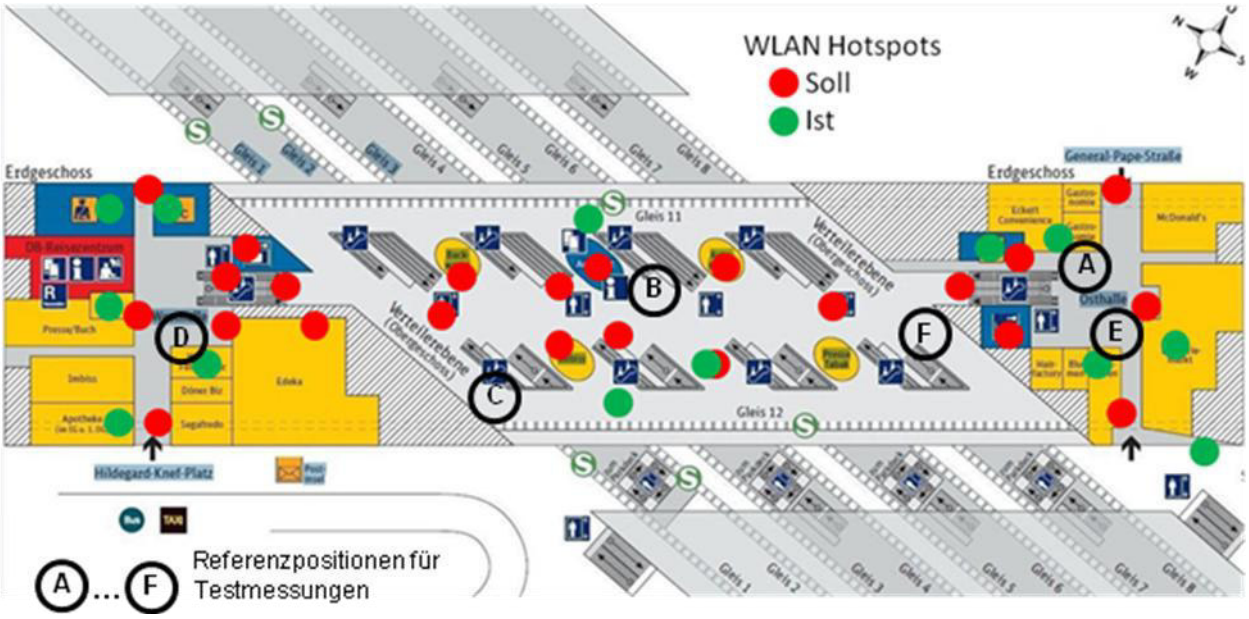


Abbildung 4: WLAN Infrastruktur-Ausbau

3.3.2. Datenbank / Server mit Ortsbestimmungs-Algorithmus

Zur Erstellung der Datenbank mit den geo-referenzierten Lokalisierungspunkten werden während einer sogenannten Trainingsphase Messungen der Hotspot-Feldstärken (RSSIs) mittels Android-Smartphones durchgeführt. Der Lokalisierungsalgorithmus greift auf diese Datenbank zu und benutzt das Verfahren der „kleinsten Euklidischen Abstände“ der gemessenen RSSIs zu den Referenzwerten in der Datenbank als Metrik. Dieser Algorithmus läuft auf einen Server, der im Internet per http erreichbar ist. Auf diesem Server liegt auch die Referenzpunkt-Datenbank.

Zur Errechnung der Nutzer-Position wird dieser Algorithmus durch eintreffende Requests von den Nutzer-Smartphones angestoßen u. liefert die berechneten Koordinaten zurück. Ein Glättungsfilter verringert zusätzlich stochastische Fehler.

Ein grundsätzlicher Punkt für die Genauigkeit der Indoor-Navigation ist das Raster der Datenerfassung: die Basisgenauigkeit kann nicht besser sein als der Abstand der Fingerprint (FP) Referenzpunkte in der erfassten Datenbank. Natürlich können durch verschieden Algorithmen

(z.B. geografische/geometrische Mittelung) stochastische Verbesserungen erzielt werden. Mit einem engeren Rastermaß wächst andererseits aber auch der Messaufwand quadratisch. Wie sich gezeigt hat, hat eine immer weitergehende Rasterverbesserung aber nur noch einen begrenzten Effekt auf die Genauigkeit, vor allem, wenn andere, stochastische Fehlerquellen überwiegen. Unser Datenbankraster liegt zwischen 5 und 10 m.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Projekt-Ergebnisse für diesen Funktionsblock erreicht wurden, die Datenerfassung wurde komplettiert, Server u. die Datenbank wurden online geschaltet.

3.3.3. Smartphone Software

Das Lokalisierungsmodul wurde als Android-Java-Bibliothek gestaltet. Es hat ein einfaches internes Interface zu der Smartphone-App mit dem Nutzerinterface zur Erfüllung folgender Aufgaben:

- Aktivieren der Lokalisierung und Vorgabe eines Lokalisierungs-Intervalls
- Abfrage des Aktivierungsstatus
- Deaktivieren der Lokalisierung

Wenn die Lokalisierung aktiviert ist, erfolgt periodisch ein Scan der verfügbaren WLAN-Hotspots (Beacons), die Anfrage der geschätzten Koordinaten via Internet beim Lokalisierungsserver und die Rückgabe der ermittelten Koordinaten an die aufrufende Smartphone-App über eine Callback-Routine.

Das API unterstützt die in Abbildungen 2 und 3 gezeigte Möglichkeit, zwischen verschiedenen Lokalisierungsverfahren auszuwählen. Die Entscheidung dafür liegt allerdings außerhalb dieses SW-Moduls.

Mit der erfolgreichen Entwicklung des Lokalisierungsmoduls und Bereitstellung der API-Software an die beteiligten Projektpartner wurden die gestellten Ziele erreicht. Die von Hacon unter Nutzung dieser SW entwickelte Lokalisierungs-App wurde uns für Testzwecke bereitgestellt, Ergebnisse sind in Abschnitt 3.3.4 beschrieben.

3.3.4. Optimierung von Auswerte-Algorithmen

Verbesserungen der Orts-Koordinatenbestimmung können durch Optimierung von Filtereigenschaften erreicht werden. Folgende Verfahren wurden in den Auswerte-Algorithmus eingebracht und auf ihre Effizienz getestet:

o Lokalisierung unter Berücksichtigung benachbarter Fingerprint-Werte:

Bei der Auswertung der Messdaten wird die bestmögliche Übereinstimmung eines vom Nutzer gemessenen Fingerprints mit den in der Datenbank vorliegenden Fingerprints ermittelt und dem Nutzer der entsprechende Koordinatenwert zugeordnet. Außer dem Koordinatenwert mit kleinstem Distance-Error werden nun während der Auswertung auch die am nächstbesten passenden Koordinatenpunkte errechnet (Koordinaten der ‚nächsten Nachbarn', NN).

Im Projekt wurde untersucht, ob und wie sich eine Einbeziehung solcher Werte auf eine Verbesserung des Distance-Errors der errechneten Ortsposition auswirkt. In Abbildung 5 ist der Distance-Error verschiedenen Stellen des Bahnhofs (Location A bis E) über der Anzahl der nächsten Nachbarn (NN) an aufgetragen. Es zeigt sich, dass bis auf wenige Ausnahmen bereits eine deutliche Verbesserung in der Ortsbestimmung (bis ca. 35 %) eintritt, sobald nicht nur der am besten passende Fingerprint (NN=1), sondern auch der zweitbeste Wert berücksichtigt wird. Die Einbeziehung dieser Werte bei der Auswertung erfolgt aufgrund der hiermit erzielbaren Verbesserungen standardmäßig.

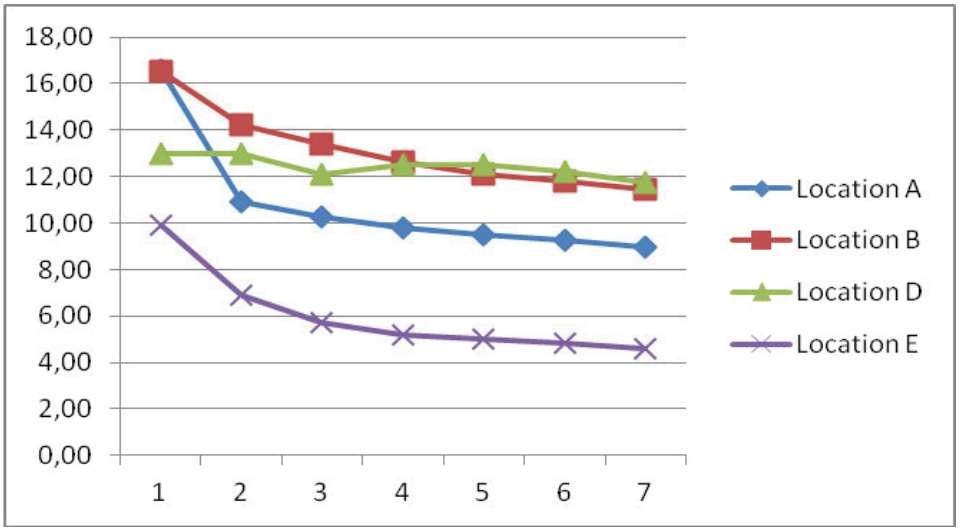


Abbildung 5: Beispiele für Distance Error-Auswertungsergebnisse (vertikale Skala: Distance Error Angabe in Metern) unter Einbeziehung der nächsten Nachbarn (horiz. Skala: NN=1..7)

o Realisierung eines Glättungsfilters für dynamische Messungen

Ziel des Glättungsverfahrens ist es, bei dynamischen Messungen (Bewegung der Person) ein zu starkes Hin-und Herspringen der ermittelten Position zu vermeiden. Sie lässt sich vermindern durch Betrachtung mehrerer aufeinander folgender Messpunkte anstelle einer isolierten Auswertung jedes einzelnen Punktes für sich. Der aktuelle Lokalisierungspunkt wird durch Triangulation der drei letzten errechneten Punkte bestimmt. Ergebnisse von Tests, die unter Nutzung dieses Verfahrens durch-geführt wurden, sind im folgenden Kapitel beschrieben.

3.4. Durchführung der Tests und Ergebnisse

Wir haben unsere Tests folgendermaßen eingeteilt:

(1) Tests an ausgewählten statischen Messpunkten, (2) Integrationstests an statischen Punkten mit der HaCon-App, (3) Server Lasttests, (4) Tests mit sich bewegenden Nutzern

Zunächst erfolgt die Beschreibung der Tests an ausgewählten statischen Messpunkten:

In den Tests (1) und (2) wurden auf dem Bahnhof Testmessungen zur Genauigkeit der Ortsbestimmung durchgeführt, die tatsächlichen Standorte wurden mit den vom Algorithmus gelieferten Schätzwerten für die Position verglichen. Die Differenzen ergeben einen Wert für die Positionierungsgenauigkeit. Hierbei können verschiedene Konfigurationen und Bedingungen (Access Points, Smartphones, Parametereinstellungen …) verglichen werden. Dabei wurde der Algorithmus sehr detailliert getestet und teilweise verbessert. Außerdem ermöglichten diese Tests eine Optimierung der Parametereinstellungen entsprechend den örtlichen Gegebenheiten.

Die erzielte Genauigkeit (in Metern) ist in Tabelle 1 gezeigt. In den Bahnhofsvorhallen werden Mittelwerte < 10 m erreicht, in der Ringbahnhalle sind die Ergebnisse allerdings deutlich schlechter. Auf mögliche Ursachen wird im weiteren Verlauf eingegangen.

Genauigkeits-Metrik Ort	Median	Mittelwert	80% Quantil	Mittlere Abweichung vom Mittelwert (Standardabweichung)
Osthalle	<8	<10	<12	<4
Westhalle	<10	<10	<15	<5
Ringbahn-Halle Mitte	<15	<15	<20	<8
Ringbahn-Halle Rand	<25	<25	<35	<9

Tabelle 1: Genauigkeit der Positionierung (Positionierungsabweichung in m)

Betrachtung von Ursachen, welche die Genauigkeit beeinflussen:

Wie erwähnt, stehen, 13 „zuverlässige“ DB Access-Points zur Verfügung. Außerdem wurden anhand der Datenbankanalyse etwa 40 zusätzliche Access ausgewählt, die in die Positionsberechnung eingehen. Über diese Access Points ist nichts außer den Messwerten bekannt. Sie können somit nicht als zuverlässig betrachtet werden, was durch Testergebnisse bestätigt wird.

Folgende Einflüsse sind (speziell an einem Bahnhof mit sich ständig bewegenden Objekten) von besonderer Bedeutung für die Tests und die Interpretation der Ergebnisse:

- Funkausbreitung: Die Konstanz der Funksignale wird beeinflusst durch die Funkausbreitung: (Non-)Line of Sight ((N)LOS), Fading, Streuung, Reflexionen, Abschattungen an Gebäuden, Begrenzungsflächen, ortsfesten und beweglichen Objekten, Menschen) LOS/NLOS. WLAN-Signale können sich innerhalb von Zentimetern ändern.

- Eine günstige Anordnung der WLAN Access-Points und ihrer Konfiguration spielt gerade unter Berücksichtigung des vorhergenannten Punktes eine wichtige Rolle. In den Vorhallen (Ost- und Westhalle), in denen deutlich mehr Access-Points installiert sind, ist auch die erhaltene Ortsgenauigkeit wesentlich besser (s. Tabelle 1).

- Zuverlässigkeit der WLAN Access-Points (Leistungsregelung, Frequenzbandwechsel), Langzeit-Stabilität (Ab-/Anschalten, Lage- oder Antennenänderung, Änderung der Konfiguration).

- Zuverlässigkeit der Messungen sowohl bei der Erfassung der Datenbank, als auch bei der Lokalisierungsmessungen der einzelnen Nutzer (Smartphones) selbst. Hier spielt auch die Genauigkeit der RSSI-Messung, die Messperiode und die die Erfassung möglichst vieler zuverlässiger Access-Points eine Rolle.

- An Bahnhöfen gibt es als besonderen Störfaktor für die Messungen natürlich die Züge, die große bewegliche Reflexionsflächen darstellen. Im Bahnhof Südkreuz fahren Züge im Minutentakt.

Im Folgenden werden Untersuchungen zum Auffinden/Eingrenzen von Fehlerquellen vorgestellt:

Zunächst wurden zeitliche Variation der Sichtbarkeit und des Empfangspegel der DB Access Points an einem konstanten Ort (Osthalle, Pos. A) über einen Messzeitraum von ca. 100 s gemessen: Abbildung 6 zeiget die anhand der Registrierung der RSSI-Signale gemessenen Sichtbarkeiten der Access Points und Abbildung 7 die Pegel der Empfangssignale. Die Access Points sind dabei jeweils durch ihre MAC-Adressen gekennzeichnet (Bsp.: DB 12feed889b2e mit der MAC-Adresse 12:FE:ED:88:9B:2E).

In diesen Ergebnissen wird eine Hauptproblematik sichtbar, welche die Genauigkeit im Bahnhof Südkreuz begrenzt: Obwohl alle Access-Points einen relativ guten Empfangs-Leistungspegel zeigen, fehlen Registrierungen einzelner Access-Points in einzelnen Messungen. Die Ursache liegt z.T.im Android-Betriebssystem, d.h. in einem WLAN Scan auf dem Android-Smartphone sind nicht immer alle Access-Points erfasst. Abbildung 6 zeigt dieses Verhalten deutlich: In

jedem 10-s-Messintervall werden 20 Messwerte der gezeigten Access-Points erwartet, die Anzahl der tatsächlich erhaltenen Messwerte liegt aber oft wesentlich darunter.

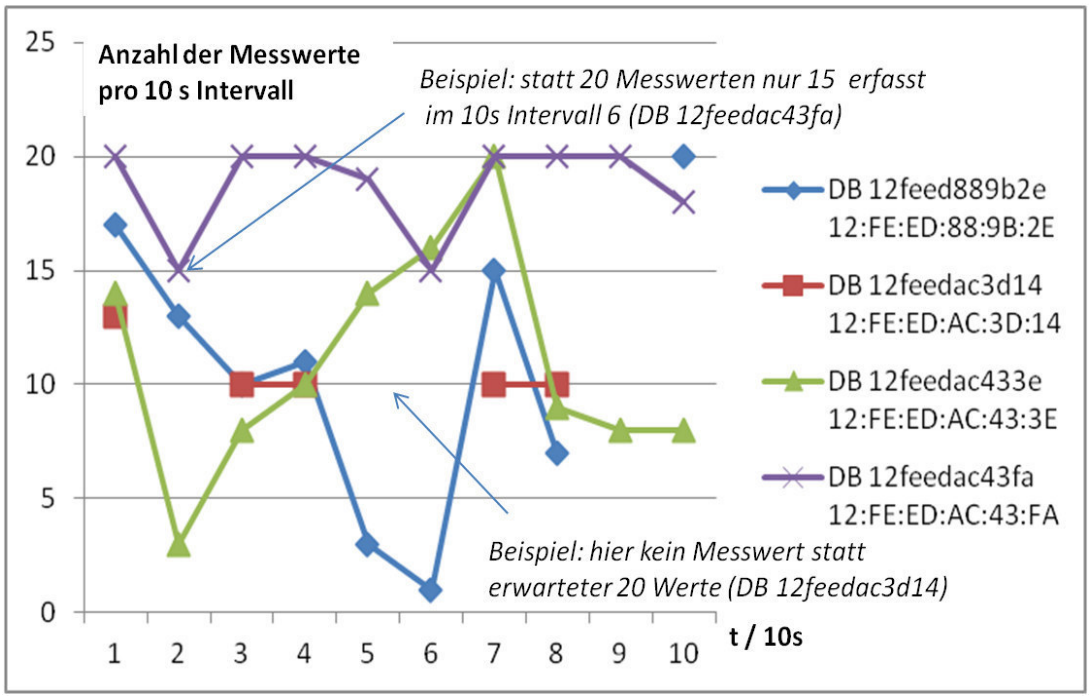


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der Sichtbarkeit von DB Access-Points, Anzahl der Messwerte:Soll = 20

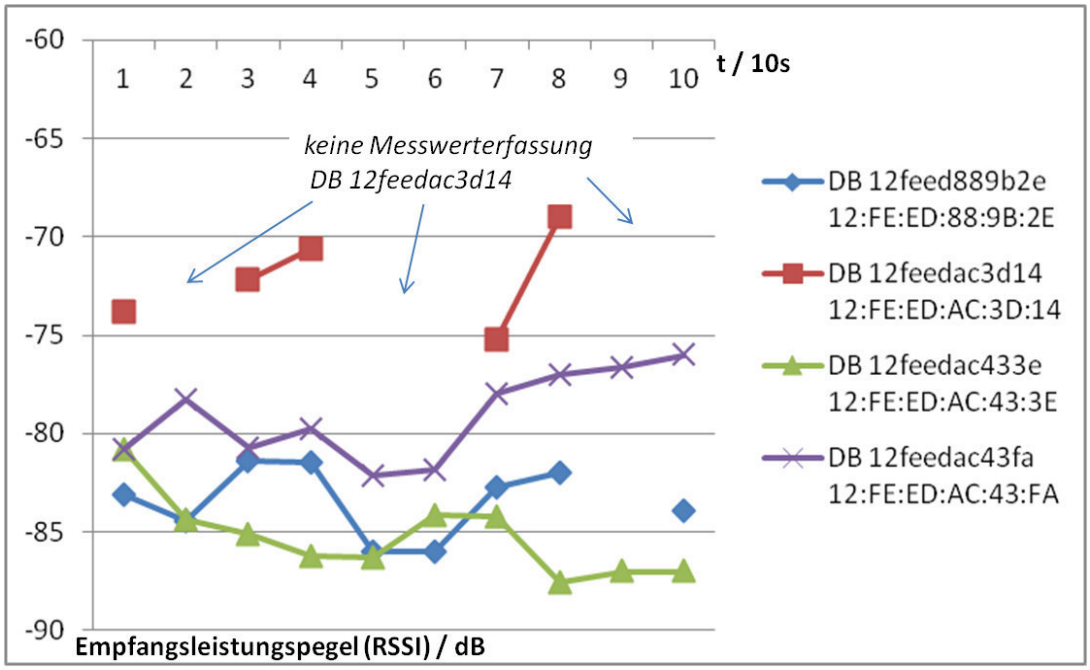


Abbildung 7: Kurzzeit-Pegeländerung des Empfangspegels (über ca. 100 s)

Des Weiteren zeigt sich, dass der Empfangspegel der einzelnen Messungen über einen Zeitraum von 100 s (Abbildung 7) nicht konstant ist. Schwankungen von 5 dB und mehr sind hier

sichtbar. Auch bei den Messwerten innerhalb einer 10-s Messperiode gibt es erhebliche Pegelschwankungen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse ausführlicher Untersuchungen zur Lokalisierungsgenauigkeit an verschiedenen Positionen des Bahnhofs vorgestellt. In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die Ergebnisse zur Genauigkeit der Positionsbestimmungen detailliert als empirische Verteilungsfunktionen (CDFs, Cumulative Density Functions) angegeben, im einen Fall unter ausschließlicher Berücksichtigung der DB Access-Points, im anderen Fall unter zusätzlicher Berücksichtigung von 46 ‚freien' Access-Points. Die Ergebnisse für die verschiedenen Bereiche sind farblich auf folgende Weise gekennzeichnet: Osthalle, Pos. A und E: grün und blau; Ringbahnhalle, Pos. B: orange; Ringbahnhalle/Rand, Pos. C: gelb, Westhalle, Pos. D: rot. Fn(x) gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der die Abweichungen unter einer bestimmten Größe (distance error) liegen: z.B. der Wert von 0,5 entspricht dem Median, d.h. die Hälfte alle Messwert ist besser als der zugehörige distance error auf der x-Achse.

In den beiden Hallen sind die Median-Werte besser oder gleich 10 m. Man sieht jedoch deutlich, dass es eine Stelle im Bahnhof gibt, die deutlich schlechtere Werte liefert (Ringbahnhalle/Rand). Zusätzliche Access-Points (Abbildung 9) bringen tendenziell keine Verbesserung sondern eher eine Vergrößerung der Schwankungen (Varianz). Eine Ausnahme ist der kritische Punkt am Rand der Ringbahnhalle. Hier ist wahrscheinlich die Sichtbarkeit von DB Access-Points so eingeschränkt, dass zusätzliche, auch eher unzuverlässige Access-Points eine deutliche Verbesserung bewirken.

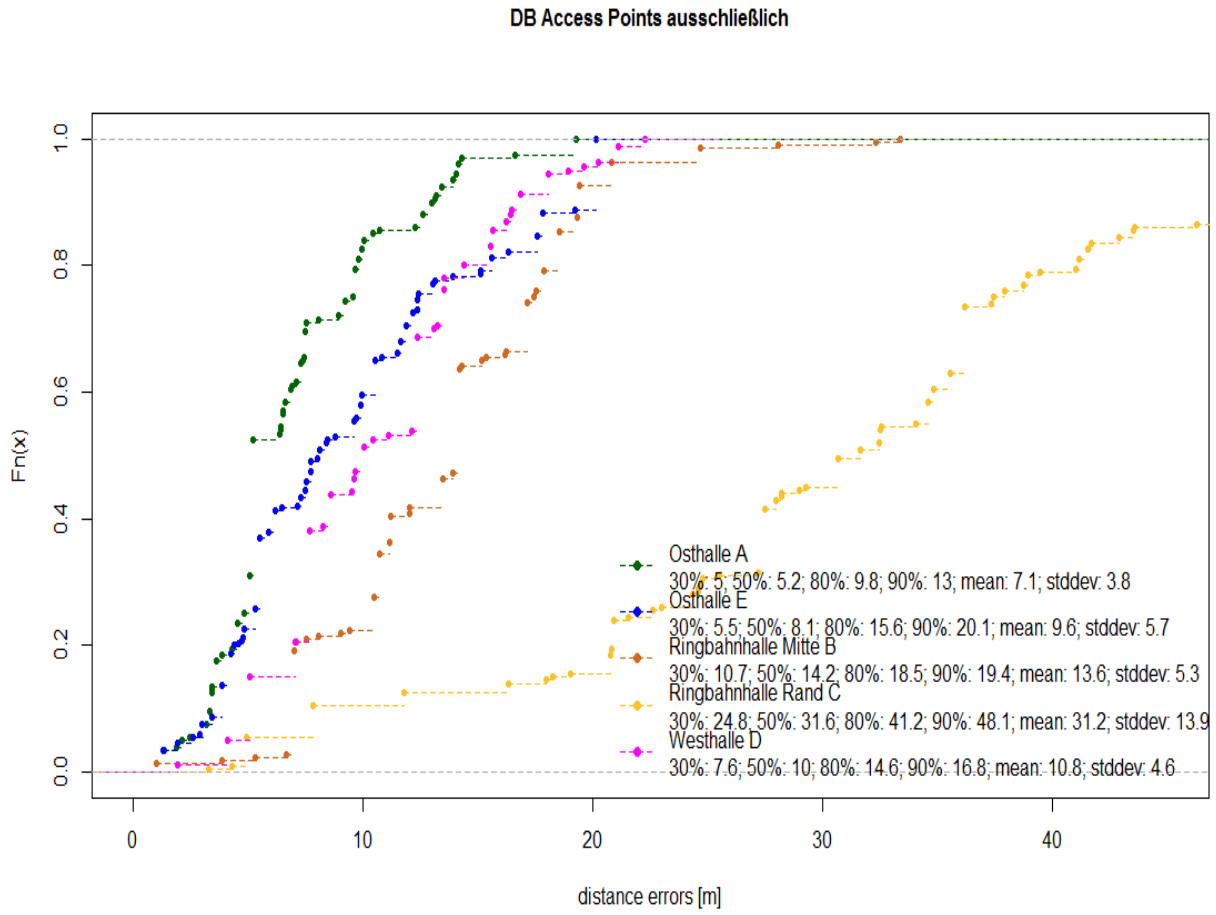


Abbildung 8: Genauigkeit bei statischen Messungen nur mit DB Access-Points

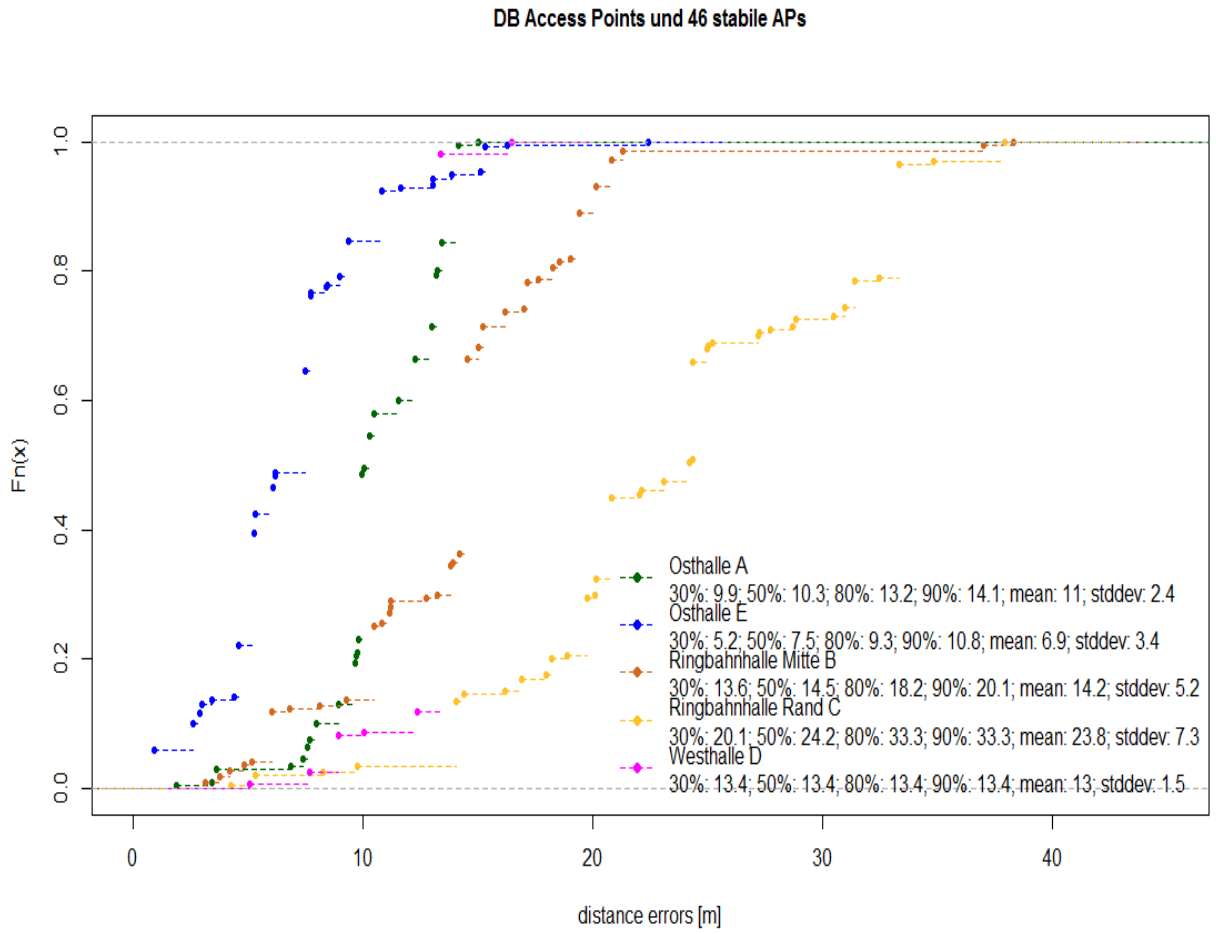


Abbildung 9: Genauigkeit bei statischen Messungen mit DB Access Points und zusätzlichen privaten Access-Points

Zusammenfassung der gewonnen Erkenntnisse (Abbildungen 6-9):

- Feldstärken schwanken innerhalb von einigen Sekunden um mehrere dB, während sich die Feldstärke von einem Positionierungspunkt zu einem benachbarten andererseits teilweise wenig ändert. Ursachen dafür sind am wahrscheinlichsten in der komplexen und zeitlich variierenden elektromagnetischen Feldausbreitung im Bahnhof zu finden.

- Die System-API des Android-Smartphones scannt nur eine begrenzte Anzahl der vorhandenen Access-Points. In der Lokalisierungsmessung fehlende Access-Points führen zu Fehlern bzw. reduzieren die Genauigkeit. Eine Verbesserung der Smartphone-Technologie ist auf diesem Gebiet in der nächsten Zeit nicht zu erwarten, da das WLAN-Interface ursprünglich nicht für Positionierungsanwendungen gedacht ist. Andererseits ist man auf dem Gebiet der Indoor-Navigation aber auf Massenverbreitung der Smartphones angewiesen, d.h. diese können im Allgemeinen nicht durch andere Geräte ersetzt werden.

- Die stochastischen/zufälligen Fehler auf Grund der genannten Ursachen überwiegen meist den systematischen Einfluss einzelner Optimierungseinstellungen.

Die zuverlässigen Access-Points der Deutschen Bahn sind zahlenmäßig geringer als ursprünglich geplant und wie erwähnt ungünstig positioniert. Es gibt die klare Tendenz, dass man mit mehr Access Points, deren Konfiguration, Ort und Ausrichtung man selbst bestimmt, Verbesserungen erzielen kann.

Last-Tests (3):

Das System ist planmäßig für 100 Nutzer ausgelegt, die gleichzeitig den Lokalisierungsdienst in Anspruch nehmen. Gemessen wurden die Antwort-Zeiten des Servers zur Rückmeldung Lokalisierungsinformation (Tabelle 2) für bis zu 150 Nutzer. Die Antwortzeiten bewegen sich deutlich unter 1 s pro Request und erfüllen damit die gestellten Anforderungen. Diese Werte wurden mit einem Google Nexus-Smartphone erreicht.

	Durchschnitt	Maximum
Server Antwortzeit 150 Nutzer, IP Festnetz	ca. 230 ms	< 800 ms
Server Antwortzeit mit Mobilfunk-Netz,1 Nutzer	ca. 600 – 700 ms	< 1 s

Tabelle 2: Gemessene Antwortzeiten des Lokalisierungsservers pro Request

Dynamische Tests (4) zur Positionsbestimmung einer sich bewegenden Person:

Die abschließenden dynamischen Tests zur Positionsbestimmung wurden am Südkreuz Berlin mit Smartphones unter Nutzung der HaCon-App durchgeführt. Bei solchen Wanderungen durch das Bahnhofsgelände wurden die ermittelten Ortskoordinaten an Punkten gemessen, deren Position aufgrund des vorliegenden Kartenmaterials exakt bekannt war. Das neue entwickelte Verfahren unter Nutzung eines Glättungsfilters (s. Abschnitt 3.3.4) wurde dabei eingesetzt.

Aus dem Vergleich dieser Daten wurden die in den dynamischen Messungen auftretenden Abweichungen bestimmt. In Abbildung 10 ist Fn(x), die kumulative Verteilungsfunktion, in Abhängigkeit der aufgetretenen Distance Errors dargestellt. In der Hälfte der Fälle beträgt die Abweichung der ermittelten zur korrekten Position weniger als 10 m und ist geringer als 15 m für 80% aller Messwerte. Damit wurde das entsprechende Projektziel erreicht.

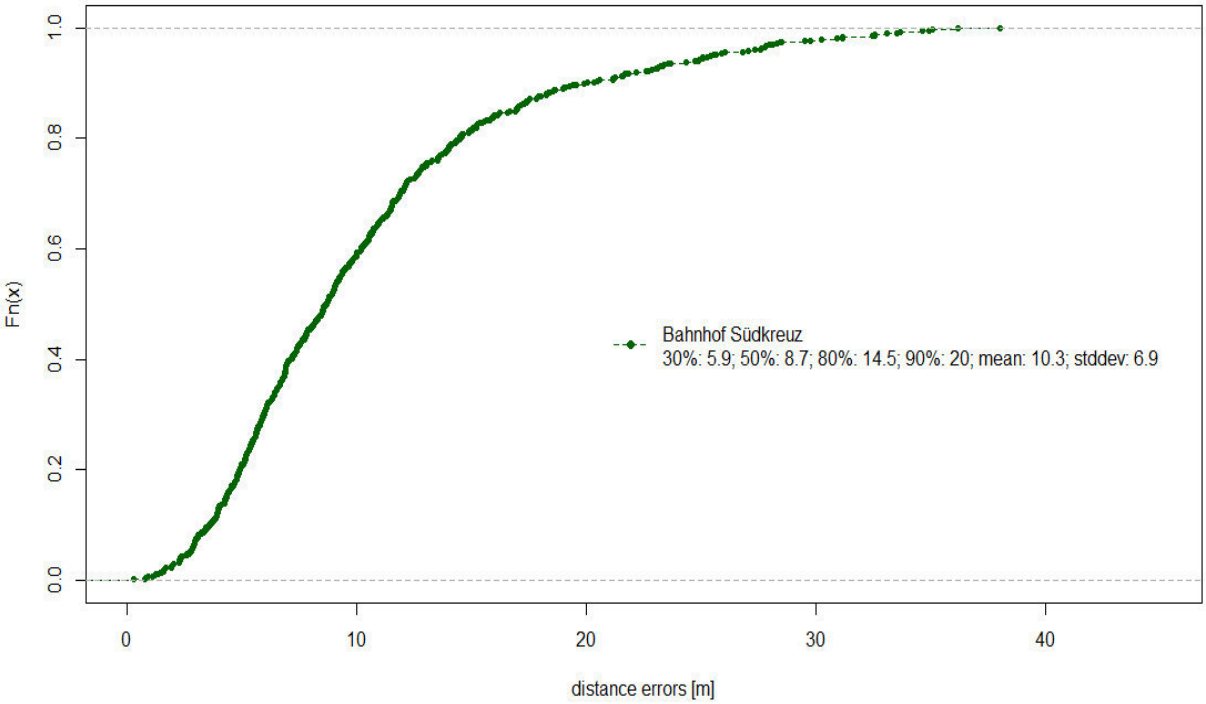


Abb. 10: Kumulative Verteilungsfunktion der Positionsabweichungen über alle Messungen (HaCon App, NN=2)

3.5. Nachweis der Interoperabilität verschiedener Ortsbestimmungsverfahren

Der Nachweis der Interoperabilität verschiedener Ortsbestimmungsmethoden war ein wesentliches Projektziel. Um dieses Ziel zu ermöglichen, war eine Anpassung der zuvor im Projekt entwickelten Architektur (s. Abbildung 1) erforderlich. Zusammen mit den Projektpartnern wurde ein Konzept entwickelt, wie aufbauend auf der verfügbaren Infrastruktur die Sicherstellung und Erprobung technischer Interoperabilität zwischen den Ortsbestimmungsverfahren von IIS/FHG und dem Verfahren von Alcatel-Lucent umgesetzt werden sollte (s. Abbildung 3).

Die in Abschnitt 3.3.3 beschriebene API-Software von Alcatel-Lucent eignete sich ohne weitere Anpassung als Interface zur Einbindung unseres Lokalisierungsverfahrens in das von IIS/FHG realisierte Gesamt-Ortungssystem. Über die API wird die Verbindung zu unserer Fingerprint-Datenbank aufgenommen. Die vom Smartphone ermittelten Fingerprint-Messungen der WLAN-Hotspots werden an den Server mit der angeschlossenen Datenbank geschickt. Dort erfolgt die Auswertung unter Nutzung der Filterverfahren, und die errechneten Positionsdaten werden an das im Smartphone integrierte API zurückgemeldet.

Nach Bereitstellung der von uns entwickelten API-Software und Server/Datenbank-Umgebung an IIS/FHG wurden die Integration in das Gesamtsystem und der Nachweis des Zusammenwirkens der verschiedenen Verfahren durch IIS/FHG durchgeführt, entsprechende Tests verliefen erfolgreich. Eine genaue Darstellung der Integration und der er zielten Ergebnisse befindet sich im Berichtsteil von IIS/FHG.

3.6. Zusammenfassung und Bewertung

Ziel von Alcatel-Lucent in Arbeitspaket 4 des IMS-Projektes war es, ein Lokalisierungs-Verfahren für ein Android-Smartphone bereitzustellen, das eine Indoor-Navigationslösung mit Nutzer-Interface anbietet. Die Anwendung sollte definierte Bereiche des Bahnhofes Berlin Südkreuz abdecken. Die hierzu verwendeten Access-Points können entweder nur für die WLAN-Ortung eingesetzt werden oder auch Bestandteil normaler Kommunikationsinfrastruktur sein (öffentliche Access-Points).

Die Positionsbestimmung beim spezifischen Ansatz von Alcatel-Lucent basiert auf einer Erfassung und Auswertung der Feldstärke von WIFI-Funksignalen von WLAN Access-Points mittels eines Fingerprint-Verfahrens. Zunächst wird dafür während der Kalibrierungsphase die Feldstärke in Abhängigkeit von der Position ermittelt und in einer serverbasierten Datenbank (Fingerprint-Datenbank) hinterlegt. Ein mobiles Endgerät misst die Feldstärke der WLAN-Access-Points im regulären Betrieb und bestimmt durch den Vergleich der aktuellen Messwerte mit den Werten in der Fingerprint-Datenbank die Position des mobilen Endgerätes. Durch Verwendung intelligenter Algorithmen z.B. Berücksichtigung von Feldstärkeschwankungen und entsprechender Konditionierung der Fingerprint-Datenbank wird die Genauigkeit der Ortung erhöht.

Gesamt-Architektur, Komponenten des Systems:

Die Definition der Gesamt-Architektur für die Realisierung der Indoor-Navigation erfolgte bei Alcatel-Lucent in Abstimmung mit den beteiligten Projektpartnern. Das Gesamtsystem der Indoor-Navigation kann in mehrere Komponenten zerlegt werden. Für eine Navigationslösung werden die Komponenten Lokalisierung (zur Findung der Position), Routing (Berechnung der Strecke vom aktuellen Punkt zum Ziel) und Karten (Darstellung der Strecke) benötigt. Die

einzelnen Komponenten können wiederum in mehrere funktionale Blöcke zerlegt werden (z.B. User Interface, Maps, WLAN Measurement etc.).

Für dieses System entwickelten wir die Indoor-Lokalisierungskomponente, die sich aus den funktionalen Blöcken WLAN Measurement, Localization Algorithms, Fingerprint (FP) Database (DB) und Fingerprint Database Creation zusammensetzt. Die einzelnen Blöcke werden dann als Anwendungen auf mobilen Endgeräten ausgeführt. Zum Datenaustausch mit dem Smartphone wurde ein Application-Programming Interface (API) entwickelt und an die Partner HaCon und IIS/FHG bereitgestellt.

Einrichtung des Indoor-Navigationsverfahrens für den Bahnhof Südkreuz:

Wesentlich für die spätere Genauigkeit bei der Lokalisierung ist die zugrunde liegende WLAN-Infrastruktur. Diese kann zunächst anhand von Gebäude- und Ausrüstungsplänen (WLAN-Ausrüstung) abgeschätzt werden. Wichtiger sind jedoch Probemessungen zur genaueren Bestimmung der Signalstärken. Die Aufnahme erfolgte manuell an verschiedenen Positionen im Bahnhof Südkreuz. Das Aufnehmen der Signalstärken wird auch als Fingerprinting bezeichnet, die Datenbank zur Ablage der Signalstärken wird Fingerprint (FB) Datenbank (DB) genannt.

Geplant war zunächst die Installation von 23 WLAN- Access-Points an ausgesuchten Postionen, was durch fehlende Stromversorgung nicht möglich war. Es wurden daher 13 Access-Points zu einem großen Teil in Geschäften und Büros installiert, die Abdeckung ist damit nicht wie ursprünglich erwartet. Die eingestellten Parameter der neuen Hotspots sind konstant einschließlich der Sendeleistung. Diese Access-Points laufen unter der Regie der Deutschen Bahn. Außerdem gibt es etwa 130 private WLAN Access-Points auf dem Bahnhof. Davon wurden ca. 40, die sich bei Tests als relativ konstant erwiesen haben, für die weitere Nutzung ausgewählt. Zum Erfassen der Datenbank wird eine Karte verwendet, welche die markanten Stellen wie Treppen, Rolltreppen, Positionen von Geschäften usw. enthält. Diese Punkte wurden mit Hilfe von Google geo-referenziert.

Datenbank / Server:

Zur Erstellung der Datenbank mit den geo-referenzierten Lokalisierungspunkten wurden während einer sogenannten Trainingsphase Messungen der Hotspot-Feldstärken (RSSIs) mittels eins Android-Smartphones durchgeführt. Der Lokalisierungsalgorithmus greift auf diese Datenbank zu und benutzt das Verfahren der „kleinsten Euklidischen Abstände“ der gemessenen RSSIs zu den Referenzwerten in der Datenbank als Metrik. Dieser Algorithmus läuft auf einen Server, der im Internet per http erreichbar ist. Auf diesem Server liegt auch die Referenzpunkt-Datenbank.

Ein grundsätzliches Kriterium für die Genauigkeit der Indoor-Navigation ist das Raster der Datenerfassung: die Basisgenauigkeit kann nicht besser sein als der Abstand der Fingerprint (FP) Referenzpunkte in der erfassten Datenbank. Mit einem engeren Rastermaß wächst andererseits aber auch der Messaufwand quadratisch. Unser Datenbankraster liegt zwischen 5 und 10 m.

Zur Errechnung der Nutzer-Position wird dieser Algorithmus durch eintreffende Requests von den Nutzer-Smartphones angestoßen und liefert die berechneten Koordinaten zurück. Hierzu wurde auf einem Server eine geeignete Datenbank zur Aufnahme der Messdaten für die Erzeugung der Fingerprint-Karte eingerichtet und die Implementierung der erforderlichen Auswerte-Algorithmen durchgeführt. Server und die Datenbank wurden über Internet zur Kommunikation und Positionsübermittlung an eine entsprechende Smartphone-App zugänglich gemacht.

Smartphone Software:

Das Lokalisierungsmodul wurde als Android-Java-Bibliothek gestaltet. Es hat ein internes Interface zu der Smartphone-App mit dem Nutzerinterface zum Aktivieren/Deaktivieren der Lokalisierung und Abfrage des Aktivierungsstatus. Wenn die Lokalisierung aktiviert ist, erfolgt periodisch ein Scan der verfügbaren WLAN Access-Points (Beacons), die Anfrage der geschätzten Koordinaten via Internet beim Lokalisierungsserver und die anschließend Rückgabe der ermittelten Koordinaten an die aufrufende Smartphone-App über eine Callback-Routine.

Das API unterstützt die Möglichkeit, zwischen verschiedenen Lokalisierungsverfahren auszuwählen. Die Entscheidung dafür liegt allerdings außerhalb dieses SW-Moduls. Zum geplanten Zeitpunkt wurde die Entwicklung des Lokalisierungsmoduls abgeschlossen, die Software wurde unseren Projektpartnern HaCon und IIS/FHG bereitgestellt.

Tests & Auswertung:

Am Südkreuz Berlin wurden unter Nutzung der entwickelten und anschließend integrierten Funktionsblöcke umfangreiche Tests zur Indoor-Lokalisierung mit Smartphones durchgeführt. Dabei wurden die implementierten Algorithmen detailliert getestet und teilweise verbessert. Mit der im Projekt installierten Infrastruktur unter (von der Deutschen Bahn installierte Access-Points) sowie zusätzlichen vorhandenen privaten Access-Points erreichen wir bei statischen Messungen im Bahnhof Südkreuz stellenweise eine mittlere Genauigkeit von besser als 10m (für 80% der Messwerte besser als 12m), in äußerst ungünstigen Fällen wurden aber auch nur 25m im Mittel erzielt. Für die begrenzte Genauigkeit wurden folgende Ursachen gefunden:

- Gemessene Feldstärken schwanken innerhalb von einigen Sekunden um mehrere dB, während sich die Feldstärke von einem Positionierungspunkt zu einem benachbarten andererseits teilweise wenig ändert. Ursachen für die Schwankungen sind am wahrscheinlichsten in der komplexen elektromagnetischen Feldausbreitung zu finden. Die hohe an Bahnhöfen zu beobachtende Dynamik (ein/ausfahrende Züge mit entsprechender Beeinflussung der Funksignale) ist hier von besonderem Einfluss.
- Die System-API des Android-Smartphones scannt nur eine begrenzte Anzahl der vorhandenen Access Points. In der Lokalisierungsmessung fehlende Access-Points führen zu Fehlern bzw. reduzierter Genauigkeit. Eine Verbesserung der Smartphone-Technologie ist auf diesem Gebiet in der nächsten Zeit nicht zu erwarten, da das WLAN-Interface nicht ursprünglich für Lokalisierungsanwendungen gedacht ist. Andererseits ist man auf dem Gebiet der Indoor-Navigation aber auf Massenverbreitung der Smartphones angewiesen, d.h. diese können im Allgemeinen nicht durch andere Geräte ersetzt werden.
- Die zuverlässigen Access Points der Deutschen Bahn sind zahlenmäßig geringer als ursprünglich geplant und zum Teil ungünstig positioniert. Es ist zu erwarten, dass man mit mehr Access Points, deren Konfiguration, Ort und Ausrichtung man selbst bestimmt, deutliche Verbesserungen erzielen kann.

Dynamische Tests zur Positionsbestimmung einer sich bewegenden Person:

Nachdem die zuverlässige Funktionsweise des Servers, der Datenbank und der API-Software zur Positionsbestimmung in den zuvor beschriebenen Tests nachgewiesen war, wurde das API bei HaCon mit der dort entwickelten Navigations-App im Smartphone integriert. Damit war ein zentrales Projektergebnis erreicht, es standen alle Komponenten zum Datenaustausch zwischen dem Lokalisierungsmodul mit dem Nutzer-Interface zur Verfügung. Die App konnte nun in der Konfiguration getestet werden, wie sie später von den Nutzern zur Positionsbestimmung und Indoor-Navigation am Südkreuz Berlin eingesetzt werden sollte.

Bei unseren abschließenden Tests mit dieser von HaCon bereitgestellten App führten wir dynamische Lokalisierungsmessungen (bei zügigem Abschreiten von Wegen durch das Bahnhofsgelände) durch. Die Ortskoordinaten wurden an Punkten entlang gerader Wegstrecken

aufgenommen, deren Positionen aufgrund des vorliegenden Kartenmaterials exakt bekannt waren. Aus dem Vergleich dieser Datensätze wurden die in den dynamischen Messungen auftretenden Abweichungen bestimmt, die folgenden Resultate wurden damit erzielt: In der Hälfte der Messungen beträgt die Abweichung der ermittelten zur korrekten Position weniger als 10m und in 80% aller Messwerte weniger als 15m.

Interoperabilität verschiedener Ortsbestimmungsverfahren:

Das Thema Interoperabilität bildete einen wichtigen Schwerpunkt im Arbeitskreis ‚Indoor-Navigation' und führte zu einer eigenen Arbeitsgruppe. Für das in diesem Kreis initiierte White Paper zur ‚Sicherstellung der Interoperabilität bei Indoor-Navigation' wurde von Alcatel-Lucent ein Beitrag bezüglich Einführung eines Referenzmodells erstellt. Ein solches Modell kann sowohl spezielle Indoor-Navigations-Lösungen und -Technologien Lösungen beschreiben als auch als Architektur für die Entwicklung neuer Lösungen betrachtet werden.

Nachdem im Rahmen eines Erweiterungsantrages des Fraunhofer-Institut für Fraunhofer Institut Integrierte Schaltungen (IIS/FHG) als Partner in das Projektkonsortium aufgenommen wurde, war die Möglichkeit gegeben, die Ortsbestimmungsverfahren von Alcatel-Lucent und IIS/FHG zu integrieren und den Nachweis des Zusammenwirkens zu erbringen.

Im ersten Schritt in Richtung Interoperabilität war eine Anpassung der zuvor im Projekt entwickelten Architektur erforderlich. Zusammen mit den Projektpartnern wurde ein Konzept entwickelt, wie aufbauend auf der verfügbaren Infrastruktur die Sicherstellung und Erprobung einer Interoperabilität zwischen den Ortsbestimmungsverfahren von IIS/FHG und dem Verfahren von Alcatel-Lucent umgesetzt werden kann.

Nach Bereitstellung der von uns entwickelten API-Software und Server/Datenbank-Umgebung wurden die Integration in das Gesamtsystem und der Nachweis des Zusammenwirkens der verschiedenen Verfahren durch IIS/FHG durchgeführt, entsprechende Tests verliefen erfolgreich. Eine genaue Darstellung der Integration und der zielten Ergebnisse befindet sich im Berichtsteil von IIS/FHG.

4. Darstellung wesentlicher Abweichungen zum Arbeitsplan

Für den Beitrag von Alcatel-Lucent zu Arbeitspaket AP 4 „Indoor-Navigation“ wurde eine kostenneutrale Verlängerung um 3 Monate bis zum 31. März 2016 genehmigt. Die Gründe für die Verlängerung waren wie folgt:

Die Deutsche Bahn AG führte im Laufe des Projektes am Zukunftsbahnhof Berlin Südkreuz Erweiterungen der Infrastruktur um BLE-Beacons und zugehörige Beacon-Controller durch. Damit waren die zuvor nicht gegebenen Voraussetzungen zur Erprobung einer interoperablen Indoor-Navigation vorhanden. Im Erweiterungsantrag vom 30.03.2015 wurde ein Konzept entwickelt, wie aufbauend auf dieser Infrastruktur das wichtige Anliegen der Sicherstellung und Erprobung technischer Interoperabilität umgesetzt werden soll.

Die im Erweiterungsantrag dargestellten Aktivitäten konnten nicht mehr in der verbliebenen Restlaufzeit des Projekts (bis 31.12.2015) durchgeführt werden. Um die Erprobung technischer Interoperabilität in der Verlängerungsphase zu ermöglichen, erklärte sich Alcatel-Lucent bereit, die im bisherigen Projektrahmen von Alcatel-Lucent bereits bereitgestellte und erfolgreich getestete Infrastruktur bis zum 31.3.2016 für die Interaktion mit den Projektpartnern bereitzustellen. Die Arbeits- und Zeitplanung wurde entsprechend modifiziert und mit den Projektpartnern abgestimmt.

Insgesamt entsprach der Mittelverbrauch der Kostenplanung und der durch den Verlängerungsantrag modifizierten Zeitplanung. Im Ablauf des Projektes traten keine gravierenden Probleme auf, die die Erreichung der technisch-wissenschaftlichen Zielsetzungen gefährden konnten, die Arbeiten verliefen im Zeitplan. Alle Arbeiten konnten im geplanten Budgetrahmen erfolgreich abgeschlossen werden.

5. Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik

Im Gegensatz zu Bahnhofsgebäuden, Flughäfen und anderen Umsteigekomplexen stehen für den öffentlichen Verkehr (ÖV) und Individualverkehr (IV) bereits leistungsfähige Systeme zur Verfügung, die Orientierung und Information in Echtzeit und „auf Knopfdruck“ bereitstellen. Für den IV sind Navigationssysteme bekannter Hersteller wie TomTom, Navigon, Navteq usw. bereits weit verbreitet und werden von den OEMs oft schon direkt ins Fahrzeug fest integriert. Für den ÖV stellt der DB Navigator umfassende Informationen zu allen öffentlichen Verkehrsmitteln bereit.

Der Status Quo bei der Planung von großen Bahnhofsanlagen ist jedoch geprägt von dem Vorrang isolierter technischer Funktionalität. Intelligente Energienutzung, Intermodale Hubfunktion und digitale Navigation spielen bei der Planung kaum eine Rolle und müssen bei Bedarf im Nachgang suboptimal nachgerüstet werden. Einzelne Komponenten werden für sich genommen bereits in isolierten Neuplanungen eingebaut. Es existiert aber bisher kein übergreifendes, alle drei Grundbausteine umfassendes Erprobungsprogramm mit Bezug zum Realbetrieb. Übertragbare Forschungserfahrungen zu sammeln, die einen neuen Stand der Wissenschaft und Technik für die Überarbeitung des intermodalen Gesamtsystems und auch für die Optimierung der Teilkomponenten der einzelnen Projektpartner darstellen, war daher ein Hauptziel des Projektes.

Indoor-Lokalisierung/Navigation bildete einen zentralen Baustein in diesem integrativen Gesamtansatz und war in einem Themenfeld angesiedelt, mit dem sich weltweit eine Vielzahl von Einrichtungen in Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit unterschiedlichen technischen

Ansätzen beschäftigen. An einigen dieser Projekte wirken auch die an dem vorliegenden Vorhaben beteiligten Projektpartner mit.

Eine der am intensivsten untersuchten Methoden ist die WLAN-Ortung, welche auf der Auswertung der Feldstärke von WLAN Access-Points (mittels Fingerprint) basiert. Dafür wird eine gewisse Anzahl an installierten WLAN Access-Points vorausgesetzt. Die verwendeten Access-Points können nur für die WLAN-Ortung eingesetzt werden oder auch Bestandteil normaler Kommunikationsinfrastruktur sein (öffentliche Access-Points). Dadurch können Erkenntnisse zur Indoor-Navigation gebündelt und Synergien genutzt werden.

Die Positionsbestimmung beim spezifischen Ansatz von Alcatel-Lucent basierte auf der Auswertung der Feldstärke von WLAN Access-Points. Zunächst wird dafür während der Kalibrierungsphase die Feldstärke in Abhängigkeit von der Position ermittelt und in einer serverbasierten Datenbank (Fingerprint-Datenbank) hinterlegt. Ein mobiles Endgerät misst die Feldstärke der WLAN-Access-Points im regulären Betrieb und bestimmt durch den Vergleich der aktuellen Messwerte mit den Werten in der Fingerprint-Datenbank die Position des mobilen Endgerätes. Im Prinzip entspricht dieses Verfahren internationalen State-of-the-Art Ansätzen, spezielle Herausforderung war jedoch der Nachweis der Tauglichkeit in einem äußerst störungsbehafteten Bahnhofsumfeld. Durch Verwendung intelligenter Algorithmen, z.B. Berücksichtigung von Feldstärkeschwankungen, und entsprechender Konditionierung der Fingerprint-Datenbank lässt sich die Genauigkeit der Ortung für dieses Umfeld erhöhen.

Interoperabilität verschiedener Ortsbestimmungsverfahren und Auswahl der jeweils geeignetsten Methode bietet ein Möglichkeit, die Positionier-Genauigkeit gezielt auf die Erfordernisse einzelner Sektoren des Bahnhofs anzupassen, um z.B. Barrierefreiheit zu ermöglichen. In diesem Vorhaben wurden dabei zwei unterschiedliche Systeme (WLAN und Bluetooth) kombiniert, um zum einen die Adaption in andere Kontexte zu ermöglichen und zum anderen die Leistungsfähigkeit und die technischen Möglichkeiten zur genauen Ortung insgesamt zu steigern.

Abschließend kann festgestellt werden, dass auf die Kernfrage ‚Wie lassen sich die in anderen Projekten gewonnenen Laborerkenntnisse im Life-Betrieb eines modernen Großbahnhofs umsetzen bzw. fortentwickeln' bisher sehr wenige und dann auch nur rudimentäre Antworten existierten. Fast alle verfügbaren Erkenntnisse bezogen sich auf Ortsbestimmungen in störungsarmen und teilweise ‚idealen' Umgebungen. Mit der Schwerpunkt-Setzung in diesem Verbundprojekt wurde daher ein neues und sehr anspruchsvolles Feld betreten.

6. Verwertung, Zukunftsaussichten und weiterer F&E-Bedarf

6.1. Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen

Bahnhöfe der Zukunft sind mehr als Ein- und Ausstiegspunkte des Eisenbahnverkehrs. Sie werden sich in Folge der im Projekt beschriebenen Änderungsprozesse immer stärker zu sogenannten „Multi-Modal-Arenen" entwickeln, in denen der Nutzer als Nachfrager der vernetzten ökologisch verträglichen Mobilität deren einzelne Bausteine als Gesamtangebot erfahren kann und in ihrer Nutzung geleitet wird. Aus dieser Rollendefinition des Bahnhofs, besser der Mobilitätsstation, als zentrale Schnittstelle herkömmlicher und neuer Mobilitätsformen erwuchs auch der Zuschnitt der im Projekt implementierten Demonstrationsumgebung: Die Mobilitätsstation wird intelligent erfahrbar, Indoor-Navigation erleichtert die Orientierung und das intermodale Umsteigen in komplexen Gebäudesituationen.

Mit dem vorliegenden Projekt wird auf Basis einer verknüpften WLAN-Bluetooth-Ortung und darauf aufbauenden Indoor-Navigation gewährleistet, dass am „intelligenten Bahnhof der Zukunft“ nicht nur innovative Mobilitätsangebote bereitgestellt werden, sondern diese in einer gemeinsamen, nutzerfreundlichen Informationsplattform integriert werden. Damit wird den Nutzern der Zugang zu verschiedenen Mobilitätsdiensten erleichtert und auch eine größere Auslastung dieser Angebote erzielt. Die energetische Betrachtung des Gesamtsystems wird dabei um wesentliche Informationen zu Nutzerpräferenzen und kleinräumlichen Bewegungsmustern ergänzt.

Durch Nutzung der technischen Möglichkeiten dieser integrierten Indoor-Navigationslösung können dabei neue Erkenntnisse über die Bewegungsmuster der Nutzer bei spezifischen Mobilitätsbedürfnissen bzw. Informationsbedürfnissen gewonnen werden, die mit bisherigen Technologien nicht zu erfassen waren. So lassen sich bspw. folgende Fragestellungen beantworten, z.B: Welche typischen Bewegungsmuster bestehen an Umsteigestationen, z.B. bei der Suche nach bestimmten ÖPNV-Haltestellen oder Carsharingstationen?

Diese Fragestellungen können unter Nutzung der Projektergebnisse um spezifische Informationsbedürfnisse der beteiligten Stakeholder wie z.B. des Bahnhofsbetreibers, der Anbieter von Mobilitätsdiensten oder der Betreiber der Bahnhofsgeschäfte erweitert werden. Mit diesen Informationen kann somit insgesamt ein wesentlicher Beitrag dazu geleistet werden, die Komplexität an großen Umsteigeobjekten zu minimieren und einen intuitiv begeh- und erfahrbaren „Bahnhof der Zukunft“ zu gestalten.

So sollten die informatorischen Möglichkeiten auf Basis der Indoor-Navigation den intermodalen Mobilitätsangeboten neue Kunden sowie mehr Nutzungen bescheren. Im Arbeitspaket „Indoor-Navigation“ wurden Technologien für Informationsangebote bereitgestellt, die die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten sowohl der Mobilitätsdienstleistungen als auch der Geschäfte und Gastronomie vor Ort erhöhen. Tatsächlich hat sich in mehreren Forschungsprojekten gezeigt, dass durch eine erhöhte Sichtbarkeit von Mobilitätsangeboten deren Nutzung durchaus intensiviert wird.

6.2. Veröffentlichungen, Vorträge

Das Thema Interoperabilität bildete einen wichtigen Schwerpunkt im Arbeitskreis ‚Indoor-Navigation‘ und führte zu einer eigenen Arbeitsgruppe. Für das in diesem Kreis initiierte White Paper zur ‚Sicherstellung der Interoperabilität bei Indoor-Navigation‘ wurde von Alcatel-Lucent ein Beitrag bezüglich Einführung eines Referenzmodells erstellt. Ein solches Modell kann sowohl spezielle Indoor-Navigations-Lösungen und -Technologien Lösungen beschreiben als auch als Architektur für die Entwicklung neuer Lösungen betrachtet werden.

6.3. zukünftiger F&E Bedarf

Aus den Ergebnissen des Projektes ergeben sich verschiedene Ansätze, die im Rahmen des „Internets der Dinge“ (Internet of Things, IoT) von Alcatel-Lucent/Bell Labs weiterverfolgt werden. In welcher Form (z.B. eigene Forschung oder Entwicklung, Teilnahme an Verbund-Forschungs-Vorhaben) dies im Einzelnen erfolgen wird, ist Gegenstand der derzeit laufenden Neuausrichtung der Forschungsaktivitäten von Bell Labs in der Folge der Übernahme von Alcatel-Lucent durch Nokia Anfang dieses Jahres.

7. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogrammes Schaufenster Elektromobilität

Mit dem Förderprogramm „Schaufenster Elektromobilität“ setzte die Bundesregierung eine zentrale Maßnahme des 2011 beschlossenen Regierungsprogramms Elektromobilität um. Die Förderbekanntmachung „Schaufenster Elektromobilität“ der vier Ministerien BMWi, BMVBS, BMU und BMBF diente dazu, einen wichtigen Beitrag zu diesem Ziel der Bundesregierung zu leisten. Durch die „Schaufenster Elektromobilität“ sollten Kräfte, Wissen und Erfahrungen systemübergreifend gebündelt und Aktivitäten fokussiert vorangetrieben werden.

Eine besondere Rolle bei diesem Programm kommt dabei den Bahnhöfen zu. Bahnhöfe der Zukunft sind mehr als Ein- und Ausstiegspunkte des Eisenbahnverkehrs. Sie werden sich immer stärker zu sog. „Multi-Modal-Arenen“ entwickeln, in denen der Nutzer als Nachfrager der vernetzen Mobilität deren einzelne Bausteine als Gesamtangebot erfahren kann und in ihrer Nutzung geleitet wird. Aus dieser Rollendefinition des Bahnhofs als zentrale Schnittstelle herkömmlicher und neuer Mobilitätsformen erwuchs auch der Zuschnitt dieses Projektes: Die Mobilitätsstation wird intelligent erfahrbar, Indoor-Navigation erleichtert die Orientierung und das intermodale Umsteigen in komplexen Gebäudesituationen.

Das vorliegende Projekt unterstützt die mit dem Schaufensterprogramm Elektromobilität aufgerufenen Inhalte durch Erforschung und Erprobung eines Indoor-Navigationssystems, und leistet somit einen wesentlichen Beitrag zur Integration in ein umfassendes Auskunfts-und Orientierungssystem. Damit wird gewährleistet, dass am „intelligenten Bahnhof der Zukunft“ nicht nur innovative Mobilitätsangebote bereitgestellt werden, sondern diese in einer gemeinsamen, nutzerfreundlichen Informationsplattform integriert werden. Damit wird den Nutzern der Zugang zu verschiedenen Mobilitätsdienste erleichtert und auch eine größere Auslastung dieser Angebote erzielt. Die energetische Betrachtung des Gesamtsystems wird dabei um wesentliche Informationen zu Nutzerpräferenzen und kleinräumlichen Bewegungsmustern ergänzt.

Der Bahnhof Südkreuz bildet als räumlich geschlossenes System ideale Voraussetzungen zum konzentrierten Umsetzen und Vermitteln der genannten Forschungsarbeiten zu Indoor-Navigationssystemen. Durch die stark steigende Nutzerfrequenz am Bahnhof Südkreuz ist die Einbindung einer großen Öffentlichkeit gewährleistet, Kunden werden auf Ihren intermodalen Wegen die neuartige Indoor-Navigation direkt nutzen können.

A.9 Abschlussbericht HaCon

Abschlussbericht

Projekt: Verbundprojekt B2-IMS
Themenbahnhof „Vernetzte Mobilität und Energie“
(Schaufensterprojekt B2)

Förderkennzeichen:	**Zuwendungsempfänger:**
16SBB006H	DB Station & Service AG
16SBB006B	**HaCon Ingenieurgesellschaft mbH**

Laufzeit des Vorhabens:	01.03.2013 – 30.06.2016
Berichtszeitraum:	01.03.2013 – 30.06.2016
Datum:	18.07.2016
Seitenzahl:	10

Inhalt

1. Ziele und Aufgaben des Partners ..... - 3 -

1.1 HaCon Ingenieurgesellschaft mbH ..... - 3 -

2.1 Leistungen der HaCon Ingenieurgesellschaft mbH ..... - 4 -

3. Abbildungsverzeichnis ..... - 10 -

1. Ziele und Aufgaben des Partners

1.1 HaCon Ingenieurgesellschaft mbH

AP 4 – Indoor-Navigation

Ziele

Ziel der HaCon im AP 4 war die technische Umsetzung einer Smartphone-Applikation für die Indoor-Navigation im Bahnhof Berlin Südkreuz und ihre Integration in die intermodale Auskunft.

Aufgaben

Durch HaCon erfolgte eine Mitarbeit im AP 4, in Zusammenarbeit mit den Partnern InnoZ, DB S&S und Alcatel Lucent. Die konkreten Aufgaben umfassten:

- Konzeption der zu entwickelnden Funktionalitäten und Erweiterung des HAFAS-Datenmodells
- Modellierung des Bahnhofs Berlin-Südkreuz gemäß des entwickelten Datenmodells
- Entwicklung und Implementierung des Indoor-Routings und der Navigation in Form einer Android-Smartphone-App
- Integration der von Alcatel Lucent und FhG IIS entwickelten Komponenten zur Indoor-Ortung
- Integration des Indoor-Routings und der Navigation in eine intermodale Auskunfts-App zur Unterstützung von Umsteigevorgängen im Bahnhof Berlin-Südkreuz

2. Erzielte Ergebnisse des Partners

2.1 Leistungen der HaCon Ingenieurgesellschaft mbH

Durch die HaCon Ingenieurgesellschaft erfolgte eine Mitarbeit im AP 4. Wesentlicher Arbeitsinhalt war die Erstellung einer Smartphone-App, die ein Indoor-Routing sowie eine Indoor-Navigation im Bahnhof Berlin-Südkreuz ermöglicht. Die durchgeführten Arbeiten stellen eine Anwendung und Erweiterung von Forschungsergebnissen aus dem Projekt DIMIS dar, das vom BMWI im Rahmen der Initiative „von Tür zu Tür“ in den Jahren 2012 bis 2016 gefördert wurde.

Grundlage für die Navigation und das Anbieten ortsbezogener Dienste im Bahnhofsgebäude ist das Vorhandensein einer hinreichend genauen Indoor-Ortung. Zu diesem Zweck wurden zwei Verfahren integriert, die von anderen Projektpartnern für den Bahnhof Berlin-Südkreuz bereitgestellt wurden

- WLAN-Ortungsverfahren von AlcatelLucent auf dem Bahnsteig der S-Ringbahn sowie in den beiden Bahnhofshallen
- WLAN und BLE gestütztes Ortungsverfahren von Fraunhofer IIS („Awiloc“) auf den Ebene 0-Bahnsteigen (Fern- und Regionalverkehr, Nord-Süd-S-Bahn)

Außerhalb des Bahnhofsgebäudes konnte auf die standardmäßige GPS- / Smartphone-Ortung zurückgegriffen werden.

Folgende Arbeitsschritte wurden durchgeführt:

- Erweiterung des Datenmodells für HAFAS-Umsteigebauwerke: Das HAFAS-Datenmodell ermöglicht bereits seit einigen Jahren die Modellierung von Wegen in Umsteigegebäuden. Der Fokus lag jedoch bisher auf der Vorhaltung von Wegeeigenschaften, um barrierefreie Umstiege beauskunften zu können. Im Rahmen der Arbeiten im Projekt DIMIS (Förderung durch BMWI) wurde dieses Modell weiterentwickelt, um einerseits geographisch korrekte Verläufe abbilden zu können und um andererseits Wege mit Navigationsanweisungen und Bildmaterial annotieren zu können. Im Projekt IMS erfolgte eine Zuarbeit bei der Entwicklung der Modellierungskonzepte und eine Bewertung der Anwendbarkeit auf den Bahnhof Berlin-Südkreuz.

- Modellierung des Bahnhofs Berlin Südkreuz: Im aufbauenden Schritt wurde Berlin-Südkreuz gemäß der entwickelten Spezifikation als HAFAS-Umsteigebauwerk modelliert und ein HAFAS-Plandatensatz erstellt, der als Input für die folgenden Arbeitsschritte diente
- Erstellung einer initialen Smartphone-App für Berlin-Südkreuz: Im ersten Arbeitssschritt wurde eine Android-App entwickelt, die folgende Features beinhaltet (Screenshots in Abbildung 1):
    - Integration der Indoor-Ortungskomponente von Alcatec Lucent zur Darstellung des aktuellen Standorts im Bahnhofslageplan
    - Darstellung von ebenengenauen Lageplänen für Berlin-Südkreuz auf Basis der WorldInsight-Modellierung von DB Systel, s. Abbildung 1 (c)
    - Darstellung von Points of Interest (POI) im Lageplan, Anzeige von Zusatzinformationen (Öffnungszeiten, Kontaktdaten), Darstellung der Lagepläne s. Abbildung 1 (c); Anzeige von Zusatzinformationen analog zu Abbildung 3 (c)
    - Ermittlung von Fußwegrouten zwischen POI, einschließlich Barrierefreiheitsoptionen (keine Treppen / keine Rolltreppen / Nutzung von Aufzügen), s. Abbildung 1 (a) (Route ohne Einschränkung), (b) (Barrierefreie Route)
    - Darstellung der ermittelten Fußwegrouten auf dem Lageplan und in textueller Form, Annotierung von Routenelementen mit Kamerasymbol zur Verzweigung auf Bildansichten (aus WorldInsight generiert), s. Abbildung 1 (a); Bildansichten analog zu Abbildung 3 (a)
- Integration der Navigation in eine intermodale Auskunft: Im zweiten Schritt wurde die Funktionalität der initialen Smartphone-App in die intermodale App aus dem FuE-Projekt DIMIS integriert und die Navigationsfunktionalität erweitert. Dazu wurden folgende Arbeiten durchgeführt.
    - Verknüpfung des HAFAS-Datensatzes für das Umsteigebauwerk Berlin-Südkreuz mit dem Datensatz der produktiven DB-Auskunft
    - Integration des Indoor-Routings in die intermodale Auskunfts-App, die im Rahmen des Projekts DIMIS entwickelt wurde

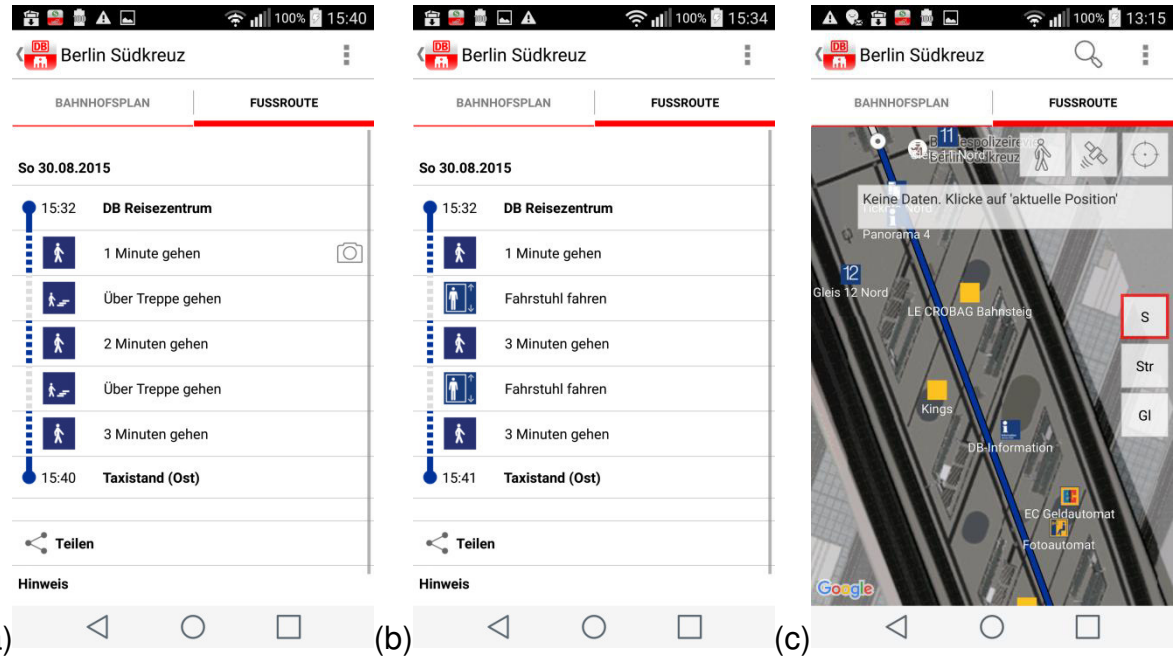
- Integration der Awiloc-Indoor-Ortung von FhG IIS für die Verbesserung der Ortung auf den Fern- und Regionalverkehrs-Bahnsteigen

Folgende Features wurden neu umgesetzt:

- Einbindung des Indoor-Routings zur Unterstützung von Umsteigevorgängen im Bahnhof Berlin Südkreuz im Kontext einer Gesamtroute, einschließlich der Verknüpfung mit multimodalen Angeboten und den Verkehren der BVG (s. Abbildung 2 (a), die Verknüpfung erfolgt über das Kartensymbol neben dem Fußweg-Icon)
- Einbinden detaillierter Bahnhofslagepläne, die von der Firma Archifiles bereitgestellt wurden (s. Abbildung 2 (b))
- Einbinden von 360°-Panoramen auf Basis des WorldInsight-Bahnhofsmodells zur Unterstützung der allgemeinen Orientierung im Bahnhof und der Navigation (s. Abbildung 3 (a)).
- Anzeige von Standorten und zusätzlichen Informationen zu Points of Interest (POI) im Bahnhof:
  - Abfahrtspositionen der Verkehrsmittel: Anzeige der nächsten Abfahrten (s. Abbildung 3 (b))
  - Standorte multimodaler Angebote: verfügbare Fahrzeuge, Buchungsschnittstelle über Aussprung in die Flinkster-App (s.Abbildung 2 (c))
  - Standorte von POI und Zusatzinformationen, z:B Öffnungszeiten, Kontaktinformationen etc. (s. Abbildung 3 (c))

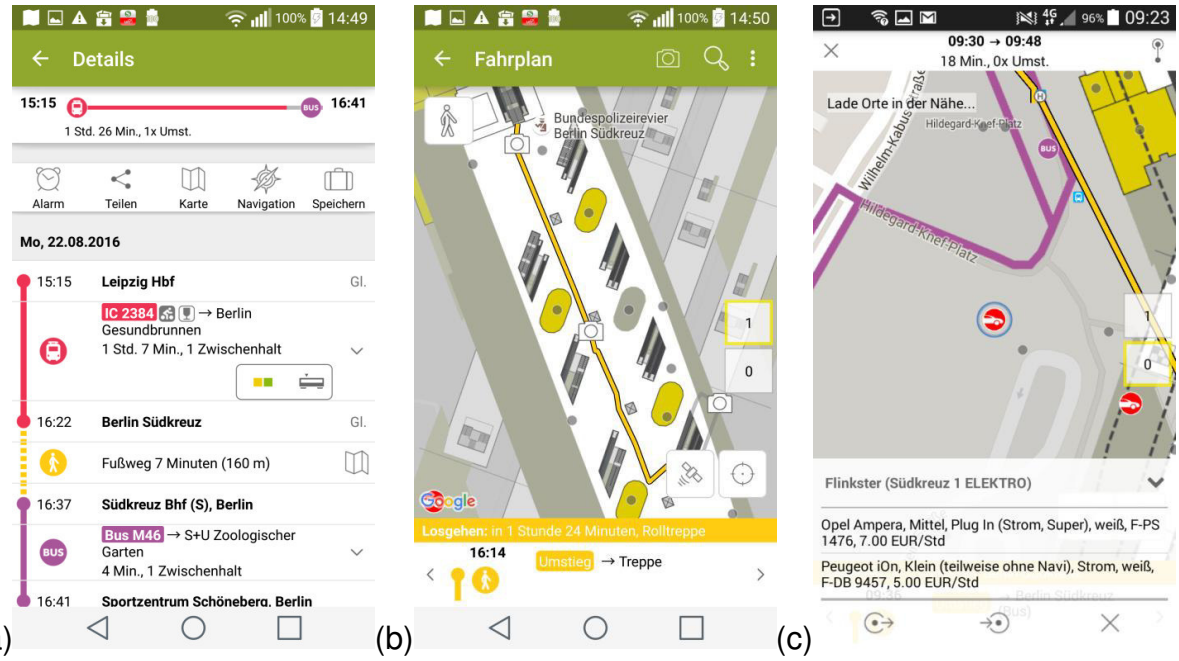
- Die Darstellung von Indoor-Routen zwischen POI im Bahnhof Südkreuz wurde erweitert und ist wahlweise auf der Karte oder als Abfolge von WorldInsight-Panoramaansichten (s. Abbildung 2 (b)) zugänglich.

Abbildung 1, Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen Screenshots aus den umgesetzten Android-Apps:



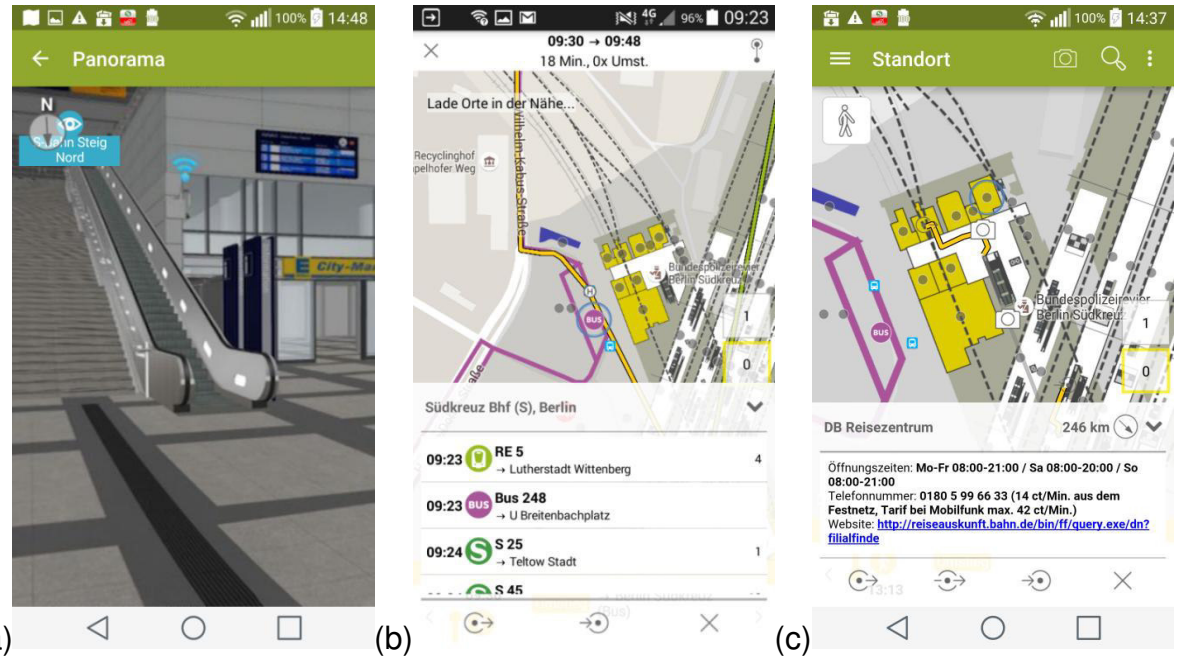
(a) (b) (c)

Abbildung 1:
Initiale Navigations-App für Berlin-Südkreuz,
(a), (b) Indoor-Routing zwischen POI mit unterschiedlichen Vorgaben zur Barrierefreiheit,
(c) Darstellung von Lageplänen / Routen / POI



(a) (b) (c)

Abbildung 2:
Intermodale Navigations-App für Berlin-Südkreuz,
(a) Integration in Verbindungsauskunft,
(b) Umsteigewege (Karte),
(c) Informationen mulitmodale Angebote



(a) (b) (c)

Abbildung 3:
Navigations-App für Berlin-Südkreuz:
(a) Umsteigewege (Panorama),
(b) nächste Abfahrten,
(c) Informationen zu Points of Interest

Die Navigation innerhalb des Bahnhofs wurde nicht als klassische Turn-by-Turn-Navigation implementiert. Dafür gab es folgende Gründe:

- Die Genauigkeit der Indoor-Ortung war nicht hoch genug, um mit hinreichender Zuverlässigkeit zu erkennen, ob der Nutzer sich auf der vorgegebenen Route befand bzw. ob ein Entscheidungspunkt erreicht wurde
- Durch die großen Freiflächen auf den Bahnsteigen und in den Bahnhofshallen existieren zwischen zwei Punkten im Bahnhof üblicherweise eine Vielzahl von Wegen, eine Abweichung von der beauskunfteten „Ideallinie“ sollte jedoch nicht zu einem Warnhinweis führen.

3. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Initiale Navigations-App für Berlin-Südkreuz, (a), (b) Indoor-Routing zwischen POI mit unterschiedlichen Vorgaben zur Barrierefreiheit, (c) Darstellung von Lageplänen / Routen / POI .... - 7 -

Abbildung 2: Intermodale Navigations-App für Berlin-Südkreuz, (a) Integration in Verbindungsauskunft, (b) Umsteigewege (Karte), (c) Informationen mulitmodale Angebote ..... - 8 -

Abbildung 3: Navigations-App für Berlin-Südkreuz: (a) Umsteigewege (Panorama), (b) nächste Abfahrten, (c) Informationen zu Points of Interest..... - 9 -

A.10 Abschlußbericht Fraunhofer Institut

Abschlussbericht
„IMS – Intermodale Mobilitätsstation“

Dokument Information

Projekt: Aufstockungsantrag IMS Intermodale Mobilitätsstation

Projektkurztitel: IMS Aufstockungsantrag

Arbeitspaket: AP 4.1, AP 4.2, AP 4.3 innerhalb des Arbeitspakets 4 der InnoZ

Version: 1.0

Datum: 08.09.2016

Autor(en):

Firma	Autor(en)	Kapitel
Fraunhofer IIS	Xenia Brouk, Tobias Stummer,	

Berichtsstatus:

Titel: Abschlussbericht „IMS – Intermodale Mobiliitätsstation“				
Bemerkungen:				
Version	Datum	Änderungsnotiz	Bearbeiter	Freigabe
1.0	01.07.16	Inital version	stt	

Fraunhofer IIS

Inhaltsübersicht

1. Aufgabenübersicht seitens IIS 3

2. Technische Entwicklungen und wissenschaftliche Ergebnisse seitens IIS 5

AP 4.1 Schaffen einer Infrastruktur für BLE Lokalisierung auf den Bahnsteigen 5

AP 4.2 Anbinden der Alcatel-Lucent WLAN Lokalisierung an awiloc 8

AP 4.3 Test und Demonstrator 14

Abschlussbericht des Aufstockungsantrags

„IMS - Intelligente Mobilitätsstation“

Vorhabensbezeichnung: Aufstockungsantrag IMS – Intelligente Mobilitätsstation

1. Aufgabenübersicht seitens IIS

Im Rahmen des IMS Unterauftrags wurden folgende Aufgaben an das Fraunhofer IIS gestellt:

- Realisierung einer Personenlokalisierung im Bahnhofsumfeld unter Zuhilfenahme mehrerer Positionsquellen und Stützinformationen. Als Testareal war hierbei das Berliner Bahnhofsgebäude Südkreuz definiert. Dazu sollte die am Bahnhof Südkreuz bereits installierte Bluetooth-LE (BLE) Infrastruktur der Firma favendo als Sensorquelle zur Positionsbestimmung mit dem am Fraunhofer IIS entwickelten Lokalisierungstechnologie awiloc® evaluiert werden.
- Neben der awiloc® WLAN und awiloc® BLE Lokalisierung sollte die WLAN Lokalisierungslösung der Firma Alcatel Lucent (ALUD) als weitere externe Positionsquelle in das awiloc® Positions-Framework eingebunden und zugänglich gemacht werden. Eine erste bereichsabhängige Umschaltung zwischen der awiloc® WLAN und ALUD-Lokalisierung sollte dabei ebenfalls realisiert und die daraus resultierende Position mit der verwendeten Lokalisierungstechnologie gekennzeichnet werden.
- Im weiteren Projektverlauf sollte neben der ALUD-Lokalisierung auch noch weitere Positionsquellen wie GPS und die awiloc® BLE Lokalisierung bereichsabhängig integriert und als Lokalisierungsbibliothek umgesetzt werden.
- Die Arbeiten sollten in einer Lokalisierungsbibliothek münden, welche eine Personenlokalisierung am Berliner Bahnhof Südkreuz durch eine bereichsabhängige

Positionstechnologieumschaltung ermöglicht und durch Projektpartner in einer Demonstrationsanwendung integriert wird.

2. Technische Entwicklungen und wissenschaftliche Ergebnisse seitens IIS

AP 4.1 Schaffen einer Infrastruktur für BLE Lokalisierung auf den Bahnsteigen

Im Projektverlauf wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde die bereits vor Ort installierte BLE Beacon Infrastruktur auf Tauglichkeit für die awiloc® BLE Lokalisierung getestet. Zum einen wurde die Ausbreitungscharakteristik der favendo Beacons am Fraunhofer IIS evaluiert, zum anderen wurde die Signalausbreitung im Bahnhofsgebäude und an den Gleisen mithilfe von Testtrails ausgewertet. Es wurde festgestellt, dass die Beacons mit einer sehr niedrigen Sendeleistung konfiguriert waren und das awiloc® System unter diesen Voraussetzungen kein optimales Ergebnis liefern kann. In Zusammenarbeit mit favendo wurde ein Kompromiss für die Sendeleistungseinstellung gefunden, welcher sowohl den Ansprüchen der favendo Lokalisierung als auch der IIS Lokalisierung genügte. Nachdem die Beacons umkonfiguriert wurden, wurde der komplette Bahnhof zweimal entlang der gängigen Einmesspfade vermessen und eine Datenbank für die Ortung generiert. Anschließend wurden die Signalausbreitungsbilder der vor Ort installierten Beacons ausgewertet und die awiloc® Lokalisierung getestet (siehe Abbildung 1). Beim Evaluieren der Daten wurde festgestellt, dass in den Treppenbereichen (Abgänge zu den Bahnsteigen) wenige bis keine BLE Beacons vorhanden sind. Diese sind jedoch u.a. für das rechtzeitige Erkennen ob der Nutzer sich auf dem Weg zum richtigen Bahnsteig befindet relevant. Es wurde über die Ausbringung weiterer Beacons in den Treppenabgängen mit favendo diskutiert.

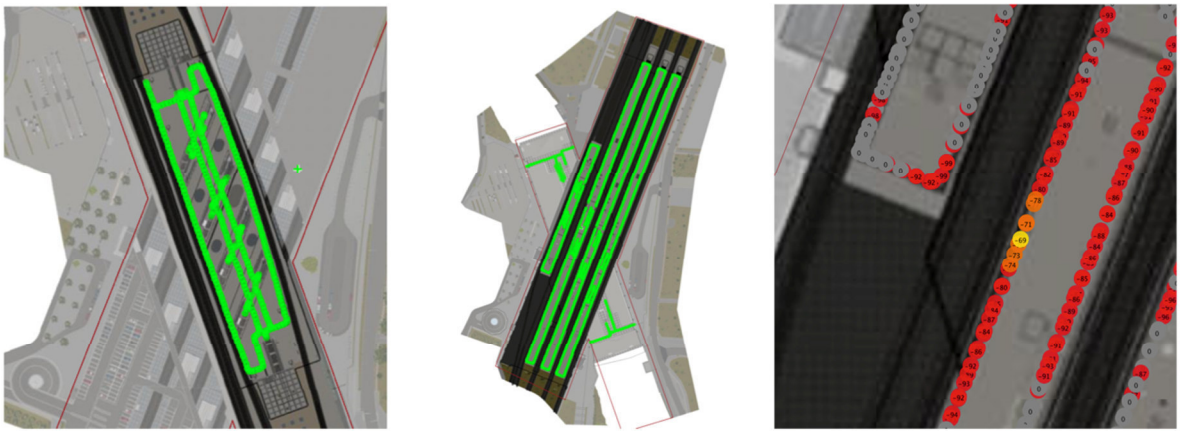


Abbildung 1: Messdaten der Beacon-Infrastrukturevaluierung

- Erweiterung des Umgebungsmodells um die für den Technologiewechsel benötigen Bereichsdefinitionen.

  Um die technologiebezogene Umschaltung zu realisieren, wurde das bereits für Berlin Südkreuz vorhandene Umgebungsmodell erweitert (siehe Abbildung 2). Es wurden Modellobjekte sowohl für Bereiche definiert, in denen ausschließlich eine bestimmte Technologie zur Verfügung stehen soll, als auch Modellobjekte für Bereiche definiert, in denen die Umschaltung zwischen den Technologien erfolgen soll. Solche überschneidenden Bereiche, in denen beide Technologien koexistieren, sind für eine reibungslose und unterbrechungsfreie Umschaltung zwischen den Technologien notwendig. Die Funktionsweise der Umschaltung wird im nachfolgenden Abschnitt ausführlich beschrieben.

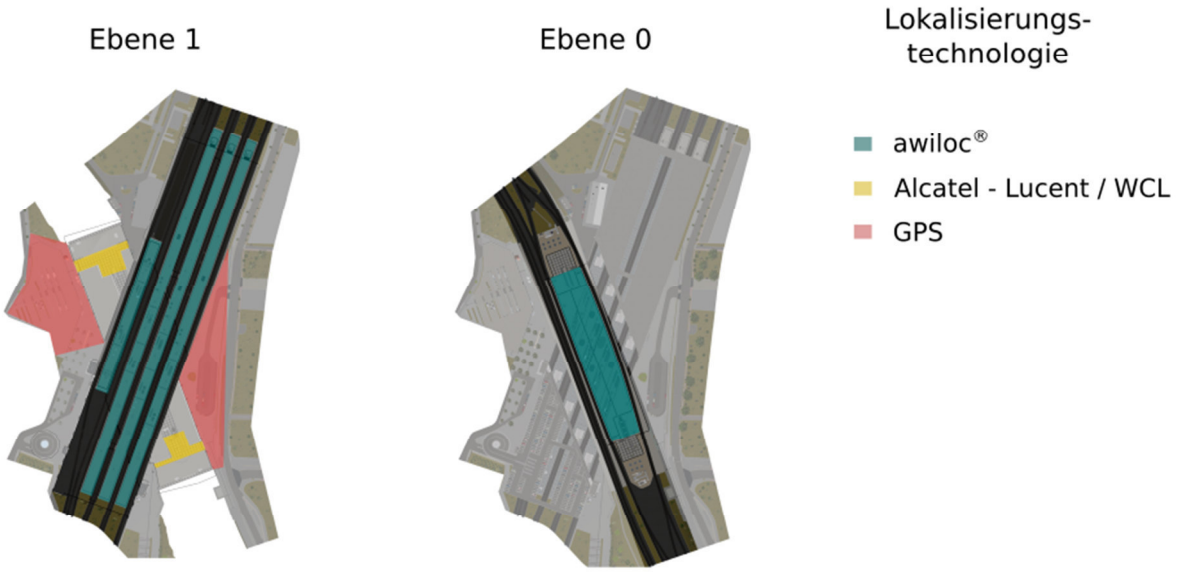


Abbildung 2: Lokalisierungstechnologiebereiche

AP 4.2 Anbinden der Alcatel-Lucent WLAN Lokalisierung an awiloc

Bereichsabhängiges Umschalten zwischen Lokalisierungstechnologien

Im Projektverlauf wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Für die Einbindung der ALUD Library ins awiloc® Positioning Framework musste seitens des awiloc® Frameworks eine neue Komponente, ein sog. Locator, geschaffen werden, welche über bestimmte festgelegte Schnittstellen verfügt und dem awiloc® Life-Cycle-Management folgt. Diese Komponente ist für das Steuern der ALUD-Library zuständig. Die Schnittstellen des Locators beinhalten unter anderem Methoden zum Starten/Stoppen, zur Abfrage einer Position in unterschiedlichen Datenformaten (WGS84, lokales metrische Koordinatensystem, UTM), sowie Methoden zur Registrierung auf Positions-Updates. Alle im awiloc® Framework existierende Locator müssen diese Schnittstellen implementieren und das Life-Cycle-Management unterstützen. Somit können unterschiedlichen Locator per Konfiguration aktiviert werden, als auch komplexere Vorgänge wie das bereichsabhängige Umschalten umgesetzt werden. Die neue Komponente (sog. ALUD Locator) wurde vor Ort in Berlin getestet und somit die Integration der ALUD Library erfolgreich evaluiert.

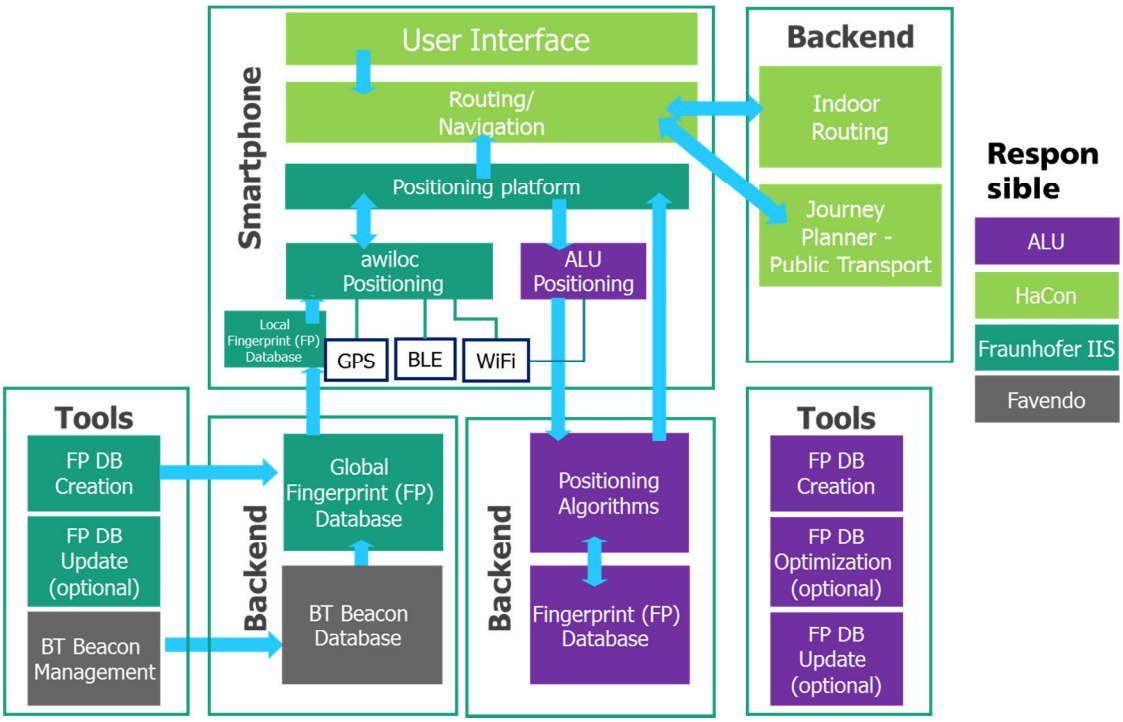


Abbildung 3: Gesamtüberblick der Architektur

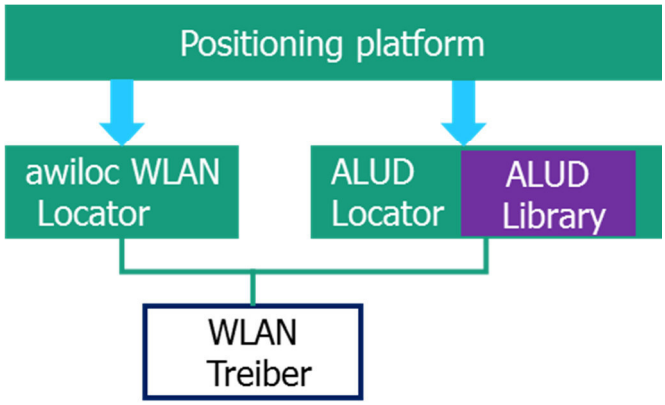


Abbildung 4: Einbindung des ALUD Locators in awiloc®Positioning Framework

- awiloc® Positioning Platform, Integration der Alcatel Lucent WLAN-Lokalisierung:

  Die Zwischenversion der awiloc® Positioning Platform, siehe Abbildung 4, realisiert die bereichsabhängige Umschaltung zwischen den Technologien ALUD WLAN und awiloc® -WLAN. Beim Starten der Positioning Platform wird

eine Grobposition als aktueller Aufenthaltsort bestimmt. Dies übernimmt die den beiden Locator übergeordnete Steuerungskomponente, welche ebenfalls als Locator umgesetzt wurde. Die Grobbestimmung des Aufenthaltsortes kann mit einem einfachen Verfahren wie Cell-of-Origin oder mit WCL erfolgen. Aktuell ist eine WCL-Version umgesetzt. Nachdem der aktuelle Aufenthaltsort bestimmt wurde, wird der für den Bereich definierter Locator gestartet. Die Positionen werden von der Steuerungskomponente evaluiert. Sobald die Position eine definierte Zeit im Übergangsbereich (im aktuellen Fall die Treppen von den Eingangshallen zu Ringbahnsteig) liegt, wird der für den benachbarten Bereich definierte Locator gestartet. Liefert der Locator eine Position, so schaltet die Steuerungskomponente auf diesen Locator als Haupt-Locator um, d.h. es wird die Position von diesem Locator nach außen durch-gegeben.

Zur Unterscheidung der einzelnen Technologien wurde die Positionspunktfarbe in der Applikation abhängig von dem positionsliefernden Locator eingefärbt („blau" für den ALUD-Lokalisierung und „grün" für den awiloc®-WLAN-Lokalisierung), siehe Abbildung 5.

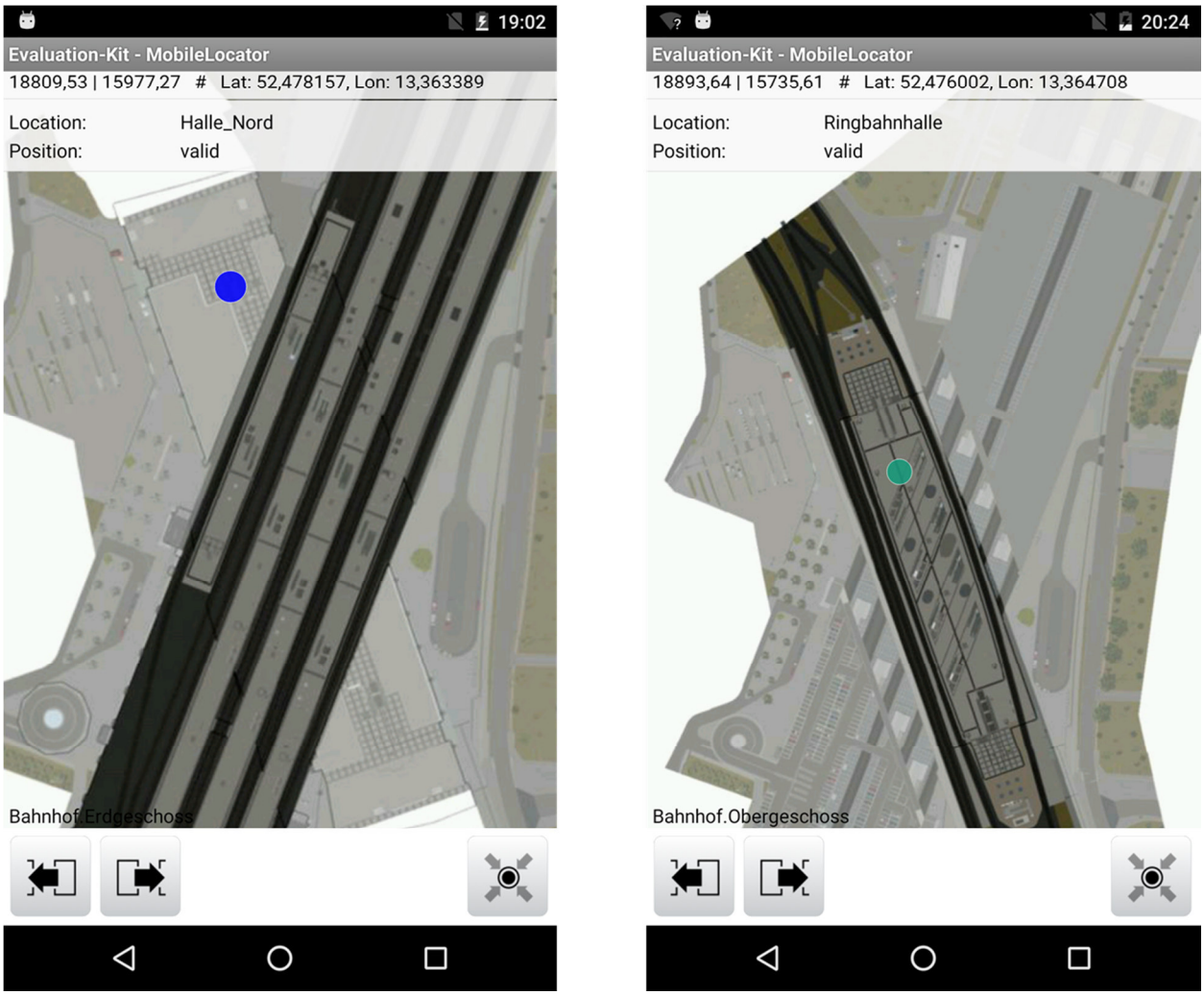


Abbildung 5: Linkes Bild - ALUD Position in der Halle Nord, rechtes Bild - awiloc Position auf dem Ringbahnsteig

- Durchführung von Testläufen zur experimentellen Bestimmung der Umschaltparameter vor Ort:
  Es wurden vor Ort Tests durchgeführt, um die Steuerungskomponente in ihren Bereichsgrößen und Umschaltkriterien fein zu justieren. Dabei wurden sowohl Testaufnahmen für nachträgliche Justierungsmöglichkeiten, als auch direkte Anpassungen vor Ort durchgeführt.

- awiloc® Positioning Platform, Austausch der ALUD-Lokalisierung:

Durch das Abschalten der Serverkomponente der Alcatel-Lucent WLAN Lokalisierung wurde eine einfache Ersatzlokalisierungskomponente mit ähnlicher Lokalisierungstechnologie, der Weighted Centroid Localization (WCL) geschaffen. Der WCL-Lokalisierung wurden dieselben Bereiche (Eingang Nord und Eingang Süd) zugewiesen.

Die WCL-Lokalisierung ist eine gängige Variante der signalbasierten Ortung. Zur Berechnung der Position werden wie auch im vom Fraunhofer-IIS entwickelten Fingerprinting Verfahren die Signalstärken der aktuell empfangenen Sender herangezogen. Zusätzlich wird die Position aller Sender benötigt. Auf Basis der Signalstärkenunterschiede der Sender wird anschließend die Position des Empfangsgerätes durch eine Gewichtete Positionsmittelung über alle empfangenen Sender berechnet. Zur Optimierung kann hierbei noch eine Filterung der empfangenen Senderpositionen konfiguriert werden um besonders starke oder schwache Sender sowie Sender mit einer für das Verfahren ungünstigen gerichteten Abstrahlwirkung aus der Berechnung auszuklammern. Die Lokalisierungskomponente wurde anhand der in vorherigen Vor-Ort Messungen aufgenommenen Testmessungen kalibriert und für die Positionsbestimmung hinderliche Sender identifiziert und in eine Filterkomponente mittels Konfigurationsparameter eingetragen. In einem Vor-Ort-Termin wurde die Lokalisierung getestet und weiter optimiert.

- awiloc® Positioning Platform, Integration einer GPS-Lokalisierung:
  Im Zuge des Arbeitspakets 1.2 wurden die beiden Lokalisierungstechnologien awiloc® sowie die neu entwickelte WCL-Lokalisierung um eine GPS basierte Lokalisierungskomponente erweitert. Diese dient zur Lokalisierung in den Außenbereichen im Norden und Süden des Bahnhofs. Wie schon die anderen Lokalisierungskomponenten zuvor wurde die GPS-Lokalisierung anhand bereits aufgenommener Testmessungen kalibriert, die beiden Außenbereiche im Norden und

Süden in die bereichsabhängige Umschaltung integriert und in einem anschließendem Vor-Ort-Test getestet und optimiert.

- awiloc® Positioning Platform, bereichsabhängige Optimierung der Referenzdaten: Durch eine mehrstufige Einschränkung des Aufenthaltsortes konnte die awiloc®-Lokalisierung gerade im Bereich der Fernverkehrsgleise der unteren Ebene deutlich verbessert werden. Teile der bereichsabhängigen Umschaltung wurden hierbei zur Eingrenzung des Bahnsteigs herangezogen. Dadurch konnten temporäre Wechsel zwischen durch Gleise getrennte Bahnsteige weitestgehend vermieden werden und im überwiegenden Bereich neben der Auflösung des Bahnsteigabschnittes auch eine Seitenauflösung der Gleise eines Bahnsteigs erzielt werden.

AP 4.3 Test und Demonstrator

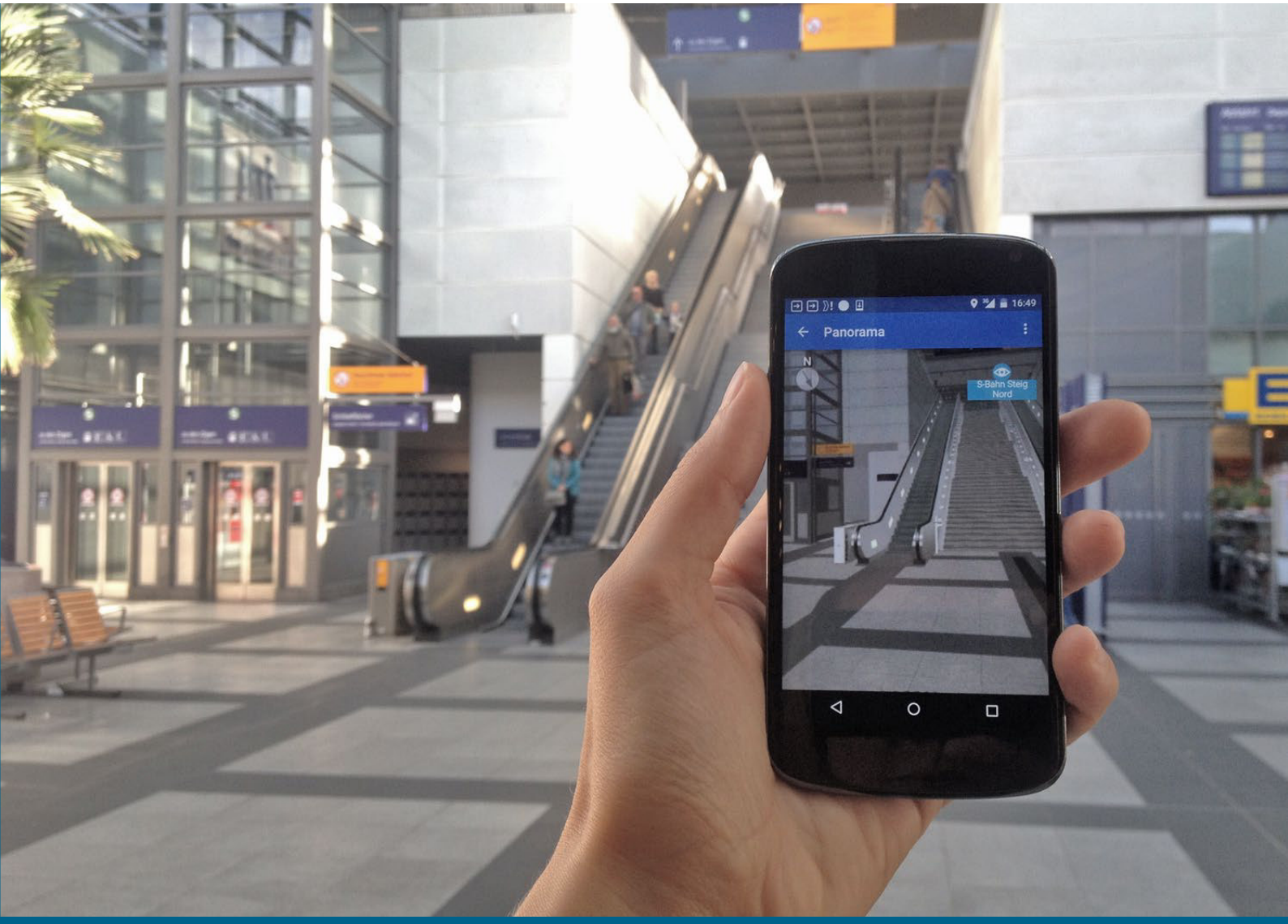
Im Projektverlauf wurden folgende Arbeiten durchgeführt

- Erstellung und Bereitstellung einer Lokalisierungsbibliothek incl. Schnittstellen:
  Die Lokalisierungskomponenten awiloc® -Lokalisierung, WCL-Lokalisierung und GPS-Lokalisierung wurden mittels einer Steuerungskomponente zusammengefasst, welche ebenfalls als sog. Locator für das beschriebene Lokalisierungsframework entwickelt und eingegliedert wurde. Als Schnittstelle für den Nutzer der Lokalisierungsbibliothek wurde weitestgehend auf die bestehenden Registrierungsschnittstellen auf Positionsupdates des Lokalisierungsframeworks zurückgegriffen. Um die verwendete Lokalisierungstechnologie für den Nutzer erkennbar zu machen wurde die Schnittstelle um die Quellinformation des erzeugenden Lokalisierungsverfahrens erweitert.
  Die Schnittstellendefinition wurde den Projektpartnern für die Anbindung an Ihre Lokalisierungsanwendung in einer Auslieferung mitgeteilt, welche die Lokalisierungs-bibliothek darauf aufsetzend erfolgreich in Ihre Demoanwendung einbinden konnten.

- Abschließender Vor-Ort-Test der Lokalisierungsbibliothek:
  Die Lokalisierungsbibliothek wurde in eine eigene Testanwendung integriert und bei einem Vor-Ort-Test verifiziert. Dabei wurden erneut Testmessungen für weitere Verfeinerungen der Lokalisierung aufgenommen und im Nachgang letzte Optimierungen der Konfiguration der Lokalisierungsbibliothek vorgenommen. Die Anpassungen wurden wiederum an die Projektpartner zum Einpflegen in Ihre Demoanwendung gegeben.

A.11 Whitepaper des AK Indoor-Navigation

Innovationszentrum für Mobilität
und gesellschaftlichen Wandel



Indoor-Navigation

Whitepaper zur Sicherstellung der Interoperabilität und Empfehlungen zur Visualisierung einer Indoor-Navigation

Ergebnisse des Arbeitskreises „Indoor-Navigation“
am InnoZ (2012 – 2015)

Dezember 2015

Detlef Hartmann, Marc Schelewsky, Klaus Wuenstel, Lena Damrau,
Vlado Handziski, Bernhard Müller-Beßler, Manuel Friedrich

Indoor-Navigation

Whitepaper zur Sicherstellung der Interoperabilität und
Empfehlungen zur Visualisierung einer Indoor-Navigation

Ergebnisse des Arbeitskreises „Indoor-Navigation“
am InnoZ (2012 – 2015)

Dezember 2015

Detlef Hartmann, Marc Schelewsky, Klaus Wuenstel, Lena Damrau,
Vlado Handziski, Bernhard Müller-Beßler, Manuel Friedrich

Vorwort

Als am 30. Mai 2012 der Arbeitskreis „Indoor-Navigation" seine Arbeit aufnahm, gab es nur wenige Praxisbeispiele, in denen eine Indoor-Navigation praktisch erprobt wurde. Für den öffentlichen Verkehr spielte das Thema nur eine untergeordnete Rolle. Entsprechend blieb auch die Anforderung interoperabler Lösungen sowohl in Forschungsprojekten als auch auf Konferenzen ein blinder Fleck. Der Frage nachgehend, wie denn eine z.B. Navigation für Bahnhofsgebäude gestaltet werden könnte, eröffnete sich auch der Blick auf Ansätze, die die unterschiedlichen Verfahren und Vorgehensweisen im Bereich der Indoor-Lokalisierung und -Navigation stärker aufeinander beziehen.

So wurde bereits in der zweiten Sitzung am 25. Juni 2013 die Schwerpunktsetzung stärker auf den Nutzer bzw. Anwender einer Indoor-Navigation bezogen. Weniger die technischen Verfahren zur Steigerung der Ortungsgenauigkeit standen im Mittelpunkt der Diskussion des Arbeitskreises, vielmehr wurden mögliche Ansätze und Konzepte entworfen, die geeignet schienen, die Systeme interoperabel zu gestalten. Aber was bedeutet Interoperabilität der Indoor-Navigation? Salopp formuliert: Für Nutzer bedeutet Interoperabilität einen Zugewinn an Komfort. Eine App sollte überall funktionieren, egal ob ich mich am Hauptbahnhof in München, am Bahnhof Hamburg-Harburg oder Berlin Südkreuz befinde. Ziel sollte es sein, den Zugang zu den Informationen über einen Kanal zu ermöglichen. Damit war der erste Schwerpunkt gefunden, dem sich der Arbeitskreis in den weiteren Sitzungen widmete.

Doch noch ein zweiter Aspekt muss beachtet werden, denn Informationen sind nur dann nützlich, wenn sie auch ohne größere Aufwände vom Nutzer verstanden werden. Die Anforderung richtet sich an die geeignete Form der Visualisierung der Indoor-Navigation. Gerade für komplexe Gebäude mit mehreren Ebenen bestehen große Herausforderungen dreidimensionale Gebäude auf zwei Dimensionen von Smartphones oder Tablets zu projizieren. Denkt man an den Berliner Hauptbahnhof, so wird diese Herausforderung schnell deutlich. Menschen, die den Bahnhof das erste Mal betreten sind von dem Gebäude zunächst beeindruckt, dann macht sich aber schnell Ratlosigkeit breit, wie man sich in diesem verschachtelten Gebäude orientieren soll. Neben den beiden Hauptebenen für Bahnverkehr gibt es drei weitere Ebenen, die Zugang zu Ladengeschäften bieten und als Verbindungsebenen dienen. Damit werden die Wege innerhalb des Bahnhofs höchst komplex und in einer schematischen Darstellung schwer zu vermitteln. Welche Ansätze hier zielführend sind, war der zweite Schwerpunkt, dem sich der Arbeitskreis widmete.

Die Ergebnisse der Diskussion um diese beiden Arbeitsschwerpunkte sind in dem vorliegenden Whitepaper zusammengefasst dargestellt. Ziel ist es, die Ergebnisse für weitere Diskussionen zur Verfügung zu stellen, die Bedeutung der identifizierten Schwerpunktthemen zu verdeutlichen und einige Anregungen und Empfehlungen zu geben, wie denn eine Lösung für die beschriebenen Anforderungen aussehen könnte. Dabei ist es der Natur eines Arbeitskreises geschuldet, dass die Ergebnisse nur einen Zwischenschritt darstellen können. Natürlich gibt es andere Ansätze, die ebenso diskutiert werden können und genauso ist den Autoren bewusst, dass die formulierten Gedanken unvollständig sind.

Nichtsdestotrotz will dieses Papier einen Anstoß geben, um das Thema Indoor-Navigation als eine der wenigen Leerstellen von Auskunftssystemen des öffentlichen Verkehrs im Sinne deren Nutzer zu bearbeiten und gleichzeitig einen Beitrag leisten, um eine vollständige Informationskette von Tür-zu-Tür zu realisieren.

An dieser Stelle gilt es noch meinen Dank an alle Teilnehmer des Arbeitskreises Indoor-Navigation auszusprechen, insbesondere gegenüber den Referenten und Inputgebern, die auf den letzten sechs Sitzungen mit Ihren Vorträgen die Diskussionen inhaltlich bereichert und geprägt haben. Dies trug wesentlich zum Erfolg des Arbeitskreises bei. Auch gilt mein Dank der Unterstützung der Berlin Partner für Wirtschaft und Technologie GmbH für die sehr gute inhaltliche, partnerschaftliche und kooperative Zusammenarbeit. Schließlich richtet sich mein Dank auch an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (vormals BM für Wirtschaft und Technologie), auf dessen Zuspruch der Arbeitskreis als Querschnittsinitiative im Rahmen der Tür-zu-Tür-Ausschreibung 2012 entstanden ist sowie dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (vormals BM für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung), für die Unterstützung im Rahmen des Schaufensterprojekts Berlin-Brandenburg.

Marc Schelewsky
Berlin, Dezember 2015

Interoperabilität

1 Einführung und Klassifizierung

Die **Interoperabilität von Lösungen zur Indoor-Navigation** hat sich im Laufe des AKs schnell als wichtiges Thema besonders für die Usability herausgestellt. Das nahtlose Ineinandergreifen unterschiedlicher, vereinzelter Lösungen, ohne dass der Nutzer dies bemerkt oder gar aktiv steuern müsste, ist besonders im Hinblick auf die Marktfähigkeit gegenüber den großen Anbietern von Navigationsanwendungen für mobile Endgeräte unabdingbar.

2 Vier Dimensionen der Interoperabilität

Interoperabilität wird verstanden als die umfassende Nutzbarmachung einer Indoor-Navigationslösung, die

» in unterschiedlichen Gebäuden,
» mit divergierenden technischen Ansätzen zur Lokalisierung,
» mit verschiedenen Endgeräte/Betriebssystemen

nutzbar ist. Damit werden gleichzeitig wesentliche Dimensionen der Interoperabilität benannt, die bei einem vollständig interoperablen Ansatz berücksichtigt werden müssen:

» Interoperabilität zwischen verschiedenen **Lokalisierungstechnologien**,
» Interoperabilität zwischen verschiedenen **Objekten**,
» Interoperabilität zwischen verschiedenen **Anbietern von Indoor-Navigationslösungen** und
» Interoperabilität zwischen verschiedenen **Smartphone-Betriebssystemen**

Die Dimensionen der Interoperabilität wurden für die Domäne Bahnhof diskutiert, sie sind jedoch auch auf andere Use Cases/Domänen übertragbar. Im Fokus steht dabei der Nutzer mit seinem Orientierungsbedürfnis in komplexen Gebäuden. Dabei sollte an unterschiedlichen Bahnhöfen ohne weiteres Zutun der Dienst „Indoor-Navigation" nutzbar sein, also ohne Angabe des genauen Bahnhofsnamens oder des Aufenthaltsorts. Ebenso sollte keine Eingabe erforderlich sein „Ortung mit WLAN" oder „Ortung mit BLE". Diese lokalen Gegebenheiten sollen automatisch ermittelt und im Hintergrund ebenfalls automatisch umgesetzt werden. Im Folgenden werden die erforderlichen Prozesse genauer diskutiert.

2.1 Interoperabilität zwischen verschiedenen Technologien

Ziel der Sicherstellung interoperabler Technologien ist die Integration und Nutzbarmachung unterschiedlicher Ortungstechnologien wie z.B. zwischen WLAN und Bluetooth Low Energy (BLE), je nachdem, für welche Lokalisierungssensorik ein Objekt ausgelegt ist bzw. eine entsprechende Lokalisierungsdatenbank verfügbar ist. Dabei ist zu beachten, dass auch innerhalb eines Gebäudes unterschiedlicher Technologien zur Anwendung kommen können. Eine automatische Anpassung an lokale Gegebenheiten kann einen Wechsel zwischen verschiedenen Lokalisierungstechnologien erforderlichen machen, also ein smartphone-

seitiges Umschalten zwischen den entsprechenden Sensoren für die Lokalisierung. Es sind unterschiedliche Ansätze vorstellbar, wie dieses „Umschalten“ betriebssystem-spezifisch umgesetzt werden kann. Theoretisch könnten die Sensoren auch parallel abgefragt werden, dies hätte jedoch einen sehr hohen Stromverbrauch zur Folge und würde insbesondere auch mit steigender Zahl der Use Cases sehr intelligente Algorithmen erfordern, die die Datenmenge in Echtzeit auswerten können. Zudem ist als Sonderfall der Übergang von „Outdoor“ zu „Indoor“ zu behandeln, der besondere Implikationen für das zu verwendende Kartenmaterial aufweist.

Die Umschaltung zwischen verschiedenen Indoor-Ortungsverfahren kann anhand der Signalstärke der jeweiligen Funktechnologie ausgelöst werden oder an einen bestimmten Ort bzw. einen Bereich gekoppelt sein. Generell ist eine gewisse räumliche Überlappung der Technologien wünschenswert, um ein nahtloses Umschalten zu ermöglichen. Alternativ könnte auch eine Bewegungsprädiktion angewandt werden, um Wahrscheinlichkeiten für den Übergang zu berechnen und ggf. intelligente Übergänge basierend auf u.a. Nutzerverhalten bereitzuhalten. Insgesamt ist aus User-Sicht die Umsetzung einer seamless-Erfahrung wünschenswert, d.h. die Übergänge zwischen einzelnen Technologien sollten ohne aktives Zutun der Nutzer erfolgen. Dabei sind auch Optionen jenseits von funkbasierten Lösungen möglich.

Der Übergang von GPS zu WLAN oder BLE entspricht dem Use Case des Übergangs vom Outdoor-Bereich zum Indoor-Bereich. Der Wechsel der Lokalisierungstechnologie ist erforderlich, da in geschlossenen Gebäuden ohne zusätzliche technische Ausstattung kein verlässlicher GPS-Empfang möglich ist. Zusätzlich zum Wechsel der Ortungstechnologie wird zudem ein Wechsel des Kartenmaterials erforderlich, da Gebäudepläne so gut wie gar nicht in gängige Karten-Darstellung wie OSM oder Google-Maps integriert sind. Ein Grund dafür ist die schwer umzusetzende Berücksichtigung der verschiedenen Gebäudeebenen in einer zweidimensionalen Karte. Beim Anschluss oder der Integration von Gebäudeplänen ist auf deren genaue Georeferenzierung zu achten, da es bei der Übergabe sonst zu Sprüngen in der Kartendarstellung kommen kann.

Für die Umschaltung zwischen Outdoor- und Indoor-Navigation kann auf die Daten der Inertialsensorik zurückgegriffen werden. Diese ist unter anderem in der Lage, die Schrittgeschwindigkeit zu bestimmen, die beim Eintreten in ein Gebäude meist abnimmt. Auch andere Verfahren, wie z.B. die Nutzung von BLE Beacons, die an Eingängen von Gebäuden installiert werden, sind denkbar. Des Weiteren könnte bei zunehmender GPS-Drift oder bei zunehmender Helligkeit umgeschaltet werden. Der zweite Ansatz ist dabei jedoch abhängig von der Tageszeit. Da die einzelnen Indikatoren alle fehleranfällig sind, ist ein Kombinieren der Umschaltkriterien sinnvoll. Hier gilt es sinnvolle Ansätze zu entwickeln, die über die Einflussfaktoren der Technologien deren Integrität misst und dem Device zur Verfügung stellt. Damit kann die Verlässlichkeit – auch bei einer Kombination von Umschaltkriterien – weiter erhöht werden.

Im Abschnitt 4.2 „Referenzarchitektur“ werden unter 4.2.2.4 „Operation & Maintenance“ Ansätze vorgestellt, wie dieses Umschalten betriebssystemseitig umzusetzen ist. Eine genauere Spezifikation kann an dieser Stelle jedoch nicht vorgenommen werden.

2.2 Interoperabilität zwischen verschiedenen Objekten

Die Anwendbarkeit einer Indoor-Navigationslösung in unterschiedlichen Objekten ist zentral, um eine hohe Nutzerzufriedenheit zu gewährleisten. Betrachtet man das Beispiel Indoor-Navigation in Bahnhöfen (der 1. und 2. Kategorie), wird die Bedeutung dieser Anforderung deutlich. Derzeit gibt es 21 Bahnhöfe der 1. und 82 Bahnhöfe der 2. Kategorie. Zur 2. Kategorie gehören u.a. auch Bahnhöfe mit über 100.000 täglich reisenden Personen und bis zu 16 (Hauptbahnhof Chemnitz) unterschiedlichen Gleisen. Eine Indoor-Navigation würde Fahrgästen auch für diese Bahnhöfe eine hilfreiche Unterstützung bieten. Die Umsetzung

einer fokussierten Bahnhofs-App für jeden einzelnen dieser in Summe 103 Bahnhöfe würde den Nutzern nicht mehr vermittelbar sein. D.h. es muss sichergestellt werden, dass die lokalen Lokalisierungslösungen interoperabel gestaltet werden, sodass mit einer App der Dienst für alle Bahnhöfe potenziell möglich wird.

Eine technische Realisierung könnte auf Basis der empfangenen MAC-Adressen oder BLE-IDs der WLAN- bzw. BLE-Hotspots mit einem zentralen Auskunftsserver geschehen. Dieser Auskunftsserver würde für jeden Hotspot eine Datenbankabfrage starten und eine Information zurückspielen, in welchem Bahnhof sich der Nutzer gerade befindet. Mit dieser Information könnte dann der entsprechende Lokalisierungsvorgang auf Grundlage der vor Ort verfügbaren Lokalisierungstechnologie angestoßen werden. Alternativ bietet sich an, über GPS eine Lokalisierung vorzunehmen und auf dieser Basis zu ermitteln, in welche Stadt und vor welchem Gebäude sich eine Person befindet. Mit dieser Information ließen sich die weiteren erforderlichen Prozesse anstoßen: Welche Ortungstechnologie wird in diesem Gebäude verwendet? Welche Adresse besitzt der entsprechende Server mit der Lokalisierungsdatenbank? Erforderlich ist dazu eine Metadatenbank, über die bei entsprechender Identifikation eines Gebäudes alle weiteren Informationen abgerufen werden können. In einem zweiten Schritt müssen dann auf dem Smartphone entsprechende Prozesse ausgelöst werden (Anschalten von WLAN bzw. BLE, Aufbau Internetverbindung mit entsprechendem Server, Austausch von Daten usw.)

2.3 Interoperabilität zwischen verschiedenen Anbietern von Indoor-Navigationslösungen

In großen Gebäuden oder Gebäudekomplexen besteht die Möglichkeit, dass unterschiedliche Anbieter Lösungen für Teilbereiche zur Verfügung stellen. Der Übergang zwischen den Bereichen sollte vor den Nutzern verborgen werden. Um dies zu erreichen, muss er vollkommen automatisiert sein, was wiederum eine sehr gute Abstimmung der einzelnen Lösungen voraussetzt. Die Anbieter sind in der technischen Umsetzung ihrer Navigationslösung recht frei, solange eine gemeinsame Schnittstelle zur Visualisierungskomponente genutzt wird und es ein eindeutiges Kriterium für die Auswahl des Anbieters gibt. Dabei gilt es zu beachten, dass nicht jede Ortungstechnologie auf absoluten Koordination (latitude, longitute, altitude) basiert, sondern Bezug auf verschiedene Objekte nehmen und die Ortung über die Nähe zu diesen Objekten vornehmen. Diese Objekte sind jedoch semantisch kodiert, wobei diese Kodierung nicht einheitlich erfolgt (Gleis, Bahnsteig, Abschnitt). Hier wäre eine einheitliche Kodierung von Objekten wünschenswert. Ansätze in dieser Richtung sind derzeit jedoch nicht bekannt.

2.4 Interoperabilität zwischen verschiedenen Smartphone-Betriebssystemen

Um den gesamten Markt abdecken zu können ist eine Bereitstellung von Lösungen für alle großen Smartphone-Betriebssysteme nötig. Im Hinblick auf die Visualisierung wäre es wünschenswert, einerseits ein einheitliches Erscheinungsbild der Navigationsanwendung zu erhalten, diese jedoch andererseits auch an die dem Betriebssystem eigenen Gestaltungsrichtlinien anzupassen. Allerdings lassen sich derzeit bei iOS-Systemen bestimmte erforderliche Kennwerte nicht auslesen und weiternutzen (z.B. die Feldstärke der sichtbaren WLAN-Netze). Damit sind bestimmte Lokalisierungslösungen für iOS prinzipiell ausgeschlossen, was eine betriebssystemübergreifende Umsetzung interoperabler Ansätze derzeit nur eingeschränkt möglich ist. Im Folgenden wird deshalb eine „offene" Lösung diskutiert, die derartige Restriktionen unberücksichtigt lässt.

3 Anforderungen

Aus den Beschreibungen der verschiedenen Dimensionen der Interoperabilität ergeben sich folgende Anforderungen an Indoor-Navigations-Lösungen:

» Eine genaue Georeferenzierung des Kartenmaterials
» Eine gemeinsame Schnittstelle zum Frontend für unterschiedliche Navigationslösungen
» Eindeutige Entscheidungskriterien für das Umschalten zwischen verschiedenen Navigationslösungen oder Technologien
» Das Aufsetzen und der Betrieb eine Metadatenbank mit Informationen zu den Adressen von Lokalisierungsservern und Datenbanken für bestimmte Gebäude

4 Referenzmodell

Indoor-Navigation beschränkt sich heute nicht mehr nur auf die klassische Navigation, d.h. das „Routen" eines Nutzers von einem Startort zum Zielort. Vielmehr ist eine Vielzahl von Diensten vorstellbar, die Standortinformationen benötigt, um dem Nutzer Dienstleistungen aller Art anbieten zu können (z.B. sicheres, automatisches Anmelden zu Diensten abhängig vom Ort, Information des Nutzers: aktuelle Fahrpläne, „Points of Interests" (POI) etc.). Im Mobilfunk wird schon seit längerem hierfür der Begriff „Location Based Services" (LBS) genutzt. Wir werden diesen Begriff daher auch im Folgenden, neben dem Begriff Indoor-Navigation, verwenden.

Um die technischen Aspekte der o.g. Interoperabilitätsanforderungen genauer funktionell beschreiben und einzelnen Komponenten der Indoor-Navigations-Lösung zuordnen zu können, schlagen wir hier die Einführung eines Referenzmodells vor. Ein solches Modell muss generisch anwendbar auf viele Indoor-Navigations-Lösungen und -Technologien sein. Es kann aber auch leicht konkreteren Anforderungen angepasst bzw. erweitert werden. Das Modell kann damit sowohl spezielle Lösungen beschreiben als auch als Architektur für die Entwicklung neuer Lösungen betrachtet werden.

Abbildung 1 zeigt eine solche Modellstruktur, die wir im Folgenden näher erläutern werden. Empfehlenswert ist ebenfalls, unser vorgeschlagenes Modell mit der „Architektur interoperabler Informationssysteme (AIOS)" zu vergleichen und dieser bei Bedarf anzupassen. *[Jörg Ziemann Architecture of Interoperable Information Systems - An enterprise Model-based Approach for Describing and Enacting Collaborative Business Processes, Erich Schmidt Verlag, ISBN: 978-3832524142]*

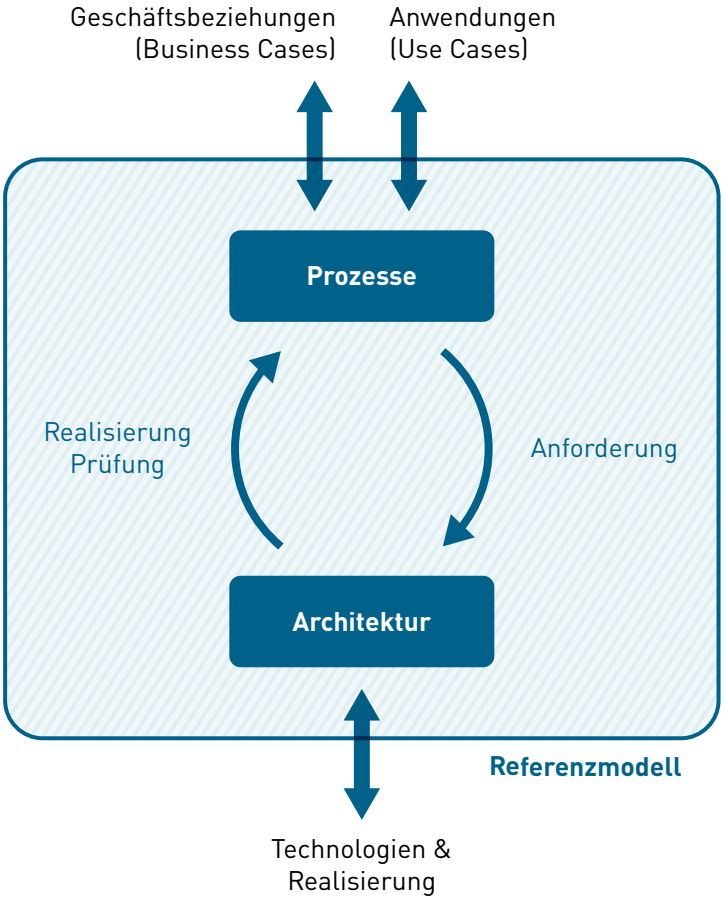


Abbildung 1: Referenzmodell-Überblick

Natürlich können wir im Rahmen dieses Aufsatzes ein solches Modell nicht bis in die Details spezifizieren – dieses muss im Rahmen einer wissenschaftlichen oder/und Entwicklungs-Arbeit erfolgen. Wir möchten hier zur Systematik des Themas beitragen und Ideen und Anregungen geben, die einen Einstieg in die Problematik bietet, die Komplexität des Themas darstellt und erste generische Lösungsansätze aufzeigt.

An dieser Stelle weisen wir darauf hin, dass unser Referenzmodell alle genannten Interoperabilitäts-Dimensionen unterstützen soll (diverse Technologien, LBS-Lösungen, Objekte und Betriebssysteme).

Das Prozessmodell beschreibt das Verhalten des Systems unter Berücksichtigung der Use-Cases und Geschäftsbeziehungen. Es ermöglicht so eine Beschreibung der dynamischen Abläufe in und zwischen den funktionellen Einheiten, die in der Referenzarchitektur definiert werden. Die Referenz-Architektur beschreibt die Systemkomponenten, ihre Schnittstellen untereinander, sowie die zugehörigen Datenmodelle, die für eine Umsetzung der Prozesse notwendig sind.

Die Architektur baut wiederum auf verschiedenen Technologien auf. Das beinhaltet Navigationsalgorithmen, physikalische Grundlagen, Sensorik, Visualisierung und Nutzerinterfaces, Datenübertragung und -verarbeitung, Sicherheitsaspekte, Betriebssysteme und Hardware. Die Architektur sollte in der Lage sein, auch zukünftige Technologien mit geringem Anpassungsaufwand einbinden zu können.

4.1 Prozesse

Die Prozesse geben eine formalisierte Beschreibung des LBS-Systemverhaltens unter Berücksichtigung verschiedener Anwendungen und Geschäftsbeziehungen wieder. Die Prozessspezifikation ermöglicht so eine Beschreibung der dynamischen Abläufe und definiert damit die Anforderungen an die Referenzarchitektur auch bezüglich interoperabler Nutzung des Systems.

Die Referenz-Architektur beschreibt die Systemkomponenten, ihre Schnittstellen untereinander sowie die zugehörigen Datenmodelle, die für eine Umsetzung der Prozesse notwendig sind. Wir können hier zwei grundsätzliche Prozesstypen unterscheiden: Entwicklungs- und Laufzeitprozesse.

Unter Entwicklungsprozessen verstehen wir hier Entscheidungen, die das Systemverhalten im Sinne einer Prozessdefinition beeinflussen, aber schon zur Entwicklungszeit festgelegt werden (z.B. Verwendung und Lizensierung von Datenbanken mit Informationen zu Objekten, Festlegung von Positionsdaten und Positionierungsverfahren, Karten und Nutzerdiensten etc.).

Laufzeitprozesse sind dynamische Verhaltensabläufe und umfassen alle Aktionen, die während des Betriebs des Systems auftreten. Verschiedene Prozesse können auch interagieren.

Die Beachtung und Realisierung solcher Prozesse (z.B. in Programmier-Schnittstellen, -Bibliotheken und Entwicklungsumgebungen) führen zu einer leichteren Wartung und Aktualisierung, aber auch zu einer effektiveren Systementwicklung und können so die Interoperabilität des Gesamtsystems in allen genannten Dimensionen wesentlich verbessern. Die Festlegung, welche Prozesse zur Lauf- oder Entwicklungszeit ausgeführt werden müssen (z.B. ob Objektdaten zur Entwicklungszeit oder zur Laufzeit in das System geladen werden) sowie die Interaktion zwischen Prozessen, haben ebenfalls entscheidenden Einfluss auf die Interoperabilität.

Wir geben hier eine Übersicht über einige grundlegende **Prozessgruppen** (zu einer genaueren Prozessdefinition gehören die dynamischen Abläufe, die wir im Rahmen dieses Papiers nicht beschreiben):

Nutzer-Datenvermittlung

» Beschreibt wie ein Nutzer Informationen erhält bzw. Aktionen in das System eingeben kann (z.B. durch die Festlegung von Regeln, wie eine grafische Nutzerschnittstelle aussehen soll)

LBS-Dienste

» LBS-Dienste umfassen Prozesse der Positionierung und auch Prozesse wie Navigation. Es können zudem Prozesse wie positionsbasierte Push-Dienste beschrieben werden, z.B. als Warnung beim Abweichen von einer Route oder für Marketingzwecke

Konfiguration anhand der Nutzeranforderung

» Auswahl, Aktivierung einer Lösung für bestimmte Objekte
» Autorisierung von Deaktivierungen von Lösungen oder einzelnen Elementen
» Autorisierung von Geschäftsbeziehungen (Lizensierung, Kauf ...)

Automatische Konfiguration anhand von Systemparametern

» Entscheidung über die Verwendung von Systemkomponenten, deren Download, Aktivierung, Deaktivierung
» Bestimmung einer Basisposition
» Updates (z.B. in festgelegten Intervallen)
» Test- und Monitormodus

Analyse von Systemressourcen

» Bereitstellung der Daten für den Nutzer
» Gewährleistung von Konsistenz/Lauffähigkeit für Lösungen, die dem Nutzer zur Auswahl gegeben werden.
» Report von Ressourcenverbrauch, insbesondere in kritischen Situationen

Nutzerdienste-Konfiguration

» Systemkonfigurationen und -vorbereitungen sind getan
» LBS-Dienste stehen jetzt für die Nutzer-Interaktion zur Verfügung und können den Nutzerwünschen angepasst werden

Die im Folgenden gezeigte Referenzarchitektur muss:

» Prozessausführung ermöglichen, neu definierte Prozesse einfach integrierbar machen
» Verschiedene Realisierungsmöglichkeiten der Prozesse unterstützen
» Eine flexible Zuordnung zu Laufzeit- oder Entwicklungsprozessen ermöglichen

4.2 Referenzarchitektur

4.2.1 Übersicht

Abbildung 2 zeigt die funktionellen Komponenten der Referenzarchitektur und ihre wichtigsten Beziehungen (Kontroll- und Datenflüsse). Das gesamte System wird hier als Navigations-System oder -Lösung bezeichnet. Die Komponenten des Navigations-Systems (Module bzw. Funktionen) können auf Nutzer-Endgeräte (im Folgenden als User Equipment UE bezeichnet) und in einem Daten-Netzwerk verteilt sein. Dabei gibt es auch die Möglichkeiten, dass diese sowohl im Netz und gleichzeitig im UE vorhanden sind und intern kommunizieren, es können aber auch Komponenten entweder im Netz oder im UE realisiert werden. UEs sind im Wesentlichen Smartphones und Tablets, können aber auch PCs, Notebooks und andere Geräte sein. Auch ein Fahrzeug kann ein UE darstellen oder enthalten. Netzwerkkomponenten können beliebig auf Servern oder Clouds im Daten-Netzwerk realisiert werden, wenn sie die im Modell definierten Kriterien einhalten.

Jedes Modul sollte unabhängig von seinen speziellen technischen Aufgaben seinen Ressourcenverbrauch und -bedarf kennen und diesen bei Bedarf auch an andere Funktionen kommunizieren. Das ist insbesondere auf den UEs wichtig. Ressourcen sind Zugriffe auf externe Schnittstellen und Sensoren, erforderliche Bandbreiten, statischer und dynamischer Speicherbedarf, erforderliche Rechenleistung und der Stromversorgungs-Bedarf. Dazu sind geeignete Metriken, Methoden, Datenmodelle und -formate zu definieren. Da solche Funktionen teilweise schwierig zu realisieren sind, müssen diese Definitionen hierfür flexible Angaben zulassen.

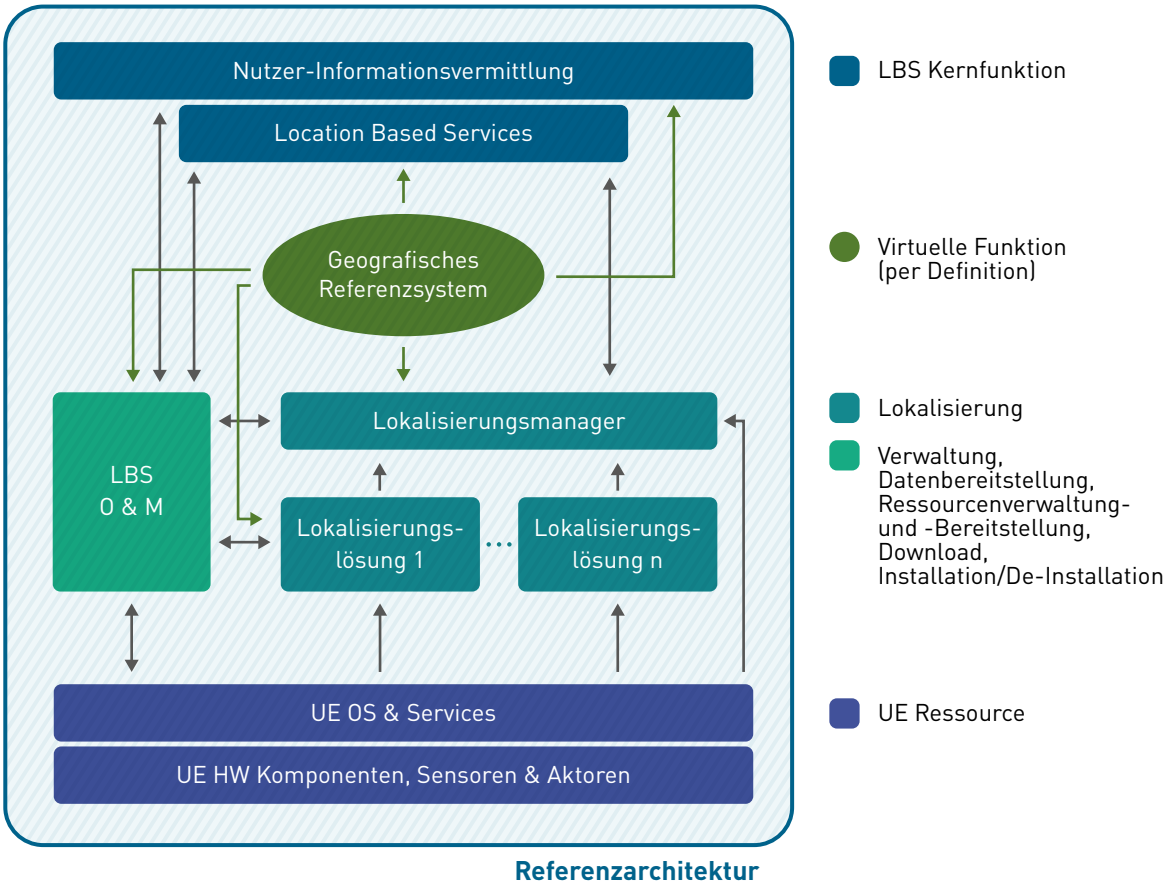


Abbildung 2: Funktionale Referenzarchitektur für ein Indoor-Navigations-System

4.2.2 Komponentenbeschreibung

Im Folgenden wird die Funktionalität der Module beschrieben und es werden Hinweise zur Datenhaltung gegeben. Funktionalitäten und Daten sind hierbei immer als optional zu sehen, d.h. es ist immer eine „Default"-Eigenschaft „Nicht verfügbar" vorzusehen.

Grundsätzlich gilt hier für die Schnittstellen zwischen den Modulen: Je genauer die Datenformate, Übertragungsmechanismen und -protokolle sowie die dynamischen Abläufe definiert werden, desto besser wird der Austausch von Modulen verschiedener Anbieter unterstützt. Ist ein Modul über Netzwerk und UE verteilt, müssen die internen Schnittstellen hier nicht definiert werden. Allerdings beeinflussen diese natürlich den Ressourcenbedarf und dieser muss entsprechend berücksichtigt werden.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, alle Module dynamisch, d.h. zur Nutzungszeit auszutauschen, wenn alle Schnittstellen sorgfältig bis ins Detail festgelegt werden. Notwendig ist dies allerdings nur bei wichtigen Funktionen, die das Funktionieren des Gesamtsystems erst ermöglichen. Das sind in diesem Fall die Lokalisierungslösungen. Informationen, die innerhalb der Module verwendet werden (Objektdaten, Karten, POIs, etc.), müssen natürlich ebenfalls dynamisch ladbar sein.

Module, die zur Entwicklungszeit fest eingebunden werden, haben den Vorteil, dass Schnittstellendefinitionen angepasst werden können, allerdings geht dies zu Lasten der Wartbarkeit und Effizienz der Entwicklungsarbeit.

4.2.2.1 Geografisches Referenzsystem

Die Kenntnis des Geografischen Bezugssystems ist einer der Kernpunkte für ein interoperables LBS-System. Es definiert die Beziehung im geodätischen Gitter und ist somit die Voraussetzung, dass sich alle Komponenten untereinander „verstehen".

Werden hier standardisierte Verfahren benutzt, ist automatisch die Verständigung der verschiedenen Funktionen gegeben, ohne dass neue Schnittstellen erforderlich wären. Insofern ist dieses Modul „virtuell", d.h. es sind nur „Offline"-Definitionen erforderlich.

Empfohlen wird, international standardisierte Lösungen für geografische Koordinaten und Gebäudemodelle (WGS84, ITRS, ERTF 89, LOD 4 ...) zu verwenden. Informationen über die verwendeten Systeme sind dem Modul LBS O&M zur Verfügung zu stellen.

Auch die Formate zur Übertragung von geografischen Daten können voneinander abweichen. Daher sind hierfür Metriken zu definieren und die entsprechenden Informationen über verwendete Formate ebenfalls dem Modul LBS O&M zur Verfügung bekannt zu geben. Damit wird gewährleistet, dass eine Formatkompatibilität geprüft werden kann, insbesondere auch bei dynamischer oder Online-Auswahl einzelner Komponenten.

4.2.2.2 Operation und Maintenance (O&M) für Location Based Services

Dieses auf das LBS bezogene O&M ist ein zentrales Element des Navigationssystems. Es beschafft und verwaltet Informationen über Lokalisierungslösungen (z.B. lokale Verfügbarkeit, Downloadmöglichkeit) und Karten/POI Material. Das O&M hat Zugriff zu (system-)internen und externen Datenbanken, die solche Informationen bereitstellen. Das O&M stellt diese Informationen den anderen Funktionen zur Verfügung, d.h. dafür sind geeignete interne Schnittstellen zu definieren. O&M managt einen Download von Komponenten, Daten oder Bibliotheken, wenn notwendig oder von anderen Funktionen gefordert.

Das O&M steuert den Download notwendiger Daten und Komponenten. Insbesondere die Bereitstellung und Verwaltung von Objektdaten und die Verwendung einer passenden Lokalisierungslösung sind wesentliche Punkte im Interoperabilitätskonzept. Lokalisierungslösungen können nach Informationsaustausch mit dem Lokalisierungsmanager dynamisch nachgeladen, aktiviert/deaktiviert und im LBS-System gelöscht werden. Hier sind diverse Lösungsansätze möglich: Das O&M nutzt betriebssystem-spezifische Applikation-Management-Dienste oder es werden Web-Services über die entsprechenden Browser verwendet.

O&M hat einen Überblick über den Ressourcenverbrauch/-bedarf der anderen Funktionen und stellt diese Informationen den anderen Modulen zur Verfügung. Das LBS O&M stellt ausgewählte Informationen zum Testen und Monitoren, z.B. durch einen Operator und/oder den Nutzer, zur Verfügung. Durch die geschilderte Funktion sorgt das LBS O&M für die mögliche Anwendung verschiedener Positionierungslösungen und Technologien zur Ortung und sowie zur Anwendung für verschiedene Objekte.

Das LBS O&M kann verteilt sein auf das Daten-Netzwerk und das UE. Das bedeutet, dass hier eine Modul-interne Kommunikation auf vorhandenen UE Netzwerk-Ressourcen erfolgen muss. O&M hat außerdem Zugriff auf öffentliche oder private Datenbanken. Es unterstützt die Lizensierung und Abrechnung von Diensten (unter Verwendung der vorhandenen Möglichkeiten des Betriebssystems).

4.2.2.3 Nutzer Informationsvermittlung & Location Based Services

Die Nutzer-Informationsvermittlung bildet das gesamte Nutzer-Interface ab. Es ermöglicht Ein- und Ausgaben für den Nutzer, Darstellung und Präsentation von Karten, Routen, POIs. Es leitet Nutzereingaben und -kommandos an das System. Weiterhin ermöglicht es eine Konfiguration durch den Nutzer. Weiterhin muss es Positionsangaben bzw. Routen anfordern, es autorisiert über Nutzerabfragen/Kommandos den unter Umständen

kostenpflichtigen Download bzw. die Nutzung von Komponenten, Datenbanken, Karten oder das Abonnement von solchen Netzwerk-Diensten.

Dieses Modul kann von verschiedenen Anbietern und auf verschiedener UE-Hardware bereitgestellt werden, wobei die Einbindung auf Grund der Komplexität des Moduls wahrscheinlich ausschließlich zur Entwicklungszeit passiert. Um die Forderung nach Interoperabilität auf der Ebene verschiedener Betriebssysteme und für verschieden Objekte zu unterstützen, muss die Nutzerschnittstelle (Grafik, Menüs etc.) durch Empfehlungen und Regeln so vereinheitlicht werden, dass die Nutzererfahrung und Bedienbarkeit ähnlich ist oder zumindest einen hohen Wiedererkennungswert hat.

Die Funktion Location Based Services übernimmt folgende Aufgaben

» Entgegennahme von Kommandos von der Nutzerinformationsvermittlung
» Erstellung der Routen und Bereitstellung für die Nutzerinformationsvermittlung
» Entgegennahme der Anforderungen der Nutzerinformationsvermittlung entgegen und Aktivierung erforderlicher Dienste
» Ermittlung der aktuellen Nutzerposition durch Anfragen an den Lokalisierungsmanager
» Entgegennahme bzw. Anforderung von Informationen vom LBS O&M über Karten, POI usw.

Nutzerinformationsvermittlung und LBS-Funktion sind so eng verbunden, dass diese als eine Komponente betrachtet werden sollten. Damit liegt die Verantwortung für das Interface zwischen diesen beiden Modulen bei ein und demselben Komponentenentwickler. Dieses spart die Festlegung einer äußerst komplexen Schnittstelle in der Referenzarchitektur und rechtfertigt daher eventuelle Nachteile in der Flexibilität. Logisch bzw. funktionell gesehen bleiben es natürlich getrennte Komponenten.

Informationen über Objektdaten, die hier benötigt werden, müssen so definiert werden, dass ein Wechsel zwischen Objekten problemlos möglich ist. Dazu ist es ebenfalls notwendig, die Schnittstelle zum LBS O&M festzulegen, um Informationen entsprechend den lokalen Gegebenheiten nachladen oder anfordern zu können.

Das LBS-Modul fordert die aktuelle Position vom Lokalisierungsmanager an. Diese Schnittstelle ist zur Entwicklungszeit zu definieren. Grundlegende Format- und Protokolldefinitionen unterstützen hierbei das Zusammenschalten von Modulen verschiedener Anbieter.

4.2.2.4 Lokalisierungsmanager

Der Lokalisierungsmanager liefert die aktuelle Position auf Anfrage vom LBS-Modul. Er entscheidet über die Verwendung sowie Aktivierung/Deaktivierung einer vorhandenen Lokalisierungslösung zur Positionsbestimmung.

Der Lokalisierungsmanager fragt die aktuelle Position bei den Lokalisierungslösungen an. Er entscheidet anhand von Genauigkeitsinformationen und Ressourcenbedarf über die Verwendung einer oder mehrerer Lokalisierungslösungen für eine konkrete Positionsanfrage.

Dazu sollten für die verschiedenen Lokalisierungslösungen Genauigkeitsinformationen vorliegen. Diese sollten sowohl für eine Lokalisierungslösung als Parameter gegeben sein (z.B. über das O&M), aber auch für einzelne Positionsabfragen aktuell mitgeliefert werden. Der Lokalisierungsmanager entscheidet, welche Lösung aktiviert wird. Greifen mehrere Lösungen auf gleiche Ressourcen zu, muss der Lokalisierungsmanager entscheiden, welche Lösung zu welcher Zeit aktiviert wird. Es können auch mehrere installierte Lösungen parallel genutzt werden. Der Lokalisierungsmanager kann dabei selbst Positionsberechnungen an Hand der vorhandenen Informationen optimieren. Damit kann die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Positionsbestimmung erhöht werden.

Durch eine Umschaltung von Lokalisierungslösungen ist auch ein einfacher Wechsel der Positionierungs-Technologie möglich. Damit kann u.a. der Übergang zwischen verschiedenen Bereichen des aktuellen Objektes nahtlos gewährleistet werden.

Einige Betriebssysteme stellen bereits Lokalisierungsmanager bzw. entsprechende Schnittstellen bereit (z.B. den Android Fused Location Manager). Die Definitionen in unserem generischen Modell sollten so gewählt sein, dass eine einfache Adaption an solche Schnittstellen möglich ist.

Der Lokalisierungsmanager sollte über Möglichkeiten einer Grobpositionierung verfügen. Das gewährleistet eine automatische Erkennung der örtlichen Gegebenheiten und kann gegebenenfalls zur Anforderung von Daten- und Modul-Downloads genutzt werden.

Zur Entwicklungszeit können Lokalisierungsmanager verschiedener Anbieter eingebunden werden.

Der Lokalisierungsmanager führt folgende Funktionen aus:

» Positionsbestimmung
» Bereitstellung/Ermittlung der geschätzten Position, Geschwindigkeit, Orientierung, Genauigkeit, Zuverlässigkeit (Hauptfunktion)
» Verbindung zu Lokalisierungsengines aufbauen
» Daten/Position der Lokalisierungsengines abfragen
» Umschalten zwischen Lokalisierungsengines, Unterstützung Outdoor/Indoor-Umschaltung
» Eigene Algorithmen zur Genauigkeitsverbesserung oder -kontrolle möglich
» Grobpositionierung (Datenübermittlung an LBS O&M)

Informationsaustausch mit LBS O&M

» Verfügbarkeit von Lokalisierungsengines abfragen
» Ggf. Request des Downloads von Lokalisierungsengines
» Abfrage der Lokalisierungsmöglichkeit zur Grobpositionierung (z.B. letzte GPS Koordinaten)
» Genauigkeitsklasse der Lokalisierungsengines
» Ressourcenbedarf (low-layer Schnittstellen: Bandbreite/-blockade für z.B. WLAN, Bluetooth, Mobilfunk, ...), Speicherbedarf, Antwortzeiten notwendiger Systeme/Komponenten, notwendige Rechenleistung, Stromversorgungsbedarf/-verbrauch, Sensorennutzung (Ressourcenbedarf sollte mit dem LBS O&M abgestimmt, d.h. ausgehandelt oder zu mindestens informativ zur Verfügung gestellt werden)
» Verwendung von Lokalisierungsengines an LBS O&M melden

Datenlieferung (Position, Genauigkeit, Zuverlässigkeit) an Modul LBS/Nutzer-Datenvermittlung

» Einmalig auf Anfrage von LBS/Nutzer-Datenvermittlung
» Fortlaufender Prozess mit Start/Stop durch LBS/Nutzer-Datenvermittlung

Performancemessungen

» Ermittlung von Latenzen, Genauigkeiten, Zuverlässigkeiten (Fehlereinflussanalyse)
» Zuordnung zu Lokalisierungsengines zur effektiveren oder genaueren Positionsbestimmung
» Bereitstellung an LBS O&M (für Tests, Monitoring etc.)

Die GPS Schnittstelle, soweit vorhanden, kann ebenfalls als eine der Navigationslösungen genutzt werden. Dies vereinfacht den Übergang Outdoor/Indoor bzw. kann für die Navigation in der Gebäude-Umgebung genutzt werden, wenn dafür Kartenmaterial vorliegt.

4.2.2.5 Lokalisierungslösungen (Lokalisierungsengines)

Die Lokalisierungslösungen liefern die Position, Genauigkeitsklasse, Genauigkeitsangabe der Einzelmessung, Antwortzeiten und Ressourcennutzung. Vor allem das Interface zum Lokalisierungsmanager muss sehr genau definiert werden, um verschiedene Lokalisierungslösungen verwenden zu können.

Es gibt mehrere Gründe für die gleichzeitige oder alternative Verwendung mehrerer Lokalisierungslösungen: Verschiedene Lösungen für gleiche Objekte können sich in Genauigkeit und Ressourcenbedarf unterscheiden. Das kann durch die Realisierung unterschiedlicher Anbieter oder auch durch Verwendung diverser Ortungstechnologien (z.B. Bluetooth-Beacon-Ortung oder WLAN-Fingerprinting) bedingt sein. Ebenso können auch für verschieden Objekte andere Lokalisierungslösungen vorhanden sein.

In allen Fällen ist ein äußerst schneller und dynamischer Wechsel (durch Aktivierung und/oder

Download) der Lokalisierung wünschenswert. Hier liegt das größte Potenzial in der gesamten Referenzarchitektur, um sowohl Objekt- als auch Technologie- und Anbieterinteroperabilität gewährleisten zu können. Alle anderen Module können statisch zur Entwicklungszeit festgelegt werden.

Eine Lokalisierungslösung kann ebenfalls auf Netzwerk und UE verteilt sein. In diesem Fall werden wieder Modul-interne Schnittstellen benutzt. Diese müssen nicht extra in der Architektur spezifiziert werden, sondern liegen in der Verantwortung des Anbieters. Allerdings muss gewährleistet sein, dass die entsprechenden Ressourcen vorhanden sind und bedarfsgerecht genutzt werden können. Das betrifft insbesondere die Verwendung der externen UE-Schnittstellen (Bandbreite etc.) sowie die Nutzung von weiteren UE/OS-Funktionen und -Sensoren. Über den Ressourcenbedarf und die aktuelle Ressourcenbelegung sind Informationen für das LBS O&M und den Lokalisierungsmanager bereitzustellen.

Damit kann diese Funktion auf Datenbanken zugreifen oder Prozesse anstoßen, die auf dem UE vorhanden sind und/oder im Core-Netzwerk ablaufen. Auch ein Zugriff auf öffentliche oder private Datenpools im Netzwerk ist damit möglich.

Ein Download solcher Lokalisierungslösungen zur Laufzeit ist daher sehr wichtig (z.B. als Bibliothek oder Service). Wegen der notwendigen Installationszeit sollten diese aber vom Nutzer vor der gewünschten Nutzung angestoßen werden. Die Mechanismen für solche Moduldownloads und -aktivierung müssen festgelegt werden.

Die Latenzzeit zum Aktivieren einer Lokalisierungslösung, d.h. beginnend von der Lokalisierungs-Anforderung bis zur Lieferung der Schätzposition (ohne dass vorher UE-Ressourcen belegt wurden oder ein Lokalisierungs-History vorliegt) ist für schnelle Umschaltzwecke ein wichtiger Parameter. Erfahrungsgemäß sollte er bei maximal 1-2 s liegen. Die Genauigkeit einer solchen ersten Anforderung ist u.U. schlechter als die spätere erzielte Genauigkeit, da innerhalb der Lokalisierungslösung Bewegungsalgorithmen ablaufen bzw. einschwingen können. Der Genauigkeitswert für Anfangs- und eingeschwungenen Zustand sollte ebenfalls bekannt sein.

Im laufenden Betrieb sind auch typische, minimale und maximale Antwortzeiten (Round-Trip-Zeiten) dem System als Parameter bereitzustellen.

4.2.2.6 UE Operation System, Dienste, Hardware und Sensor Ressourcen

Auch wenn dem Betriebssystem (OS) des UEs natürlich eine besondere Bedeutung zukommt, sind die Funktionalitäten und Ressourcen, die hier bereitgestellt werden, bereits in den Modul- und Schnittstellenbeschreibung der anderen Komponenten festgelegt worden.

4.2.3 Daten

An allen Schnittstellen, an denen Interoperabilität gefordert wird, müssen die Art und das Format der Daten, die Übertragungsmechanismen und -protokolle sowie ein dynamischer Ablauf festgelegt werden.

Auch wenn in diesem Papier eine solche detaillierte Datenmodell-Definition nicht erfolgen kann, wird in den folgenden Tabellen ein Überblick über einige wichtige Daten gezeigt. Welche dieser Daten eventuell optional sind, muss in der konkreten System-Realisierung festgelegt werden. Daher wird vorgeschlagen, für alle Daten einen Wert „Nicht vorhanden" vorzusehen. Bei der Systemspezifikation ist natürlich zu beachten, dass die Module auf diesen Wert sinnvoll reagieren müssen. Unter „Daten" verstehen wir hier sowohl den Austausch von Informationen als auch Kommandos, die Aktionen in anderen Modulen auslösen.

Datentyp	*Erläuterung*
LBS O&M <-> Nutzerdatenvermittlung / LBS Services	
Konfigurationsparameter	» Einstellungen Nutzer- und Geräteverwaltung » Objektdaten (von geografischen Objekte z.B. Bahnhöfen) Verfügbarkeit verschiedener Objektdaten, Genauigkeit Services/POIs Kosten/Vertragsvereinbarungen Download/Aktivierung/Deaktivierung Ein Download/Installation von Objektdaten kann automatisch erfolgen oder vom Nutzer veranlasst werden.
LBS O&M <-> Lokalisierungsmanager	
Aktuell verfügbare Lokalisierungslösungen	Hier können die Lokalisierungslösungen, die aktuell verwendet werden sollen, ausgehandelt werden. O&M sorgt für die Bekanntgabe möglicher Lösungen und deren Bereitstellung, der Lokalisierungsmanager kann Anforderungen an das O&M geben, z.B. wenn mehrere Lösungen verwendet werden sollen. O&M meldet dann die tatsächlich installierten Lösungen an den Lokalisierungsmanager. O&M kann nicht benutzte Lokalisierungslösungen deinstallieren, sollte das aber mit dem Lokalisierungsmanager aushandeln.
LBS O&M <-> alle Module	
Konfigurationsparameter	Systemkomponentendaten: » Ressourcenbedarf und –verbrauch der Komponenten » Geografische Referenzsysteme, die die Komponenten nutzen können » Aktivierungs-, Deaktivierungsmöglichkeiten
Ressourcen » **OS-Anforderungen** » **OS-Schnittstellen** » **Bandbreite** » **Stromverbrauch** » **Speicherbedarf** » **Processing-Kapazität**	Höhe des Ressourcenbedarfs für verschiedene Modulzustände (z.B. aktiv, inaktiv, laufende Positionierung) Belegungszeiten von Ressourcen Exklusivität der Ressourcennutzung Diese Informationen werden genutzt zur » Entscheidung über den aktuellen Systemaufbau » Informationsbereitstellung für andere Komponenten Beispiele für Ressourcen: WLAN, Bluetooth, IP-Verbindung, Sensoren, GPS
OS-Ressourcen	Abfrage verfügbarer OS-Ressourcen » zur Entscheidung über den aktuellen Systemaufbau » zur Informationsbereitstellung für die Komponenten
Komponentenverwaltung	Komponentenübersicht und –status
LBS O&M <-> Extern	
Download	Daten aus externen Datenbanken
Updates	Update von Datenbanken, Datenbanklisten
Abrechnungs-/ Lizenz-daten	Hier sind möglichst generische Schnittstellen zu verwenden bzw. zu entwickeln

Tabelle 1: Konfigurations- und O&M Daten

Tabelle 2 (rechte Seite):
Daten für Positionierung

Datentyp	*Bemerkungen, Mögliche Metrik*
Nutzerdatenvermittlung/LBS Services -> Lokalisierungsmanager	
Positionsanforderung	» Kommandos zum Starten, Stoppen der Positionsbestimmung » Ein Intervall kann die Häufigkeit der Positionsbestimmung festlegen, » damit kann eine einmalige oder periodische Positionslieferung angefordert werden » Genauigkeitsanforderung: Es wird eine gewünschte Genauigkeit vorgegeben
Lokalisierungsmanager -> Nutzerdatenvermittlung/LBS Services	
Aktuelle Genauigkeit	Radius, Konfidenzintervall
Aktuelle Schätzposition	» Angabe der benutzten Metrik (da Nutzung verschiedener Metriken denkbar ist, z.B. geografische Koordinaten in verschiedenen Bezugssystemen) » Position » Orientierung » Geschwindigkeit
Lokalisierungsmanager -> Lokalisierungslösung	
Aktivierung/ Deaktivierung	» Aktionen/Kommandos mit dem Ziel: » Kein Ressourcenverbrauch bei Deaktivierung » Geringer Ressourcenverbrauch bei Aktivierung (erst bei angeforderter Position sollte ein voller Ressourcenverbrauch stattfinden)
Positionsanforderung	» Kommandos zum Starten, Stoppen der Positionsbestimmung » Ein Intervall kann die Häufigkeit der Positionsbestimmung festlegen » damit kann eine einmalige oder periodische Positionslieferung angefordert werden » Genauigkeitsanforderung: Der Lokalisierungsmanager gibt eine gewünschte Genauigkeit vor
Parameteranforderung	Anforderung von Parametern zu Genauigkeitsklasse, erwartete Genauigkeiten, maximale Frequenz der Positionsbestimmung
Lokalisierungslösung -> Lokalisierungsmanager	
Aktuelle Schätzposition	» Angabe der benutzten Metrik (ermöglicht die Verwendung verschiedener Datenformate) » Position » Orientierung » Geschwindigkeit
Aktuelle Genauigkeit	Radius, Konfidenzintervall
Genauigkeitsklasse	In einer zu definierenden Metrik, z.B. durch eine Radius- und Konfidenzintervall-Tabelle
Erwartetet Anfangs-Genauigkeit	Radius, Konfidenzintervall
Erwartete eingeschwungene Genauigkeit	Radius, Konfidenzintervall
Aktuelle Genauigkeit	Radius, Konfidenzintervall
Minimales Intervall	Angabe eines solchen Wertes hat Einfluss z.B. auf die Updatehäufigkeit der Positionsbestimmung und kann daher als ein mögliches Güte-Kriterium der Lokalisierungslösung verwendet werden
Latenzzeit	Roundtrip-Zeit, Zeit von Positionierungsstart bis zur Lieferung der Position beeinflusst die Gesamtgenauigkeit der Navigation und ist damit ein wichtiger Parameter für die Gütebestimmung und für genauigkeitsverbessernde Algorithmen

Informationsvermittlung

Die Vermittlung von Informationen in Navigationsanwendungen ist seit Beginn des Arbeitskreises Indoor Navigation ein zentrales Thema. Sie beinhaltet zum einen die Art und den Umfang der Präsentation der Daten, zum anderen aber auch das Interface für die Zieleingabe, das für möglichst alle Personengruppen nutzbar sein sollte. Damit bildet die Informationsvermittlung die Brücke zwischen den Entwicklern und den Anwendern. Da der erste Eindruck einer Applikation oftmals über die weitere Nutzung entscheidet, ist eine ansprechende, übersichtliche Darstellung der benötigten Informationen unabdingbar.

Die Navigation in geschlossenen Gebäuden findet auf wesentlich kleinerem Raum statt als die Navigation im Straßenumfeld. Die klassische Turn-by-Turn-Navigation würde auf Grund der kurzen Abstände einen ständigen Blick auf das Smartphone erfordern, sodass die Umwelt nur noch eingeschränkt wahrgenommen würde. Dies stellt ein mitunter erhebliches Sicherheitsrisiko dar. Generell ist bei Navigationsanwendung eine Bewegung von Übersichtsdarstellungen hin zu flexiblen Anzeigen an neuralgischen Punkten zu beobachten. Dazu wird eine teilweise sehr genaue Ortung der Nutzer benötigt, da sich mit dem Aufenthaltsort auch die benötigten Informationen verändern.

Die in der Outdoor-Navigation bereits gebräuchlichen Darstellungsformen müssen also für den Indoor-Bereich angepasst werden.

5 Einflussfaktoren auf die Wahl der Darstellungsform

Es gibt keine eindeutig „richtige" Darstellungsform, sie muss sich vielmehr an den technischen Möglichkeiten und den Anforderungen, die die Nutzer an die App stellen, orientieren. Im Folgenden werden die Faktoren ausgeführt, die die Wahl sowohl des „Wie" als auch des „Was" der Visualisierung beeinflussen.

5.1 Das Anwendungsszenario

Das Anwendungsszenario bestimmt den groben Rahmen der Darstellung. Hiervon hängt ab, wie groß der potenziell darzustellende Bereich ist, ob zum Beispiel zwischen unterschiedlichen Stockwerken hin und her geschaltet werden muss, welche Navigationsziele es gibt, und welche Zugriffsmöglichkeiten es auf sie geben sollte.

An Bahnhöfen geht es häufig darum, Personen beim Auffinden des richtigen Gleises oder den im Bahnhofsumfeld verteilten Haltestellen des ÖPNV zu unterstützen. Reisende stehen oftmals unter Zeitdruck, möchten unterwegs noch etwas einkaufen oder suchen einen Ort, an dem sie die Wartezeit auf den Anschlusszug überbrücken können. Die Navigationsziele sind sehr vielfältig und reichen vom Waggon, in dem sich der reservierte Sitzplatz befindet, über die Bahnhofsbuchhandlung bis zur nächstgelegenen Bushaltestelle oder Carsharing-Station. Ein ähnliches Szenario ist der Flughafen, hier sind die Örtlichkeiten jedoch häufig unübersichtlicher und die Reisenden kennen sich vor Ort weniger gut aus. Außerdem benötigen mehr Menschen Informationen in einer anderen Sprache. In Bürogebäuden oder Universitäten steht die Suche nach Besprechungsräumen,

Seminaren oder der Kantine im Vordergrund. Es gibt häufig Bereiche, die nur einem bestimmten Personenkreis zugänglich sind. Die Navigation in Einkaufszentren ist hingegen stark von wirtschaftlichen Interessen der Mieter beeinflusst. Die Besucher sollen einerseits möglichst lang vor Ort gehalten und zum Einkaufen animiert werden, möchten andererseits aber auch schnell zur gesuchten Filiale finden. Die Aktualität der Daten ist wichtig, da die Mieter teilweise häufig wechseln. In Museen kann die reine Navigationsanwendung durch Informationen zu den Ausstellungsstücken zum Audio Guide mit didaktischen Elementen werden. Ein weiteres Anwendungsszenario für Indoor Navigationsanwendungen sind Messen. Hier ändern sich die Informationen, die zur Verfügung gestellt werden müssen ständig, es gibt für die Nutzer keine Gewöhnungseffekte. Neben der Lokalisierung einzelner Stände beziehungsweise Aussteller wird auch eine Echtzeitanzeige von Vorträgen oder Workshops benötigt.

An allen Orten kann außerdem das Notfallszenario zum Einsatz kommen. Hier sind eine schnelle Navigation, die Vermeidung von Fahrstühlen, das Markieren von Meldepunkten und eventuell sogar das dynamische Leiten der Personenströme anhand der Breite von Durchgängen und Wegen wichtig.

5.2 Die Rolle, die der Nutzer im Anwendungsszenario einnimmt

Es ist zwischen Reisenden oder Besuchern auf der einen Seite und Personal auf der anderen Seite zu unterscheiden. Eine weitere Gruppe von potenziellen Nutzern der Navigationsanwendung sind Angestellte aus dem Sicherheitsbereich. Darunter fallen sowohl Beschäftigte der Gebäudesicherheit als auch Feuerwehrleute oder andere Personen, die nur im Notfall das Gebäude betreten.

5.3 Die Attribute der Nutzer

Zusätzlich zur Einteilung der Nutzer in diskrete Personengruppen gibt es auch innerhalb der einzelnen Gruppen Unterschiede in den Bedürfnissen und Anforderungen, die an eine Navigationsanwendung gestellt werden. Diese lassen sich anhand von Attributen näher bestimmen.

Eine wichtige Unterscheidung ist die in ortskundige und ortsunkundige Personen. Erstere benötigen vor allem dynamische Informationen wie zum Beispiel die Wegeführung betreffende Einschränkungen durch Baustellen oder ähnliches oder im Bahnhofsszenario auch Änderungen zu Abfahrtszeiten oder -gleisen. Auch die Sprachkenntnis der Nutzer ist von Bedeutung, besonders wenn das Gebäude ausschließlich ein einer Sprache beschildert ist. Personen können außerdem auf unterschiedliche Arten in ihrer Mobilität eingeschränkt sein, sei es durch die Nutzung eines Rollstuhls, das Mitführen von großen Gepäckstücken oder das Angewiesen sein auf Blindenleitstreifen. Dies ist vor allem im Notfall zu berücksichtigen. Im Sinne des „Design for All“ muss außerdem berücksichtigt werden, welche Darstellungsformen der Nutzer wahrnehmen kann. So können Blinde keine visuellen Informationen wahrnehmen, Taube keine auditiven. Je nachdem, wo eine Person ihr Smartphone aufbewahrt, sind Vibrationen möglicherweise nicht zu spüren.

Neben dem Anwendungsszenario und den Rollen und Attributen der Nutzer sind auch die technischen Möglichkeiten des Endgerätes und die Qualität der zugrundeliegenden Daten ausschlaggebend für die Wahl der Darstellungsart.

6 Arten der Vermittlung von raumbezogenen Inhalten

6.1 Augmented Reality

In dieser Darstellungsform werden meist 3D-Modelle des Gebäudes um Zusatzinformationen wie Abbiegepfeile oder POIs ergänzt. Werden diese Modelle nicht für Smartphones optimiert, stellen sie hohe Anforderungen an die Rechenleistung des Endgerätes und beanspruchen den Akku dementsprechend stark. Des Weiteren müssen hochgenaue Geometriedaten des Gebäudes vorliegen, da die Zusatzinformationen deckungsgleich überlagert werden. Auch die Ortung der mobilen Endgeräte muss sehr präzise sein, um die Aussagekraft des präsentierten Bildausschnittes zu erhöhen. Augmented Reality (AR) bietet außerdem keine gute Möglichkeit zur Übersicht oder groben Orientierung. Der Nutzer muss vom Start- bis zum Endpunkt navigiert werden. Ein großer Vorteil der Darstellungsform ist jedoch, dass sie von der Seite des Nutzers sehr voraussetzungsarm ist. Sie ist sprachunabhängig und fordert keine Fähigkeiten im Kartenlesen.

6.2 Fotonavigation

Einen ähnlichen Ansatz wie die AR verfolgt die Navigation mit Hilfe von Fotos. Hierbei werden dem Nutzer an entscheidenden Stellen des Weges Fotos von der Umgebung präsentiert, anhand derer er sich orientieren kann. Eine Ergänzung der Bilder mit Zusatzinformationen ist einfach zur realisieren. Diese Art der Visualisierung stellt im Gegensatz zur AR keine großen technischen Anforderungen an die Endgeräte, ist jedoch ebenfalls auf eine sehr genaue Ortung angewiesen. Hinzu kommt, dass Personen oder andere temporäre Erscheinungen, die möglicherweise auf den Fotos zu sehen sind, den Wiedererkennungswert der Umgebung verringern können.

6.3 Kartendarstellungen

Übersichtskarten sind vielen Nutzern sehr vertraut und können eventuelle Berührungsängste mit Navigationsanwendungen verringern. Auf der anderen Seite erfordern sie jedoch Fähigkeiten im Kartenlesen, die nicht ohne Weiteres vorausgesetzt werden können. Sie bieten dennoch für die meisten Personen eine gute Möglichkeit, sich eine Übersicht über die Örtlichkeiten zu verschaffen und eigenständig zu navigieren. Die Anforderungen, die sie sowohl an die Genauigkeit der zugrundeliegenden Daten als auch an die Technik stellen, sind gering.

6.4 Textanweisungen

Die Präsentation in Form von einzelnen Anweisungen in Textform ist technisch recht einfach zu realisieren. Sie stellt nur sehr geringe Anforderungen an die Genauigkeit der Daten und die Vorkenntnisse der Nutzer. Im Gegensatz zu den graphischen Darstellungsformen sind für Textanweisungen jedoch Kenntnisse in der verwendeten Sprache unabdingbar. Für Use Cases, in denen diese nicht vorausgesetzt werden können, ist eine Übersetzung nötig. Ein großer Vorteil ist die Möglichkeit, sie durch Vorlesen für blinde Menschen zugänglich zu machen, wobei die Geschwindigkeit der Sprachausgabe stark erhöht werden kann. Außerdem bleiben auch komplexere Wegabfolgen als sprachliche Handlungsanweisungen gut im Gedächtnis. Allerdings bietet diese Darstellungsform wie auch die Fotonavigation und die AR keinen Überblick, sondern zwingt den Nutzer, den Anweisungen genau zu folgen.

6.5 Auditive oder Vibrationssignale

Für Personen, die visuelle Informationen nicht wahrnehmen können oder während des Gehens nicht auf ihr Smartphone schauen möchten, eignen sich auch auditive oder Vibrationssignale. In Anlehnung an einen Geigerzähler können in immer schnellerer Folge Signale ausgegeben werden, wenn der Nutzer sich vom richtigen Weg entfernt. Steuert er dagegen und bewegt sich wieder in die richtige Richtung, wird die Signalfolge langsamer. Diese Darstellungsform eignet sich auch zur Signalisierung von Änderungen gegenüber dem Gewohnten, falls beispielsweise der gebuchte Flug von einem anderen Gate startet. Für ortsunkundige Personen ist diese Form der Informationsvermittlung vermutlich weniger geeignet, da der Weg ständig korrigiert werden müsste.

7 Flexible Integration unterschiedlicher Darstellungsformen

Da sich die einzelnen Möglichkeiten der Visualisierung in ihren Vor- und Nachteilen zum Teil sehr gut ergänzen, wäre eine Kombination wünschenswert. Dies könnte entweder über das Anlegen von Profilen oder Präferenzen oder durch ein Wechseln zwischen den Ansichten geschehen. So wäre es möglich, Textanweisungen mit Hilfe einer Überblickskarte in einen räumlichen Kontext einzubetten und es den Nutzern zu ermöglichen, bei spontanen Entscheidungen eigenständig den Weg zu suchen oder auch eine Überblickskarte mit Fotos zu ergänzen, die die Umgebung an kritischen Wegpunkten visualisieren.

Die Einstellungsmöglichkeiten in einem Profil sollten im Großen und Ganzen die Attribute der Nutzer widerspiegeln. Um die Navigationsanwendung für alle potenziellen Nutzer zugänglich zu machen, muss vor allem die präferierte Darstellungsform auswählbar sein. Des Weiteren sollte auch die Dichte der Informationen, die dem Nutzer präsentiert werden, veränderbar sein. Auf der einen Seite der Dimension „Informationsdichte“ steht dabei die reine Signalisierung von Fehlverhalten wie falschem Abbiegen oder der Aufenthalt auf dem falschen Gleis. Es werden außerdem Informationen über Änderungen gegenüber dem Normalzustand benötigt. Das andere Extrem stellt die Anreicherung der bloßen Navigationsanweisungen mit Zusatzinformationen über den Aufenthaltsort dar und verwandelt die Navigationsanwendung damit nicht nur in ein mobiles Informationssystem, sondern für Blinde auch in eine Möglichkeit, einen Überblick über ihre Umgebung zu erhalten.

Die Herausforderung besteht bei den unterschiedlichen Anforderungen, die verschiedene Personen an verschiedenen Orten zu unterschiedlichen Zeiten an eine Navigationsanwendung stellen, sicherlich darin, diese dennoch übersichtlich und möglichst einfach zu gestalten.

Der Arbeitskreis „Indoor-Navigation“

Der Arbeitskreis Indoor-Navigation wurde 2012 auf Initiative des InnoZ ins Leben gerufen, um als Austauschplattform die Vermittlung und Kommunikation zwischen Forschung und Industrie bzw. Anwendern zu fördern. Insgesamt fanden sechs Sitzungen statt, auf der insbesondere die Themen Interoperabilität und Visualisierung/Informationsvermittlung diskutiert wurden. Darüber hinaus wurden aktuelle technische Entwicklung, Forschungsprojekte und Anwendungskontexte auf die Agenda gehoben, um einen möglichst umfassenden Blick auf das Thema Indoor-Navigation zu werfen. Nachstehend finden Sie eine Übersicht über die Veranstaltungen, Referenten und Vortragsthemen.

8 Veranstaltungen und Teilnehmer

1. Sitzung am 30. Mai 2012

Vorträge/Inputs:
» Steffen Meyer, Fraunhofer IIS: Vorstellung der Projekte „DIMIS" und „Nadine"
» Stefan Brunthaler, TFH Wildau: Vorstellung Projekt „Mobi.free"
» Jurgen Caeyman, Nokia: Vorstellung der HAIP-Technologie (High Accuracy Indoor Positioning auf Basis von BLE
» David Strnad, MGE Data: Digitalisierung/Routing
» Klaus Tschritter, Alcatel-Lucent: Indoor-Navigation am Flughafen Hamburg

2. Sitzung am 3. Juni 2013

Arbeitssitzung zur Themenfindung und Schwerpunktsetzung der AK Indoor-Navigation. Auswahl der Themenfelder:
» Nutzergerechte Darstellungsformen
» Möglichkeiten der Interoperabilität

3. Sitzung am 6. März 2013

Vorträge/Inputs:
» Reiner Jäger, Hochschule Karlsruhe: Interoperabilität
» Konrad Winkler, DB Systel GmbH: Visualisierung
» Kick-Off der Arbeitsgruppen zu den Themenfeldern

4. Sitzung am 3. Dezember 2014

Vorträge/Inputs:
» Steffen Meyer, Fraunhofer IIS: Einführung iBeacon-Technologie
» René Hentschel, Beaconinside: Anwendungsmöglichkeiten von iBeacons
» Reiner Jäger, HS Karlsruhe: Die NAVKA Technologie
» Jens Albers, Nanotron Technologies Ltd.: Interoperabilität

Bearbeitung der Themenfelder:
» Interoperabilität: Detlef Hartmann
» Visualisierung: Manuel Friedrich
» iBeacon: Steffen Meyer

5. Sitzung am 9. Mai 2015

Vorträge/Inputs:
» Alexander Oelling, CEO Sensorberg GmbH: iBeacon - the new normal
» Markus Köhne, Fa.Mindtags: BLE-basierte Entfernungsmessung als Beitrag zur Schaffung barrierefreier Räume
» Marc Schelewsky, InnoZ: Anwendungsszenarien für Indoor-Navigation im Bahnhof

Bearbeitung der Themenfelder:
» Interoperabilität: Detlef Hartmann
» Visualisierung: Manuel Friedrich

6. Sitzung am 9. Dezember 2015

Vorträge/Inputs:
» Roland Wagner (Beuth Hochschule für Technik): Aktuelle Projekte zur Indoor-Navigation
» Matthias Schmidt (Fraunhofer FOKUS): Indoor-Navigation im Tür zu Tür Projekt m4guide
» Christian Wallin (42reports): Frequenzanalyse im Bahnhof Südkreuz
» Adam Wolisz (TU Berlin): Bedeutung Indoor-Navigation

**Innovationszentrum für Mobilität
und gesellschaftlichen Wandel (InnoZ) GmbH**

Torgauer Straße 12-15
10829 Berlin (Schöneberg)

Tel +49 (0)30 23 88 84 - 0
Fax +49 (0)30 23 88 84 - 120
info@innoz.de

Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:
Bus Linien M46, 248: Station Schönberg;
M48, M85: Station Dominicusstr./Hauptstr.
S-Bahn Linien S1, S41, S42, S46: Station Schöneberg

Arbeitskreis „Indoor Navigation“

Ansprechpartner:
Marc Schelewsky
Tel +49 (0)30 23 88 84 - 106
marc.schelewsky@innoz.de

Kontakt Autoren:
Detlef Hartmann – detlef_hartmann@web.de
Dr. Klaus Wuenstel – klaus.wuenstel@alcatel-lucent.com
Lena Damrau – lena.damrau@innoz.de
Vlado Handziski – vlado.handziski@tu-berlin.de
Bernhard Müller-Beßler – bmb@promotives.de
Manuel Friedrich – Manuel.Friedrich@berlin-partner.de

A.12 Ergebnisse des Cognitive Walkthrough

USABILITY-UNTERSUCHUNG

INDOOR-NAVIGATION BAHNHOF BERLIN SÜDKREUZ

Entwurf
Stand: 30.03.2015

METHODE

Cognitve Walkthrough auf Basis der folgenden Aufgabenszenarien:

1) Du bist gerade mit dem Zug am Bahnhof Südkreuz angekommen. Da du den Bahnhof nicht kennst, möchtest du dich zunächst einmal orientieren. Finde heraus, wo du dich genau befindest.

2) Du möchtest mit der S-Bahn weiter nach ... fahren. Finde heraus, wie du zu Gleis 11 kommst und gehe dort hin.

3) Du hast nun noch ein paar Minuten Zeit bis deine S-Bahn fährt. Du möchtest noch ein Getränk kaufen. Finde den passenden Shop und finde heraus, wie du dorthin kommst. Weil du schweres Gepäck dabei hast, suchst du einen Weg ohne Treppen. / Du hast den Weg zu einem Shop gefunden doch nun entscheidest du dich um und suchst den Weg zu ... (Ändern der Route).

4) Du beschließt, nun doch nicht die S-Bahn zu nehmen, sondern ein Flinkster-Auto zu nutzen. Finde die Station und lass dir den Weg dorthin anzeigen. / Lass dir verschiedene Möglichkeiten der Navigation anzeigen und nutze diese um zur Station zu gehen.

Arbeitsschritte:

» Festlegung der idealen Handlungssequenzen
» Überprüfung der idealen Handlungssequenzen auf mögliche Hindernisse für die Nutzer
» Dokumentation und Strukturierung der gefunden Probleme
» Bewertung / Erarbeitung von Empfehlungen (noch nicht bearbeitet)

SAMMLUNG MÖGLICHER USABILITY PROBLEME

START DER APP / AKTIVIEREN DER ORTUNGSFUNKTION

1) Formulierung Fehlermeldung (Start ohne aktiviertes W-LAN)
2) Formulierung Fehlermeldung (Nutzer außerhalb Ortungsgebiet)
3) Notwendigkeit einer nutzerseitigen Aktivierung der Ortungsfunktion
4) Funktion des Fadenkreuz-Icons abweichend von der gängigen Verwendung

NAVIGATIONSSTRUKTUR UND -ELEMENTE

5) Verwechslung von „Bahnhofsplan" und „Fußroute" möglich
6) Unscharfe Trennung von „Bahnhofsplan" und „Fußroute"

APP-BEREICH BAHNHOFSPLAN (KARTENDARSTELLUNG)

Visualisierung / Bezeichnungen
7) Visualisierung des Bahnhofsplans unübersichtlich
8) Ebenenbezeichnungen nicht intuitiv verständlich
9) Vermischung verschiedener Ebenendarstellungen durch Suchfunktion

Navigation
10) Navigationelemente „von", „nach" und „via" schwer unterscheidbar
11) Notwendigkeit einer nutzerseitigen Auswahl der Ebene

Suchfunktion
12) Bezeichnungen der POI teilweise nicht eindeutig oder nicht aussagekräftig genug
13) Schlechte Erkennbarkeit des Standorts eines POI nach Suchvorgang

APP-BEREICH FUSSROUTE (NAVIGATION)

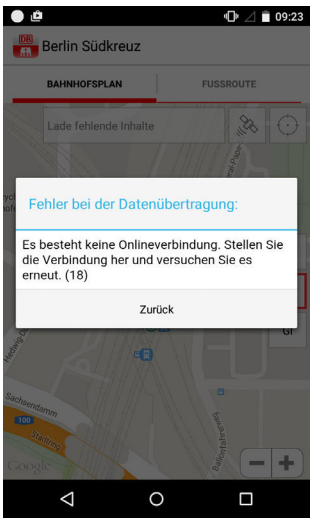
Visualisierung / Bezeichnungen
14) Routendarstellung ohne Ebenenbezug
15) Zu geringer Informationsgehalt in der textbasierten Navigation
16) Zu geringer Informationsgehalt in der Bilddarstellung für die Navigation

Navigation
17) Komplizierter Wechsel zwischen verschiedenen Darstellungsformen der Fußroute (Karte, Text, Foto)
18) Verwechslung von „Route ändern" und „Suchfunktion" möglich
19) Zu geringe Hervorhebung und ungünstige Platzierung des Fußrouten-Navigationselements

Routensuche (Formulargestaltung)
20) Routensuche „von hier" nicht möglich
21) Optionen visuell verknüpft mit Zeitauswahl
23) Zeitauswahl nicht relevant
22) Keine eindeutige Bezeichnung der Optionen
24) Bestätigen der Optionen durch Zurück-Funktion

START DER APP / AKTIVIEREN DER ORTUNGSFUNKTION

1) Formulierung Fehlermeldung (Start ohne aktiviertes W-LAN)



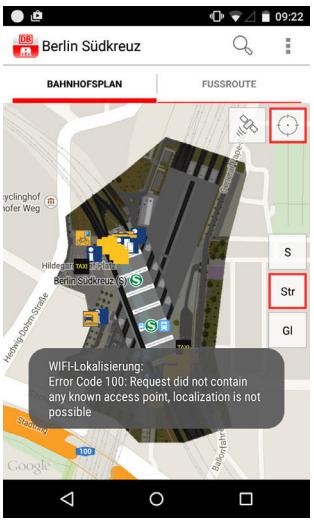
Ort: Start der App
Darstellungselemente: Fehlermeldung

Problembeschreibung: Beim Start der App erscheint bei deaktiviertem W-LAN eine Fehlermeldung, die evtl. für den Nutzer nicht verständlich ist.

Mögliche Ursachen: Der Nutzer bringt den Begriff „Online" nicht in Zusammenhang mit einer W-LAN-Aktivierung. Zudem ist ihm nicht bewusst, dass W-LAN für die Ortung relevant ist.

Bewertung: ...
Empfehlung: Umformulierung der Fehlermeldung und die Aktivierung direkt ermöglichen...

2) Formulierung Fehlermeldung (Nutzer außerhalb Ortungsgebiet)



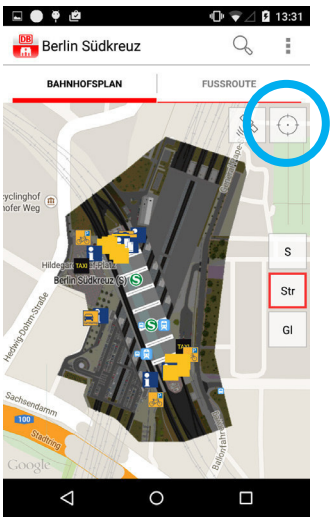
Ort: Bahnhofsplan
Darstellungselemente: Fehlermeldung

Problembeschreibung: Aktiviert der Nutzer die W-LAN-Ortung und befindet er sich außerhalb des erfassten Gebiets, so erscheint eine Fehlermeldung, die er eventuell nicht richtig deuten kann.

Mögliche Ursachen: Der Nutzer kennt den technischen Unterschied zwischen Indoor- und GPS-Ortung nicht und wird durch die Einbindung in eine Umgebungskarte davon ausgehen, dass GPS-Ortung auch funktioniert.

Bewertung:
Empfehlung: Umformulierung der Fehlermeldung. Zudem könnte das erfasste Gebiet besser visuell hervorgehoben werden, z.B. durch eine Abgrenzung zur Karte oder ein Ausgrauen des nicht erfassten Gebiets / Übergang zwischen Indoor- und GPS-Ortung? ...

3) Notwendigkeit einer nutzerseitigen Aktivierung der Ortungsfunktion



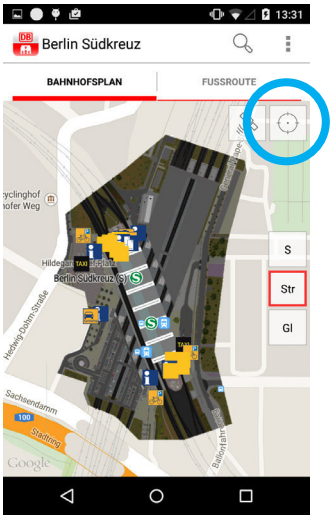
Ort: Bahnhofsplans
Darstellungselemente: Fadenkreuz-Icon

Problembeschreibung: Wird die App gestartet, wird zunächst der Bahnhofsplan ohne den Standort des Nutzers angezeigt. Der Nutzer erkennt nicht, wo er sich befindet.

Mögliche Ursache: Der Nutzer erwartet, dass die Ortung automatisch aktiviert ist, wie er das aus anderen Apps kennt (z.B. Google Maps).

Bewertung: siehe unten
Empfehlung: siehe unten

4) Funktion des Fadenkreuz-Icons abweichend von der gängigen Verwendung



Ort: Bahnhofsplan
Darstellungselemente: Fadenkreuz-Icon

Problembeschreibung: Der Nutzer versteht nicht, was ein Tippen auf das Fadenkreuz-Icon bewirkt und kann deshalb nicht seinen Standort ermitteln.

Mögliche Ursachen:
Andere Erwartung: Der Nutzer wird - wie von anderen Apps gewohnt - einen bestimmten Effekt vom Fadenkreuz-Icon erwarten (nämlich: Standort wird ermittelt, blauer Punkt wird in der Mitte der Karte angezeigt und die Karte entsprechend ausgerichtet). Dies ist hier nicht der Fall.

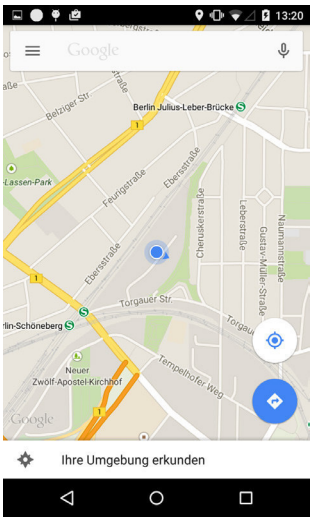
Fehlendes visuelles Feedback: Es fehlt eine direkte visuelle Rückmeldung über den Effekt der Aktivierung. Je nach Zoomstufe wird der Nutzer den blauen Punkt nicht sehen, zudem erfolgt keine Ausrichtung der Karte. Auch die Aktivierung des W-LANs auf dem Gerät geschieht im Hintergrund.

Bewertung: siehe unten
Empfehlung: siehe unten

Bewertung: Die möglichen Usability-Probleme 3 und 4 könnten zusammen dazu führen, dass der Nutzer den eigenen Standort nicht findet oder davon ausgeht, dass die App diese Funktion nicht besitzt. Er muss seinen Standort dann anhand von Informationen im Raum identifizieren und mit einem nahe gelegenen POI abgleichen. ...

Empfehlung:

» Bei eingeschaltetem W-LAN die Ortung automatisch vornehmen und visuell darstellen (die Karte zoomt auf einen bestimmten Maßstab ein, der eigene Standort befindet sich in der Mitte dieser Darstellung)
» Das Fadenkreuz-Icon übernimmt die Funktion einer Zentrierung des eigenen Standorts auf der Karte
» eventuelle Fehler und Ungenauigkeiten bei der Ortung sollten dem Nutzer kommuniziert werden, damit er damit umgehen kann



Referenzbeispiel Google Maps: Nach dem Start der App wird der eigene Standort automatisch im Zentrum dargestellt.

NAVIGATIONSSTRUKTUR UND -ELEMENTE

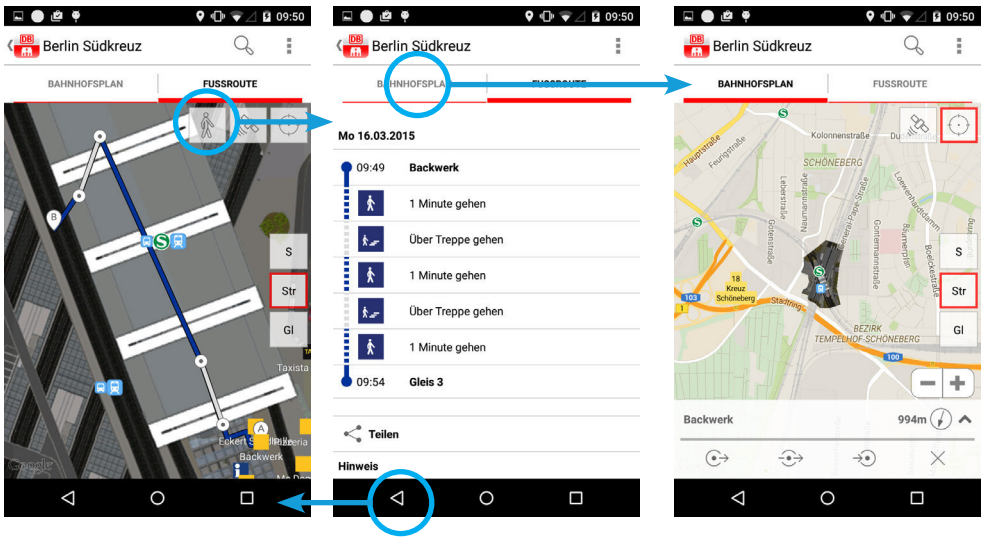
5) Verwechslung von „Bahnhofsplan“ und „Fußroute“ möglich

Ort: Bahnhofsplan/Fußroute
Darstellungselemente: Navibar Tabs

Problembeschreibung: Hat der Nutzer eine Fußroute ermittelt, so erscheint diese als Darstellung auf dem Bahnhofsplan. Wechselt der Nutzer jedoch in den Bereich „Bahnhofsplan“ so verschwindet die Route. Dies könnte besonders nach einem Wechsel in die Textnavigation verwirrend sein, da der Nutzer versuchen könnte, über den Tab „Bahnhofsplan“ zurück zur Routen-Kartenansicht zu wechseln.

Mögliche Ursachen: In der App befinden sich „Bahnhofsplan“ und „Fußroute“ auf gleichrangigen Navigationsebenen. Die Fußroute könnte aber auch Bestandteil der Kartenansicht verstanden werden. Beachten: Einbindung der Funktionen in andere App? ...

Bewertung: ...
Empfehlung: ...



Bei Wechsel in die Bahnhofsplan-ansicht verschwindet die Route

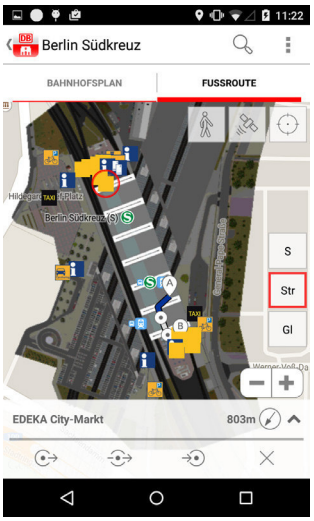
6) Unscharfe Trennung von „Bahnhofsplan“ und „Fußroute“

Ort: Bahnhofsplan/Fußroute
Darstellungselemente: Navibar Tabs

Problembeschreibung: Hat der Nutzer eine Fußroute ermittelt, so erscheint diese auf dem Bahnhofsplan. Wählt er über die Suchen-Funktion einen weiteren POI aus, so wird dieser zusätzlich auf der Karte neben der Fußroute markiert. So entsteht eine Mischung der beiden Navigationsbereiche „Fußroute“ und „Bahnhofsplan“, die im Konflikt mit oben genannter (getrennter) Verwendung steht.

Mögliche Ursachen: siehe oben

Bewertung: ...
Empfehlung: ...



Der Nutzer befindet sich im Bereich Fußroute und hat einen zusätzlichen Ort ausgewählt.

APP-BEREICH BAHNHOFSPLAN (KARTENDARSTELLUNG)

Visualisierung / Bezeichnungen

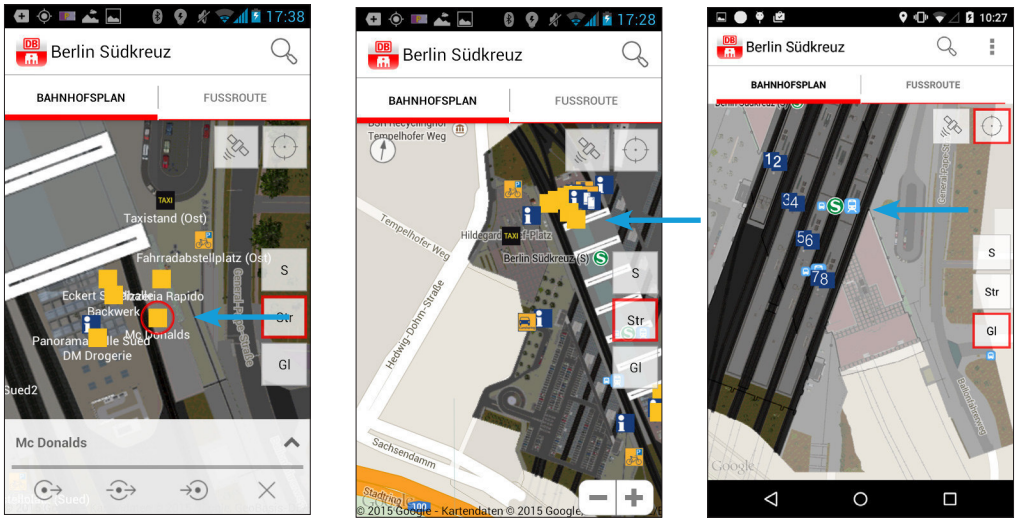
7) Visualisierung des Bahnhofsplans unübersichtlich

Ort: Bahnhofsplan
Darstellungselemente: Karten bzw. Plandarstellung

Problembeschreibung: Die Darstellung des Bahnhofsplans wirkt unübersichtlich, so dass die schnelle Erkennbarkeit von Informationen teilweise schwierig ist.

Mögliche Ursachen: Realitätsnahe Darstellung des Gebäudes, der Gleise usw. erschweren das schnelle Auffinden von Informationen. Einander überlagernde Bezeichnungen in der Kartendarstellung erschweren das Lesen. Die S-Bahn und Bahn-Icons von Google Maps bleiben eingeblendet, so dass sie andere Bezeichnungen überlagern können. Fehlende Icons erschweren die Erkennbarkeit einzelner POI.

Bewertung:
Empfehlung:



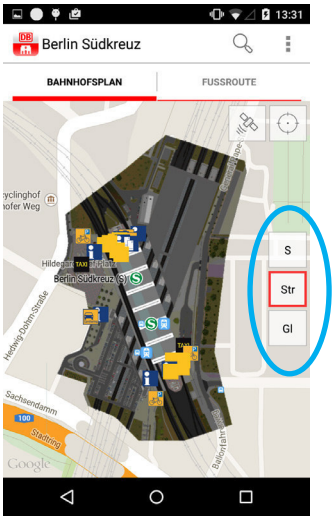
8) Ebenenbezeichnungen nicht intuitiv verständlich

Ort: Bahnhofsplan
Darstellungselemente: Ebenenbezeichnungen

Problembeschreibung: S, Str und Gl sind für den Nutzer nicht intuitiv verständlich.

Mögliche Ursachen: Die Abkürzungen sind nicht gelernt, wie etwa UG, EG und OG. Die Ebenen Gleise (Gl) sowie Straße/Bahnhofsvorhallen (Str) entsprechen sich (?).

Bewertung: ...
Empfehlung: Abkürzungen umbenennen in EG und OG.



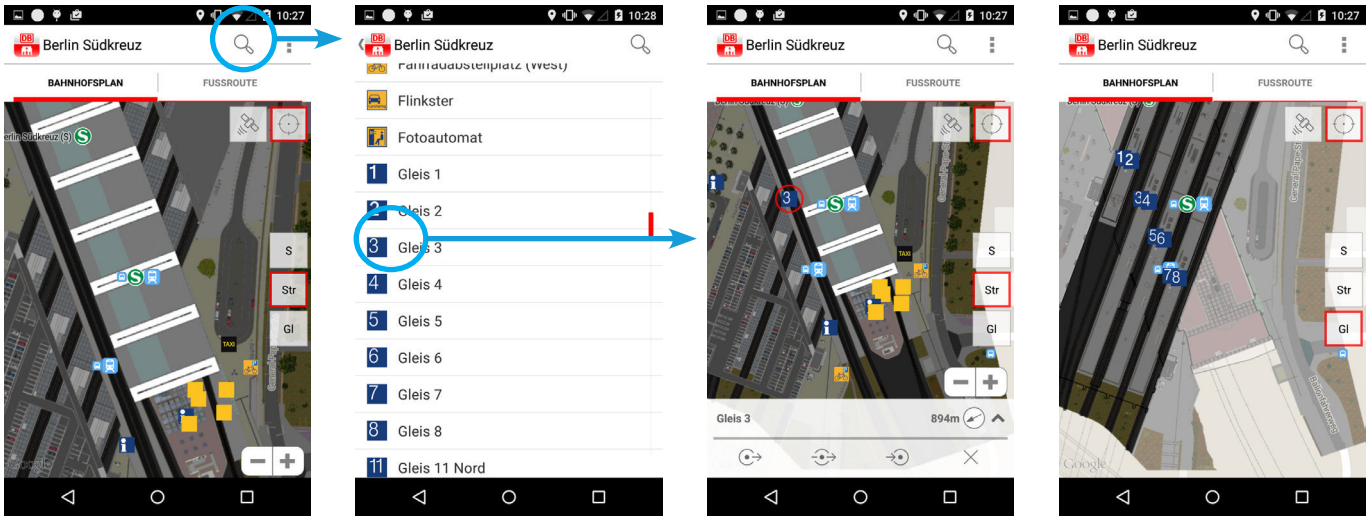
9) Vermischung verschiedener Ebenendarstellungen durch Suchfunktion

Ort: Bahnhofsplan
Darstellungselemente: Kartendarstellung Ebenen

Problembeschreibung: Wählt der Nutzer über die Suchfunktion einen POI auf einer anderen als der aktuell dargestellten Ebene, so ändert sich die Darstellung nicht. Der Punkt wird zusätzlich zu den bereits dargestellten Elementen auf der falschen Ebene dargestellt.

Mögliche Ursachen: Suchfunktion bewirkt keinen Wechsel der Ebenendarstellung

Bewertung: ...
Empfehlung: ...

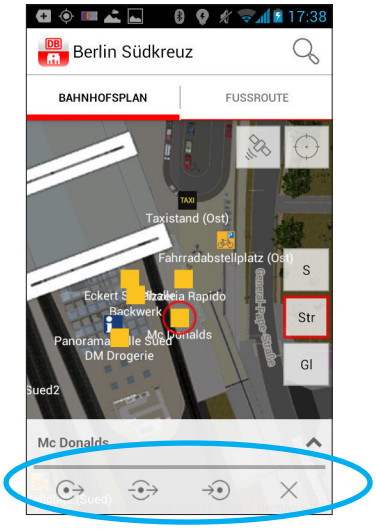


Darstellung nach Auwahl über Suchfunktion: falsche Ebene

korrekte Ebenendarstellung

Navigation

10) Navigationelemente „von“, „nach“ und „via“ schwer unterscheidbar



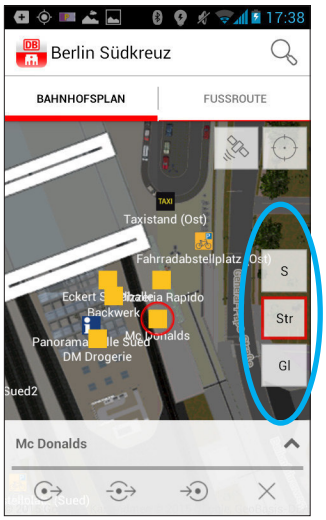
Ort: Bahnhofsplan/Fußroute
Darstellungselemente: Navigationselemente

Problembeschreibung: Um, ausgehend von einem ausgewählten POI eine Route zu berechnen, kann der Nutzer über die Icons am unteren Bildrand in die Routensuche wechseln. Die Icons sind jedoch sehr ähnlich, so dass die Gefahr der Verwechslung besteht.

Mögliche Ursachen: Die Icons sind ihrer Darstellung zu ähnlich. Die mittlere Darstellung („via“) bezeichnet zudem eine Sonderfunktion, die nur selten vorkommen wird.

Bewertung: ...
Empfehlung: „via“ kann als Option in der Suchmaske ausgewählt werden, wird aber hier entfernt. ...

11) Notwendigkeit einer nutzerseitigen Auswahl der Ebene



Ort: Bahnhofsplan
Darstellungselemente: Ebenendarstellung / Ebenen-Icons

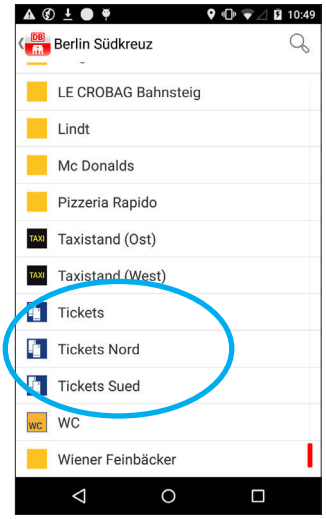
Problembeschreibung: Für den Nutzer könnte die manuelle Auswahl der eigenen Ebene verwirrend sein, wenn er nicht genau weiß, wo er sich befindet, bzw. er nicht erkennt, dass er diesen Schritt ausführen muss.

Mögliche Ursachen: Nutzer weiß nicht, dass er diesen Schritt ausführen muss.

Bewertung: ...
Empfehlung: ...

Suchfunktion

12) Bezeichnungen der POI teilweise nicht eindeutig oder nicht aussagekräftig



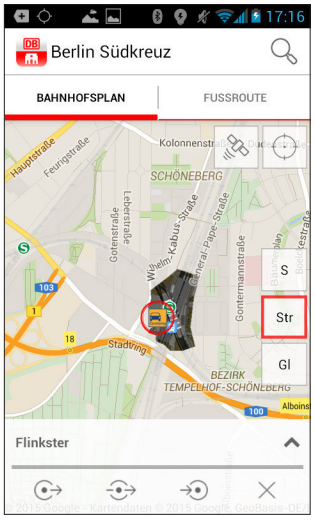
Ort: Suche
Darstellungselemente: Bezeichnungen der POI

Problembeschreibung: Die Bezeichnungen der POI könnten für den Nutzer nicht eindeutig oder nicht aussagekräftig sein.

Mögliche Ursachen: Die Bezeichnungen basieren wahrscheinlich auf den offiziellen Bezeichnungen der DB (z.B. Panoramahalle Nord), die nicht dem normalen Sprachgebrauch der Nutzer entsprechen.
Die Aufteilung der Bezeichnungen in Nord/Süd und Ost/West (z.B. bei Tickets) entspricht nicht den Informationsbedürfnissen (z.B. Wo ist der nächste Ticketautomat? oder: Wo kann ich Tickets kaufen?)

Bewertung: ...
Empfehlung: Sprache der Nutzer sprechen, Suchanfragen zusammenfassen und alle enstprechenden POI darstellen ...

13) Schlechte Erkennbarkeit des Standorts eines POI nach Suchvorgang



Ort: Bahnhofsplan
Darstellungselemente: Bahnhofsplan mit ausgewähltem POI

Problembeschreibung: Wählt der Nutzer über die Suchfunktion einen POI aus, so erkennt er nicht wo sich dieser genau befindet.

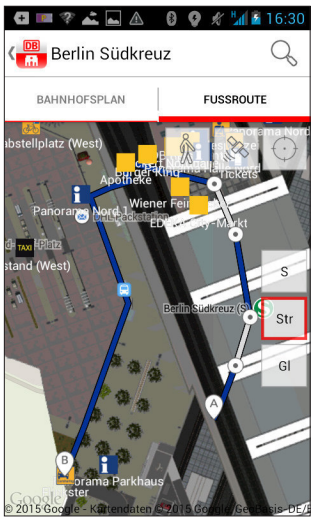
Mögliche Ursachen: Die Kartendarstellung erfolgt in einem großen Maßstab, der für die Darstellung dieser Information ungeeignet ist.

Bewertung: ...
Empfehlung: Höhere Zoomstufe für die Darstellung wählen

APP BEREICH FUSSROUTE (NAVIGATION)

Visualisierung / Bezeichnungen

14) Routendarstellung ohne Ebenenbezug



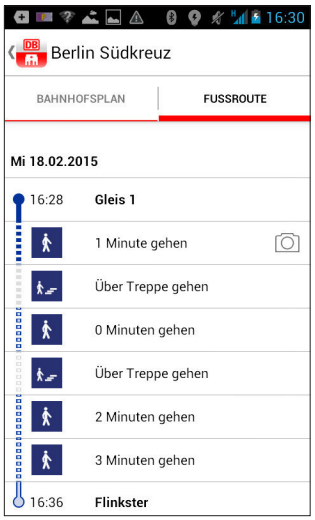
Ort: Fußroute
Darstellungselemente: Plandarstellung mit Route

Problembeschreibung: Der Nutzer erkennt nicht über welche Ebenen die Route verläuft.

Mögliche Ursachen: Die Darstellung der Route liefert keine Hinweis darauf, auf welcher Ebene sich die Route befindet. Bei einem Wechsel der Ebenendarstellung ändert sich die Routendarstellung nicht. Sie wird über alle Ebenen gleich dargestellt. Der Nutzer muss wissen, auf welcher Ebene er sich gerade befindet und die entsprechende Ebene einblenden.

Bewertung: ...
Empfehlung: Ebenenunterschiede deutlicher darstellen (z.B. ausgrauen), Ebenenwechsel automatisieren ...

15) Zu geringer Informationsgehalt in der textbasierten Navigation



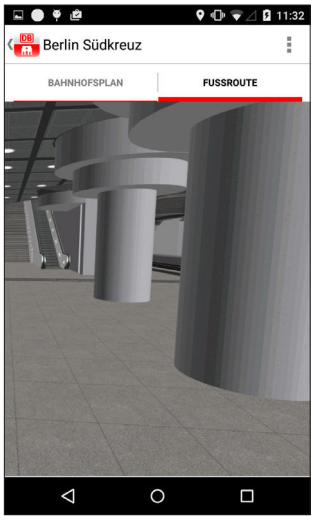
Ort: Fußroute
Darstellungselemente: Texte

Problembeschreibung: Die textbasierte Darstellung enthält Anweisungen („1Minute gehen", „Rolltreppe fahren"), die in der Praxis nicht umsetzbar sind.

Mögliche Ursachen: Es fehlen Richtungsangaben, genauere Zeit oder Streckenangaben, usw.

Bewertung: ...
Empfehlung: siehe 16)

16) Zu geringer Informationsgehalt in der Bilddarstellung für die Navigation



Ort: Fußroute
Darstellungselemente: Bilddarstellung

Problembeschreibung: Die dargestellen Fotos/Grafiken tragen nicht zur besseren Orientierung bei.

Mögliche Ursachen: Es fehlen Richtungsangaben in den Bildern. Zum Teil werden die Bilder nicht ganz dargestellt.

Bewertung: ...
Empfehlung: Text und Bildinformationen kombinieren, Pfeile einfügen ...

Navigation

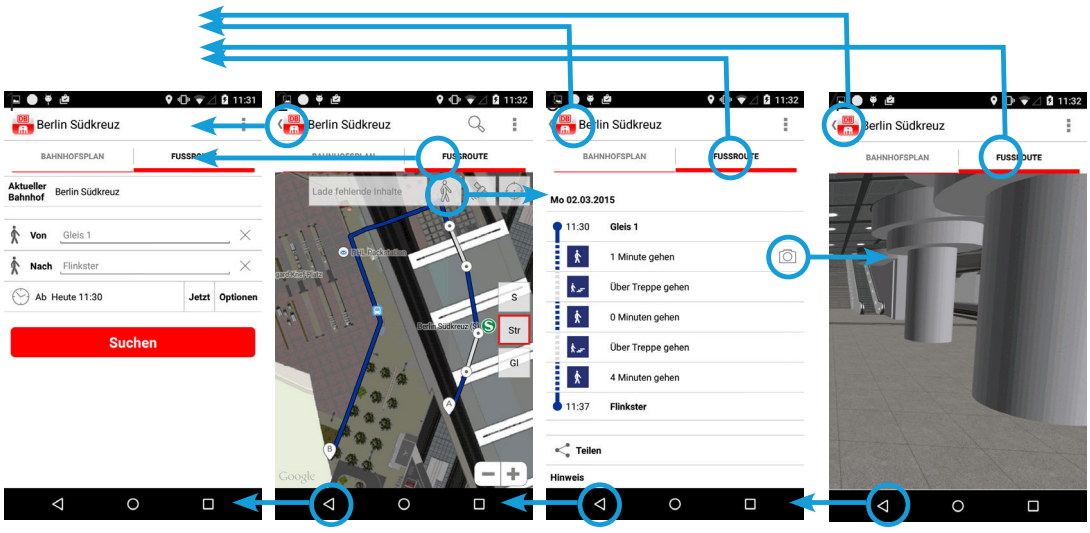
17) Komplizierter Wechsel zwischen verschiedenen Darstellungsformen der Fußroute (Karte, Text, Foto)

Ort: Fußroute
Darstellungselemente: Navigationselemente zurück, nach oben, Tabs

Problembeschreibung: Der Wechsel zwischen den verschiedenen Darstellungsformen der Fußroute ist nur über die „Zurück"-Navigation möglich. Sowohl die „Nach oben"-Funktion als auch ein Tippen auf „Fußroute" haben die Einblendung des Suchformulars zur Folge. Anschließend muss die Suche erneut ausgeführt werden. Dies kann verwirrend für den Nutzer sein.

Mögliche Ursachen: Das Problem scheint in der Navigationsstruktur begründet. Die Textnavigation ist eine Unterebene der Kartendarstellung, das Foto eine Unterebene der Textdarstellung. Tatsächlich handelt es sich jedoch um verschiedene Darstellungen einer Navigation.

Bewertung: ...
Empfehlung: ...



18) Verwechslung „Route ändern“ und „Suchfunktion“ möglich

Ort: Bahnhofsplan/Fußroute
Darstellungselemente: Navibar Tabs

Problembeschreibung: Hat der Nutzer eine Fußroute ermittelt, so erscheint diese als Darstellung auf dem Bahnhofsplan. Um die Route zu ändern, muss der Nutzer erneut auf „Fußroute“ tippen, oder über den „Zurück“ oder „Nach oben“-Button in die Formularansicht wechseln. Der Nutzer könnte jedoch auch versuchen über die (erst jetzt wieder sichtbare) Suchen-Funktion diesen Effekt zu erreichen.

Mögliche Ursachen: Das Suchen-Formular wird vom Nutzer mit der Suchfunktion (Lupe) verwechselt.

Bewertung: ...
Empfehlung: ...

falscher Weg

richtiger Weg

19) Zu geringe Hervorhebung und ungünstige Platzierung des Fußrouten-Navigationselements

Ort: Bahnhofsplan/Fußroute
Darstellungselemente: Navigationselemente

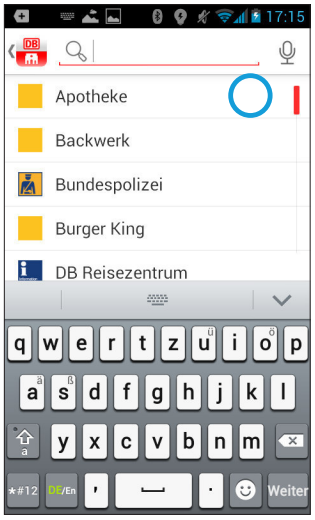
Problembeschreibung: Wird eine Route berechnet so erscheint in der Kartendarstellung ein zusätzliches Fußgänger-Icon, dass auf die textbasierte Beschreibung der Routenführung und damit auf eine andere Navigationsebene verweist. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass dieses vom Nutzer nicht bemerkt wird.

Mögliche Ursachen: Es handelt sich um ein Navigationselement, dass in seiner Darstellung den „Ansicht ändern"-Icons gleicht. Zudem steht es mit ihnen in einer Reihe.

Bewertung: ...
Empfehlung: ...

Routensuche (Formulargestaltung)

20) Routensuche „von hier“ nicht möglich



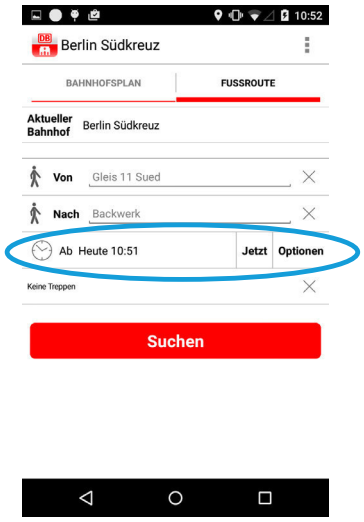
Ort: Fußroute > von / nach
Darstellungselemente: Auswahlliste

Problembeschreibung: Der Nutzer kann keine Suchanfrage vom eigenen Standort zu einem Ziel durchführen.

Mögliche Ursachen: Der Punkt „von hier“ oder „eigener Standort“ fehlt in der Auswahlliste.

Bewertung: ...
Empfehlung: Funktion „eigener Standort“ integrieren.

21) Optionen visuell verknüpft mit Zeitauswahl



Ort: Fußroute
Darstellungselemente: Optionen

Problembeschreibung: Der Nutzer könnte die das Optionen-Feld übersehen.

Mögliche Ursachen: Optionen steht in einer Reihe mit der Zeitauswahl so dass dieses Element als dazu gehörig wahrgenommen werden könnte

Bewertung: ...
Empfehlung: Elemente visuell trennen.

22) Zeitauswahl nicht relevant

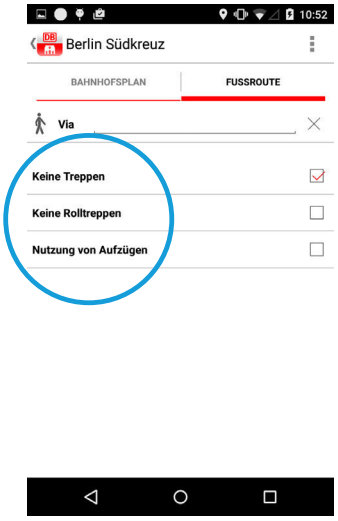
Ort: Fußroute
Darstellungselemente: Zeitauswahl

Problembeschreibung: Die Zeitauswahl ist für den Nutzer nicht relevant.

Mögliche Ursachen: Da keine Verbindung gesucht wird, ist die Auswahl des Startzeitpunkts nicht relevant.

Bewertung:
Empfehlung: Anzeige von „Reisedauer“ und Strecke in den Ergebnissen, Zeiteinstellung weglassen.

23) Keine eindeutige Bezeichnung der Optionen



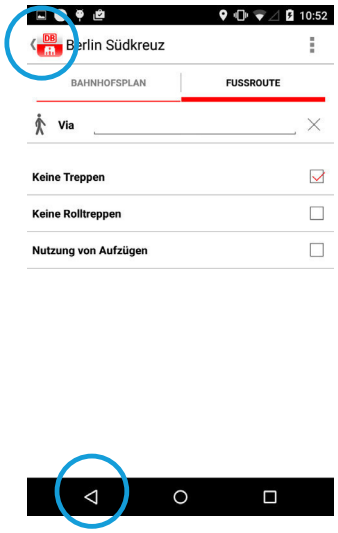
Ort: Fußroute > Optionen
Darstellungselemente: Checkboxen

Problembeschreibung: Der Nutzer könnte die Auswahl zwischen den drei Optionen „Keine Treppen“, „Keine Rolltreppen“ und „Nutzung von Aufzügen“ verwirrend finden.

Mögliche Ursachen: Unterschiedliche Positive und negative Formulierung der Optionen

Bewertung: ...
Empfehlung: ...

24) Bestätigen der Optionen durch Zurück-Funktion



Ort: Fußroute > Optionen
Darstellungselemente: „zurück"-Navigationselement

Problembeschreibung: Der Nutzer weiß nicht, wie er die eingestellten Optionen bestätigen kann.

Mögliche Ursachen: Im Gegensatz zum Popup bei der Zeitauswahl (wo sich die Auswahl durch ´"OK" bestätigen lässt) hat die Optionen-Auswahl den Wechsel auf eine tiefere Navigationsebene zur Folge, die sich nur durch die „Nach oben"-Funktion der App oder den „zurück"-Button bestätigen lässt.

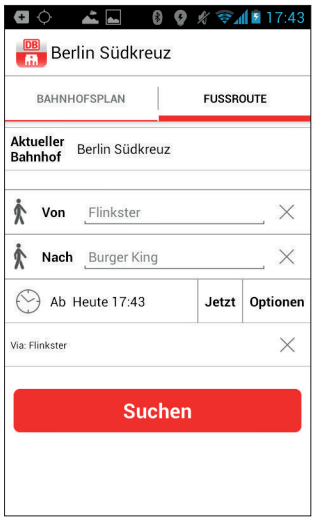
Bewertung: ...
Empfehlungen: ...

Vorschlag zu Problem 20-24 Formulargestaltung

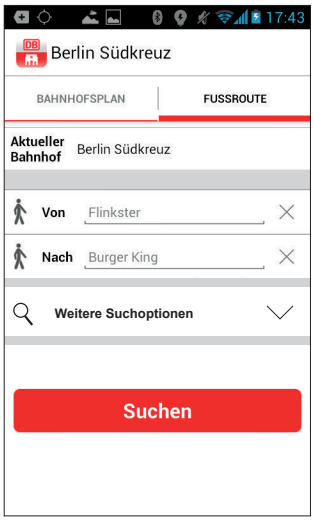
» Zeiteinstellung weglassen
» Ausklappmenü für Optionen
» Anpassen der Bezeichnungen

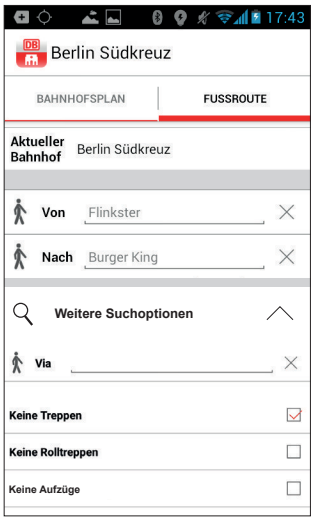
nach der Suche Strecke und benötigte Zeit anzeigen.

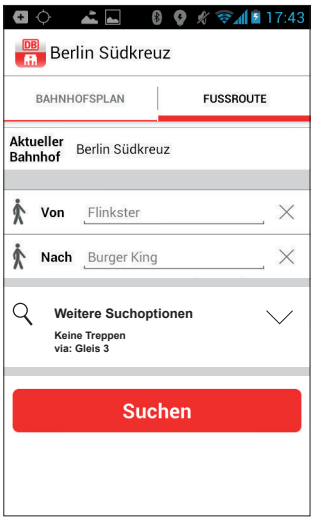
...



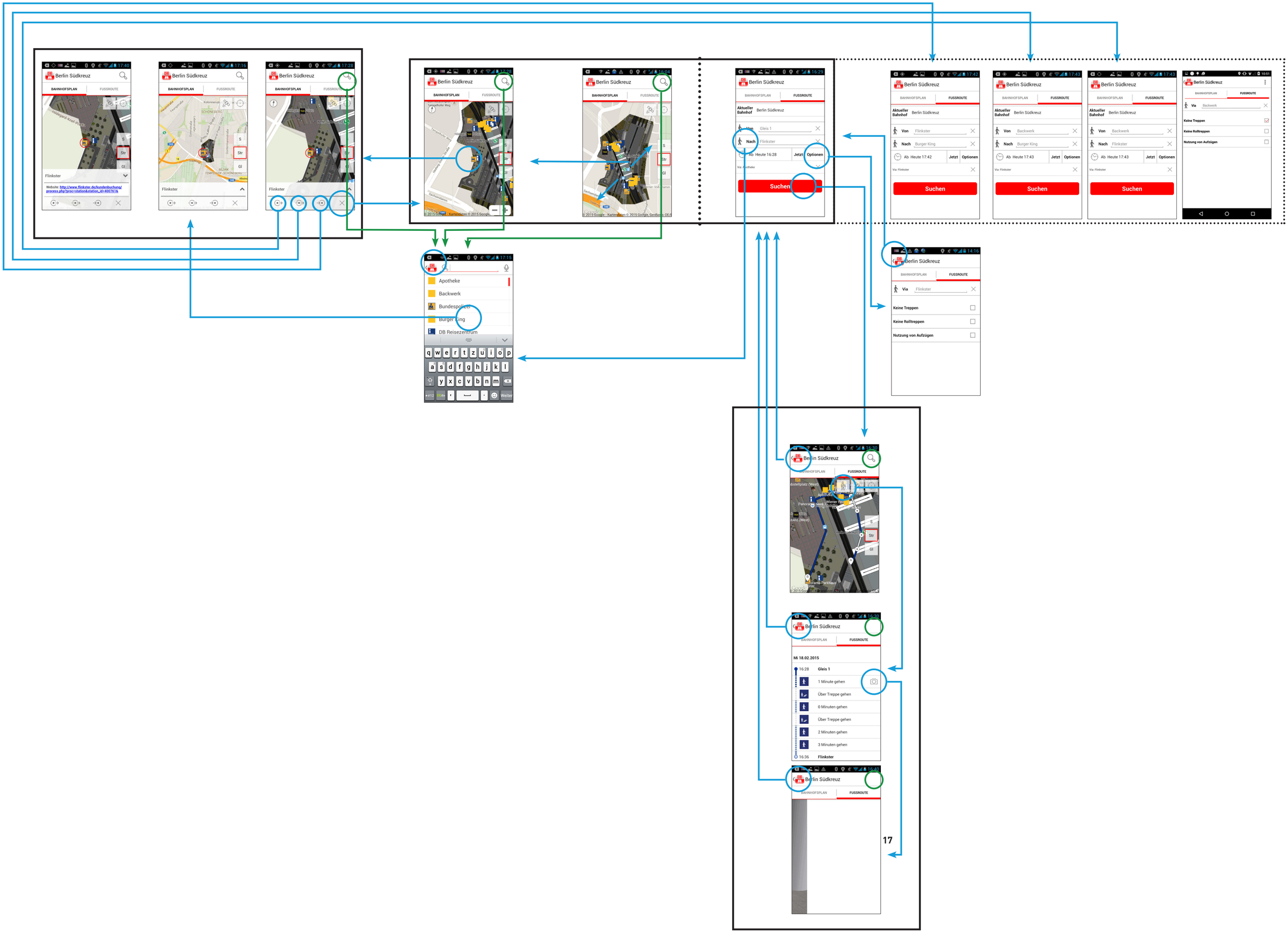
Original







Vorschlag Formulargestaltung


Berlin Südkreuz
BAHNHOFSPLAN
FUSSROUTE
Flinkster
Website: http://www.flinkster.de/kundenbuchung/process.php?proc=station&station_id=4007616
Apotheke
Backwerk
Bundespolizei
Burger King
DB Reisezentrum
Aktueller Bahnhof
Von
Nach
Via
Ab Heute 16:28
Jetzt
Optionen
Suchen
Keine Treppen
Keine Rolltreppen
Nutzung von Aufzügen
Mi 18.02.2015
16:28 Gleis 1
1 Minute gehen
Über Treppe gehen
0 Minuten gehen
2 Minuten gehen
3 Minuten gehen
16:36 Flinkster

A.13 Skizze Kraftzentrum Bahnhof

Kraftzentrum Bahnhof

Die Verkehrsschnittstelle als Energieerzeuger und die Einbindung der Nutzer in soziotechnische Transformationsprozesse.

© Universität Potsdam: Karla Fritze

Kraftzentrum Bahnhof

(Be-)Deutungswandel der Bahnhöfe in der postfossilen Gesellschaft

Fehlt: kurzer Claim

© Universität Potsdam: Karla Fritze

Ausgangslage

Auf der Suche nach einem neuen (Be-)Deutungs-Raum

„Was die Dampfmaschine für die moderne Industrie, das war die rollende Dampfmaschine, also die Lokomotive, für die moderne Stadt.“ (Dürr 1997:13) Der Bahnhof im Zeitalter der Industrialisierung war nicht nur Motor der Stadtentwicklung. Er war zugleich ein symbolischer Raum, in dem gesellschaftlicher Wohlstand, Fortschritt und moderne Mobilität Strahlkraft entfalteten.

Mit dem Aufstieg neuer Verkehrsmittel und dem Wandel zur postindustriellen Gesellschaft verliert der Bahnhof zunehmend an Bedeutung. Die funktionale Erweiterung von der bloßen Verkehrs-schnittstelle hin zum Shopping-Areal kann nicht darüber hinwegtäuschen, dass der Bahnhof im 21. Jahrhundert einen symbolischen Bedeutungs-verlust erfahren hat. Es ist ein symbolisches Vakuum entstanden, das sich durch ein „24/7-Shopping-Erlebnis“ nicht füllen lässt. Der Bahnhof, der wieder im Zentrum der Gesellschaft steht, braucht eine Funktionalität, die Ausdruck des gesellschaftlichen Pulsierens ist.

Transformation

Moderne Gesellschaft und ihre Herausforderungen

Megatrends transformieren das Handlungsumfeld von Politik und Wirtschaft, führen zu einem Wandel von Nutzerbedürfnissen und sind Treiber der Zukunftsmärkte. In ihrem Zusammenwirken verändern Megatrends Marktkontexte nachhaltig und sind damit ein wichtiger Impuls für Innovationen.

Die ökologische Bedrohung die vom Megatrend Klimawandel ausgeht, hat inzwischen weitreichende politische Maßnahmen (Energiewende) und gesetzliche Regulationen provoziert. Auf der Individualebene wird der Klimawandel durch Lebensstile und Wertekategorien flankiert, die dem Prinzip der Nachhaltigkeit hohe Bedeutung zuschreiben. Hochgradig individualisierte Lebensstile werden durch die Möglichkeiten der digitalen Medien integriert. Gleichzeitig beschleunigt und dynamisiert die Echtzeit-Kommunikation den Alltag und vervielfältig die Entscheidungsmöglich-keiten.

Welchen Platz nimmt der Bahnhof in dieser Gesellschaft ein?

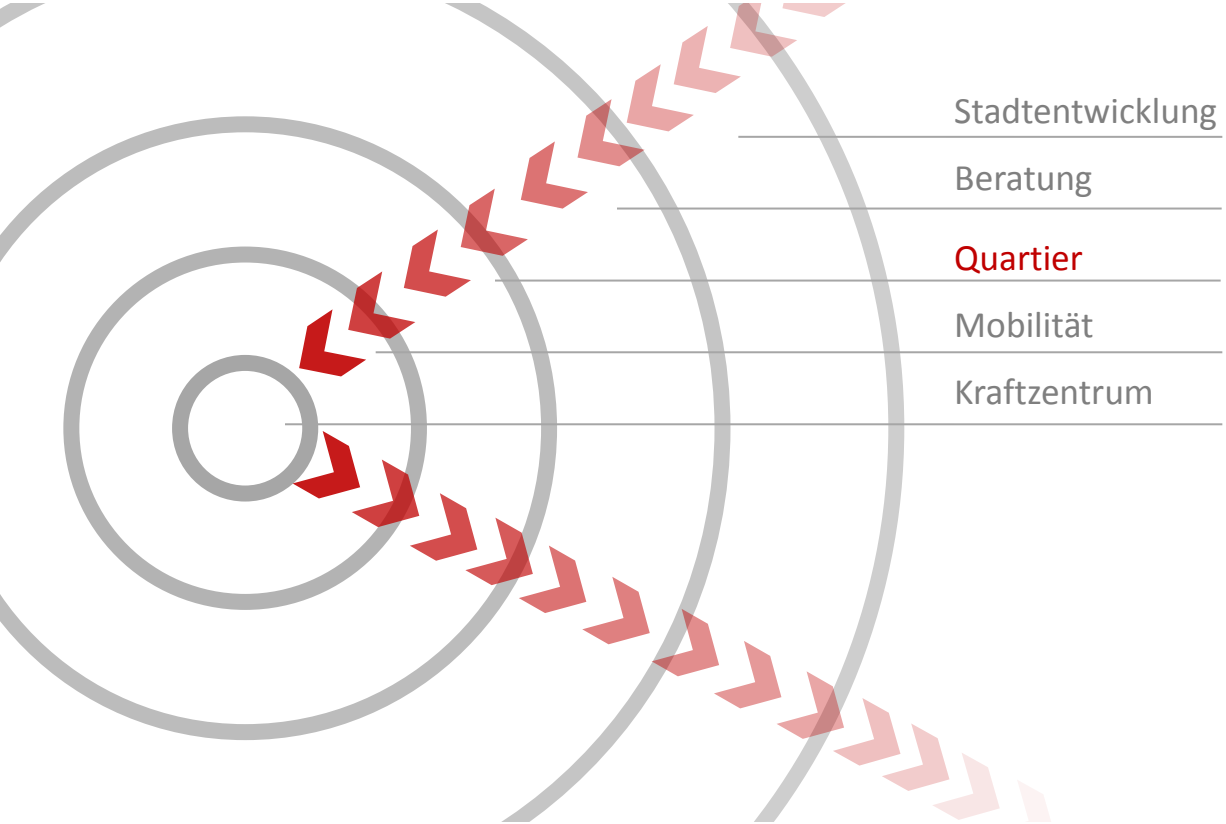
Kraftzentrum Bahnhof

Verkehrs- und Energieknotenpunkt in der postfossilen Gesellschaft

Der Bahnhof kann wieder zum Raum moderner Gesellschaften werden, wenn er seine Funktionalität neu definiert. Zum symbolischen Raum wird er, wenn seine (neue) „story“ an zentrale Deutungsmustern der Gesellschaft anknüpft.
In Anbetracht der Bedrohungen, die vom Klimawandel ausgehen, besteht eine der größten Herausforderung der modernen Gesellschaft in der Bewältigung einer Verkehrs- und Energiewende. Hier kann insbesondere der Bahnhof einen Platz und eine Funktion einnehmen, wenn er nicht länger nur als Verkehrsschnittstelle, sondern auch als Knotenpunkt regenerativer Energieerzeugung gedacht wird. Im Zeitalter dezentraler Energieerzeugungssysteme wird der Bahnhof zum sichtbaren Energiezentrum für ein Stadtquartier.
Symbolisch kann an die Deutungsmuster der modernen Gesellschaft angeknüpft werden, wenn die technische Möglichkeit der Umsetzung eines Energiebahnhofs gekoppelt wird mit dem gesellschaftlichen Trend der Individualisierung, Nachhaltigkeit und dem Bedürfnis nach Autarkie. Der Energiebahnhof muss gemeinsam mit den Stadtteilbewohnern, für die er Energie erzeugt, gestaltet werden, um diese Bedürfnisse und Trends angemessen zu berücksichtigen.
Als Energie- und Verkehrszentrum wird der Bahnhof zu einem konzentrischen Kraftzentrum und zu einem Symbol der modernen Gesellschaften.

Konzentrische Kreise

Wie das Kraftzentrum seine Wirkung entfaltet

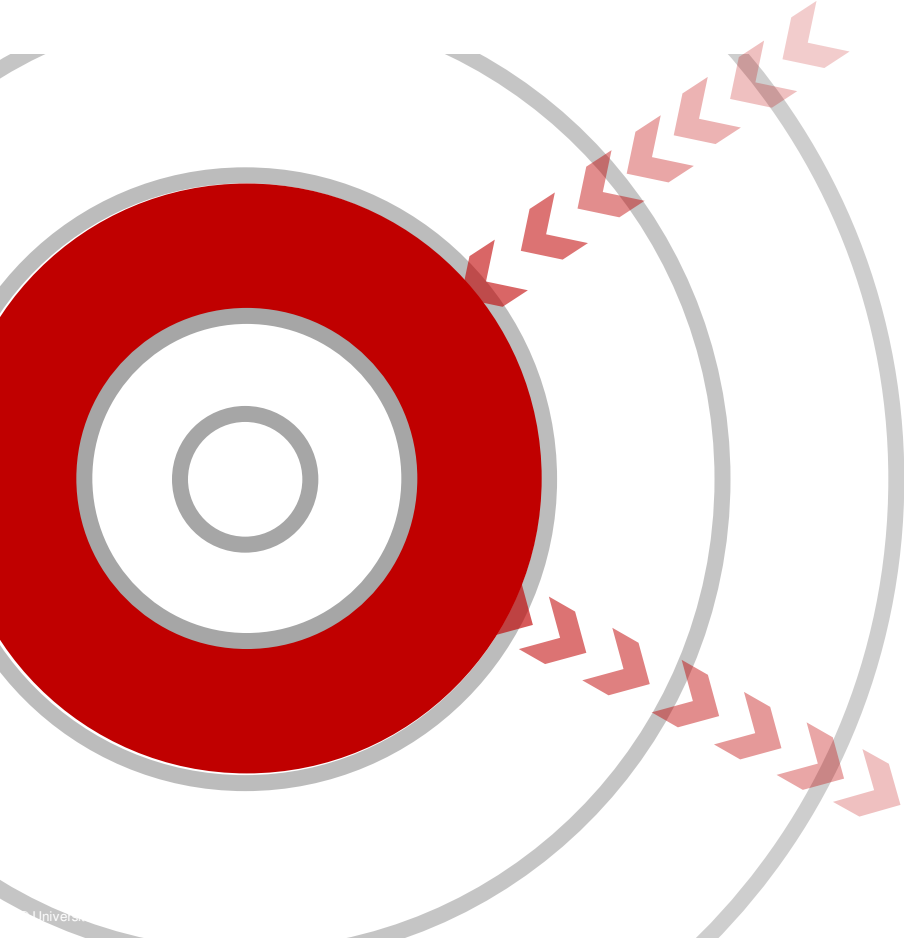


Der Bahnhof als Kraftzentrum entfaltet seine Wirkung in konzentrischen Kreisen.

Als „smartes“ Kraftzentrum fließt der vor Ort regenerativ erzeugte Strom in den Gebäudebetrieb und den Antrieb elektrischer Fahrzeuge. Das Kraftwerk Bahnhof wird so zur Schnittstelle intelligenter und nachhaltiger Mobilität. Die Stadtteilbewohner werden zum Energiemanager *ihres* Bahnhofs: Sie nutzen die dezentral erzeugte Energie für eine saubere Mobilität, erwerben Anteile an Erzeugungsanlagen, puffern mit ihren Fahrzeugbatterien Stromschwankungen. Auf diesem Weg wird der Bahnhof nicht nur zum Energieerzeuger, sondern auch zum Energieberater. Es kann sich eine Energie-Community im Bahnhofsumfeld etablieren, die die Infrastruktur nutzt, vorantreibt und Bedürfnisse formuliert, die zum Katalysator für neue Ideen werden.
Geschützt nach innen, aber offen nach außen: Das Kraftzentrum bleibt kein abgeschotteter Bereich, sondern wirkt in die Umgebung. Funktioniert das Zentrum, bleibt das Umfeld nicht lange unberührt.

Ankerpunkte im Quartier

Erste Ideenskizzen auf Basis bisheriger Insights



„Mein Haus, meine PV-Anlage, mein Auto! Ich will energie-autark sein.“

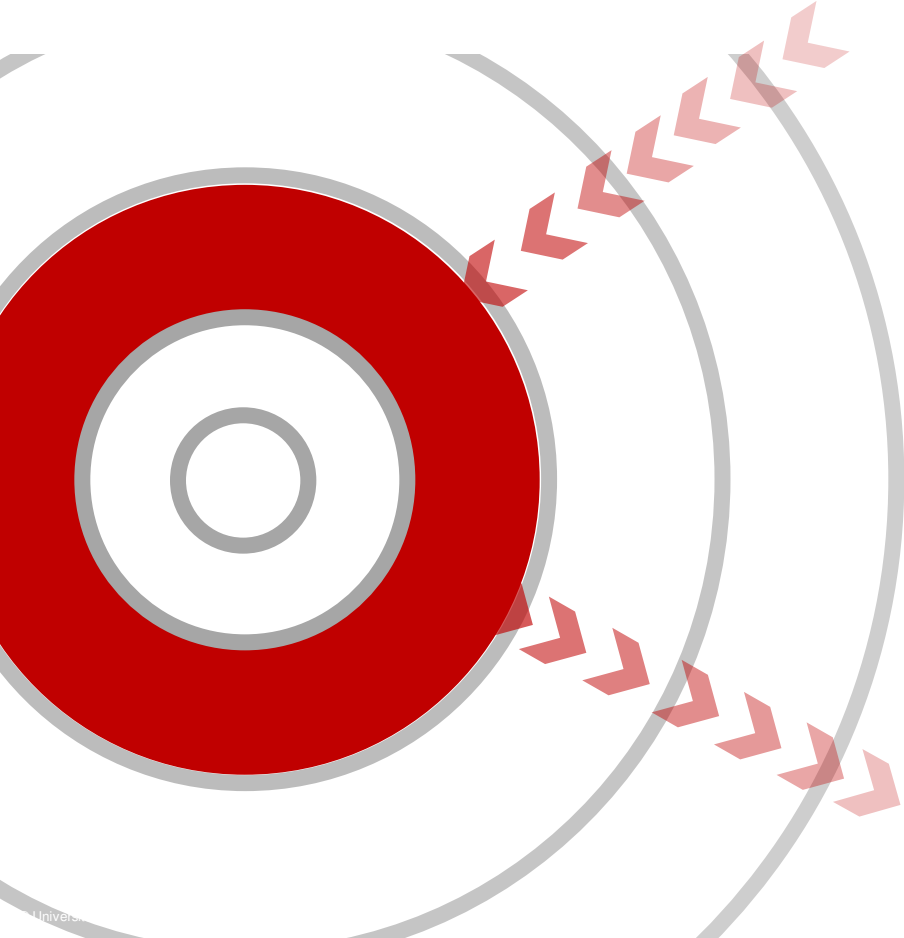
Die Idee

1. Die Bewohner des Bahnhof-Stadtquartiers können Anteile erwerben an den Anlagen zur Erzeugung regenerativer Energien am Bahnhof. Die Rendite wird in Form von „Mobilitätspunkten“ ausgezahlt: Freiminuten für Carsharing, Bikesharing, Bahntickets etc., also sämtliche Mobilitäts-angebote, die der Bahnhof bietet.

2. Wohnungsbaugesellschaften stellen bspw. Dachfläche n zur Verfügung für die Installation von Anlagen zur Erzeugung regenerativer Energien.
Überschüsse werden in das „Kraftzentrum Bahnhof“ eingespeist. Je mehr Strom pro Monat in den Bahnhof fließt, umso mehr Mobilitätspunkte erhalten die Mieter des Hauses. Es entsteht für Mieter ein Anreiz, möglichst energiesparend zu leben, um Mobilitätspunkte zu erhalten. Der Vermieter steigert die Attraktivität seiner Immobilie (Einsatz von regenerativer Energien und Angebot eines Mobilitätskonzepts auf Basis eines Anreizsystems.

Ankerpunkte im Quartier

Erste Ideenskizzen auf Basis bisheriger Insights



„Der Verbrauch von Energie ist nicht spürbar und keine messbare Größe. Wenn ich Gutes tue, dann sollen die anderen das auch sehen.“

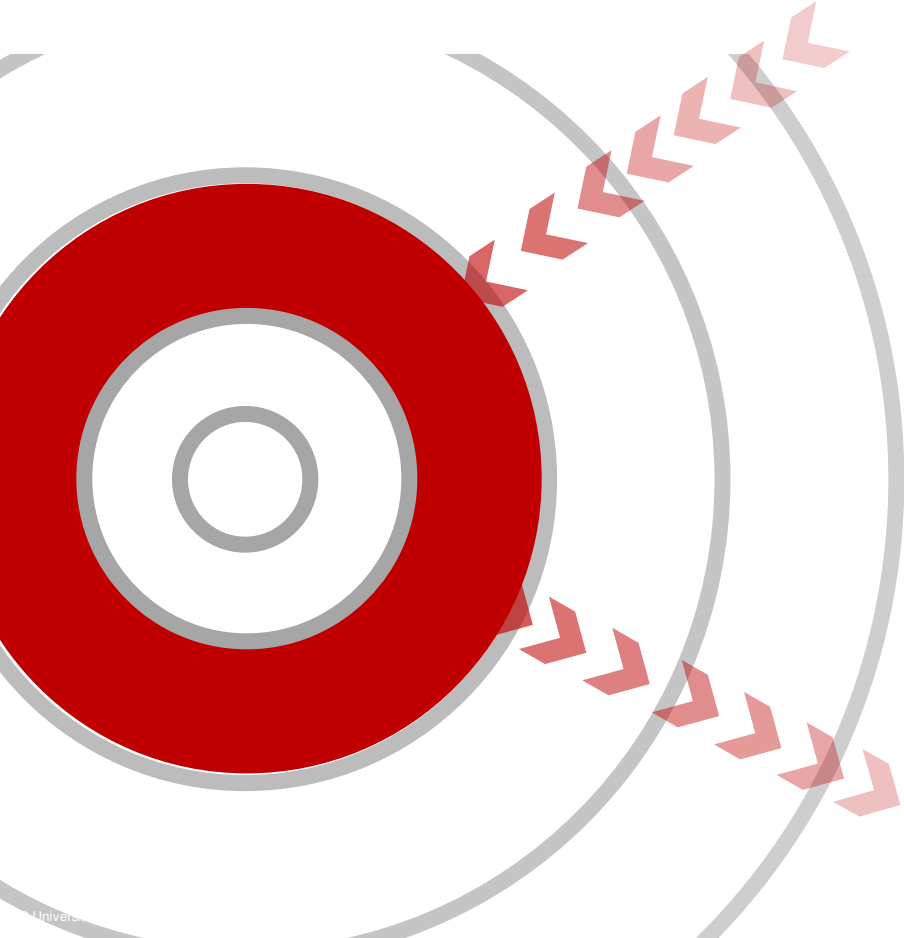
Die Idee

1. Gestaltungs-Wettbewerb: In einem Workshop oder Wettbewerb werden Bewohner des Bahnhof-Quartiers in die Gestaltung der Carsharing-Autos und Bikes ihres Quartiers aufgerufen. Es entsteht ein individuelles Design und Quartiers-Branding. Darüber hinaus findet ein Kreativ-Workshop im Co-Creation-Format (Anwohner, DB S&S, Architekten/Designer) zur Gestaltung der Carsharing- und Bike-Stationen im Quartier und am Bahnhof statt.

2. CO2-Fußabdruck des Quartiers: Entwicklung einer Quartiers-App, welche die CO2-Bilanz des Quartiers abbildet und Anreize gibt zum nachhaltigen Leben im Quartier (Vorbild: Eco-Challenge). Es gibt Informationen, Spiele, Rankings.

Ankerpunkte im Quartier

Erste Ideenskizzen auf Basis bisheriger Insights



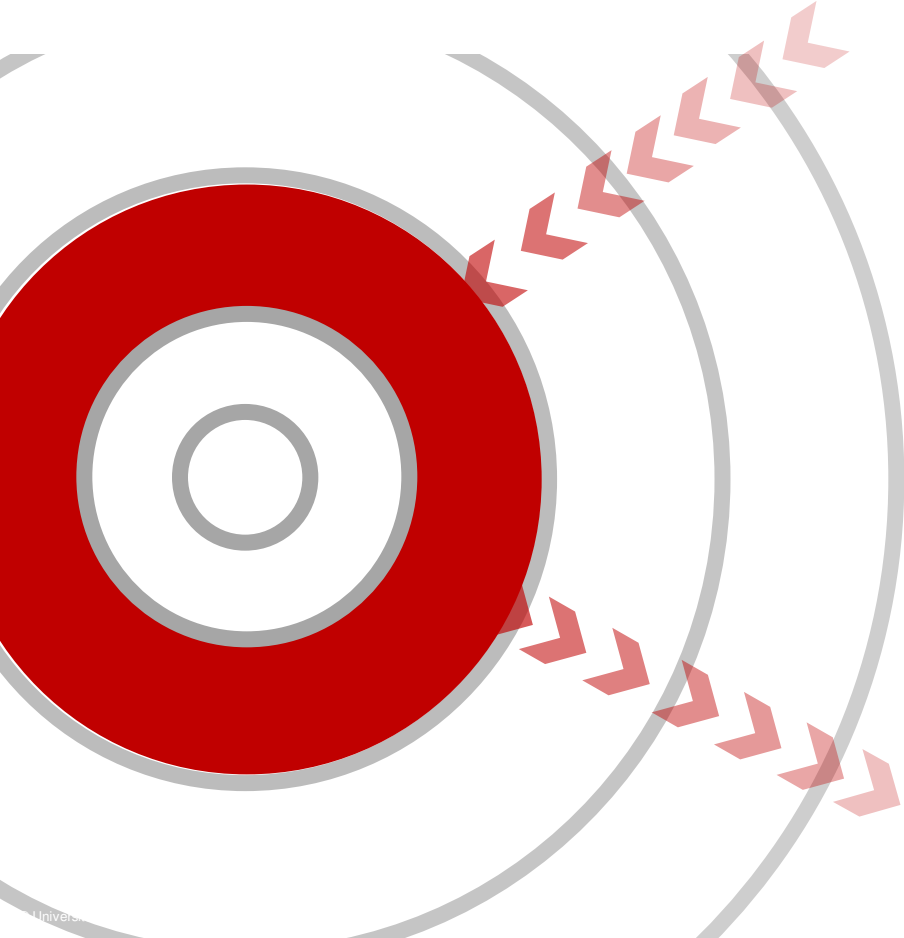
„Der Verbrauch von Energie ist nicht spürbar und keine messbare Größe. Wenn ich Gutes tue, dann sollen die anderen das auch sehen.“

Die Idee

3 Den Wandel sichtbar machen: Im Bahnhofsgebäude wird Startups sichtbare Raumfläche zur Verfügung gestellt. Startups, die sich hier ansiedeln, haben eine Geschäftsidee rund um das Thema Bahnhof, Energie, (vernetzte) Mobilität. Es finden regelmäßig Events statt zur Sichtbarmachung der Aktivitäten. Anwohner im Quartier könnten mit darüber abstimmen, welches Startup sie gerne an „ihrem“ Bahnhof sehen würden. Die Startups müssen für ihre Idee werben-

Ankerpunkte im Quartier

Erste Ideenskizzen auf Basis bisheriger Insights



„Ich teile gerne, aber nur mit Menschen, die ich kenne.“

Die Idee

1. Statt einer Car- und Bikesharing- Station am Bahnhof gibt es viele Stationen im Quartier verteilt. Autos und Fahrräder müssen nicht zur ursprünglichen Station zurückgebracht werden, sondern können an allen Stationen im Quartier und am Bahnhof geliehen und abgestellt werden (Mischung aus freefloating und stationenbasiertem Carsharing: Arealbasiertes CS). Alle Autos und Pedelecs werden mit Strom vom Kraftzentrum versorgt.

2. Wohnungsbaugesellschaften stellen Bewohnern im Quartier elektrische Flotte zur Verfügung („Häuser-/Straßenflotte“). Die Autos sind in der Lage bidirektional zu laden, d.h., die Batterien der Autos können dem Kraftzentrum nur Netzpufferung dienen. So bleibt bspw. Strom, der freigegeben wird, im Quartier.

A.14 Ergebnisse der Kurzbefragung

Kurz-Befragung für die Begleitforschung im Rahmen des Projekts: Intelligente Mobilitätsstation: Zukunftsbahnhof Berlin-Südkreuz

Rückfragen an: Jens Albrecht, InnoZ GmbH

Torgauer Straße 12 -15

D-10829 Berlin

Tel: +49(0)30 – 23 88 84 -156

E-Mail: jens.albrecht@innoz.de

Ausgangssituation

Im Rahmen des Schaufenster Projekts B2 – Erprobungsbahnhof Berlin – Südkreuz: Intelligente Mobilitätsstation (IMS) wurde durch das InnoZ (Innovationszentrum für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel) zur Evaluation innovativer Mobilitätsdienstleistungen eine Befragung von Reisenden am Zukunftsbahnhof Berlin Südkreuz durchgeführt.

Der Erprobungsbahnhof bietet eine Vielzahl verschiedenster Mobilitätsangebote: Car-Sharing-, Ride-Sharing-, Bike-Sharing-, Taxi-, Mietwagen-, Fern- und innovative induktiv ladende Nahverkehrsbus-Stationen lassen den Bahnhof zu einer intelligenten Mobilitätsstation werden. Neben diesen innovativen Angeboten gibt es die klassischen Mobilitätsangebote von Nah- und Fernbahn, Rad und Auto sowie entsprechender Abstellmöglichkeiten.

Inhaltliche Schwerpunkte der Befragung lagen auf dem Verkehrsverhalten und der Wahrnehmung innovativer Mobilitätsangebote von Reisenden im öffentlichen Personenverkehr, insbesondere von Pendlern und Fernreisenden.

Ziel war es die bisherigen Aktivitäten und Ergebnisse des Projekts auf einer übergeordneten, grobkörnigen Ebene ausschnitthaft zu evaluieren und daraus Abschätzungen auf deren Wirkung schließen zu können. Auf diese Weise sollte der Status quo durch die Befragung der bisherigen sowie der potenziellen Nutzer verdeutlicht und auf diesem Wege weitere notwendige Schritte geklärt werden.

Methodik

Die Studie basierte auf einem zweiseitigen, standardisierten paper–and–pencil-Fragebogen (PAPI), mit dem die Interviewenden am 07.09.15 und 08.09.15 eine Vielzahl von Interviews direkt im Feld, d.h. vor und im Bahnhof, durchführten. Der Erhebungszeitraum beschränkte sich auf die Stunden zwischen 09:00 Uhr und 17:00 Uhr.

Gemäß des Projektvorhabens hatte die Studie folgende Themen zum Schwerpunkt:

1. Anlass und Aufenthaltshäufigkeit am Bahnhof Südkreuz
2. Orientierung am Bahnhof
3. Wahrnehmung von Mobilitätsdienstleistungen
4. Soziodemografie

Der erste Schwerpunkt verfolgt ein allgemeines Erkenntnisinteresse, um im weiteren Verlauf der Befragung die gegebenen Antworten der Probanden bewerten zu können. Die Punkte zwei und drei bilden den inhaltlichen Schwerpunkt und wurden teilweise offen abgefragt und im Nachgang geclustert. Der vierte Punkt dient wiederum der Einordnung der Befragten.

Ergebnisse

Insgesamt wurden 103 Personen befragt, von denen sich 39% der Befragten dem männlichen Geschlecht und 61% dem weiblichen Geschlecht zuordneten.

Als Berufspendler bezeichnete sich etwas weniger als ein Drittel der Befragten (Abb. 1)

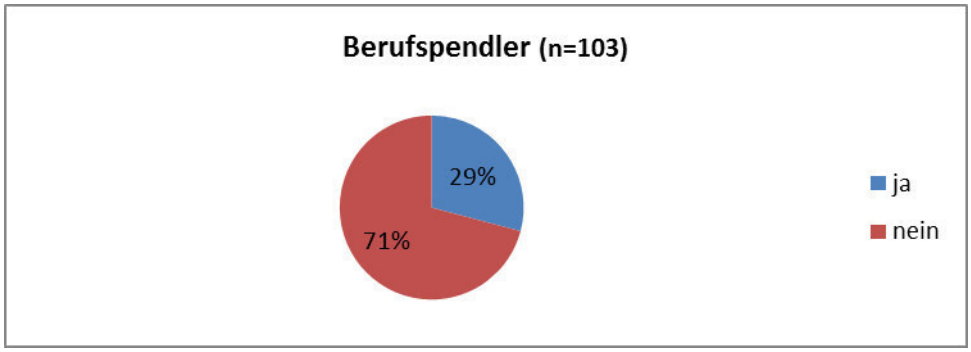


Abbildung1: Berufspendler

Die am häufigsten genannten Gründe für einen Aufenthalt am Bahnhof waren erwartungsgemäß der Umstieg (61%) sowie der Beginn oder das Ende einer Fahrt (29%). Die verbleibenden 10% setzen sich aus unterschiedlichen Aktivitäten im Zusammenhang sekundärer Funktionen des Bahnhofs zusammen (Abb. 2).

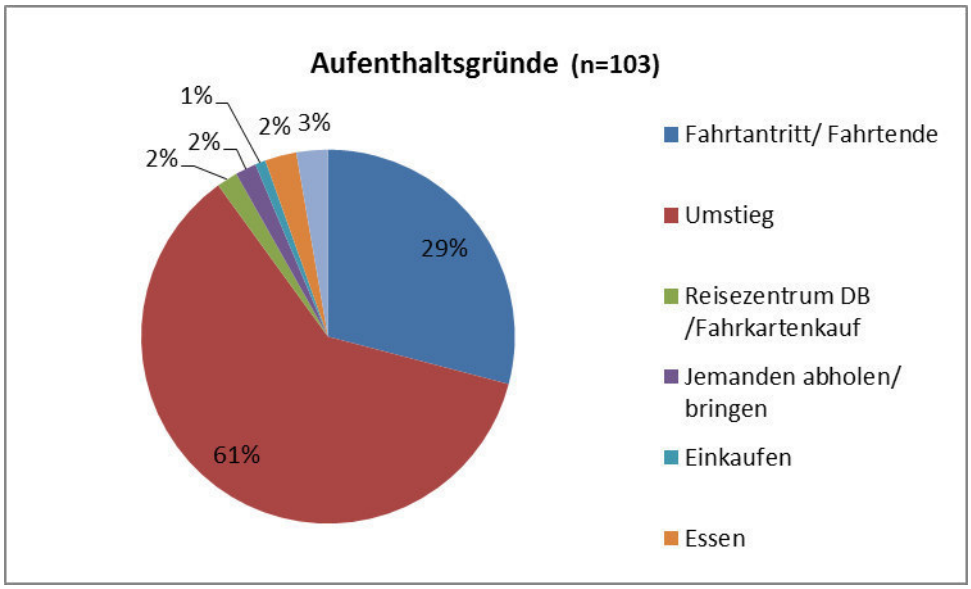


Abbildung2: Aufenthaltsgründe am Bahnhof Südkreuz

Auf die Frage zur Aufenthaltshäufigkeit gaben mehr als die Hälfte der Befragten an, sich mehrfach im Monat am Bahnhof Südkreuz aufzuhalten. Die restlichen Befragten gaben an nur selten bis nie am Bahnhof zu sein. (Abb.3).

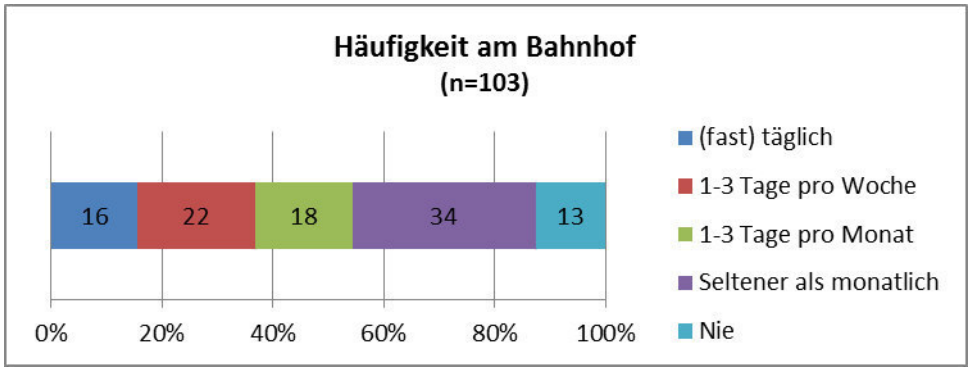


Abbildung 3: Häufigkeit am Bahnhof

Gefragt nach den Hilfsmitteln zur Orientierung am und im Bahnhof wurden am häufigsten Hinweisschilder genannt. Mit großem Abstand folgte die Möglichkeit Passanten zu fragen, Informationskästen sowie Info-Schalter (Abb. 4). Mehrfach Nennungen waren zulässig.

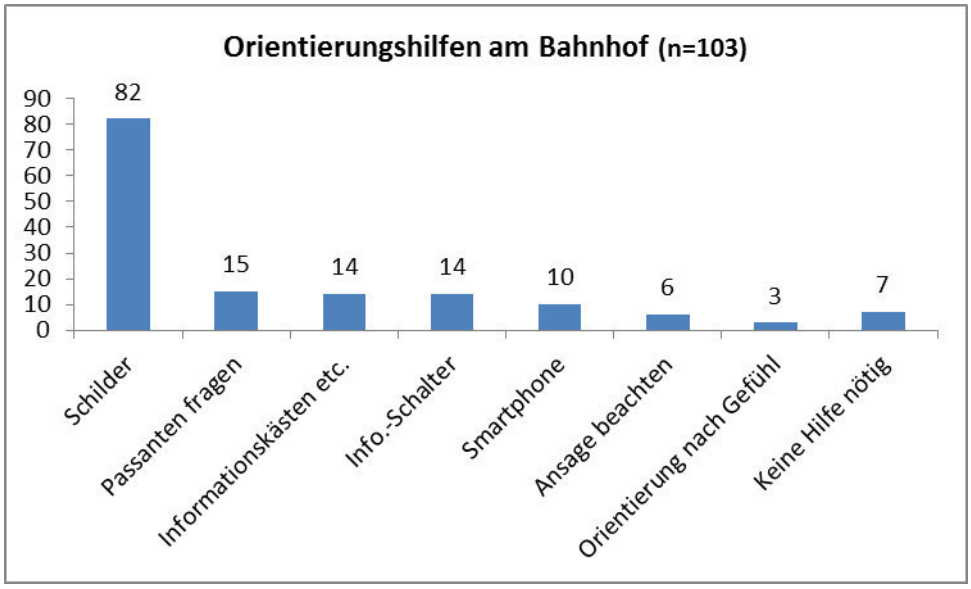


Abbildung 4: Orientierung am Bahnhof

81% der Befragten gaben an, dass sie sich Indoornavigation an Bahnhöfen, welche durch smartphonebasierte Applikationen gestützt wird, vorstellen können (Abb.5).

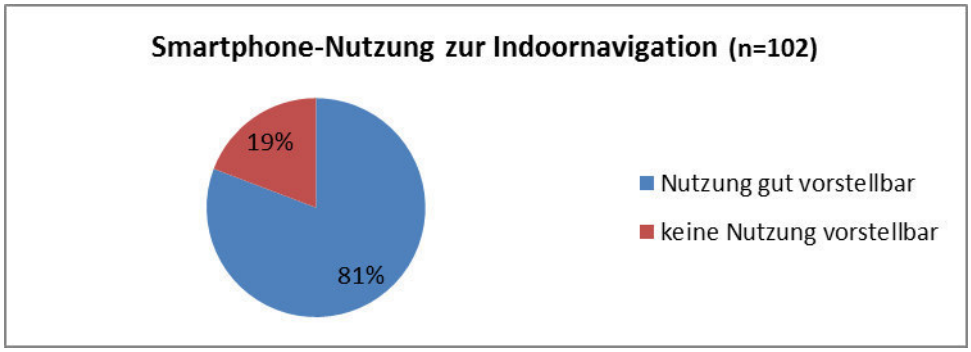


Abbildung 5: Bereitschaft zur Indoornavigation

Weiter richtete sich das Augenmerk auf die Wahrnehmung bereits vorhandener, dem Reisenden zur Verfügung stehender, Innovationsdienste. Gemeint ist die Informationsvitrine als auch der Mobilitätsmonitor. Generell lässt sich feststellen, dass bestehende Innovationsdienste nur gering durch die Reisenden wahrgenommen und demzufolge auch genutzt werden (Abb. 6 und 7).

Zunächst wurden die Personen nach ihrem Wissen um die Infovitrinen befragt. Nur 30% gaben an diese zu kennen (Abb.6).

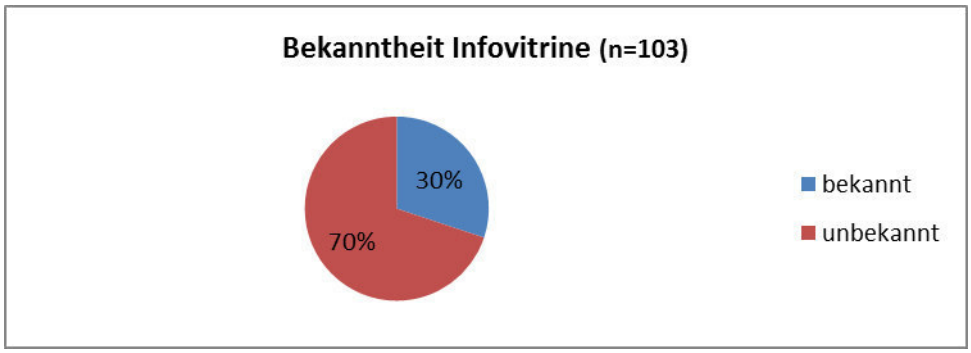


Abbildung 6: Bekanntheit Infovitrine

Den Mobilitätsmonitor, das informatorische Herzstück des intelligenten Bahnhofs, ist knapp jedem zehnten Befragten ein Begriff (Abb. 7).

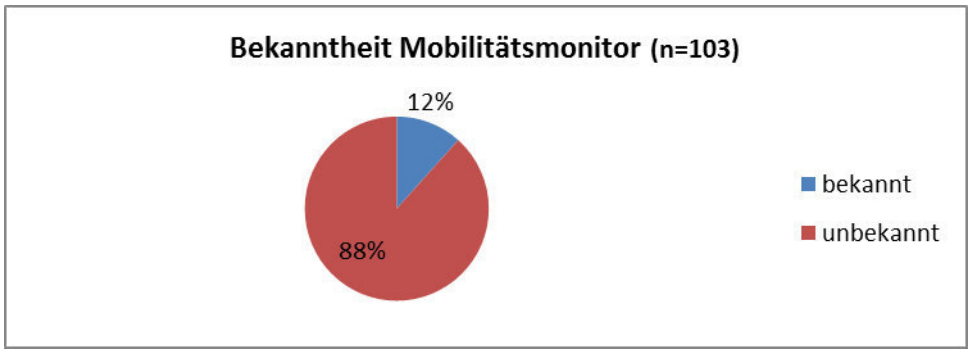


Abbildung 7: Bekanntheit Mobilitätsmonitor

A.15 Ergebnis Kundenfeedback

Kundenfeedback zu den Demonstratoren am Zukunftsbahnhof Südkreuz – Auswertung QR-Code-Befragung –

Berlin, 11. April 2016

Idee: Kundenfeedback am Zukunftsbahnhof

DB Kundenfeedback
Zukunftsbahnhof Südkreuz

Feedback

Zukunftsbahnhof Berlin Südkreuz

Idee/ Konzept

- Es gibt eine Reihe Kunden/ Nutzer von Bahnhofs-infrastruktur, die aufgrund von Wartezeiten oder positiven/ negativen Erfahrungen einen Kommunikationskanal für Feedback suchen.
- Am Zukunftsbahnhof Südkreuz sind Demonstratoren zur Mobilität der Zukunft geschaffen worden, von denen nur wenig Kenntnisse vorliegen, wie die Personen vor Ort sie wahrnehmen und bewerten.
- Durch das Feedback der Kunden, können im nächsten Schritt die Demonstratoren optimiert bzw. das Wissen in die weitere Produktentwicklung einbezogen werden.
- Die Erhebung kann kosten-minimal durchgeführt werden.

Demonstratoren

- Die Demonstratoren sind an unterschiedlichen Stellen auf dem Bahnhofsgelände positioniert, haben unterschied-liche Informationen zum Inhalt und sind bereits unterschiedlich lange für den Nutzer sichtbar.
- Eine QR-Befragung kann erheben wie groß die Wahrnehmung der Objekte ist, ob die Befragten die Information verstehen, ob Sie die Information für das eigene Verhalten nutzen können und schließlich wie sie sie bewerten.
- Durch die Platzierung von QR-Codes an allen Demonstratoren, kann ein gesamtheitliches Bild erhoben und für weitere Entwicklungen genutzt werden.

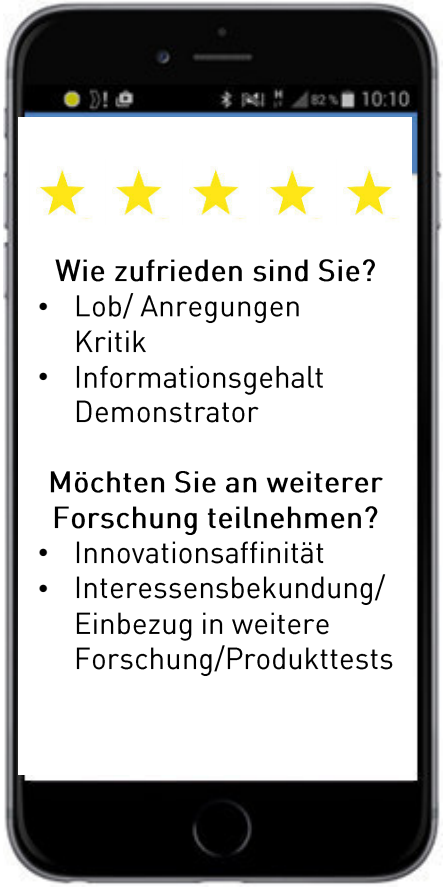
Erhebung Kundenfeedback

- Der Bahnhof ist der ideale Ort für QR-Code-Befragungen, da hier immer wieder, unterschiedliche Personen mit Wartezeiten vorbeikommen.
- QR-Codes können auf unterschiedlichen Medien, in diesem Falle auf Aufklebern platziert werden.
- Befragung von Kunden, Passanten oder Mitarbeitern am „Point-of-Use“ zum Kontaktzeitpunkt stellt ein reales und unverfälschtes Bild dar.
- Der Aufkleber weckt Aufmerksamkeit, macht einen innovativen Eindruck und ist durch die automatische Weiterleitung selbsterklärend.
- Es kann die Bereitschaft zur weiteren Mitwirkung an Produkttests abgefragt werden.

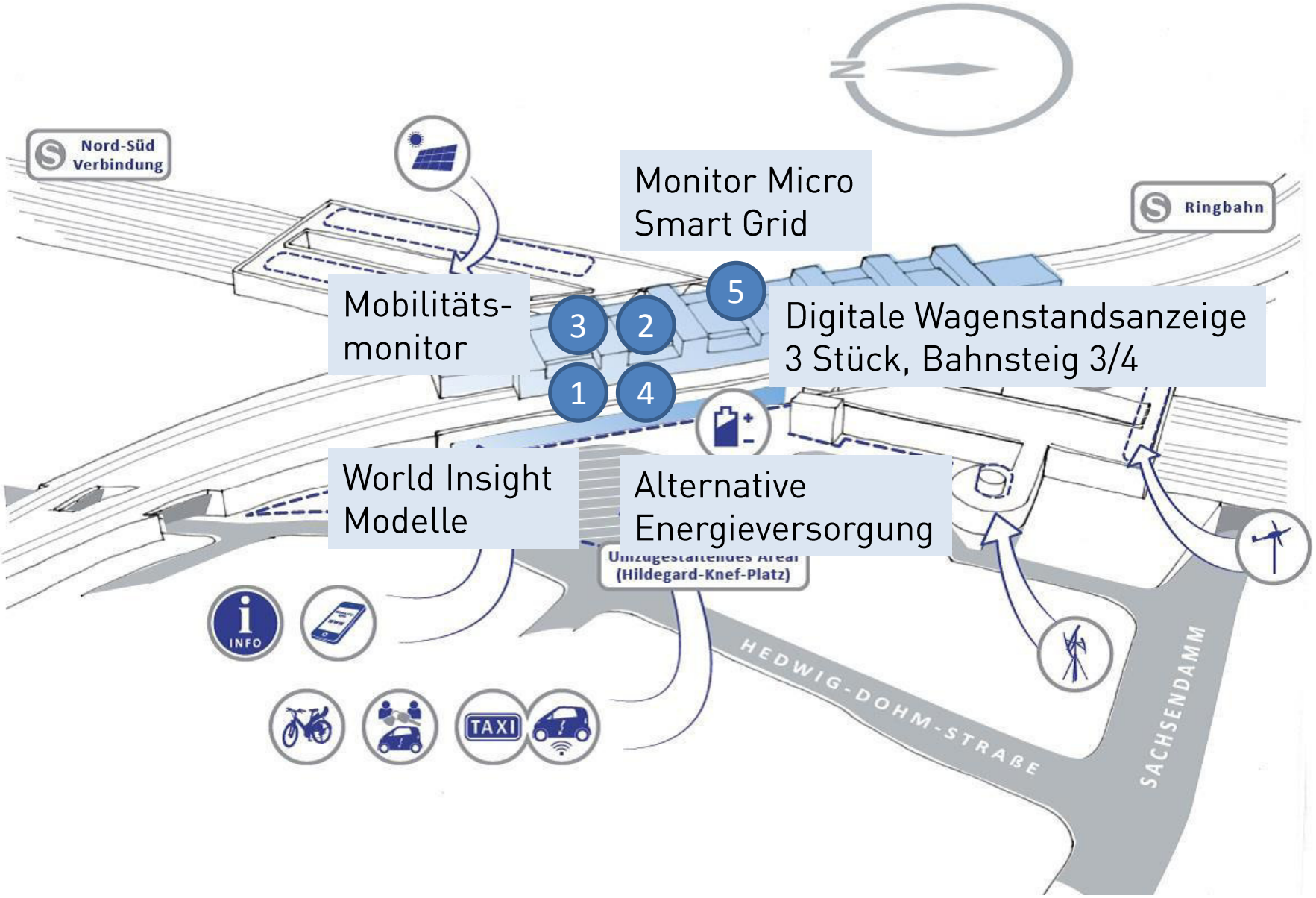
Next Steps (ab 04/16)

- Aufkleber bleiben auf Demonstratoren. Kunden-feedback wird monatlich ausgewertet.
- Prüfung wie nutzerzentrierte Forschung am Bahnhof Südkreuz weiterentwickelt werden kann.
- Ziel: Optimierung (digitaler) Informationsvermittlung, Produkt- und Geschäftsfeld-weiterentwicklung.
- Einbindung von Lead Usern in Entwicklungsprozesse (Interessenten aus Befragung).

QR-Code-Aufkleber verweisen auf mobile Kurzbefragung



QR-Code-Befragung an 5 Monitoren am Zukunftsbahnhof Südkreuz



Thesen zum Kundenfeedback am Bahnhof Südkreuz

(1) Besucher des Zukunftsbahnhofes mit Wartezeiten, z.B. aufgrund von Umstiegen, nehmen die Demonstratoren wahr und setzen sich mit den Inhalten auseinander.

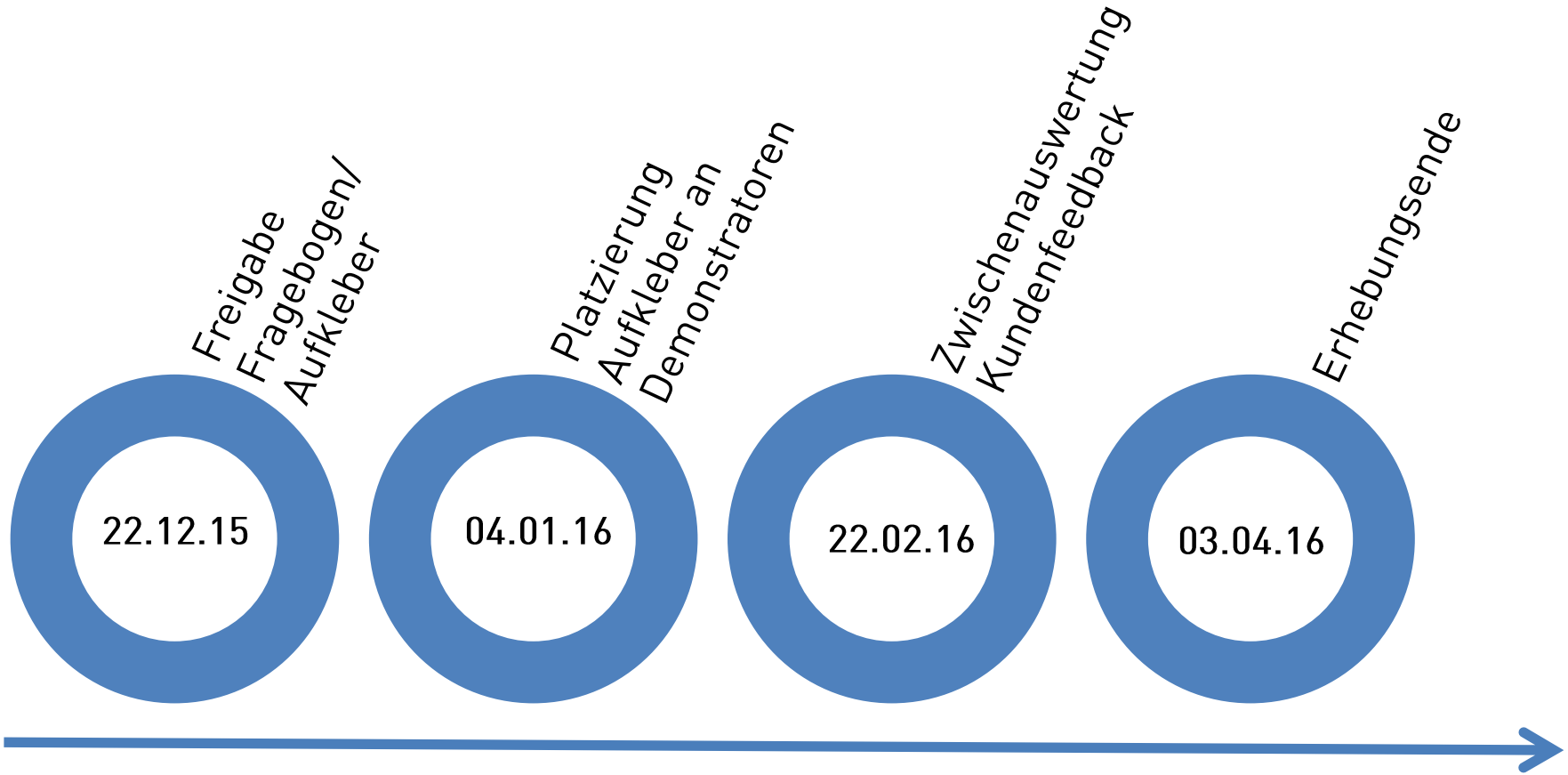
(2) Personen, die regelmäßig am Bahnhof vorbeikommen, kennen die Inhalte der Demonstratoren und haben sich eine Meinung dazu gebildet.

(3) Die Möglichkeit Feedback zu geben, wird von den Befragungsteilnehmern positiv bewertet.

(4) Personen, die an der Befragung teilnehmen, sind technisch aufgeschlossen, an innovativen Themen interessiert und sind bereit an weiterer Forschung teilzunehmen.

(5) Es können Lead User für zukünftige Produkttests gewonnen und bei der Erarbeitung neuer Mobilitätslösungen einbezogen werden.

Kundenfeedback Demonstratoren am Zukunftsbahnhof Südkreuz



Erhebungsübersicht QR-Code-Befragung Demonstratoren

Kundenfeedback zu den Demonstratoren am Bahnhof Südkreuz	
Zeitraum	**Start: 04.01.2016** **Auswertungsstand: 04.04.2016**
Untersuchungsgruppe	Besucher des Bahnhofs Südkreuz, Betrachter Demonstratoren
Rücklauf	• Insgesamt 109 Teilnehmer, ca. 34 Teilnehmer pro Monat • Elektronische Wagenstandanzeige: 84 • Mobilitätsmonitor: 10 • Monitor Indoor-Navigation: 12 • Monitor Micro Smart Grid: 3
Soziodemografie	• 87% männlich • Durchschnittliches Alter: 39 Jahre
Ziel	Wahrnehmung und Bewertung der Demonstratoren am Bahnhof Südkreuz
Inhalte	1) Anlass zum Besuch des Bahnhof Südkreuz 2) Bewertung der Demonstratoren 3) Nutzung von Mobilitäts-Apps 4) Kundenfeedback/Anregungen/weitere Forschung

Zusammenfassung Ergebnisse

Methode

- Möglichkeit für Kundenfeedback wird von Reisenden positiv angenommen.
- Aber: Teilnahmebereitschaft umso höher, je mehr persönlicher Bezug zu den Inhalten besteht. Kundenfeedback zum Monitor Micro Smart Grid und zur Indoor-Navigation sehr gering.
- Teilnehmer (TN) äußern Anregungen für Verbesserungen und haben Interesse an weiterem Dialog.
- 30 Personen stehen für weitere Forschung zur Verfügung.

Teilnehmer/ Anlass Besuch

- Soziodemografie gibt Hinweis, dass TN „Lead User" sind: Überwiegend männlich (87%), ∅ 39 Jahre alt und technikaffin.
- Meistgenutzte Mobilitätsapps der TN sind der DB Navigator (35%) und Apps lokaler ÖV-Anbieter (23%). Darüber spielen Dienste von Google-Maps (11%) und Carsharing-Anbietern (5%) eine wichtige Rolle.
- TN besuchen den Bahnhof Südkreuz regelmäßig: (1/3 mind. wöchentlich, 1/3 gelegentlich, 1/3 seltener bzw. unterschiedlich).
- 2/3 der TN beginnen oder beenden Ihre Fahrt am Bahnhof Südkreuz, ein weiteres Drittel steigt um.

Meinung/ Bewertung

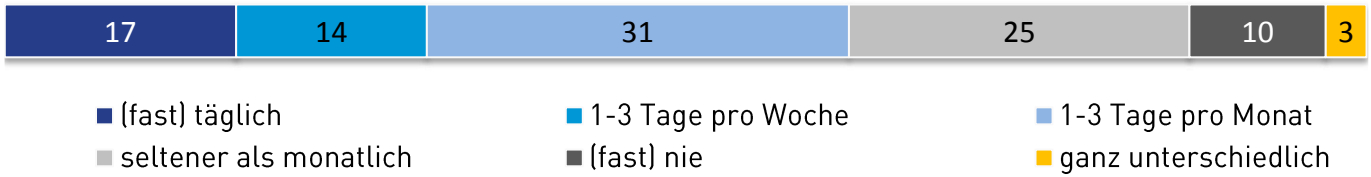
- Insgesamt großes Interesse zu innovativen Themen am Bhf. Südkreuz informiert zu werden.
- Bewertung des Mobilitäts-monitors und der Monitore Micro Smart Grid und Indoor-Navigation nur qualitativ interpretierbar: insgesamt positive Wahrnehmung.
- Monitor Indoor-Navigation: Beurteilung des pers. Nutzen für Reiseunterstützung ambivalent.
- Mobilitätsmonitor wird von allen Teilnehmern positiv bewertet und unterstützend für die Reiseplanung wahrgenommen.
- 20% der TN findet die Elektronische Wagenstand-anzeige (EWSA) eher nicht verständlich. Zahlreiche Kritik und Anregungen durch TN.

Kundenfeedback

- Offen genanntes Feedback bezieht sich fast aus-schließlich auf Elektr. Wagenstandanzeige:
- EWSA wird als Mehrwert und innovatives Informationselement am Bhf. wahrgenommen.
- Kritikpunkte EWSA: Anzeige ist nicht aktuell oder funktioniert nicht, Information besser in pers. Reisunterlagen, Informationsdichte gering, Mängel in Usability.
- Anregungen EWSA: zusätzliche Funktionen gewünscht, insbes. Information zu Wagen, Sprachenwechsel, Verspätungsanzeige.
- Mobilitätsmonitor wird als Desktoplösung gewünscht.

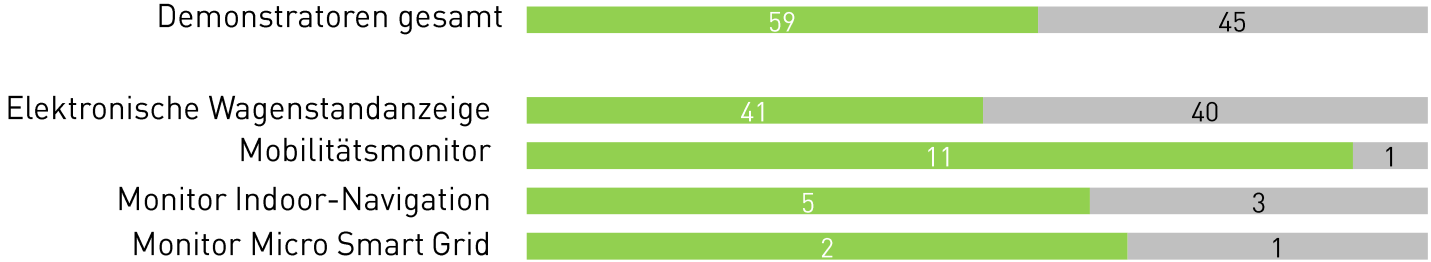
Anlass Besuch Bhf. Südkreuz/Wahrnehmung Demonstratoren

Häufigkeit Besuch Bahnhof Südkreuz

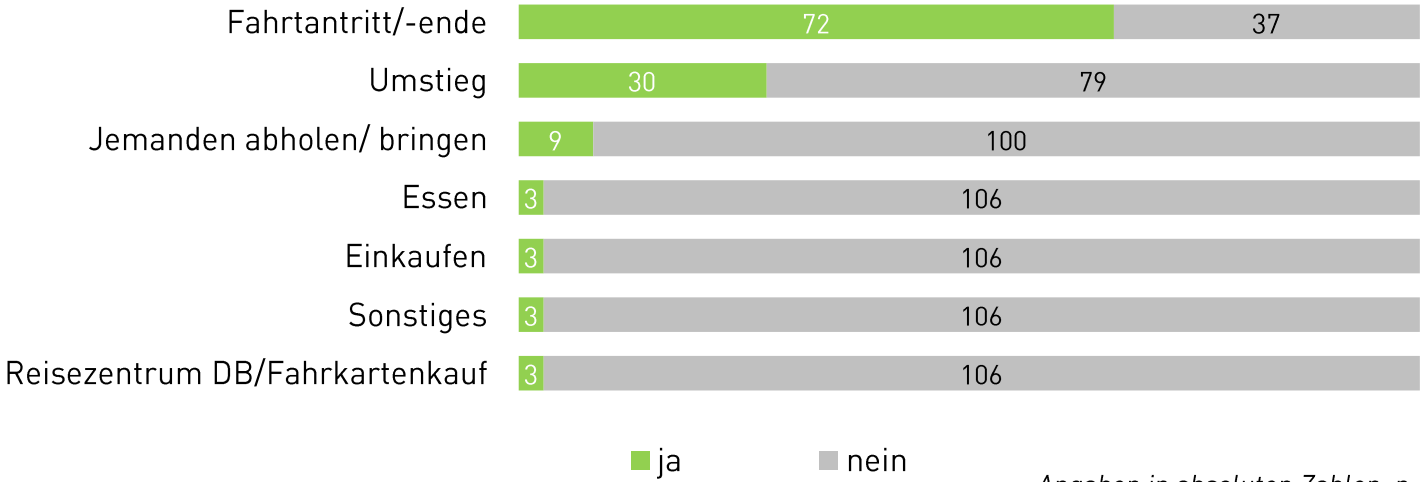


Angaben in Prozent, n= 109

Bekanntheit Demonstratoren

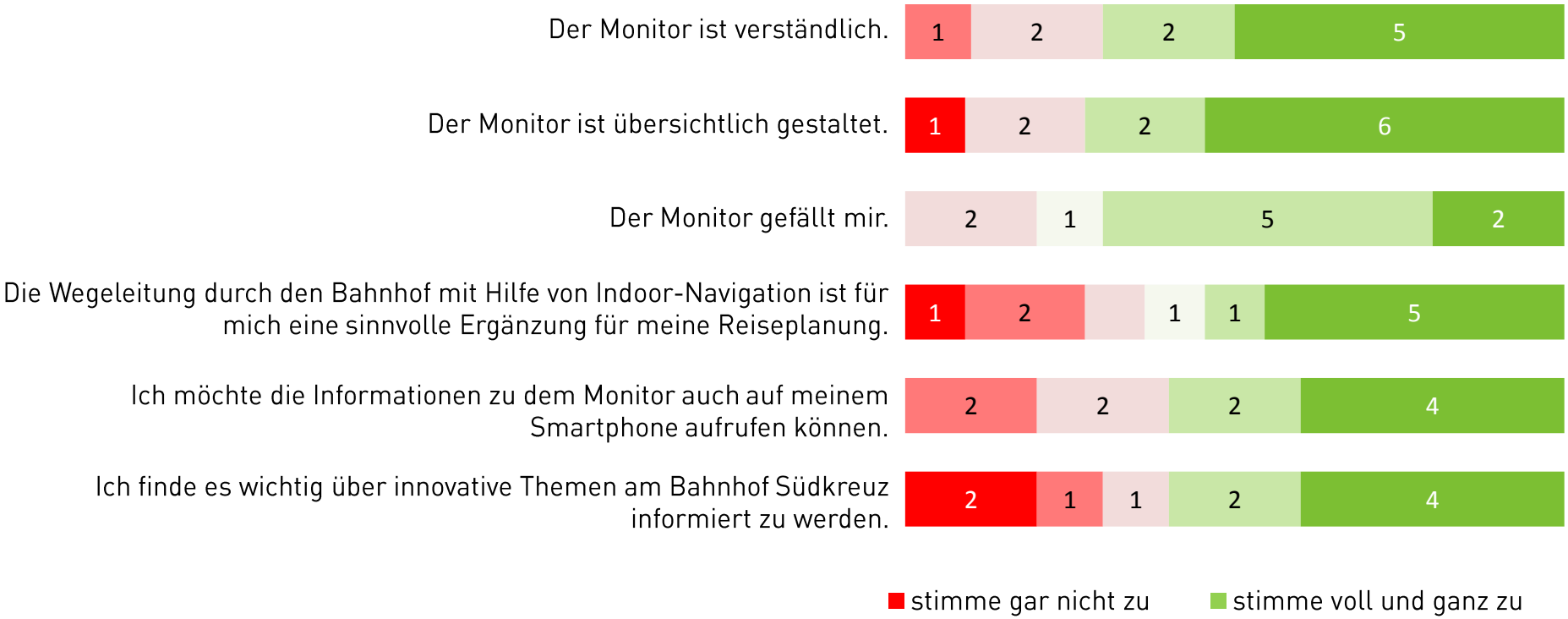


Anlass Besuch Bahnhof Südkreuz



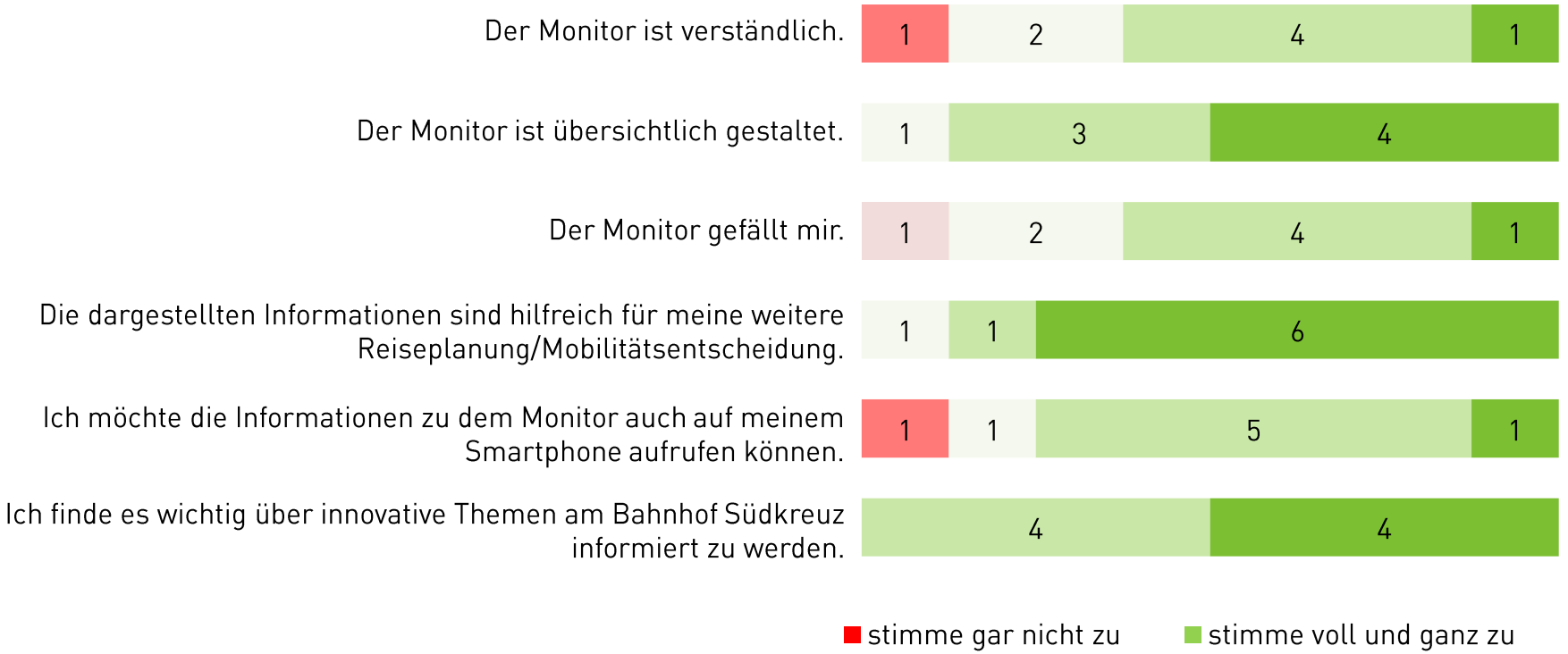
Angaben in absoluten Zahlen, n=109

Meinung zum Monitor Indoor-Navigation:



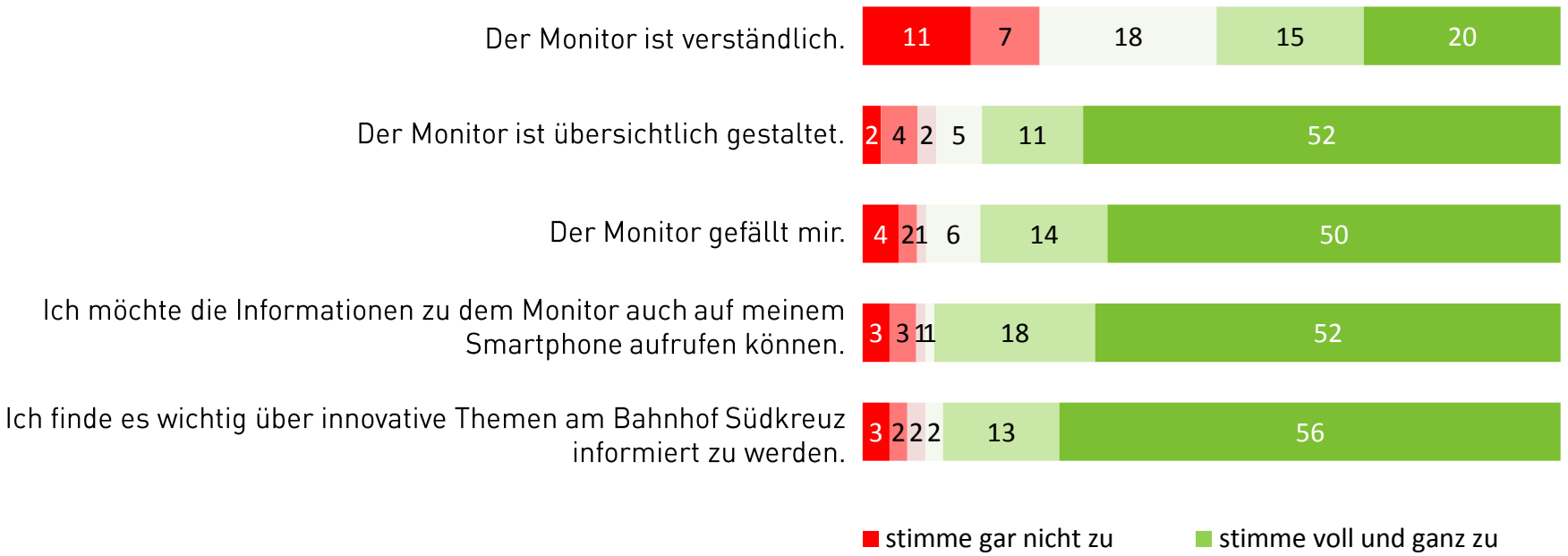
Angaben in absoluten Zahlen, n=11

Meinung zum Mobilitätsmonitor:



Angaben in absoluten Zahlen, n=8

Meinung zur Elektronischen Wagenstandanzeige:



Angaben in absoluten Zahlen, n=84

Kundenfeedback Elektronische Wagenstandanzeige

Kritik (33)

- Angezeigte Information stimmt nicht/ nicht aktuell (18)
- Anzeige funktioniert nicht (8)
- Information in Reiseunterlagen (Smartphone, Papier) (4)
- Inhalte: Informationsdichte zu gering
- Informationsdarstellung
- Usability (Touch-Bedienung)

Lob (8)

- „Insgesamt: super Sache!“
- „Sehr schönes Gerät. “
- „Top Idee“
- „Schon einmal sehr gut!“
- „Sehr Chic! 21tes Jahrhundert.
- „Sehr gute Ausführung!“
- „Die Darstellung ist wirklich gelungen.“
- „Einfach gut, viel übersichtlicher als eine Liste aller möglichen Züge in irgend einer dunklen Ecke des Bahnsteigs!“

Kundenfeedback Mobilitätsmonitor/Monitor Indoor-Navigation

Kritik

Lob

Mobilitätsmonitor (4)

- Fehlende Informationen zum schienengebundenen Nahverkehr (2)
- Platzierung nicht optimal
- Richtung zum Fernbus nicht erkennbar

- „Eine sehr gute Idee“

Monitor Indoor-Navigation (1)

- Keine Interaktion möglich
- Lesbarkeit eingeschränkt (Sonneneinstrahlung)
- Qualität der Simulation

Anregungen zu den Demonstratoren

Elektronische Wagenstandanzeige (19)

- Weitere Informationen zum Zug, z.B. reservierte Sitzplätze anzeigen (als Orientierung für Reisende ohne Reservierung), Handybereich , Kleinkindabteil(4)
- Sprachenwechsel (3)
- Verspätungsanzeige (3)
- An weiteren Bahnhöfen installieren (2)
- Sprung zum Fahrplan
- Weitere Züge ansehen
- Informationen für sehbeeinträchtigte Personen aufbereiten
- Auch andere Züge anwählbar machen
- Ankunftszeiten (wie auf den Fahrplanaushängen)
- Weitere Informationen anzeigen, z.B. Wetter
- Uhrzeit hervorheben

Mobilitätsmonitor (2)

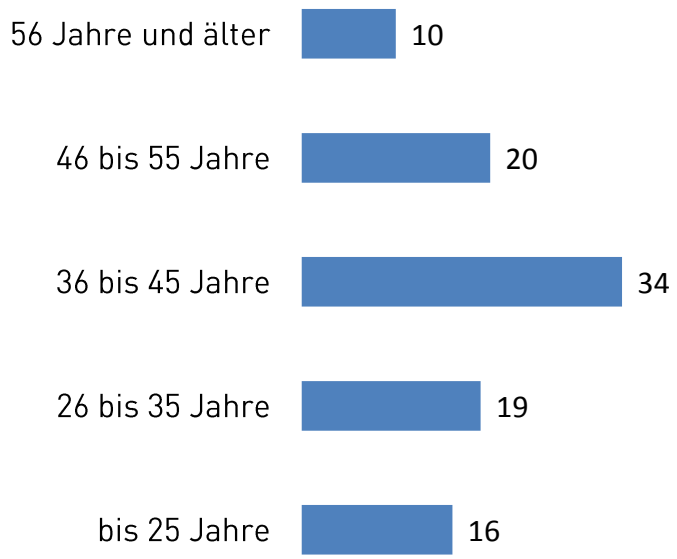
- Desktopfähige Anzeige (für Haltestelle/Bahnhof am Wohnort) (2)

Monitor Indoor-Navigation (1)

- Applikation zur Indoor-Navigation

Alter der Befragungsteilnehmer

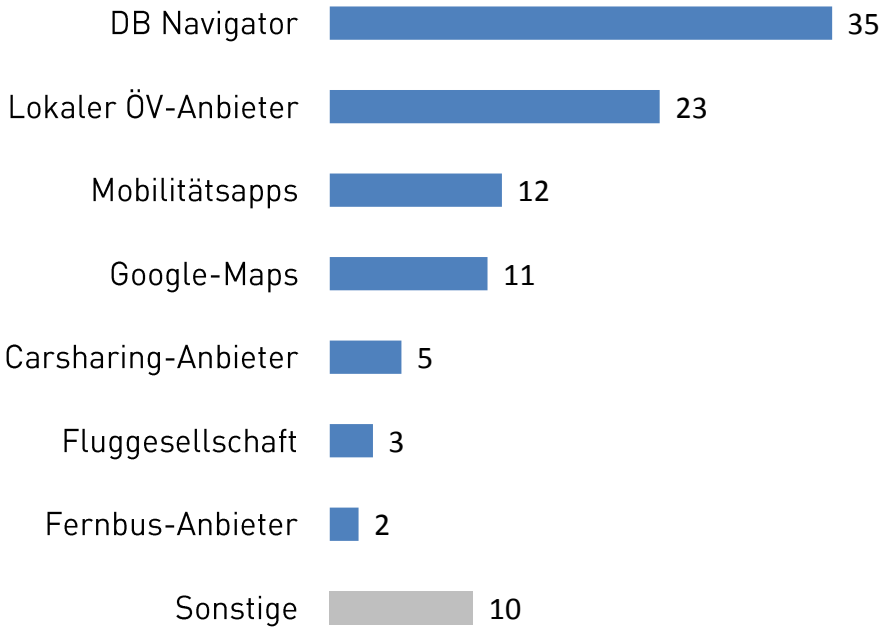
Alter der Teilnehmer



Angaben in Prozent, n=109

Meistgenutzte Apps zur Organisation der Mobilität

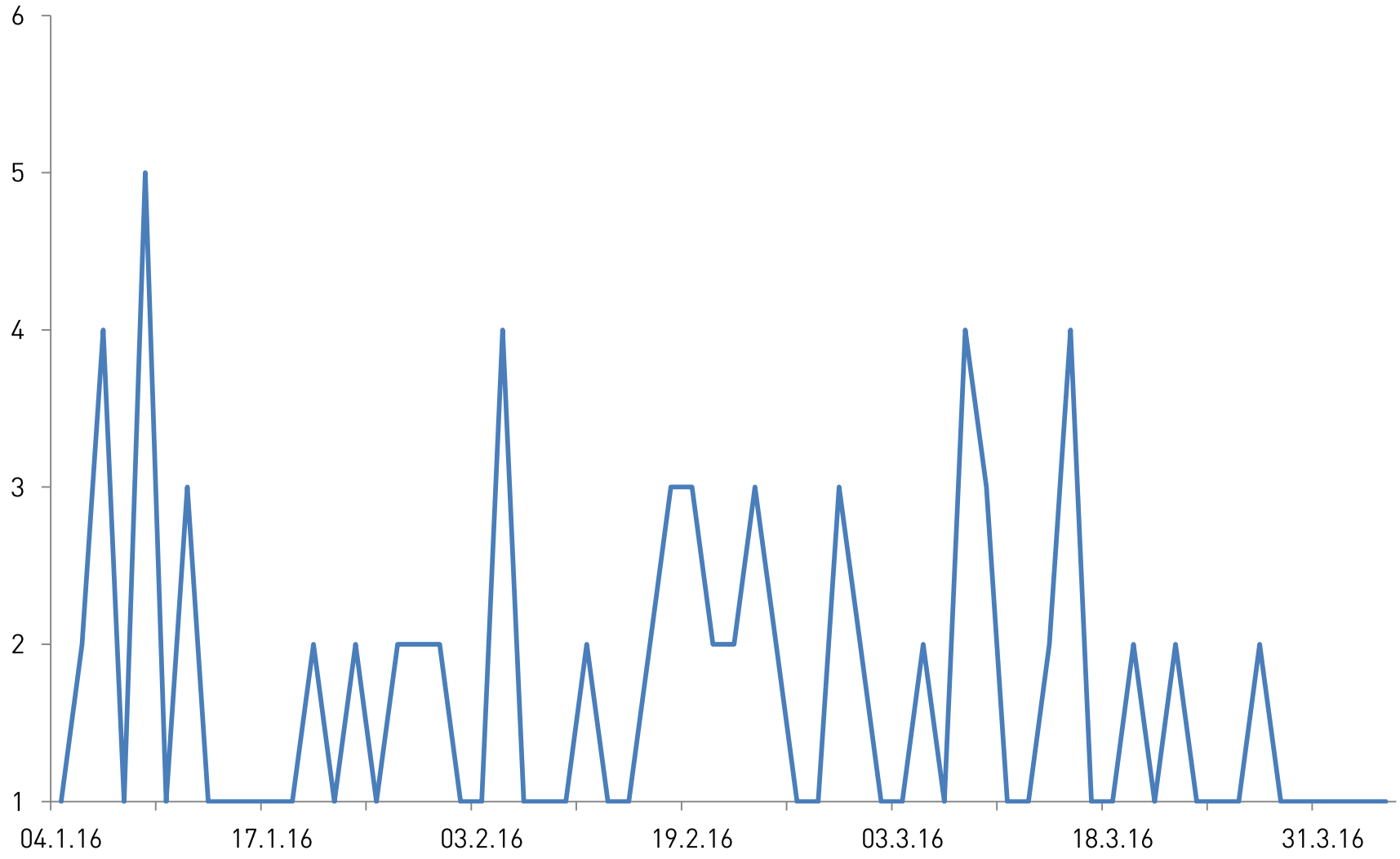
Meistgenutzte Mobilitäts-Apps



13 Personen nutzen keine Apps zur Organisation der Mobilität

Angaben in Prozent,
Mehrfachnennungen, n=187

Verteilung der Befragungsteilnahme



Nutzerzentrierte Forschung am Bhf. Südkreuz

Usability Test DIMIS-App

Projekt: DIMIS
Zeitraum: 10.2015 - 03.2016
Methode: Usability Test
Ergebnisse: Bewertung der DIMIS-App, Schwerpunkte Indoor-Navigation / Wagenstandanzeige

Begleitforschung DIMIS

Projekt: DIMIS
Zeitraum: 10.2015 - 03.2016
Methode: Multimethodale Erhebung (Befragung, In-App-Befragung, Logfile Analyse, GPS-Tracking)
Ergebnisse: Ermittlung von Situationen mit Informationsbedarf und Nutzungskontext der DIMIS-App

Vor-Ort-Befragung Reisender

Projekt: B2 - IMS
Zeitraum: 09.2015
Methode: Vor-Ort-Befragung Reisender
Ergebnisse: Erkenntnisse zu Anlass & Aufenthaltshäufigkeit, Orientierung am Bahnhof, Wahrnehmung von Mobilitätsdienstleistungen

Open Innovation, Ideenworkshop

Projekt: MovingIDEAS
Zeitraum: 03.2016
Methode: Open Innovation Prozess: Ideenentwicklung, Konzept, Pitch
Ergebnisse: Ideen zumTicketautomat der Zukunft

Echtzeit-Feedback

Projekt: MovingIDEAS
Zeitraum: 09.2014
Methode: Befragung mittels App-Prototypen
Ergebnisse: Feedback zu Crowd Helping

Kundenfeedback Demonstratoren

Projekt: B2 - IMS
Zeitraum: 01.2016 - 04.2016
Methode: QR-Code Befragung
Ergebnisse: Bewertung Mobilitätsmonitor, World-Insight-Modelle, MSG, EWSA, Rekrutierung von Teilnehmern für weitere Forschung

Optimierung digitaler Informationsvermittlung durch Einbezug räumlicher Informationen wie z.B. Beschilderung

Weiterentwicklung von Demonstratoren/ Interieur am Bhf. Südkreuz bzgl. Inhalt, Positionierung, Relevanz (Informationszentrum, Wartebereich)

Einbindung von Lead Usern in Entwicklungsprozesse zur Identifikation neuer Geschäftsideen

Innovative und nutzerzentrierte Aktivitäten zur Sichtbarkeit Zukunftsbahnhof, z.B. PR-Maßnahmen

2014 | 2015 | 2016

Nutzerzentrierte Forschung am Bahnhof Südkreuz

Leerstellen/ Entwicklungsbedarf ?

Usability Evaluation mobiler Reiseinformationsdienste

mobiler Reiseinformationsdienst
(Demonstrator oder veröffentlichte App)

Anpassungen vornehmen

Erkenntnisse & Empfehlungen

Usability Evaluation

Ziele

- Untersuchung der App hinsichtlich ihrer Nutzungsfreundlichkeit
- Identifikation von Usability Problemen

Die Kenntnis über vorhande Probleme kann dazu genutzt werden, das vorhandene System zu verbessern (formative Usability Evaluation).

Methodik

meist mehrstufige Evaluation:
- expertenbasierte Methoden (z.B. Cognitive Walkthrough)
- nutzerbasierte Methoden (z.B. Usability Test)

Besonderheit im Mobilitätskontext: hoher Einfluss des Nutzungskontexts (auf Reisen, am Bahnhof > Gedränge, hoher Geräuschpegel, Eile etc.)
» mobiles Usability Testing im Nutzungskontext

Vorteile: Aspekte der Nutzung sichtbar machen, die im Labor verborgen bleiben, z.B.
- wie räumliche Umgebungsinformation (z.B. Beschilderung) und digitale Information zusammenspielen,
- welche Informationen unterwegs fehlen und
- wie der Nutzen einer Funktion von der physischen Umgebung abhängt

Ergebnisse

- Liste und Beschreibung der Usability Probleme, Severity Rating (Bewertung der Schwere)
- Bewertung der Probleme hinsichtlich der Evaluationsziele
- Optional: Erarbeitung von Empfehlungen

Aufbereitung in Form von Ergebnisberichten, Präsentationen oder als Workshop mit dem Entwicklungsteam