

Bern, 26.02.2020

Unternehmensentwicklung

Bernhard Riegel, +41 31 321 84 99, bernhard.riegel@bernmobil.ch

SFF Bernmobil - Zwischenbericht Februar 2020

Pilotprojekt selbstfahrendes Fahrzeug im ÖV bei Bernmobil

Version 5, 26.02.2020

Inhalt

1. Einleitung.....	5
2. Projektkontext.....	6
2.1. Unternehmerische und politische Ausgangslage	6
2.2. Projektvorstellung.....	6
2.3. Projektorganisation	6
2.4. Projektzeitplan.....	7
2.5. Finanzierung	8
2.6. Rechtliche Grundlagen Pilotbetrieb	8
2.7. Motivation und Projektziele der Partner	9
2.7.1. Motivation der Projektpartner	9
2.7.2. Projektziele.....	9
2.8. Kenntnisstand Schweizer Pilotversuche und zusätzlicher Erkenntnisgewinn	10
2.8.1. Kenntnisstand laufender Pilotversuche.....	10
2.8.2. Erkenntnisgewinn durch Pilotversuch BERNMOBIL.....	10
3. Merkmale des Pilotbetriebs	12
3.1. Geografische Lage der Standorte des Pilotbetriebs in Bern	12
3.2. Pilotstrecke	12
3.2.1. Auswahl der Pilotstrecke	12
3.2.2. Charakteristika der Pilotstrecke	13
3.3. Fahrzeug.....	15
3.3.1. Auswahl des Fahrzeugs	15
3.3.2. Merkmale des Fahrzeugs.....	15
3.3.3. Fähigkeiten des Fahrzeugs.....	17
3.3.4. Fahrzeugzulassung	18
3.3.5. Betriebsbedingungen	18
3.4. Angebot.....	20
3.4.1. Angebotskonzept Linie 23	20
3.4.2. Fahrgastinformation.....	20
3.4.3. Keine PBG Pflichten	21
3.5. Einbindung Betriebsorganisation BERNMOBIL.....	21
3.5.1. Teilprojekt Pilotbetrieb	21
3.5.2. Organisatorische Einbindung.....	21
3.5.3. Technische Einbindung.....	22
4. Projekterfahrung bis Inbetriebnahme SFF	24
4.1. Fahrzeugbeschaffung	24
4.2. Vorbereitung der Pilotstrecke.....	24
4.3. Ausnahmegesuch Bundesämter.....	25
4.4. Vorbereitung Betrieb SFF	25
5. Betriebserfahrungen SFF – 6 Monate.....	27
5.1. Betriebsdaten Juli 2019 bis Dezember 2019	27

5.2.	Besondere Ereignisse Juli 2019 bis Dezember 2019	30
5.3.	Streckenzustand und Wetter	31
5.4.	Streckenprogrammierung	32
5.5.	Fahrzeugtechnik (ohne Sensoren + Software).....	33
5.6.	Sensoren und Software auf dem Fahrzeug.....	33
5.7.	Backend-System Software	34
5.8.	Zusammenarbeit Fahrzeug- und Systemlieferant	35
5.9.	Einbindung Bernmobil-Technik	35
5.10.	BERNMOBIL-Prozesse.....	36
5.11.	BERNMOBIL-Personal.....	37
5.12.	Fahrgäste	37
5.13.	Verkehrsteilnehmende	37
5.14.	Quartierbewohnende	38
5.15.	Extrafahrten	38
6.	Erkenntnisse aus Betrieb SFF – 6 Monate.....	39
6.1.	Erkenntnisse zu den spezifischen Zielen des Pilotversuchs.....	39
6.1.1.	Leitstellenintegration	39
6.1.2.	Fahrzeug-Verhalten auf Kopfsteinpflaster	40
6.1.3.	Engstellen mit Gegenverkehr	43
6.1.4.	Fahrzeug-Verhalten in kurzer Steigung mit Haltestelle	44
6.2.	Erkenntnisse hinsichtlich Relevanz der Technologie für regulären ÖV Betrieb.....	44
7.	Anpassungen Betrieb SFF nach 6 Monaten.....	45
7.1.	Integration in Betriebsabläufe BERNMOBIL	45
7.2.	Angebot - Betriebszeit.....	46
7.3.	Angebot – Anpassungen aufgrund Baustellen.....	46
8.	Quellen	47
9.	Anhang 1: EasyMile Begriffe	48
10.	Anhang 2: Fahrplan Linie 23	49
11.	Anhang 3: Umfrage Operatoren September 2019	50

Verwendete Abkürzungen und Bezeichnungen

AÖV	Amt für öffentlichen Verkehr, Kanton Bern
ASTRA	Bundesamt für Strassen
AVOC	Autonomous Vehicle Operation Centre, Software-Lösung der Firma AMoTech
BAKOM	Bundesamt für Kommunikation
BAV	Bundesamt für Verkehr
BeHiG	Behindertengleichstellungsgesetz
ewb	Energie Wasser Bern
DFI	Digitale Fahrgastinformation
LSA	Lichtsignalanlage
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PBG	Personenbeförderungsgesetz
SFF	Selbstfahrendes Fahrzeug
SVA	Strassenverkehrs- und Schifffahrtsamt Kanton Bern
TVS	Direktion für Tiefbau, Verkehr und Stadtgrün der Stadt Bern
UVEK	Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation

1. Einleitung

Die Projektpartner BERNMOBIL, Stadt Bern, Migros Aare und ewb haben im Januar 2018 den Pilotversuch „selbstfahrendes Fahrzeug im ÖV“ (kurz **Projekt SFF**) in Bern initiiert. Im Rahmen dieses Projekts betreibt BERNMOBIL auf Basis der nötigen Ausnahmegewilligungen seit Juli 2019 ein selbstfahrendes Fahrzeug (kurz **SFF**) vom Typ EasyMile EZ10 Gen2 als BERNMOBIL Linie 23 auf einer Pilotstrecke zwischen Marzilibahn und Bärenpark in Bern. Dieser Bericht dokumentiert die Erkenntnisse aus den ersten 6 Betriebsmonaten Juli – Dezember 2019.

2. Projektkontext

2.1. Unternehmerische und politische Ausgangslage

Aufgrund einer 2017 durchgeführten Marktanalyse seitens der Unternehmensentwicklung von BERNMOBIL wurde erkannt, dass die Automatisierungstechnologie die Betriebsprozesse des ÖV stark verändern würde mit potentiell erheblichen Auswirkungen auf das Unternehmen. Jedoch fehlten konkrete Erfahrungen, um den Reifegrad der Technologie und Zeithorizont möglicher Veränderungen einschätzen zu können. Dies führte zur Idee eines Pilotversuchs.

Weiterhin hat die Stadt Bern die Durchführung eines Pilotversuchs mit selbstfahrenden Fahrzeugen in ihren Legislaturrichtlinien 2017-2020 festgelegt.

Auf diesen Grundlagen haben BERNMOBIL und die Stadt Bern das Projekt SFF initiiert und zusammen mit den Projektpartnern ewb und Migros Aare die Finanzierung für die Umsetzung des Projekts und die ersten 12 Monate Pilotbetrieb aufgegleist.

Die Umsetzung erfolgt auf Basis des Entscheids des BERNMOBIL Verwaltungsrats vom 18. Dez. 2017.

2.2. Projektvorstellung

Das Projekt SFF umfasst in der Umsetzungsphase

- die Beschaffung und Zulassung eines selbstfahrenden Fahrzeugs
- die Bewilligungen für die Nutzung der Pilotstrecke
- die Einreichung des Ausnahmegesuchs bei den Bundesämtern BAV, ASTRA sowie BAKOM
- die organisatorische Vorbereitung seitens BERNMOBIL für den Pilotbetrieb des selbstfahrenden Fahrzeugs

Die anschliessende Pilotbetriebsphase umfasst

- den Betrieb des selbstfahrenden Fahrzeugs im Rahmen eines publizierten Fahrplans
- die Auswertung des Pilotbetriebs

2.3. Projektorganisation

Nachfolgende Darstellung zeigt das Projektumfeld, Stand September 2019, mit den vier Projektpartnern, dem von BERNMOBIL moderierten Begleitgremium, der Betriebsorganisation sowie drei weiteren Kooperationspartnern. Mit den Basler Verkehrsbetrieben (BVB) besteht eine Vereinbarung zur Bereitstellung von Begleitpersonen für den Einsatz auf dem selbstfahrenden Fahrzeug. Weitere Verträge bestehen mit Amotech und EasyMile.

Hervorzuheben ist das Begleitgremium, über das die Stakeholder des Projekts vom Start weg eingebunden wurden. Sowohl die Quartierorganisationen entlang der Pilotstrecke wie auch politische Vertretungen von Kanton und Gemeinden und Vertretungen anderer Transportunternehmen wurden regelmässig über die Projektarbeiten informiert und konnten ihre Anliegen einbringen.

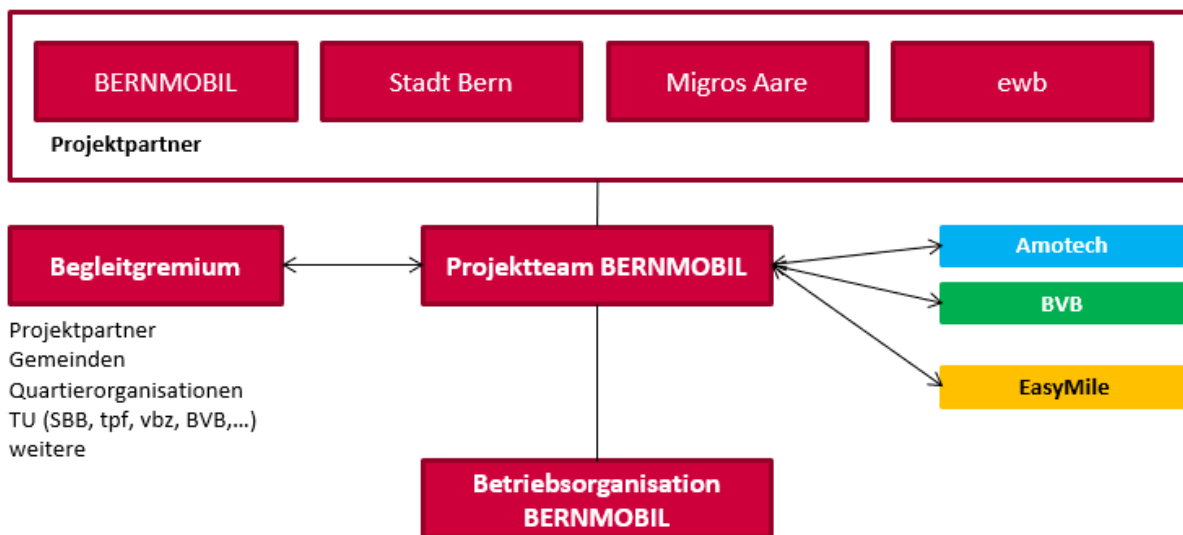


Abbildung 1: Projektumfeld SFF BERNMOBIL, Stand September 2019

Die Projektorganisation Stand September 2019 ist nachfolgend dargestellt. Die Projektpartner sind sowohl im Lenkungsausschuss des Projekts, im Begleitgremium sowie auch im Team Kommunikation vertreten, das den gemeinsamen Auftritt nach aussen abstimmt.

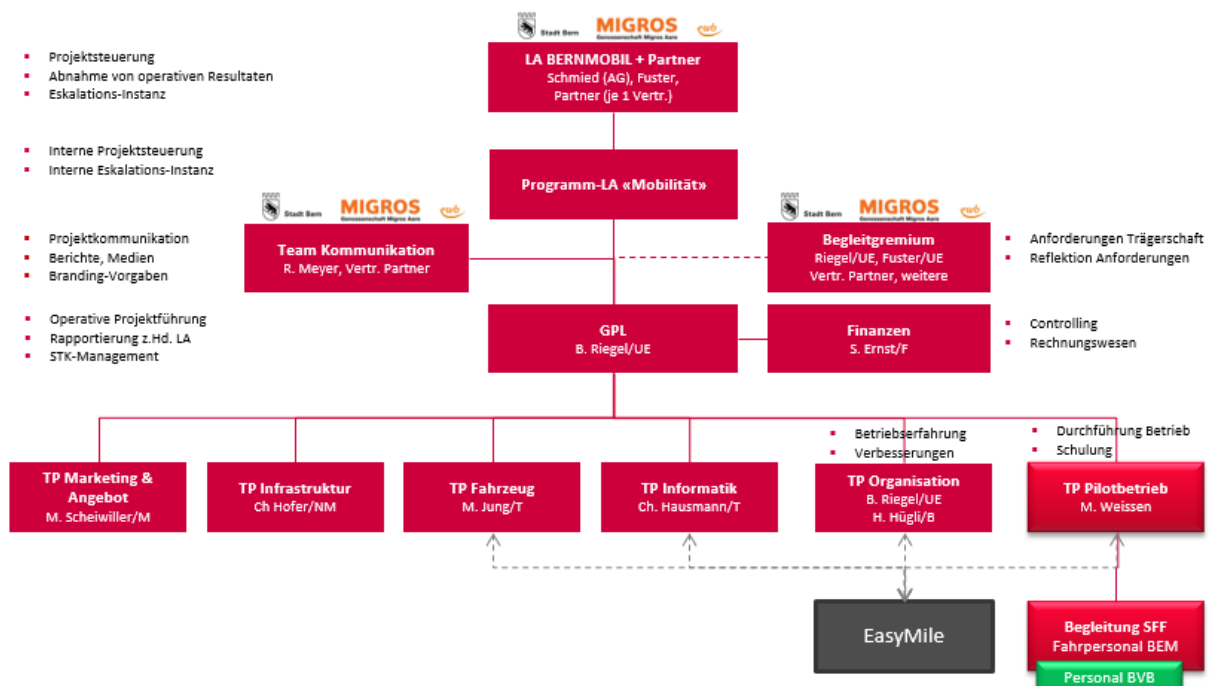


Abbildung 2: Projektorganisation SFF BERNMOBIL, Stand September 2019

2.4. Projektzeitplan

Nachfolgende Abbildung zeigt den Projektzeitplan des Gesamtprojekts, Stand Januar 2020.

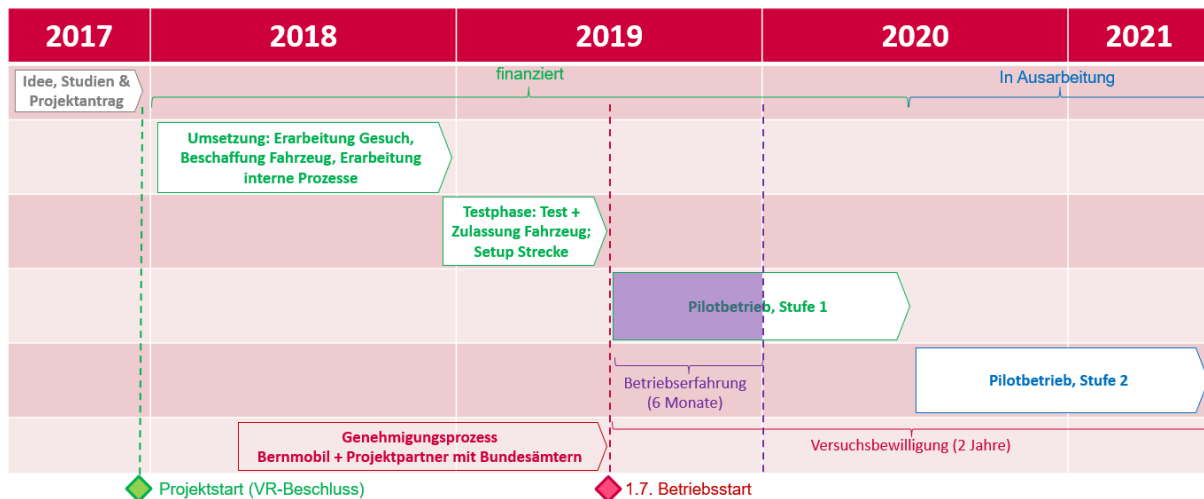


Abbildung 3: Zeitplan Gesamtprojekt, Stand Januar 2020

Gemäss Projektantrag war die Betriebsaufnahme für Januar 2019 vorgesehen. Die tatsächliche Betriebsaufnahme konnte dann Anfang Juli 2019 erfolgen. Die Verzögerung resultiert vor allem aus zwei Elementen:

- Für die Beschaffung des Fahrzeugs wurde eine öffentliche Ausschreibung auf SIMAP.ch durchgeführt, welche von der Vorbereitung über das Ausschreibungsverfahren und die anschliessende Vergabe bis zur Vertragsunterzeichnung ca. 5 Monate in Anspruch genommen hat. Die Lieferung des Fahrzeugs verzögerte sich dadurch um ca. 3 Monate.
- Die Bereitstellung der nötigen Prüfunterlagen durch den Hersteller für die Fahrzeugprüfung verzögerte das Projekt um weitere 2-3 Monate.

2.5. Finanzierung

Die Finanzierung des Projekts erfolgt vollständig durch die Projektpartner, wobei der Anteil BERNMOBIL aus der Spezialfinanzierung der gewerblichen Leistungen stammt. Für dieses Projekt werden somit keine finanziellen Mittel aus Abgeltungen eingesetzt.

Die Kosten für die Umsetzung und die ersten 12 Monate Betrieb bis einschliesslich Juni 2020 belaufen sich gemäss Planungsstand Januar 2020 auf 1.3 Mio. CHF.

Details zu Kosten und Finanzierung sind in den Projektantragsdokumenten sowie den Partnerverträgen geregelt.

2.6. Rechtliche Grundlagen Pilotbetrieb

Selbstfahrende Kleinbusse des Typs EasyMile EZ10 erfüllen die aktuell gültigen Vorschriften für den Strassenverkehr wie auch jene für ÖV-Fahrzeuge naturgemäss nicht.

Für den Pilotbetrieb wurde daher gemäss Merkblatt zur Durchführung von Pilotversuchen in der Schweiz (Version 1.0, aktuelle Version siehe [1]) eine Ausnahmegewilligung der Bundesämter ASTRA und BAV beantragt.

Diese wurde per Ausnahmeverfügung durch das UVEK am 19.06.2019 erteilt mit einer Gültigkeit bis 30.06.2021.

Diese enthält die Einzelzulassung des Fahrzeugs EZ10 für den ausschliesslichen Einsatz auf der bewilligten Pilotstrecke. Die Einzelzulassung erfolgte aufgrund der am 17.04.2019 gemeinsam durch ASTRA, BAV und dem SVA Bern durchgeführten Fahrzeugprüfung. Voraussetzung für die Prüfung waren weiterhin:

- Eine Funkversuchskonzession des BAKOM für das Fahrzeug
- Eine Betriebserlaubnis des AÖV Kanton Bern und des BAV (siehe Kap. 3.3.3)
- Eine Bewilligung der Strecke durch das ASTRA basierend auf der Zustimmung
 - der Strasseneigentümer
 - der Kantonspolizei Bern
 - der zuständigen städtischen Stellen, darunter Berufsfeuerwehr Bern und TVS

2.7. Motivation und Projektziele der Partner

2.7.1. Motivation der Projektpartner

BERNMOBIL

BERNMOBIL ist als ÖV-Unternehmen im Mobilitätsmarkt der Hauptstadtregion Bern aktiv und rechnet mittelfristig mit grundlegenden Veränderungen im Mobilitätsmarkt. Zu diesen Veränderungen zählt neben neuen Angebotsformen im ÖV und neuen Antriebstechnologien auch die zunehmende Automatisierung der Fahrzeuge. BERNMOBIL setzt sich aktiv mit diesen Veränderungen auseinander, um in diesem sich rasch verändernden Marktumfeld handlungsfähig zu bleiben und dem Besteller bei Bedarf auch neue Angebote bereitstellen zu können.

Speziell im Bereich der Automatisierung der Fahrzeuge soll der Pilotversuch dazu dienen, die Einbindung eines solchen selbstfahrenden Fahrzeugs in die ÖV-Betriebsprozesse zu verstehen, insbesondere die technische Anbindung an die Leitstelle.

Stadt Bern

Die Stadt Bern will den technologischen Wandel durch selbstfahrendes Fahren aktiv begleiten. Diese Absicht hat der Gemeinderat in seinen aktuellen Legislaturzielen 2017-2020 festgehalten: Erstens legt die Stadt Wert auf die Förderung zukunftsweisender Wirtschaftszweige (Legislaturziel 8) und beteiligt sich deshalb auch an der Initiative «Smart Capital Region» der Hauptstadtregion Bern. Zweitens will die Stadt all ihren Bewohnerinnen und Bewohnern den Zugang zu einer nachhaltigen Mobilität ermöglichen (Legislaturziel 10).

Bereits im Rahmen der Eigentümerstrategie 2017-2020 hat der Gemeinderat BERNMOBIL den Auftrag erteilt, sich aktiv mit der technologischen Entwicklung namentlich im Bereich der Informationstechnologien auseinanderzusetzen. Die Stadt Bern ist somit gewillt, die Chancen der Informationstechnologien für eine Verbesserung der öffentlichen Dienstleistungen in verschiedener Hinsicht zu nutzen und sich auf mögliche Risiken vorzubereiten. Dabei gilt es einerseits, sich Orientierungswissen zu erarbeiten, beispielsweise mit der Teilnahme an einer Studie von Ernst Basler&Partner (EBP). Andererseits soll die Stadt möglichst auch Nutzen aus praktischen Erfahrungen bei der Einführung des automatisierten Fahrens ziehen können. Insbesondere geht es darum, erste Erkenntnisse über nötige Anpassungen der Strasseninfrastruktur und das aufzubauende Leitsystem zu gewinnen, die eine Voraussetzung für automatisiertes Fahren bilden.

Migros Aare

Die Migros Aare ist als Projektpartner beim Pilotversuch «Selbstfahrende Fahrzeuge» von BERNMOBIL mit dabei, weil Mobilität und Digitalisierung zwei strategische Schwerpunktthemen sind. Mit der Teilnahme am Pilotprojekt von BERNMOBIL geht es der Migros Aare darum, praxisnahes Wissen in diesen Themen zu sammeln. Sie sieht interessante Möglichkeiten, in Zukunft selbstfahrende Fahrzeuge einzusetzen. Denkbar sind solche zum Beispiel als automatisierte Transportsysteme in der Logistik oder als Shuttle zwischen nahe gelegenen Migros-Standorten.

ewb

Das Hauptinteresse der ewb liegt bei der Planung, Projektierung und Ausführung des Netzan schlusses für die Ladeinfrastruktur sowie auf dem voraussichtlichen Erkenntnisgewinn hinsichtlich Last- und Speichermanagement.

2.7.2. Projektziele

Strategische Ziele BERNMOBIL:

- Aufbau von Kompetenzen im Bereich selbstfahrende Fahrzeuge
- Erkenntnisse hinsichtlich allfälliger Veränderungen für die Arbeitsplätze bei BERNMOBIL aus Verantwortung für die Mitarbeitenden
- Vorbereitung des Unternehmens auf allfällige zukünftige Bestellungen von selbstfahrenden Fahrzeugen

Die strategischen Ziele sollen erreicht werden, indem die Betriebsorganisation von BERNMOBIL möglichst breit in den Pilotbetrieb eingebunden wird, insbesondere das Fahrpersonal und die Leitstelle.

Daraus ergaben sich insbesondere folgend Projektziele

- Anbindung des selbstfahrenden Fahrzeugs und des zugehörigen Software-Systems an die Leitstellen-Software von BERNMOBIL

- Möglichst weitgehende Integration des Pilotbetriebs in die Betriebsprozesse
- Einsatz von Fahrpersonal als Begleitpersonen auf dem SFF
- Erkenntnisgewinn, welche organisatorischen und technischen Voraussetzungen für den fahrplanmässigen Betrieb eines SFF erforderlich sind

2.8. Kenntnisstand Schweizer Pilotversuche und zusätzlicher Erkenntnisgewinn

2.8.1. Kenntnisstand laufender Pilotversuche

BERNMOBIL hat sich zum Projektstart intensiv mit den bereits laufenden Pilotversuchen auseinandergesetzt. Insbesondere zu den folgenden Pilotversuchen wurde ein starker inhaltlicher Bezug identifiziert (s. Abbildung 4):

- Analog zum Pilotversuch in Schaffhausen (Neuhausen) stellt die Einbindung in die bestehende ÖV-Leitstelle einen Projektschwerpunkt dar. Diese erfolgt durch eine Anbindung an die zugehörige Schnittstelle der Software des Herstellers EasyMile. Ein zweites gemeinsames Thema ist die Bewältigung einer starken Steigung im Bereich 15%. Bei beiden Themen unterscheidet sich der Pilotversuch bei BERNMOBIL durch den unterschiedlichen Fahrzeugtyp (Schaffhausen = Navya Arma; Bern = EasyMile EZ10).
- Analog zum Pilotversuch Zug wird ein EZ10 Gen2 von EasyMile eingesetzt. Es ist jedoch aufgrund der Steigung mit einem stärkeren Antriebsstrang ausgestattet.
- Analog zum Pilotversuch Sion ist das selbstfahrende Fahrzeug in Bern im historischen Stadtgebiet unterwegs und verkehrt über teils grobes Kopfsteinpflaster. Auch hier ergibt sich ein Unterschied durch die unterschiedlichen Fahrzeugtypen (Sion: Navya).
- Analog zum Pilotversuch in Freiburg wird das Berner Fahrzeug nach einem Fahrplan verkehren, der in den Kundeninformationssystemen publik gemacht wird. In Bern wird es jedoch keine konzessionierte Linie im Sinne des PBG sein.

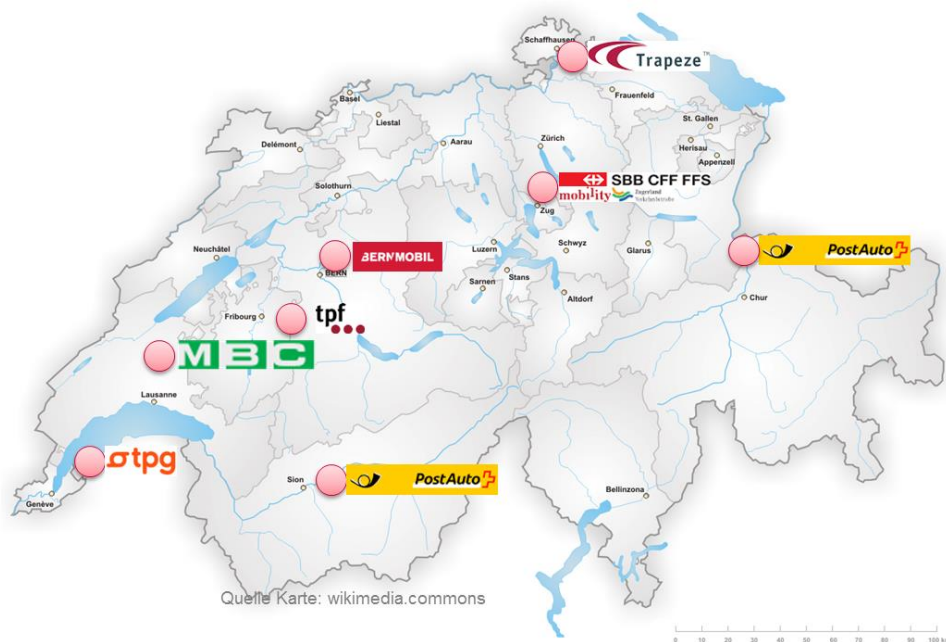


Abbildung 4: Überblick über Pilotversuche SFF Schweiz, Stand 2018

2.8.2. Erkenntnisgewinn durch Pilotversuch BERNMOBIL

Wie im Gesuch Ausnahmegewilligung im Kapitel 4 [2] ausgeführt, sollen mit dem Pilotversuch SFF bei BERNMOBIL folgende Erkenntnisgewinne erzielt werden:

Leitstellenintegration

BERNMOBIL überwacht ihre Busse und Trams von einer zentralen Leitstelle aus, die beim Depot Eigerplatz untergebracht ist (vgl. Abbildung 5). Aufgaben der Leitstelle sind Vermeidung von Störungen im Linienverkehr, Behebung von Störungen sowie Auswertung der Störungen und umfasst neben den Betriebsmassnahmen auch die Information der Fahrgäste.

Während bereits die konventionellen Fahrzeuge ihre Position automatisch per Funk an das Leitstellen-System melden, erfolgt die weitere Kommunikation zu diesen Fahrzeugen über das Fahr-

personal. Für ein automatisiertes Fahrzeug müssen hier neue Kommunikationswege etabliert werden. Ausserdem ist der Aspekt der Beeinflussung bzw. Steuerung des automatisierten Fahrzeugs aus der Leitstelle von zentraler Bedeutung und soll untersucht werden.

Ein wesentlicher Neuigkeitswert und Kernziel des Projekts ist daher die Einbindung des automatisierten Fahrzeugs EZ10 der Firma EasyMile in die bediente Leitstelle von BERNMOBIL. Diese Anbindung soll IT-seitig an das System LIO der Firma Trapeze erfolgen, welches auf der Leitstelle im Einsatz ist.

Die Firma AMoTech, eine Tochterfirma der Firma Trapeze, unterstützt die Integration mit der Bereitstellung einer Softwarelösung „AVOC“ zur Anbindung an das LIO System.

Fahrzeug-Verhalten auf Kopfsteinpflaster

Die Sensortechnik des EasyMile EZ10 Gen2 orientiert sich anhand redundanter LiDAR-Sensoren, die neben dem GPS noch mit Daten aus der Fahrzeugbewegung (Odometer) ergänzt werden. Auf der Pilotstrecke befinden sich zwei Abschnitte mit Kopfsteinpflaster. Es stellt sich die Frage, wie sich diese Sensortechnik bei den Erschütterungen durch das Kopfsteinpflaster verhält.

Engstellen mit Gegenverkehr

Die vorgesehene Pilotstrecke enthält weiterhin mehrere Engstellen, bei denen Fahrerinnen und Fahrer konventioneller Fahrzeuge über gegenseitigen Blickkontakt den Vortritt regeln müssen. Das Verhalten des EZ10 Gen2 wird Gegenstand einer vertieften Betrachtung, so dass auch daraus ein Erkenntnisgewinn erzielt werden kann.

Fahrzeug-Verhalten in kurzer Steigung mit Haltestelle

Auf der Pilotstrecke befindet sich zudem eine ca. 100 m lange Steigung von bis zu 14%, in der eine Haltestelle (12% Steigung) liegt. Es schliesst sich ein Gefälle von bis zu 15% an. Das beschaffte Fahrzeug von EasyMile wurde speziell für die Bewältigung dieser Steigung ausgerüstet. Das Verhalten des Fahrzeugs in der Steigung mit Haltestelle sowie im Gefälle soll in der Praxis untersucht werden.

3. Merkmale des Pilotbetriebs

3.1. Geografische Lage der Standorte des Pilotbetriebs in Bern

Die **Pilotstrecke** verläuft zwischen Marzilibahn und Bärengraben südlich der Altstadt entlang der Aare.

Die Teststrecke wurde auf dem Gelände des **Depots Bolligenstrasse** eingerichtet. Allfällige Reparaturen werden im BERNMOBIL **Depot Eigerplatz** durchgeführt.

Folgende Übersicht (Abbildung 5) zeigt die geografische Anordnung der Standorte.

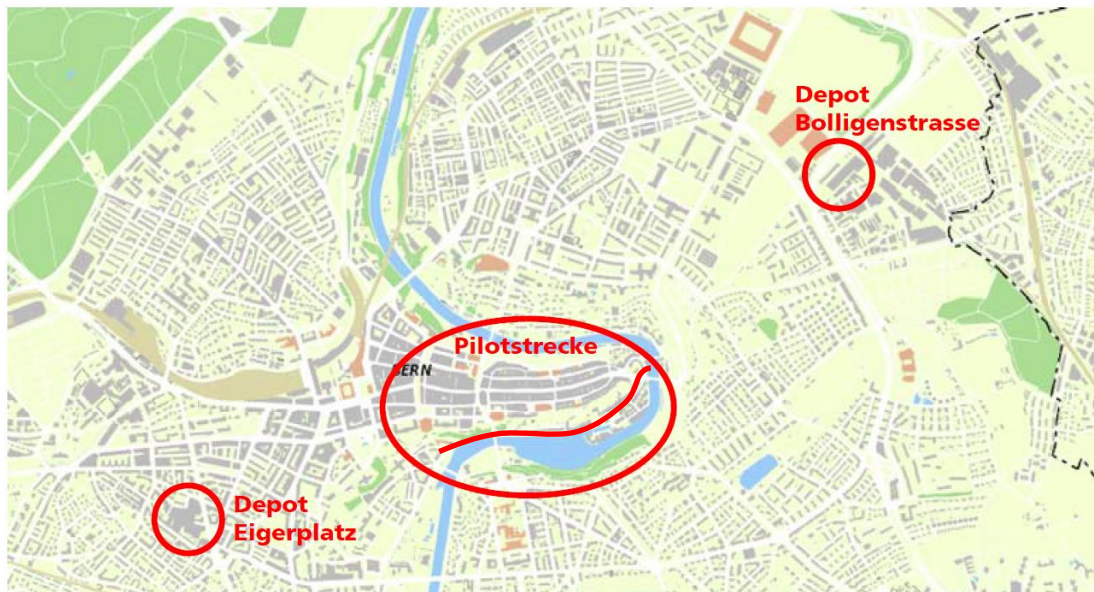


Abbildung 5: Geografische Lage von Pilotstrecke und Depotstandorte in Bern

Da die beiden Depots je ca. 2 km von der Pilotstrecke entfernt sind und über vielbefahrende Hauptachsen führen, muss das SFF für den Transport zwischen diesen Orten verladen werden.

3.2. Pilotstrecke

3.2.1. Auswahl der Pilotstrecke

Nach einer umfassenden Analyse von potentiellen Streckenführungen in der Stadt Bern wurde im Rahmen einer Vorstudie 2017 ein Variantenfächer möglicher Pilotstrecken ausgearbeitet. Aufgrund der Kriterien Fahrbahn, Verkehrsregime, Streckenlänge, Potenzial, Bewilligungsfähigkeit und „weitere Kriterien“ wurde die Strecke zwischen Bärenpark und der Talstation der Marzilibahn als beste Variante bewertet und als Pilotstrecke gewählt (Abbildung 6). Das Anfahren des Mattelifts konnte aufgrund einer Baustelle in den Betriebsmonaten Juli bis Dezember 2019 nicht realisiert werden, stattdessen wurde die Haltestelle Badgasse angefahren (Abbildung 7).

Insbesondere folgende Kriterien waren für die Wahl der Strecke ausschlaggebend:

- Gute Ergänzung und Einbindung in das bestehende ÖV-Angebot
- Geeignete Streckenlänge
- Verkehrsberuhigter Bereich mit geringem Verkehrsaufkommen
- Anbindung an mehrere Points-of-Interest und somit genügend Publikumsverkehr

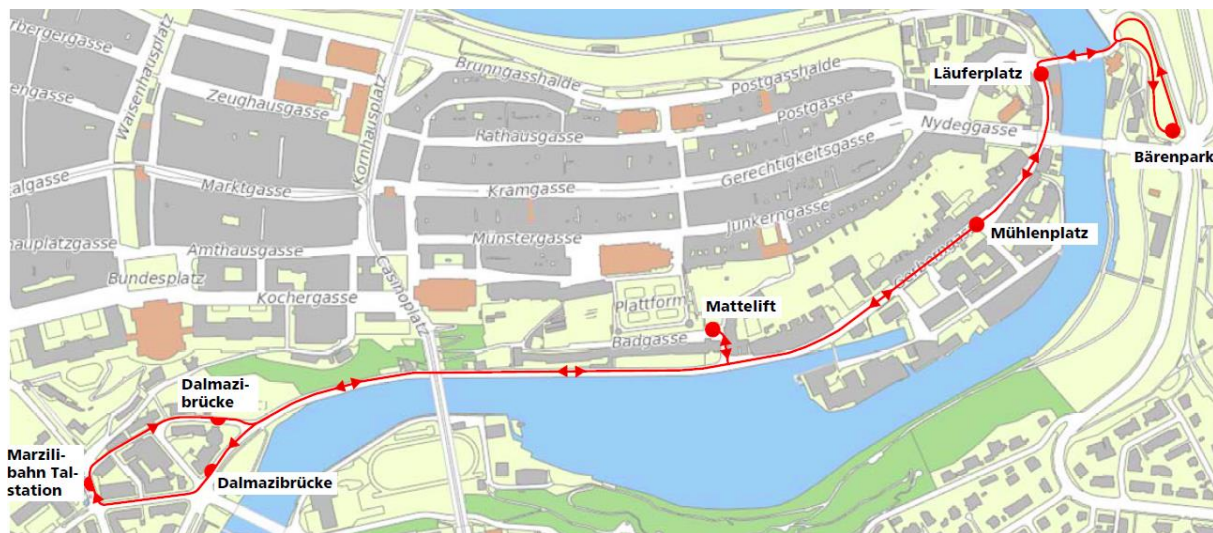


Abbildung 6: geplante Pilotstrecke SFF

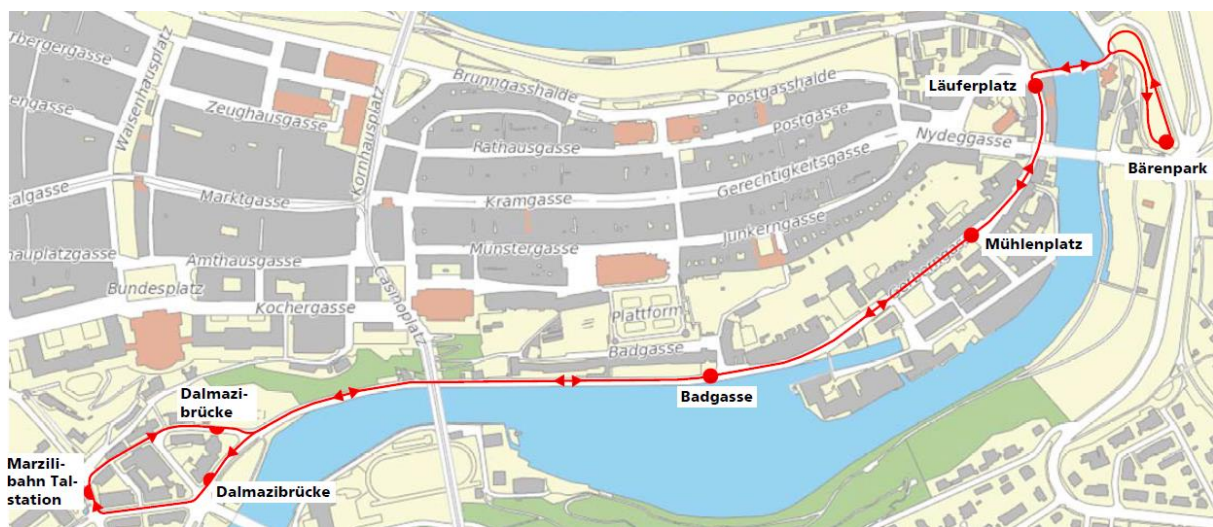


Abbildung 7: Pilotstrecke SFF von Juli bis Dezember 2019

3.2.2. Charakteristika der Pilotstrecke

Länge

Die Streckenlänge zwischen den beiden Endhaltestellen beträgt 1.6 km.

Verlauf

Das westliche Ende der Strecke ist als Schleife durch das Marziliquartier mit der Endhaltestelle „Marzilibahn-Talstation“ ausgestaltet, die Fahrtrichtung richtet sich nach den Einbahnstrassen. An der Marzilibahn-Talstation können Passagiere von der Standseilbahn auf das selbstfahrende Fahrzeug umsteigen und umgekehrt.

Die Strecke verläuft von dort durch die Weihergasse und mündet in die Aarstrasse ein, wo sich die Haltestelle „Dalmazibrücke“ befindet. Sie folgt weiter der Aarstrasse bis zur Einmündung Badgasse und verzweigt dort in die Badgasse zur Haltestelle „Mattelift“, wo ebenfalls ein direkter Übergang zwischen dem Mattelift und dem Shuttle möglich ist. Der weitere Verlauf folgt der Schifflaube bis zum Mühlenplatz mit der gleichnamigen Haltestelle „Mühlenplatz“. Danach folgt die Strecke der Gerbergasse bis zur Haltestelle „Läuferplatz“, biegt dort rechts ab über die Untertorbrücke zum östlichen Ende, das ebenfalls als Schleife über den Parkplatz Klösterlistutz ausgebildet ist, mit der Haltestelle „Bärenpark“ im oberen Teil des Parkplatzes.

Der Parkplatz Klösterlistutz stellt mit seiner Steigung und seinem Gefälle (bis 15%) sowie dem Parkverkehr eine besondere Herausforderung dar.

Streckenprofil

Während der Abschnitt zwischen "Marzilibahn Talstation" und "Läuferplatz" keine signifikanten Steigungen enthält, ist zwischen "Läuferplatz" und "Bärenpark" eine signifikante Steigung von

14% und in der Gegenrichtung ein Gefälle von 15% zu meistern. Die Haltestelle "Bärenpark" selbst liegt in einer 12%-Steigung.

Verkehrsmengen

Die Verkehrsmengen des motorisierten Verkehrs wurden aus den Zählraten des Tiefbauamts von 2017 ermittelt. Die Verkehrsmengen auf der Pilotstrecke liegen zwischen 1010 Fahrzeuge DTVw auf der Aarstrasse und 3610 Fahrzeuge auf der Untertorbrücke. Die Menge auf dem Dalmazikreislauf kann aufgrund der Mengen der Zufahrtachsen Marzistrasse (6960), Dalmazibrücke (5570) und Aarstrasse (1010) auf ca. 6700 Fahrzeuge abgeschätzt werden.

Im Bereich der Pilotstrecke ist mit im städtischen Nahverkehr üblichem Veloverkehr zu rechnen. Insbesondere auf den Strassen zwischen Marzilibahn Talstation und dem Marzilibad ist bei Badewetter mit erheblichem Fussverkehr zu rechnen (bis zu 13'000 Besucher).

Besonderheiten

Die Strecke weist neben der bereits erwähnten Steigung ausserdem zahlreiche einspurige Abschnitte mit Gegenverkehr auf. In der Aarstrasse befinden sich künstliche Engstellen zur Verkehrsberuhigung (Abbildung 8). Weitere Engstellen ergeben sich aus der Anordnung der Parkplätze wie z.B. an der Schiffflaube (Abbildung 9).



Abbildung 8: Künstliche Engstelle in der Aarstrasse, Fahrtrichtung Bärenpark



Abbildung 9: Längsparkplätze im Bereich Schiffflaube, Fahrtrichtung Bärenpark

Weiterhin besteht der Strassenbelag im Bereich der Schiffflaube, der Matteenge (Abbildung 10) und der Untertorbrücke aus Pflastersteinen.



Abbildung 10: Blick vom Läuferplatz in die Matteenge

3.3. Fahrzeug

3.3.1. Auswahl des Fahrzeugs

Das Projekt unter Führung von BERNMOBIL stellt eine Beschaffungsgemeinschaft dar und unterliegt als solche dem öffentlichen Vergaberecht. Es kommen dabei die Bestimmungen des Kantons Bern zur Anwendung, die ab einem Auftragswert von 250'000 CHF eine öffentliche Ausschreibung vorsehen. Da der angenommene Auftragswert für das selbstfahrende Fahrzeug über dieser Grenze liegt, wurde zwischen April und August 2018 das zugehörige Verfahren für die Wahl des Fahrzeuglieferanten durchgeführt.

Die Ausnahmeklausel der Neuartigkeit, die einen Verzicht auf eine Ausschreibung vorsieht, wurde verworfen, da in der Schweiz bereits mehrere selbstfahrende Fahrzeuge beschafft wurden und es mehr als einen Anbieter dieser Technologie gibt.

Die Erstellung der Ausschreibungsunterlagen erfolgte bis Anfang Mai 2018. Dabei wurden, wenn möglich, funktionale Kriterien für die Bewertung definiert, um der Situation der Lieferanten dieser neuen, sich dynamisch entwickelnden Technologie gerecht zu werden. Damit konnten zentrale Zusagen eingefordert werden, ohne den Lösungsweg einzuengen. Beispiele sind einerseits die Zusage der Bewältigung der in der Pilotstrecke vorhandenen Steigung, andererseits die Angabe des Anteils der vom Fahrzeug im automatisierten Modus gefahrenen Betriebsstunden, wobei der höchste Wert die meisten Punkte erhielt.

Die Publikation auf SIMAP erfolgte am 15.05.2018 unter der Nr. 170345. Zum Einreichungstermin am 13.07.2018 gingen 3 Offerten ein, von denen nur eine die in den Ausschreibungsunterlagen genannten Muss-Kriterien erfüllte. Der Vergabeentscheid durch den int. Lenkungsausschuss erfolgte am 08.08.2018, die Publikation auf SIMAP am 18.08.2018.

Die Vergabe erfolgte zugunsten der Firma EasyMile GmbH, Berlin (Tochter der EasyMile SAS, Toulouse), die ihr Fahrzeug EZ10 Gen2 nebst den zugehörigen Dienstleistungen angeboten haben.

Der Werkliefervertrag mit EasyMile umfasst den Kauf eines EZ10 Gen 2 inkl. sämtlicher Nebenkosten sowie die Betriebskosten für ein Jahr. Im Hinblick auf eine Verlängerung des Pilotbetriebs über Juni 2020 hinaus sind weiterhin eine Option auf zwei zusätzliche Fahrzeuge sowie eine Option auf eine Betriebsverlängerung um ein zusätzliches Jahr enthalten.

3.3.2. Merkmale des Fahrzeugs

Das EZ10 Gen2 ist ein automatisierter, elektrisch betriebener Kleinbus mit 8 Plätzen (6 Sitzplätze und 2 zum Anlehnen im Stehen) und einem Stehplatz für eine Begleitperson. Das Fahrzeug ist dabei jederzeit über öffentlichen Mobilfunk mit dem Software-Backendsystem des Herstellers

EasyMile verbunden. Es ist für den Einsatz auf einem fix vordefinierten Streckennetz konzipiert, welches dem Fahrzeug (bzw. dem Backendsystem) in einem Setup-Prozess einprogrammiert wird. Auf nicht einprogrammierten Strecken kann das Fahrzeug nicht eingesetzt werden.

Der Automatisierungs-Level entspricht laut Hersteller EasyMile dem Level 4 (gemäss SAE J3016). Der automatische Betrieb wird von einer Begleitperson überwacht (diese Begleitperson wird in der Sprachregelung von EasyMile „Operator“ genannt). Diese kann jederzeit einen Nothalt auslösen oder mittels einer fahrzeugseitigen Bedienkonsole in den manuellen Modus wechseln. Weiterhin muss sie an vordefinierten Stellen die Weiterfahrt quittieren (z.B. Einfahrt in einen Kreisel). Im manuellen Modus steuert die Begleitperson das Fahrzeug mittels der fahrzeugseitigen Fernsteuerung.

Die primäre Technologie zur Erkennung von Hindernissen sowie zur Orientierung an der Umgebung sind LIDAR-Scanner zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung mittels Laser-Impulsen. Die Hinderniserkennung erfolgt durch eine geschickte Kombination der LIDAR-Sensoren.

Die Orientierung des Fahrzeugs wird durch einen Abgleich der LIDAR-Umgebungsdaten mit der Position aus einem Differential-GPS sowie den Daten von Inertial-Messungen und Odometrie-Messungen sichergestellt.



Abbildung 11: Selbstfahrender Kleinbus EasyMile EZ10 Gen2

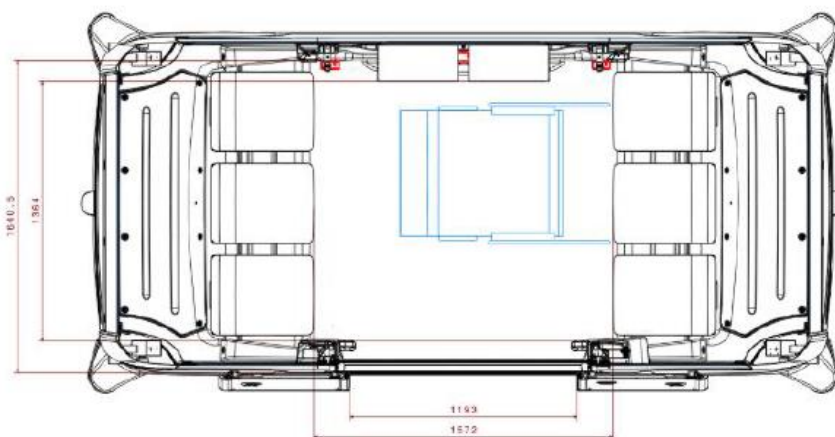


Abbildung 12: EZ10 Sitzplatzanordnung

Das Fahrzeug ist mit einer Akkukapazität von 30 kWh sowie zwei Fahrmotoren zu 8 kW ausgestattet.

Die Abmessungen betragen:

Länge: 4.02 m, Breite: 1.98 m, Höhe inkl. Klimaanlage: 2.87 m

3.3.3. Fähigkeiten des Fahrzeugs

Die wichtigsten Fähigkeiten des Fahrzeugs EZ10 Gen2 mit Softwarestand Voyager 7 (Stand Dezember 2019) werden in nachfolgender Übersicht beschrieben:

Fähigkeit	Beschreibung
Selbstfahrfunktion, Ortung und Orientierung	Das Fahrzeug orientiert sich im Raum v.a. mit Hilfe der auf dem Dach angebrachten 360°-LIDAR-Sensoren. Beim Einrichten der Strecke wird damit eine «Karte» erstellt. Diese Karte enthält die von den LIDAR-Sensoren erkannten Objekte, v.a. Gebäudeflächen und -kanten, Mauern, Pfosten und dergleichen. Ist die Karte einmal vorhanden, wird darauf die genaue Fahrspur geplant. Seitlich des Fahrzeugs wird der sogenannte Sicherheitskorridor festgelegt. Dieser kann entlang der Strecke variieren und bestimmt die maximale Geschwindigkeit (je enger der Korridor, desto kleiner die max. Geschwindigkeit). Wenn das Fahrzeug nun im Automatik-Modus fährt, orientiert es sich wiederum mit den beiden Dach-LIDAR-Sensoren, um die definierte Spur einzuhalten. Es gleicht die Position mit GPS und weiteren Daten aus Odometrie und Inertialmessung ab. Es hält sofort an, wenn es sich nicht mehr zurechtfindet.
Einhaltung des ÖV Betriebsablaufs	Die Abfolge der anzufahrenden Haltestellen wird dem Fahrzeug vom Software-Backendsystem SiteCC zugewiesen.
Einhaltung der Verkehrsregeln	Die Software des Fahrzeugs kennt keine Verkehrsregeln. Vortrittsge- währung wird dem Fahrzeug durch sogenannte Yields einprogram- miert. Yields sind programmierte Stopps, an denen die Begleitperson die Weiterfahrt quittieren muss.
Vermeidung von Kollisionen	Die Kollisionsvermeidung basiert im Wesentlichen auf den LIDAR-Sen- soren. Diese scannen die Umgebung des Fahrzeuges permanent und nehmen feste und bewegliche Hindernisse wahr. Wenn im vordefinierten Sicherheitskorridor ein Hindernis erkannt wird, verzögert das Fahrzeug oder hält bei Unterschreitung der program- mierten Mindestabstandswerte sofort an.
Kommunikation mit der Umgebung	Wird ein Hindernis erkannt, so verlangsamt das Fahrzeug seine Fahrt und bleibt stehen. Beim Bremsen werden die Bremsleuchten aktiviert. In diesem Fall findet keine weitere Kommunikation mit der Umgebung statt. Macht das Fahrzeug, z.B. aufgrund eines plötzlich auftauchenden Hindernisses einen Notstopp, dann kommen Warnblinker und Licht- hupe zum Einsatz.
Kommunikation mit Begleitperson	Als Benutzerschnittstelle zum Fahrzeug stehen der Begleitperson ein Bedienpanel (Operatorpanel) zur Verfügung. Die Begleitperson kann so das Verhalten des Fahrzeuges beeinflussen, bzw. Informationen vom Fahrzeug erhalten.
Eingriff und Über- nahme durch Be- gleitperson	Die Begleitperson (Operator) kann über die Bedienkonsole jederzeit die manuelle Kontrolle übernehmen. Bei grösster Gefahr kann über drei im Fahrzeuginneren verteilte Nothalt-Taster eine Notbremsung ausgelöst werden. Zusätzlich hat die Begleitperson jederzeit die Mög- lichkeit, das Fahrzeug mit einer normalen Betriebsbremsung zum Still- stand zu bringen (SoftStopp). Im Rahmen der Einrichtung der Strecke werden zudem kritische Stellen definiert, an denen das EZ10 in jedem Fall sanft anhält und nur nach Quittierung durch die Begleitperson weiterfährt. Z.B. vor einem Fuss- gängerstreifen. Um einen flüssigen Betrieb zu ermöglichen, kann die Begleitperson die Quittierung bereits beim Annähern an die definier- ten Stellen vornehmen.
Ausweichen bei fes- ten Hindernissen	Das Fahrzeug kann kleineren Hindernissen auf der Fahrspur unter Ide- albedingungen automatisch ausweichen. Diese Hindernisse dürfen nicht mehr als 1 m in den Fahrweg hineinragen und nicht länger als 5 m sein. Die Funktion ist an eine Reihe von Parametern gebunden, die alle erfüllt sein müssen damit eine Umfahrung berechnet werden kann.

	Stimmt einer oder mehrere dieser Parameter nicht, schlägt die Berechnung fehl und das Fahrzeug muss manuell um das Hindernis gefahren werden. Grössere Hindernisse wie z.B. am Strassenrand abgestellte Fahrzeuge müssen in jedem Fall im manuellen Betrieb umfahren werden.
Kommunikation mit der Leitstelle	Das Fahrzeug ist über Mobilfunk mit einem Hintergrundsystem des Herstellers verbunden, welches wiederum über eine gesicherte Netzwerkverbindung und einen Software-Adapter an das Leitstellensystem angebunden ist. Das Fahrzeug kann so bidirektional Daten mit dem Leitstellensystem austauschen.
Entpannung	Das Fahrzeug kann bei Ausfall der automatischen Fahrfunktion manuell über die Bedienkonsole gesteuert werden. Bei Ausfall der Elektrik können die Bremsen gelöst werden und das Fahrzeug mit Hilfe der beiliegenden Abschleppösen auf ein Abschleppfahrzeug verladen werden. Weitere Details finden sich im Wartungskonzept.
Überwachung technischer Parameter	Es findet ein Monitoring statt, welches die Begleitperson sofort informiert, wenn eine vitale Grösse (z.B. Ladestand der Batterie) den zulässigen Schwellenwert über- oder unterschreitet. Die zugehörigen Ereignisse werden auch an das Leitsystem weitergemeldet.
Datenaufzeichnung technischer Parameter	Im Fahrzeug ist ein Restwegschreiber installiert, welcher die relevanten Parameter und Ereignisse permanent aufzeichnet. Auf diese kann nach einem Vorkommnis zugegriffen werden. Einbau und Kalibrierung sind zertifiziert.
Überwachung Umgebung bzw. Innenraum	Die beiden Aussenkameras sowie die Innenkamera ermöglichen es den Leitstellenmitarbeitenden das Geschehen im und um das Fahrzeug herum zu überwachen.
Nothalt-Taster für alle Insassen	Im Fahrzeug befinden sich drei gut zugängliche Nothalttaster, so dass alle Insassen im Fahrzeug einen Nothalt auslösen können, sollten sie eine Gefahr erkennen. Ein ausgelöster Nothalttaster kann nur durch die Begleitperson mit einem Schlüssel wieder arretiert werden. Somit kann die Fahrt bei einem Nothalt ohne Begleitperson nicht fortgesetzt werden. Die Nothalt-Taster werden auch verwendet, um das Fahrzeug gegen unbefugtes Verwenden sowie gegen Wegrollen zu sichern.
Notruffunktion	Die Begleitperson und die Fahrgäste können über die Notruffunktion eine Sprechverbindung mit der Leitstelle aufbauen.

3.3.4. Fahrzeugzulassung

Bezüglich der Anforderungen an die Einzelzulassung konnte das Projekt SFF auf die Erfahrungen der Firmen Amotech sowie RappTrans aufbauen.

Bezüglich der Detailausstattung (wie z.B. Unterlegkeile, Beschriftungsanforderungen) wurden uns von SBB und Mobility freundlicherweise Erfahrungen mit einem EasyMile-Fahrzeug gleichen Typs aus deren Pilotprojekt in Zug bereitgestellt.

Das Fahrzeug EZ10 Gen2 043 wurde am 17.04.2019 vom SVA Bern sowie den Bundesämtern BAV und ASTRA geprüft. Die Einzelzulassung für den Betrieb auf der o.g. Pilotstrecke wurde dann im Rahmen der UVEK Verfügung vom 19.06.2019 erteilt.

Das Fahrzeug von BERNMOBIL ist für den Betrieb mit maximal 8 Fahrgästen (plus die Begleitperson) bei maximal 20 km/h zugelassen.

3.3.5. Betriebsbedingungen

EaysMile hat im Dokument "User Guide Rev A4" die Betriebsbedingungen für einen automatischen Betrieb des EZ10 definiert.

	Safe operation up to heavy or medium snowfall	Snow may slow down or stop the vehicle, impacting service availability.
	Safe operation up to medium (10 mm/h) (0.4 in/h) or heavy rain (> 10 mm/h) (0.4 in/h)	Rain may slow down or stop the vehicle, impacting service availability.
	Water accumulation or flow on the track: • Safe operation up to 10 mm (0.4 in) of water at 20 km/h (12.4 mph) • Safe operation up to 20 mm (0.8 in) of water at 10 km/h (6.2 mph)	Water dispersion may affect components under or around the vehicle.

Abbildung 13: Betriebsbedingungen EZ10 Gen2, "Quelle EasyMile User Guide A4", S. 13

	Ice or snow on the track: • Safe operation up to 1 cm (0.4 in) of snow or ice with studded snow tires • Safe operation up to 1 cm (0.4 in) of snow and no ice with snow tires	Vehicles must be equipped with snow tires when required by local regulation. Slippery ground may cause safety issues and E-Stops due to a loss of friction. The vehicle does not embed ASR, ABS, ESP or any similar traction control system.
	Humidity: Safe operation and storage between 5 % and 95 %	Storage or operation in heavily humid environments may affect some components, impacting service availability.
	Wind: Safe operation up to 50 km/h (31 mph) stabilized, or 65 km/h (40 mph) peak	E-Stops may be triggered due to dust or leaves blown away by the wind, impacting service availability.
	Dust, fog or vapor on the track: Safe operation up to 200 m (3.2 ft) visibility	Low visibility may slow down or stop the vehicle, impacting service availability.
	Temperature in operation: Safe operation from -10°C (14°F) to + 45°C (113°F)	Depending on vehicle usage rate, low or high temperatures during operation may affect the battery pack, which may impact service availability.

Abbildung 14: Betriebsbedingungen EZ10 Gen2, "Quelle EasyMile User Guide A4", S. 14

3.4. Angebot

3.4.1. Angebotskonzept Linie 23

Das Angebot mit dem selbstfahrenden Fahrzeug auf der Pilotstrecke wird als BERNMOBIL Linie 23 betrieben und bietet folgende Anschlüsse an das bestehende Liniennetz:

- Bärenpark – BERNMOBIL Linie 12
- Mattelift/Badgasse – Mattelift (Münsterplattform)
- Talstation Marzilibahn – Marzilibahn (DMB)

Die Linie 23 ist seit 1.7.2019 bis 28.02.2020 von Montag bis Freitag zwischen 9 und 17 Uhr in Betrieb. Ab 2.3.2020 ist eine Anpassung der Betriebszeit geplant.

Der zugehörige Fahrplan beinhaltet stündliche Abfahrten zwischen 9.00 und 16.00 an der Marzilibahn-Talstation und stündliche Abfahrten zwischen 9.30 und 16.30 am Bärenpark (siehe Abbildung 15 und Anhang 10).

Pilotversuch SFF Fahrplan <u>ohne</u> Bedienung Matte-Lift				Reisegeschwindigkeit: 5.5 km/h / 60'-Takt / 8 Kurspaare							
Marzili - Badgasse - Matte - Bärenpark				Montag - Freitag, 60'-Takt ca. 9 - 17 Uhr							
Marzilibahn, Bergstation				alle 3 M inuten							
Marzilibahn, Talstation											
	Distanz (m)	Fahrzeit	Ø km/h								
Marzili				09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
Dalmazbrücke	275	4.2	00:04:12	3.9	09:04	10:04	11:04	12:04	13:04	14:04	15:04
Badgasse	535	4.6	00:04:36	7.0	09:08	10:08	11:08	12:08	13:08	14:08	15:08
Mühlenplatz	270	3.0	00:03:00	5.4	09:11	10:11	11:11	12:11	13:11	14:11	15:11
Läuferplatz	275	3.0	00:03:00	5.5	09:14	10:14	11:14	12:14	13:14	14:14	15:14
Bärenpark	275	2.8	00:02:48	5.9	09:17	10:17	11:17	12:17	13:17	14:17	15:17
	1'630	17.6	00:17:36	5.6							
L12: Bärenpark ab				alle 6 M inuten							
L12: Bern Bahnhof an											
L12: Bärenpark ab				alle 6 M inuten							
L12: Zentrum Paul Klee an											
Bärenpark - Matte - Badgasse - Marzili				Montag - Freitag, 60'-Takt ca. 9 - 17 Uhr							
L12: Zentrum Paul Klee ab				alle 6 M inuten							
L12: Bärenpark an											
L12: Bern Bahnhof ab				alle 6 M inuten							
L12: Bärenpark an											
	Distanz in m	Fahrzeit in s	Ø km/h								
Bärenpark				09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30
Läuferplatz	285	3.5	00:03:30	4.9	09:33	10:33	11:33	12:33	13:33	14:33	15:33
Mühlenplatz	290	3.0	00:03:00	4.4	09:36	10:36	11:36	12:36	13:36	14:36	15:36
Badgasse	360	3.3	00:03:18	6.5	09:39	10:39	11:39	12:39	13:39	14:39	15:39
Dalmazbrücke	605	5.0	00:05:00	7.3	09:44	10:44	11:44	12:44	13:44	14:44	15:44
Marzili	190	3.2	00:03:12	3.6	09:48	10:48	11:48	12:48	13:48	14:48	15:48
	1'659	18.0	00:18:00	5.5							
Marzilibahn, Talstation				alle 3 M inuten							
Marzilibahn, Bergstation											

Abbildung 15: Fahrplan Linie 23 ab 1.7.2019 bis 28.02.2020

3.4.2. Fahrgastinformation

Die Informationen zum Fahrplan und den Betriebszustand der Linie 23 werden über die regulären BERNMOBIL-Kanäle publiziert. Dazu gehören:

- Aushänge an den (provisorischen) Haltestellen der Linie 23
- Digitale Anzeigen auf elektronischen Abfahrtstafeln an der Haltestelle Bärenpark und Marzilibahn-Talstation
- Online auf www.bernmobil.ch sowie in der ÖV-Plus App
- Online verfügbar auf Fahrplanauskünften anderer TU, z.B. SBB.

Das Fahrzeug verfügt über ein Innendisplay, auf dem die Linie sowie die Haltestellen vom Easy-Mile-System angezeigt werden. Ein Teil des Displays kann mit BERNMOBIL-Informationen bespielt werden.

Ein elektronisches Aussendisplay ist Stand Januar 2020 am EZ10 nicht vorhanden. Stattdessen wurden provisorische Schilder mit Liniennummer und Fahrziel hinter Front- und Rückscheibe platziert.

3.4.3. Keine PBG Pflichten

Da das EasyMile Fahrzeug EZ10 nur 8 Plätze aufweist, ist für den Betrieb keine ÖV-Konzession gemäss PBG erforderlich, sondern nur eine Bewilligung des AÖV des Kantons Bern und die diesbezügliche Zustimmung des BAV. Der Betrieb der Linie 23 erfolgt daher ohne die PBG-Pflichten, d.h. insbesondere keine Tarif-, Betriebs- und Fahrplanpflicht.

Für die Mitfahrt im selbstfahrenden Fahrzeug verlangt BERNMOBIL kein Ticket (gratis), dies vor allem aus den folgenden drei Gründen:

1. Der Betrieb kann nicht garantiert werden (siehe auch Aussage zu PBG-Pflichten).
2. Es sollen möglichst viele Leute zur Mitfahrt animiert werden.
3. Die Kosten für die Installation von provisorischen Ticketautomaten und Einbindung in den Libero-Tarifverbund übersteigen die potenziellen Einnahmen deutlich.

Die Bereitstellung der Fahrzeiten erfolgt mit einem Hinweis ("Disclaimer"), dass der Betrieb nicht gewährleistet ist (s. Abbildung 16).

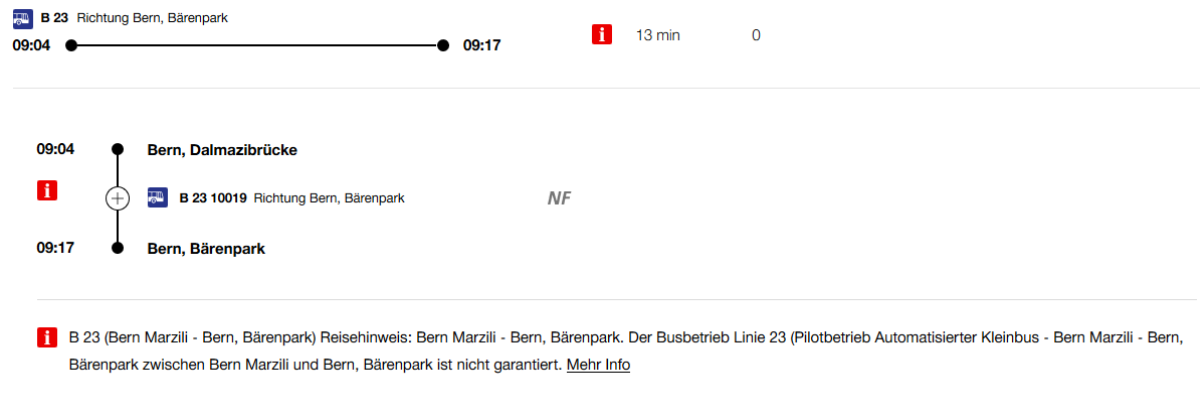


Abbildung 16: Fahrplanauskunft sbb.ch für den 23.1.2020

3.5. Einbindung Betriebsorganisation BERNMOBIL

3.5.1. Teilprojekt Pilotbetrieb

Das Teilprojekt Pilotbetrieb organisiert den Einsatz des SFF gemäss Fahrplan. Weiterhin gehört die Störungsanalyse und -behebung und damit der Kontakt zur EasyMile Serviceorganisation zum Aufgabengebiet. Dazu wurden zwei Personen bei BERNMOBIL zum EasyMile "Chief Operator" ausgebildet.

Eine Person besitzt zusätzlich die Qualifikation als EasyMile "Training Officer", welcher die Ausbildung zum "Operator" durchführen darf.

3.5.2. Organisatorische Einbindung

Im Hinblick auf das Ziel des Erfahrungsgewinns mit der Automatisierungstechnologie erfolgt der Betrieb soweit möglich gemäss den BERNMOBIL Standardprozessen.

Als Begleitpersonen (Operator) auf dem selbstfahrenden Fahrzeug kommt überwiegend Fahrpersonal von BERNMOBIL zum Einsatz, welches diese Tätigkeit als befristete Zusatzfunktion im Umfang von 10-20% neben den normalen Fahrdiensten durchführt. Weitere Begleitpersonen stammen aus anderen Unternehmensbereichen von BERNMOBIL. Ausserdem wurde ein wöchentlicher Betriebstag von Juli – November 2019 von Mitarbeitenden der Basler Verkehrsbetriebe (BVB) übernommen.

Für die Einsätze wurden SFF-Dienste konzipiert, die einerseits den Vorgaben von EasyMile bezüglich maximaler Einsatzzeit genügen, andererseits die Anforderungen des AZG erfüllen und zudem mit anderen Dienstteilen kombinierbar sind.

Die Dienstplanung für die SFF-Dienste erfolgt durch die Abteilung Produktionsplanung in Abstimmung mit dem Teilprojekt Pilotbetrieb.

Für den Betrieb der Linie 23 kommen wo immer möglich die Standard Kommunikationswege von BERNMOBIL zur Anwendung.

Im Tagesbetrieb ist die erste Ansprechstelle für die Begleitperson auf dem SFF immer die Leitstelle, wo eine Verkehrsdisponentin bzw. ein Verkehrsdisponent die nötigen Massnahmen initiiert und das Projekt SFF über relevante Ereignisse informiert. Zu den Massnahmen gehören je nach Situation das Aufbieten des Serviceteams, des Unfalldienstes, das Alarmieren der Blaulichtorganisationen, in jedem Fall aber das Aufschalten der Fahrgastinformationen. Zusätzlich wurde eine Telefon-Hotline eingerichtet, die während den Betriebszeiten der Linie 23 besetzt ist und an welche sich in erster Linie die Leitstelle aber auch die Begleitperson wenden kann.

Planbare Abweichungen der Linie 23 vom Normalbetrieb (z.B. Baustellen oder Anlässe, aber auch längere Fahrzeugausfälle) werden zwischen den Abteilungen "Sonderanlass", "Marketing" sowie "Unternehmenskommunikation" einerseits und dem Projekt SFF abgestimmt.

Bei der Projektkommunikation an die Begleitpersonen werden verbindliche Betriebsanweisungen über das BERNMOBIL-Weisungstool kommuniziert.

3.5.3. Technische Einbindung

Für die technische Anbindung des SFF an das Leitstellensystem wurden von AMoTech und BERNMOBIL die folgenden 11 inhaltlichen Pakete definiert, die schrittweise realisiert werden sollen:

Paket 1: Bewegungsverfolgung (Motion Tracking)	Sichtbarkeit der Position des Fahrzeugs im Leitstellensystem
Paket 2: Versionierung (Configuration Information)	Darstellung der aktiven Software Versionen pro Fahrzeug
Paket 3: Fahrzeugzustand (Status Information)	Darstellung des Fahrzeugzustands im Leitstellensystem
Paket 4: Ereignisse (Events)	Meldung von Fahrzeugereignissen im Leitstellensystem
Paket 5: Manifest (Manifest)	Übermittlung von Fahraufträgen (Linie, Haltestelle) an das Fahrzeug
Paket 6: Videoüberwachung (Video Surveillance)	Darstellung der Videosignale des Fahrzeugs im Leitstellensystem
Paket 7: Notfallkommunikation (Emergency Intercom)	Direkte Verbindung zwischen der Notrufstelle im Fahrzeug und dem Telefonsystem auf der Leitstelle
Paket 8: Beschallung (Public Address)	Übermittlung von Durchsagen der Leitstelle in das Fahrzeug
Paket 9: Aussendisplay (Exterior Display)	Darstellung der aktuellen Linien-Nummer und des Fahrziels auf einem Aussendisplay
Paket 10: Innendisplay (Interior Display)	Darstellung des Linienvorlaufs (Perlschnur) und der nächsten Haltestelle auf einem Innendisplay
Paket 11: Fernsteuerung (Remote Control)	Auslösen von vordefinierten Fahrmanövern des Fahrzeugs durch die Leitstelle

Für das erste Betriebsjahr von Juli 2019 bis Juni 2020 ist die Realisierung der Pakete 1 bis 5 vorgesehen.

Voraussetzung für die Anzeige des SFF im Leitstellensystem ist, dass der Fahrzeughersteller die benötigten Daten aus seinem Backend-System auf einer Schnittstelle bereitstellt. Daher wurde seitens BERNMOBIL die Bereitstellung dieser Daten als Anforderung im Lastenheft der Ausschreibungsunterlagen definiert. EasyMile hat dies zugesagt.

Für die technische Anbindung hat die Firma AMoTech eine Software-Lösung namens AVOC konzipiert (siehe [2]), die einerseits mit dem Backend-System von EasyMile kommuniziert, andererseits mit dem Leitstellensystem LIO (s. Abbildung 17).

Nicht alle im ÖV-Betrieb erforderlichen Funktionalitäten werden vom EasyMile Fahrzeug und Backend-System geboten. So gibt es keine Möglichkeit, dass sich eine Begleitperson am Fahrzeug oder Backend-System anmelden kann. Auch eine für die Darstellung im LIO nötige Anmeldung des Fahrzeugs auf einem Linie-Kurs-Paar ist nicht möglich.

Für diese Funktionalität kommt die "AVOC Attendant Web Application" (kurz AVOC App) von AMoTech zum Einsatz, die auf einem separat eingebauten Display im Fahrzeug verfügbar gemacht wurde.

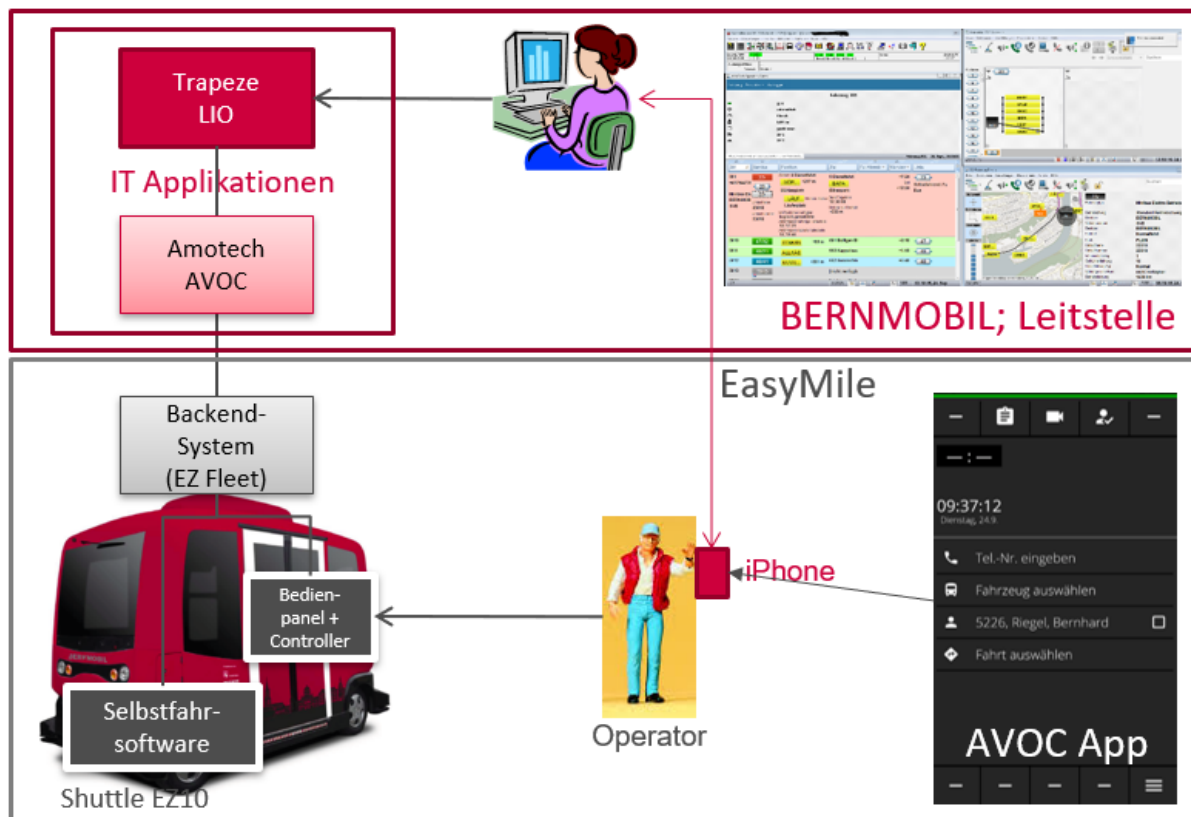


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Leitstellenanbindung

4. Projekterfahrung bis Inbetriebnahme SFF

4.1. Fahrzeugbeschaffung

Rückblickend hat sich der Aufwand für das Ausschreibungsverfahren aus verschiedenen Gründen gelohnt:

- Die Erstellung der Ausschreibungsunterlagen erforderte eine intensive Diskussion, was von den verfügbaren automatisierten Fahrzeugen und von den zugehörigen Herstellern wirklich erwartet werden kann und muss.
- Die Anforderungen von BERNMOBIL konnten klar definiert werden, insbesondere hinsichtlich der Bewältigung der Pilotstrecke, deren Beschreibung den Ausschreibungsunterlagen beilag.
- Bereits anhand der Qualität der eingereichten Offert-Unterlagen sowie der nachfolgenden Kommunikation konnte sich BERNMOBIL ein gutes Bild von der Arbeitsweise der Hersteller machen.

4.2. Vorbereitung der Pilotstrecke

Die gewählte Pilotstrecke wurde initial von EasyMile mit einem SiteAssessment beurteilt. Der zugehörige SiteAssessmentReport enthielt generische Empfehlungen zu Anpassungen im Strassenraum. Nicht alle konnten im realpolitischen Stadtkontext umgesetzt werden, da sowohl die Anliegen der Anwohnenden wie auch der städtischen Ämter zu beachten waren.

Zudem liegt ein Teil der Strecke im UNESCO-Perimeter Weltkulturerbe Berner Altstadt. Somit war sowohl der Einsatz einer temporären LSA im Bereich Läuferplatz wie auch das Aufstellen von solarbetriebenen elektronischen Haltestellenanzeigen nicht möglich.

Es wurden folgende temporäre Massnahmen entlang der Strecke umgesetzt:

- Montage von Warntafeln "autonome Fahrzeuge" an den Zufahrtsstrecken
- Montage von Orientierungstafeln für das SFF entlang der Aarstrasse
- Entfernen eines Betonpollers sowie Kürzen einer Blende im Bereich der Haltestelle Marzilibahn-Talstation
- Aufhebung je zweier Parkplätze für die Haltestelle Mühlenplatz, Fahrtrichtung Bärenpark, sowie für die Haltestelle Bärenpark.



Abbildung 18: EZ10 in der Aarstrasse, links eine Orientierungstafel für die auf dem Dach montierten LIDAR-Sensoren (Mai 2019)

In Fahrtrichtung Marzili nutzt die Linie 23 die bestehenden Haltestellen der Linie 30. An allen anderen Haltestellen der Linie 23 wurden mobile Haltestellen-Tafeln aufgestellt. An der Haltestelle Marzilibahn-Talstation wurde zudem ein elektronisches Display mit den Abfahrtszeiten eingerichtet. An der Haltestelle Bärenpark wird die DFI-Anzeige der Linie 12, Fahrtrichtung Bahnhof, mitgenutzt.

Eine Herausforderung war, eine Abstellmöglichkeit für das 2.90 m hohe Fahrzeug in unmittelbarer Nähe zur Pilotstrecke zu finden. Hier konnte in der Wasserwerksgasse 31 eine sehr gut geeignete Möglichkeit gefunden werden.

4.3. Ausnahmegesuch Bundesämter

Durch eine frühzeitige Kontaktaufnahme mit den zuständigen Ansprechpartnern der Bundesämter ASTRA, BAV und BAKOM konnte BERNMOBIL den Ablauf des Gesuchs- und Bewilligungsverfahrens richtig einschätzen.

Bewährt hat sich ein übergeordnetes Gesuchdokument mit themenspezifischen Anhängen. So konnte z.B. der Streckenbeschrieb der Pilotstrecke bereits vorgängig zum Fahrzeug-Zulassungsverfahren für eine erste Beurteilung eingereicht werden.

Insgesamt war die Zusammenarbeit mit den beteiligten Bundesämtern unter der Federführung von Benno Nager, ASTRA, sehr konstruktiv und zielorientiert.

4.4. Vorbereitung Betrieb SFF

Das Testgelände im BERNMOBIL Depot Bolligenstrasse ist im Gesuch ausführlich beschrieben und daher nicht Gegenstand dieses Berichts. Auf dem Testgelände wurde ein Testparcours programmiert.

Als Reparaturstandort hat sich das BERNMOBIL Depot Eigerplatz mit der dortigen Buswerkstatt als beste Möglichkeit etabliert. Mit der Firma Gerber AG konnte eine Vereinbarung über die Transporte des EZ10 zwischen den Standorten getroffen werden.

Für die Abnahme des Fahrzeugs wurden Testfälle in Form eines Fahrmanöver-Katalogs definiert, um das Verhalten des Fahrzeugs in diesen Fällen zu verifizieren. Weiterhin wurde das Lastenheft der Ausschreibung für die Abnahme herangezogen.

Im Verlauf der Abnahmetests des EZ10 wurden mehrere Optimierungsaspekte identifiziert und an EasyMile über deren Ticketsystem zurückgemeldet.

Für den Abnahmeprozess von Software-Updates wurde folgendes Vorgehen definiert:

- EasyMile stellt BERNMOBIL mind. 2 Wochen vor einem Software-Update einen Release-Letter mit allen relevanten Informationen zu. Dazu gehören neben Neuerungen auch Änderungen an bestehenden Funktionen.
- BERNMOBIL prüft den Release-Letter und bestätigt dann die Durchführung des Updates
- BERNMOBIL aktualisiert ggf. die Testfälle aufgrund der Informationen im Release-Letter.
- Für das Update wird das Fahrzeug von der Pilotstrecke auf das Testgelände gebracht.
- Anschliessend wird das Update im Testgelände aufgespielt und anhand der Testfälle geprüft.
- Danach erfolgten der Transport des Fahrzeugs auf die Pilotstrecke, das Update der Streckenkonfiguration und die Testfahrten auf der Pilotstrecke

Die initiale Programmierung der Pilotstrecke erfolgte im Mai 2019 noch ohne die Zulassung des Fahrzeugs. Daher musste das Fahrzeug durch eine Security-Firma in einer sogenannten Polizeiblaue begleitet werden (Abbildung 19).



Abbildung 19: Programmierung der Pilotstrecke mit Geleitschutz durch Security-Personal (Mai 2019)

EasyMile nimmt die Streckenprogrammierung (Setup) sehr sicherheitsbewusst und risikominimierend vor. Zunächst wird die Strecke manuell mit maximal 5 km/h abgefahren und dabei die Umgebung als 3D-Karte aufgenommen. Anschliessend wird auf dieser Kartenbasis eine Trajektorie definiert, auf der das Fahrzeug fahren wird. Diese wird dann in mehreren Iterationen optimiert, u.a. bezüglich der seitlichen Sicherheitsabstände, der programmierten Stopps (Yield), der genauen Positionen der Haltestellen etc. Zuletzt wird wo möglich die Geschwindigkeit erhöht. Als maximale Geschwindigkeit wurde in einem kurzen Bereich der Aarstrasse 13 km/h programmiert, auf den übrigen Streckenabschnitten beträgt die programmierte Geschwindigkeit zwischen 5 und 11 km/h.

Die programmierten Trajektorien werden in der EasyMile Software "SiteCC" dargestellt (Abbildung 20).



Abbildung 20: Darstellung der Pilotstrecke im EasyMile SiteCC (Zustand 15.07.2019)

5. Betriebserfahrungen SFF – 6 Monate

5.1. Betriebsdaten Juli 2019 bis Dezember 2019

Betriebstage

Als Betriebstage waren ab 1. Juli jeweils Montag bis Freitag geplant. Zwischen dem 23.12. und 31.12.2019 war kein Betrieb geplant.

Von den vorgesehenen Betriebstagen konnte der Betrieb des SFF nicht an allen Tagen tatsächlich durchgeführt werden.

Geplante Unterbrüche sind auf das Einspielen von Updates im Juli und Dezember, Ausbildungsfahrten im September und auf die Jahreswartung Ende November zurückzuführen. Da nur ein Fahrzeug für den Betrieb zur Verfügung steht, konnten an diesen Tagen keine regulären Fahrpläne angeboten werden.

Weiterhin kam es zu längeren ungeplanten Unterbrüchen, die überwiegend auf Fahrzeugstörungen zurückzuführen sind.

Nachfolgende Abbildung 21 zeigt, dass im Juli und September gute und im Oktober und November sehr gute Verfügbarkeitswerte erzielt werden konnten. Dagegen gab es im August grössere Probleme mit dem Fahrzeug und nochmals signifikante Ausfälle im Dezember.

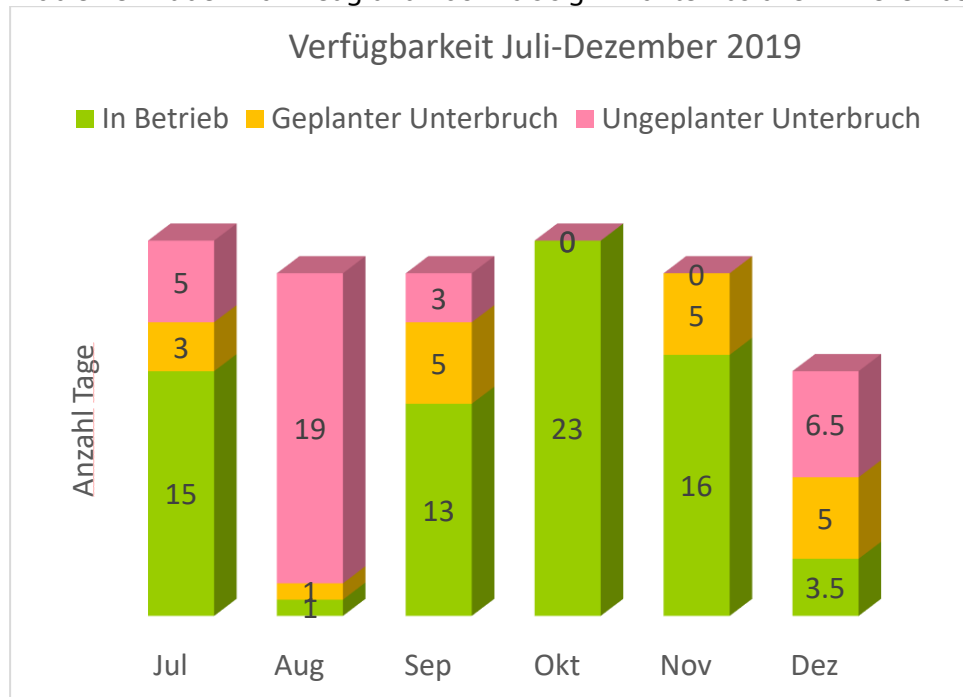


Abbildung 21: Verfügbarkeit des Fahrzeugs EZ10

Fahrgastzahlen und km-Leistung

Die Fahrgastzahlen wurden durch die Begleitpersonen ermittelt. Bis August erfolgte dies über einen Handzähler, ab September über ein elektronisches Erfassungstool (siehe Kap. 5.9). Ebenso wurden die km-Leistungen bis August durch die Begleitpersonen vom Operator-Panel abgelesen und manuell in den Tagesrapport eingetragen, ab September wurden diese aus den Werten der EasyMile-Schnittstelle ermittelt (siehe Kap. 5.9).

Die Werte für August und Dezember sind nicht aussagekräftig, da ihnen nur sehr wenige Fahrten mit Fahrgastmitnahme zugrunde liegen.

Die Fahrgastzahlen nach dem Start im Juli waren mit 53 Fahrgästen pro Betriebstag erfreulich hoch. Ab September bis November wurden zwischen 23 und 32 Fahrgäste pro Betriebstag ermittelt.

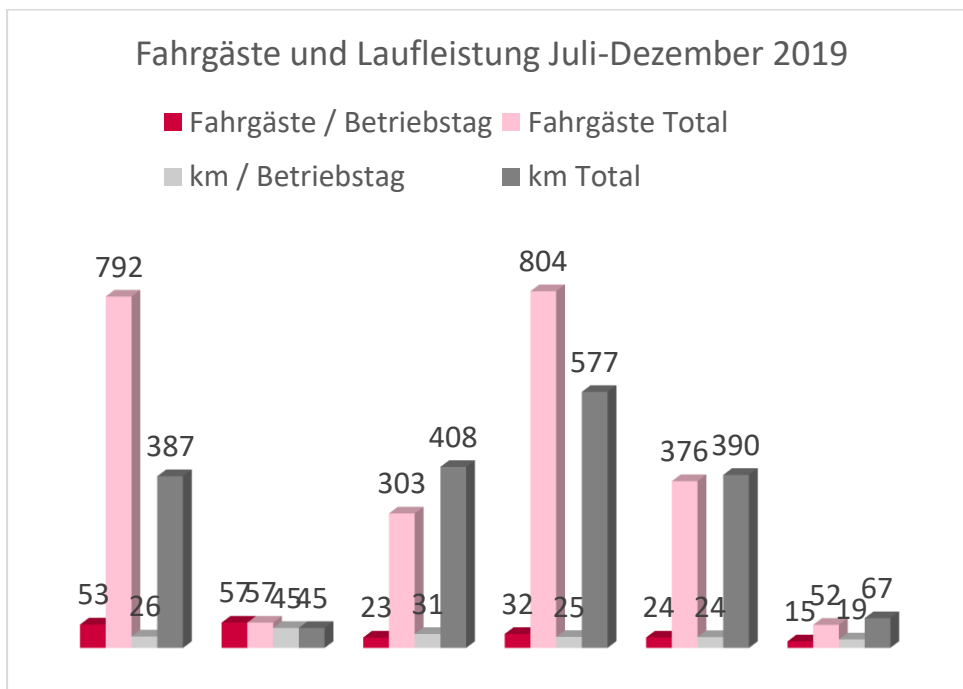


Abbildung 22: Fahrgastzahlen und Laufleistung im Betrachtungszeitraum

Fahrzeugdaten

Die Ist-Daten der Fahrten werden seit 11.09.2019 ebenfalls in einer Datenbank gespeichert und können ausgewertet werden. Die Werte werden einerseits von der Schnittstelle des Herstellers EasyMile geliefert, andererseits vom Fahrpersonal über ein Erfassungstool eingegeben (siehe Kap. 5.9).

Aus der Geschwindigkeit wurde die Durchschnittsgeschwindigkeit pro Betriebstag berechnet, welche relativ konstant bei ca. 6 km/h lag. Der tiefe Wert am 29.11. bezieht sich nicht auf einen Betriebstag, sondern auf eine Testfahrt, vom 16.-20.09. fand eine Ausbildung statt.

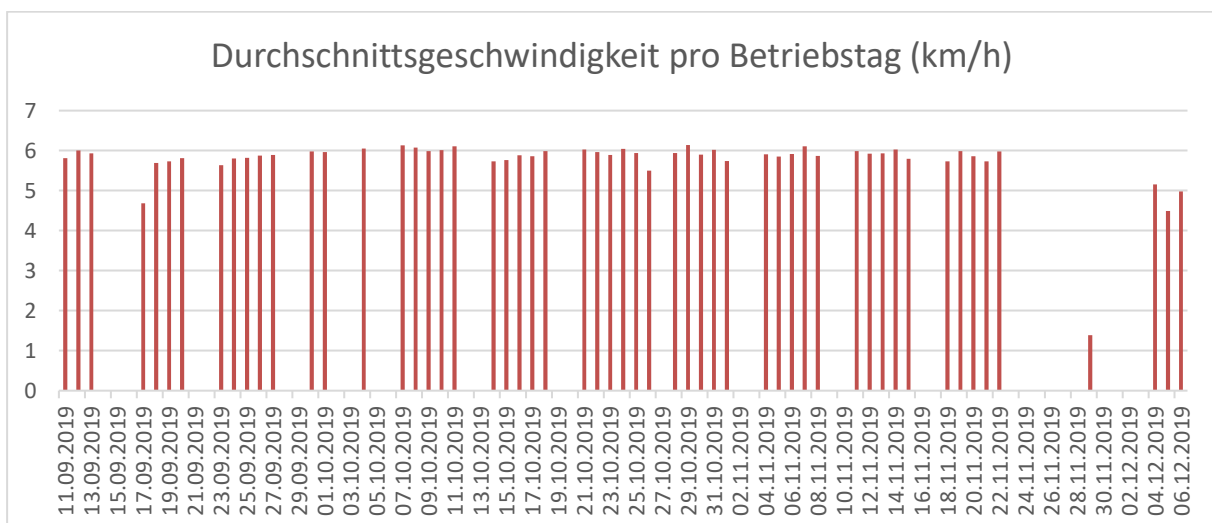


Abbildung 23: Durchschnittsgeschwindigkeit des EZ10

Nachfolgende Abbildung 24 zeigt eine erste Auswertung der Zahl der sogenannten Störhalte pro Betriebstag im Zeitraum September bis November 2019. Als Störhalt werden sowohl die Notstopps des Fahrzeugs gezählt, wie auch Eingriffe des Operators (manueller Betrieb oder längeres Abwarten).

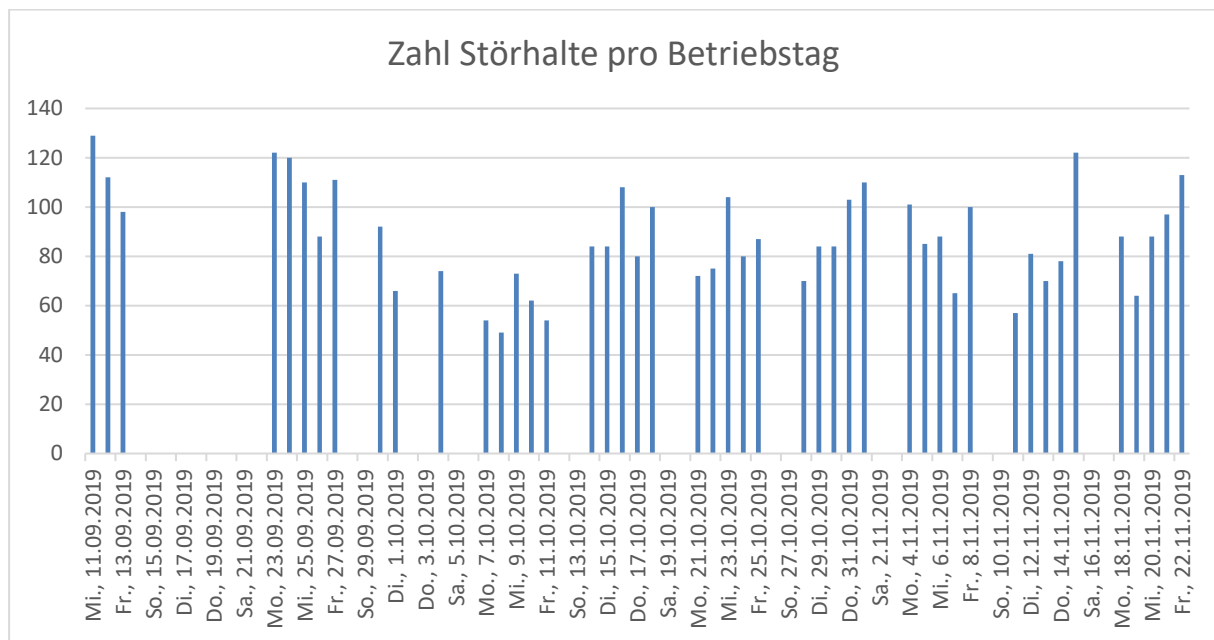


Abbildung 24: Zahl der Störhalte pro Betriebstag EZ10

Seit Oktober 2019 stehen auf der Schnittstelle von EasyMile die Nothalte des Fahrzeugs mit einer Zuordnung zu einem Grund zur Verfügung. Es gibt 5 Kategorien:

- Obstacle – Nothalt ausgelöst durch Hindernis
- Emergency – Begleitperson oder Fahrgast hat einen Nothaltknopf gedrückt oder das Fahrzeug veranlasst aufgrund nicht zulässiger Situationen einen Notstopp
- Software – Nothalt auf ein Software-Problem zurückzuführen
- Hardware – Nothalt auf ein Hardware-Problem zurückzuführen
- Unknown – Ursache unbekannt

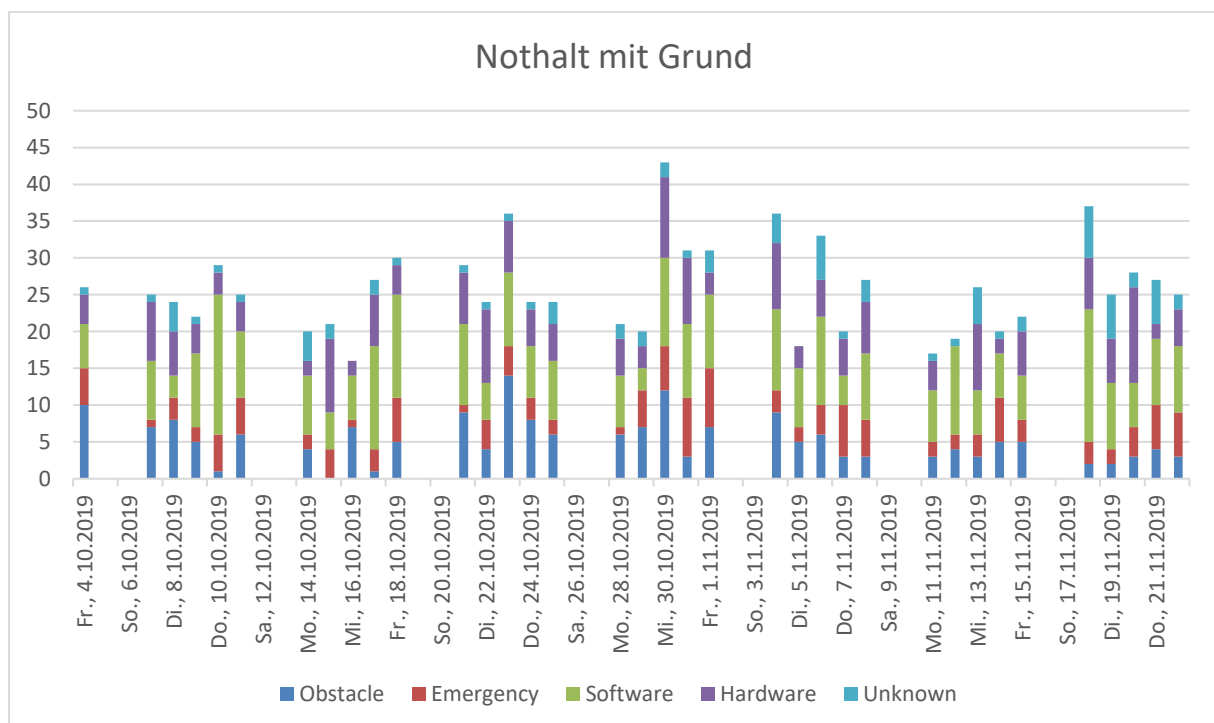


Abbildung 25: Verteilung der Nothalt-Kategorien im Oktober und November 2019

In Abbildung 25 ist die Verteilung der Nothalt-Kategorien an den beobachteten Betriebstagen dargestellt. In dieser Auswertung wird nicht zwischen manuellem und automatischem Betrieb unterschieden. Unter anderem tritt der Grund "Emergency" auch im manuellen Betrieb auf und wird z.B. ausgelöst, wenn der Operator bei stark eingeschlagenen Rädern zu schnell beschleunigt.

5.2. Besondere Ereignisse Juli 2019 bis Dezember 2019

Farbcodierung der Tabelle:

- Unfall
- Technische Störung
- Geplante Massnahme
- Kritische Betriebsbedingung

3.-5. Juli 2019	Fahrzeug verliert Lokalisierung und stoppt
Beschreibung:	Häufige Notstopps aufgrund fehlender Lokalisierung
Folge:	Ungeplanter Betriebsunterbruch ca. 3 Tage
Massnahme:	Ersatz des Navigations PC durch EasyMile
15.-16. Juli 2019	Streifkollision PW mit Sensorabdeckung des stehenden SFF
Beschreibung:	Streifkollision PW mit stehendem SFF Schuld klar bei Unfallgegner; Standard Schadensbearbeitung über BERNMOBIL-Unfalldienst; Sensorabdeckung vorne links beschädigt.
Folge:	Ungeplanter Betriebsunterbruch ca. 1.5 Tage
Massnahme:	Sensorabdeckung geklebt; Funktionalität des Safety-Lidar vorne-links mit EasyMile am 16.07. getestet: OK von EasyMile für Betriebsfortsetzung; Sensorabdeckung am 22.07. ersetzt
24.-26. Juli 2019	Update Streckenprogrammierung durch EasyMile
Beschreibung:	Anpassung der Trajektorie an einen versetzten Betonpoller im Bereich Aarstrasse 62 sowie Verbesserungen nach 3 Wochen Betriebserfahrung
Folge:	Geplanter Betriebsunterbruch 3 Tage
Massnahme:	Keine
5.-14. August 2019	Ausfall einer Antriebseinheit
Beschreibung:	Unkorrektes Verhalten in der Steigung: Fahrzeug kann nicht anfahren (rollt kurz zurück und löst dann Emergency Stop aus). Ebenso rollt es bergab schneller als programmiert, was wiederum einen Emergency Stop auslöst. Analyse zeigt den Ausfall einer der beiden Antriebseinheiten.
Folge:	ungeplanter Betriebsunterbruch 7 Tage
Massnahme:	14.8. Tausch und Update des RearTractionController
14.-28. August 2019	Getriebeschaden
Beschreibung:	Getriebeschaden am vorderen Differential
Folge:	ungeplanter Betriebsunterbruch 11 Tage
Massnahme:	(1) EasyMile ersetzt Getriebe am 28.8. (2) BERNMOBIL vermutet, dass die hohe Belastung durch die nicht ganz korrekt arbeitende Steuerung beim Anfahren in der Steigung in Kombination mit einem fehlerhaft produziertem Teil zu dem Schaden geführt hat. => Massnahme BERNMOBIL: kein Betrieb auf dem Teil Klösterlistutz 15%: Kurzwende am unteren Teil des Parkplatzes, bis EasyMile das problemlose Anfahren nachweisen kann (geplant für Update November)
29. August – 4. September 2019	Problem mit Fernsteuerung
Beschreibung:	Fernsteuerung verliert Kontakt zu Fahrzeug; Fahrzeug stoppt
Folge:	ungeplanter Betriebsunterbruch 4.5 Tage
Massnahme:	EasyMile ersetzt Fernsteuerung
16.-20. September 2019	Ausbildung von weiteren Operatoren
Beschreibung:	Ausbildung von mehreren weiteren Operatoren für den Einsatz auf dem SFF
Folge:	Geplanter Betriebsunterbruch 5 Tage
Massnahme:	Kundeninformation
15. Oktober 2019	Starke Regenschauer ab ca. 14 Uhr
Beschreibung:	Häufige Notstopps
Folge:	Kein sicherer Betrieb mehr möglich

Massnahme:	Vorzeitiges Beenden des Tagesbetriebs + Kundeninformation
25. – 29. November 2019	Jährliche präventive Wartung des Fahrzeugs durch EasyMile
Beschreibung:	Durchführung der geplanten Wartungsarbeiten
Folge:	Geplanter Betriebsunterbruch 5 Tage
Massnahme:	Kundeninformation
2.-6. Dezember 2019	Update Fahrzeug und Strecke
Beschreibung:	Einspielen der Software Version "Voyager 7" durch EasyMile und Anpassung der Streckenprogrammierung im Hinblick auf die neue Funktionalität "Hindernisumfahrung"
Folge:	Geplanter Betriebsunterbruch 5 Tage
Massnahme:	Kundeninformation
11.-13. Dezember 2019	Feststellbremse löst sich nicht
Beschreibung:	Fahrzeug fährt auch manuell nicht, weil eine Feststellbremse sich nicht lösen lässt.
Folge:	ungeplanter Betriebsunterbruch 3 Tage
Massnahme:	Reparatur durch BERNMOBIL (siehe Kap. 7.1) + Kundeninformation
17. Dezember 2019 – 16. Januar 2020	Extrem viele unnötige Notstopps / CAN-Bus Controller
Beschreibung:	signifikant zu hohe Zahl von unnötigen EmergencyStopps, bis zu 10 Stopps in 30min.
Folge:	ungeplanter Betriebsunterbruch 3 Tage im Dezember 2019 (sowie weiterer im Januar 2020 aufgrund Folgeproblem)
Massnahme:	23.12.2019: Update eingespielt, Folge CAN-Bus-Controller muss getauscht werden 13.01.2020: Einbau neuer CAN-Bus Controller Kundeninformation

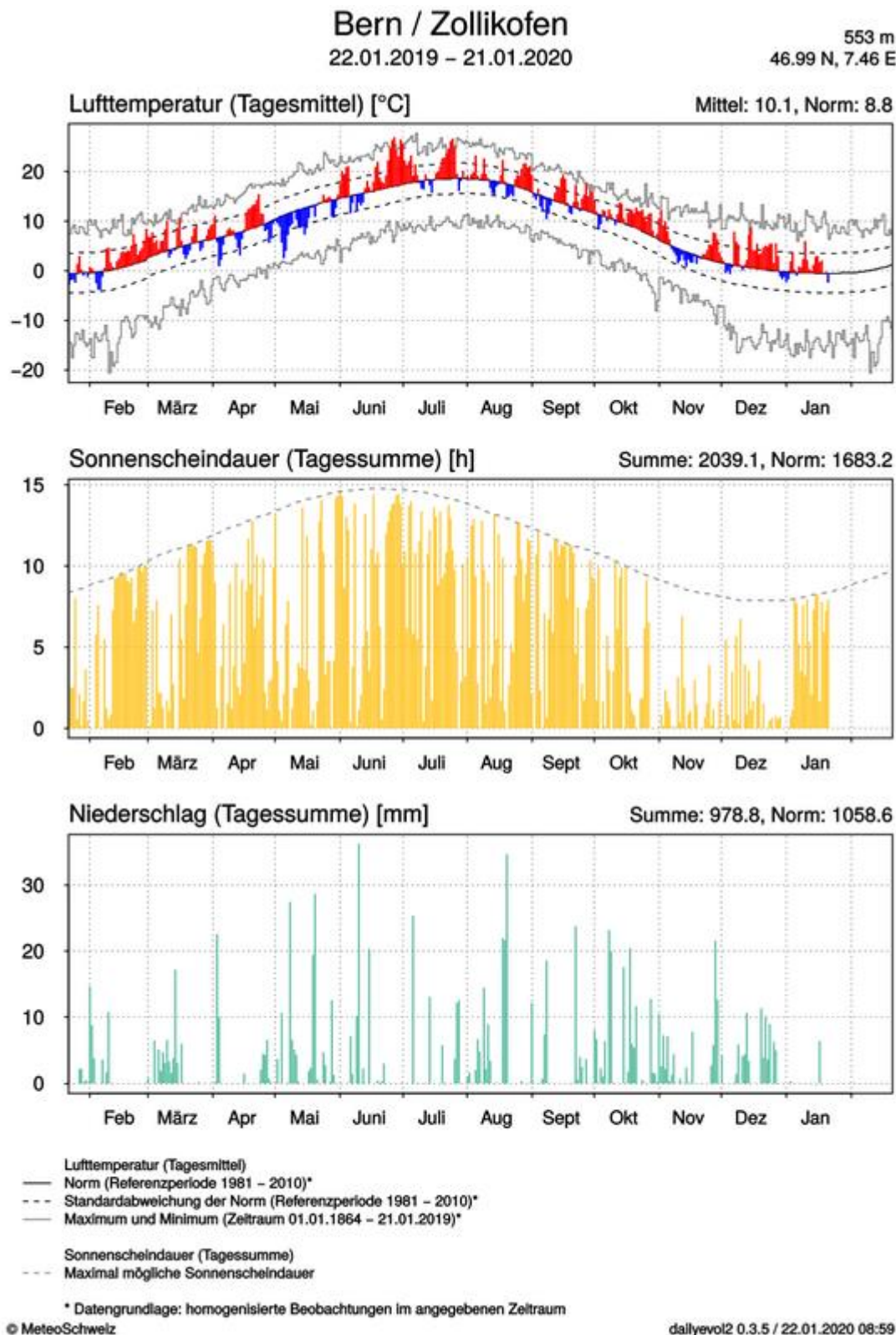
5.3. Streckenzustand und Wetter

Die Pilotstrecke war im Beobachtungszeitraum Juli – Dezember 2019 durchwegs befahrbar. Im August und September führten 2 kurze Baustellen von ewb im Bereich der Aarstrasse zu vermehrtem manuellem Betrieb.

Der Mattelift (Münsterplattform) wurde aufgrund einer längeren Baustelle wie in Kap. 3.2.1 beschrieben planmässig nicht bedient.

Im Beobachtungszeitraum waren lange Hochdrucklagen wetterbestimmend, so dass es bis auf einzelne Ausnahmen relativ wenig Niederschlag gab (vgl. Abbildung 1). Nebel und Schneefall wurden an den Betriebstagen fast gar nicht beobachtet.

Dagegen beeinträchtigte Laubfall durch Wind im November den Fahrbetrieb ebenso wie durch Laubbläser erzeugte Blätter- und Staubwolken. Freundlicherweise haben die Mitarbeitenden des Tiefbauamtes Bern nach Bekanntwerden des Problems während der Vorbeifahrt des Fahrzeugs das Laubblasen kurz unterbrochen.



Aktualisiert am Mittwoch, 22. Januar 2020, 10:03 Uhr

Abbildung 26: Temperatur, Sonnenschein und Niederschlag der letzten 12 Monate für Bern (per 22.01.2020, Quelle: MeteoSchweiz)

5.4. Streckenprogrammierung

Bei der ersten Programmierung im Mai 2019 (vgl. Kap. 4.4) wurde die Trajektorie des SFF so gelegt, dass keine Sperrflächen überfahren werden, auch keine Ladezonen und Behindertenparkplätze. Es hat sich gezeigt, dass die Ladezone auf Höhe der Matteenge 8 nur zu 50% belegt ist,

die Behindertenparkplätze auf Höhe der Gerberngasse 13 fast nie. Bei den beengten Verhältnissen vor Ort war es für die anderen Verkehrsteilnehmenden nicht verständlich, warum das SFF weit links - also teilweise auf der Gegenspur - um diese leeren Flächen herumfährt. Dies führte in Einzelfällen zu gefährlichen Fahrmanövern der anderen Verkehrsteilnehmer (die das SFF z.B. rechts überholt haben).

Mit dem Update im Dezember 2019 wurde die Streckenprogrammierung so angepasst, dass die Trajektorie über die beiden genannten Flächen führt, aber jeweils nur in geringem Umfang, so dass allfällige Fahrzeuge, die auf diesen Flächen stehen, im optimalen Fall mit der automatischen Hindernisumfahrung umfahren werden können.

Generell konnten mit den Updates der Streckenprogrammierung Ende Juli und im Dezember 2019 die Lage der Trajektorie und die möglichen Geschwindigkeiten optimiert werden. Diese erfolgten aufgrund der Betriebserfahrungen der Operatoren.

Das Thema der Engstellen mit Gegenverkehr wird in Kap. 6.1.3 näher betrachtet.

5.5. Fahrzeugtechnik (ohne Sensoren + Software)

Wie aus der Fahrzeugverfügbarkeit (Kap. 5.1) und der Ereignistabelle (Kap. 5.2) ersichtlich ist, zeigte das EasyMile EZ10 Gen2 häufige technische Störungen am Fahrzeug, die zu längeren Betriebsausfällen führten. Die lange Dauer bis zur Behebung ist auf mehrere Faktoren zurückzuführen:

1. Die Bereitstellung der Analysedaten an EasyMile ist relativ aufwändig. Die problematische Situation muss in einem "Daten-Dump" auf dem Fahrzeug festgehalten werden. Dieser Daten-Dump (mehrere GB) muss via USB-Stick und anschliessend Netzwerktransfer an EasyMile übermittelt werden.
2. Die Analyse der Logdateien durch EasyMile kann mehrere Tage in Anspruch nehmen.
3. Der Einsatz der weltweit eingesetzten EasyMile-Techniker muss anschliessend geplant werden.

Im Beobachtungszeitraum hatte BERNMOBIL mit EasyMile einen "Gold"-Wartungsvertrag, d.h. sämtliche Arbeiten wurden von EasyMile durchgeführt. Aufgrund der o.g. Erfahrungen wird ab Januar 2020 ein neues Wartungsmodell eingeführt (siehe Kap. 7.1).

Insgesamt ist der Wartungsprozess durch EasyMile mit einem Servicedesk, der die Bewertung und Analyse der Vorfälle vornimmt, einem Team aus Technikern für die Fahrzeug-Defekte sowie einem Entwicklungsteam für die Software sinnvoll konzipiert.

5.6. Sensoren und Software auf dem Fahrzeug

Sensoren für die Hinderniserkennung

Die LIDAR-Sensoren (3D Velodyne vorne/hinten in der Mitte und singleLayer Laser an den 4 Fahrzeugecken auf 30 cm Höhe) erkennen Objekte in ihrem überwachten Bereich zuverlässig.

Die von EasyMile als "SafetyLIDAR" bezeichneten singleLayer Laser an den 4 Fahrzeugecken funktionieren unabhängig vom Hauptcomputer und lösen sowohl im automatischen wie auch im manuellen Betrieb eine Bremsung aus, wenn ein Objekt näherkommt. Ist das erkannte Objekt unterhalb der tolerierten Distanz, wird ein Notstopp ausgelöst. Dabei wird gemäss Beobachtung der Begleitpersonen auch die Geschwindigkeit des Fahrzeugs und der Objekte einbezogen, eine Berechnung des Fahrwegs (Trajectory Prediction) findet aber nicht statt. So löst das Fahrzeug beim knappen Einscheren überholender Fahrzeuge einen Notstopp aus.

Durch die singleLayer Technologie und die Montagehöhe auf 30 cm Höhe können die SafetyLIDAR sehr kleine Objekte (< 25 cm Höhe) und oberhalb des LIDAR hereinragende Objekte (wie z.B. eine offene Ladeklappe) nicht erkennen. Hier muss die Begleitperson die Überwachungsfunktion übernehmen.

Der 3D-LIDAR erkennt mit der Option "small obstacle detection" auch sehr kleine Hindernisse, kann aber nicht zwischen einer befahrbaren Rampe, einer nahen Trottoirkante und einem echten Hindernis unterscheiden. Auf der sehr unebenen Pilotstrecke würde das EZ10 an mehreren Stellen nicht vorbeikommen. Aus diesem Grund ist diese Option zurzeit deaktiviert und die Begleitpersonen sind entsprechend instruiert. Hier zeigt sich der Nachteil der LIDAR-Systeme, dass sie Objekte nicht klassifizieren können.

Beide LIDAR Systeme werden durch Regentropfen oder Staub in ihrer Funktionalität beeinträchtigt. Der Verschmutzungszustand wird dem Operator auf dem Operator-Panel angezeigt, so dass dieser die LIDARs wieder reinigen kann.

Es zeigte sich, dass insbesondere beim schrägstehenden Fahrzeug in der Steigung am Bärenpark die tiefstehende Sonne die LIDAR Systeme irritieren kann – in diesem Fall wird ein Hindernis erkannt. Ebenso werden kleine Objekte von Vögeln über Laubblätter bis hin zu grösseren Mückenschwärmen als Hindernisse erkannt und lösen entsprechende Stopps des Fahrzeugs aus.

Lokalisierung und Orientierung

Für die Lokalisierung verwendet das Fahrzeug die LIDAR-Sensoren auf dem Dach, GPS und Odometriesensoren. Mit den LIDAR-Sensoren wird die Umgebung beim Setup als 3D-Karte erfasst, in der sich das Fahrzeug im Betrieb dann bewegt. Dies funktioniert zuverlässig. Das Fahrzeug fährt präzise seine Fahrspur entlang und kommt auch in Situationen mit schlechtem GPS-Empfang gut zurecht (Matteenge). Auch im Bereich des Parkplatz Klösterlistutz (wenige Gebäude, viele Bäume, in der Steigung) funktioniert die Lokalisierung gut. Ein Verlust der Lokalisierung tritt äusserst selten auf. Meistens ist eine solche auf ein Konfigurationsproblem zurückzuführen (wenn z.B. dem Fahrzeug ein Linienfahrweg konfiguriert wird, der den aktuellen Standort des Fahrzeugs nicht enthält). Ein Problem ist, dass das Fahrzeug auf einen Verlust der Lokalisierung oder der Datenverbindung in jedem Fall unmittelbar mit einem Notstopp reagiert, der immer das Risiko einer Auffahrkollision beinhaltet.

Software

Seit der Erstlieferung des EZ10 im Dezember 2018 wurde die Software auf dem Fahrzeug mehrfach aktualisiert:

- 7. Mai 2019: Update Feature Release "Voyager 6" (18.10.6)
- 2. Dezember 2019: Update Feature Release "Voyager 7" (19.06.6)
- 23. Dezember 2019: Update zur Fehlerkorrektur

Auf Anforderung von BERNMOBIL hat EasyMile für das Release "Voyager 7" einen Release Letter bereitgestellt, in dem alle Neuerungen und Änderungen in der nötigen Detailtiefe dokumentiert waren, so dass BERNMOBIL sich entsprechend vorbereiten und die angepasste Benutzerdokumentation für die Begleitpersonen entsprechend kommunizieren konnte.

Der in Kap. 4.4 dargestellte Update-Prozess wurde für das Release "Voyager 7" wie geplant durchgeführt. Es zeigte sich:

- Der Wechsel des Fahrzeugs von der Pilotstrecke auf die Teststrecke erfordert eine Konfiguration des Backend-Systems, was derzeit nur von EasyMile vorgenommen werden kann
- Das Einspielen der Updates ist relativ zeitaufwändig und die Zeitdauer im Voraus nicht klar bezifferbar
- Trotz flexibel anpassbarem Zeitpunkt für den Rücktransport auf die Pilotstrecke seitens der Firma Gerber war für BERNMOBIL die Zeit für die Abnahmetests auf der Teststrecke sehr knapp
- Für das Anpassen der Pilotstecken-Programmierung (für die Nutzung der neuen Features) und das Testen des Updates auf der Pilotstrecke ist genügend Zeit vorzusehen (>2 Tage)
- Aus den o.g. Zeitaufwänden in Verbindung mit der zeitlich limitierten Anwesenheit des EasyMile-Technikers sowie der Erwartung, dass das Fahrzeug möglichst gemäss Planung wieder in den Fahrplanbetrieb übergeben wird, ergibt sich ein hoher Zeitdruck für die Abnahme des Updates.

5.7. Backend-System Software

Das Flottenmanagementsystem nennt EasyMile seit Release Voyager 7 nun "EZ Maestro 7" (vgl. Kap. 0). Dieses wird parallel zu den Fahrzeugsystemen "EZ Move" und "EZ Drive" aktualisiert.

Das System läuft auf Servern in der Cloud und die BERNMOBIL Kollegen mit EasyMile Chief Operator Ausbildung haben Zugriff darauf, ebenso jene von der Leitstelle. Auf den EasyMile Servern laufen alle Sites weltweit. Ist der Server nicht verfügbar, kann das selbstfahrende Fahrzeug nicht

betrieben werden. Verliert das Fahrzeug unterwegs den Kontakt, löst es einen Notstopp aus. Somit ist die Verfügbarkeit dieser Server und der Software "EZ Maestro" kritischer Faktor für den Betrieb des Fahrzeugs.

Auf das System kann BERNMOBIL über die Benutzerschnittstelle "SiteCC" zugreifen. Damit lassen sich die Fahrzeuge einer Site (vgl. Kap. 0) überwachen, in diesem Projekt nur das eine EZ10. Es zeigt den Zustand des Fahrzeugs und seine Position sowie die aktuell programmierte Linie an. Man kann dem Fahrzeug eine neue Linie zuweisen, ggf. auch auf die Videokameras zugreifen.

Da BERNMOBIL nicht für jeden Fahrzeug-Typ eine Hersteller-spezifische Überwachungssoftware auf der Leitstelle betreiben kann, war die Vorgabe, dass das SFF über die vorhandene Leitstellensoftware Trapeze LIO 500 überwacht und gesteuert werden können muss (vgl. Kap. 2.7.2). Daraus resultiert die Anforderung an EasyMile, Datenschnittstellen auf das EZ Maestro bereitzustellen (Abbildung 27). Über die Monitoring API kann der Status des Fahrzeugs ausgelesen werden. Die Mission API ist für die Programmierung von Linien aus dem Leitsystem vorgesehen (im Betrachtungszeitraum noch nicht verfügbar).

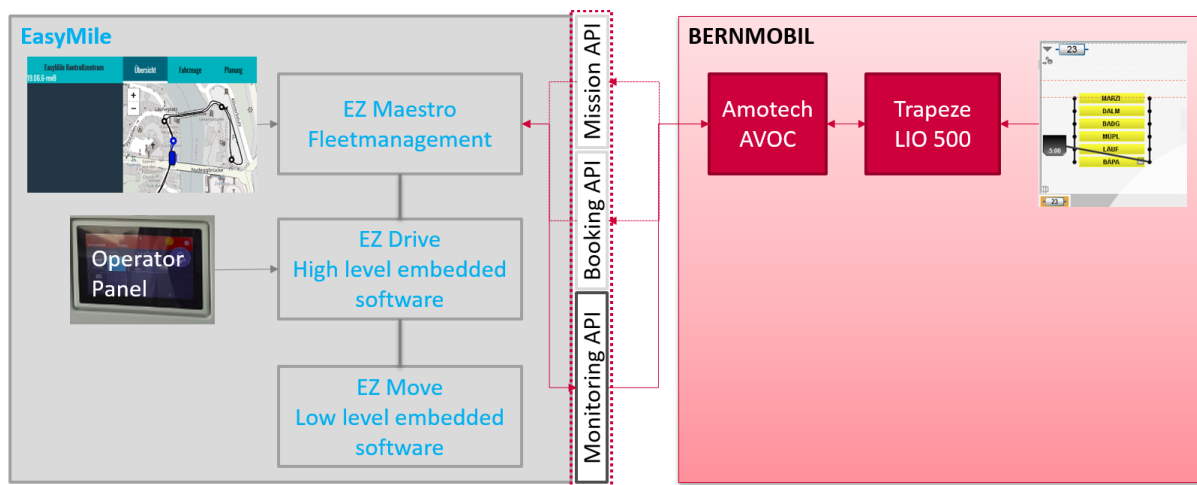


Abbildung 27: Schnittstellen (APIs) auf die EasyMile Software EZ Maestro

5.8. Zusammenarbeit Fahrzeug- und Systemlieferant

BERNMOBIL hat den Liefervertrag mit der EasyMile GmbH, Berlin, abgeschlossen. Das Projekt wurde anfangs direkt vom EasyMile-Hauptsitz in Toulouse betreut, mittlerweile ebenfalls aus der Niederlassung in Berlin. Bei Fahrzeugstörungen läuft der Kontakt derzeit direkt zur Supportorganisation in Toulouse.

Insgesamt hat sich eine sehr kooperative und zielorientierte Zusammenarbeit etabliert. Das Berner SFF Projekt hat in Toulouse einen hohen Stellenwert.

5.9. Einbindung Bernmobil-Technik

Die nachfolgende Tabelle zeigt den Realisierungsstand der Leitstellenintegration (vgl. Kap. 3.5.3) über die in Kap. 5.7 beschriebenen Schnittstellen von EasyMile per Ende Dezember 2019.

Paket 1: Bewegungsverfolgung (Motion Tracking)	Seit 1.7.2019 produktiv, die reale Fahrzeugposition wird im Leitstellensystem dargestellt, inklusive der Abweichung von den Sollfahrplandaten. EasyMile stellt dazu die Fahrzeugdaten über die Monitoring API zur Verfügung. Das AVOC-System bereitet diese für das Leitstellen-System LIO auf.
Paket 2: Versionierung (Configuration Information)	Ist noch nicht realisiert.

Paket 3: Fahrzeugzustand (Status Information)	Seit 1.7.2019 werden Status Informationen im Leitstellensystem dargestellt. Per Dezember sind dies u.a. folgende Parameter: • Automatischer/manueller Betrieb • Batteriestand • Türzustand • Temperaturen (innen/ausser/Batterie) • Km-Stand • Geschwindigkeit Diese werden ebenfalls von der Monitoring API zur Verfügung gestellt.
Paket 4: Ereignisse (Events)	Aus den Status Informationen (Monitoring API) werden durch die AVOC-Software Ereignisse im Leitstellensystem erzeugt (z.B. zu niedriger Batteriestand).
Paket 5: Manifest (Manifest)	Der Linienfahrweg muss vom Leitstellenpersonal aktuell mithilfe der EasyMile-Software "SiteCC" dem Fahrzeug zugewiesen werden. Die Anbindung der Mission API an das Leitstellensystem ist in Arbeit.

Die in Kap. 3.5.3 beschriebene AVOC App für die Anmeldung des Operators am Leitsystem wurde im Lauf des Projekts um ein Erfassungsmodul für die Fahrgastzählung erweitert. Dieses ist seit September 2019 in Betrieb.

Weiterhin wurde eine webbasierte Software für die systematische Störungserfassung entwickelt und im Fahrzeug montiert. Zwar bietet EasyMile eine solche Funktionalität im Operator Panel nach einem Notstopp oder Soft-Stopp bzw. beim Umschalten in manuellen Betrieb, jedoch werden diese Daten nicht auf den Schnittstellen bereitgestellt und werden BERNMOBIL nur zeitverzögert zugestellt. Ausserdem deckt die eingebaute Störungserfassung nicht alle realen Anwendungsfälle ab.

5.10. BERNMOBIL-Prozesse

Die Betriebsprozesse "Fahrgast-kommunikation" und "Fahrgäste befördern" laufen im Projekt SFF gemäss den BERNMOBIL Standard-Prozessen, für die Prozesse "Fahrgastbeförderung planen" und "Fahrgastbeförderung steuern" gibt es noch geringfügige Abweichungen vom Standard-Prozess.

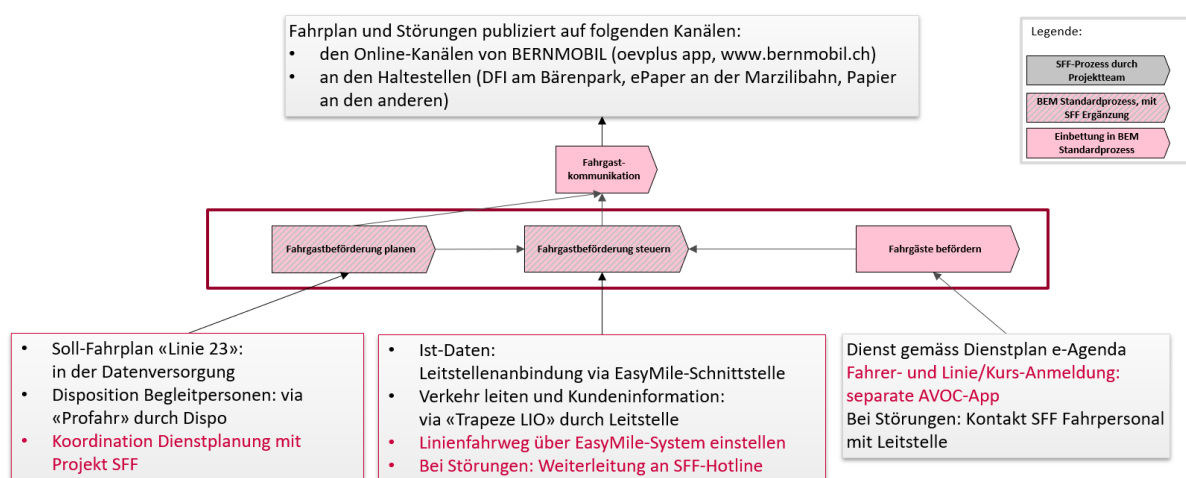


Abbildung 28: Stand der Integration des SFF-Betriebs in die BERNMOBIL Standardprozesse

Bei dem längeren Betriebsausfall im August 2019 aufgrund der Fahrzeugstörung wurden die Fahrgastinformationen anfangs nicht korrekt versorgt, so dass für die Kundschaft der Ausfall nicht immer transparent war. Dies lag unter anderem daran, dass der Fall eines längeren Linienausfalls in der Software gar nicht vorgesehen war. Im regulären ÖV kommt der Fall so in der Regel nicht vor. Nach einer Anpassung der Software können wir für die Linie 23 nun auch einen

mehrtägigen Ausfall aufgrund einer Fahrzeugstörung konsistent an die Kundschaft kommunizieren.

5.11. BERNMOBIL-Personal

Der Einsatz von Fahrpersonal auf dem SFF hat sich bewährt. Zum einen kennen die Fahrdienstangestellten die Standardprozesse und müssen diesbezüglich nicht speziell geschult werden. Zum anderen bringen sie viel Erfahrung mit, wodurch sie in anspruchsvollen Situationen routiniert reagieren. Der auf 5 h limitierte Fahrdienst auf dem SFF im Stadtverkehr benötigt nach Auskunft von Operatoren mehr Konzentration als der Fahrdienst auf einer Bus- oder Tramlinie durch die Altstadt.

Inzwischen werden auch BERNMOBIL-Mitarbeitende aus anderen Bereichen in regulären SFF-Diensten eingesetzt. Dies war erforderlich, damit sie die nötige Fahrpraxis für die Extrafahrten erhalten (siehe Kap. 5.15).

BERNMOBIL hat im September 2019 eine Umfrage unter den Operatoren bezüglich Motivation und Akzeptanz durchgeführt, die Ergebnisse finden sich in Kap. 0.

5.12. Fahrgäste

Wegen der hohen Bremsverzögerung des Fahrzeugs (ca. 5 m/s^2) bei den oft unvermittelten Notstopps müssen sich die Fahrgäste setzen bzw. die 2 stehenden gut festhalten. Die Begrenzung der maximalen programmierten Geschwindigkeit auf 13 km/h durch EasyMile ist aus diesem Grund plausibel.

Es gab im Pilotbetrieb bereits Fälle, in denen ein Fahrgast wegen eines Notstopps vom Holzsitz gerutscht ist.

Einzelnen negativen Äusserungen von Fahrgästen stehen sehr viele positive Rückmeldungen gegenüber. Diese Aussage basiert aber bislang auf den Rückmeldungen der Operatoren.

5.13. Verkehrsteilnehmende

Die grössten Herausforderungen im Betrieb des SFF auf der Pilotstrecke sind die anderen motorisierten Verkehrsteilnehmenden sowie die Velofahrenden. Dies liegt in erster Linie an der sehr langsamen Geschwindigkeit des EZ10 (5-13 km/h) und ausserdem an dem teilweise irritierenden Verhalten des Fahrzeugs, wenn es stur der einprogrammierten Fahrspur folgt.

Die Folge sind knappe Überholmanöver genervter Verkehrsteilnehmenden, die bei knapper Vorbeifahrt wiederum das SFF verlangsamen oder stoppen, und zu weiteren Verzögerungen führen.

Die ca. 18.5 cm herausragenden Schutzabdeckungen der SafetyLIDAR im unteren schwarz lackierten Bereich des EZ10 Gen2 sind dabei besonders gefährdet, da sie schlecht erkennbar sind. Die in Kap. 5.2 erwähnte Streifkollision am 14.7. zeigt dies (Vergleichbare Unfälle gab es mit dem EZ10 Gen2 auch in Monheim im Dez 2019 und Brandenburg Juli 2019).

Auch Velofahrende, die in einer engen Passage seitlich knapp am SFF vorbeifahren oder kurz davor wieder einscheren, lösen regelmässig einen Notstopp aus.

Falschparkierte Fahrzeuge sind für die Fahrt auf einer fest programmierten Spur natürlich auch ein Problem, wenn das Fahrzeug ganz oder teilweise in das Lichtraumprofil des SFF hereinragt. Ein eingeschränktes Lichtraumprofil führt zur Verlangsamung bis hin zu 1 km/h. Ragt ein Fahrzeug bis zu 1 m in die Fahrspur, kann die neue "Obstacle Circumvention" in Idealfällen eine Umfahrung berechnen. Bei weiterem Hineinragen muss das SFF manuell um das falsch parkierte Fahrzeug gesteuert werden.

Das Verhalten des Fahrzeugs bei Fussgängerinnen und Fussgängern ist sehr gut. Es bremst vorsichtshalber ab, wenn jemand zu nahe ans Fahrzeug kommt. Das führt dann teilweise dazu, dass

das Fahrzeug eine Haltestelle erst dann richtig anfahren kann, wenn die wartenden Fahrgäste draussen verstehen, dass sie erst mal genug Abstand haben müssen.

5.14. Quartierbewohnende

Eine systematische Befragung der Quartierbewohnenden wurde bislang nicht vorgenommen. Es liegt jedoch eine Rückmeldung vom Marzili-Dalmazi-Leist vor, gemäss der 98% der Mitglieder den Einsatz des SFF als Linie 23 im Quartier positiv bewerten.

5.15. Extrafahrten

Da das EZ10 nur Platz für 8 Fahrgäste hat, hat BERNMOBIL für Gruppen-Anfragen ein Extrafahrtenkonzept erstellt. Interessenten an einer organisierten Extrafahrt mit dem SFF können sich über die BERNMOBIL-Homepage anmelden. Extrafahrten finden ausserhalb der regulären Fahrplanfahrten statt und haben in der Regel noch ein kurzes Rahmenprogramm.

Für die Extrafahrten kann aus betrieblichen Gründen kein Fahrpersonal eingesetzt werden, daher wurden BERNMOBIL-Mitarbeitende aus anderen Bereichen als "Operator" ausgebildet.

Die Zahl der Extrafahrten ist aus Ressourcengründen limitiert.

Die Rückmeldungen zu den durchgeführten Extrafahrten waren durchwegs positiv.

6. Erkenntnisse aus Betrieb SFF – 6 Monate

6.1. Erkenntnisse zu den spezifischen Zielen des Pilotversuchs

In diesem Abschnitt werden die Erkenntnisse bezogen auf die in Kap. 2.8.2 aufgeführten spezifischen Ziele des Pilotversuchs dargestellt.

6.1.1. Leitstellenintegration

Die ersten Elemente der Anbindung des EasyMile Systems an das Leitstellensystem über die in Kap. 5.7 beschriebenen Schnittstellen konnten gemäss Kap. 5.9 erfolgreich implementiert werden.

Seit Juli 2019 kann der Betrieb des SFF Fahrzeugs wie alle anderen Fahrzeuge von BERNMOBIL vom Leitstellensystem überwacht werden. Hierzu wird auf die "Monitoring API" von EasyMile zugegriffen.

In einem ersten Schritt wurde zunächst die Darstellung der aktuellen Position des Fahrzeugs im Leitsystem programmiert (Abbildung 29).

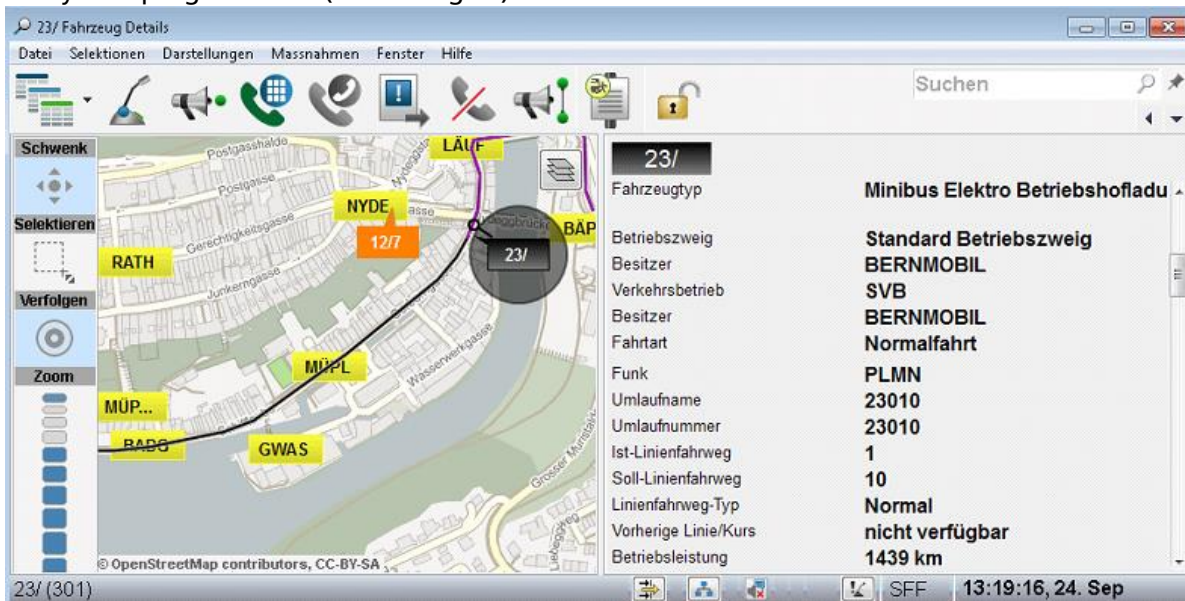


Abbildung 29: Darstellung des Fahrzeugs 301 (SFF) im Leitstellensystem LIO 500

Aus dem Vergleich der Ist-Positionsdaten mit den Fahrplandaten (Soll) berechnet das Leitstellensystem die Verspätung. Zusätzlich können die Verkehrsdisponentinnen und Verkehrsdisponenten auf der Leitstelle Meldungstexte bei Störungen verfassen (Abbildung 30). Die Abfahrtszeiten mit allfälligen Verspätungen und Störungsinformationen werden automatisch an die Fahrgastinformationssysteme von BERNMOBIL weitergeleitet, werden aber auch über die sogenannte Datendrehscheibe an die Fahrplanauskunftssysteme anderer Transportunternehmungen weitergeleitet, so dass sie z.B. auf sbb.ch zu finden sind.

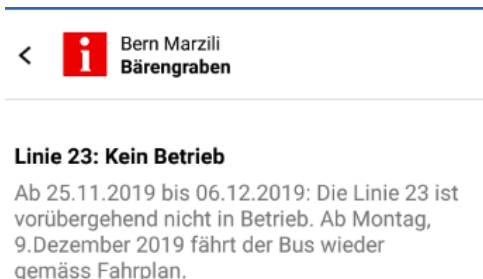


Abbildung 30: Ausfallinformation der Linie 23 im Fahrgastinformationssystem.

In einem zweiten Schritt wurde die Darstellung mehrerer Fahrzeug-Informationen auf der Leitstelle programmiert, die dort seit September 2019 sichtbar sind (Abbildung 31). Dazu gehört der Batteriestand und der Fahrmodus (automatisch/manuell).

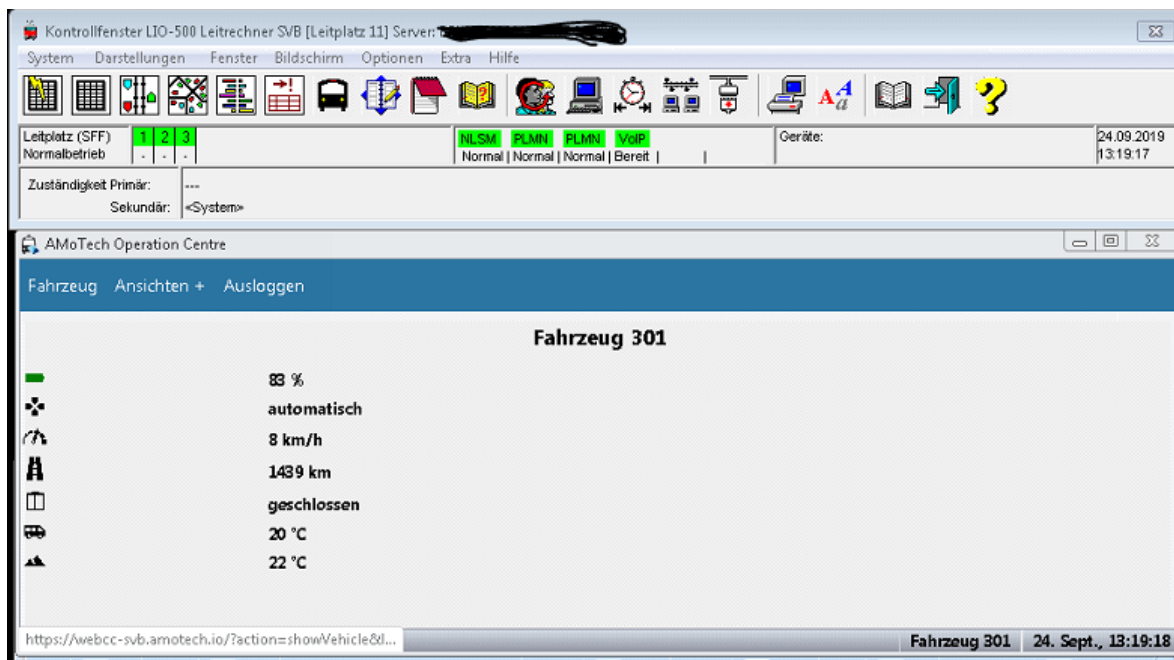


Abbildung 31: Darstellung der Fahrzeug-Informationen im Leitstellensystem

Stand Dezember 2019 kann die Leitstelle den Linienfahrweg des Fahrzeugs nur über das Easy-Mile System (SiteCC) beeinflussen, die vollständige Integration in das LIO System der Leitstelle über die Schnittstelle "Mission API" soll im ersten Halbjahr 2020 implementiert werden.

6.1.2. Fahrzeug-Verhalten auf Kopfsteinpflaster

Für einen späteren praktischen Einsatz von automatisierten Fahrzeugen müssen diese auch auf unebenem Strassenbelag funktionieren.

Dazu wurde folgende These anhand der vorliegenden Daten zu Störungen geprüft:

"Das Fahrzeug funktioniert auf unebenem Strassenbelag gut, wenn die Zahl der "relevanten Störungen"/km, die nicht auf die anderen Verkehrsteilnehmenden zurückgeführt werden können, auf dem Streckenteil mit Kopfsteinpflaster nicht signifikant höher ist als auf dem Streckenteil mit Asphaltbelag."

Dazu wurde die Zahl der Nothalte mit Nothalt-Grund "Hardware" und "Software" (vgl. Kap. 5.1) auf den Streckenabschnitten mit Kopfsteinpflaster mit den Streckenabschnitten ohne Kopfsteinpflaster verglichen.

Auf der Gesamtstrecke (Abbildung 32) gibt es folgende zwei Abschnitte, die gepflastert sind:

1. Schifflaube 16 bis Schifflaube 52
2. Matteenge und Untertorbrücke

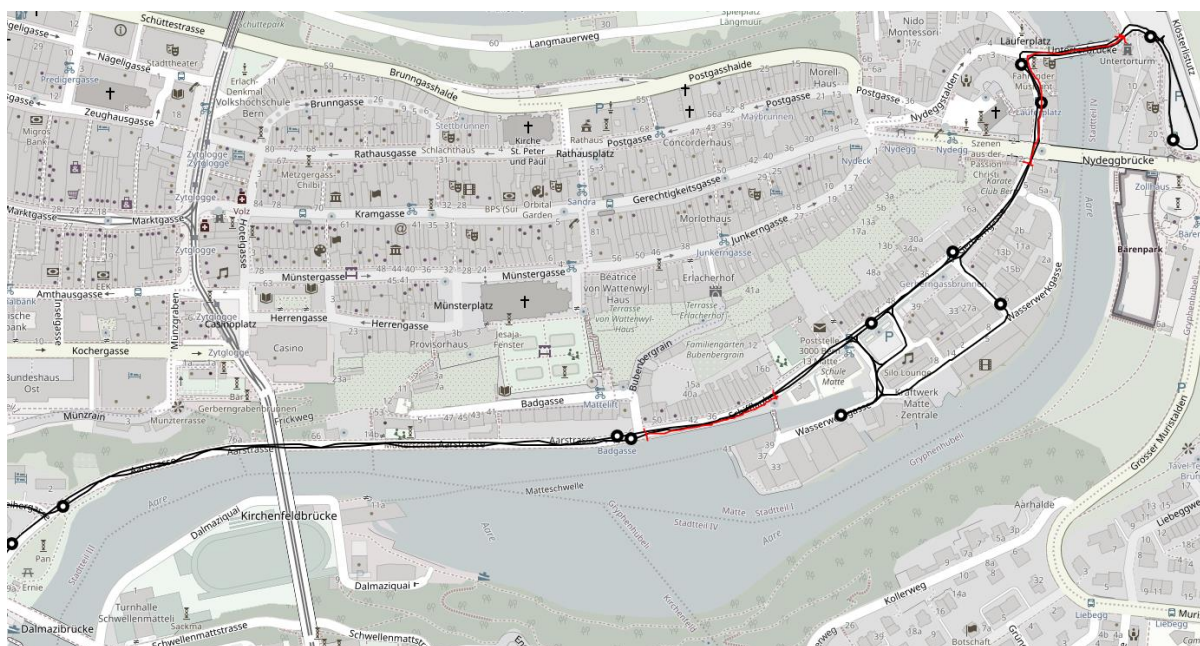


Abbildung 32: Pilotstrecke mit gepflasterten Abschnitten (rot). In der Mitte: Abschnitt Schiffflaube. Rechts oben: Abschnitt Matteenge und Untertorbrücke

Die Datenanalyse wurde von der Firma SPOUD AG für die Messdaten zwischen 04.10.2019 und 21.01.2020 vorgenommen, wobei nur Messtage mit mehr als 15 km Fahrleistung betrachtet wurden (der Sollwert gemäss Fahrplan/Umlaufplan ist 28 km pro Tag).

Die Zuordnung zu den Abschnitten mit Pflaster bzw. ohne Pflaster erfolgte aufgrund der GPS-Koordinaten der Nothalt-Einträge.

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Zahl der Nothalte bzw. der gefahrenen Kilometer jeweils für die asphaltierten Anteile (hellblau) und die gepflasterten Anteile (dunkelblau). Auffallend ist der signifikante Rückgang der Nothalte auf Asphalt nach dem Software Update Voyager 7 Anfang Dezember 2019. Die Tage 10. und 16.12.2019 stellen dabei Ausnahmen dar, die auf bekannte Fahrzeugprobleme zurückgeführt werden können. Diese wurden Anfang Januar 2020 behoben.

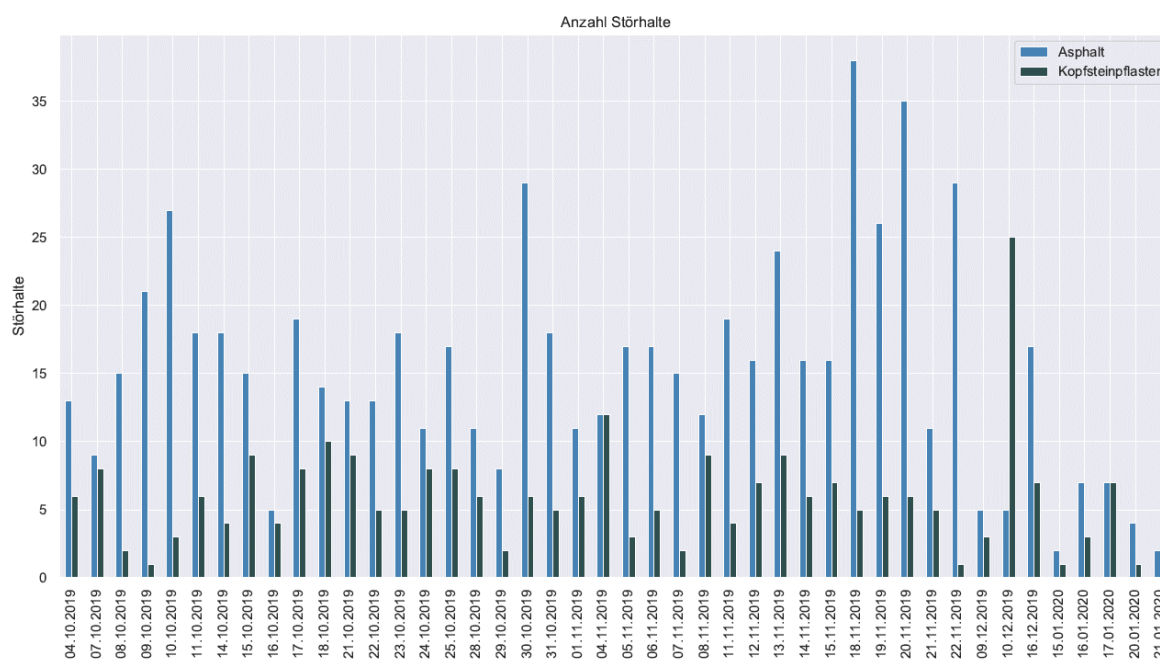


Abbildung 33: Anzahl Störhalte (Hardware, Software) pro Betriebstag getrennt nach Strassenbelag

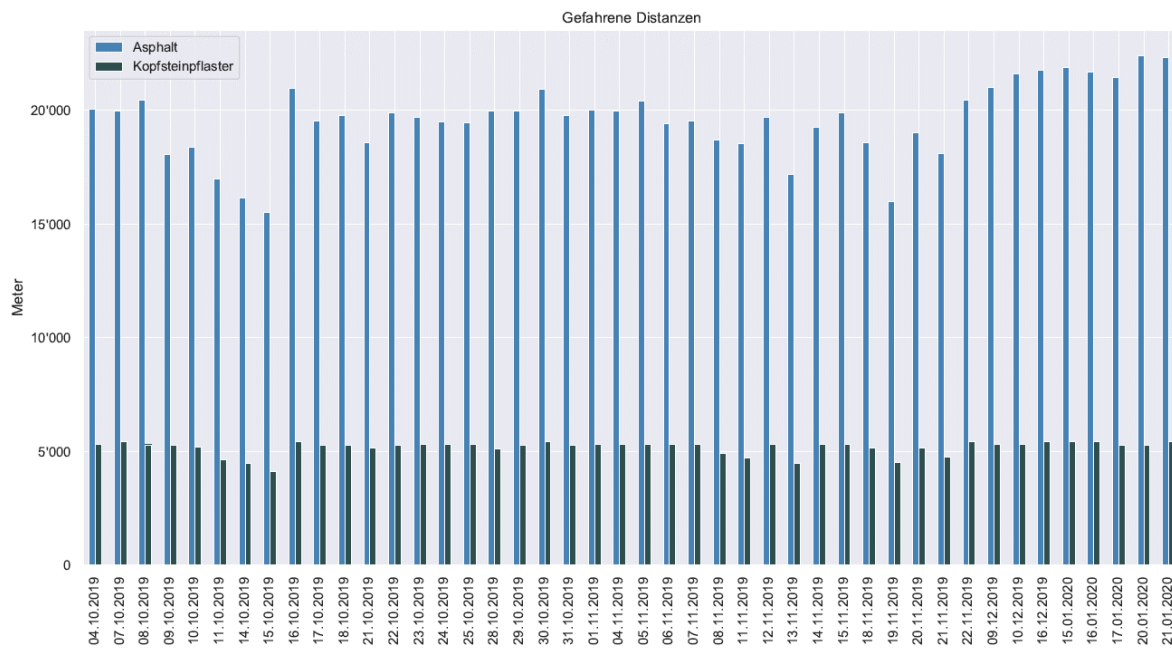


Abbildung 34: gefahrene km pro Betriebstag nach Strassenbelag

Die statistische Auswertung (Abbildung 35) der Zahl an Störhalten (Nothalte aufgrund Hardware oder Software-Fehler) pro km zeigt folgendes:

- auf den gepflasterten Abschnitten treten durchschnittlich 1.1 Störhalte / km auf (Standardabweichung 0.78)
- auf den asphaltierten treten im Durchschnitt dagegen nur 0.8 Störhalte / km auf (Standardabweichung 0.45).
- Es treten auf den gepflasterten Abschnitten also 0.3 Störhalte / km mehr auf, was signifikant höher ist.

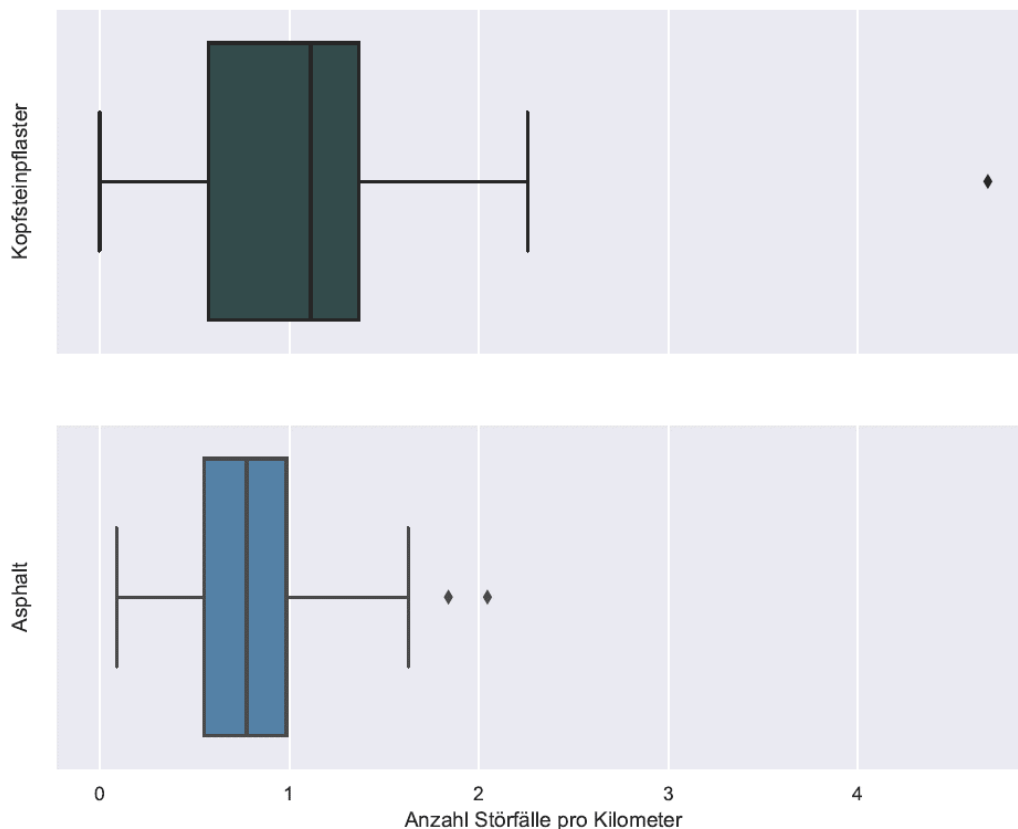


Abbildung 35: Mittelwert und Standardabweichung für die Anzahl der Störhalte pro km, getrennt nach Strassenbelag

Damit wird die oben formulierte Hypothese widerlegt.

BERNMOBIL wird die Daten zusammen mit EasyMile analysieren und klären, wie das Verhalten auf unebener Fahrbahn verbessert werden kann.

Grössere Unebenheiten als der Pflasterbelag stellen das Fahrzeug indes vor grundsätzliche Probleme. Z.B. Schlaglöcher oder Schwellen. Diese können je nach Neigung des Fahrzeugs und Höhe der Unebenheit von den SafetyLIDAR als Hindernisse erkannt werden und zu Notstopps führen.

6.1.3. Engstellen mit Gegenverkehr

Die Engstellen mit Gegenverkehr (vgl. Kap. 3.2.2) stellen eine besondere Herausforderung auf der gewählten Pilotstecke dar. Dies liegt an den stark begrenzten Fähigkeiten des Fahrzeugs EZ10 Gen2, das einer festen Fahrspur folgt, alle anderen Objekte als Hindernisse wahrnimmt, und nur aufgrund der Entfernung vom eigenen Fahrweg die nötigen Reaktionen wie Geschwindigkeitsreduktion oder Anhalten auslöst. Weder kann das EZ10 die voraussichtliche Trajektorie von bewegten Objekten vorausberechnen noch kann es die eigene Fahrspur dynamisch anpassen.

Ohne Intervention fährt das EZ10 (gelb in Abbildung 36) an der Schiffflaube 22 bei längs parkierten Fahrzeugen (blau) in die Engstelle ein und bremst erst unmittelbar vor dem entgegenkommenden Fahrzeug (rot) ab und wartet, bis dieses sich entfernt.

Daher wurde vor jeder Engstelle ein sogenanntes Yield (grün) programmiert, an dem das EZ10 stoppt und auf die Quittierung der Weiterfahrt durch den Operator wartet. D.h. der Operator muss die Situation überblicken und ggf. über Handzeichen mit den anderen Verkehrsteilnehmenden kommunizieren, bis der Streckenteil frei ist und er die Weiterfahrt quittiert.



Abbildung 36: Engstellensituation in der Schiffflaube

Sowohl an der Schiffflaube wie auch entlang des Mühlenplatzes und im Bereich der Matteenge gibt es bis zu 100 m lange, teilweise unübersichtliche Engstellen.

Die Situation wird durch die langsame Geschwindigkeit des EZ10 verschärft (5-13 km/h), weil sich dadurch andere Fahrzeuge hinter dem SFF aufstauen, die dann vorbeifahren wollen, wenn das EZ10 am Yield stoppt. Häufig ist der Operator des EZ10 bei Begegnungssituationen zu manuellen Manövern gezwungen, bei denen das Fahrzeug sich maximal mit 5 km/h bewegt. Andere Verkehrsteilnehmende wissen nicht, dass der manuelle Betrieb die Lösung einer Begegnungssituation eher verzögert als beschleunigt.

Folgende Massnahmen haben im Verlauf des Betriebs zu einer Verbesserung der Situation geführt:

- Defensive Fahrweise der Operatoren. Hinter dem EZ10 aufstauende Fahrzeuge frühzeitig passieren lassen. Gegenverkehr grosszügig vorbeilassen.

- Zügige Durchfahrt des EZ10 durch die Engstelle, um diese nicht länger als nötig zu belegen – hier haben mehrere Optimierungen der Trajektorie sowie der Geschwindigkeiten sowie ein höherer Beschleunigungswert des EZ10 im Lauf der Betriebsmonate zu einer deutlichen Verbesserung geführt.

Als problematisch erweisen sich insbesondere in den einspurigen Passagen knapp überholende Velofahrende, die je nach Abstand das EZ10 zum Bremsen oder zum Notstopp bringen, wodurch sich die Durchfahrt durch die Engstelle verzögert.

6.1.4. Fahrzeug-Verhalten in kurzer Steigung mit Haltestelle

Aufgrund der im August aufgetretenen Fahrzeugprobleme (siehe Kap. 5.2) und dem daraus resultierenden Nichtbefahren des Steigungsteils bis zum Update Anfang Dezember 2019 liegen zu wenige Messdaten für eine Auswertung vor.

Seit 4.12.2019 wird der Steigungsteil wieder befahren, so dass für den Folgebericht nach 12 Betriebsmonaten genügend Fahrdaten für eine Analyse vorhanden sein sollten.

6.2. Erkenntnisse hinsichtlich Relevanz der Technologie für regulären ÖV Betrieb

Automatisierter Betrieb (SAE J3016 Level 4 oder 5)

Anhand des Pilotbetriebs SFF mit dem EasyMile EZ10 Gen2 Fahrzeug können folgende Erkenntnisse hinsichtlich der Relevanz der Automatisierungstechnik Level 4 und 5 für den regulären ÖV-Betrieb abgeleitet werden:

- Ortung und Navigation des Fahrzeugs funktionieren tadellos, auch bei schlechtem GPS-Empfang und im Gebäude
- Hinderniserkennung funktioniert auch sicher (im Sinn, dass kein Hindernis übersehen wird – dies gilt derzeit allerdings nur für Hindernisse ab 30 cm Höhe und nicht für Löcher in der Strasse)
- Mit der Hindernisumfahrung "Obstacle Circumvention", die nur für kleine Hindernisse unter Idealbedingungen funktioniert, ist ein erster Ansatz zu einer flexibleren Fahrspur erkennbar
- Funktionsfähiges Komplettsystem für einen "automatisierten ÖV" bei EasyMile erkennbar, das Zusammenspiel der Komponenten ist sinnvoll konzipiert.

Dennoch bestehen noch folgende Lücken zur Anwendungsreife (entsprechende Feedbacks hat BERNMOBIL bereits an EasyMile zurückgemeldet):

- Die Sensoren melden zu viele "false positives" bei der Hinderniserkennung (Laub, Schnee, Kleintiere) – vgl. 6.1
- Die Sensoren müssen mit erwarteten Situationen wie Schnee, Regen, Nebel umgehen können und über einen Reinigungsmechanismus sowie einen Selbsttest verfügen
- Die Strategie "Hindernis erkennen und anhalten" ist nicht immer sinnvoll – z.B. bei überholenden und knapp einscherenden Fahrzeugen. D.h. die Vorhersage der Objektbewegungen (Trajectory Prediction) ist dringend erforderlich. Diese ist für kommende Software-Releases seitens EasyMile angekündigt.
- Die fixe Fahrspur ist im Praxiseinsatz im Stadtverkehr hinderlich, das Fahrzeug müsste sich frei in einem vorgegebenen "Fahrband" bewegen können. Erste Ansätze sind bei der Funktion "obstacle detection" und auf der Entwicklungs-Roadmap von EasyMile erkennbar ("navigable area").
- Die Stabilität von Fahrzeugtechnik und Software ist noch unzureichend – die Notstopps aufgrund von Software-Fehlern und Fahrzeugproblemen müssen weiter signifikant reduziert werden. Die Verbesserungen nach dem Update im Dezember 2019 zeigen in die richtige Richtung.
- Es gibt noch keine Objektklassifizierung – das Fahrzeug kann nicht zwischen Mast und Mensch unterscheiden und fährt an beiden gleich langsam vorbei. Die Funktionalität "Sensorfusion mit Einsatz Kamera" zur Objekterkennung ist dringend nötig. Die nachfolgende Fahrzeuggeneration EZ10 Gen3 ist mit den entsprechenden Sensoren ausgerüstet.
- Das Fahrzeug muss Hindernisfreiheit auf der vorgesehenen Fahrbahn weiter vorausschauend beurteilen können, auch seitlich (bei Einmündungen). Auch hier sind Verbesserungen für das EZ10 Gen3 seitens EasyMile angekündigt.
- Das Fahrzeug muss Verkehrsregeln lernen können (Fussgängerstreifen, Rechtsvortritt, Signalisation, Verhalten bei Blaulichtfahrzeugen).
- Das Fahrzeug muss für den Einsatz im Schweizer ÖV BeHiG konform gestaltet sein, d.h. u.a. über genügend Platz für den Rollstuhlplatz sowie eine Befestigungsmöglichkeit für

diesen aufweisen. Die automatische Rollstuhlrampe des EZ10 ist eine sinnvolle Einrichtung, muss aber hinsichtlich Zuverlässigkeit und Bedienung noch deutlich verbessert werden. Der Innenbildschirm muss eine kontrastreichere Darstellung aufweisen.

- Für das Einspielen von Software-Updates ist ein klar definierter Release-Prozess erforderlich (ausführliche Release-Information, Prozedere für Einspielen, Abnahme, Test und Schulung der Begleitperson bzw. Leitstellenmitarbeitende).
- Die Backend-Systeme sind redundant auszulegen (Failsafe-Cluster), damit ein Ausfall nicht zum Betriebsausfall aller Fahrzeuge führt.
- Das Fahrzeug muss bei Verlust der Datenverbindung oder Orientierung aufgrund der Sensordaten ein sinnvolles Fahrmanöver ausführen. Ein Notstopp muss auf klar definierte Ausnahmefälle beschränkt bleiben, da er mit der Gefahr einer Auffahrkollision und damit Gefährdung der Insassen verbunden ist.
- Es besteht ein grundsätzlicher Zielkonflikt zwischen der Sicherheit der Insassen (inklusive der Begleitperson) und der angestrebten höheren Geschwindigkeit für den Alltagseinsatz, solange das Fahrzeug bei jeder Unsicherheit mit einem Notstopp reagiert.

Fazit: Der Betrieb ist derzeit nur mit hohem technischem, personellem und finanziellem Aufwand möglich. Das Fahrzeug muss quasi permanent überwacht werden.

Im regulären ÖV Betrieb auf der Strasse im Stadtverkehr ist ein Einsatz eines solchen Systems aus heutiger Sicht nicht denkbar. Allenfalls ist ein Einsatz auf eigenen, reservierten Fahrspuren unter permanenter Überwachung oder in geschlossenen Arealen denkbar.

Assistenzsysteme (SAE J3016 Level 2 und 3)

Viele der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse lassen sich jedoch kurzfristig in Bezug auf die Einführung von Assistenzsystemen übertragen:

- Die mit EasyMile getroffene Vereinbarung über die Echtzeit-Datenbereitstellung der Fahrzeugdaten auf einer Schnittstelle ihres Backend-Systems lässt sich praktisch 1:1 auch als Anforderung an Hersteller von Assistenzsystemen bzw. an Fahrzeughersteller mit Datenerfassungssystemen übernehmen:
 - Assistenzsysteme wie Hinderniserkennungssysteme müssen ausgelöste Notstopps als Events ebenso wie den Status des Assistenzsystems auf der Schnittstelle bereitstellen
- Die Langlebigkeit der verbauten Sensortechnik und die langfristige Verfügbarkeit der zugehörigen Software sind ebenfalls Muss-Kriterien bei der Beschaffung von Assistenzsystemen. Optimalerweise wird dies über eine TCO (Total Cost of Ownership)-Regelung geklärt.
- Wichtig ist auch, dass Assistenzsysteme den Fahrerinnen und Fahrern bei Ausfall aktiv informieren müssen und das Funktionieren muss über einen Selbstcheck überprüft werden können.
- Sensorsysteme müssen Verschmutzungen erkennen und einen Selbstreinigungsmechanismus haben sowie resistent gegen Vandalismus sein.

Befähigung Organisation

Durch die weitgehende Integration des SFF-Betriebs in die Standardprozesse bei BERNMOBIL zeigt sich, dass der Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs organisatorisch darstellbar ist.

7. Anpassungen Betrieb SFF nach 6 Monaten

7.1. Integration in Betriebsabläufe BERNMOBIL

Die Integration in die Betriebsabläufe bei BERNMOBIL wird weiter vorangetrieben, indem die Fahrzeugwartung des EZ10 für alle Arbeiten des EasyMile Level 1 (vgl. Kap. 0) durch die Buswerkstatt durchgeführt wird. Zwei Mitarbeitende haben die entsprechende EasyMile-Ausbildung erhalten.

In der Folge kann auch der Prozess auf der Leitstelle näher am Standard-Prozess laufen, indem bei einer Fahrzeugstörung automatisch ein entsprechender SAP-Auftrag an die Buswerkstatt ausgelöst wird.

7.2. Angebot - Betriebszeit

Die Fahrgastzahlen zeigen, dass die Auslastung zwischen 9 und 11 Uhr meist sehr tief ist. Daher wird die Betriebszeit des SFF ab 2. März 2020 an die Nachfrage angepasst und von 9-17 Uhr auf 11-19 Uhr verschoben.

7.3. Angebot – Anpassungen aufgrund Baustellen

Weiterhin wird das Angebot situativ an die Baustellen im Perimeter der Pilotstrecke angepasst. Mit dem Ende einer Gebäudesanierung kann ab März 2020 die ursprünglich geplante Anbindung des Mattelift (vgl. Kap. 3.2) realisiert werden.

Ebenfalls ab März 2020 startet die Glasfaser-Verlegung im Mattequartier und wird mit ca. 2-wöchigen Kleinbaustellen in einem grösseren Areal den Betrieb beeinträchtigen. Hier wird der Pilotbetrieb SFF situativ angepasst (manueller Betrieb oder Einschränkung je nach Situation).

Voraussichtlich ab Mai 2020 wird die Werkleitungssanierung in der Schifflaube eine grössere Anpassung des Betriebs erforderlich machen.

8. Quellen

- [1] ASTRA Webseite zu Pilotversuchen: <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/intelligente-mobilitaet/pilotversuche.html>
- [2] AVOC: Software-Lösung der Firma AMoTech für die Anbindung Automatisierter Fahrzeuge in ein ITCS-Leitsystem: <https://www.amotech.ch/de/angebot/bereich/loesungen>

9. Anhang 1: EasyMile Begriffe

Der Fahrzeug-Lieferant EasyMile verwendet eine Reihe von englischen Fachbegriffen und Spezialbezeichnungen. Diese werden in nachfolgender Tabelle kurz erklärt.

Operator	Begleitperson auf dem selbstfahrenden Fahrzeug EZ10, Ausbildung durch zertifizierten EasyMile "Training Officer"
Chief Operator	Zusatzausbildung zum "Operator", zusätzliches Wissen zur Störungsbehebung und Zugriff auf das Helpdesk-System
Training Officer	Zusatzausbildung mit der Berechtigung, weitere Personen zum "Operator" auszubilden. Voraussetzung: "Chief Operator" und ausreichend Praxiserfahrung mit dem Fahrzeug
Maintenance Officer	Ausbildung zur Ausführung von Wartungsarbeiten "Level 1" am Fahrzeug und für den manuellen Betrieb des Fahrzeugs
Setup Designer (Level 1 oder 2)	Berechtigt zur Programmierung des Fahrzeugs auf einer "Site". Level 1: nur einfache Demostrecken, Level 2: auch anspruchsvollere Strecken. Ausbildung durch EasyMile in Toulouse, für Level 2 Praxiserfahrung als Level 1 Designer
Maintenance Level 1	Alle Wartungsarbeiten rund um die Fahrzeugtechnik (Mechanik, Elektrik, Chassis) – ohne Sensoren und Software
Maintenance Level 2	Kompliziertere Wartungsarbeiten an Sensoren, Software etc. sind EasyMile vorbehalten
Site	Kartografiertes und in der Software hinterlegtes Einsatzgebiet mit zusammenhängenden Strecken und mehreren Haltestellen.
SiteAssessmentReport	Bericht zur Beurteilung einer "Site" für die Befahrung mit dem Fahrzeug EZ10, vor der Programmierung
SiteAcceptanceReport	Abschliessender Bericht nach der Programmierung, dass die "Site" zur Befahrung mit dem EZ10 von EasyMile freigegeben ist
SiteCC	Benutzerschnittstelle zur Backend-Software EZ-Maestro (Fleetmanagement)
EZ-Maestro	Backend-Software zur Überwachung der Fahrzeuge auf der Site
EZ-Move	Core-Control, low level embedded Software auf dem Fahrzeug
EZ-Drive	EM Navigator, high level embedded Software auf dem Fahrzeug

10. Anhang 2: Fahrplan Linie 23

[illegible]

11. Anhang 3: Umfrage Operatoren September 2019

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse einer Kurzumfrage unter den Begleitpersonen (BERNMOBIL und BVB), die bis Mitte September 2019 durchgeführt wurde. Aufgrund des langen Fahrzeugausfalls hatten zu diesem Zeitpunkt viele der Befragten nur wenige Einsätze auf dem SFF. Es lagen 8 Rückmeldungen vor.

Die Fragen bezogen sich auf:

- Persönliche Motivation
- Reaktion von Kolleginnen/Kollegen
- Reaktion von Fahrgästen
- Einschätzung der Auswirkungen
- Erwartungen an den Arbeitgeber

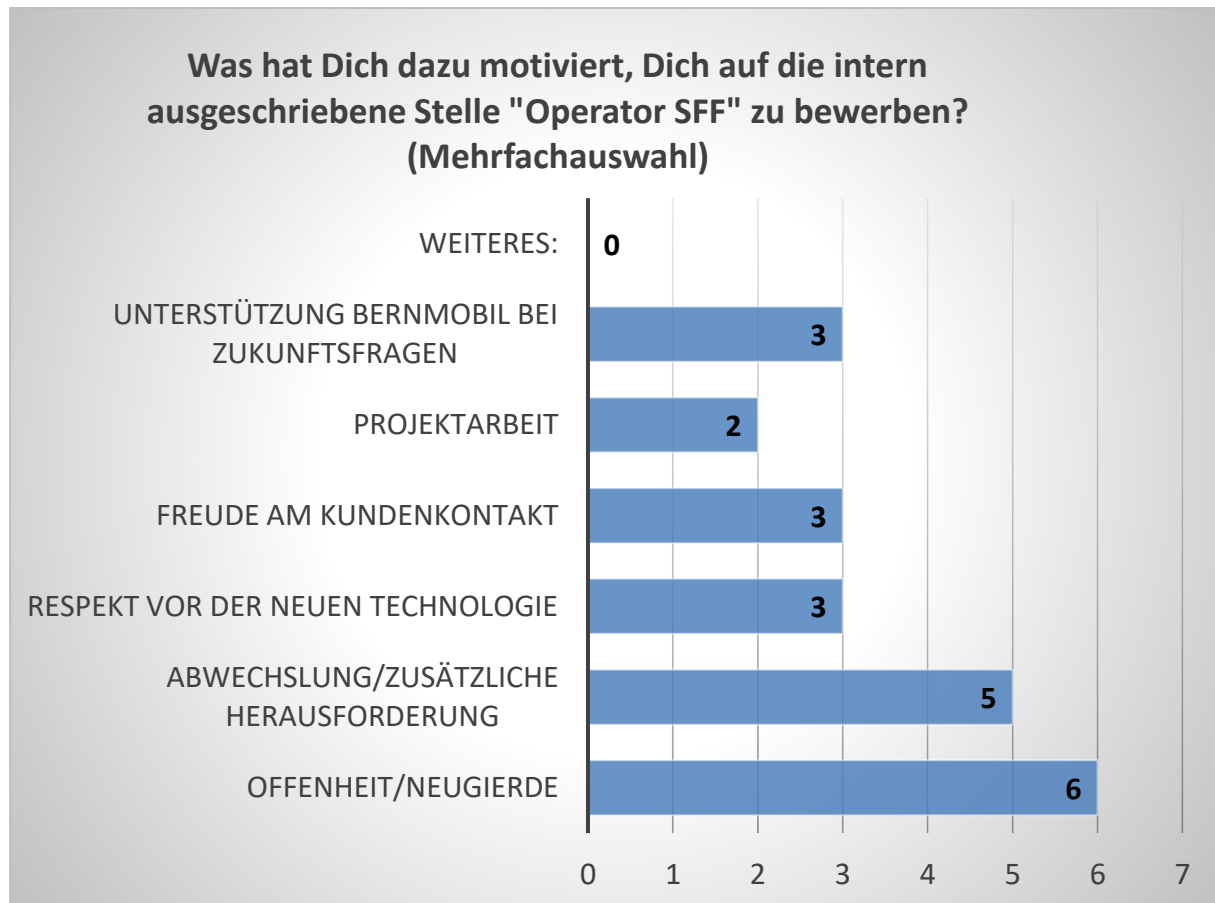


Abbildung 37: Motivation für Bewerbung als Operator

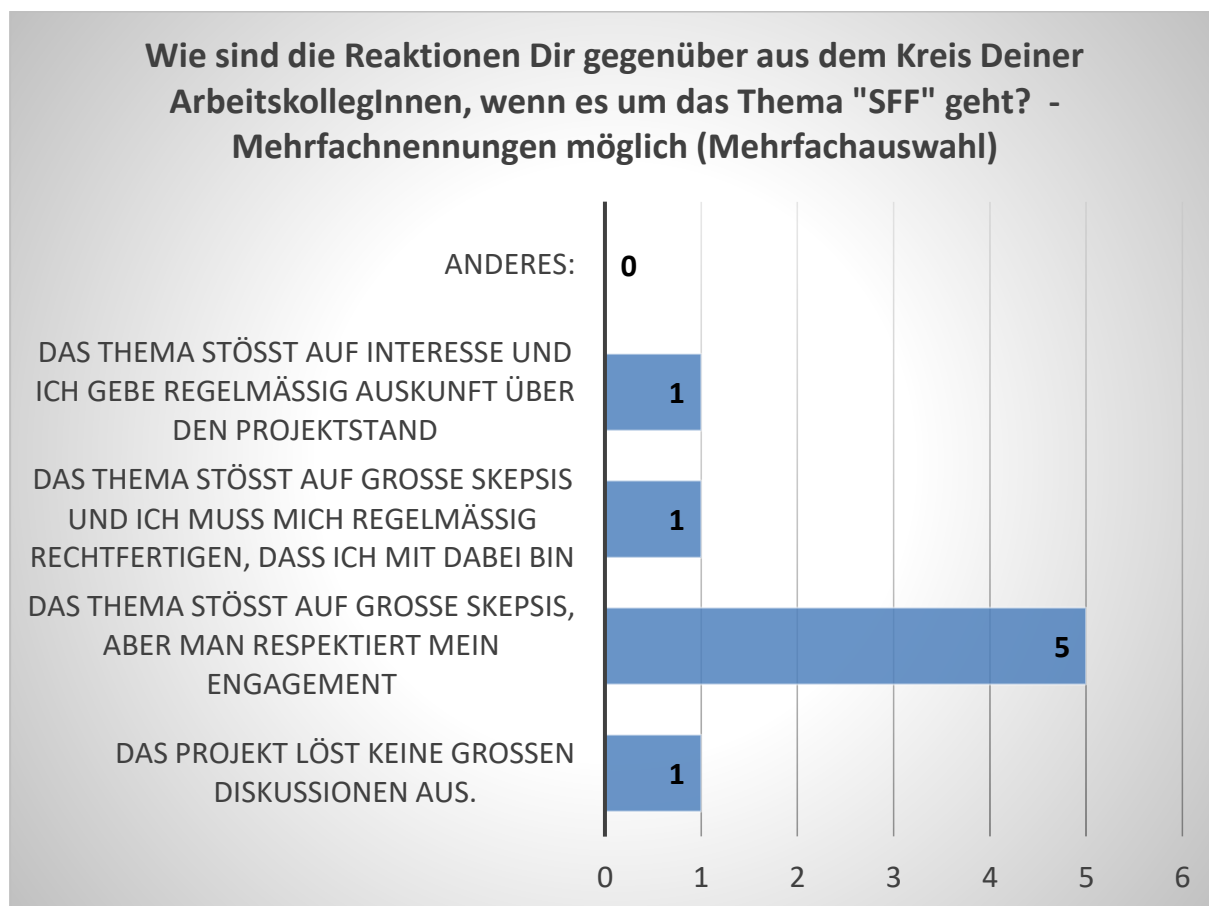


Abbildung 38: Reaktion der ArbeitskollegInnen aus dem Fahrdienst

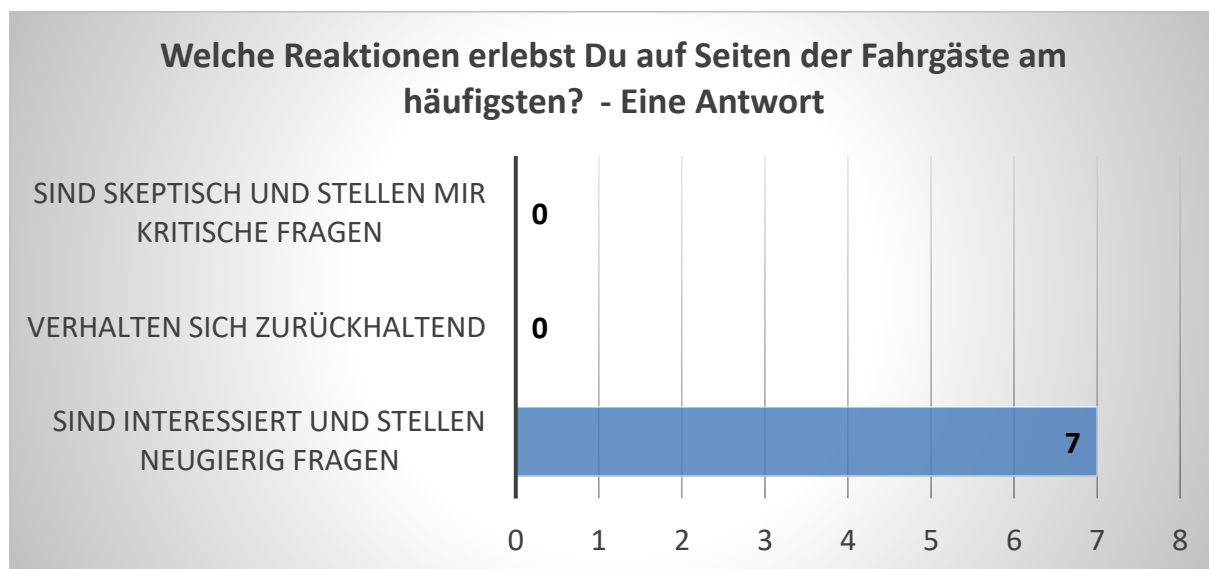


Abbildung 39: Häufigste Fahrgastreaktionen

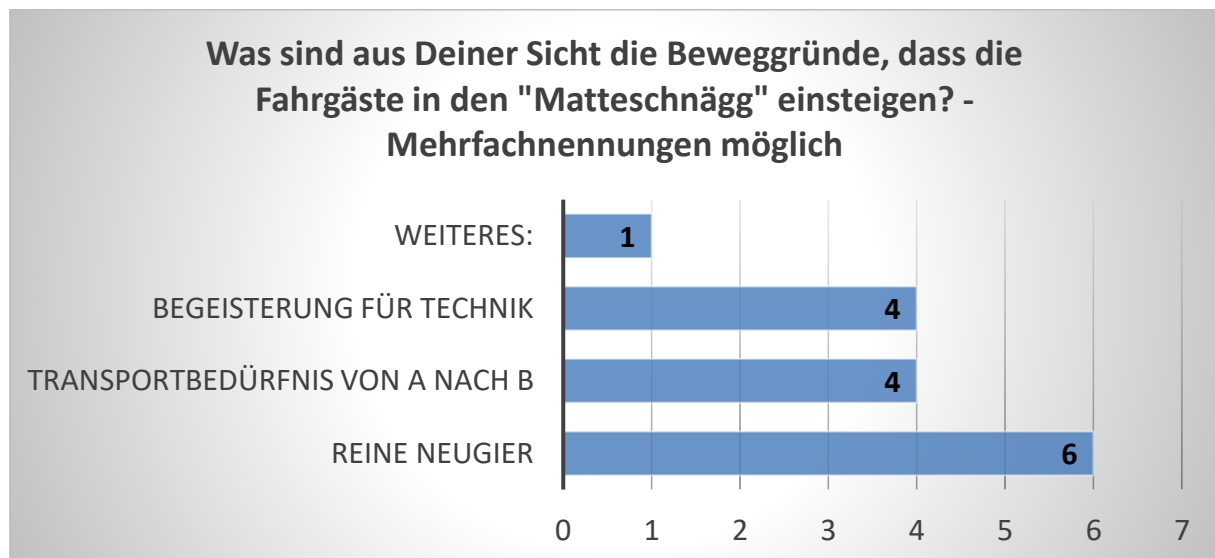


Abbildung 40: Beweggründe für Mitfahrt

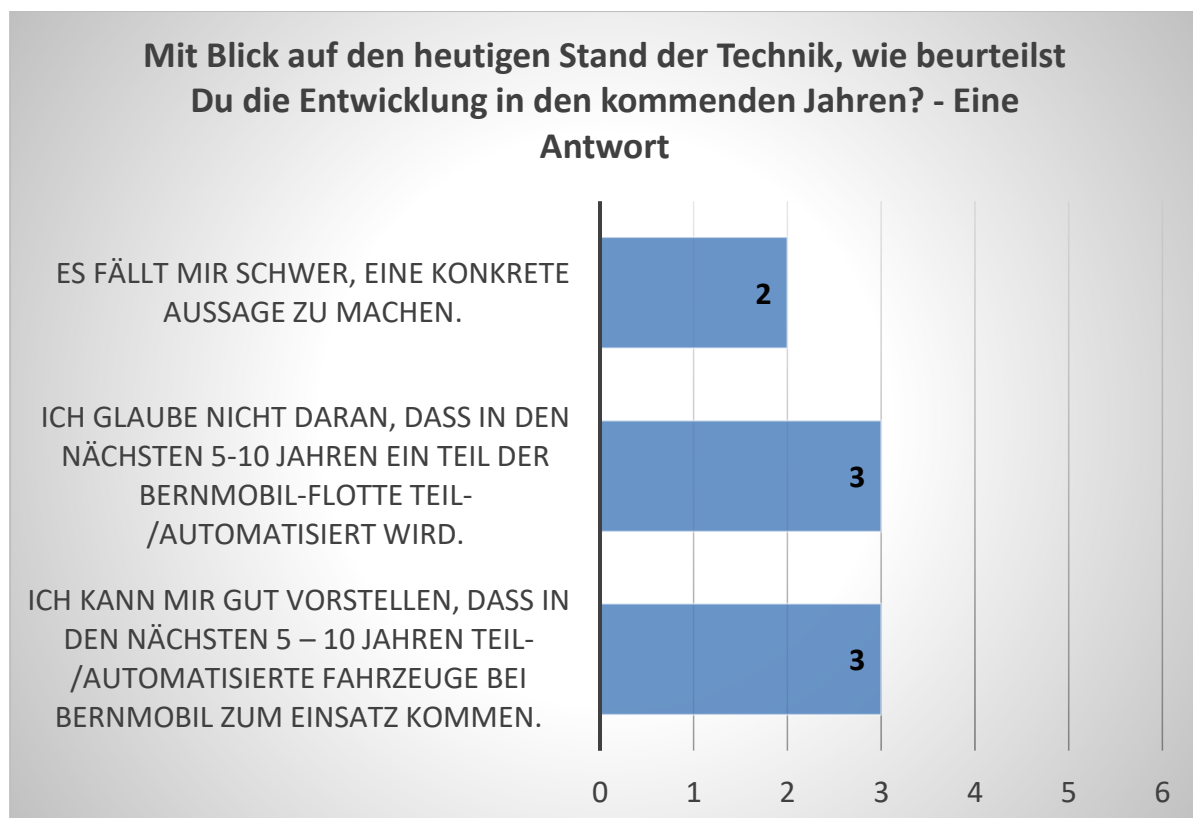


Abbildung 41: Beurteilung der Technikentwicklung

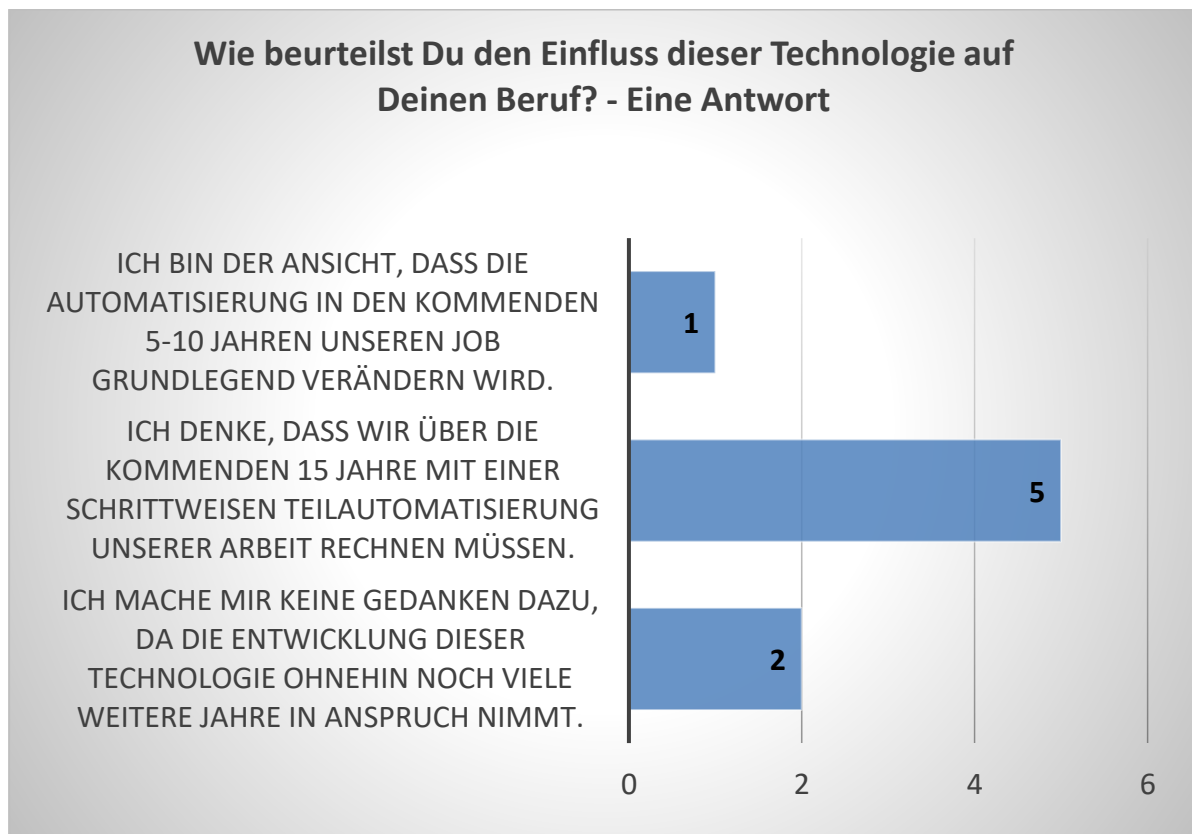


Abbildung 42: Beurteilung des Einflusses der Technik auf den Arbeitsplatz