



# Gemeinsamer Schlussbericht der Projektpartner

<b>Forschungsvorhaben:</b>	PAMIR – Stellplatzfeine Parkplatzbelegungsinformation und Parkplatzreservierung für ein komfortableres multimodales Reisen
<b>Förderkennzeichen:</b>	19F2061
<b>Gefördert durch:</b>	Bundesministerium für Digitales und Verkehr (vorher BMVI)
<b>Verbundkoordinator und Projektpartner:</b>	ifak Institut für Automation und Kommunikation e.V. Adresse: Werner- Heisenberg-Straße 1, 39106 Magdeburg Projektleiter: Dr. Alexander Kaiser Förderkennzeichen: 19F2061A
<b>Weiterer Projektpartner:</b>	ParkHere GmbH Adresse: Gollierstraße 70, 80339 München Projektleiter: Clemens Techmer Förderkennzeichen: 19F2061B
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>	01.09.2018 – 30.11.2021
<b>Autoren:</b>	Dr.-Ing. Alexander Kaiser, ifak B.Sc. Clemens Techmer, ParkHere B.Sc. Richard Reider, ifak M.E. Joachim Schade, ifak
<b>Berichtsort und -datum:</b>	Magdeburg/München, 14. März 2022

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.2.1	Parkplatzsensor von ParkHere	3
1.2.2	Verfügbarkeit von Parkplatzbelegungsdaten	5
1.2.3	Verfügbarkeit von Fahrplandaten	5
1.2.4	Verfügbarkeit von sonstigen Daten	5
1.2.5	Verfügbarkeit von Open-Source-Software (OpenTripPlanner, OsmAnd)	6
1.2.6	Sonstiges	6
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	10
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	12
2	Eingehende Darstellungen	13
2.1	Erzielte Ergebnisse	13
2.1.1	AP 1 Projektmanagement	13
2.1.2	AP 2 AP-übergreifende Daten- und Serviceplattform	13
2.1.3	AP 3 Belegungsprognose von Parkplätzen	18
2.1.4	AP 4 Stellplatzreservierung	24
2.1.5	AP 5 Multimodales Reisen	27
2.1.6	AP 6 Ride Sharing	32
2.1.7	AP 7 Feldversuche und Evaluierung	32
2.1.8	AP 8 Rechtliche Rahmenbedingungen	40
2.2	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit	42
2.2.1	ifak	42
2.2.2	ParkHere	43
2.3	Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	43
2.4	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	44
2.4.1	Erfolgte Veröffentlichungen	44
2.4.2	Geplante Veröffentlichungen	45
2.4.3	Sonstiges	46
3	Literaturverzeichnis	46

## **1 Kurzdarstellung**

### **1.1 Aufgabenstellung**

Das Gesamtziel des Vorhabens PAMIR bestand darin, auf Basis des vorhandenen Parkplatzsensors des Projektpartners ParkHere GmbH verschiedene Dienste mit Bezug zum Parken – insbesondere die Stellplatzreservierung, die Navigation zum Stellplatz und die Parkraumbelungsprognose – zu entwickeln, um damit schließlich übergeordnete Mobilitätsdienste für den Umstieg vom Pkw auf ein anderes Verkehrsmittel (Park+Ride) und zum sogenannten Ride Sharing / Car Pooling deutlich komfortabler und planbarer als bisher ermöglichen zu können.

Außerdem waren die ökologischen Effekte (Energieverbrauch und Luftemissionen) durch die Mobilitätsdienste abzuschätzen, da sich zum Beispiel weniger Parksuchverkehr infolge der Möglichkeit zur Stellplatzreservierung für einen Teil der Parkplatznutzer ergibt. Ob und inwieweit sich dadurch die insgesamt zurückgelegte Entfernung von allen Fahrzeugen (auch ohne Reservierung) reduziert, ist eine Fragestellung, die nur durch eine wissenschaftliche Untersuchung beantwortet werden kann, da die eingesparten Fahrwege der reservierenden Nutzer den teilweise längeren Fahrwegen der nicht-reservierenden Nutzer gegenüberstehen.

Die Aufgaben des Projektkoordinators *ifak* waren zum einen das Projektmanagement (AP 1), das insbesondere in der Abstimmung und Kontrolle der Arbeiten der Projektpartner *ParkHere* und *Wunder* im Rahmen von regelmäßigen Projekttreffen bestand. Zum anderen hat das ifak als Forschungseinrichtung die technisch-wissenschaftlichen Arbeitspakete 2, 3, 5, 7 und 8 geleitet und mit entsprechender Fachkompetenz selbstständig bearbeitet, worauf im Kapitel 2 dieses Schlussberichts ausführlich eingegangen wird. Zuletzt hat das ifak auch an diversen Veranstaltungen der mFUND-Begleitforschung als Referent und Teilnehmer mitgewirkt sowie eine Fachpublikation der Begleitforschung zum Thema Parkplatzsensoren mitverfasst.

Der Fokus des ifak lag vor allem auf der Entwicklung eines Prognosemodells (AP 3) sowie der Entwicklung eines Planungswerkzeugs für multimodales Reisen und Parkplatznavigation (AP 5), da sich diese Projektergebnisse perspektivisch sowohl wissenschaftlich (z. B. Fachpublikationen) als auch wirtschaftlich (z. B. Software-Lizenzentnahmen) verwerten lassen.

Die Aufgabenschwerpunkte der ParkHere GmbH waren die technische Entwicklung von Hard- und Softwarelösungen für die Stellplatzreservierung (AP 4) sowie die Installation der Belegungssensoren und Reservierungsanzeigen auf einzelnen Stellplätzen von Parkplätzen wie Park-and-Ride-Anlagen, die für den Feldversuch (AP 7) genutzt werden sollten. Da ParkHere bereits über ein IoT-Backendsystem verfügte, sollte dieses im Rahmen von PAMIR um zusätzliche Funktionalitäten für den Reservierungsdienst und die entsprechenden Reservierungsdisplays sowie mobile Dienste und Schnittstellen zu Drittapplikationen ergänzt werden.

### **1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

#### **1.2.1 Parkplatzsensor von ParkHere**

Die wesentlichste Grundlage für das PAMIR-Projekt war der Parkplatzsensor des Projektpartners ParkHere, der bereits vor Projektbeginn entwickelt und getestet wurde, sodass dieser für die Installation auf einem Versuchsparkplatz zum Projektbeginn grundsätzlich verfügbar war.

Dieser druckempfindliche Sensor ist in einem schlauchförmigen TPE-Kunststoffmantel (Querschnitt: 45 x 26 mm) untergebracht, wie in Abb. 1 schematisch dargestellt ist. Im Abstand von jeweils 30 cm werden mehrere Sensoreinheiten aneinandergereiht, die je nach Breite und Anzahl von unmittelbar benachbarten Stellplätzen einen geschlossenen Sensorstreifen bilden.

Davon werden zwei parallele Streifen im Abstand von 10 cm entlang der Stellplatzmitte – entweder in einer im Asphalt eingefrästen Rille oder in speziellen Betonsteinen – senkrecht zur Parkrichtung verlegt. Durch diese Anordnung wird die Fahrtrichtung eines Fahrzeugs erkannt, da jedes überrollende Rad jeweils ein Signal auf dem ersten und zweiten Sensorstreifen nacheinander auslöst. Dabei wird zusätzlich die tatsächlich beanspruchte Breite mithilfe der entsprechenden Sensoreinheiten erfasst, sodass z. B. ein auf zwei Stellplätzen schief geparktes Fahrzeug erkannt wird (siehe Abb. 2).



Abb. 1: Bodensensor zur Belegungszustandserfassung eines Stellplatzes (Quelle: ParkHere)

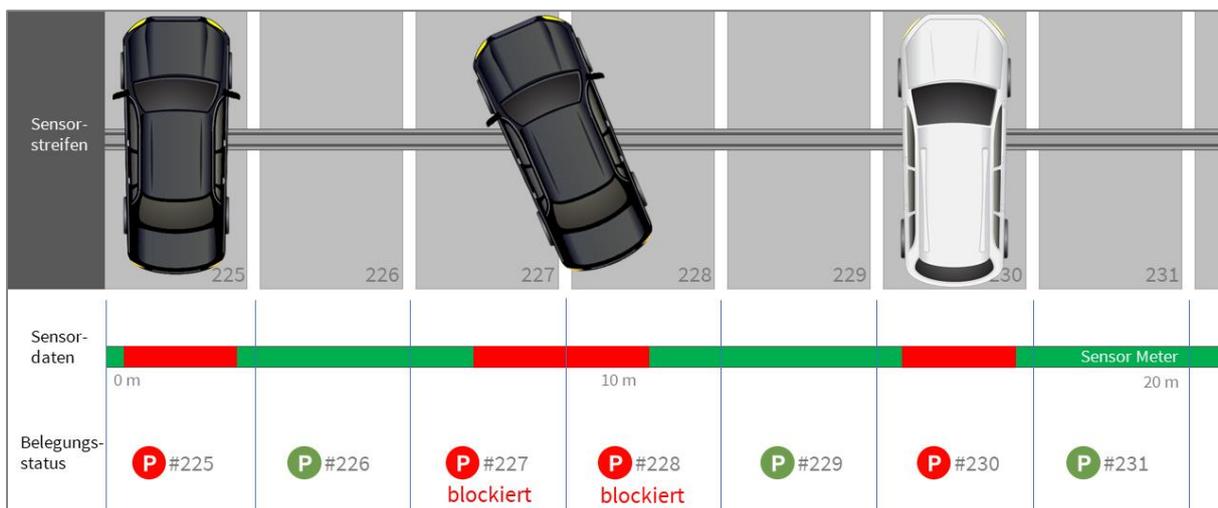


Abb. 2: Abschnittsweise Belegungserfassung entlang eines Sensorstreifens (Quelle: ParkHere)

Die Signale der Sensoreinheiten werden zunächst an eine nahegelegene lokale Basisstation gefunkt (Frequenz: 868 MHz) und anschließend per Mobilfunk oder Internet zu einer zentralen Cloud weitergeleitet. Dort erfolgt die Signalauswertung durch spezielle Algorithmen, um eindeutige Ein- und Ausparkvorgänge zu erkennen und sonstige Ereignisse (Fehldetektionen)

auszusortieren. Somit werden der aktuelle Belegungszustand jedes Stellplatzes und die Gesamtbelegung des Parkraums in Echtzeit berechnet und als Information an die Betreiber und Kunden via Internet zurückgegeben.

Das Sensorsystem wird von verschiedenen Kunden auf privaten und öffentlichen Parkflächen im Innen- und Außenbereich (Tiefgaragen, Parkhäuser, Parkplätze) genutzt. Bei normalen Ein- und Ausparkmanövern – wie es z. B. bei Mitarbeiterparkplätzen üblich ist – weisen die Sensoren laut Aussage von ParkHere eine hohe Detektionsgenauigkeit (95 – 99 %) auf.

### **1.2.2 Verfügbarkeit von Parkplatzbelegungsdaten**

Um das in AP 3 geplante Prognosemodell entwickeln zu können, waren historische Daten zur Parkplatzbelegung, insbesondere von Park-and-Ride-Anlagen in deutschen Großstädten, erforderlich. Wären dafür ausschließlich die aktuellen Belegungsdaten verwendet worden, die während der Projektlaufzeit mithilfe der Sensoren von ParkHere erhoben wurden, hätten langfristige Trends und lokale Besonderheiten nicht adäquat berücksichtigt werden können. Allerdings konnten vor und zu Beginn des Projektes keine entsprechenden (öffentlichen) Daten für Park-and-Ride-Anlagen gefunden werden, sodass letztlich die internen Daten eines Parkplatzbetreibers, der P+R Park & Ride GmbH München, die freundlicherweise zugleich eine Park-and-Ride-Anlage für den PAMIR-Feldversuch zur Verfügung stellte, eingesetzt worden.

### **1.2.3 Verfügbarkeit von Fahrplandaten**

Für den geplanten Einsatz der Open-Source-App OpenTripPlanner in AP 5 (Multimodales Reisen) wurde vorausgesetzt, dass die kompletten Fahrplandaten des jeweiligen Verkehrsverbundes im GTFS-Format (General Transit Feed Specification) öffentlich verfügbar sind. Nach einer Recherche zu Projektbeginn stellte sich allerdings heraus, dass nicht alle Verkehrsverbände diese Daten öffentlich bereitstellen, wozu auch der Münchner Verkehrsverbund zählt.<sup>1</sup>

Da die Entscheidung für die Einrichtung eines Testfelds in München nicht allein von der Verfügbarkeit der Fahrplandaten abhing, wurde eine alternative Lösung für die Integration von Fahrplandaten entwickelt, die letztlich auch dazu führte, dass anstelle des OpenTripPlanners eine andere App neuentwickelt und eingesetzt wurde (hierzu ausführlich im Abschnitt 2.1.5).

### **1.2.4 Verfügbarkeit von sonstigen Daten**

Im Vergleich zu den erwähnten Parkplatzbelegungs- und Fahrplandaten waren sonstige Daten, die für das Prognosemodell (AP 3) bzw. die Parkplatznavigation (AP 5) benötigt wurden, in der Regel öffentlich und kostenfrei verfügbar. Hierzu zählen u. a. historische und aktuelle Wetterinformationen für eine Region, die vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellt wurden, sowie Kartendaten zu einem Parkplatz, die von OpenStreetMap heruntergeladen und dort auch z. B. zwecks der Einzeichnung von reservierbaren Stellplätzen bearbeitet werden konnten. Daneben wurde auch der Kartendienst von Mapbox genutzt (siehe auch Abschnitt 2.1.5).

---

<sup>1</sup> Dagegen werden z. B. die GTFS-Fahrplandaten des Verkehrsverbundes Rhein-Sieg (Region Köln-Bonn) und der S-Bahn Stuttgart (Deutsche Bahn AG) über die mCLOUD öffentlich bereitgestellt. Auch auf Nachfrage beim MVV wurden die Daten für das PAMIR-Projekt nicht zur Verfügung gestellt.

### 1.2.5 Verfügbarkeit von Open-Source-Software (OpenTripPlanner, OsmAnd)

Der bereits im vorigen Abschnitt erwähnte OpenTripPlanner eignete sich auch deshalb nicht für die ursprünglich geplante Verwendung als Smartphone-App, da die entsprechende Android-Version zuletzt im Jahr 2017 aktualisiert wurde und seitdem nicht mehr gewartet wird.<sup>2</sup> Alternativ ließ sich eine aktuellere Version des OpenTripPlanner auch über einen Webbrowser bedienen, was jedoch auf einem üblichen Smartphone-Bildschirm meist unkomfortabel war.

Daher wurde eine eigene App zum Planen von multimodalen Reisen vollständig neuentwickelt, die dann mit der freien Navigations-App OsmAnd wie geplant verbunden werden konnte.

### 1.2.6 Sonstiges

Zu den weiteren nennenswerten Voraussetzungen und Umständen, unter denen das PAMIR-Projekt von September 2018 bis November 2021 durchgeführt wurde, zählen externe Ereignisse wie die Corona-Pandemie und interne Ereignisse wie das vorzeitige und plötzliche Ausscheiden des Projektpartners Wunder etwa ein Jahr vor Projektende. Durch beide Ereignisse mussten die Ziele und der Ablauf des Vorhabens in wesentlichen Punkten angepasst werden.

So hat sich durch das heruntergefahrere gesellschaftliche Leben während der Pandemie u. a. das Verhalten von Berufspendlern signifikant verändert, da im Allgemeinen häufiger und über längere Zeiträume im Homeoffice gearbeitet wurde und dementsprechend weniger Park-and-Ride-Anlagen genutzt wurden. Dies spiegelte sich z. B. in der mehrfach versuchten Kontaktaufnahme mit Nutzern der P+R-Anlage Lochhausen in München wider, um diese als Testnutzer für den Feldversuch (AP 7) zu gewinnen. Aufgrund der ausbleibenden Teilnahmebereitschaft konnte der Feldversuch nicht wie geplant mit externen Nutzern durchgeführt werden. Stattdessen wurden rechtzeitig alternative Verfahren zur Evaluierung der entwickelten Mobilitätsdienste entwickelt und eingesetzt, wie z.B. ein Simulationsmodell des Parkplatzes und ein mit Projektbeteiligten durchgeführter Praxistest vor Ort (hierzu ausführlich in Abschnitt 2.1.7).

Der Ausstieg des Projektpartners Wunder wirkte sich vor allem auf das verantwortete AP 6 (Ride Sharing) aus, das aufgrund des speziellen Themas und entsprechend hohen Anforderungen an die fachlichen und technischen Kompetenzen nicht von den verbleibenden Projektpartnern ifak und ParkHere übernommen werden konnte. Zudem war laut Wunder die weltweite Kundennachfrage nach Carpooling-Angeboten, bei dem letztlich immer eine Fahrgemeinschaft gebildet wird, aufgrund der pandemischen Lage und entsprechender Kontaktreduzierungen eingebrochen. Im Rahmen des Feldversuches hätten dafür strenge Abstands- und Hygieneregeln beachtet werden müssen, die in einem Pkw mit mehreren Personen nicht umsetzbar gewesen wären. Daher wurde das AP 6 nach dem plötzlichen Ausscheiden von Wunder vorzeitig beendet, wobei die bis dahin von Wunder erarbeiteten Projektergebnisse nicht in den vorliegenden Schlussbericht einfließen konnten, da den verbleibenden Partnern keine entsprechende Dokumentation überlassen wurde. Hierfür wird um Verständnis gebeten.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Vorbereitungen für das PAMIR-Projekt erfolgten etwa von Mitte 2017 und bis Mitte 2018, zuerst in Form einer Projektskizze und anschließend durch die entsprechende Vorhabenbeschreibung u. a. mit der detaillierten Arbeits- und Zeitplanung. Demnach wurde das Vorhaben

---

<sup>2</sup> siehe auch: <https://github.com/CUTR-at-USF/OpenTripPlanner-for-Android>

in acht Arbeitspakete (siehe Tab. 1) über eine Laufzeit von insgesamt 36 Monaten geplant. Mit der Durchführung des Projekts wurde am 01.09.2018 begonnen. Obwohl das planmäßige Projektende am 31.08.2021 gewesen wäre, hat sich dieses um drei Monate verschoben, da zu Beginn der Pandemie alle laufenden mFUND-Projekte pauschal um drei Monate verlängert wurden. Daher wird im Soll-Arbeitsplan (Tab. 1) das neue Projektende bereits berücksichtigt.

**Tab. 1: Soll-Arbeitsplan des PAMIR-Vorhabens, gegliedert nach Arbeitspaketen (Stand: 2018)**

<i>Nr.</i>	<i>AP-Titel und geplante Inhaltsschwerpunkte</i>	<i>Leitung</i>	<i>Zeitraum</i>
1	Projektmanagement <ul style="list-style-type: none"> <li>• Projektadministration</li> <li>• Interne Kommunikation</li> <li>• Risikomanagement</li> <li>• Qualitätsmanagement</li> <li>• Corporate Design und Website</li> </ul>	ifak	01.09.2018 – 30.11.2021
2	AP-übergreifende Daten- und Serviceplattform <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anforderungsanalyse</li> <li>• Systementwurf</li> <li>• Kartengrundlage (einzelne Stellplätze)</li> <li>• Implementierung</li> <li>• Dienste (zur Nutzung von Projektdaten)</li> <li>• Bereitstellung der Daten für die mCLOUD</li> <li>• Test</li> </ul>	ifak	01.09.2018 – 31.08.2019
3	Belegungsprognose von Parkplätzen <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anforderungsanalyse (Prognosedienst)</li> <li>• Systementwurf (Prognosedienst)</li> <li>• Installation von Parkplatzsensoren</li> <li>• Erschließung externer Datenquellen</li> <li>• Historische Belegungsdaten</li> <li>• Prognosemodell (für gesamten Parkplatz)</li> <li>• Verifikation und Validierung</li> <li>• Prognosedienst</li> </ul>	ParkHere	01.12.2018 – 31.10.2020
4	Stellplatzreservierung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anforderungsanalyse</li> <li>• Systementwurf</li> <li>• Reservierungsmanagement (Backend)</li> <li>• Reservierungszustand (Anzeige)</li> <li>• Reservierungsdienst (Smartphone-App)</li> <li>• Test</li> </ul>	ParkHere	01.12.2018 – 31.05.2020
5	Multimodales Reisen <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anforderungsanalyse (Anwendungsfälle)</li> <li>• Routing zum Stellplatz (Verfahren)</li> <li>• Navigationsdienst</li> <li>• Integration in bestehende Mobilitäts-App</li> <li>• Test</li> </ul>	ifak	01.05.2019 – 31.10.2020
6	RideSharing <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anforderungsanalyse (Anwendungsfälle)</li> <li>• Installation von Parkplatzsensoren</li> <li>• Verkettung mehrerer Mitfahrwünsche</li> </ul>	Wunder	01.05.2019 – 31.10.2020



die Parkplatzbelegungsprognose als ein interessanter Anwendungsfall betrachtet.<sup>3</sup> Zugleich wurde der wissenschaftliche Anspruch des Arbeitspakets deutlich erhöht, da statt dem ursprünglich geplanten Regressionsmodell für die Belegungsprognose nun ein künstliches neuronales Netz zu erstellen war, das im Abschnitt 2.1.3 ausführlich beschrieben wird.

Für den Feldversuch (AP 7) war es zu Projektbeginn außerdem notwendig, einen Parkplatzbetreiber als assoziierten Partner zu gewinnen, um die Installation der Hard- und Software (Sensoren, Anzeigen etc.) auf einem Parkplatz vornehmen zu können. Gemeinsam konnten ParkHere und ifak die P+R Park & Ride GmbH München von der Nachhaltigkeit und dem großen Innovationscharakter des PAMIR-Projekts überzeugen und schlossen mit dem Unternehmen einen entsprechenden Kooperationsvertrag im Jahr 2019 (siehe auch Abschnitt 1.5).

Anschließend übernahm ParkHere die Planung und Koordination der Bauarbeiten auf dem Parkplatz, die im Herbst 2019 durchgeführt wurden (siehe auch Abb. 4). Die wesentlichen Vorgänge zur Umsetzung aller dazu notwendiger Arbeiten waren:

- Vorort-Besichtigung
- Planung der Installation und Abstimmung mit dem Parkplatzbetreiber
- Erstellung eines Projektplans
- Beauftragung eines Subdienstleisters unter Berücksichtigung von Budget und Zeitrahmen
- Baustellenbesichtigung und Dokumentation
- Konfiguration und Initialisierung des Sensorsystems
- Tests und Qualitätssicherung



**Abb. 4: Installation der Sensoren auf der Park-and-Ride-Anlage Lochhausen Nord in München**

Des Weiteren ergaben sich wesentliche Änderungen in den Arbeitspaketen 6 und 7, die auf den vorzeitigen Ausstieg des Projektpartners Wunder bzw. die fehlende Teilnahmereitschaft von Testnutzern für den Feldversuch zurückzuführen waren (wie bereits im Abschnitt 1.2.6 erörtert). Jedoch war für das AP 6 von vornherein keine direkte Beteiligung des ifak vorgesehen, sodass dessen Abbruch nur indirekte Auswirkungen auf die Ziele des ifak im AP 7 hatte.

Aufgrund des Ausscheidens von Wunder, das mit der Kündigung des Kooperationsvertrags am 13.11.2020 erklärt wurde, haben die verbleibenden Projektpartner ifak und ParkHere die

---

<sup>3</sup> siehe auch Zwischenbericht ifak 2019, S. 1

Möglichkeiten zur Fortsetzung des PAMIR-Projekts eingehend geprüft.<sup>4</sup> Im Ergebnis dieser Prüfung wurde einvernehmlich festgestellt, dass auch ohne die Mitwirkung von Wunder bis zum Ende der Projektlaufzeit die Projektziele erreicht und die noch nicht abgeschlossenen Arbeiten finalisiert werden können. Entgegen der ursprünglichen Planung wurde dabei auf das Carpooling-Angebot verzichtet, da es auch angesichts der während des Feldversuchs sehr wahrscheinlich anhaltenden Corona-Pandemie und entsprechender Kontaktbeschränkungen ohnehin nicht zulässig gewesen wäre. Insofern wurde die von den verbleibenden Projektpartnern zunächst angedachte Alternative einer Übernahme des Carpooling-Angebots durch einen anderen Projektpartner oder einen zu beauftragenden Dienstleister als nicht sinnvoll erachtet und nicht weiterverfolgt. Der Feldversuch (AP 7) wurde nach der angepassten Planung deshalb auf Anwendungen und Mobilitätsdienste, die von ifak und ParkHere entwickelt wurden, fokussiert. Die Aufgaben im AP 7 konnten durch die verbleibenden Partner ohne Mehraufwand durchgeführt werden, da zum einen die entsprechenden Anteile für das Carpooling entfallen und zum anderen das gemeinsame Evaluierungskonzept (AP 7.1) unter Mitwirkung des Partners Wunder bereits vor dessen Ausscheiden erstellt wurde.

In der ersten Hälfte der Projektlaufzeit fanden ganztägige Arbeitstreffen bei einem der Partner vor Ort, im Abstand von etwa 3-6 Monaten statt, um gemeinsam die aktuellen Arbeitsstände und die nächsten Schritte zu besprechen. Diese Arbeitstreffen wurden vorrangig durch den Koordinator ifak geplant und moderiert. Nach dem Ausbruch der Corona-Pandemie fanden die Arbeitstreffen rein virtuell über Konferenztools statt. Daneben wurden seit Projektbeginn einstündige Webmeetings im Abstand von zwei Wochen, unter Leitung des ifak durchgeführt, um kurzfristige Termine und Aufgaben (z. B. Teilnahme an Veranstaltungen) abzustimmen.

Das ifak hat die Öffentlichkeitsarbeit zum PAMIR-Projekt federführend übernommen, indem es an Konferenzen und Messen (u. a. mFUND-Konferenz, ITS World Congress, Hypermotion, Smart Country Convention) sowie den regelmäßigen Workshops der Begleitforschung (u. a. Arbeitsforum Standardisierung/mCLOUD, Open Data/Behörden; Fachaustausch Parken) teilnahm bzw. mitwirkte. Ebenso hat das ifak das öffentliche Abschlusstreffen, das am 10.02.2022 virtuell stattfand, vorbereitet und gemeinsam mit dem Projektpartner ParkHere durchgeführt.

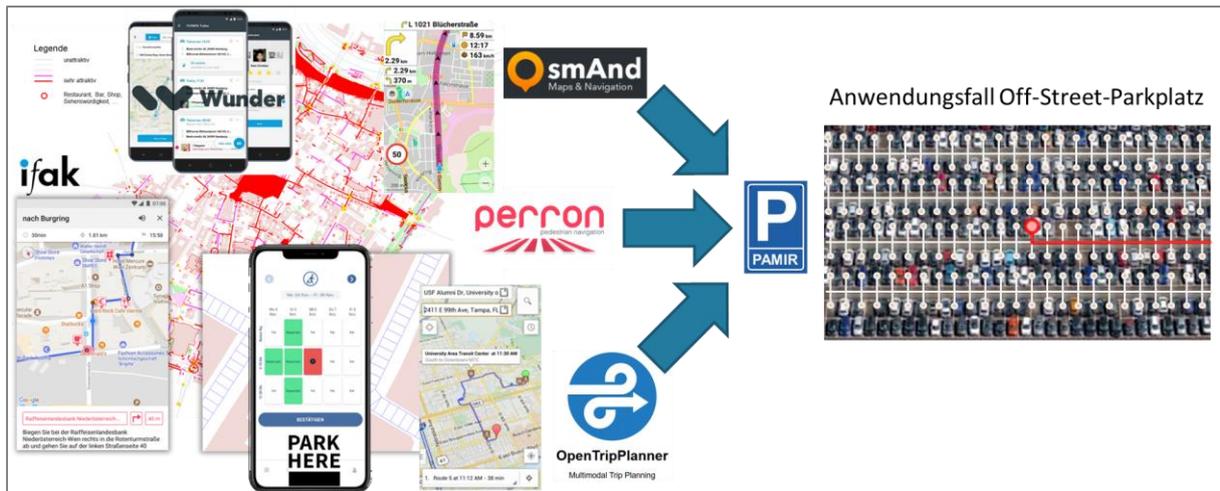
#### **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Der Stand der Technik und Wissenschaft zu Projektbeginn (Stand 2018) besteht zum einen aus eigenen Vorarbeiten und -entwicklungen, wie z. B. dem bereits einsatzfähigen Belegungssensor von ParkHere sowie einer prototypischen Fußgängernavigations-App, die vom ifak im Rahmen des PERRON-Projekts (2014-2017) entwickelt wurde. Zum anderen wurde auf bestehende Open-Source-Tools für die Pkw-Navigation (OsmAnd) und für die Reiseplanung mit öffentlichen Verkehrsmitteln (OpenTripPlanner) gesetzt, die jeweils an den PAMIR-Anwendungsfall (Off-Street-Parkplätze, insbesondere Park-and-Ride-Anlagen) angepasst werden sollten.<sup>5</sup> Eine grafische Übersicht dieser und weiterer Tools der anderen Projektpartner bietet die folgende Abb. 5.

---

<sup>4</sup> siehe auch Stellungnahme des Projektkoordinators ifak an den Projektträger VDI/VDE-IT vom 01.12.2020 (nichtöffentliches Dokument)

<sup>5</sup> PERRON und OpenTripPlanner konnten aufgrund sich später herausstellender Probleme jedoch nicht genutzt werden und sind daher durch geeignetere Anwendungen ersetzt worden (wie bereits im Abschnitt 1.2 erläutert und zu den entsprechenden Ergebnissen im Abschnitt 2.1 weiter ausgeführt wird).



**Abb. 5: Übersicht der eigenen Vorarbeiten und verfügbaren Tools für das PAMIR-Projekt**

Für die Detektion des Belegungsstatus von Parkplätzen gibt es zahlreiche unterschiedliche Ansätze. Während Hersteller wie Bosch auf batteriebetriebene Sensoren mit Sensorfusion aus Magnetfeld- und Ultraschall setzen, die mittels LoraWan über ein Sensornetzwerk kommunizieren, bietet Siemens radarbetriebene Technik an Laternenmasten an. Wieder andere Ansätze, wie die von Clever City, arbeiten mit Kameras bzw. optischen Sensoren und Computer Vision-Technologie.

All diese Ansätze haben eines gemein: Sie benötigen eine Energiequelle, sei es eine Batterie, die nur eine sehr begrenzte Lebensdauer hat, oder ein mehr oder weniger aufwändig zu verlegender Stromanschluss für eine Radar- oder Kameralösung an die gewählte Stelle der Detektion. Zudem ist es für diese Lösungen notwendig, einen hohen Punkt mit möglichst freiem Blickfeld auf die Stellflächen zu wählen.

Bis auf den ParkHere-Sensor ist eine energieautarke Sensorik im Einsatzbereich der Parkplatz-Detektion nicht bekannt. Im Bereich der Gebäudeautomation werden bereits energieautarke Sensoren z. B. für Lichtschalter oder die Kippstellung eines Fensters genutzt. Die Firma EnOcean bietet zahlreiche „low energy“ und energieautarke Lösungen in diesem Bereich an.

Für die Planung einer multimodalen Reisekette sind Anwendungen wie z. B. Google Maps verfügbar. Zwar können viele dieser Anwendungen bereits mehr als einen Verkehrsmodus in die Planung einbeziehen, allerdings meist keinen Umstieg zwischen Individual- und öffentlichen Verkehrsmitteln. Außerdem verfügen diese Anwendungen auch noch nicht über Echtzeit- oder Prognosedaten zur Belegungssituation der Parkplätze, weder für einen Umsteigepunkt noch für das Reiseziel. Eine Reservierungsfunktion für Parkplätze gibt es vereinzelt bereits an Flughäfen, der Einsatz auf unbeschränkten Park-and-Ride-Anlagen ist jedoch nicht bekannt.

Analog zum Stand der Technik wurde auch der Stand der Wissenschaft zu Projektbeginn recherchiert und ausgewertet. Dabei wurden vor allem mFUND-Projekte, die sich ebenso mit dem Thema „Parken“ oder „Multimodales Reisen“ beschäftigen, betrachtet, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede herauszuarbeiten und somit die Vernetzungs- und Kooperationsmöglichkeiten z. B. im Rahmen der Begleitforschung bestmöglich zu nutzen (siehe Tab. 2).

**Tab. 2: Vergleichbare mFUND-Projekte zum Thema Parken oder multimodales Reisen**

<i>Projekt</i>	<i>Thema</i>	<i>Wesentliche Schwerpunkte</i>
ParkenDigital (mFUND) 2018-2019	Entwicklung von übertragbaren Erhebungsmethoden unter Berücksichtigung innovativer Technologien zur Parkraumdatengenerierung und Digitalisierung des Parkraums	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fokus: Parksuchverkehr</li> <li>• Kombination und Verwertung von vorhandenen Parkraumdaten aus unterschiedlichen Quellen (z. B. registrierte Parkverstöße eines Ordnungsamtes)</li> <li>• Konzept- und Methodenentwicklung zur Datenfusion, -aufbereitung und -auswertung</li> <li>• zur detaillierteren Parkraumabbildung</li> <li>• keine stellplatzfeinen Belegungssensoren</li> </ul>
ParkUp (mFUND) 2017-2019	Urbane Mobilitäts- und Logistikdienste durch flexibles und datenbasiertes Parkraummanagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fokus: Zweitnutzung von innerstädtischen Parkhäusern/Stellplätzen als Logistikflächen</li> <li>• Kombination von Verkehrs- und Umweltdaten</li> <li>• zur Entwicklung flexibler Preismodelle</li> <li>• Stellplatzreservierung/-anmietung per App</li> <li>• mit Reservierungsanzeige (Display)</li> <li>• mit physischer Absperrung (Bügelssystem)</li> <li>• keine stellplatzfeinen Belegungssensoren</li> </ul>
FaMoS (mFUND) 2017-2020	Daten der Fahrzeugnavigation für verbesserte Mobilitäts- und Situationsinformationen im Verkehrsmanagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fokus: Multimodale strategiekonforme Mobilitäts- und Situationsinformationen im Verkehrsmanagement</li> <li>• Integration in Systeme zur Fahrzeugnavigation (z. B. Anzeige von Umleitungen oder von überlasteten Netzabschnitten und entspr. Routenoptimierung)</li> <li>• prototypische Smartphone-App zur Demonstration</li> <li>• keine Echtzeitdaten zur lokalen Parksituation</li> </ul>

Weitere erwähnenswerte mFUND-Projekte sind PundR-Aktuell<sup>6</sup> (2020-2021) und start2park<sup>7</sup> (seit 2020), die aufgrund des jeweils zwei Jahre späteren Starts dem ifak erst während der zweiten Halbzeit des PAMIR-Projekts bekanntgeworden sind, sodass eine mögliche Abstimmung und Anpassung der jeweiligen Projektziele nicht mehr möglich gewesen sind.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wie bereits in den vorigen Abschnitten beiläufig erwähnt, war die externe Zusammenarbeit während der Projektlaufzeit vor allem durch die regelmäßige Kommunikation und Vernetzung mit der bis 2020 zuständigen Einrichtung für die mFUND-Begleitforschung (WIK) sowie den Konsortien der oben genannten mFUND-Projekte geprägt. Zum Ende der Projektlaufzeit wurden die Angebote der seit 2021 zuständigen Begleitforschungseinrichtung *iRights.Lab* genutzt, wie z. B. der Newsletter „Emmett Navigator“ zur Bewerbung des Abschlusstreffens.

Daneben wurde im Jahr 2019 ein Kooperationsvertrag mit der P+R Park & Ride GmbH München, die im Auftrag der Landeshauptstadt München die dortigen P+R-Anlagen betreibt, zur Einrichtung und Durchführung des Testbetriebs der Sensoren und des Reservierungssystems

<sup>6</sup> Akkurate treffsichere und evaluierte Lösungen und Leistungen für Park+Ride-Anlagen (<https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/pundr-aktuell.html>)

<sup>7</sup> Smarte Nutzung von Trackingdaten zur Entwicklung eines Erklärungs- und Prognosemodells für die Parksuchdauer (<https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/start2park.html>)

in der Anlage „Lochhausen Nord“ geschlossen. Über den Geschäftsführer wurden Informationen zum PAMIR-Projekt in der Stadtverwaltung, u. a. im Rahmen von Gremiensitzungen und mithilfe von Pressemitteilungen, regelmäßig verbreitet.

Außerdem wurde durch das ifak direkt Kontakt zur MVV (Münchner Verkehrs- und Tarifverbund GmbH) sowie zur Stadtverwaltung (Referat für Stadtplanung und Bauordnung, Stadtentwicklungsplanung, Abteilung Verkehrsplanung HA I/3) aufgenommen, um Zugangsmöglichkeiten zu Fahrplandaten (GTFS) bzw. detaillierten Verkehrsdaten für Lochhausen zu prüfen.

## **2 Eingehende Darstellungen**

### **2.1 Erzielte Ergebnisse**

#### **2.1.1 AP 1 Projektmanagement**

Im Rahmen des AP 1 war das ifak in der Rolle des Projektkoordinators für die Planung, Steuerung und Kontrolle des Gesamtvorhabens verantwortlich. Es stand dem Projektträger oder dem Zuwendungsgeber als erster Ansprechpartner zur Verfügung. Durch das Projektmanagement wurde eine dem Zeit- und Arbeitsplan entsprechende Projektbearbeitung und fristgerechte Erstellung von Zwischen- und Schlussberichten sichergestellt. Im Fall von Konflikten hätte das ifak als schlichtende Instanz agiert. Zudem hat es als Forschungseinrichtung, die seit über 30 Jahren existiert, den wissenschaftlichen Anspruch für alle Projektpartner definiert sowie die Qualität der erzielten Ergebnisse überwacht und ggf. zur Verbesserung aufgefordert.

Im Einzelnen untergliederte sich das AP 1 in folgende fünf Unterarbeitspakete, die ausschließlich durch das ifak geleitet und bearbeitet wurden:

- AP 1.1 Projektadministration
- AP 1.2 Interne Kommunikation
- AP 1.3 Risikomanagement
- AP 1.4 Qualitätsmanagement
- AP 1.5 Corporate Design und Website

Besondere Ergebnisse, die sich von den üblichen Aufgaben des Projektmanagements abheben und daher erwähnenswert sind, betreffen die Einrichtung und Pflege einer Projektwebsite ([www.pamir-projekt.de](http://www.pamir-projekt.de)), die Gestaltung eines Projektlogos (siehe Deckblatt), die Schaffung eines einheitlichen Designs für alle Projektpräsentationen sowie die Erstellung eines Projektflyers und verschiedener Projektposter, die in P+R Lochhausen Nord ausgehängt wurden.

#### **2.1.2 AP 2 AP-übergreifende Daten- und Serviceplattform**

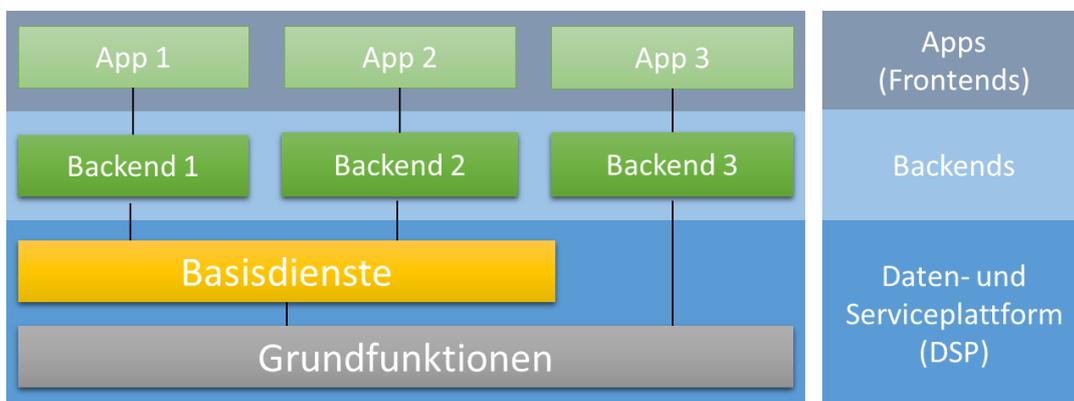
Das Ziel von AP 2 bestand darin, eine AP-übergreifende Serviceplattform aufzusetzen, auf der alle relevanten Daten – vorrangig jedoch die Daten der ParkHere-Sensoren – zusammenlaufen. Die Daten waren anschließend allen Partnern für ihre zu entwickelnden Algorithmen und Dienste zur Verfügung zu stellen. Ferner sollten Basisdienste für grundlegende Such-, Filter und Aggregationsaufgaben bereitgestellt werden. Das ifak übernahm die AP-Gesamtleitung.

Im Einzelnen untergliederte sich das AP 2 in folgende sieben Unterarbeitspakete:

- AP 2.1 Anforderungsanalyse
- AP 2.2 Systementwurf
- AP 2.3 Kartengrundlage
- AP 2.4 Implementierung

- AP 2.5 Dienste
- AP 2.6 Bereitstellung der Daten für die mCLOUD
- AP 2.7 Test

Im Rahmen von AP 2.2 **Systementwurf** wurde zunächst die prinzipielle Systemarchitektur der AP-übergreifenden Daten- und Serviceplattform (DSP) mit verschiedenen Backends und Frontends entwickelt. Wie in der Abb. 6 schematisch dargestellt, ist diese als sogenanntes Mehrschichtmodell konzipiert. Auf der untersten Ebene befinden sich die Grundfunktionen. Sie beinhalten grundlegende, dienstunabhängige Funktionen, wie beispielsweise die Abfrage belegter Stellplätze für einen bestimmten Parkbereich. Darauf aufsetzend befindet sich die Schicht der Basisdienste, welche auf die API der Grundfunktionen zugreifen. Basisdienste stellen spezielle Funktionen zur Verfügung, die aber noch so allgemein gehalten sind, dass sie von unterschiedlichen Backends gemeinsam genutzt werden können. Ein Beispiel für einen Basisdienst wäre die Ermittlung des Belegungszustands eines einzelnen Stellplatzes.



**Abb. 6: Prinzipielle Systemarchitektur (Daten- und Serviceplattform, Backends, Frontends)**

Im Rahmen von AP 2.1 **Anforderungsanalyse** wurde der allgemeine PAMIR-Anwendungsfall (Off-Street-Parkplätze, insbesondere Park-and-Ride-Anlagen) anhand der zu entwickelnden Mobilitätsdienste und betrachteten Nutzergruppen spezifiziert. Demnach ergaben sich aus Sicht der Unternehmen ParkHere und Wunder (Anbieter) vier relevante Anwendungsfälle:

- *Anwendungsfall 1:* Reservierung von Parkplätzen
- *Anwendungsfall 2:* Multimodale Reiseplanung mit der Benutzung des Pkw als ein Glied der Reisekette. Das Routing kann durch die mikroskopischen Belegungsdaten von Parkplätzen die exakte Route zum Parkplatz und den anschließenden Fußweg zum ÖPNV bzw. zum Ziel berechnen. Weitere Varianten des Anwendungsfalls ergeben sich durch die Berücksichtigung der prognostizierten makroskopischen Parkplatzsituation, d. h. ohne Reservierung, bei der Reiseplanung und jeweils die Verwendung eines Stellplatzes.
- *Anwendungsfall 3:* Komfortable Navigation zum reservierten Stellplatz während der Reise bzw. zu einem nicht-reservierten Stellplatz auf der Basis aktueller Belegungsdaten der ParkHere-Sensoren
- *Anwendungsfall 4:* Planung und Durchführung einer Verkettung mehrerer Mitfahrwünsche unter Einbindung der Parkplatzprognosedaten und Parkplatzreservierungsmöglichkeiten

Entsprechend dieser Beschreibungen lassen sich die vier Anwendungsfälle anhand der Merkmale „Mobilitätsdienst“ und „Nutzergruppe“ wie in Tab. 3 kennzeichnen und unterscheiden:

**Tab. 3: Übersicht der gebildeten Anwendungsfälle im PAMIR-Projekt**

		Anwendungsfall (mit Varianten a, b,...)					
		1	2a	2b	3a	3b	4
<i>Mobilitätsdienst</i>	M1 Stellplatzbelegungserfassung		•			•	
	M2 Parkplatzbelegungsprognose			•			•
	M3 Stellplatzreservierung	•			•		•
	M4 Stellplatz-Zielnavigation				•		
	M5 Multimodale Reiseplanung		•				
	M6 Verkettung von Mitfahrwünschen						
<i>Nutzergruppe</i>	N1 Park-and-Ride-Kunden	•	•		•		
	N2 Carpooling-Kunden	•			•		•

Mit den jeweils zwei Varianten zu Anwendungsfall 2 und 3 standen insgesamt sechs Szenarien für den Feldversuch und das Simulationsexperiment (in AP 7) zur Auswahl. Aufgrund des vorzeitigen Ausstiegs von Wunder wurde der Anwendungsfall 4 vollständig gestrichen sowie der Fall 1 und 3 jeweils ohne Carpooling-Kunden betrachtet (schraffierte Bereiche in Tab. 3).

Auf Basis der definierten Anwendungsfälle wurden im AP 2.2 **Systementwurf** auch die erforderlichen Daten und Funktionen der einzelnen Mobilitätsdienste bestimmt. Zum Beispiel sollte der Dienst *M3 Stellplatzreservierung* folgende Funktionen<sup>8</sup> umfassen:

- Funktion M3.1: Reservierung durchführen
- Funktion M3.2: Reservierung ändern (z. B. Zeitraum verlängern)
- Funktion M3.3: Reservierung stornieren
- Funktion M3.4: Bestätigung der Ankunft auf reserviertem Stellplatz durch Nutzer
- Funktion M3.5: Reservierter Stellplatz wird durch unberechtigtes Fahrzeug belegt
- Funktion M3.6: Freigabe des reservierten Stellplatzes (evtl. vorzeitig) durch Nutzer

Für jede Funktion wurden die erforderlichen bzw. optionalen Parameter einer Anfrage (Request) und Antwort (Response) tabellarisch beschrieben, wie zum Beispiel für die Funktion 2.1:

**Tab. 4: Parameter (Request) der Funktion M3.1 *reserveSpot***

<i>Parameter</i>	<i>Datentyp</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Optional</i>
customerId	integer	Kunden-ID	
areald	integer	Parkbereich-ID	
start	integer	Beginn des Reservierungszeitraumes (Unix Timestamp)	
end	integer	Ende des Reservierungszeitraumes (Unix Timestamp)	
licensePlate	string	Kfz-Kennzeichen (Fahrzeug-ID)	
userId	integer	Benutzer-ID	

<sup>8</sup> teilweise waren diese nicht unbedingt erforderlich und wurden daher von ParkHere nicht implementiert

**Tab. 5: Response der Funktion M3.1 reserveSpot**

Name	Datentyp	Beschreibung	Optional
errorCode	integer	Fehlercode, 0 bei erfolgreicher Reservierung	
spotId	integer	Stellplatz-ID	ja
reservationId	integer	Reservierungs-ID	ja
start	integer	Beginn des Reservierungszeitraumes (Unix Timestamp)	ja
end	integer	Ende des Reservierungszeitraumes (Unix Timestamp)	ja

Die **Implementierung** der Daten- und Serviceplattform (AP 2.4) erfolgte auf einem Webserver, der dem ifak gehört und sich in dessen Räumlichkeiten in Magdeburg befindet. Dieser wird von den zuständigen Systemadministratoren nach höchsten IT-Sicherheitsstandards betrieben, sodass bisher keine Störungen (z. B. Hacker-Angriffe o. Ä.) aufgetreten sind.

Die Echtzeit-Sensordaten vom Parkplatz Lochhausen Nord werden zunächst auf einem anderen Webserver von ParkHere gespeichert und dort im Minutentakt vom ifak-Webserver abgefragt und permanent gespeichert. Dadurch sind alle historischen und aktuellen Sensordaten auf der Daten- und Serviceplattform im ifak verfügbar und können von den anderen Diensten (Stellplatzreservierung, Stellplatz-Zielnavigation) über eine API (JSON) abgefragt werden.

Die aktuellen Sensordaten sind öffentlich über entsprechende Links z. B. in der **mCLOUD**<sup>9</sup> (AP 2.6) abrufbar. Diese können auch Personen ohne Programmierkenntnisse mithilfe eines geeigneten Webbrowsers (z. B. Firefox) lesen, wie in der folgenden Abb. 7 dargestellt. Analog können die exakten Geo-Koordinaten jedes Stellplatzes abgefragt werden (siehe Abb. 6).

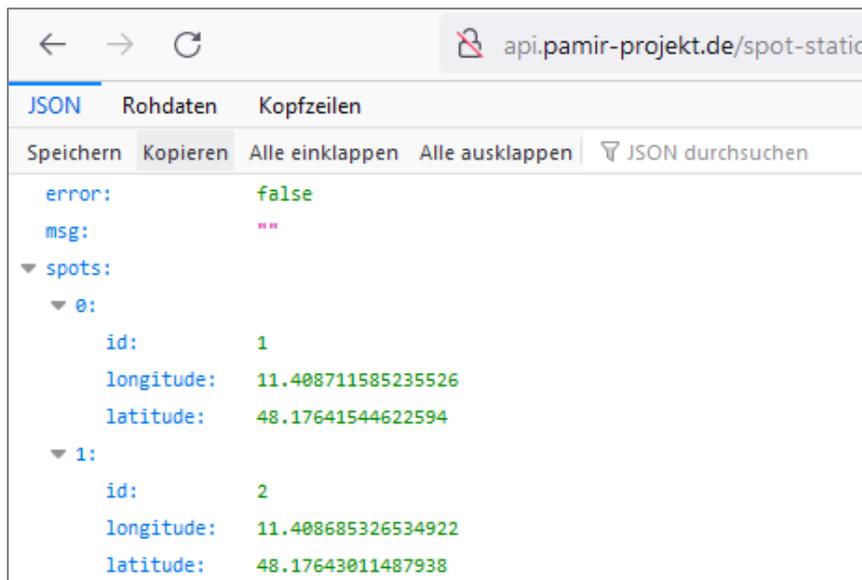
```

{
  "error": false,
  "msg": "",
  "spots": [
    {
      "id": 1,
      "timestamp": "16.02.2022 09:17",
      "state": 1
    },
    {
      "id": 2,
      "timestamp": "16.02.2022 09:14",
      "state": 1
    }
  ]
}

```

**Abb. 7: Dynamische Informationen (Zustandsbeginn, Belegungszustand) eines Stellplatzes (id)**

<sup>9</sup> <https://www.mcloud.de/zh/web/quest/suche/-/results/detail/FED49CD5-4AAF-4EAD-BFD4-9FDC1DE0C1B3>



```
api.pamir-projekt.de/spot-static
JSON Rohdaten Kopfzeilen
Speichern Kopieren Alle einklappen Alle ausklappen JSON durchsuchen
error: false
msg: ""
spots:
  0:
    id: 1
    longitude: 11.408711585235526
    latitude: 48.17641544622594
  1:
    id: 2
    longitude: 11.408685326534922
    latitude: 48.17643011487938
```

Abb. 8: Statische Informationen (Geo-Koordinaten: ö. Länge, n. Breite) eines Stellplatzes (id)

Ferner war im Rahmen von AP 2 auch die **Kartengrundlage** für die neuen Dienste, insbesondere für die Stellplatz-Zielnavigation (Routing), zu erstellen. Dafür wurden in die vorhandene OpenStreetMap-Karte von Lochhausen Nord mithilfe des *Java-OpenStreetMap-Editor* (JOSM) zunächst die Flächen von allen Bereichen (wie z. B. Sonderzonen für Behinderte, Familien und Frauen sowie Normalzonen für sonstige Nutzer) eingezeichnet.<sup>10</sup> Anschließend wurden die reservierbaren Stellplätze, die bisher zu einer Normalzone gehörten, im Einzelnen eingezeichnet. Dabei wurden neben den vier Eckpunkten der Fläche auch der Mittelpunkt eines Stellplatzes gesetzt, um diesen jeweils mit einem Pfad zum Hauptfahrweg des Parkplatzes zu verbinden. Das Ergebnis ist im folgenden JOSM-Kartenausschnitt (Abb. 9) zu erkennen.

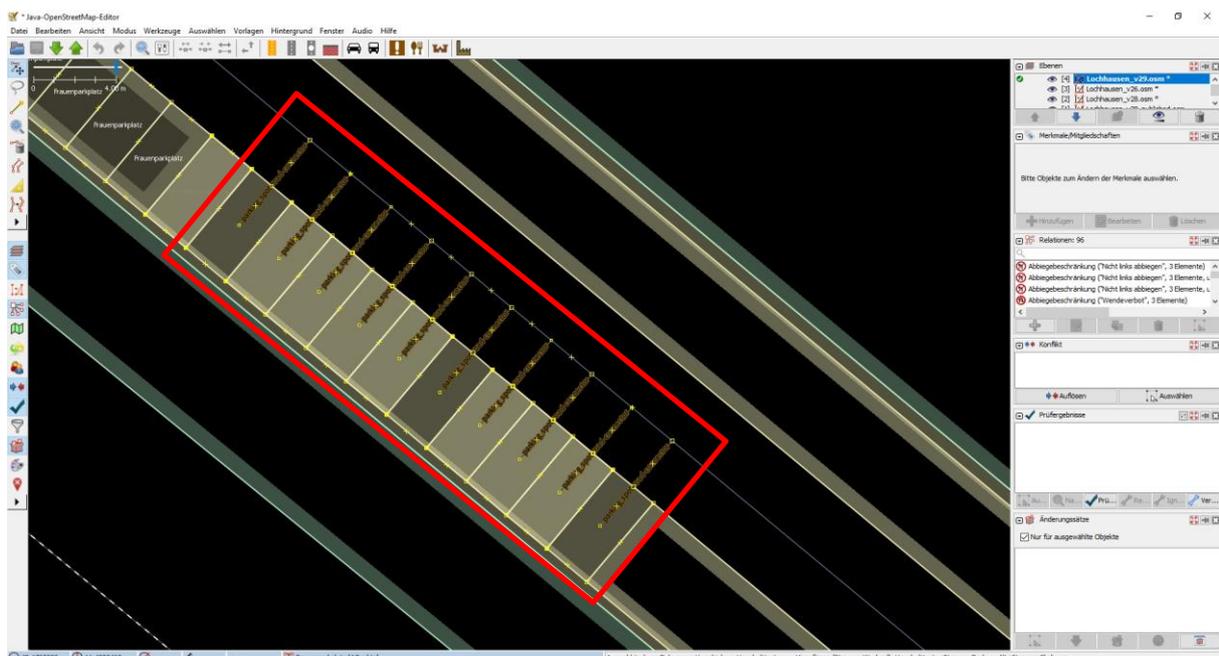
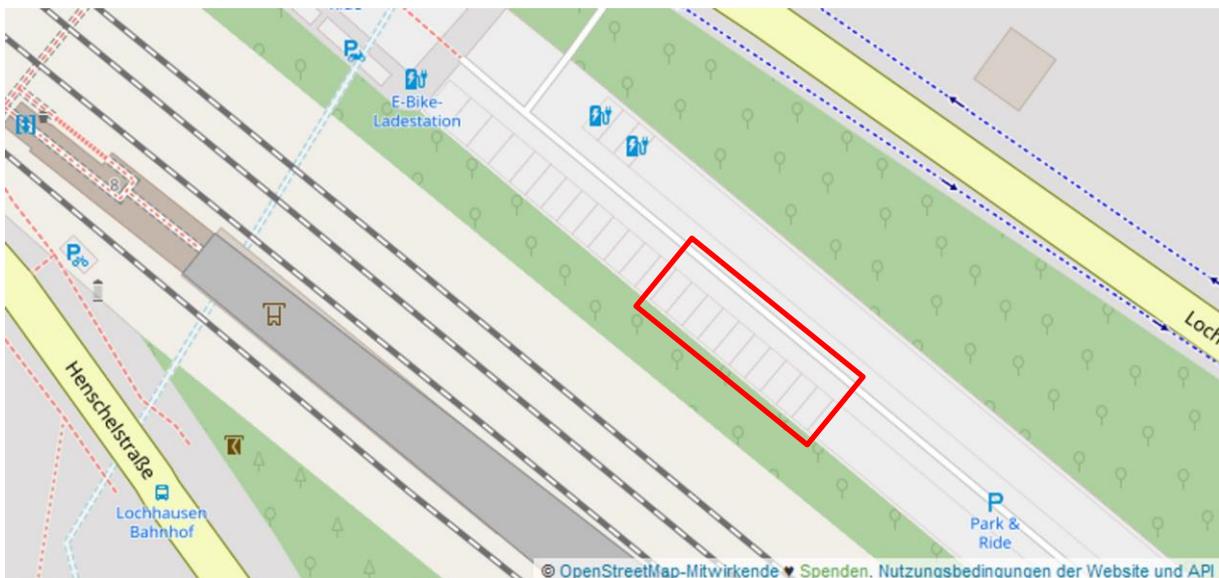


Abb. 9: Einzeichnung der zehn reservierbaren Stellplätze (rot umrandet) in Lochhausen Nord

<sup>10</sup> Die Geo-Koordinaten der Flächen wurden u. a. auf Basis von Luft- und Satellitenbildern bestimmt.

Anschließend wurde mithilfe des *OsmAndMapCreator* die entsprechende OSM-Datei der aktualisierten Karte in eine OBF-Datei umgewandelt, die dann direkt in den Kartenordner der auf einem Smartphone installierten OsmAnd-App geladen werden konnte. Somit war es nicht erforderlich, auf die offizielle Aktualisierung der Parkplatzkarte durch OsmAnd zu warten, da Änderungen aus der OSM-Datenbank in der Regel erst nach mehreren Wochen übernommen werden. Außerdem wurden die Verbindungen zwischen einem Stellplatz und dem Hauptfahrweg gar nicht erst in die OSM-Datenbank eingepflegt, da noch kein Standard für das Einzeichnen solcher Pfade durch die OSM-Gemeinschaft definiert wurde. Provisorisch wurde daher für OsmAnd der Wegtyp „Feld- oder Waldweg“ genutzt, auf dem auch Kraftfahrzeuge fahren dürfen. Diese sind in der durch das ifak aktualisierten OSM-Karte nicht vorhanden (siehe Abb. 10).



**Abb. 10: Offizielle OSM-Karte nach Einzeichnung von reservierbaren Stellplätzen (rot umrandet)**

### 2.1.3 AP 3 Belegungsprognose von Parkplätzen

Das Ziel von AP 3 bestand darin, makroskopische (d. h. nicht stellplatzfeine) Belegungsdaten zu Parkplätzen auf Korrelation mit verschiedenen anderen Daten (u. a. Wetter, Großveranstaltungen, Schulferien und Feiertage) zu untersuchen, um daraus eine makroskopische Belegungsprognose von Parkplätzen generieren zu können. Diese dient einer realistischeren Reiseplanung auch ohne Parkplatzreservierung. Zur Verifizierung der Güte des Prognosemodells sollten neben den Daten der installierten Parkplatzsensoren auch historische Belegungsdaten z. B. von Parkplätzen mit Zählfunktion oder von Parkscheinautomaten verwendet werden.

Die AP-Gesamtleitung übernahm das ifak anstelle von ParkHere, da sich zu Projektbeginn ein hohes Interesse des ifak an einem KI-basierten Prognosemodell herausstellte und dies wissenschaftlich anspruchsvoller als das ursprünglich geplante Regressionsmodell war.

Im Einzelnen untergliederte sich das AP 3 in folgende acht Unterarbeitspakete:

- AP 3.1 Anforderungsanalyse
- AP 3.2 Systementwurf
- AP 3.3 Installation von Parkplatzsensoren (ausschließlich durch ParkHere)
- AP 3.4 Erschließung externer Datenquellen

- AP 3.5 Historische Belegungsdaten
- AP 3.6 Prognosemodell
- AP 3.7 Verifikation und Validierung
- AP 3.8 Prognosedienst

Im Rahmen von AP 3.1 **Anforderungsanalyse** wurden die Anforderungen an das Prognosemodell und den Prognosedienst durch die Projektpartner spezifiziert. Neben den bereits definierten Einflussfaktoren (Wetter, Großveranstaltungen, Schulferien, Feiertage) wurden außerdem die Prognosegenauigkeit (d. h. die tolerierbare Abweichung zwischen Prognose- und Realwert), der Prognosezeitschritt (z. B. im Minuten- oder Stundentakt) und der Prognosezeitraum (z. B. täglich von 0-24 Uhr) als wesentliche Kriterien erörtert. Als Mindestanforderungen wurden eine Toleranz von  $\pm 15\%$  um den tatsächlichen Belegungsgrad (z. B.  $80\% \pm 15\%$  entspricht einer tatsächlichen Belegung zwischen  $65\%$  und  $95\%$ ), ein Zeitschritt von einer Stunde (beginnend jeweils zur vollen Stunde, z. B. 15:00 – 15:59 Uhr) sowie ein Zeitraum von werktäglich 8-18 Uhr (Hauptzeit für Berufspendler) festgelegt. Da dies grundsätzlich von der Menge und Qualität der verfügbaren Eingangsdaten, insbesondere den historischen Belegungsdaten, abhängt, konnte die endgültige Festlegung der Anforderungen erst nach Beschaffung und Auswertung dieser Daten im Rahmen von AP 3.4 und AP 3.5 erfolgen.

Eine weitere Aufgabe von AP 3.1 bestand in der Auswahl von geeigneten Parkplätzen für die geplanten Anwendungsfälle. Da der Fokus auf Nutzer von Park-and-Ride-Angeboten lag, wurden die jeweiligen Betreiber von Park-and-Ride-Anlagen in verschiedenen Großstädten angefragt. Aufgrund des bereits vor PAMIR bestehenden Kontakts von ParkHere zum Betreiber in München, der P+R Park & Ride GmbH, war das dortige Interesse am PAMIR-Projekt sofort sehr ausgeprägt, sodass bereits im Frühling/Sommer 2019 ein Kooperationsvertrag zur Einrichtung eines Testfelds in der Anlage Lochhausen Nord und zur Bereitstellung von historischen Belegungsdaten von verschiedenen Parkplätzen geschlossen wurde. Die folgende Abb. 11 bietet eine Übersicht zu den drei untersuchten Park-and-Ride-Anlagen in München.<sup>11</sup>

- Kooperation mit **P+R Park & Ride GmbH München**
- Gesamtbelegungsdaten aus täglichen Ticketkontrollen (2014 – 2019) erhalten für
  - Lochhausen Nord (LON)
  - Großhadern (GRO)
  - Trudering Nord (TRN)

	LON	GRO	TRN
Nutzer	nur ÖPNV-Kunden erlaubt		
Parkdauer	maximal 24 h		
Anbindung	S3	U6	U2,S4,S6
Kapazität	139	308	169

**Abb. 11: Übersicht zu den untersuchten Park-and-Ride-Anlagen in München**

<sup>11</sup> Die ParkHere-Sensoren wurden nur in der Anlage Lochhausen Nord installiert.

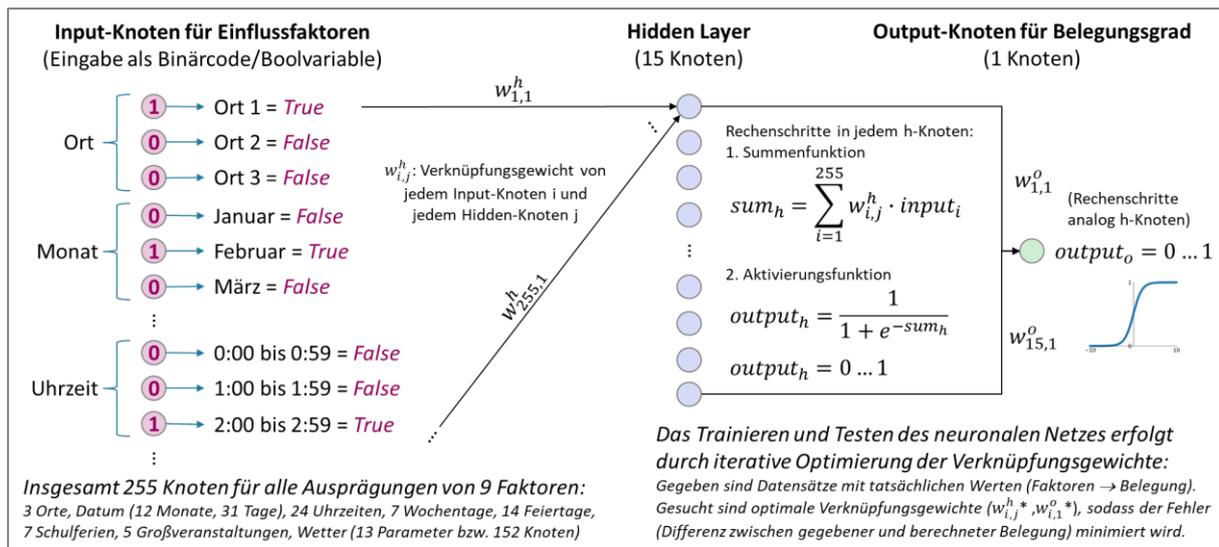
Der **Systementwurf** (AP 3.2) zum Parkplatz-Prognosedienst orientiert sich an der allgemeinen Systemarchitektur (Abb. 6). Das Backend besteht aus dem Prognosemodell, das als künstliches neuronales Netz (ein sogenanntes dreischichtiges Feedforward-Network) auf dem ifak-Webserver implementiert ist. Das Frontend des Prognosedienstes wurde in die vom ifak neu entwickelte PAMIR-App integriert, die auch die anderen Dienste (Reservierung, Reiseplanung, Navigation) enthält. Die PAMIR-App wird im Abschnitt 2.1.5 (AP 5) ausführlich vorgestellt.

Die **Erschließung externer Datenquellen**, die zum sogenannten Training und Testen des neuronalen Netzes benötigt wurden, erfolgte in AP 3.4. Entsprechend den definierten Einflussfaktoren (AP 3.1) wurden folgende Datenquellen identifiziert und erschlossen (siehe Tab. 6):

**Tab. 6: Übersicht der verwendeten Eingangsdaten für das Prognosemodell**

<i>Daten</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Quelle</i>
Parkplatzbelegung	Gesamtbelegung eines Parkplatzes (stündlicher Durchschnittswert)	Zählungen des Parkplatzbetreibers (P+R GmbH München)
Parkzeiten	Ankunftszeit, Abfahrtszeit und Parkdauer jedes Fahrzeugs	ParkHere-Sensordaten (Primärdatenerfassung)
Kalender und Zeit	Datum (Jahr, Monat, Tag eines Monats), Uhrzeit (Stunde) und Wochentag	Python-Standardmodule ( <i>datetime</i> u.a.)
Feiertage	14 gesetzliche Feiertage in München/Bayern (inkl. Reformationstag im Jahr 2017)	Python-Modul <i>holidays</i>
Schulferien	7 verschiedene Schulferien in München/Bayern (z. B. Sommer-, Winterferien)	Website <i>schulferien.org</i> (manuell übertragen)
Großveranstaltungen	5 relevantesten jährlichen Großveranstaltungen in München (z. B. Oktoberfest)	u. a. Website <i>muenchen.de</i> (manuell recherchiert)
Wetter	Tägliches Wetter in München (durch 15 verschiedene Wetterparameter bestimmt) mit lang- und kurzfristiger Rückschau (historical, recent) sowie 10-tägiger Vorschau	Python-Modul <i>wetterdienst</i> (Zugriff auf Daten des Deutschen Wetterdienstes: <i>DWD Open Data</i> , <a href="https://opendata.dwd.de">https://opendata.dwd.de</a> )

Im Rahmen von AP 3.5, 3.6 und 3.7 wurde das **Prognosemodell** als neuronales Netz entwickelt, da es sowohl zur vergangenheitsorientierten Regressionsanalyse zwischen den Einflussfaktoren- und Belegungsdaten als auch zur Prognose der zukünftigen Parkplatzbelegung geeignet ist. Hierfür wurde ein dreischichtiges Feedforward-Netz nach dem Beispiel von *Rashid* [1] in der Programmiersprache Python implementiert (siehe auch Abb. 12). Die Eingabeschicht besteht aus insgesamt 255 Knoten, da jeder der neun Einflussfaktoren (Ort, Monat, Tag, Uhrzeit etc.) durch einen Binärcode repräsentiert wird und ein Faktor bis zu 31 Merkmalsausprägungen (z. B. Anzahl der Tage eines Monats) und dementsprechend viele Knoten aufweisen kann. Dagegen besteht die Ausgabeschicht aus nur einem Knoten, der den gesuchten Belegungsgrad (abhängige Variable) als kontinuierlichen Wert zwischen 0 und 1 berechnet.



**Abb. 12: Prinzipieller Aufbau des neuronalen Netzes zur Parkplatz-Belegungsprognose**

Zum Trainieren und Testen des neuronalen Netzes wurden u. a. die historischen Parkplatzbelegungsdaten verwendet, die aus den stichprobenartig erfolgten Ticketkontrollen des Betreibers stammen. Die Anzahl der Datensätze je Parkplatz und Jahr ist in der folgenden Tab. 7 angegeben. Das Training erfolgte ortsunabhängig mit den Datensätzen 2014-2018 und das Testen ortsabhängig mit den Datensätzen von 2019, sodass die Prognosegenauigkeit<sup>12</sup> des neuronalen Netzes für jeden Parkplatz (Ort) separat bewertet werden konnte (siehe Abb. 13).

**Tab. 7: Anzahl der verfügbaren Datensätze zur historischen Parkplatzbelegung**

Jahr \ Ort	Lochhausen Nord (LON)	Großhadern (GRO)	Trudering Nord (TRN)	Summe	Einsatzzweck neuronales Netz
2014	108	145	64	1.343	Training
2015	113	121	141		
2016	90	110	122		
2017	90	129	110		
2018	113	148	136	397	Testen
Summe	514	653	573	1.740	

<sup>12</sup> entspricht der Erkennungsrate, die als Anteil der Testdatensätze mit wahrer Prognose definiert ist

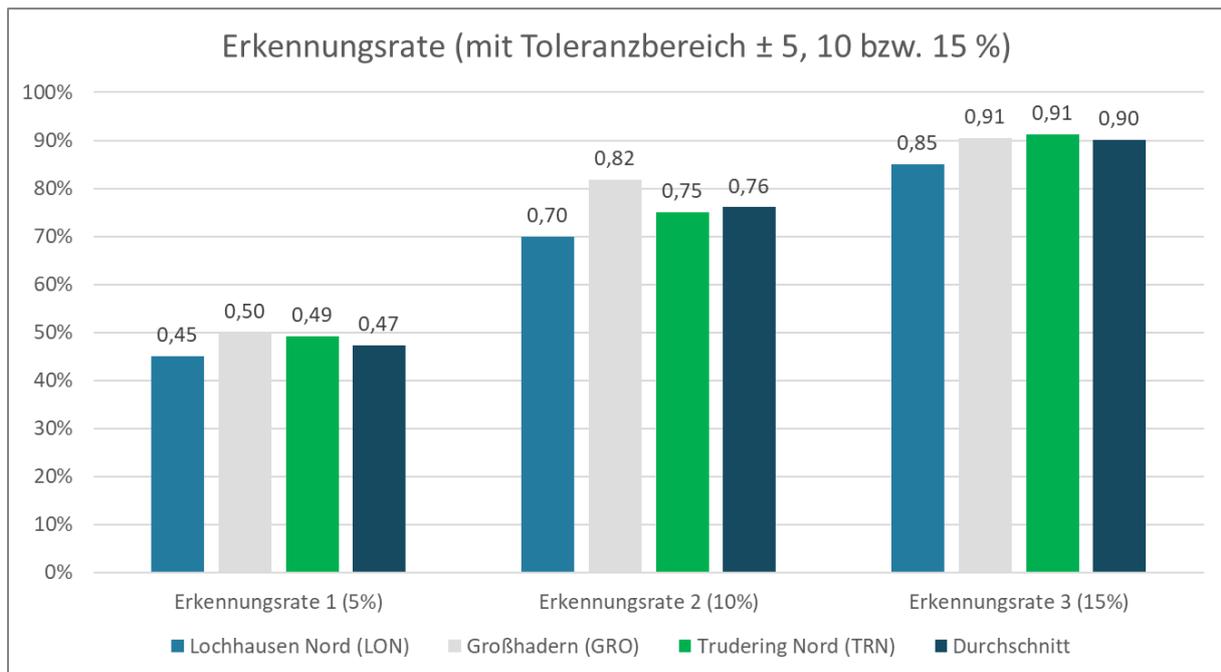


Abb. 13: Genauigkeit der Intervallschätzung des neuronalen Netzes für jeden Parkplatz

Analog zur Definition von Toleranzbereichen kann umgekehrt auch eine gewünschte Prognosegenauigkeit vorgegeben werden. Wenn zum Beispiel festgelegt wird, dass die Erkennungsrate für Lochhausen Nord nicht nur 85 % (wie in Abb. 13 bei Erkennungsrate 3), sondern 95 % betragen soll, ist der entsprechende Toleranzbereich (größer als ± 15 %) zu ermitteln. Hierfür wurde die Konfidenzintervallmethode genutzt, um den Toleranzbereich zu berechnen, der dem Konfidenzintervall entspricht und in 95 % aller Prognosefälle den tatsächlichen Belegungsgrad einschließt. Das Prinzip wird in der folgenden Abb. 14 am Beispiel von zwei unterschiedlichen Fällen beschrieben. Im Beispiel 1 (links) liegt der reale Wert innerhalb des Konfidenzintervalls (blaue Fläche), was auf 95 % aller Prognosefälle zutrifft. Dagegen liegt der reale Wert im Beispiel 2 (rechts) außerhalb des Konfidenzintervalls, was 5 % aller Prognosefälle entspricht.

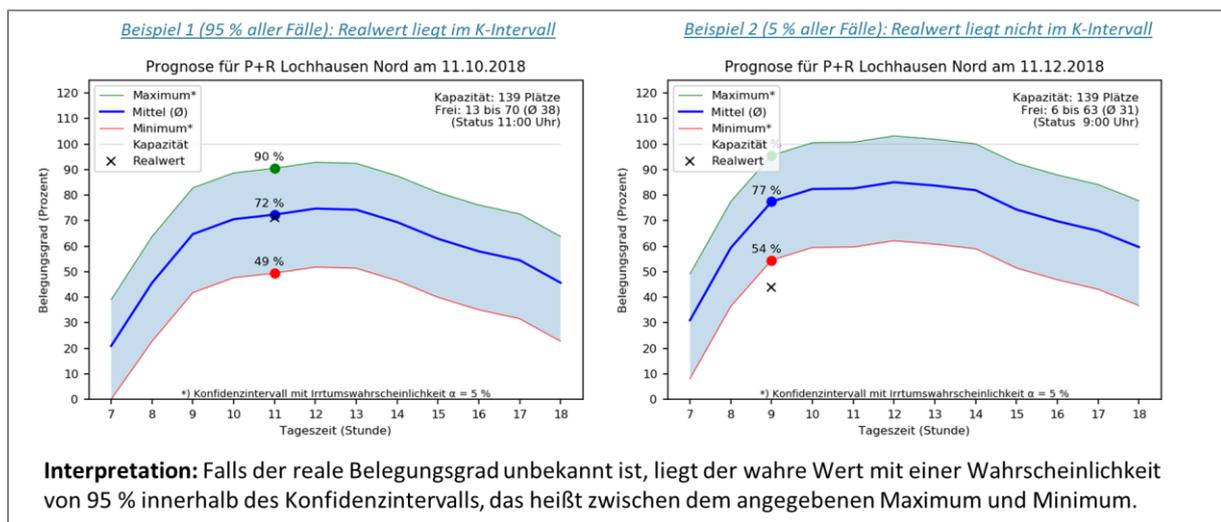


Abb. 14: Tagesganglinie der prognostizierten Parkplatzbelegung (mit Konfidenzintervall)

Das vollständig entwickelte neuronale Netz konnte auch auf umgekehrtem Weg zur Analyse der einzelnen Einflussfaktoren genutzt werden. Dazu wurden die entsprechenden Matrizen der Verknüpfungsgewichte multipliziert ( $W_{i,h} \cdot W_{h,o} = W_{i,o}$ ). Dadurch ergibt sich zu jedem Eingangsknoten (Ausprägung eines Einflussfaktors) ein Wert  $w_{i,o}$ , der die Einflussrichtung und Einflussstärke auf den Belegungsgrad (Ausgangsknoten) angibt. Falls der Wert positiv ist ( $w_{i,o} > 0$ ), erhöht die entsprechende Ausprägung des Einflussfaktors die Parkplatzbelegung (z. B. am stärksten eine Uhrzeit zwischen 13:00 und 13:59 Uhr, wie in Abb. 15, links zu erkennen ist). Falls der Wert negativ ist ( $w_{i,o} < 0$ ), wird die Belegung entsprechend reduziert, wie z. B. am stärksten bei einer Uhrzeit zwischen 07:00 und 07:59 Uhr (siehe Abb. 15, rechts).

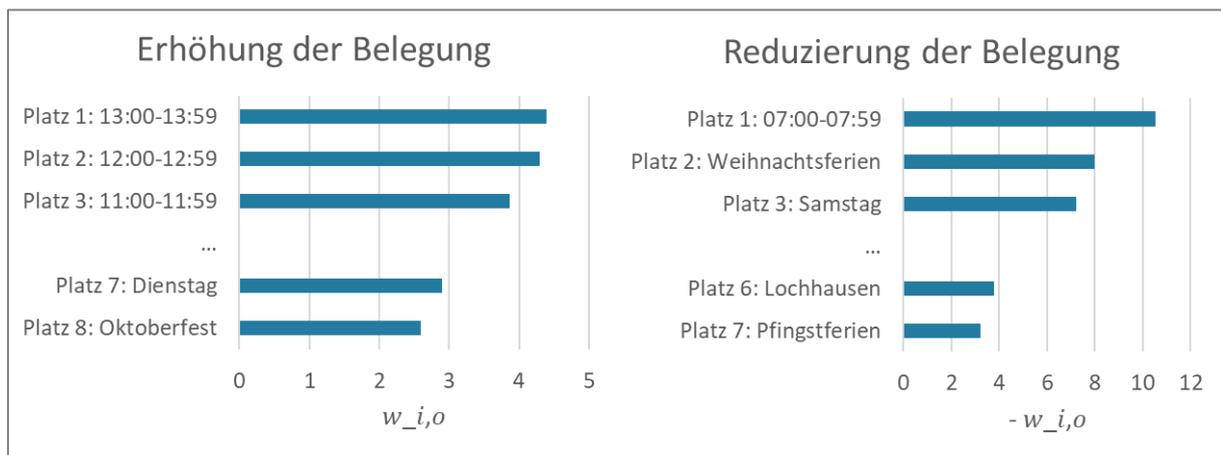


Abb. 15: Einflussstärke von belegungserhöhenden bzw. -reduzierenden Faktorausprägungen

Über das arithmetische Mittel können auch nur die Einflussfaktoren miteinander verglichen werden (z. B. Uhrzeit versus Wochentag). Dies wird in der Abb. 16 für die zehn einflussstärksten Faktoren dargestellt, wobei links nur die Stärke aller Ausprägungen (d. h. in positiver und negativer Richtung) anhand des Betrages verglichen wird, während rechts nur belegungserhöhende Faktoren (d. h. in positiver Richtung) berücksichtigt werden.<sup>13</sup>

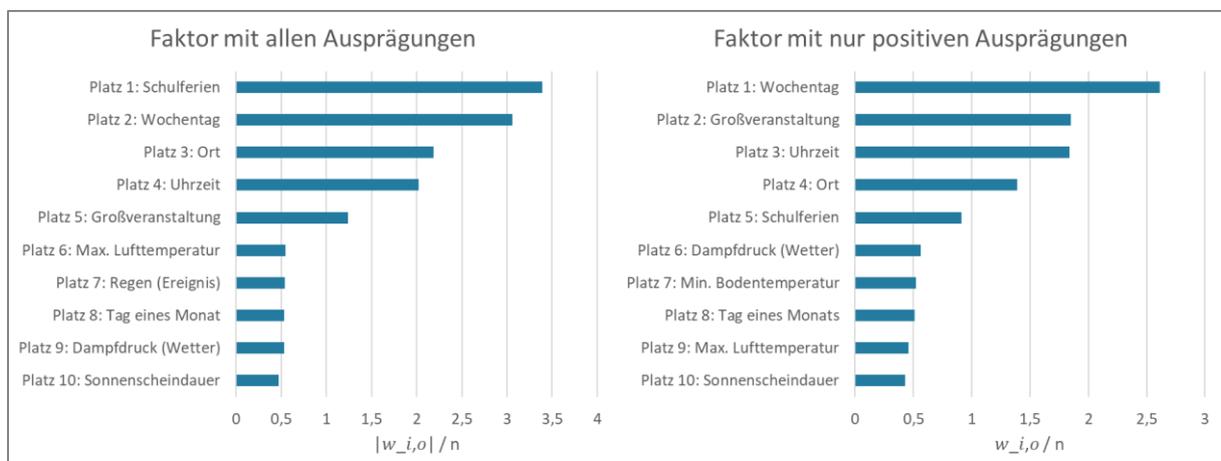


Abb. 16: Mittlere Einflussstärke von allen bzw. nur belegungserhöhenden Faktoren

<sup>13</sup> zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Altendeitering et al. 2018 [2].

Abschließend wurde der **Prognosedienst** (API), der auf dem neuronalen Netz basiert, auf dem ifak-Webserver im Rahmen von AP 3.8 eingerichtet. Dieser ist seit September 2021 auch öffentlich verfügbar, sodass eine stundengenaue Prognose zu Lochhausen Nord, für jeweils die nächsten drei Tage, abgefragt werden kann.<sup>14</sup> Zudem wurde eine PC-App des Prognosemodells zu weiteren Test- und Vorführungszwecken entwickelt (siehe Abb. 17). Damit kann die Tagesganglinie der prognostizierten Parkplatzbelegung (mit dem zugehörigen Konfidenzintervall) für jeden beliebigen Tag (ab dem 01.01.2014) visualisiert werden. Außerdem können in der PC-App die entsprechenden Informationen zu Wetter, Schulferien, Feiertagen und Großveranstaltungen eingesehen werden, die an dem jeweiligen Tag tatsächlich bzw. voraussichtlich (z. B. Wettervorhersage) vorliegen und für die Belegungsprognose bestimmend sind.

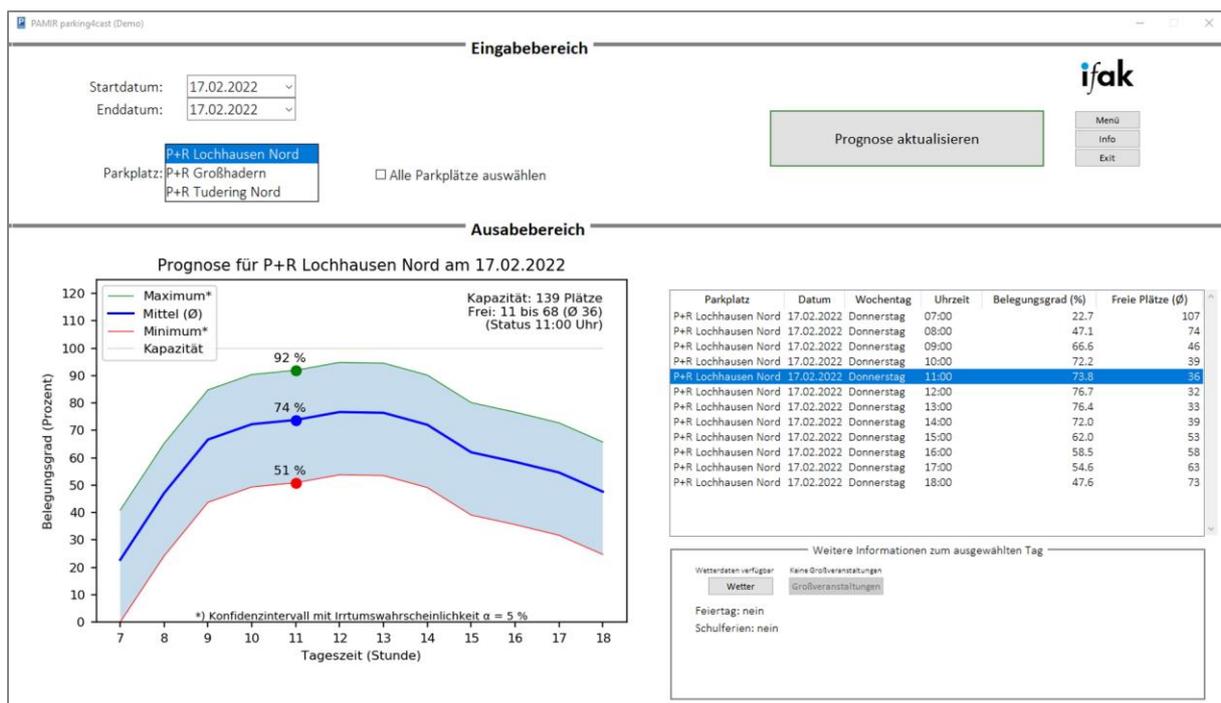


Abb. 17: Screenshot der PC-App zum Prognosemodell (PAMIR parking4cast)

### 2.1.4 AP 4 Stellplatzreservierung

Im Rahmen von AP 4 sollte eine Lösung entwickelt werden, um eine Parkplatzreservierung ermöglichen und für die multimodale Reiseplanung (AP 5) nutzen zu können. Mit einem Risiko behaftet war hierbei, Dritten den Reservierungszustand eines leeren Stellplatzes mitzuteilen, da eine physische Sperrung, z. B. durch einen Poller, aus rechtlichen und wirtschaftlichen Gründen zunächst nicht in Frage kam. ParkHere hatte bereits Vorarbeiten zu einem energieautarken E-Ink-Schild, welches Kennzeichen, Namen oder Begrüßungstexte anzeigen kann, geleistet. Das E-Ink-Schild befand sich zu Projektbeginn jedoch noch im Prototypen-Status und funktionierte nicht unter bestimmten Witterungseinflüssen. Die E-Ink-Technologie ist z. B. von Natur aus nicht für Minusgrade ausgelegt und droht einzufrieren.

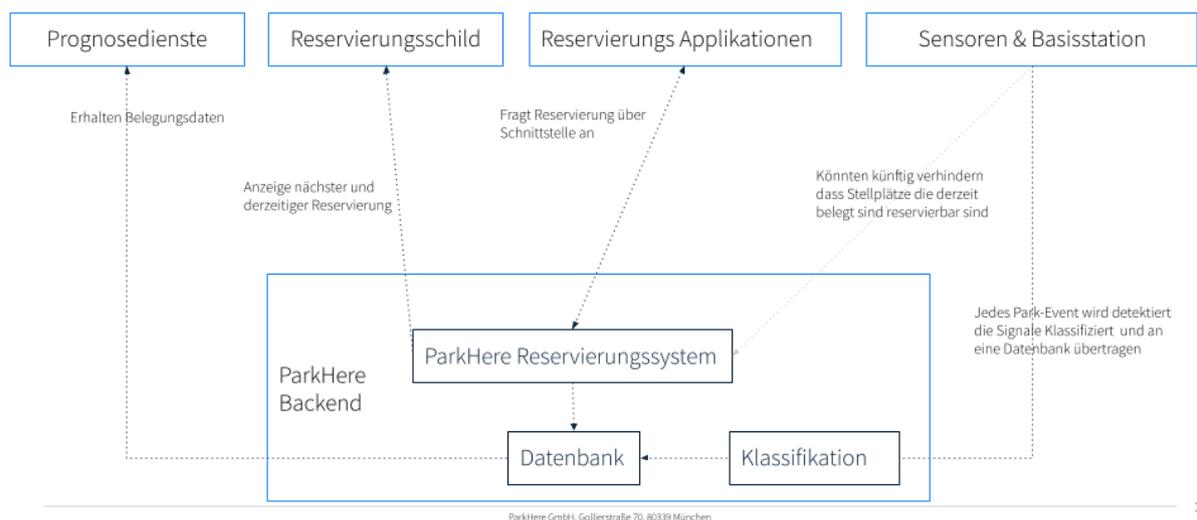
<sup>14</sup> <https://www.mcloud.de/zh/web/quest/suche/-/results/detail/27388340-AD5B-4AD3-A0D2-DBE83173381D>

Die gesamte Leitung und inhaltliche Bearbeitung des Arbeitspakets übernahm ParkHere, während das ifak lediglich bei der Anforderungsanalyse (AP 4.1) beratend zur Seite stand.<sup>15</sup>

Im Einzelnen untergliederte sich das AP 4 in folgende sechs Unterarbeitspakete:

- AP 4.1 Anforderungsanalyse
- AP 4.2 Systementwurf
- AP 4.3 Reservierungsmanagement
- AP 4.4 Reservierungszustand
- AP 4.5 Reservierungsdienst
- AP 4.6 Test

In diesem Arbeitspaket hat ParkHere die entsprechenden Dienste Stellplatzreservierung und Parkplatzbelegungsdaten zur Verfügung gestellt (siehe auch Abb. 18). Für den Parkplatzbelegungsdatendienst konnte dazu auf bereits bestehende Funktionen zurückgegriffen werden. Der Stellplatzreservierungsdienst wurde komplett neu aufgebaut und eine sichere Schnittstelle zu den Funktionalitäten zur Verfügung gestellt. Der Dienst mit dazugehöriger Schnittstelle ermöglichte es den Projektpartnern, Reservierungen anzulegen, zu verwalten und zu löschen.

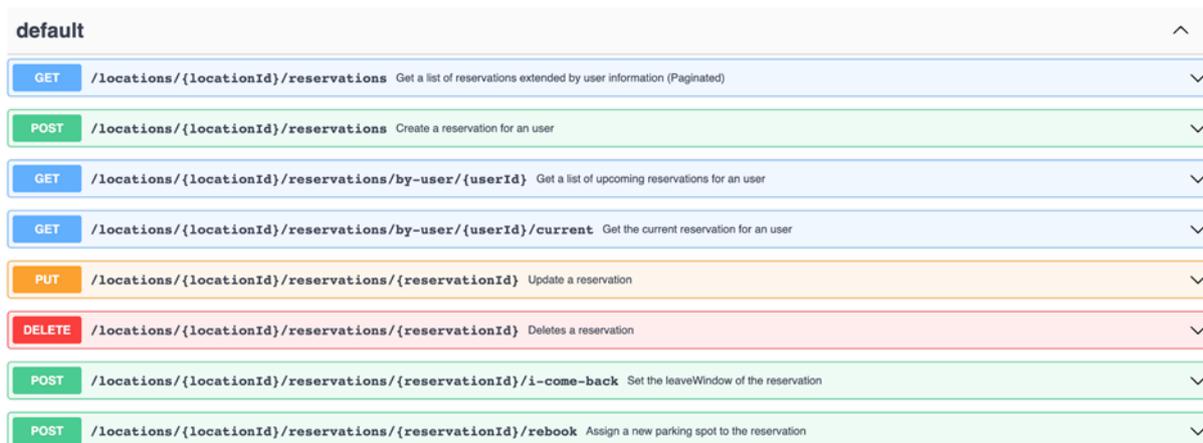


**Abb. 18: Struktur des ParkHere-Reservierungssystems**

Der Stellplatzreservierungsdienst stellt dabei die notwendige Logik zur Verfügung, um doppelte Reservierungen oder Überlappungen auszuschließen. Zusätzlich stellt dieser Dienst sicher, dass die Information über eine Reservierung in allen anderen Partnerapplikationen vorhanden ist und auf den Reservierungsdisplays vor Ort angezeigt wird – unabhängig davon, über welche Drittanwendung eine Reservierung vorgenommen wurde.

Die Dokumentation der Schnittstelle wurde im sogenannten Swagger-Format zur Verfügung gestellt und zeigt alle Funktionalitäten, wie z. B. in der Abb. 19 dargestellt.

<sup>15</sup> Dadurch konnten die hier ursprünglich eingeplanten PM für den Mehraufwand in AP3 genutzt werden.



default	
GET	/locations/{locationId}/reservations Get a list of reservations extended by user information (Paginated)
POST	/locations/{locationId}/reservations Create a reservation for an user
GET	/locations/{locationId}/reservations/by-user/{userId} Get a list of upcoming reservations for an user
GET	/locations/{locationId}/reservations/by-user/{userId}/current Get the current reservation for an user
PUT	/locations/{locationId}/reservations/{reservationId} Update a reservation
DELETE	/locations/{locationId}/reservations/{reservationId} Deletes a reservation
POST	/locations/{locationId}/reservations/{reservationId}/i-come-back Set the leaveWindow of the reservation
POST	/locations/{locationId}/reservations/{reservationId}/rebook Assign a new parking spot to the reservation

**Abb. 19: Einblick in die ParkHere Reservation API (Screenshot)**

Um ein Stellplatzreservierungssystem zur Verfügung zu stellen, benötigt man einerseits einen Hintergrunddienst, der den Überblick über alle Reservierungen, freien Parkplätze und künftige Belegungen sowie die geplante Reservierungsdauer behält. Auf der anderen Seite müssen Endnutzer, auch solche, die nicht Teil des Systems sind, selbstverständlich verstehen, welche Stellplätze sie nicht nutzen dürfen. Nicht zuletzt muss es Nutzern ermöglicht werden, einen Stellplatz möglichst einfach, d. h. über einen Web- bzw. mobilen Dienst, zu reservieren.

Da physische Absperrungen sowohl technisch wartungsintensiv als auch teuer sind, hat sich das Projektkonsortium dazu entschieden, Reservierungsschilder an den Stellplätzen anzubringen, welche kommende Reservierungen als auch bereits laufende Reservierungen anzeigen (siehe auch folgende Abb. 20, links).

Es konnte nicht genau evaluiert werden, wie hoch die Akzeptanz solcher Schilder ist, jedoch war es für den Feldversuch möglich, alle Stellplätze für einen Tag auf „reserviert“ zu setzen. Wie erwartet, war das Resultat, dass der überwiegende Teil der Stellplätze freigehalten wurde, obwohl dies die attraktivsten Stellplätze der Anlage waren. Tatsächlich konnte beobachtet werden, wie zahlreiche Autofahrer während des Feldversuchs zunächst einparkten, dann das Schild lasen und sich schließlich woanders hinstellten. Nach Experteneinschätzung der P+R Park & Ride GmbH kann die Disziplin durch gelegentliche Kontrollgänge weiter erhöht werden.

Um datenschutzrechtlichen Bedenken vorzubeugen, zeigen die Reservierungsschilder dabei erst das Kennzeichen für die Reservierung an, sobald diese beginnt – das Fahrzeug also ohnehin dort steht. Davor zeigen die Reservierungsschilder lediglich an, dass eine Reservierung ab dem Zeitpunkt X in der Zukunft vorliegt und der Stellplatz ab dann freizuhalten ist.

Zudem wurde eine Web- und Mobile-App von ParkHere erstellt, mit der die Nutzer über einen Klick eine Reservierung anlegen können (siehe Abb. 20, rechts unten). Die App ermöglicht dabei Reservierungen für den ganzen Tag, den Vormittag oder den Nachmittag vorzunehmen. Sofern eine Reservierung zur gewünschten Zeit möglich ist (da z. B. nicht alle Stellplätze ausgebucht sind), weist das System dem Nutzer gemäß seiner Anfrage einen freien Stellplatz zu und gibt die entsprechende Stellplatznummer mit der Reservierungsbestätigung zurück.

Alle Reservierungen werden zudem in einem Dashboard angezeigt, das für den Parkplatzbetreiber vorgesehen ist (siehe Abb. 20, rechts oben). Dieser kann einsehen, für welche Tage wie viele Reservierungen vorliegen. Im Dashboard werden im Übrigen auch die Echtzeit-Belegungsdaten der Sensoren angezeigt, sodass alle Informationen gebündelt einsehbar sind.

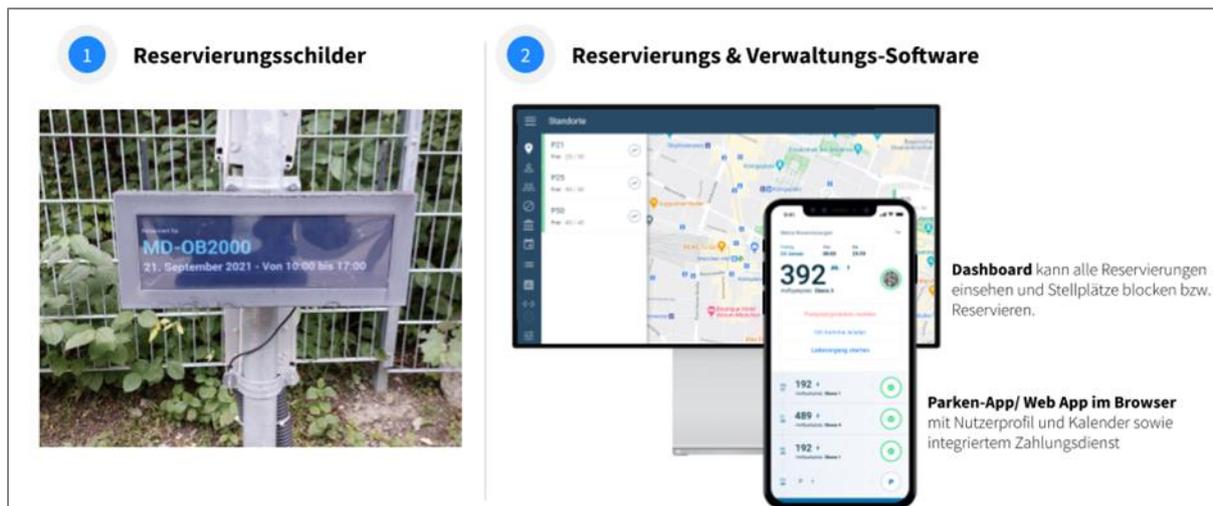


Abb. 20: Komponenten von ParkHere für das Reservierungssystem in P+R Lochhausen Nord

### 2.1.5 AP 5 Multimodales Reisen

Ziel des AP war die Entwicklung eines verfeinerten multimodalen Routings für den Umstieg vom Pkw auf ein öffentliches Verkehrsmittel unter Einbeziehung des konkreten Pkw-Stellplatzes und des sich daraus ergebenden Fußweges. Das Verfahren sollte als Dienst ausgeprägt werden, der von bestehenden Routenplanern in den Testfeldern eingebunden werden kann. Darüber hinaus sollte ein Dienst entwickelt werden, der den Nutzer zu einem konkreten, jedoch nicht unbedingt reservierten, Stellplatz auf Basis der aktuellen mikroskopischen (stellplatzfeinen) Parkplatzbelegungssituation führt. Alternativ sollte die Navigation zu einem Stellplatz auf Basis der makroskopischen Parkplatzbelegungsprognose erfolgen. Die Dienste wurden exemplarisch in eine neuentwickelte Mobilitätsapp zur multimodalen Reiseplanung integriert, anhand derer die Evaluierung erfolgen sollte. Das ifak übernahm die AP-Gesamtleitung.

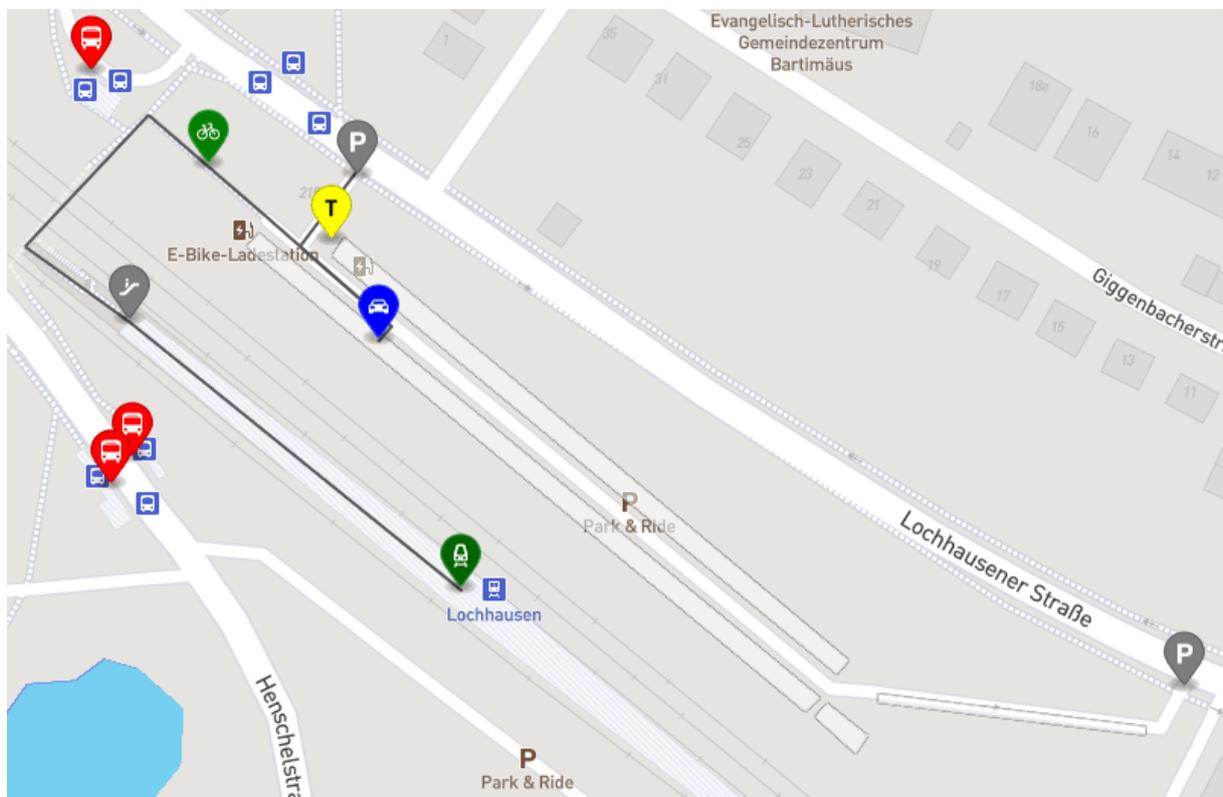
Im Einzelnen untergliederte sich das AP 5 in folgende fünf Unterarbeitspakete:

- AP 5.1 Anforderungsanalyse
- AP 5.2 Routing zum Stellplatz
- AP 5.3 Navigationsdienst
- AP 5.4 Integration in bestehende Mobilitätsapp
- AP 5.5 Test

Im Rahmen von AP 5.2 **Routing zum Stellplatz** wurde neben der bereits für die OsmAnd-App vorbereiteten OSM-Karte mit den zehn reservierbaren Stellplätzen (Abb. 10), zusätzlich der Kartendienst von Mapbox<sup>16</sup> eingesetzt. Mithilfe der entsprechenden *Mapbox Static Images API* können beliebige Kartenausschnitte, wie z. B. vom Parkplatz Lochhausen Nord (siehe folgende Abb. 21) oder andere Gebiete von München, erstellt werden. Darin lassen sich zugleich Routen einzeichnen, die von der *Mapbox Directions API* für gegebene Start- und Zielorte und unterschiedliche Verkehrsmodi (Kraftfahrzeuge, Fußgänger, Radfahrer) optimiert und als GeoJSON-Feature (LineString) in die jeweilige Karte eingefügt wird. Wichtige Punkte auf einer Karte, wie z. B. der Standort (Koordinate) eines geparkten Pkw auf einem Stellplatz, des nächstgelegenen Parkscheinautomaten oder aller Bahn- und Bussteige, können ebenso durch

<sup>16</sup> <https://docs.mapbox.com/>

entsprechende Marker (Symbole) abgebildet und in das Fußgänger-Routing integriert werden. Dies wird in Abb. 21 für eine Route von der Einfahrt bis zum Bahnsteig exemplarisch gezeigt.



**Abb. 21: Karte vom P+R Lochhausen Nord mit Route von der Einfahrt (P-Symbol) zum reservierten Stellplatz (Pkw) und zu Fuß über Parkscheinautomaten (T) zum Bahnsteig (Bahn) (© Mapbox © OpenStreetMap)**

Für jeden einzelnen Routenabschnitt auf der Parkplatzkarte (Abb. 21) wird die per Pkw bzw. zu Fuß zurückgelegte Entfernung durch eine entsprechende Durchschnittsgeschwindigkeit (gemäß Mapbox z. B. 5,2 km/h für normales Gehen) dividiert. Dadurch kann die Gesamtdauer der Route abgeschätzt werden, die von der Parkplatzeinfahrt bis zum Stellplatz und von dort zu Fuß, ggf. mit einem Hin- und Rückweg zum Parkscheinautomaten (PSA), zzgl. einer mittleren Bedienzeit, bis zum jeweiligen Bahn- oder Bussteig der geplanten Anschlussfahrt benötigt wird. Die berechneten Dauern für das Beispiel in Abb. 21 werden in der Tab. 8 angegeben.

**Tab. 8: Dauern der Routenabschnitte auf dem Parkplatz bei Ankunft (von Einfahrt bis Bahnsteig)**

	Startpunkt/Prozess	Zielpunkt	Entfernung [m]	Geschwindigkeit [m/s]	Dauer [s]
1	Einfahrt	Stellplatz	55,83	2,94	19
2	Stellplatz	PSA	25,37	1,45	18
3	Bedienung PSA	-	-	-	60
4	PSA	Stellplatz	25,37	1,45	17
5	Stellplatz	Bahnsteig (Mitte)	289,09	1,45	199
$\Sigma$	Fahren		55,83		19
$\Sigma$	Gehen + Bedienen		339,82		294
$\Sigma$	<b>Insgesamt</b>		<b>395,65</b>		<b>313</b>

In diesem Beispiel wird die Gesamtdauer auf insgesamt 313 Sekunden (5 min 13 s) geschätzt. Unter Berücksichtigung eines Puffers für variable Dauern (z. B. Einparkmanöver, Bedienzeit am PSA) oder eine verfrühte Abfahrt der S-Bahn, sollte dieser Wert z. B. auf 6 min aufgerundet werden. Daraus ergibt sich die späteste Ankunftszeit des Fahrzeugs auf dem Parkplatz (Einfahrt) und der späteste Beginn des Reservierungszeitraums in Höhe von 6 min vor der geplanten Abfahrtszeit der S-Bahn. Analog dazu wird auch der Rückweg (Bahnsteig – Stellplatz – Ausfahrt) berechnet, um das früheste Ende des Reservierungszeitraums abzuschätzen.

Im Fall ohne Stellplatzreservierung wird die voraussichtliche Parkposition auf Basis der Belegungsprognose für die entsprechende Ankunftszeit (Datum, Uhrzeit) abgeschätzt – wie in Abb. 22 für dasselbe Beispiel dargestellt ist – und die Gesamtdauer analog berechnet. Die Differenz zwischen den Dauern ohne Reservierung und mit Reservierung entspricht dem Einsparpotenzial des reservierenden Nutzers, in diesem Beispiel ca. 160 Sekunden (Hin- und Rückweg).

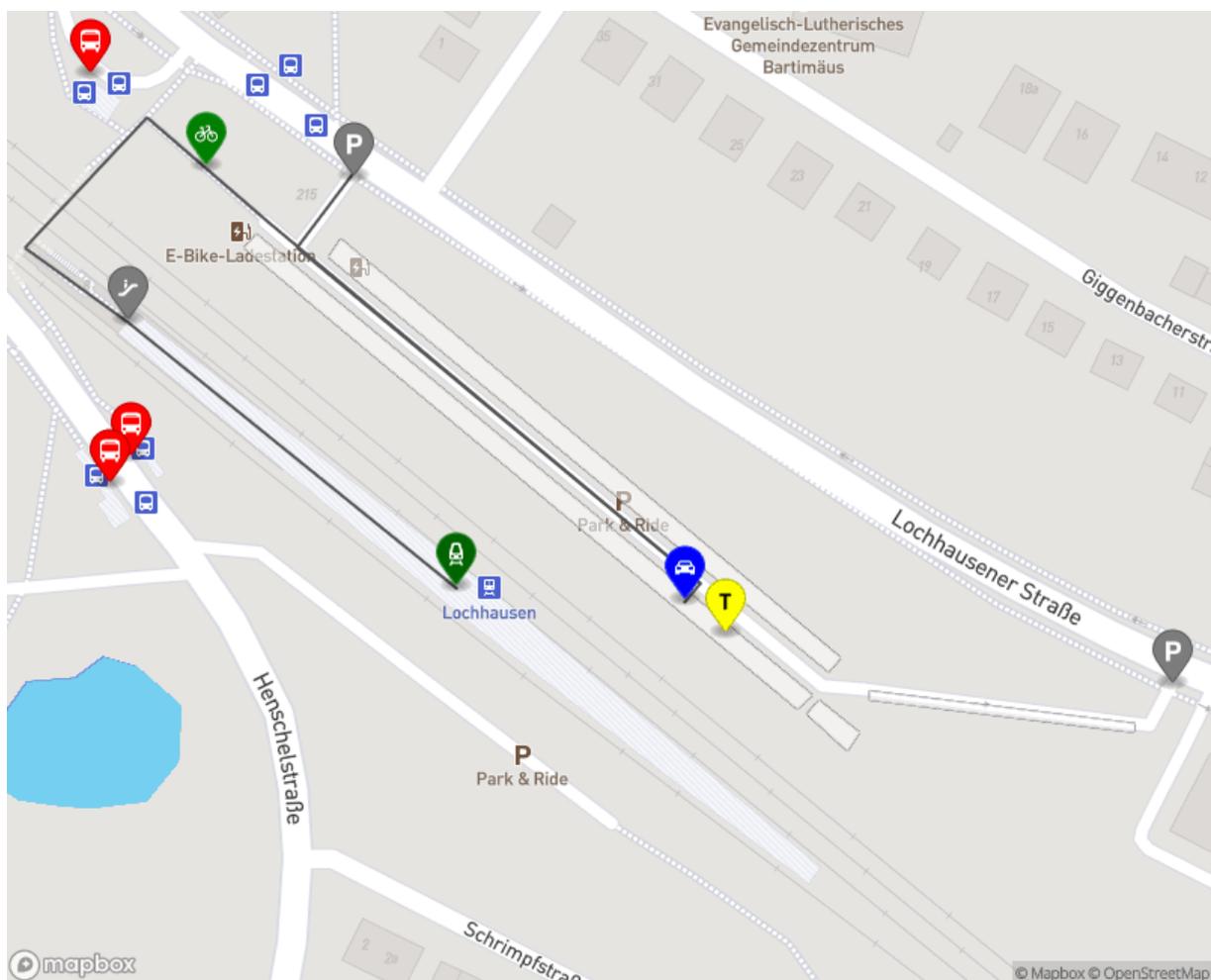
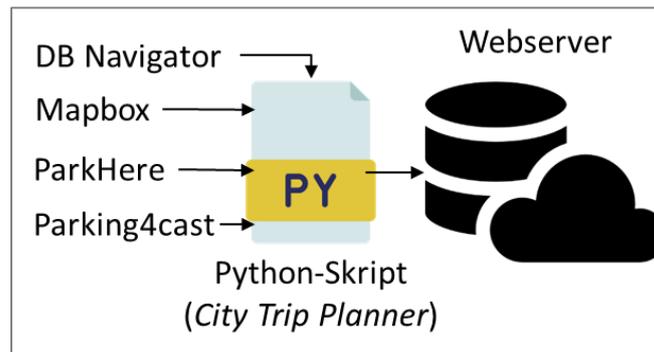


Abb. 22: Karte vom P+R Lochhausen Nord mit Route von der Einfahrt zum nächsten freien Stellplatz gemäß der Belegungsprognose (sonst analog zu Abb. 21)

Wie bereits im Abschnitt 1.2.5 erörtert, wurde eine Smartphone-App für die Reiseplanung vollständig neuentwickelt und mit der OsmAnd-App verbunden, sodass AP 5.3 (**Navigationsdienst**) und AP 5.4 (**Integration in bestehende Mobilitätsapp**) als ein AP zu betrachten sind.

Für das zugehörige **Backend** der PAMIR-App wurde eine Python-Applikation mit der Bezeichnung *City Trip Planner* programmiert (siehe Abb. 23). Diese verarbeitet die Reisedaten einer

Nutzeranfrage (z. B. Ankunftszeit am Zielort oder Abfahrtszeit ab P+R Lochhausen Nord) und erstellt den entsprechenden Reiseplan (alternative ÖPNV-Verbindungen jeweils mit Route, Abfahrts- und Ankunftszeiten) sowie die zugehörigen Übersichts- und Detailkarten (mit der Fußwegroute für jeden Umstieg und am Zielort). Die dafür erforderlichen Informationen werden simultan aus verschiedenen Quellen (API) abgefragt, wie z. B. die Fahrpläne der Deutschen Bahn und anderer Verkehrsunternehmen über einen sogenannten Wrapper des DB Navigator. Weitere Quellen des City Trip Planner sind die APIs von Mapbox (Karten), ParkHere (geplante Reservierungen, aktuelle Belegungssituation) und Parking4cast (Belegungsprognose).



**Abb. 23: Komponenten des Backend der PAMIR-App**

Wie oben erwähnt, wird zum Abruf von Echtzeit-Fahrplandaten des Langstrecken- und Regionalverkehrs sowie des lokalen ÖPNV ein Wrapper des DB Navigator, die API-Schnittstelle *v5.db.transport.rest*, zu reinen Entwicklungs- und Testzwecken verwendet.<sup>17</sup> Diese umschließt (wraps) eine offizielle API der Deutschen Bahn zur Abfrage dieser Daten. Die Anzahl der Anfragen ist dabei auf 100 pro Minute begrenzt. Die Fahrplanauskunft beinhaltet für jede Verbindung die Ankunfts- und Abfahrtszeiten, Zwischenstationen und eine Handlungsbeschreibung.

Ein weiteres Ziel der Backend-Entwicklung war das Bereitstellen von Auskünften zu geplanten Reservierungen und zur aktuellen Belegungssituation der zehn reservierbaren Stellplätze in Lochhausen Nord. Dazu wurde es, wie oben erwähnt, mit dem Stellplatzreservierungsdienst von ParkHere verbunden, um Reservierungen anzufragen, abzurufen und gegebenenfalls stornieren zu können. Hierfür wurde eine SQL-Datenbank zur Verwaltung von Nutzern und Reservierungen implementiert, um Reservierungen eindeutig Nutzern zuordnen zu können.

Zur Registrierung von neuen Nutzern wurde eine simple Web-Oberfläche entwickelt. Zur Registrierung ist die Angabe einer gültigen E-Mail, eines Namens, eines Passworts und Kfz-Kennzeichens (sowie eines Registrierungsschlüssels) erforderlich. Nach der Registrierung können Nutzer sich dann per Login authentifizieren und auf Funktionen des Backend zugreifen, die ausschließlich für registrierte Nutzer bestimmt sind, wie die Stellplatzreservierung.

Reservierungsanfragen für einen gewünschten Zeitraum werden vom Backend an den nachgelagerten Stellplatzreservierungsdienst von ParkHere gestellt. Informationen über eine erfolgreiche Reservierung - zusammen mit der Stellplatznummer oder Absage - werden an den Nutzer als Antwort weitergeleitet.

Zum Speichern von Informationen über Nutzer und Reservierungen wurde ein Verwaltungssystem entwickelt, das das SQL-Datenbankframework *sqlite* zur permanenten Speicherung

<sup>17</sup> <https://v5.db.transport.rest/>

und das SQL-Toolkit *SQLAlchemy* für den Zugriff, das Ändern und Löschen dieser Informationen nutzt. Um Reservierungen entsprechenden Nutzern zuordnen zu können, wird jede getätigte Reservierung mit der jeweiligen Nutzer-ID als Fremdschlüssel gekennzeichnet. Bei Bedarf kann der Nutzer so Informationen über seine getätigten, kommenden oder laufenden Reservierungen abrufen.

Nutzer können erstellte Reservierungen auch wieder stornieren. Dabei wird die Anfrage zunächst an den Stellplatzreservierungsdienst von ParkHere gestellt. Bei Bestätigung einer erfolgreichen Löschung wird die Reservierung auch auf der Datenbank des Backend gelöscht und abschließend eine Bestätigung an den anfragenden Nutzer gesendet.

Das Ziel der Entwicklung der Smartphone-App (**Frontend**) war es, die Funktionen des Backend über eine prototypische Frontend-Applikation als nutzerfreundliche Schnittstelle anbieten zu können. Die vom Backend zur Verfügung gestellten Funktionen und Daten werden in einer übersichtlichen, geordneten und leicht zugänglichen Form dargestellt (siehe Abb. 24). Die Frontend-Applikation reduziert ein aufwendiges Eingeben von Daten und erlaubt somit einen schnellen Zugriff auf die Dienste Reiseplanung, Belegungsprognose und Stellplatzreservierung. Zusätzlich wurde die Applikation mit der OsmAnd-App verknüpft, um eine Navigation zum Stellplatz zu ermöglichen. Die Frontend-Applikation wurde für die Software-Plattform Android entwickelt und in den Programmiersprachen Kotlin und Java geschrieben.

Für die Nutzung der PAMIR-App ist ein Smartphone mit einem Android-Betriebssystem (Version 8.0 oder höher) erforderlich. Um die Navigationsfunktionen von OsmAnd in der PAMIR-App nutzen zu können, ist eine Installation der kostenlosen Version von OsmAnd hinreichend. Die PAMIR-App erkennt automatisch, ob diese bereits installiert wurde und benachrichtigt den Nutzer beim Start der App, falls dies nicht der Fall sein sollte. Für eine stellplatzfeine Navigation auf dem Parkplatz Lochhausen Nord ist ein Update der Karte in OsmAnd notwendig.<sup>18</sup>

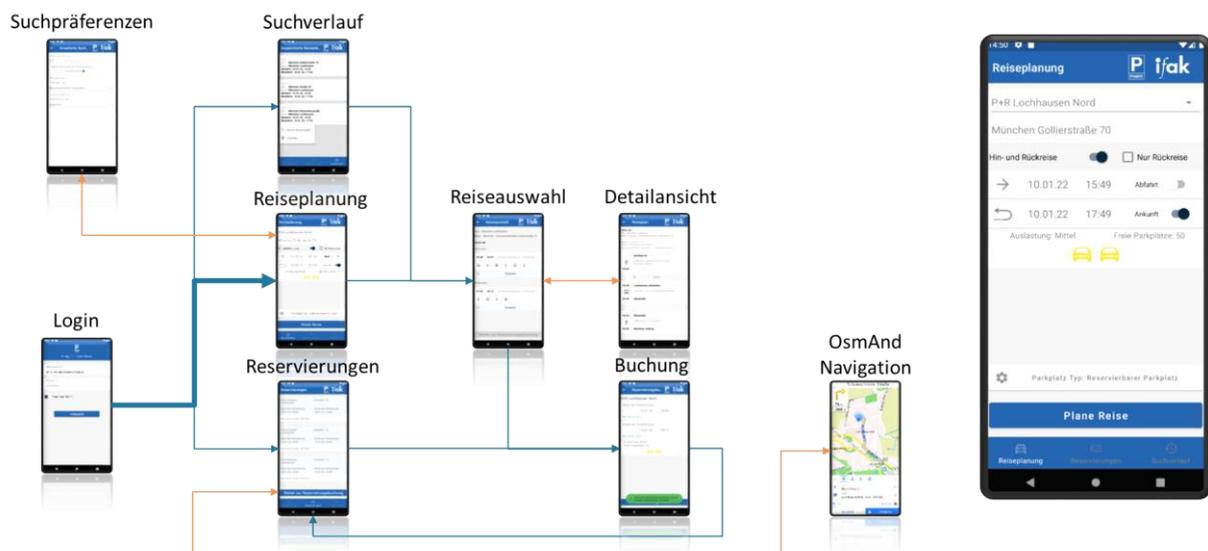


Abb. 24: Menüführung und Funktionen der PAMIR-App – am Beispiel der Reiseplanung (rechts)

<sup>18</sup> Diese Karte ist bisher nur projektintern als OBF-Datei verfügbar und durch den Nutzer in den entsprechenden Kartenordner der OsmAnd-App auf dem Smartphone zu laden (siehe auch Abschnitt 2.1.2).

### 2.1.6 AP 6 Ride Sharing

Das Arbeitspaket 6 konzentrierte sich darauf, die Vorteile für Fahrgemeinschaften und Mitfahrgelegenheiten insbesondere im urbanen Raum durch die Einbindung von Parkplatzprognose- und Parkplatzreservierungsmöglichkeiten zu untersuchen. Hierzu sollten die entsprechenden Dienste aus AP 3 und AP 4 prototypisch in die RideSharing-Vermittlung des Projektpartners Wunder eingebunden und im Rahmen der Feldversuche erprobt und evaluiert werden. Da insbesondere beim RideSharing (auch Carpooling genannt) häufig auch eine kurzfristige Vereinbarung des Treffpunktes (z. B. auf einem Stellplatz) erforderlich ist, muss die entsprechende Stellplatzsuche und Stellplatzreservierung auch während der Fahrt erfolgen können. Schließlich sollte das RideSharing um komplexere Vermittlungsfunktionen, wie z. B. Anschlussfahrten mit dem ÖPNV und Verkettung mehrerer Mitfahrwünsche, erweitert werden.

Der Projektpartner Wunder leitete das gesamte Arbeitspaket und übernahm die inhaltliche Bearbeitung zusammen mit ParkHere, während das ifak (da ohne eingeplanten Personalaufwand) lediglich bei der Anforderungsanalyse (AP 6.1) beratend zur Seite stand.

Im Einzelnen untergliederte sich das AP 6 in folgende fünf Unterarbeitspakete:

- AP 6.1 Anforderungsanalyse
- AP 6.2 Installation von Parkplatzsensoren
- AP 6.3 Verkettung mehrerer Mitfahrwünsche
- AP 6.4 Ergänzung der Park-Dienste
- AP 6.5 Integration in Wunder Carpool

Aufgrund des vorzeitigen Ausstiegs von Wunder aus dem PAMIR-Projekt, wie bereits im Abschnitt 1.2.6 erläutert, wurde das Arbeitspaket vorzeitig beendet, wobei die bis dahin von Wunder erarbeiteten Projektergebnisse nicht in den vorliegenden Schlussbericht einfließen konnten, da den verbleibenden Partnern keine entsprechende Dokumentation überlassen wurde.

### 2.1.7 AP 7 Feldversuche und Evaluierung

Das Ziel dieses Arbeitspakets war es, die neuentwickelten Mobilitätsdienste auf dem eingerichteten Testfeld in München (P+R Lochhausen Nord) durch lokale Parkplatznutzer über mehrere Wochen im Alltag testen zu lassen.<sup>19</sup> Dadurch sollten u. a. die Zeit- und Wegersparnis bei der Parkplatzsuche sowie das entsprechende Einsparpotenzial von Treibhausgas- und Schadstoffemissionen ermittelt werden. Durch Befragung der Testnutzer sollten außerdem qualitative Kriterien bewertet werden. Hierunter fielen die Nutzerfreundlichkeit der Apps, die Zahlungsbereitschaft für eine Reservierung und die Akzeptanz der Stellplatzreservierung im Sinne der beobachteten Reaktionen der anderen Parkplatznutzer auf die Reservierungsanzeigen, d. h. ob ein reservierter Stellplatz auch ohne physische Absperrung freigehalten wurde.

Die AP-Gesamtleitung oblag dem ifak. Im Einzelnen waren sechs Unterarbeitspakete vorgesehen, deren Inhalte, aufgrund der pandemiebedingten Änderungen während der Projektlaufzeit (wie in Abschnitt 1.2.6 und 1.3 dargelegt), zum Teil jedoch nicht mehr zielführend waren und dafür durch neue Aufgaben (z. B. Entwicklung von Simulationsmodellen) ersetzt wurden.<sup>20</sup> Letzteres wird im Folgenden anhand des Evaluierungskonzepts erläutert.

---

<sup>19</sup> Ein zweites Testfeld war ursprünglich in der Metropolregion Rhein-Neckar (wegen eines dort ansässigen, aber kurz vor Projektbeginn ausgeschiedenen Partners) geplant. Dieses sollte dann nach Hamburg verlagert werden, konnte aber trotz der Bemühungen von Wunder letztlich nicht realisiert werden.

<sup>20</sup> Versuche zur Akquisition von Probanden (AP 7.2) u. a. durch Poster erfolgten noch bis Frühling 2021.

Das im AP 7.1 zu erstellende **Evaluierungskonzept** wurde den Umständen entsprechend angepasst, aber auch wissenschaftlich anspruchsvoller gestaltet (siehe folgende Abb. 25). Insbesondere durch den Einsatz eines neuen Parkplatzmodells von Lochhausen Nord ließen sich die gesuchten Einsparpotenziale wesentlich umfassender, genauer und zuverlässiger berechnen, als dies nach dem ursprünglichen Plan (d. h. nur auf Basis von GPS-Tracks der Testnutzer) vorgesehen war. Zudem wurde auch das Prognosemodell zur Erzeugung von realistischen Belegungskurven von allen Tagen eines Jahres genutzt, die in das Parkplatzmodell eingingen und somit die mikroskopische Verkehrsflusssimulation einzelner Parkvorgänge (d. h. mit Aufzeichnung der Bewegungspfade und Geschwindigkeitsprofile) ermöglichten. Im Allgemeinen dient das Geschwindigkeitsprofil eines Fahrzeugs der exakten Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs und entsprechender Emissionen mithilfe eines physikbasierten Energieverbrauchsmodells. Aufgrund der großen Menge an Fahrzeugen wäre jedoch die Rechenzeit des Energieverbrauchsmodells allein für einen Tag sehr hoch gewesen, sodass es letztlich nur zu Testzwecken eingesetzt wurde. Stattdessen wurden der Verbrauch und die Emissionen aller Fahrzeuge, die den Parkplatz in einem Jahr nutzten, auf Basis der vom Parkplatzmodell ermittelten Gesamtfahrleistung (zurückgelegte Entfernung), multipliziert mit durchschnittlichen Umrechnungsfaktoren für Verbrauch, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> etc. (gemäß HBEFA 4.1), berechnet.

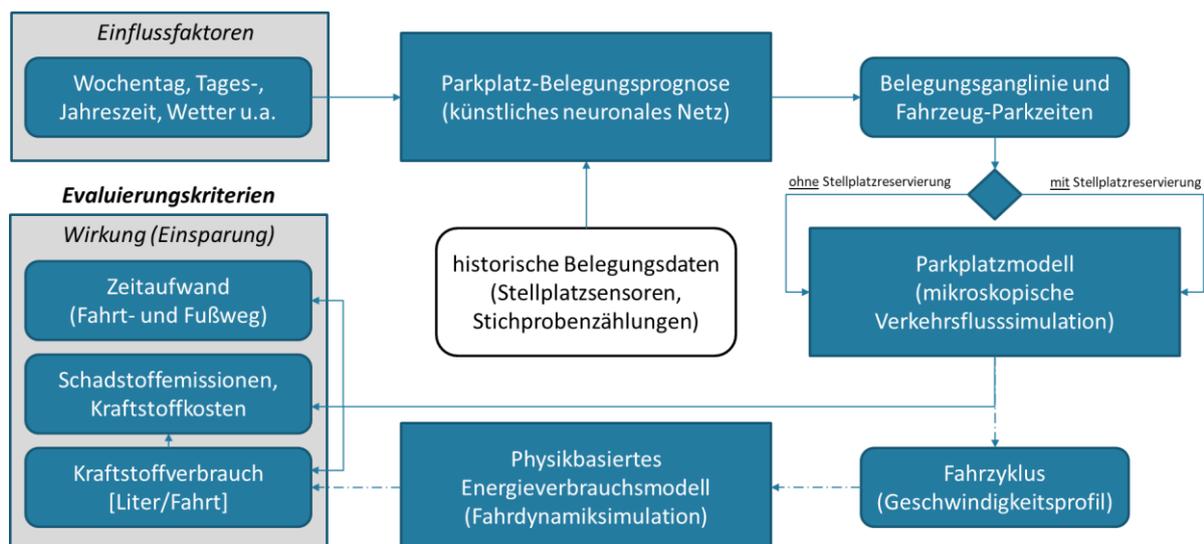


Abb. 25: Modelle zur Analyse und Bewertung der Stellplatzreservierung (Evaluierungskonzept)

Das **Parkplatzmodell** wurde mit der Simulationssoftware AnyLogic 8 erstellt und ist zur Übersicht in der folgenden Abb. 26 mit Erklärungen abgebildet. Darin ist u. a. die Reservierungszone markiert, deren Stellplätze jeweils mit einem unteren Farbsignal für den Belegungszustand (rot = belegt, grün = frei) und einem oberen für den Reservierungsstatus (rot = reserviert, grün = nicht reserviert) versehen sind. Im abgebildeten Fall sind alle Stellplätze nicht reserviert (d. h. nicht weiter freizuhalten) und daher durch Fahrzeuge ohne Reservierung belegt.<sup>21</sup> Das Modell wurde maßstabsgerecht auf Grundlage eines Google-Satellitenbildes und eines aktuellen Anlagenplans des Parkplatzbetreibers aufgebaut. Zusätzlich wurden 139 Stellplätze in der Hauptverkehrsstraße (d. h. im Umkreis von etwa 500 m) mithilfe von Google Street View erkannt und hinzugefügt, die bei Vollbelegung der Anlage als Überlauf genutzt werden.

<sup>21</sup> Oder diese Fahrzeuge haben reserviert, aber Folgereservierungen für den verbl. Tag liegen nicht vor.

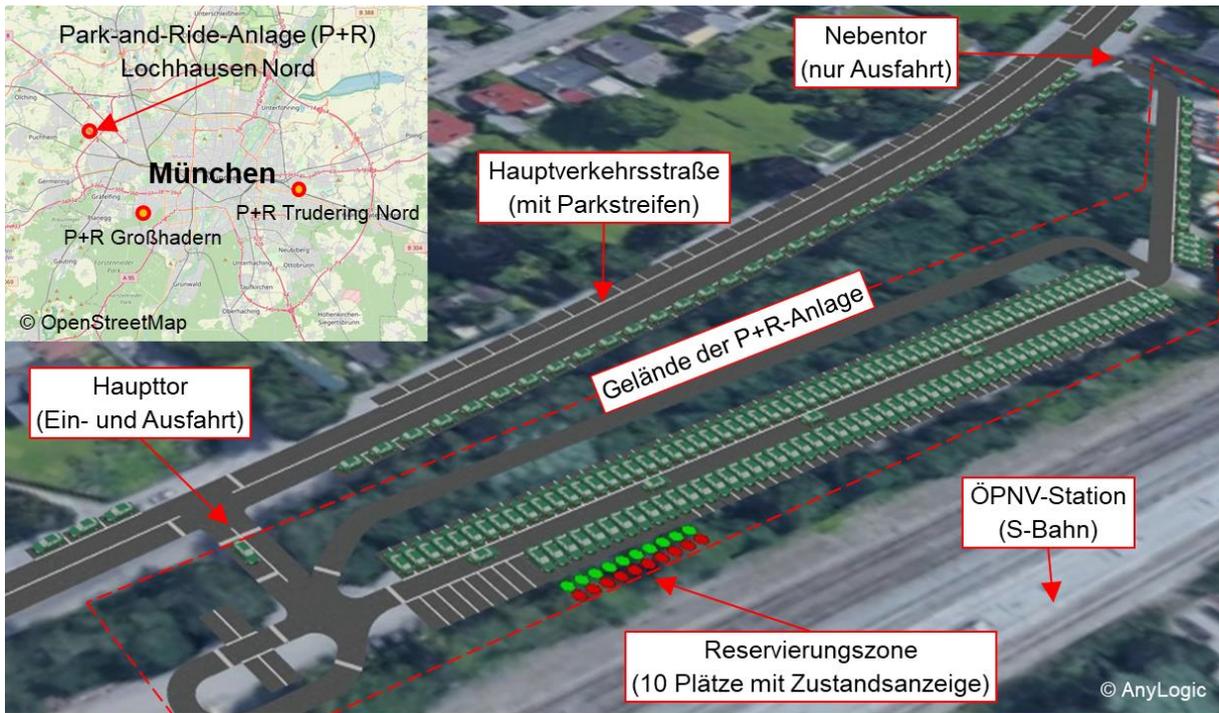


Abb. 26: Übersichtsplan zum Parkplatzmodell in der Simulationssoftware AnyLogic 8



Abb. 27: Screenshot des AnyLogic-Modells während eines Simulationslaufs (03.10.2019, 14:36)



Abb. 28: Nachbearbeitete, endgültige Bewegungspfade aller parkenden Fahrzeuge an einem Tag

Abb. 27 zeigt eine Momentaufnahme des Parkplatzmodells während eines Simulationslaufs. Zu unterscheiden sind darin die grünen Fahrzeuge, welche die Park-and-Ride-Anlage zum Parken aufsuchen, von den roten Fahrzeugen, welche den Durchgangsverkehr<sup>22</sup> und die sonstige Belegung des Außenbereiches (z. B. parkende Anwohner) bilden.<sup>23</sup> Außerdem ist darin die Ist-Belegungskurve der Anlage – Total occupancy P+R (actual) – bis zum aktuellen Zeitpunkt dargestellt. Diese ergibt sich aus der simulierten Ankunft und Abfahrt jedes „grünen“ Fahrzeugs auf einem Stellplatz. Zum Vergleich ist die Soll-Kurve gemäß der Belegungsprognose für den entsprechenden Tag – Total occupancy P+R (target) – abgebildet. Wie zu erkennen ist, verlaufen die Ist- und Soll-Kurve nahezu deckungsgleich. Dieses erwünschte Verhalten ist auf das Optimierungsverfahren zurückzuführen, das vor der Simulation zur Bestimmung der exakten Ankunfts- und Abfahrtszeiten jedes „grünen“ Fahrzeugs eingesetzt wird.

Zur exakten Bestimmung der zurückgelegten Entfernung sind die aufgezeichneten Bewegungspfade im Nachgang zu korrigieren, da ein Teil der im Modell gefahrenen Wege, d. h. die genutzten Wendeschleifen nach dem Ausparken, nicht der Realität entspricht. Die zwei Wendeschleifen befinden sich über dem mittleren Bereich bzw. unter dem linken Bereich des Parkplatzes. Sie sind aufgrund der Beschränkung von AnyLogic erforderlich, dass Stellplätze (parking lots) nur bei Einbahnstraßen rechts- und linksseitig der Fahrbahn platziert und benutzt werden können, während sonst nur die rechte Fahrbahnseite (in Fahrtrichtung) zum Parken möglich ist. Damit zum Einparken auch die linksseitigen Stellplätze direkt befahren werden können, erfolgt das mit einem Umweg verbundene Wenden erst beim Ausparken über die Schleifen, falls z. B. von der Parkplatzmitte zur linken Ausfahrt (Haupttor) gefahren wird. Dementsprechend werden die betreffenden Abschnitte der Bewegungspfade aller Fahrzeuge im Nachgang durch einen speziellen Algorithmus, der in PAMIR entwickelt und implementiert wurde, automatisch erkannt, gekürzt und teilweise durch den korrekten, von der Hinfahrt gegebenen Pfadabschnitt ersetzt. Abb. 28 veranschaulicht das Ergebnis dieser Nachbereitung.

Das dritte Modell des Evaluierungskonzepts ist das **physikbasierte Energieverbrauchsmodell**, in das die aufgezeichneten Fahrzyklen eingehen, wie in Abb. 29 beispielhaft dargestellt.

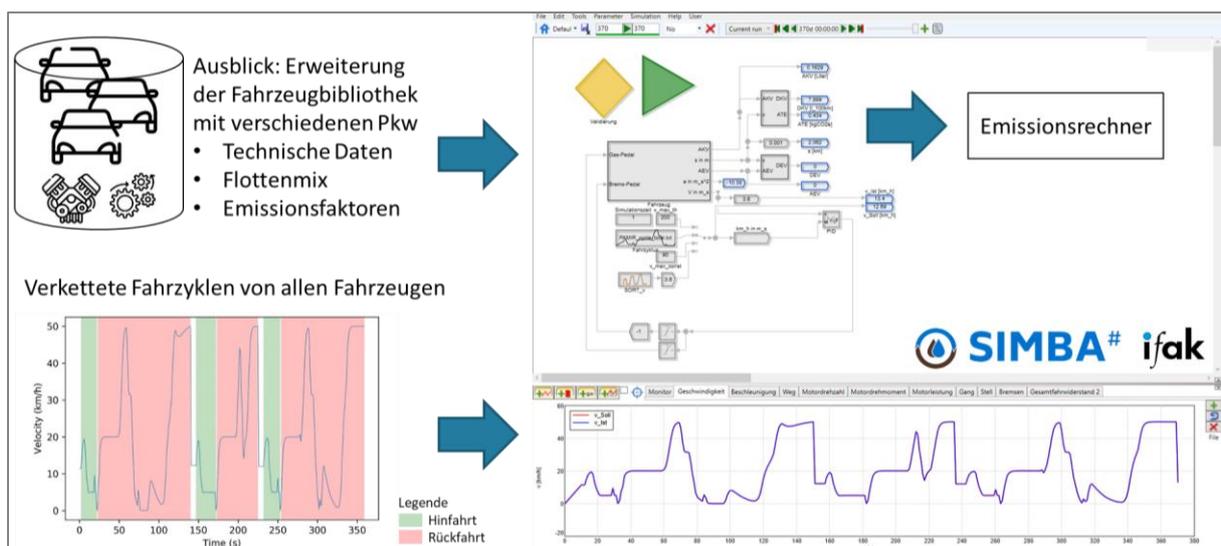


Abb. 29: Physikbasiertes Energieverbrauchsmodell in der ifak-Simulationssoftware SIMBA#

<sup>22</sup> Die mittlere Verkehrsstärke des Durchgangsverkehrs in jeder Fahrtrichtung wurde auf Basis der offiziellen Verkehrsmengenkarte der Landeshauptstadt München für das Jahr 2018 abgeschätzt.

<sup>23</sup> Da die Außenbelegung für die Simulationsexperimente nicht relevant war (keine Vollbelegung), wurde ein Belegungsgrad von 50 % angenommen und die entsprechende Fahrzeugmenge zufällig verteilt.

Die Entwicklung der Simulationsmodelle erfolgte ersatzweise für die in AP 7.3 ursprünglich geplanten Aufgaben (Logfunktionen), die mangels Testnutzer nicht gebraucht wurden.<sup>24</sup> Die letzten beiden Unterarbeitspakete – AP 7.5 Durchführung der Feldversuche und AP 7.6 Auswertung der Ergebnisse – erfolgten dagegen analog zum Feldversuch im Sinne der Durchführung der Simulationsexperimente und Auswertung der Simulationsergebnisse. Zusätzlich wurden durch die Projektpartner ParkHere und ifak zwei Praxistests am 26. Mai 2020 und am 21. September 2021 vor Ort durchgeführt, um u. a. die Sensoren durch unterschiedliche Ein- und Ausparkmanöver sowie die neue PAMIR-App im Alltag zu testen, sodass letztlich doch ein Feldversuch, nur in verkürzter Form und ohne projektexterne Nutzer, durchgeführt wurde.

Das **Simulationsexperiment** wurde am Beispiel des Jahres 2019 durchgeführt, da in diesem Jahr noch alle Großveranstaltungen (z. B. Oktoberfest und Christkindmarkt) sowie die Schulferien planmäßig stattfanden. Um nicht alle 365 Tage des Jahres einzeln und für jeweils zwei Szenarien (ohne und mit Reservierung) mit dem Parkplatzmodell zu simulieren<sup>25</sup>, wurden zunächst alle 365 Belegungskurven mit dem Prognosemodell erstellt und nach dem Tagesmaximum der oberen Konfidenzschranke (level\_ub\_max) absteigend sortiert (siehe Abb. 30). Dadurch können die für eine Reservierung relevanten Tage bestimmt und ausgewählt werden, da anzunehmen ist, dass Reservierungen in der Regel erst bei einer höheren Gesamtauslastung vorgenommen werden und dafür ein Schwellenwert von 80 % der prognostizierten Maximalbelegung (entspricht level\_ub\_max) angesetzt wird. Somit sind nur 207 Tage relevant, an denen der Schwellenwert überschritten wird und mindestens eine Reservierung möglich ist.

Index	level_max	level_ub_max	level_lb_max	level_mean	rate_max	rate_min	rate_initial	rate_final
2019-10-03	0.974025	1.15549	0.744748	0.818249	0.2908...	-0.077...	0.395233	-0.709...
2019-12-11	0.929443	1.1109	0.700166	0.748091	0.3150...	-0.092...	0.2714	-0.597...
2019-11-28	0.902628	1.08409	0.673351	0.75148	0.2067...	-0.101...	0.412938	-0.639...
⋮								
2019-08-22	0.620107	0.801568	0.39083	0.422975	0.2309...	-0.107...	0.093842	-0.219...
2019-01-11	0.619595	0.801056	0.390318	0.519977	0.1745...	-0.070...	0.276687	-0.444...
2019-09-28	0.617953	0.799414	0.388676	0.491109	0.2051...	-0.095...	0.16791	-0.365...
2019-04-18	0.617921	0.799382	0.388644	0.509859	0.1844...	-0.070...	0.250622	-0.428...
⋮								
2019-06-22	0.213515	0.394976	0	0.129547	0.0571...	-0.042...	0.04442...	-0.064...
2019-12-28	0.185583	0.367044	0	0.123556	0.0376...	-0.029...	0.06101...	-0.079...
2019-01-05	0.104769	0.28623	0	0.0725228	0.0175...	-0.015...	0.04230...	-0.052...

Nur an diesen Tagen kann mindestens eine Reservierung stattfinden.

- level\_ub\_max ≥ 0,8
- Anzahl: 207 Tage (56,7%)

→ Auswahl

Die übrigen Tage sind vernachlässigbar, da keine Reservierungen stattfinden.

**Abb. 30:** Liste mit allen Tagesbelegungskurven-Kennzahlen in 2019 (auszugsweise Darstellung)

Zur weiteren Reduzierung der Simulationsläufe wurden die ausgewählten Tage in vier Klassen zusammengefasst und jeweils ein repräsentativer Tag (Median) ausgewählt (siehe Tab. 9).

**Tab. 9:** Klassen der ausgewählten Tagesbelegungskurven in 2019 (x = level\_ub\_max; x ≥ 0,8)

Nr.	Klassengrenzen	Anzahl n	Median (Tag)	Tagesmaximum x
1	0,8 ≤ x < 0,9	96	20.12.2019	0,8510 (85 %)
2	0,9 ≤ x < 1,0	85	04.11.2019	0,9385 (94 %)
3	1,0 ≤ x < 1,1	24	09.10.2019	1,0328 (103 %)
4	1,1 ≤ x < 1,2	2	11.12.2019	1,1109 (111 %)

<sup>24</sup> Am nachfolgenden AP 7.4 Installation von Parkplatzsensoren war das ifak wiederum nicht beteiligt.

<sup>25</sup> Ein Simulationslauf (ein Tag und ein Szenario) erfordert eine Rechenzeit zwischen 20 und 30 Minuten.

Anschließend wurden die beiden Szenarien mit jedem Klassenvertreter simuliert, sodass insgesamt nur acht (statt  $2 \cdot 365$ ) Simulationsläufe in AnyLogic erforderlich waren, um am Ende eine Hochrechnung der Simulationsergebnisse für das gesamte Jahr durchführen zu können.

Für das Szenario „Mit Reservierung“ ist an dieser Stelle noch die verfolgte **Reservierungsstrategie** zu erklären, da diese das Endergebnis maßgeblich beeinflusste. Sie wurde im Parkplatzmodell durch folgende Parameter (P) und Optimierungskriterien (K) definiert:

- P1: Schwellenwert der prognostizierten Belegung, ab dem Reservierungen erfolgen
- P2: Anteil der zur Reservierung berechtigten Nutzer, die tatsächlich reservieren
- K1: Minimierung der Gesamtfahrleistung aller Nutzer (ohne und mit Reservierung)
- K2: Maximierung der Auslastung der Reservierungsstellplätze (durch Mehrfachbelegung und Freigabe für alle Nutzer bis Tagesende nach Ende der letzten Reservierung)

Für P1 wurde der bereits erklärte Schwellenwert von 80 % angenommen. Daraus ergibt sich die Menge der potenziellen Nutzer, von denen jedoch nur ein Teil entsprechend dem P2-Wert (hier mit 50 % angenommen) tatsächlich reserviert, da nicht alle Nutzer vorher die Belegungsprognose beachten oder die ggf. kostenpflichtige Reservierung bezahlen wollen.

Um die Möglichkeiten zur Verringerung der Gesamtfahrleistung erkennen zu können, sind die ggf. unterschiedlichen Herkunftsrichtungen der potenziellen Nutzer und die entsprechenden Gesamtfahrwege (Hin- und Rückfahrt), wie in Abb. 31 skizziert, zu betrachten. Demnach müssen alle Nutzer aus östlicher Richtung entlang des roten Pfades stets bis zur einzigen Einfahrt (Haupttor) des Parkplatzes fahren. Unabhängig von ihrer endgültigen Parkposition legen sie nach der Einfahrt durch das Haupttor bereits einen Teil des Rückweges zurück, da dieser am kürzesten über die östliche Ausfahrt (Nebentor) führt. Somit ist die Summe aus Hin- und Rückweg für alle Nutzer aus Osten stets gleich groß. Für die anderen Nutzer aus nördlicher und westlicher Richtung, die von links kommend nur durch das Haupttor ein- und ausfahren (grüner Pfad), hängt die zurückgelegte Entfernung von der Parkposition ab. Daher wird die Gesamtfahrleistung umso stärker reduziert, je mehr „grüne“ Nutzer in der Reservierungszone parken.



Abb. 31: Gesamtfahrwege von Nutzern nach Herkunftsrichtung (Hin- und Rückfahrt)

Dementsprechend wurde in allen Simulationsläufen die optimale Reservierungsstrategie angewendet, wobei insbesondere nur die Nutzer aus Norden und Westen reservieren durften. Die tatsächlichen Reservierungen wurden schließlich unter Berücksichtigung von P1 und P2 vor jedem Simulationslauf anhand der Simulationsereignisliste (mit Ankunftszeit, Herkunftsrichtung und Nutzertyp der einzelnen Fahrzeuge) wie zum Beispiel in Abb. 32 bestimmt.

Nutzer-Nr.	Ankunft	Herkunft (Richtung)	Nutzertyp	Reservierung
75	2019-10-03 08:02:14	2	6	1
76	2019-10-03 08:02:44	3	1	nicht berechtigt
77	2019-10-03 08:03:12	2	6	0
78	2019-10-03 08:04:26	3	5	nicht berechtigt
79	2019-10-03 08:06:28	3	6	nicht berechtigt
80	2019-10-03 08:08:27	3	6	nicht berechtigt
81	2019-10-03 08:08:40	3	6	nicht berechtigt
82	2019-10-03 08:08:46	2	1	0
83	2019-10-03 08:09:06	2	3	nicht berechtigt
84	2019-10-03 08:10:09	2	6	2
85	2019-10-03 08:13:07	3	6	nicht berechtigt

Abb. 32: Bestimmung der Nutzer, die einen Stellplatz reservieren, in der Simulationsereignisliste

Die **Simulationsergebnisse** sind in der Abb. 33 am Beispiel der Wegersparnis für reservierende und nicht-reservierende (sonstige) Nutzer sowie insgesamt für alle Nutzer dargestellt. Im linken Diagramm ist die mittlere Gesamteinsparung für jeden simulierten Tag (jeweils der Median einer Klasse) und im rechten Diagramm die mittlere Einsparung je Nutzer und Tag zu finden. Die entsprechende Nutzeranzahl (am simulierten Tag) ist darunter angegeben.

Bei reservierenden Nutzern (blaue Kurve) nehmen sowohl die mittlere Gesamteinsparung als auch die mittlere Einsparung je Nutzer zu, wenn die Gesamtbelegung des Parkplatzes steigt. Im Durchschnitt liegt die mittlere tägliche Wegersparnis eines reservierenden Nutzers zwischen 150 und 200 Metern. Allerdings wirkt sich diese Ersparnis negativ auf die sonstigen Nutzer (graue Kurve) aus, die einen längeren Weg von jeweils etwa 10 Metern täglich zurücklegen. Über alle Nutzer betrachtet (grüne Kurve) ergibt sich jedoch ein positiver Saldo, der ebenso mit zunehmender Gesamtauslastung von 1,89 auf 6,83 Meter je Nutzer und Tag steigt. Die angewendete Reservierungsstrategie erweist sich damit, trotz der relativ geringen Gesamteinsparung für alle Nutzer, als wirksam und zielführend mit Blick auf die insgesamt geringere Gesamtfahrleistung innerhalb eines Jahres, sodass auch Emissionen eingespart werden.

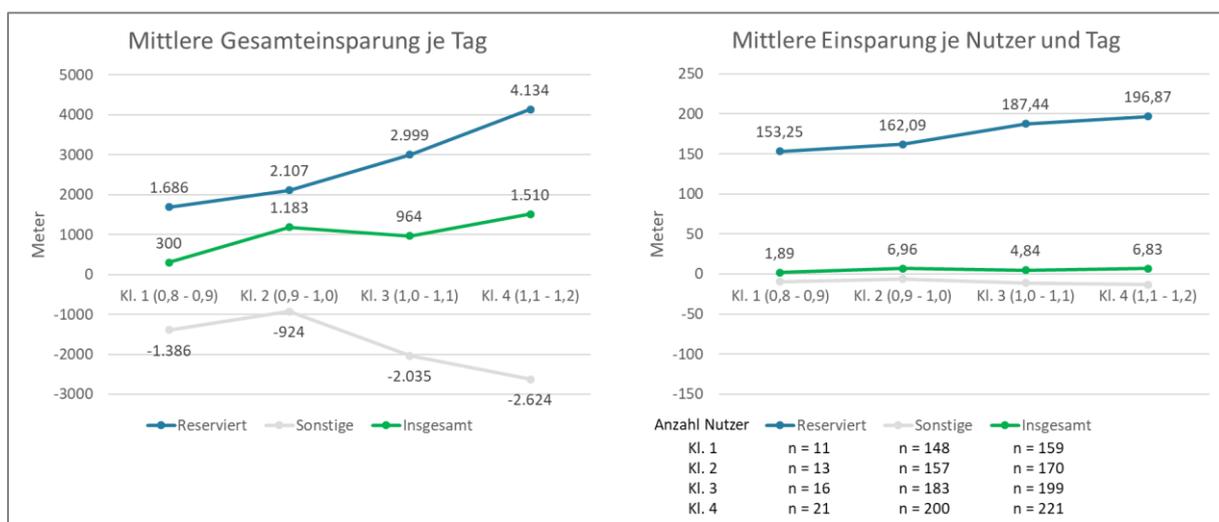


Abb. 33: Einsparung der zurückgelegten Entfernung durch Reservierungen in Lochhausen

Durch Hochrechnung der Einzelergebnisse von jedem simulierten Tag auf alle Tage einer Klasse und schließlich auf alle Tage des Jahres 2019, ergibt sich eine Wegersparnis von etwa 155,531 km (siehe auch Abb. 34). Dies entspricht etwa 0,8 % der Gesamtfahrleistung.

Das entsprechende Einsparpotenzial für den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen wurde auf Basis der sogenannten aggregierten HBEFA-Faktoren berechnet, die bereits einen repräsentativen Flotten- und Kraftstoffmix von Pkw in Deutschland 2020 berücksichtigen und somit auf die Parkplatznutzer in Lochhausen übertragbar sind. Demnach können z. B. 9,28 kg Kraftstoffe und 27,06 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen jährlich eingespart werden (siehe Tabelle in Abb. 34). Angesichts von über 163 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> im Gesamtverkehr Deutschlands 2019<sup>26</sup> sind diese Werte verschwindend gering, jedoch lässt sich die absolute Einsparmenge erst bei einer Übertragung des Reservierungssystems und einer Hochrechnung auf viele gleichartige Parkplätze in Deutschland abschätzen, was jedoch nicht mehr Gegenstand dieser Untersuchung war.

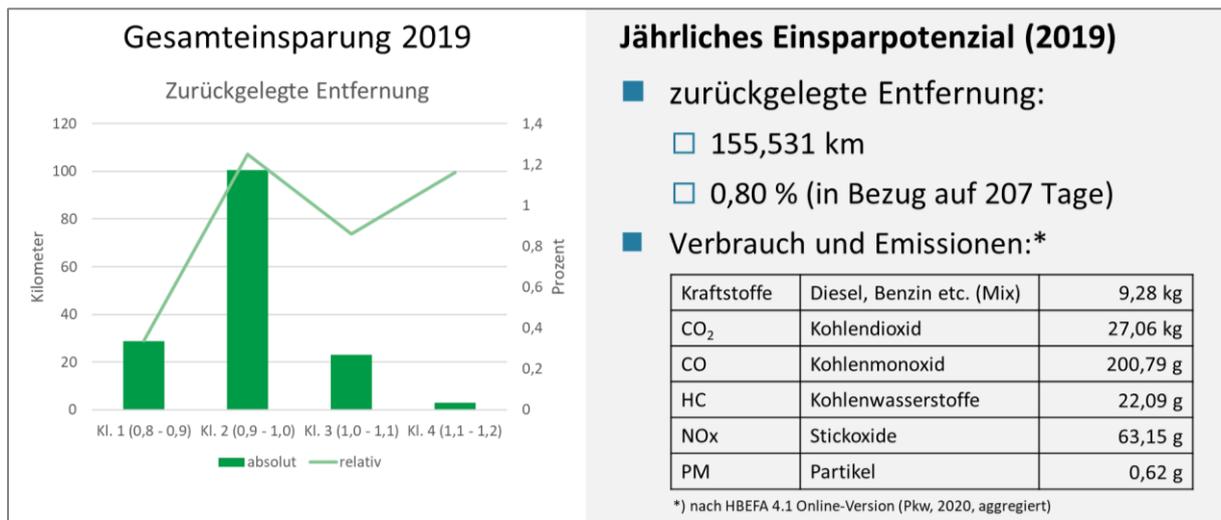


Abb. 34: Jährliches Einsparpotenzial für Entfernung, Verbrauch und Emissionen in Lochhausen

Da die Simulationsergebnisse ein signifikantes Einsparpotenzial für reservierende Nutzer ergaben und schließlich auch die Zahlungsbereitschaft für eine Reservierung zu evaluieren war, wurden die entsprechenden Kosteneinsparungen (durch weniger Kraftverbrauch, Fahr- und Gehzeit) mit geschätzten Preisen und Geschwindigkeiten berechnet (siehe Abb. 35).

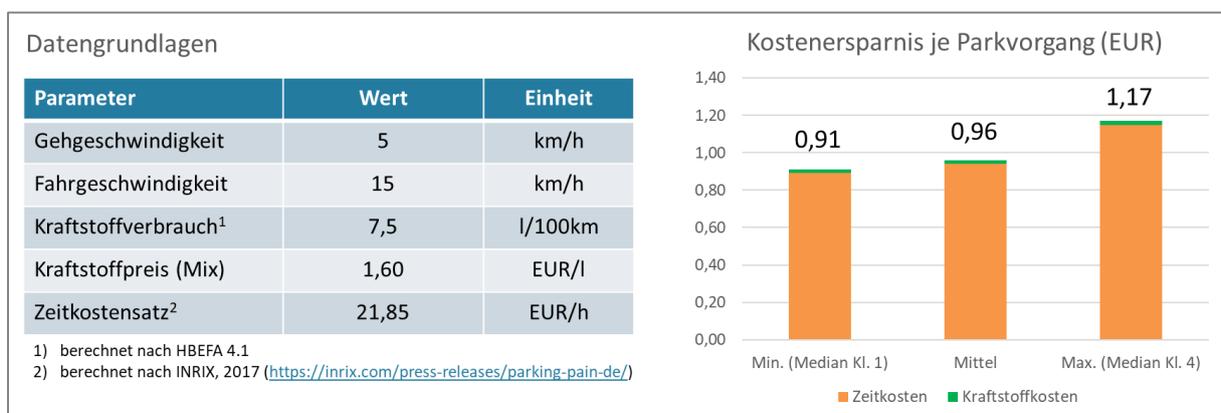


Abb. 35: Abschätzung der Kosteneinsparung für einen reservierenden Nutzer je Parkvorgang

<sup>26</sup> <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12188/umfrage/co2-emissionen-durch-verkehr-in-deutschland-seit-1990/>

Aufgrund der mit steigender Parkplatzbelegung zunehmenden Wegersparnis eines reservierenden Nutzers (Abb. 33, rechts), nimmt auch seine Kosteneinsparung, die fast ausschließlich aus kalkulatorischen Zeitkosten und kaum aus zahlungswirksamen Kraftstoffkosten besteht, entsprechend zu (siehe Abb. 35, rechts). Die Einsparung beträgt durchschnittlich 0,91 Euro bei einer Auslastung zwischen 80 und 90 % und steigt auf etwa 1,17 Euro bei einer maximalen Parkplatzbelegung. Der Durchschnitt über alle 207 Tage im Jahr 2019, an denen die Auslastung über 80 % liegt, beträgt 0,96 Euro.

Demzufolge wird ein rational denkender Durchschnittsnutzer (im Sinne eines Homo oeconomicus) bereit sein, für eine Stellplatzreservierung mindestens 0,90 Cent zu zahlen. Dieser Preis kann auch variabel in Abhängigkeit von der Parkplatzauslastung gestaltet und auf 1,00 Euro oder 1,10 Euro angehoben werden, sodass sich stets eine Nettoersparnis für den Nutzer ergibt. Die (ggf. abzüglich der gesetzlichen Mehrwertsteuer i. H. v. 19 % verbleibenden) Einnahmen können laut Aussage des Projektpartners ParkHere durchaus zum kostendeckenden Betrieb des Reservierungssystems durch einen Parkplatzbetreiber verwendet werden.

### 2.1.8 AP 8 Rechtliche Rahmenbedingungen

Begleitend zu den FuE-orientierten Arbeitspaketen (AP 2-7) sollten die aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen zur Möglichkeit einer Stellplatzreservierung und des zu beachtenden Schutzes von personenbezogenen Daten, die von den entwickelten Mobilitätsdiensten ggf. erfasst und verarbeitet werden, im Rahmen von AP 8 geprüft werden.

Im Einzelnen untergliederte sich das AP 8 in folgende zwei Unterarbeitspakete, die durch das ifak geleitet und von diesem auch mit Unterstützung von ParkHere bearbeitet wurden:

- AP 8.1 Parkplatzreservierung in den Testfeldern
- AP 8.2 Sonstige (Datenschutz)

Im öffentlichen Verkehrsraum ist die **Parkplatzreservierung**, wie z. B. einer Parklücke am Straßenrand, nach der Straßenverkehrsordnung (§ 12 Abs. 5 StVO) grundsätzlich untersagt: *„An einer Parklücke hat Vorrang, wer sie zuerst unmittelbar erreicht; der Vorrang bleibt erhalten, wenn der Berechtigte an der Parklücke vorbeifährt, um rückwärts einzuparken oder wenn sonst zusätzliche Fahrbewegungen ausgeführt werden, um in die Parklücke einzufahren. Satz 1 gilt entsprechend, wenn an einer frei werdenden Parklücke gewartet wird.“* Dementsprechend stellt das rechtswidrige Freihalten einer Parklücke eine Ordnungswidrigkeit dar, die unter bestimmten Umständen (z. B. Sitzblockade des Freihaltenden in der Parklücke) sogar als strafbare Handlung (Nötigung) gewertet wird.<sup>27</sup>

Eine Reservierungsanzeige, wie sie vom Projektpartner ParkHere im PAMIR-Projekt eingesetzt wurde, ist auch nicht mit einem temporären Halteverbot für Umzugstransporte o. Ä. gemäß § 45 Abs. 6 StVO vergleichbar, da hierfür jeweils eine Genehmigung der zuständigen Straßenverkehrs- oder Ordnungsbehörde erforderlich ist. Aufgrund der aktuellen Beschränkung auf Umzüge oder Baustellen und der Notwendigkeit einer behördlichen Genehmigung, ist eine Ausweitung dieser Regelung auf die Stellplatzreservierung nur schwer vorstellbar.

Dennoch konnte die Stellplatzreservierung im Rahmen des PAMIR-Projekts rechtskonform umgesetzt werden, da keine physischen Sperren (z. B. Absperrbügel) zum Freihalten eines

---

<sup>27</sup> <https://www.juraforum.de/ratgeber/verkehrsrecht/ist-das-parkluecke-oder-parkplatz-freihalten-erlaubt>

reservieren Stellplatzes eingesetzt wurden. Außerdem befindet sich der betreffende Parkplatz (P+R Lochhausen Nord) auf einem Grundstück und somit nicht im unmittelbaren öffentlichen Verkehrsraum, weshalb durch den Parkplatzbetreiber (P+R Park & Ride GmbH München) sogenannte Einstellbedingungen<sup>28</sup> (Vertragsbestandteil) festgelegt und durchgesetzt werden dürfen. Diese schränken zum Beispiel den Nutzerkreis ein: *„Das Parken von Fahrzeugen ist nur MVV-Fahrgästen gestattet, um mit den von hier aus verkehrenden öffentlichen Verkehrsmitteln (Bahnen und Busse) unmittelbar abzufahren und/oder zurückzukommen.“* (Bedingung Nr. 1). Außerdem werden dort auch über die StVO hinausgehende Regelungen zum Freihalten von Sonderstellplätzen (z. B. für Familien) getroffen: *„[...] Durch Markierung oder Beschilderung gekennzeichnete Sonderstellplätze (z. B. für Menschen mit Behinderung, Frauen, Familien usw.) dürfen nur von berechtigten Personen genutzt werden.“* (Bedingung Nr. 4)

Demzufolge stellten die aktivierten Reservierungsanzeigen der reservierbaren Stellplätze auf dem Parkplatz Lochhausen Nord eine Beschilderung von Sonderstellplätzen dar. Diese waren von den Parkplatznutzern entsprechend zu beachten. Ein Verstoß, das heißt das Belegen eines reservierten Stellplatzes durch einen unberechtigten Nutzer, hätte vom Parkplatzbetreiber auf Grundlage der Einstellbedingungen sanktioniert werden können. Dies war im Rahmen des PAMIR-Projekts jedoch nicht vorgesehen und auch nicht erforderlich, da sich die meisten Nutzer an die (lediglich zu Testzwecken aktivierten) Reservierungsanzeigen gehalten haben.

Der **Datenschutz** gemäß der einschlägigen Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) sollte bereits bei der Herstellung einer Software beachtet werden, wenn damit personenbezogene Daten verarbeitet werden können, um z. B. mögliche Haftungsansprüche eines späteren Nutzers (Verantwortlicher) zu vermeiden [3]. Personenbezogene Daten sind definiert als *„alle Informationen, die sich auf eine identifizierte oder identifizierbare natürliche Person ... beziehen [...] insbesondere mittels Zuordnung zu einer Kennung wie einem Namen, zu einer Kennnummer, zu Standortdaten, zu einer Online-Kennung [...]“* (Art. 4 Nr. 1 DSGVO) Dies trifft vor allem auf die erforderlichen Nutzerdaten (d. h. Name, E-Mail-Adresse und Kfz-Kennzeichen) für die Stellplatzreservierung zu. Dagegen sind für die anderen Dienste, die vom ifak im Rahmen von PAMIR selbst- oder mitentwickelt wurden, grundsätzlich keine personenbezogenen Daten erforderlich und dürfen somit auch nicht von einer Software erhoben werden (gemäß dem Grundsatz der Zweckbindung, Art. 5 Abs. 1 DSGVO).

Bei der Entwicklung des Nutzer- und Reservierungsverwaltungssystems für die PAMIR-App wurden insbesondere die Grundsätze des Artikels 25 der DSGVO beachtet: Datenschutz durch Technikgestaltung (Data Protection by Design) und datenschutzfreundliche Voreinstellungen (Data Protection by Default) [3]. So sind z. B. ein Pseudonym oder eine nicht-persönbezogene E-Mail-Adresse als Nutzerkennung möglich. Die Voreinstellungen sind für den Nutzer in der PAMIR-App so festgelegt, dass z. B. die Nutzerdaten zu einer Reservierung unverzüglich gelöscht werden, sobald diese abgelaufen ist (Grundsatz der Speicherbegrenzung).

Des Weiteren wurde eine Datenschutzerklärung für die potenziellen Testnutzer der PAMIR-Dienste auf Basis einer vorhandenen, DSGVO-konformen Vorlage von ParkHere entworfen. Diese enthält folgende Abschnitte: (1) Verantwortlichkeiten und Kontakt, (2) Kontaktdaten Datenschutzbeauftragter, (3) Zwecke der Datenverarbeitung, Rechtsgrundlage, (4) Dauer der Speicherung, (5) Kategorien der Empfänger Ihrer Daten, (6) Ihre Rechte, und (7) Änderung der Datenschutzerklärung.

---

<sup>28</sup> <https://www.parkundride.de/de/einstellbedingungen.html>

Da auch das Kfz-Kennzeichen zu den personenbezogenen Daten zählt, wird dieses auf der Anzeige des reservierten Stellplatzes erst kurz vor Beginn des Reservierungszeitraums angezeigt. Während des Reservierungszeitraums ist die Anzeige weiter zwingend erforderlich, um eine zügige Kontrolle der rechtmäßigen Belegung durch das jeweilige Fahrzeug durch einen Bevollmächtigten des Parkplatzbetreibers zu unterstützen.

## 2.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

### 2.2.1 ifak

Das ifak beabsichtigt eine wissenschaftliche und wirtschaftliche Verwertung der im PAMIR-Projekt entwickelten Lösungen, die in der Abb. 36 zusammenfassend dargestellt sind. Darin sind auch die Lösungen des Projektpartners ParkHere (Belegungserfassung, Stellplatzreservierung) als Komponenten abgebildet, die aber grundsätzlich durch alternative Lösungen von anderen Herstellern (z. B. andere Parksensoren) ersetzt werden können. Das ifak kann dadurch auch unabhängig von ParkHere seine eigenen Lösungen (Belegungsprognose, Reiseplanung, Parkplatzsimulation) weiterentwickeln und verwerten.

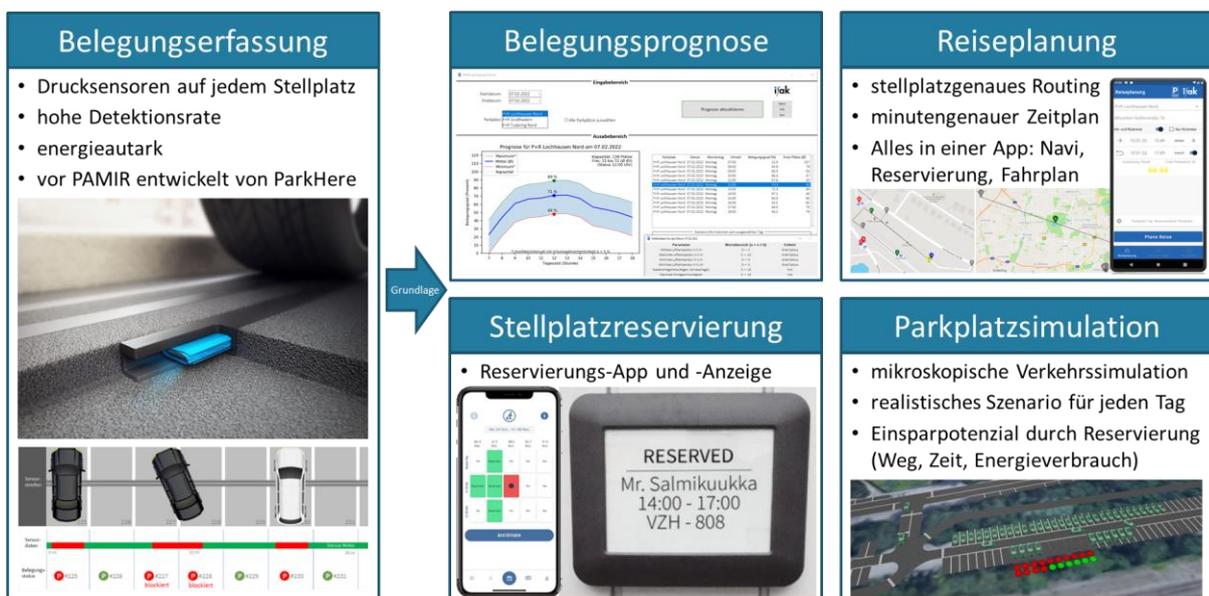


Abb. 36: Übersicht zu den Grundlagen und neuentwickelten Lösungen des PAMIR-Projekts

Die wissenschaftliche Verwertung startete bereits während der Projektlaufzeit mit diversen Publikationen (hierzu ausführlich in Abschnitt 2.4) und der Einreichung einer mFUND-Projekt-skizze im Januar 2022. In diesem neuen Vorhaben soll das physikbasierte Energieverbrauchsmodell, das im Rahmen der Evaluierung/Parkplatzsimulation (AP 7.1) mit der ifak-eigenen Simulationssoftware SIMBA# erstellt wurde, u. a. durch eine Fahrzeugbibliothek und einen Emissionsrechner weiterentwickelt werden. Das Ziel dabei ist es, den Energieverbrauch und die Emissionen von Fahrzeugen und Umschlagmitteln, die in multimodal-autonomen Transportketten zur wirtschaftlichen Belieferung von Privathaushalten im ländlichen Raum eingesetzt werden, zu bewerten und zu optimieren.

Ein weiteres geplantes Folgeprojekt soll sich der Echtzeit-Erfassung des Belegungszustands von On-Street-Parkplätzen durch öffentliche Verkehrsmittel widmen. Dabei soll auch das Prognosemodell aus PAMIR eingesetzt und entsprechend weiterentwickelt werden, um die kurzfristige Vorhersage freier Parkplätze in Zeiträumen ohne Echtzeit-Erfassung zu ermöglichen.

Die wirtschaftliche Verwertung der Parkplatzsimulation soll durch Schaffung eines Dienstleistungsangebots z. B. für Parkplatzbetreiber oder kommunale Planungsbehörden erreicht werden. Neben der bereits in PAMIR demonstrierten Bewertung der Emissionen und Optimierung der Reservierungsstrategie, sollen mittelfristig noch weitere Applikationen hinzugefügt werden, wie z. B. die Kapazitäts- und Standortoptimierung von Parkplatzzonen oder die Analyse und Optimierung von Überlastungs- und Extremsituationen (z. B. bei Großveranstaltungen). Hierfür sollen noch in 2022 entsprechende Vorbereitungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Weitere Lösungen aus PAMIR, die kurzfristig als Dienstleistung angeboten werden können, sind das Prognosemodell für Parkplätze<sup>29</sup> und die neuartigen Komponenten der prototypischen PAMIR-App (insbesondere das stellplatzfeine, prognosebasierte Parkplatz-Routing), die z. B. in bestehende kommerzielle Apps wie den *DB Navigator* integriert werden können.

### 2.2.2 ParkHere

ParkHere nutzt bereits einige Teile des Reservierungsdienstes, vor allem für die Reservierung von Mitarbeiterstellplätzen in großen Unternehmen.

Zudem geht ParkHere weiterhin davon aus, dass die Verbindung und „Incentivierung“ von Mitfahrgelegenheiten durch Reservierung von Stellplätzen in verschiedenen Szenarien nach der Corona-Pandemie wieder an Relevanz gewinnt und möchte daher zukünftig wieder mit einem Carpooling-Anbieter kooperieren.

Der Use Case auf Park-and-Ride-Anlagen ist ebenso zukunftssträftig, da diese Parkplätze zunehmend zu Mobility Hubs umgerüstet werden, in denen verschiedene Mobilitätsdienste ineinandergreifen werden. Ob dafür jedoch schon ausreichend Nutzerakzeptanz vorherrscht, lässt sich leider aufgrund der widrigen Testbedingungen noch nicht abschließend beurteilen.

## 2.3 Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurden die Fortschritte der anderen mFUND-Projekte zum Thema Parken (ParkenDigital, ParkUp, FaMoS, PundR-Aktuell und start2park – siehe auch Abschnitt 1.4) durch den regelmäßigen Besuch von Veranstaltungen (mFUND-Fach Austausch, mFUND-Konferenz) sowie das Lesen der entsprechenden Publikationen (z.B. [4]) verfolgt.

Dabei stellten sich die größten inhaltlichen Gemeinsamkeiten mit dem Projekt PundR-Aktuell heraus, da dieses ebenso Stellplatz-Sensoren auf Park-and-Ride-Anlagen (in der Region Frankfurt am Main) verwendete sowie einen Karten- und Belegungsprognosedienst entwickelte. Dies war dem ifak allerdings erst kurz vor dessen Start im Herbst 2020 über einen mFUND-Newsletter bekanntgeworden. Der erste detaillierte Einblick in das Projekt war danach auf der mFUND-Konferenz 2021 möglich gewesen, wobei sich auch der erste Kontakt zwischen den beiden Koordinatoren von PAMIR und PundR-Aktuell ergab und ein weiterer Aus-

---

<sup>29</sup> Übertragbar auf vergleichbare Parkplätze, wobei das neuronale Netz vorher mit spezifischen Daten des Parkplatzes trainiert und getestet werden muss

tausch vereinbart wurde. Bei der Abschlussveranstaltung des einjährigen Projekts im Dezember 2021 wurden schließlich die Ergebnisse von PundR-Aktuell vorgestellt, sodass dabei auch ein Vergleich mit den Ergebnissen von PAMIR möglich war. Demnach wurde festgestellt, dass bei PundR-Aktuell ein Magnetfeld-Sensor (auf jedem Stellplatz mittig montiert) verwendet wird, der jedoch konstruktionsbedingt keine Erkennung der Fahrzeugbreite oder von schrägparkenden Fahrzeugen wie der ParkHere-Sensor (Abb. 2) erlaubt. Außerdem wurde festgestellt, dass das Prognosemodell drei Klassen mit konstanten Grenzen zur Angabe der jeweiligen Auslastungssituation verwendet (d. h. entsprechend den Farben einer Ampel: grün, gelb und rot). Dagegen wird beim PAMIR-Prognosemodell ein variables Konfidenzintervall zur Angabe der Auslastungssituation verwendet, sodass auf die beliebige bzw. willkürliche Festlegung von Klassengrenzen wie bei einer Ampel verzichtet werden kann. Da das Ampelsystem außerdem auf einer mit Unsicherheit verbundenen Punktschätzung des Belegungsgrades basiert, sind die Fälle problematisch, bei denen die Punktschätzung (z.B. 79,8 %) in der Nähe einer Klassengrenze (z. B. 80 % als Grenze zwischen „gelb“ und „rot“) liegt. Dann ist die Wahrscheinlichkeit für „gelb“ und „rot“ etwa gleich groß, obwohl dem Nutzer nur „gelb“ angegeben wird.

Das zum Ende von PAMIR gestartete Projekt start2park war ebenso von Interesse, da u. a. eine empirische Untersuchung zur Bestimmung des exakten Start- und Endzeitpunkts eines Vorgangs zur Parkplatzsuche (Parksuchverkehr) durchgeführt werden soll. Diese Parameter sind auch im Parkplatzmodell erforderlich und werden bisher durch den Zeitpunkt der Einfahrt auf dem Parkplatz bzw. des Einparkens auf dem Stellplatz bestimmt. Die Parameter können an die Ergebnisse von start2park angepasst werden, sobald diese veröffentlicht sind.

## 2.4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des PAMIR-Projekts wurden in Form von Präsentationen, Kurzfilmen, Demonstratoren etc. auf Tagungen und Messen sowie wissenschaftlichen Publikationen öffentlich verbreitet. Außerdem wurde die Projektwebsite [www.pamir-projekt.de](http://www.pamir-projekt.de) zu Projektbeginn eingerichtet und während der Laufzeit fortlaufend aktualisiert. Im Veröffentlichungsbereich werden ausgewählte Präsentationen, Pressemitteilungen etc. zum Download bereitgestellt.

Im Folgenden sind alle Veröffentlichungen chronologisch geordnet aufgelistet.

### 2.4.1 Erfolgte Veröffentlichungen

Kaiser, A.; Naumann, S.; Schade, J.; Techmer, C.; Grüning, T.: PAMIR - Stellplatzfeine Parkplatzbelegungsinformation und Parkplatzreservierung für ein komfortableres multimodales Reisen (Vortrag). Hypermotion 2018, BMVI-Messestand, Frankfurt am Main, 21. November 2018.

Kaiser, A.; Naumann, S.: PAMIR - Stellplatzfeine Parkplatzbelegungsinformation und Parkplatzreservierung für ein komfortableres multimodales Reisen (Vortrag). Aachener Straßenbau- und Verkehrstage (ASVT) 2018. Aachen, 22.-23. November 2018.

Schade, J.: PAMIR - Stellplatzfeine Parkplatzbelegungsinformation und Parkplatzreservierung für ein komfortableres multimodales Reisen (Vortrag). Arbeitsforum Standardisierung/mCLOUD. WIK-Begleitforschung, Berlin, 28. August 2019.

Techmer, C.; Kaiser, A.: Prognose der Parkraumbellegung auf Basis von stellplatzfeinen Drucksensordaten (Vortrag). mFUND-Konferenz 2019, Forum 6: Prognosemodelle für eine bessere Parkraumbewirtschaftung. Berlin, 26. September 2019.

Kaiser, A.: PAMIR - Stellplatzfeine Parkplatzbelegungsinformation und Parkplatzreservierung für ein komfortableres multimodales Reisen (Vortrag). Smart Country Convention, BMVI-Messestand. Berlin, 24. Oktober 2019.

Kaiser, A.: mFUND Projekte im Porträt, 7 Fragen an PAMIR (Interview). WIK-Begleitforschung, Dezember 2019. URL: [https://www.wik.org/fileadmin/mFUND\\_VF/mFUND\\_WIK\\_7\\_Fragen\\_an\\_PAMIR.pdf](https://www.wik.org/fileadmin/mFUND_VF/mFUND_WIK_7_Fragen_an_PAMIR.pdf) (zuletzt gesichtet am 23.02.2022).

Kaiser, A.: PAMIR - Stellplatzfeine Parkplatzbelegungsinformation und Parkplatzreservierung für ein komfortableres multimodales Reisen (Vortrag). mFUND-Fachaustausch: Parken. WIK-Begleitforschung, Online-Veranstaltung, 19. März 2020.

Kaiser, A.: PAMIR - Stellplatzfeine Parkplatzbelegungsinformation und Parkplatzreservierung für ein komfortableres multimodales Reisen. In: Liebe, A.; Hillebrand, A.: Platz da?! Datenbasierte Systeme zur Parkplatzerkennung. Eine Studie der mFUND-Begleitforschung des WIK. Bad Honnef, Dezember 2020, S. 7. URL: [https://www.wik.org/fileadmin/mFUND\\_VF/mFUND-WIK-Studie\\_DatenbasierteSystemeZurParkplatzerkennung.pdf](https://www.wik.org/fileadmin/mFUND_VF/mFUND-WIK-Studie_DatenbasierteSystemeZurParkplatzerkennung.pdf) (zuletzt gesichtet am 23.02.2022).

Kaiser, A.: Synthetische Kennfelder für die Energieverbrauchssimulation von Kraftfahrzeugen. In: at - Automatisierungstechnik, Jg. 69, Nr. 6, 2021, S. 524-537 (Open Access). URL: <https://doi.org/10.1515/auto-2020-0104>.

Kaiser, A.: PAMIR - Parkplatz-Belegungsprognose mit künstlicher Intelligenz (Vortrag). ifak-Institutskolloquium. Institut für Automation und Kommunikation e.V., Online-Veranstaltung, 27. Mai 2021.

Kaiser, A.; Reider, R.: PAMIR - Parking occupancy information and parking spot reservation for a more comfortable multimodal traveling (Ausstellung). ITS World Congress, Gemeinschaftsstand der Bundesländer/Sachsen-Anhalt, Hamburg, 11.-15. Oktober 2021.

Kaiser, A.: PAMIR - Stellplatzfeine Parkplatzbelegungsinformation und Parkplatzreservierung für ein komfortableres multimodales Reisen (Kurzfilm). mFUND-Konferenz 2021, Begleit-ausstellung, Online-Veranstaltung, 19.-20. Oktober 2021.

Kaiser, A.; Techmer, C.; Reider, R: Abschlussveranstaltung PAMIR-Projekt (diverse Vorträge). Institut für Automation und Kommunikation e.V., ParkHere GmbH, Online-Veranstaltung, 10. Februar 2021.

## 2.4.2 Geplante Veröffentlichungen

Kaiser, A.; Schade, J.; Zadek, H.: Modeling of total occupancy curves with integrated single parking times as input for microscopic traffic simulation (Research Paper).<sup>30</sup>

Des Weiteren soll mindestens ein Beitrag im Frühling/Sommer 2022 in einer Fachzeitschrift (z. B. in Internationales Verkehrswesen, Straßenverkehrstechnik oder Der Nahverkehr) platziert werden, in dem die Ergebnisse aus dem Schlussbericht zusammengefasst oder das Simulationsmodell und die Simulationsergebnisse ausführlich beschrieben werden.

---

<sup>30</sup> Zuerst eingereicht im November 2021 bei *Transportation Research Part B* (nicht angenommen). Wiedereinreichung einer überarbeiteten Fassung in einem anderen Journal im März 2022 geplant.

### 2.4.3 Sonstiges

Ansonsten wurde folgende Masterarbeit zum PAMIR-Projekt betreut (nicht veröffentlicht):

Alberts, F.: Analyse und Modellierung der Parkraumnutzung bei ÖV-Knotenpunkten auf Open-Data-Basis. Betreuer: Zadek, H.; Kaiser, A. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Logistik und Materialflusstechnik, Oktober 2019.

## 3 Literaturverzeichnis

- [1] Rashid, Tariq (2017): Neuronale Netze selbst programmieren. Ein verständlicher Einstieg mit Python. Unter Mitarbeit von Frank Langenau. Heidelberg: o'Reilly (Animals). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6016588>.
- [2] Altendeitering, Marcel; Pflügler, Christoph; Schreieck, Maximilian; Fröhlich, Sven; Wiesche, Manuel; Krcmar, Helmut (2018): Prognose von Parkplatzdaten. In: Manuel Wiesche, Petra Sauer, Jürgen Krimmling und Helmut Krcmar (Hg.): Management digitaler Plattformen. Konzeption und Realisierung eines offenen Ökosystems für intelligente Mobilitätsdienste in der Smart City. Wiesbaden: Springer Gabler (Informationsmanagement und digitale Transformation), S. 193–206.
- [3] Hircin, Tolga (2021): Datenschutz in der Softwareentwicklung. Wegweiser durch den DSGVO-Dschungel. In: *Entwickler Magazin* (4), S. 9–17.
- [4] Schäfer, Petra; Hagen, Thomas; Lux, Katharina (2019): Möglichkeiten und Grenzen der Gewinnung von Daten zum on-street-Parkraumangebot in Innenstädten aus Daten zu Ordnungswidrigkeiten - ein Versuch für Köln und Frankfurt. In: *Straßenverkehrstechnik* 63 (8), S. 543–551.