

Bern, 16.12.2021

Unternehmensentwicklung

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

SFF BERNMOBIL – Schlussbericht Dezember 2021

Pilotprojekt selbstfahrendes Fahrzeug im ÖV bei BERNMOBIL

Bern, 16.12.2021

Inhaltsverzeichnis

Management Summary	7
1. Einleitung	9
2. Danksagung.....	10
3. Projektkontext	11
3.1. Ausgangslage.....	11
3.2. Projektinitialisierung	11
3.3. Finanzierung	11
3.4. Anmerkung zur Corona-Situation während des Projektzeitraums	11
3.5. Projektvorstellung.....	11
3.6. Projektzeitplan.....	12
3.7. Projektorganisation	13
3.8. Rechtliche Grundlagen Pilotbetrieb.....	14
4. Projektziele.....	16
4.1. Motivation der Projektpartnerinnen	16
4.2. Ziele der Projektpartnerinnen.....	16
4.2.1. Projektziele in Stufe 1.....	17
4.2.2. Projektziele in Stufe 2.....	17
4.3. Projektziele gemäss Anträgen und Bewilligungen ASTRA.....	17
4.3.1. Projektziele in Stufe 1.....	17
4.3.2. Projektziele in "Stufe 2 – neue Fahrzeuggeneration"	18
4.3.3. Projektziele in "Stufe 2 – OnDemand-Betrieb"	18
5. Merkmale des Pilotbetriebs	19
5.1. Projektaufbau zum Erreichen der Ziele	19
5.2. Überblick Ausnahmegewilligungen.....	19
5.3. Geografische Lage der Standorte des Pilotbetriebs in Bern	19
5.4. Demostrecke.....	20
5.5. Pilotstrecke	21
5.5.1. Wahl der Pilotstrecke im Stadtgebiet von Bern	21
5.5.2. Pilotstrecke im Zustand Mitte 2019	22
5.5.3. Pilotstrecke im Zustand Anfang 2020	22
5.5.4. Pilotstrecke im Zustand Herbst 2020.....	23
5.5.5. Pilotstrecke im Zustand 2021.....	23
5.6. EasyMile-Fahrzeuge und eingesetzte Software	25
5.6.1. Initiale Beschaffung	25
5.6.2. EasyMile Begriffswelt – Hardware, Software und Rollen	26
5.6.3. Test und Zulassung EasyMile EZ10 Gen2	27
5.6.4. Beschaffung EZ10 Gen3.....	27
5.6.5. Zulassung EZ10 Gen3.....	28
5.6.6. Überblick der Anpassungen an den Fahrzeugen	30
5.6.7. Überblick der Software-Aktualisierungen.....	30
5.7. Angebotskonzepte der Linie 23	30
5.7.1. Grundsätzliche Eckpunkte des Angebots	30
5.7.2. Angebotskonzept Linie 23 – Fahrplanbetrieb ein Fahrzeug	30

5.7.3. Angebotskonzept Linie 23 - Ergänzung ab August.2020	31
5.7.4. Angebotskonzept Rufbus Linie 23 – OnDemand	31
5.8. Fahrgastkommunikation für den Fahrplanbetrieb	32
5.9. Fahrgastkommunikation für den OnDemand-Betrieb.....	32
5.10. IT-Umgebung für den Fahrplanbetrieb	32
5.11. IT-Umgebung für den OnDemand-Betrieb.....	33
5.12. Betriebsorganisation für den Fahrplanbetrieb.....	35
5.13. Angepasste Organisation für den OnDemand Betrieb.....	37
6. Projekterfahrungen zur Inbetriebnahme der automatisierten Fahrzeuge	39
6.1. Inbetriebnahme des EZ10 Gen2 inkl. Anbindung an die Leitstelle	39
6.2. Inbetriebnahme der EZ10 Gen3 inkl. Anbindung an Leitstelle bzw. OnDemand-System	40
7. Betriebserfahrungen SFF	42
7.1. Betrieb ein Fahrzeug im Fahrplanbetrieb – Juli 2019 bis Juni 2020	42
7.2. Betrieb zwei Fahrzeuge im Fahrplanbetrieb- Juli bis Dezember 2020.....	45
7.3. Betrieb zwei Fahrzeuge im OnDemand-Betrieb – Januar bis Juni 2021	47
7.4. Weitere Betriebserfahrungen	50
8. Detailanalysen	51
8.1. Fragestellungen	51
8.2. Methodik und Tools.....	52
8.3. Grundlagendaten zu manuellen Eingriffen	52
8.3.1. Datenanalyse der Notstopps	53
8.3.2. Anteil automatischer bzw. manueller Betrieb	58
8.4. Datenanalyse OnDemand-Buchungen.....	60
8.5. Zusammenstellung besondere Vorkommnisse im Projektzeitraum	64
8.6. Umfragen	67
8.6.1. Akzeptanz bei Fahrgästen.....	67
8.6.2. Akzeptanz bei Anwohnenden	67
8.6.3. Akzeptanz bei Operatoren.....	68
8.7. Schlussfolgerungen zu den Fragestellungen.....	68
8.7.1. Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmenden	68
8.7.2. Heikle Manöver.....	69
8.7.3. Akzeptanz Verkehrsteilnehmer	69
8.7.4. Infrastruktur	69
8.7.5. Verhalten im Verkehr	71
8.7.6. Technische Erkenntnisse	71
8.7.7. Vernetzung	72
8.7.8. Vergleich der Fahrzeuggenerationen 2 und 3 des EZ10.....	72
8.7.9. Vergleich EZ10 Gen3/Gen3b.....	73
8.7.10. OnDemand Haltestellen	74
8.7.11. OnDemand Betrieb	75
8.7.12. Richtlinien zur Festlegung der Haltestellen	76
8.8. Integration in die Leitstelle	76
9. Erkenntnisse aus dem Pilotprojekt	77
9.1. Reifegrad der Fahrzeuge.....	77

9.2.	Anbindung der EasyMile-Systeme an die BERNMOBIL IT-Landschaft	78
9.3.	OnDemand Betrieb Rufbus Linie 23.....	79
9.4.	Auswirkungen auf die Organisation eines ÖV-Unternehmens	80
9.5.	Auswirkungen auf den städtischen Verkehr	80
9.6.	ÖV Anwendungsszenarien in den nächsten 10 Jahren.....	81
9.7.	Herausforderungen durch automatisierte Fahrzeuge im ÖV	82
9.8.	Pilotversuche mit automatisierten Fahrzeugen in der Schweiz	82
10.	Zusammenfassung.....	84
11.	Quellen.....	85
12.	Anhang	86
12.1.	EasyMile Begriffe	86
12.2.	Steckbrief EasyMile EZ10 Generation 2	87
12.3.	Steckbrief EasyMile EZ10 Generation 3	90
12.4.	Tabellenfahrplan im ersten Betriebsjahr, 1 Fahrzeug.....	92
12.5.	Tabellenfahrplan mit 2 Fahrzeugen	93
12.6.	Datenanalyse OnDemand-Betrieb	94
13.	Übersicht beiliegende Anhänge	96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zeitplan Gesamtprojekt, Stand Januar 2021.....	12
Abbildung 2: Inhalt der Berichte.....	13
Abbildung 3: Projektumfeld SFF BERNMOBIL, Stand Januar 2020 (Start Stufe 2)	13
Abbildung 4: Projektorganisation SFF BERNMOBIL, Stand Januar 2020	14
Abbildung 5: Die Ausnahmegewilligung erfordert die Zustimmung der aufgeführten Ämter.....	14
Abbildung 6: Geografische Lage von Pilotstrecke und Depotstandorte in Bern	20
Abbildung 7: Demostrecke auf dem Gelände des Tramdepots Bolligenstrasse.....	20
Abbildung 8: erweiterte Demostrecke für die Stufe 2 des Projekts.....	21
Abbildung 9: Pilotstrecke für Stufe 1 gemäss ursprünglicher Planung	22
Abbildung 10: Pilotstrecke, wie sie im Betriebszeitraum Juli bis Dezember 2019 befahren wurde.	22
Abbildung 11: Pilotstrecke SFF ab 9. März 2020	23
Abbildung 12: Variantenprüfung aufgrund Werkleitungsbau Schiffhaube: Entscheid für West-Ast.....	23
Abbildung 13: Streckennetz "OnDemand" gemäss Darstellung auf Infotafel mit QR-Code	24
Abbildung 14: Übersicht über die EasyMile-Begriffswelt aus Fahrzeugen, Software-Komponenten und Benutzerrollen.	26
Abbildung 15: Einsatz des EZ10 Gen2.....	27
Abbildung 16: Einsatzzeitraum der EZ10 Gen3	28
Abbildung 17: Operator-Arbeitsplatz im Zustand August 2020.....	29
Abbildung 18: Limitierung Höchstgeschwindigkeit und Personenzahlen	29
Abbildung 19: Beleuchtungselemente vorne	29
Abbildung 20: Fahrplanauskunft sbb.ch für den 23.1.2020	32
Abbildung 21: Schematische Darstellung der Leitstellenanbindung	33
Abbildung 22: Die Komponenten der T.DiMo-Software	34
Abbildung 23: Workflow Buchungssystem T.DiMo und EasyMile Mission API	35
Abbildung 24: Kommunikation zwischen Operator, Leitstelle und SFF-Team.....	36
Abbildung 25: Kommunikationswege im störungsfreien OnDemand-Betrieb.....	37
Abbildung 26: Kommunikationswege im störungsfreien OnDemand-Betrieb mit Umbuchung oder Stornierung durch Fahrgäste.....	37
Abbildung 27: Kommunikationswege im OnDemand-Betrieb für den Fall einer Betriebsstörung.....	38
Abbildung 28: Aarstrasse mit weissen Orientierungstafeln an den Strassenlaternen.	39
Abbildung 29: Darstellung des Fahrzeugs 301 in den Ansichten des LIO-Systems bei BERNMOBIL.....	40
Abbildung 30: Betriebszeiträume zwischen Juli 2019 und Juni 2021.....	42
Abbildung 31: Verfügbarkeit des Fahrzeugs EZ10	43
Abbildung 32: Fahrgastzahlen und Laufleistung im Betrachtungszeitraum	43
Abbildung 33: Integration SFF-Betrieb in Standardprozesse und Abweichungen (in rot)	44
Abbildung 34: Laufleistung im Betrachtungszeitraum, oben Fahrzeug 037 (rot), unten Fahrzeug 038 (orange)	46
Abbildung 35: Betriebsdaten der Fahrzeuge 037 und 038 im OnDemand-Betrieb.....	47
Abbildung 36: Situation Eiswagen mit offener Klappe bei Gelateria	48
Abbildung 37: Verteilung der Nothalt-Kategorien im Oktober und November 2019.....	54
Abbildung 38: Übersicht Nothalt mit Grund im Betriebszeitraum Januar bis März 2020	54
Abbildung 39: Mittelwert und Standardabweichung für die Anzahl der Störhalte pro km, getrennt nach Strassenbelag	55
Abbildung 40: Übersicht Nothalt mit Grund im Zeitraum März bis Juni 2021 (rote Linie: gefahrene km pro Betriebstag)	56
Abbildung 41: Notstopps pro Betriebstag und km.....	56
Abbildung 42: Korrelation der Nothalte aufgrund von Hindernissen mit der Regenmenge.....	57
Abbildung 43: Korrelation Nothalte aufgrund von Hindernissen mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit.....	57
Abbildung 44: Monatswerte Fahrzeug 301 im ersten Betriebsjahr.....	58
Abbildung 45: Zusammenfassung der Monatswerte der Fahrzeuge 302 und 303 im OnDemand-Betrieb im Jahr 2021.....	58
Abbildung 46: Anteil automatischer Betrieb pro Streckenabschnitt in % (nur Zeiten mit v > 0 km/h)	59
Abbildung 47: Zahl der Anfragen mit und ohne erfolgte Buchung (im Zeitraum März bis Juni 2021)	61
Abbildung 48: Zahl der Buchungen pro eindeutige User-ID (Zeitraum März bis Juni 2021).....	61
Abbildung 49: Ein/Aussteiger pro Haltestelle.	62
Abbildung 50: Ein/Aussteiger nach Haltestelle, Kartendarstellung.	63
Abbildung 51: Buchungen und gefahrene km pro Woche	63
Abbildung 52: die drei eingesetzten EZ10-Fahrzeuge, links die neuen "Gen3", rechts das alte "Gen2"	72
Abbildung 53: Vergleich Gen3 (oben) zu Gen3b (unten)- Verhalten vor und nach Disengagements.	74
Abbildung 54: Distanz (km) pro Tag und Fahrzeug nach Betriebsart (automat./manuell) im Zeitraum 1.2.-30.6.2021	94
Abbildung 55: Anteil automatischer Betrieb pro Tag und Fahrzeug in % (nur Zeiten mit v > 0 km/h).....	95

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
BFH	Berner Fachhochschule
ewb	Energie Wasser Bern
DFI	Dynamische Fahrgastinformation (elektronische Haltestellen-Anzeiger)
DTC	Dynamic Test Center in Vauffelin
GNSS	Global Navigation Satellite System (inkl. GPS, GLONASS, ...)
LIDAR	Light Detection and Ranging – laserbasiertes Abtastverfahren der Umgebung
LIO	Software-System zur Überwachung von Linienverkehr, Firma Trapeze
LSA	Lichtsignalanlage
MRS	Sick MRS1000 Lidar
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PBG	Personenbeförderungsgesetz
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SCALA	Typ des eingesetzten Lidars
SFF	Selbstfahrendes Fahrzeug
SVA/SVSA	Strassenverkehrs- und Schifffahrtsamt Kanton Bern
T.DiMo	OnDemand Buchungssystem der Firma Trapeze
TVS	Direktion für Tiefbau, Verkehr und Stadtgrün der Stadt Bern
UVEK	Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VIN	Vehicle Identification Number
VLP16/32	Typ des eingesetzten Lidars: "Velodyne VLP16/VLP32 3D Lidar"

Management Summary

BERNMOBIL führte von 2018 bis 2021 mit den Projektpartnern Stadt Bern, Migros Aare, ewb und SBB das Pilotprojekt "selbstfahrendes Fahrzeug im ÖV" durch. Kernelement des Projekts war der Betrieb von selbstfahrenden Kleinbussen zwischen Juli 2019 und Juni 2021 im Stadtgebiet von Bern. Es kamen Fahrzeuge vom Typ EZ10 des französischen Herstellers EasyMile zum Einsatz.

Bei der Ausarbeitung des Pilotversuchs wurde auf die Erfahrungen von in der Schweiz bereits laufenden Pilotversuchen aufgebaut. Der Berner Pilotversuch zeichnete sich diesen gegenüber durch folgende Kernelemente aus:

- Eine weitgehende Integration des Pilotbetriebs in die Standard-Betriebsprozesse bei BERNMOBIL. Die Fahrzeuge verkehrten als "Linie 23" bzw. als "Rufbus Linie 23" und wurden von Fahrpersonal begleitet.
- Eine technische Anbindung an das Leitstellen-System zur Überwachung.
- Eine Pilotstrecke, auf der das Fahrzeug-Verhalten in Engstellen mit Gegenverkehr, in Steigungsabschnitten sowie auf Kopfsteinpflaster untersucht werden konnte.
- Die technische Anbindung an ein OnDemand-Buchungssystem, das Fahraufträge direkt an die Fahrzeuge schickte.

Das EasyMile-Gesamtsystem aus Fahrzeug und Kontroll-Software funktionierte sehr zuverlässig. Der Fahrzeug-Zustand war jederzeit im EasyMile-Überwachungssystem sichtbar. Die EasyMile-Lösung wirkte durchdacht und zeigte gut, wie wichtig das reibungslose Zusammenspiel aller Komponenten für den Tagesbetrieb ist.

Die Fahrzeuge waren im Mittel in 75 % der täglichen Betriebszeit automatisiert unterwegs, in der übrigen Zeit mussten sie manuell gesteuert werden. Eingriffe durch die Begleitperson waren also die Regel und auch im automatisierten Betrieb musste die Begleitperson jederzeit aufmerksam sein. Daraus lässt sich ableiten, dass die Sensortechnik und Software der automatisierten Fahrzeuge noch erheblich weiterentwickelt werden müssen, damit diese dereinst in einer komplexen Umgebung wie dem Matte- und Marziliquartier in Bern unbegleitet fahren können.

Im automatisierten Betrieb hielten sich die Fahrzeuge jedoch präzise an die programmierten Fahrspuren und stoppten zuverlässig vor Hindernissen. Die Lokalisierung und Hinderniserkennung der Fahrzeuge funktionierten somit sehr zuverlässig. Für einen ÖV-Betrieb als hinderlich erwies sich, dass der automatisierte Betrieb bei schlechtem Wetter (Starkregen, Schnee) sowie aufgrund gewachsener Vegetation nicht zuverlässig funktionierte.

Aus Sicherheitsgründen waren die Fahrzeuge mit maximal 14 km/h und im Durchschnitt mit etwa 6 km/h unterwegs. Während diese Geschwindigkeit für Fussgängerbereiche gut geeignet war, wirkten die langsamen Fahrzeuge im motorisierten Verkehr als Hindernisse.

Der Einsatz automatisierter Fahrzeuge mit Begleitperson zeigte unter anderem in folgenden Bereichen Auswirkungen auf ein ÖV-Unternehmen:

- IT: die Verfügbarkeit von Fachexperten wie auch die Zuverlässigkeit der IT-Systeme sind essenziell für einen stabilen Betrieb automatisierter Fahrzeuge.
- Leitstelle: die Fahrzeuge müssen mit ihrem Status jederzeit sichtbar sein und geeignete Ereignismeldungen senden. Dabei müssen sich die neuen IT-Systeme nahtlos in die bestehenden Arbeitsplätze integrieren lassen.
- Technik: eine gute Schulung des Werkstatt-Personal ermöglicht schnelle Reaktionszeiten im Fall von Störungen und Wartungsaufgaben der neuen Technologien (Sensoren).
- Fahrpersonal: das Anforderungsprofil des Fahrpersonals als Begleitperson verschiebt sich hin zu Überwachungsaufgaben, zur Fahrgastkommunikation sowie zur flexiblen Störungsbehebung. Praxiserfahrung im ÖV-Stadtverkehr bleibt aber unverzichtbar, um im Verkehrsfluss mit den anderen Verkehrsteilnehmenden einen stabilen Betrieb sicherzustellen.

Auf Seiten der Systemlieferanten ist eine direkte Hotline für den ÖV-Betreiber ebenso zwingend erforderlich wie kurze Reaktionszeiten, ausfallsichere, redundante Backend-Systeme und das Beherrschen der Software-Entwicklung inkl. Security- und Release-Management.

Die Rückmeldungen der Fahrgäste in den Umfragen waren überwiegend positiv, wobei bei einzelnen Aspekten durchaus Verbesserungsbedarf erkannt wurde. Als sehr vertrauensfördernd bei der Mitfahrt erwiesen sich die Begleitpersonen auf den Fahrzeugen.

Das Pilotprojekt somit hat gezeigt, dass die eingesetzten Fahrzeuge auf öffentlicher Strasse noch nicht ohne permanente Begleitung verkehren können. Die Technologie zeigt noch erheblichen Weiterentwicklungsbedarf. Ein Anwendungsfall aus Sicht eines ÖV-Betreibers ist aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus erst dann möglich, wenn die automatisierten Fahrzeuge nicht mehr 1:1 begleitet werden müssen.

Daraus lassen sich vier Stossrichtungen ableiten:

1. Die Fahrzeugautomatisierung wird zunächst nur in Form von Assistenzsystemen genutzt, die das Fahrpersonal unterstützen (Analog zur Entwicklung im Automobilbereich).
2. Bei den Einsatzszenarien werden zunächst "geschützte Räume" wie z.B. Depot-Fahrten näher geprüft. Dort lassen sich die Umgebungsbedingungen so vereinfachen, dass diese von automatisierten Fahrzeugen beherrscht werden können.
3. Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Fernüberwachung und -steuerung aus einer Leitstelle, so dass eine Person mehrere Fahrzeuge überwachen und notfalls eingreifen kann. So wäre ggf. eine Wirtschaftlichkeit zu erreichen, ohne dass die Fahrzeuge jede Situation beherrschen müssen.
4. Empfohlen wird zudem ein aktives Verfolgen der Sensor- und Software-Entwicklung in den Bereichen "Allwettertauglichkeit" und "intelligenter Umgang mit Pflanzen". Wären diese zwei Aspekte zufriedenstellend gelöst, wäre ein Einsatz der automatisierten Fahrzeuge z.B. in räumlich abgetrennten Fahrspuren denkbar.

1. Einleitung

Die Entwicklung der Mobilität war in ihrer Geschichte gezeichnet von tiefen Einschnitten, die Transportunternehmen immer wieder herausforderten. Als Beispiel sei die Verbreitung der Eisenbahn genannt, die z.B. mit der Eröffnung der Gotthardlinie die pferdebespannte Gotthardpost überflüssig machte. Oder die Elektrifizierung der Eisenbahnen, der sowohl Infrastrukturseitig wie auch auf Seiten der Lokomotiven und des zugehörigen Personals einschneidende Veränderungen folgten. Schliesslich in den Nachkriegsjahren die Massenmotorisierung auf der Strasse als sehr erfolgreiche Konkurrenz des ÖV-Systems.

Seit ein paar Jahren ermöglicht der rasante technologische Fortschritt im Bereich der Sensorik sowie der Computer-Hard- und Software enorme Entwicklungsschritte in Richtung Automatisierung der Fahrzeuge. So gehört z.B. der Abstandstempomat heute zur Standardausstattung vieler Pkws. Das "Automatisierte Fahren" gilt als einer der Megatrends in der Mobilitätsbranche, auch im ÖV.

Es gehört zu einer verantwortungsvollen Unternehmensführung, derartige Veränderungen rechtzeitig zu erkennen und das Unternehmen darauf vorzubereiten. Eine Automatisierung der Fahrzeuge betrifft alle Unternehmensbereiche von BERNMOBIL, von der Beschaffung über die Instandhaltung, die Informatik, die Produktionsplanung, die Produktionssteuerung, den Fahrdienst bis zur Angebotsplanung. Neben den internen Auswirkungen interessierte insbesondere auch die Frage der Akzeptanz durch Fahrgäste und die anderen Verkehrsteilnehmenden. 2017 entschieden daher die Geschäftsleitung und der Verwaltungsrat von BERNMOBIL, die Auswirkungen der Fahrzeugautomatisierung auf das eigene ÖV-Unternehmen durch diesen Pilotversuch genauer zu analysieren. Das Projekt konnte dank der Mitfinanzierung und konstruktiven Mitwirkung der Projektpartner "Stadt Bern", "Migros Aare", "ewb" Anfang 2018 starten, die Projektpartnerin "SBB" kam dann noch ab 2020 dazu.

Bei diesem Pilotprojekt "selbstfahrendes Fahrzeug im ÖV" stand das Lernen im Vordergrund. In der Vorbereitungsphase sowie in den zwei Betriebsjahren sollten möglichst viele Erkenntnisse gewonnen werden. (SFF Projekt als "Learning Journey" für alle Beteiligten).

Die Ergebnisse sind nun in dem vorliegenden Schlussbericht sowie den referenzierten Zwischenberichten dokumentiert. Sie bilden die Grundlage für die Ableitungen von Prioritäten im Bereich automatisiertes Fahren für die kommenden Jahre.

Die weitere Entwicklung verfolgt BERNMOBIL nun als Mitglied der "Swiss Association of Autonomous Mobility" (SAAM) [5], in der sich Akteure aus öffentlicher und privater Mobilität, Forschungseinrichtungen und Firmen national koordinieren und gegenseitig unterstützen.

2. Danksagung

Herzlichen Dank

- an die Projektpartner, dass sie dieses Projekt mit ihren Finanzierungszusagen erst ermöglicht haben, und in der Folge mit sehr konstruktivem Feedback begleitet haben.
- an die Projektpartner für die konstruktive Mitwirkung in der Umsetzung, insbesondere
 - an die Stadt Bern betreffend die Bewilligungs- und Baumassnahmen rund um die Pilotstrecke
 - an die Migros Aare betreffend die Folierung der Fahrzeuge
 - an die ewb betreffend die Einrichtung der Ladestationen
 - und an die SBB mit der aktiven Rolle im Projektteam und dem Einbringen ihrer wertvollen Erfahrungen im OnDemand-Betrieb
- an die Entscheidungsträger/innen im VR sowie in der GL von BERNMOBIL für die Unterstützung des Projekts.
- Projektteam SFF für das Engagement bei der Ausarbeitung und Umsetzung des SFF-Betriebs
- Allen involvierten Mitarbeitenden von BERNMOBIL, insbesondere
 - aus Fahrdienst, Leitstelle, Dienstplanung, Sonderanlässe, Unfalldienst und weiteren Betriebsabteilungen
 - aus Informatik, Buswerkstatt, Logistik, Baudienst und anderen Technikabteilungen
 - aus dem Bereich Finanzen und Immobilien
 - aus den Abteilungen Kommunikation, Netzmanagement und Infocenter
 - aus der Unternehmensentwicklung
- Die BVB für die Bereitstellung von Operatoren
- Den Mitarbeitenden der Migros Aare für die aufwändige Folierung der Fahrzeuge
- Allen involvierten Mitarbeitenden der Stadtberner Abteilungen, insbesondere Tiefbau und Verkehrsplanung
- Den genehmigende Bundesämter ASTRA, BAV und BAKOM sowie Strassenverkehrsamt Bern für die äusserst konstruktive Zusammenarbeit.
- Alle weiteren in die Genehmigung involvierten Amtsstellen, u.a. von Seiten der Kantonspolizei und der Berufsfeuerwehr Bern.
- Allen Mitwirkenden in dem Begleitgremium sowie den Quartierorganisationen für die kritische Begleitung des Projekts
- Allen weiteren Projektpartnern, namentlich
 - EasyMile SA, Toulouse
 - EasyMile GmbH, Berlin
 - Amotech, Trapeze, T.DiMo
 - Spoud AG
 - Berner Fachhochschule, Departement Wirtschaft, Prof. Stefan Rose
 - Bruno Schoch, Beratung bezüglich Beschaffung
 - Den Vertretern der Marzilibahn und des Mattelifts
 - Karl Zimmermann, Vermieter Garagenstandort

3. Projektkontext

3.1. Ausgangslage

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

Aus ähnlichen Überlegungen – aus Sicht der städtischen Verkehrsplanung - hat die Stadt Bern die Durchführung eines Pilotversuchs mit selbstfahrenden Fahrzeugen in ihren Legislaturrichtlinien 2017-2020 festgelegt.

Die konkreten Ziele des Projekts werden in Abschnitt 4 ausführlich erläutert.

3.2. Projektinitialisierung

Auf den vorgängig genannten Grundlagen haben BERNMOBIL und die Stadt Bern Anfang 2018 das "Pilotprojekt selbstfahrendes Fahrzeug im ÖV", kurz "SFF", initiiert und zusammen mit den Projektpartnern ewb und Migros Aare die Finanzierung für die Umsetzung des Projekts und die ersten 12 Monate Pilotbetrieb aufgelegt. Die Umsetzung erfolgt auf Basis des Entscheids des BERNMOBIL Verwaltungsrats vom 18. Dez. 2017. Das erste Betriebsjahr startete im Juli 2019 und wurde im Juni 2020 abgeschlossen.

Im Dezember 2019 haben die bisherigen Projektpartner die SBB als weitere Projektpartnerin gewinnen können sowie die Finanzierung und Durchführung der sogenannten "Stufe 2" mit weiteren 12 Monaten Pilotbetrieb und erweitertem Projektumfang beschlossen. Der Pilotbetrieb wurde im Juni 2021 planmässig abgeschlossen.

3.3. Finanzierung

Die Finanzierung des Projekts erfolgte vollständig durch die Projektpartner, wobei der Anteil BERNMOBIL aus der Spezialfinanzierung der gewerblichen Leistungen stammte. Für dieses Projekt wurden somit keine finanziellen Mittel aus dem abgeltungsberechtigten ÖV (*) eingesetzt.

(*Anmerkung für Lesende ausserhalb der Schweiz: "Die *Abgeltung* ist die Entschädigung der ungedeckten Kosten eines bestellten Leistungsangebotes im Bereich des regionalen Personenverkehrs" -siehe <https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/glossar/abgeltung-im-regionalen-personenverkehr.html>)

3.4. Anmerkung zur Corona-Situation während des Projektzeitraums

Während der Durchführung des Pilotbetriebs hat die seit März 2020 in Europa grassierende Corona-Pandemie grosse Teile des öffentlichen Lebens und damit auch die Durchführung dieses Versuchs massiv beeinflusst. Als Folge der Beschränkungen gingen die Fahrgastzahlen und Einnahmen der ÖV-Unternehmungen signifikant zurück und haben zu neuen Prioritäten geführt.

Diese Pandemie und ihre Auswirkungen waren jedoch im Herbst 2019 - zum Zeitpunkt der Beschlüsse und der zugehörigen Verträge zur Umsetzung der Stufe 2 des Projekts SFF - noch nicht absehbar. Auch die Verträge mit den Lieferanten wurden deutlich vor der Pandemie unterzeichnet. Daher hielten es die Projektpartner für sinnvoll, den Pilotbetrieb – trotz zwischenzeitlicher Betriebseinschränkungen - wie vorgesehen zu Ende zu führen, um möglichst viele Erkenntnisse aus dieser Investition zu gewinnen.

Die beim ASTRA vorsorglich beantragte Verlängerung der Ausnahmegewilligung bis 31.12.2021 wurde jedoch dann nicht mehr genutzt.

3.5. Projektvorstellung

Das "Pilotprojekt selbstfahrendes Fahrzeug im ÖV" bestand aus den nachfolgend aufgeführten inhaltlichen Elementen. Entsprechend der separaten Grundlagen-Entscheide werden diese den beiden Projektstufen "SFF Stufe 1" und "SFF Stufe 2" zugeordnet.

"SFF Stufe 1":

- die Beschaffung und Zulassung eines selbstfahrenden Fahrzeugs

- die Erlangung der Bewilligungen für die Nutzung der Pilotstrecke
- die Einreichung des genehmigungsfähigen Ausnahmegesuchs bei den Bundesämtern BAV, ASTRA sowie BAKOM
- die organisatorische Vorbereitung seitens BERNMOBIL für den Pilotbetrieb des selbstfahrenden Fahrzeugs
- die Inbetriebnahme des selbstfahrenden Fahrzeugs auf abgeschlossenem Betriebsgelände
- den Betrieb des selbstfahrenden Fahrzeugs im Rahmen eines publizierten Fahrplans während 12 Monaten
- die Auswertung des Pilotbetriebs

"SFF Stufe 2":

- Beschaffung zweier neuer selbstfahrenden Fahrzeuge auf Basis von Optionen im bestehenden Vertrag
- Zulassung der neuen Fahrzeuge
- Erweiterung der Pilotstrecke (für das Angebot ab 2021)
- Erweiterung der Bewilligungen seitens ASTRA und BAV
- 6 Monate Betrieb zweier Fahrzeuge nach Fahrplan – Juli bis Dezember 2020
- 6 Monate Betrieb zweier Fahrzeuge auf Bestellung (OnDemand) – Januar bis Juni 2021
- die Auswertung des Pilotbetriebs

3.6. Projektzeitplan

Die vorgängig dargestellten Projektelemente wurden gemäss folgendem Projektzeitplan bearbeitet (Abbildung 1). Die Elemente der "Stufe 1" sind grün dargestellt, jene der "Stufe 2" blau. Dagegen sind die wichtigsten Elemente des parallellaufenden Genehmigungsprozesses unter Federführung von ASTRA und BERNMOBIL rot dargestellt.:

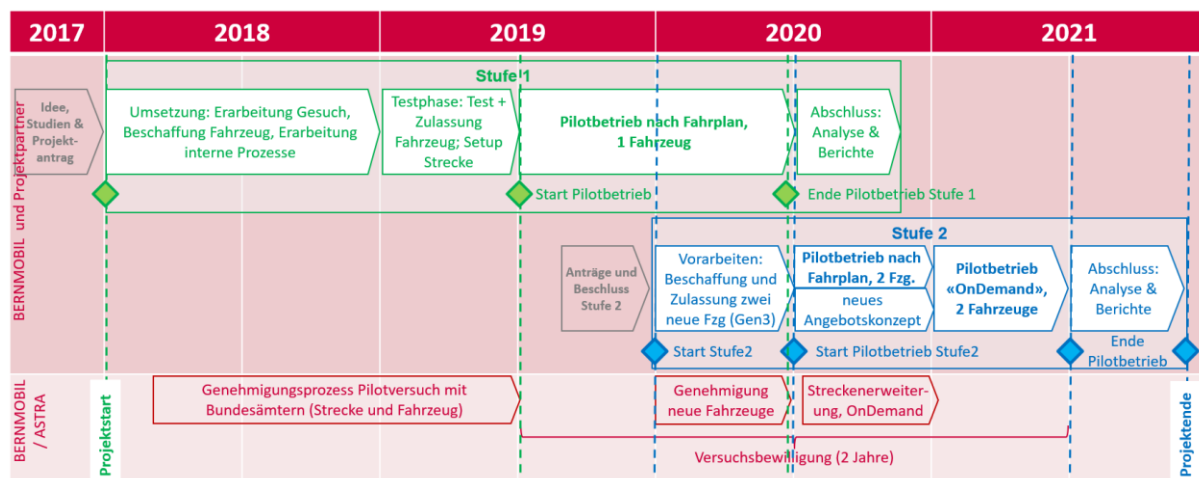


Abbildung 1: Zeitplan Gesamtprojekt, Stand Januar 2021

Die Zwischenberichte und dieser Schlussbericht bewerten rückblickend die erzielten Erkenntnisse. Dabei bezieht sich der erste Zwischenbericht auf die Schritte "Genehmigung" und "Inbetriebnahme" der "Stufe 1" sowie die ersten Betriebsmonate der "Stufe 1", der zweite Zwischenbericht ergänzt die Betriebserfahrungen bis zum Ende des Fahrplanbetriebs gemäss Angebotskonzept der "Stufe 1". Der dritte Zwischenbericht fokussiert auf die Zulassung der neuen Fahrzeuge und die ersten Betriebsmonate der "Stufe 2".

Dieser Schlussbericht beleuchtet nochmals das ganze Projekt, wobei die Erkenntnisse aus den vorherigen Zwischenberichten summarisch zusammengefasst werden. Darüber hinaus werden die Erkenntnisse der letzten Betriebsphase im OnDemand-Betrieb sowie die zugehörigen Vorbereitungen genauer betrachtet (Abbildung 2).

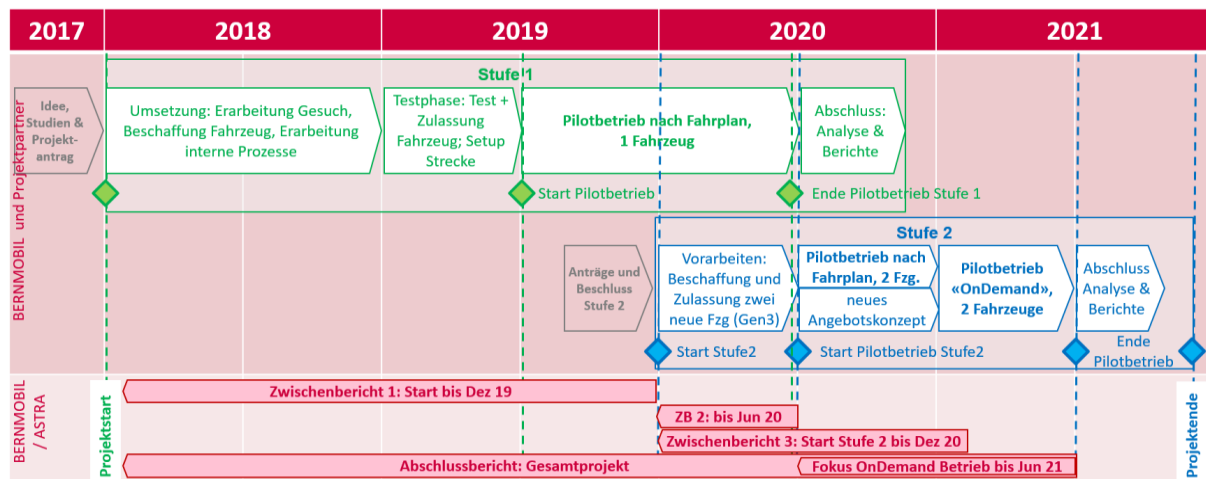


Abbildung 2: Inhalt der Berichte

3.7. Projektorganisation

Nachfolgende Darstellung (Abbildung 3) zeigt das Projektumfeld, Stand Januar 2021, mit den Projektpartnern, dem von BERNMOBIL moderierten Begleitgremium und dem Team Kommunikation, in dem Vertreter aller Projektpartner eingebunden waren. Ab Januar 2020 war die SBB als Projektpartnerin vertreten.

Lieferantenbeziehungen bestanden mit dem Fahrzeuglieferanten "EasyMile" und den beiden IT-Firmen "Amotech" und "T.DiMo" (beide Töchter von "Trapeze") sowie in kleinerem Umfang mit weiteren Dienstleistern.

Ein wichtiges Element war 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.

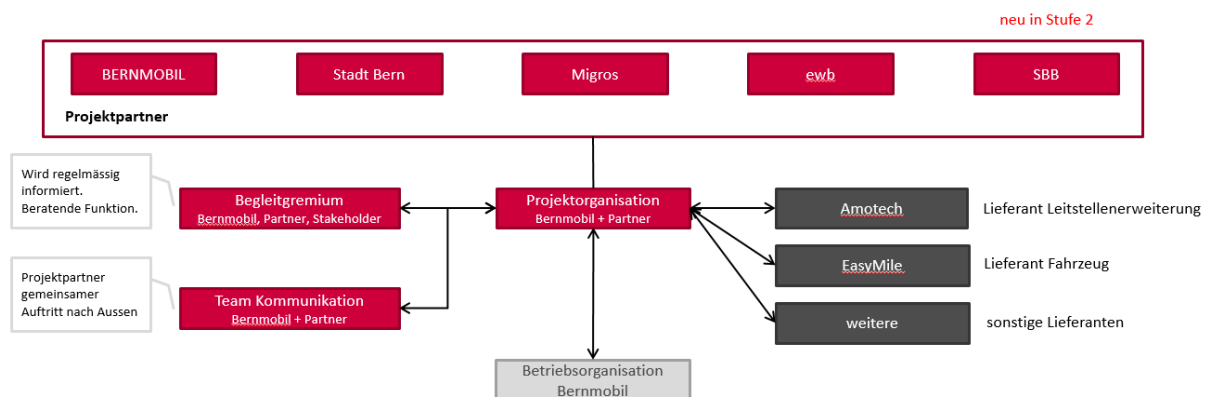


Abbildung 3: Projektumfeld SFF BERNMOBIL, Stand Januar 2020 (Start Stufe 2)

Die Projektorganisation Stand Januar 2020 ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Projektpartner waren sowohl im Lenkungsausschuss des Projekts sowie in unterschiedlichem Umfang in den Teilprojekten vertreten, so übernahm z.B. die SBB die Teilprojektleitung zur Ausgestaltung des On-Demand-Angebots.

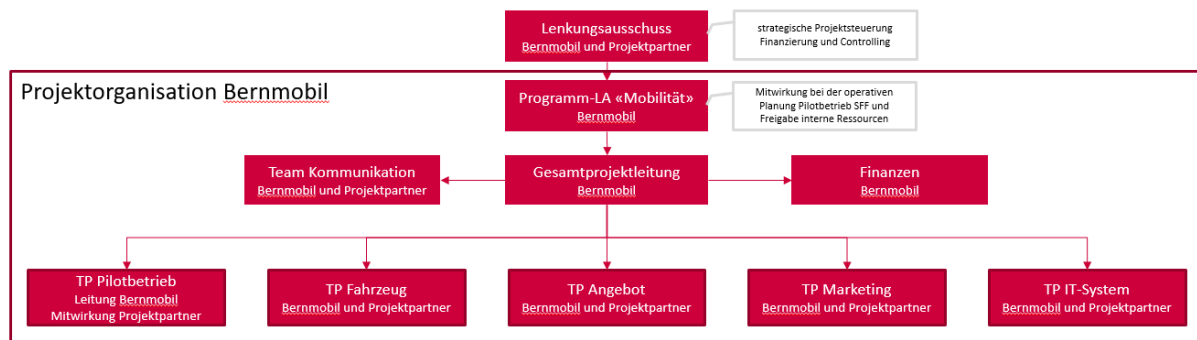


Abbildung 4: Projektorganisation SFF BERNMOBIL, Stand Januar 2020

3.8. Rechtliche Grundlagen Pilotbetrieb

Die Beschaffung der selbstfahrenden Kleinbusse wurde aufgrund der kantonalen Vorschriften über eine öffentliche Ausschreibung organisiert. Den Zuschlag erhielt die Firma EasyMile für die Lieferung eines Fahrzeugs EZ10 der Generation 2 mit der Option für zwei weitere Fahrzeuge (vgl. Kap 5.6.1).

Die automatisierten Fahrzeuge des Typs EasyMile EZ10 erfüllten die zum Projektzeitpunkt 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, welche wiederum die Zustimmung weiterer Ämter und Organisationen der drei Staatsebenen Bund, Kanton und Gemeinde erforderte (dargestellt in Abbildung 5).

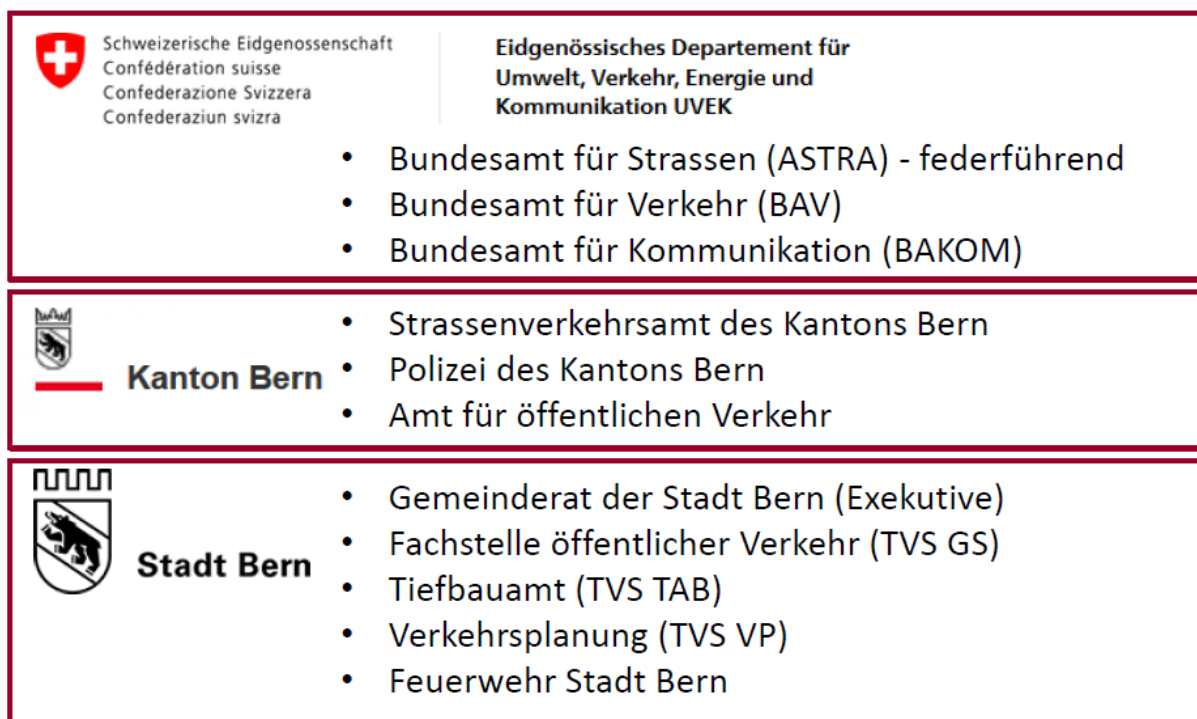


Abbildung 5: Die Ausnahmegewilligung erfordert die Zustimmung der aufgeführten Ämter

Neben den genannten öffentlichen Stellen mussten auch die Eigentümer der befahrenen Strassen- und Grundstücke dem Betrieb zustimmen.

Die Bewilligung für den Pilotbetrieb wurde per Ausnahmeverfügung durch das UVEK erstmalig am 19.06.2019 erteilt, mit einer Gültigkeit bis 30.06.2021. Diese enthielt die Einzelzulassung des Fahrzeugs "EZ10 Gen2 043" für den ausschliesslichen Einsatz auf der bewilligten Pilotstrecke s. Kap. 5.5).

Diese Einzelzulassung erfolgte aufgrund der am 17.04.2019 gemeinsam durch ASTRA, BAV und dem SVA Bern durchgeführten Fahrzeugprüfung. Voraussetzung für die Prüfung waren neben den Konformitätsnachweisen UN R-10 und UN R-100 folgende Dokumente:

- 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

Für die Stufe 2 des Projekts wurden in zwei Schritten folgende Erweiterungen der Bewilligung bei den Bundesämtern ASTRA und BAV beantragt:

- Schritt 1:
 - Genehmigung des Betriebs für die neuen Fahrzeuge des Typs EasyMile EZ10 Gen3 (Fahrzeuge 037 und 038)
- Schritt 2:
 - Erweiterung der Pilotstrecke in Richtung Süden bis zur Berner Fachhochschule, Standort Brückenstrasse
 - Vorsorgliche Verlängerung der Bewilligung um 6 Monate, um bei Bedarf allfällige pandemiebedingte Unterbrüche kompensieren zu können.

Die Zulassung der neuen Fahrzeuge erfolgte aufgrund der am 10.07.2020 bestandenen Fahrzeugprüfung per 30.07.2020.

Die Erweiterung der Pilotstrecke sowie die Verlängerung der Versuchsdauer wurden per Verfügung am 16.12.2020 erteilt. Diese Erweiterung betrifft die letzte Betriebsphase ab Januar 2021 im OnDemand-Betrieb.

4. Projektziele

4.1. Motivation der Projektpartnerinnen

BERNMOBIL

BERNMOBIL ist als ÖV-Unternehmen im Mobilitätsmarkt der Hauptstadtregion Bern aktiv und rechnete 2017 mittelfristig mit grundlegenden Veränderungen im Mobilitätsmarkt. Zu diesen Veränderungen zählte neben neuen Angebotsformen im ÖV und neuen Antriebstechnologien auch die zunehmende Automatisierung der Fahrzeuge. BERNMOBIL setzte sich daher 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 sollte der Pilotversuch dazu dienen, die Einbindung eines solchen selbstfahrenden Fahrzeugs in die ÖV-Betriebsprozesse zu verstehen, insbesondere die technische Anbindung an die Leitstelle wie auch die Kombination mit neuen bedarfsorientierten Angebotsformen (OnDemand).

Stadt Bern

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

Bereits im Rahmen der Eigentümerstrategie 2017-2020 hatte der Gemeinderat BERNMOBIL den Auftrag erteilt, sich aktiv mit der technologischen Entwicklung namentlich im Bereich der Informationstechnologien auseinanderzusetzen. Die Stadt Bern war somit gewillt, die Chancen der Informationstechnologien für eine Verbesserung der öffentlichen Dienstleistungen in verschiedener Hinsicht zu nutzen und sich auf mögliche Risiken vorzubereiten. Dabei galt es einerseits, sich Orientierungswissen zu erarbeiten, beispielsweise mit der Teilnahme an einer Studie von Ernst Basler&Partner (EBP) [7]. Andererseits sollte die Stadt möglichst auch Nutzen aus praktischen Erfahrungen bei der Einführung des automatisierten Fahrens ziehen können. Insbesondere ging es darum, erste Erkenntnisse über nötige Anpassungen der Strasseninfrastruktur und das aufzubauende Leitsystem zu gewinnen, die Voraussetzung für automatisiertes Fahren gesehen wurden.

Migros Aare

Die Migros Aare war als Projektpartner beim Pilotversuch «Selbstfahrende Fahrzeuge» von BERNMOBIL mit dabei, weil dies zu den zwei strategischen Schwerpunktthemen Mobilität und Digitalisierung passte. Mit der Teilnahme am Pilotprojekt von BERNMOBIL ging es der Migros Aare darum, praxisnahes Wissen in diesen Themen zu sammeln. Sie sah interessante Möglichkeiten, in Zukunft selbstfahrende Fahrzeuge einzusetzen, zum Beispiel als automatisierte Transportsysteme in der Logistik oder als Shuttle zwischen nahe gelegenen Migros-Standorten.

ewb

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

SBB

Das Hauptinteresse der SBB im Rahmen des vorliegenden Kooperationsprojektes lag in der Markterforschung selbstfahrender Fahrzeuge, insbesondere in der Bewertung neuer Fahrzeugtechnologien und der Angebotsausgestaltung.

4.2. Ziele der Projektpartnerinnen

Die Projektziele für das Gesamtprojekt und speziell die Stufe 1 (Betrieb mit einem Fahrzeug bis Juni 2020) bestanden aus den folgenden übergeordneten strategischen Zielen seitens BERNMOBIL:

- Aufbau von Kompetenzen im Bereich von selbstfahrenden Fahrzeugen

- Erkenntnisse hinsichtlich allfälliger Veränderungen für die Arbeitsplätze bei BERNMOBIL aus Verantwortung für die Mitarbeitenden
- Vorbereitung des Unternehmens auf allfällige zukünftige Bestellungen von ÖV-Angeboten mit selbstfahrenden Fahrzeugen

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

4.2.1. Projektziele in Stufe 1

Daraus ergaben sich insbesondere folgende Projektziele für die Stufe 1:

- 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

Die Projektziele der Projektpartnerinnen Stadt Bern, Migros Aare und ewb sind im Kapitel 4.1 benannt.

4.2.2. Projektziele in Stufe 2

Für die "Stufe 2" des Projekts haben die Projektpartnerinnen (neu mit SBB) die folgenden zusätzlichen Projektziele definiert:

- Erzielen von Erkenntnissen aus dem Einsatz der neueren Fahrzeuggeneration EZ10 Gen3 mit verbesserter Technologie – Vergleich mit der vorherigen Fahrzeuggeneration EZ10 Gen2.
- Neue Erkenntnisse durch den Einsatz von zwei automatisierten Fahrzeugen auf der gleichen Strecke.
- Entwicklung eines OnDemand-Angebots mit den automatisierten Fahrzeugen
- Anbindung des selbstfahrenden Fahrzeugs und des zugehörigen Software-Systems an die OnDemand-Software
- Auch in der neuen Angebotsform eine möglichst weitgehende Integration des Pilotbetriebs in die Betriebsprozesse

4.3. Projektziele gemäss Anträgen und Bewilligungen ASTRA

Aus den vorgenannten Projektzielen wurden jene für die Anträge an das ASTRA weiter detailliert, die von allgemeinem Interesse sind und in dieser Form von den vorangegangenen Pilotversuchen noch nicht untersucht wurden. Dies aufgrund der Anforderung des ASTRA [1], dass der Neuigkeitswert des Pilotversuchs die Grundlage des Entscheids bezüglich der Ausnahmegewilligung bildet.

4.3.1. Projektziele in Stufe 1

Mit dem Pilotversuch SFF bei BERNMOBIL sollten folgende Erkenntnisgewinne erzielt werden:

Leitstellenintegration

BERNMOBIL überwacht ihre Busse und Trams von einer zentralen Leitstelle aus, die beim Depot Eigerplatz untergebracht ist (vgl. Abbildung 6). 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 Fahrpersonal. 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 sollte untersucht werden.

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

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

Fahrzeug-Verhalten auf Kopfsteinpflaster

Die Sensortechnik des EasyMile EZ10 Gen2 orientierte sich anhand redundanter LiDAR-Sensoren, die neben dem GPS noch mit Daten aus der Fahrzeugbewegung (Odometer) ergänzt wurden. Die auf der Pilotstrecke befindlichen Abschnitte mit Kopfsteinpflaster sollten näher betrachtet werden, um zu klären, wie sich die Sensortechnik bei den Erschütterungen verhalten würde.

Engstellen mit Gegenverkehr

Auch an den auf der gewählten Pilotstrecke vorhandenen Engstellen sollte das Verhalten des EZ10 Gen2 vertieft untersucht werden, weil Fahrerinnen und Fahrer konventioneller Fahrzeuge dort über gegenseitigen Blickkontakt den Vortritt regeln müssen.

Fahrzeug-Verhalten in kurzer Steigung mit Haltestelle

Der Umstand, dass sich auf der Pilotstrecke eine ca. 100 m lange Steigung von bis zu 14 % befand, in der eine Haltestelle (12 % Steigung) geplant war, sowie ein nachfolgendes Gefälle von bis zu 15 %, ermöglichte die Untersuchung des Fahrzeugverhaltens in der Steigung mit Haltestelle sowie im Gefälle. Das beschaffte Fahrzeug von EasyMile wurde speziell für die Bewältigung dieser Steigung mit zwei Motoren ausgerüstet.

4.3.2. Projektziele in "Stufe 2 – neue Fahrzeuggeneration"

Einsatz einer neuen Fahrzeuggeneration

Mit dem Einsatz der Nachfolgeneration EZ10 Gen3 sollten aufgrund Zusagen des Herstellers mehrere Punkte adressiert werden:

- Beobachtete Verbesserungen bzw. Veränderungen im Fahrzeugverhalten durch die neue Sensortechnologie, im Vergleich zur abgelösten Fahrzeuggeneration Gen2 [Verfügung 30.7.2020, Ziffer 7]
- Generelle Erkenntnisse aufgrund der verbesserten Technologie, im Vergleich zur abgelösten Fahrzeuggeneration Gen2 [Verfügung 30.7.2020, Ziffer 7]
- Besseres Fahrzeugverhalten in kurzer Steigung aufgrund softwareseitiger Verbesserungen in der Ansteuerung sowie in der Überwachung der Antriebskomponenten
- Intelligentere Hinderniserkennung durch neue Sensorkonfiguration mit Kamera und Software-Filtertechniken
- Erste Schritte zur Sensorfusion der Lidar und Kamera und mit späterem Software-Update auch Radar-Daten
- Bessere Lokalisierung durch besseren GNSS Setup und bessere Lidar-Sensoren
- Insgesamt weniger unnötige Notstopps

Betrieb mit zwei Fahrzeugen

Durch den Betrieb mit zwei Fahrzeugen sollten zudem folgende Themen adressiert werden:

- Situationen beim Betrieb auf der gleichen Strecke (Begegnung, Überholen)
- Spezielle Betriebsmassnahmen wie z.B. Fahrzeug-Tausch, versetzte Software-Updates ohne Betriebsunterbruch
- Vergleichende Beurteilung von Störungen (fahrzeugspezifisch oder systematisch)

4.3.3. Projektziele in "Stufe 2 – OnDemand-Betrieb"

Diese zusätzlichen Projektziele wurden im Änderungsantrag vom 19.11.2020 ausformuliert.

Mit dem neuen Angebotskonzept "OnDemand-Betrieb" sollten insbesondere folgende Aspekte untersucht werden:

- Halte an nicht markierten Stellen: Akzeptanz der anderen Verkehrsteilnehmenden, heikle Stellen und Situationen (z.B. Abfahrt) und deren Ursachen, besonders geeignete Stellen, Sicherheit beim Ein- und Aussteigen
- OnDemand-Betrieb: Akzeptanz durch die Kunden, Reaktion auf Routenanpassungen während der Fahrt, Erfahrungen zur elektronischen Bestellung

5. Merkmale des Pilotbetriebs

5.1. Projektaufbau zum Erreichen der Ziele

Kernelement zum Erreichen der Ziele der Projektpartnerinnen war die Organisation und Durchführung eines Pilotbetriebs mit selbstfahrenden Fahrzeugen im Stadtgebiet von Bern. Dabei sollte dieser Pilotbetrieb so weit wie möglich gemäss den Standardabläufen des übrigen ÖV-Angebots ablaufen. Weiterhin sollte auf bestehenden Erfahrungen anderer Pilotprojekte aufgebaut werden. Daher wurde einerseits in der Fahrzeug-Beschaffung bewusst ein Anbieter mit entsprechenden Referenzprojekten gesucht, andererseits wurde das Knowhow bereits laufender Pilotversuche einbezogen.

Für die Auswahl der geeigneten Pilotstrecke wurde bereits im Vorfeld dieses Projekts zusammen mit der Stadt Bern und den SBB eine Studie in Auftrag gegeben, deren Ergebnisse dann in den Projektantrag eingeflossen sind.

Die Merkmale des Pilotversuchs werden nachfolgend ausführlich dargestellt.

5.2. Überblick Ausnahmegewilligungen

Für den Betrieb der selbstfahrenden Fahrzeuge auf der Pilotstrecke waren mehrere miteinander wechselseitig verknüpfte Bewilligungen der Bundesämter erforderlich (vgl. Abschnitt 3.8). Die beiden Hauptelemente waren

1. Die Ausnahmegewilligung zur Nutzung der beantragen Pilotstrecke für den Betrieb des automatisierten Fahrzeugs.
2. Die Betriebsbewilligung des ASTRA und des BAV für das nicht typengeprüfte und nicht allen Vorschriften entsprechende automatisierte Fahrzeug ausschliesslich auf der bewilligten Pilotstrecke.

Die Ausnahmegewilligung für die Strecke erforderte neben einer ausführlichen Streckendokumentation zwingend die Zustimmung aller Strasseneigentümer, der kantonalen Polizei sowie der weiteren Betroffenen. Weiterhin war eine BAV-Konzession für den Betrieb einer ÖV-Linie auf dieser Strecke vorzuweisen, weswegen auch die ÖV-Betreiber im Perimeter der Strecke zustimmen mussten. Zusätzlich verlangte auch der Hersteller-EasyMile eine Bewilligung der Strecke durch das firmeninterne Site-Acceptance-Verfahren. Dessen Ergebnisse (z.B. zusätzliche Anforderungen an die Strecke) mussten wiederum in die Streckendokumentation des Ausnahmegesuchs zu Händen der Bundesämter eingefügt werden.

Grundlage für die Betriebsbewilligung des Fahrzeugs bildete die erfolgreiche Einzelzulassung des Fahrzeugs aufgrund einer Fahrzeugprüfung durch die Bundesämter ASTRA und BAV sowie des kantonalen Strassenverkehrsamts. Die Fahrzeugprüfung wurde erst nach Vorliegen sämtlicher erforderlicher Nachweise durchgeführt. Nachweise mussten unter anderem für folgende Aspekte vorgelegt werden.

- Brems- und Anfahrtests
- Elektrokonzession nach UN R 10 und UN R 100
- Prüfzertifikat Unfalldatenschreiber
- BAKOM-Funkkonzession

In den folgenden Abschnitten 5.3 bis 5.5 werden die Pilotstrecke genauer dargestellt, anschliessend im Abschnitt 5.6 die eingesetzten Fahrzeuge. In beiden Fällen erfolgt die Darstellung rückblickend mit den Entwicklungsschritten im Projektverlauf, wobei auf die enge Verzahnung von Strecke und Fahrzeug nur punktuell eingegangen wird.

5.3. Geografische Lage der Standorte des Pilotbetriebs in Bern

Die **Pilotstrecke** verlief südlich der Altstadt entlang der Aare und verbindet die Marzilibahn mit dem Bärengaben (Details zur Wahl der Strecke in Abschnitt 5.5). Für Tests und Demofahrten wurde eine **Demostrecke** auf dem Gelände des BERNMOBIL-Depots Bolligenstrasse eingerichtet. Für Reparaturen wurde das BERNMOBIL-Depot Eigerplatz genutzt.

Folgende Übersicht (Abbildung 6) zeigt die geografische Anordnung der Standorte im Stadtgebiet von Bern.



Abbildung 6: Geografische Lage von Pilotstrecke und Depotstandorte in Bern

5.4. Demostrecke

Für Testfahrten und Abnahmetests wurde eine Demostrecke auf dem Aussengelände des Tramdepots Bolligenstrasse eingerichtet. Diese wurde als Rundkurs entlang des Depotgebäudes auf dessen Nordost- und Nordwest-Seite angelegt (Abbildung 7).



Abbildung 7: Demostrecke auf dem Gelände des Tramdepots Bolligenstrasse

Für den Test der neuen Fahrzeuge der Generation 3 (Stufe 2) wurde die Demostrecke deutlich erweitert. Mit dieser Erweiterung konnten einerseits die neuen Fähigkeiten der Fahrzeuge getestet werden, andererseits auch der OnDemand-Betrieb zwischen zwei beliebigen Haltestellen (Abbildung 8).

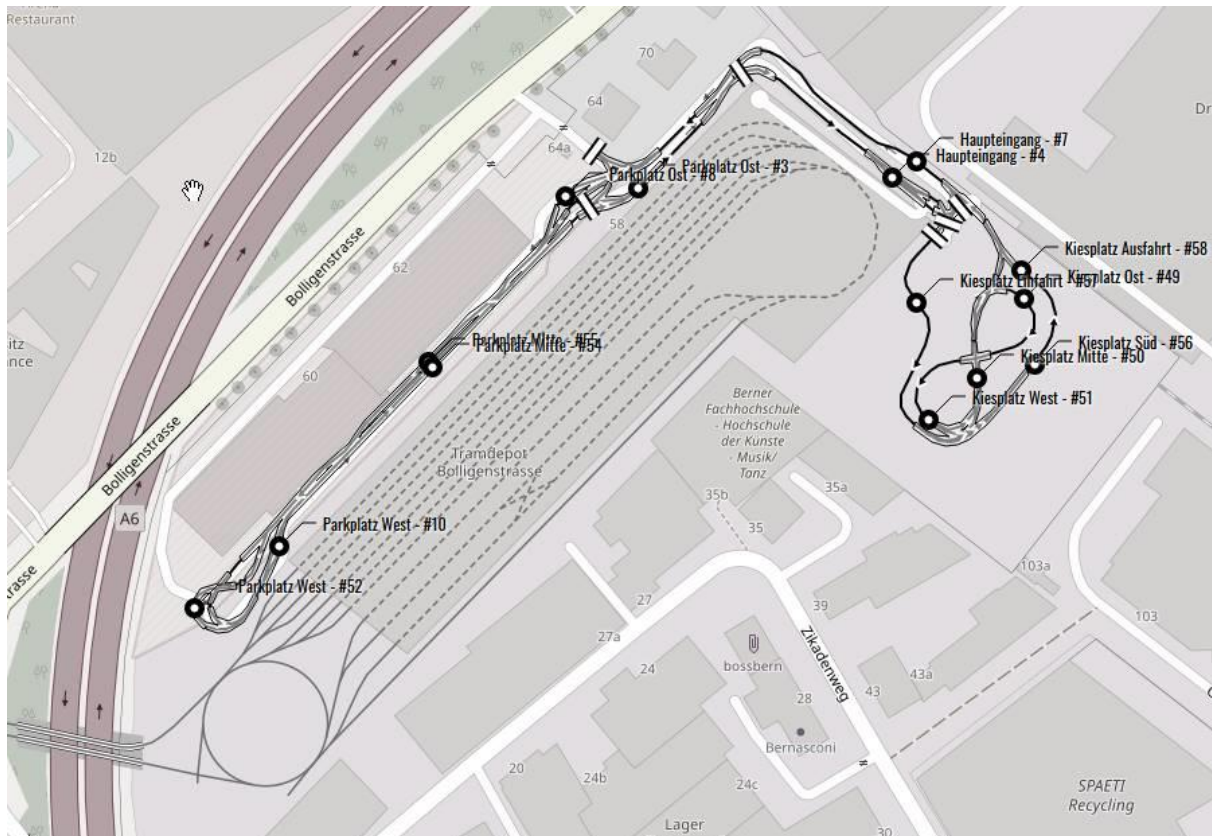


Abbildung 8: erweiterte Demostrecke für die Stufe 2 des Projekts

5.5. Pilotstrecke

5.5.1. Wahl der Pilotstrecke im Stadtgebiet von Bern

Nach einer umfassenden Analyse von potenziellen 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 weiterer Kriterien wurde die Strecke zwischen Bärenpark und der Talstation der Marzilibahn als beste Variante bewertet und als Pilotstrecke gewählt (Abbildung 9).

Am Bärenpark bestand Anschluss an die BERNMOBIL Linie 12, an der Badgasse an den historischen Mattelift und an der Talstation Marzilibahn an die gleichnamige Standseilbahn Richtung Bundesterrasse in kurzer Distanz zum Bahnhof.

Insbesondere folgende Kriterien waren für die Wahl der Strecke ausschlaggebend:

- Gute Ergänzung und Einbindung in das bestehende ÖV-Angebot
- Geeignete Streckenlänge
- Verkehrsberuhigter Bereich (überwiegend Tempo 30)
- geringes Verkehrsaufkommen
- Anbindung an mehrere Points-of-Interest und somit genügend Publikumsverkehr

Die selbstfahrenden Kleinbusse wurden als BERNMOBIL **Linie 23** betrieben und in den regionalen und nationalen Fahrplan-Systemen hinterlegt.

Auf einer Teilstrecke verkehrt in den Abendstunden die BERNMOBIL **Linie 30** (Ringlinie) vom Bahnhof kommend im Uhrzeigersinn und bedient die Haltestellen Läuferplatz, Mühlenplatz, Badgasse und Dalmazibrücke. Da sich die Betriebszeiten der Linien 23 und 30 nicht überlappten, ergaben sich keine Konflikte zwischen beiden Linien. Hingegen konnte die Haltestellen-Infrastruktur der Linie 30 an diesen vier Haltestellen mitgenutzt werden. Die übrigen Haltestellen wurden für den Zeitraum des Pilotbetriebs temporär eingerichtet.

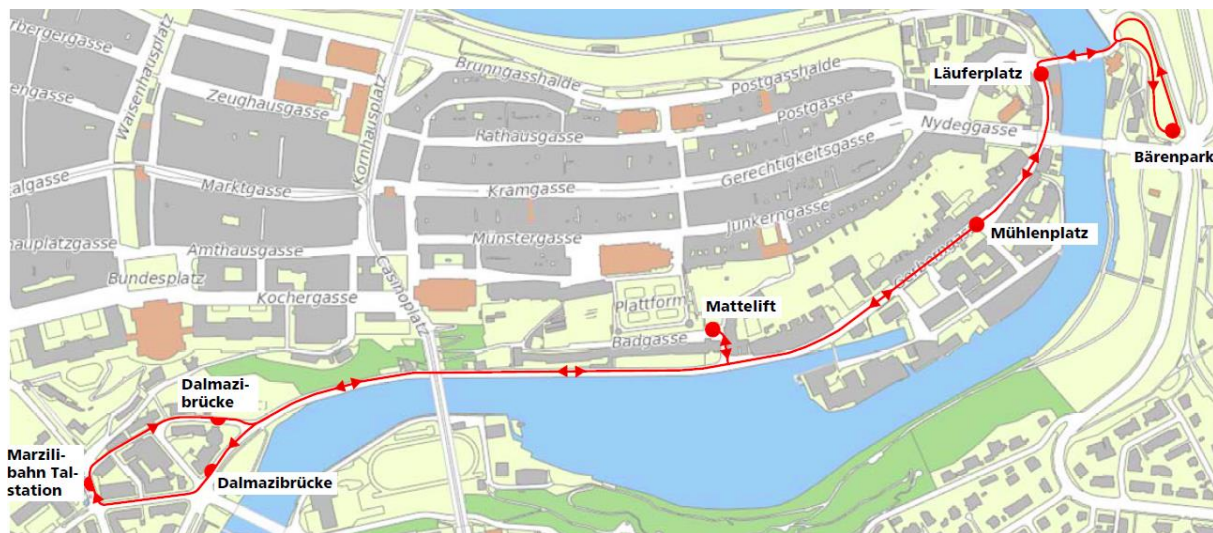


Abbildung 9: Pilotstrecke für Stufe 1 gemäss ursprünglicher Planung

5.5.2. Pilotstrecke im Zustand Mitte 2019

Das Anfahren der Haltestelle "Mattelift" konnte aufgrund einer Baustelle einer Gebäudesanierung in den Betriebsmonaten Juli bis Dezember 2019 nicht realisiert werden, stattdessen wurde die Haltestelle Badgasse angefahren (Abbildung 10).

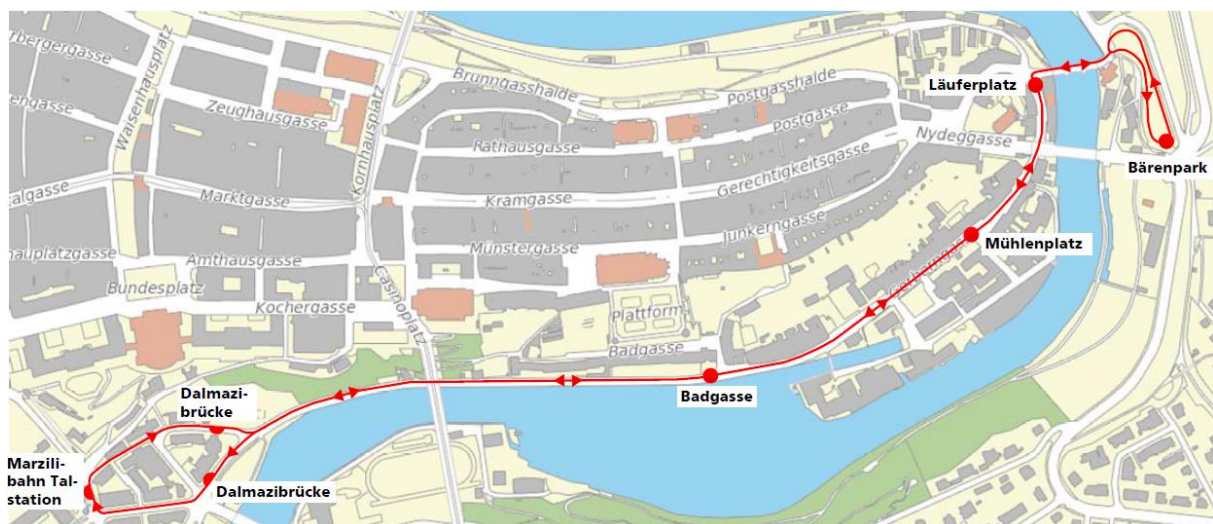


Abbildung 10: Pilotstrecke, wie sie im Betriebszeitraum Juli bis Dezember 2019 befahren wurde.

5.5.3. Pilotstrecke im Zustand Anfang 2020

Ab März 2020 konnte wie ursprünglich geplant der Mattelift angefahren werden (Abbildung 11). Diese Streckenvariante wurde jedoch nur wenige Tage gefahren, da ab Mitte März 2020 der Corona-bedingten Lockdown und damit die Betriebseinstellung bis zum Sommer 2020 erfolgte.

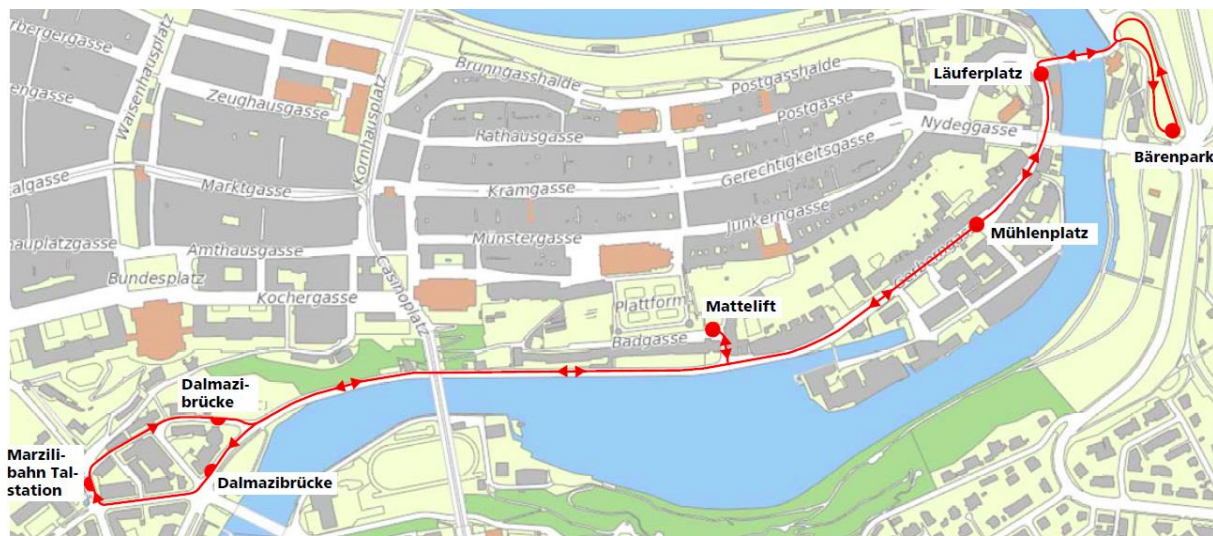


Abbildung 11: Pilotstrecke SFF ab 9. März 2020

5.5.4. Pilotstrecke im Zustand Herbst 2020

Wegen einer Werkleitungssanierung an der Schifflaube war im Zeitraum Juli 2020 bis Februar 2021 keine durchgängige Befahrung der ganzen Strecke möglich.

Für den Pilotbetrieb im automatischen Modus mit zwei Fahrzeugen wurden die folgenden beiden Optionen geprüft:

Nur Betrieb des Ost-Astes Mühlenplatz – Bärenpark

Nur Betrieb des West-Astes Mattelift - Marzilibahn

Die Variantenprüfung zeigte, dass der West-Ast mehrere Vorteile hatte. Sowohl der Mattelift wie auch die Marzilibahn können weiterhin erschlossen werden. Zudem zeigte sich dieser Abschnitt in der Analyse des ersten Betriebsjahres weniger störungsfähig und mit leicht höherer Fahrgastzahlen. Weiterhin konnte auf diesem Abschnitt die Begegnung von zwei Fahrzeugen besser realisiert werden. Nachteil dieser Option war die fehlende Anbindung des Bärenparks (Abbildung 12). Gemäss Beschluss des Lenkungsausschusses wurde der West-Ast für den Betrieb gewählt.

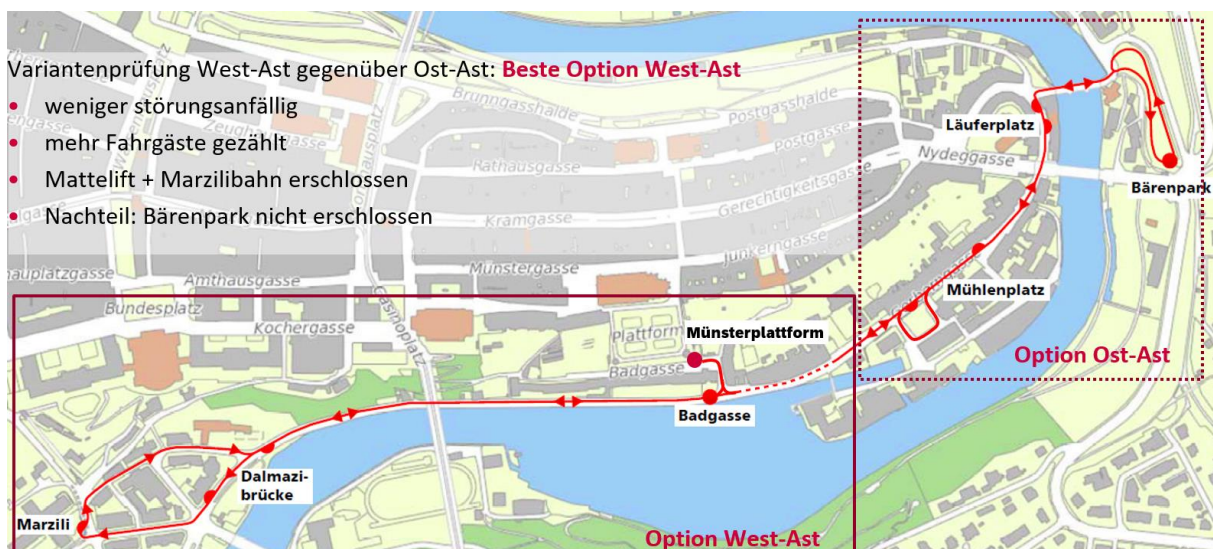


Abbildung 12: Variantenprüfung aufgrund Werkleitungsbau Schifflaube: Entscheid für West-Ast

5.5.5. Pilotstrecke im Zustand 2021

Für den OnDemand-Betrieb ab 2021 wurde eine Erweiterung der Pilotstrecke bis zur Berner Fachhochschule in der Brückenstrasse beim ASTRA beantragt (Abbildung 13). Dies, um einerseits mehr potenzielle Fahrgäste erreichen zu können und um andererseits das linienförmige Bediengebiet entlang der Aare zumindest abschnittsweise zu einem flächigen Bediengebiet mit verschiedenen Routen erweitern zu können. Aufgrund von technischen Fahrzeug-Problemen beim Anfahren in der Steigung wurde die Haltestelle Bärenpark in den unteren Bereich des dortigen

Parkplatzes verlegt. Die Bewilligung seitens ASTRA wurde am 16.12.2020 erteilt, so dass Anfang 2021 der OnDemand-Betrieb getestet und ab 1.3.2021 als Angebot "Rufbus Linie 23" in Betrieb genommen werden konnte.

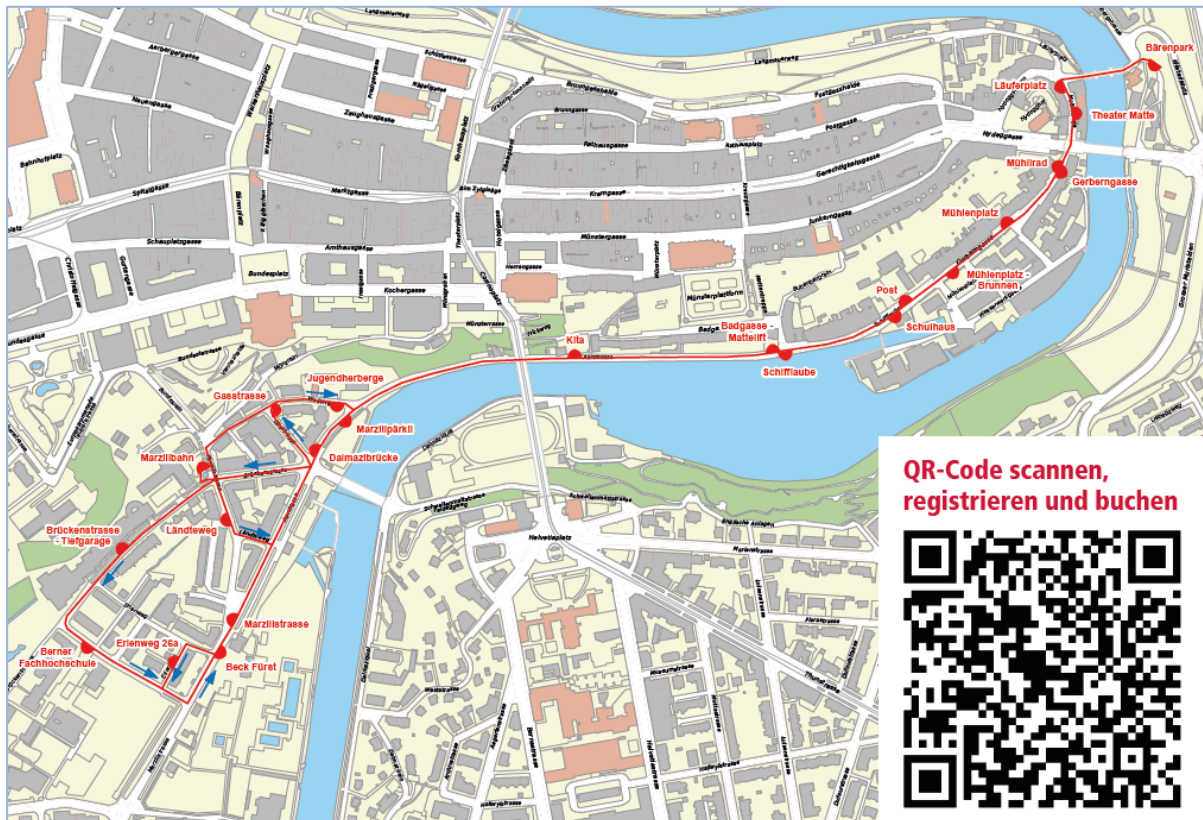


Abbildung 13: Streckennetz "OnDemand" gemäss Darstellung auf Infotafel mit QR-Code

Damit im OnDemand-Betrieb die Fahrgäste die Fahrzeuge möglichst nah zu ihrem Standort bestellen konnten, sollten möglichst viele Haltestellen eingerichtet werden. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten vor Ort sowie aus Gründen einer handhabbaren Routenmatrix im EasyMile-System wurden zusätzlich zu den bestehenden 11 Haltestellen effektiv noch 12 weitere eingerichtet.

Bei der Festlegung und Genehmigung der Haltestellen gab es folgende zwei Besonderheiten: Erstens wurden zwei Kategorien von Haltestellen für den OnDemand-Betrieb definiert:

1. "echte" Haltestellen, an denen ein Fahrzeug auch über längere Zeit stehen kann, falls es keinen Auftrag hat
2. "virtuelle" Haltestellen, an denen nur kurz für das Ein-/Aussteigen angehalten werden darf.

Zweitens wurden die zusätzlichen Haltestellen im Genehmigungsantrag noch nicht definitiv aufgeführt. Vielmehr wurde mit dem ASTRA für die Festlegung der zusätzlichen Haltestellen folgende Richtlinien verbindlich vereinbart:

Formelle Richtlinien:

1. es wird von der Antragstellerin für jede neue Haltestelle die Zustimmung von Strasseneigentümerin und Polizei eingeholt.
2. von der Antragstellerin wird ebenfalls für jede wesentliche Änderung die Zustimmung von Strasseneigentümerin und Polizei eingeholt.
3. Dazu wird von der Antragstellerin gebündelt für alle beantragten Haltestellen eine Vorort-Begehung organisiert. In Ausnahmefällen oder aufgrund von Pandemieeinschränkungen kann die Begehung auch mit virtuellen IT-Hilfsmitteln erfolgen, sofern die Örtlichkeiten allseits bekannt sind. Dabei werden die genaue Position der Haltestelle und die zusätzlich zu beachtenden Bedingungen bewertet und schriftlich in Form eines Plans festgehalten.

4. Die für den Pilotbetrieb dann auf Basis der Zustimmungen eingerichteten Haltestellen werden zu Händen des ASTRA vor Betriebsaufnahme schriftlich dokumentiert.
5. Die Verantwortung, ob im Betrieb im Einzelfall dann tatsächlich an der definierten Haltestelle angehalten werden kann, liegt weiterhin beim Sicherheitsfahrer (Operator).

Inhaltliche Richtlinien:

3. die Haltestelle muss so positioniert sein, dass ein verkehrssicheres Aussteigen möglich ist.
4. die Haltestelle muss so positioniert sein, dass der übrige Verkehr nicht behindert wird.
5. die Haltestelle muss im automatischen Betrieb angefahren werden können (kein geplanter manueller Betrieb).
6. im Betrieb tatsächlich angehalten werden darf nur
 - a. wenn ein verkehrssicheres Aussteigen gewährleistet ist
 - b. wenn der übrige Verkehr nicht unzumutbar behindert wird
7. es gibt zwei Kategorien von Haltestellen
 - a. "echte" Haltestellen, an denen das Shuttle auch über längere Zeit stehen kann, falls es keinen Auftrag hat. Diese werden gemäss Standard-Vorgaben des Betreibers ausgerüstet.
 - b. "virtuelle" Haltestellen, an denen nur kurz für das Ein-/Aussteigen angehalten werden darf. Für diese ist eine vereinfachte Ausrüstung möglich.

Alle zusätzlichen Haltestellen der Rufbus Linie 23, auch die virtuellen, wurden mit einer mobilen Haltestellen-Tafel ausgestattet, auf der das Angebot über ein Plakat mit QR-Code publiziert wurde (vgl. Abbildung 13). Ausgenommen die mitverwendeten Haltestellen der Linie 30, bei der nur die Angebotsinformationen auf den bestehenden Stelen ergänzt wurden. Im Zuge der Festlegungen wurden einige der bisherigen Haltestellen aus dem Fahrplanbetrieb in die Kategorie "virtuelle Haltestelle" verschoben, weil diese für ein längeres Stehenbleiben der Fahrzeuge als nicht geeignet erschienen.

5.6. EasyMile-Fahrzeuge und eingesetzte Software

5.6.1. Initiale Beschaffung

Für den Pilotbetrieb sollte 2018 ein automatisierter Kleinbus samt der dafür nötigen Software beschafft werden. Dazu sollte ein Anbieter gewählt werden, der bereits Referenzprojekte vorweisen konnte.

Das Projekt unter Führung von BERNMOBIL stellte eine Beschaffungsgemeinschaft dar und unterlag als solche dem öffentlichen Vergaberecht. Es kamen daher 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 gab.

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 Lizenzen und Dienstleistungen angeboten hatte.

Der Werkliefervertrag mit EasyMile umfasste den Kauf eines EZ10 Gen 2 inkl. sämtlicher Nebenkosten sowie die Betriebskosten für ein Jahr. Im Hinblick auf die 2018 bereits angedachte Verlängerung des Pilotbetriebs über Juni 2020 hinaus waren weiterhin eine Option auf zwei zusätzliche Fahrzeuge sowie eine Option auf eine Betriebsverlängerung um ein zusätzliches Jahr enthalten.

5.6.2. EasyMile Begriffswelt – Hardware, Software und Rollen

Nachfolgend wird die EasyMile-Begriffswelt erläutert, wie sie auch in diesem Bericht verwendet wird. Die hier verwendeten Begriffe stammen aus der EasyMile-Dokumentation, Stand Anfang 2021 (die Begriffe hatten sich während des Projektverlaufs teilweise geändert).

Das zentrale Element war das Fahrzeug des Typs "EZ10" (Abbildung 14). Dieses gab es zur Zeit dieser Berichtserstellung in der dritten Generation. In der Stufe 1 des Projekts wurde ein Fahrzeug der Generation 2 (Gen2) eingesetzt, in der Stufe 2 dann zwei Fahrzeuge der Generation 3 (Gen3). Die Fahrzeug-Software bestand aus den drei Komponenten "EZ Shield", "EZ Move" und "EZ Drive". Dabei war "EZ Drive" für das automatisierte Fahren zuständig und konnte über das Operator-Panel aktiviert werden. "EZ Move" war für die Antriebssteuerung zuständig, im manuellen Betrieb konnte diese via Fernsteuerung direkt angesteuert werden. Für die Betriebsbewilligung seitens EasyMile musste eine Begleitperson im Fahrzeug anwesend sein und als "Operator" für die Bedienung des automatischen Betriebs wie auch des manuellen Betriebs ausgebildet und zertifiziert worden sein.

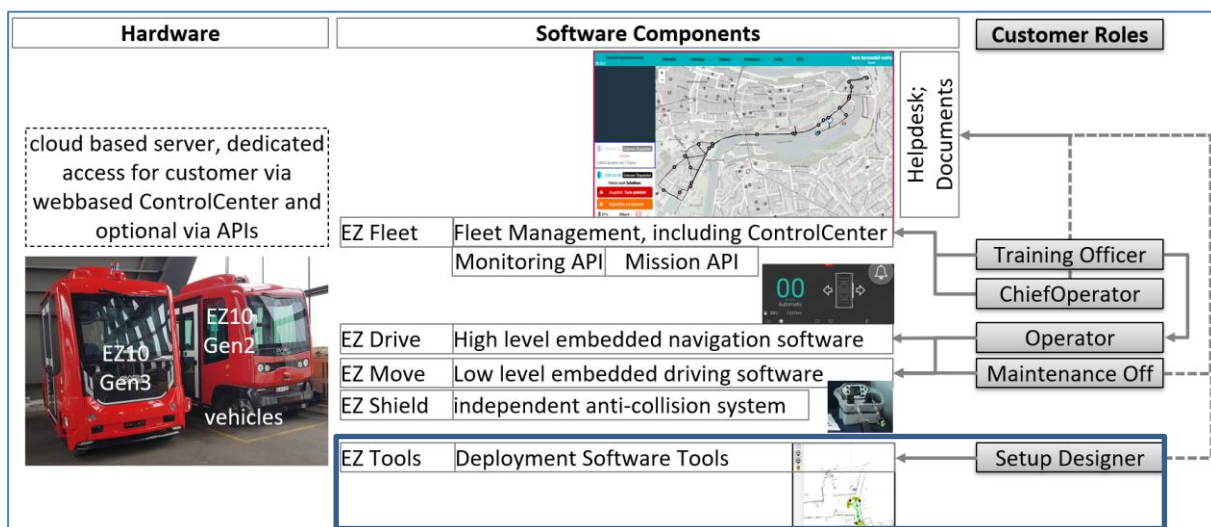


Abbildung 14: Übersicht über die EasyMile-Begriffswelt aus Fahrzeugen, Software-Komponenten und Benutzerrollen.

Für den Betrieb der EasyMile Fahrzeuge zwingend erforderlich war eine Instanz der Software "EZ Fleet", die über die Benutzeroberfläche "ControlCenter" (bzw. "SiteCC") bedient werden konnte. Für die Bedienung des Systems sowie auch für den Zugang zum Helpdesk musste mindestens eine Person im Unternehmen über die Ausbildung "ChiefOperator" verfügen. Während der Betriebszeiten musste immer ein "ChiefOperator" den Betrieb überwachen. Dieser war auch die Kontaktperson für EasyMile.

Neben den beiden genannten Rollen bot EasyMile optional weitere Ausbildungen/Zertifizierungen an. Zum einen eine Weiterbildung vom "ChiefOperator" zum "Training Officer", der zusätzlich die Berechtigung erhielt, weitere Personen zum "Operator" auszubilden. Zum anderen gab es noch eine Rolle als "Maintenance Officer" mit den Berechtigungen für Wartungsaufgaben sowie für das manuelle Bewegen des Fahrzeugs.

Um die Programmierung der befahrenen Strecken selbst vornehmen zu können, gab es zusätzlich die Möglichkeit, sich zum "Setup Designer" auf verschiedenen Berechtigungsniveaus ausbilden zu lassen. Als Setup Designer hatte man Zugriff auf die Deployment-Tools (EZ Tools) und durfte je nach Niveau einfache oder komplexe Setups durchführen.

Der Software-Stack aus EZ Fleet, EZ Drive, EZ Move, EZ Shield und EZ Tools wurde seitens EasyMile zu einem "Voyager Release" gebündelt und nach Freigabe durch das Testteam an die Kunden ausgerollt.

5.6.3. Test und Zulassung EasyMile EZ10 Gen2

Das EZ10 Gen2 ist ein automatisierter, elektrisch betriebener Kleinbus der Kategorie M1, dessen Eigenschaften in Anhang 12.2 näher beschrieben sind. Das Fahrzeug ist dabei jederzeit über öffentlichen Mobilfunk mit dem Software-Backendsystem von 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.

BERNMOBIL hat das Fahrzeug EZ10 Gen2 043 nach der Lieferung im Dezember 2018 auf der Demostrecke ausführlich getestet und die für die Zulassung notwendigen Einbauten und Nachweisdokumente organisiert (u.a. Unfalldatenschreiber, Elektro-Konformitäts- und Bremsprüfdokumente). Parallel wurden Anfang 2019 die Operatoren auf der Demostrecke ausgebildet.

Schliesslich wurde das Fahrzeug am 17.04.2019 vom SVA Bern sowie den Bundesämtern BAV und ASTRA geprüft. Das Fahrzeug von BERNMOBIL ist für den Betrieb mit maximal 8 Fahrgästen (plus die Begleitperson) bei maximal 20 km/h zugelassen.

Aufgrund der Fahrgastzahl von 8 Personen benötigte der Betrieb keine BAV Konzession, sondern kann auf der Basis einer mit dem BAV abgestimmten kantonalen Bewilligung betrieben werden.

Die Auflagen des BeHiG (Behindertengleichstellungsgesetz) werden von dem Fahrzeug nicht vollumfänglich erfüllt. Als Prototyp war aber eine Ausnahmegewilligung seitens des BAV dennoch möglich.

Die Einzelzulassung für den Betrieb auf der o.g. Pilotstrecke wurde dann im Rahmen der UVEK Verfügung vom 19.06.2019 erteilt.

Bereits im Mai 2019 wurde die Streckenprogrammierung mit dem noch nicht zugelassenen Fahrzeug durchgeführt. Dafür musste das Fahrzeug vorne und hinten von je einem Polizei- bzw. Security-Mitarbeiter abgesichert werden ("Polizeiblase").

BERNMOBIL intern wurde diesem Fahrzeug die Nummer 301 zugeteilt, über die es z.B. im Leitsystem und im Ereignismanagement sichtbar war. Das weiss gelieferte Fahrzeug erhielt eine Folierung, die an das BERNMOBIL Design angelehnt war (rot, Tür mit weissen Rändern).



Abbildung 15: Einsatz des EZ10 Gen2

5.6.4. Beschaffung EZ10 Gen3

Der bei der Beschaffung des ersten EasyMile Fahrzeugs (EZ10 Gen2) vereinbarte Werkliefervertrag enthielt als Optionen sowohl die Beschaffung zweier weiterer Fahrzeuge wie auch eine Verlängerung der Wartungs- und Lizenzvereinbarungen um 12 Monate. Da das Fahrzeug vom Typ Gen2 nicht mehr hergestellt wurde, hatte EasyMile zu den gleichen Konditionen zwei Fahrzeuge des neueren Typs Gen3 angeboten. Details zu dieser Beschaffung finden sich im Zwischenbericht

Februar 2021 [3]. Ein Steckbrief mit den Eckdaten des neuen Fahrzeugtyps befindet sich in Anhang 12.3.

5.6.5. Zulassung EZ10 Gen3

Das Vorgehen zur Zulassung der neuen Fahrzeuge wurde in mehreren Koordinationssitzungen mit den Vertreterinnen der Bundesämter sowie des Lieferanten EasyMile im Februar und März 2020 abgestimmt. Basierend darauf wurden die Termine für die Fahrzeugprüfung am DTC (<https://www.dtc-ag.ch/>), die Elektrokonformitätsprüfung, den Einbau des Unfalldatenschreibers und die finale Abnahmeprüfung frühzeitig koordiniert und fixiert.

Der zugehörige Änderungsantrag wurde am 5.6.2020 dem ASTRA eingereicht.

Die Fahrzeuge G3 037 und G3 038 wurden von EasyMile pünktlich am 18.6.2020 in Bern angeliefert, wobei die dreistelligen Nummern die Endziffern der VIN (Vehicle Identification number) darstellen. Sie erhielten die internen Fahrzeug-Nummern 302 und 303. Das Fahrzeug 302 erhielt wiederum eine BERNMOBIL-rote Beklebung, während das 303 im Orange des Projektpartners ewb foliert wurde (Abbildung 16). In diesem Bericht werden weitgehend die EasyMile-Nummern verwendet.

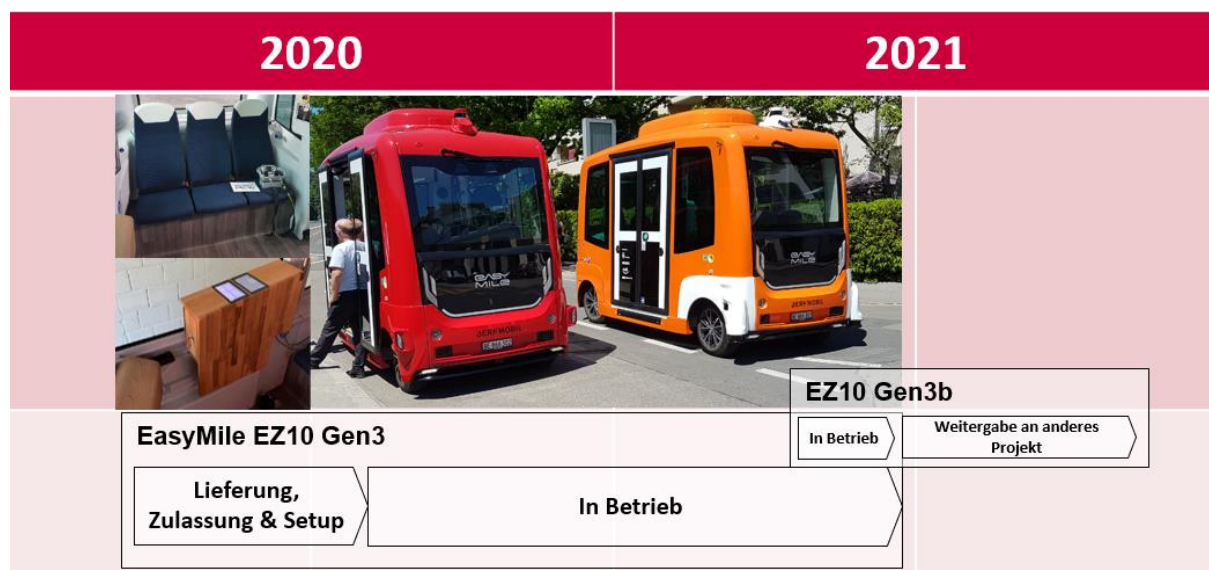


Abbildung 16: Einsatzzeitraum der EZ10 Gen3

Am 22.6. wurde die Elektrokonformitätsprüfung vorgenommen, am 24.6. der "UDS AT" Unfalldatenschreiber eingebaut und am 6./7.7. wurden die Brems- und Anfahrtests an beiden Fahrzeugen in Vauffelin beim DTC durchgeführt. Die Fahrzeugprüfung durch die Experten des ASTRA, des BAV sowie des SVSA Bern erfolgte schliesslich am 10.7. im BERNMOBIL Tramdepot Bolligenstrasse. Bei dieser Prüfung wurde auch der von BERNMOBIL entwickelte Operator-Arbeitsplatz genehmigt.

Im Originalfahrzeug hat EasyMile keinen Arbeitsplatz für die Begleitperson vorgesehen. Diese musste mit Fernbedienung im Fahrzeug stehen und hatte dabei ein grosses Sturzrisiko im Fall eines Notstopps. Um die Situation für den Operator (Begleitperson) zu verbessern, wurde der Operator-Arbeitsplatz aus den beiden Elementen "Stehsitz 45° in Fahrtrichtung schwenken" und "Ersatz des vorderen Stehsitzes durch ein Bedienpult mit Schränkchen" erstellt (s. Abbildung 17). Dieser erfüllte sowohl die ÖV-Anforderungen (Beinfreiheit für die Fahrgäste sowie ausreichend Platz für einen Rollstuhl) wie auch die Sicherheitsanforderungen (Fensterfläche für Notausstieg). Siehe auch Zwischenbericht Februar 2021.



Abbildung 17: Operator-Arbeitsplatz im Zustand August 2020.

Mit der schriftlichen Zustimmung von ASTRA und BAV konnte BERNMOBIL am 23.7. Fahrzeugausweise und Kontrollschilder beim SVSA Bern entgegennehmen für die bis auf Weiteres nur auf dem privaten Depotgelände verkehrenden Fahrzeuge.

Schliesslich wurde uns bereits am 30.7.2020 vom ASTRA die neue Verfügung zugestellt.

Die beiden neuen Fahrzeuge wurden für die bereits bewilligte Pilotstrecke zugelassen. Dies für maximal 20 km/h und 8 Plätze (davon 6 Sitzplätze). Bei Rollstuhlmitnahme reduzierte sich die Platzzahl gemäss den in Abbildung 18 gezeigtem Aufkleber.

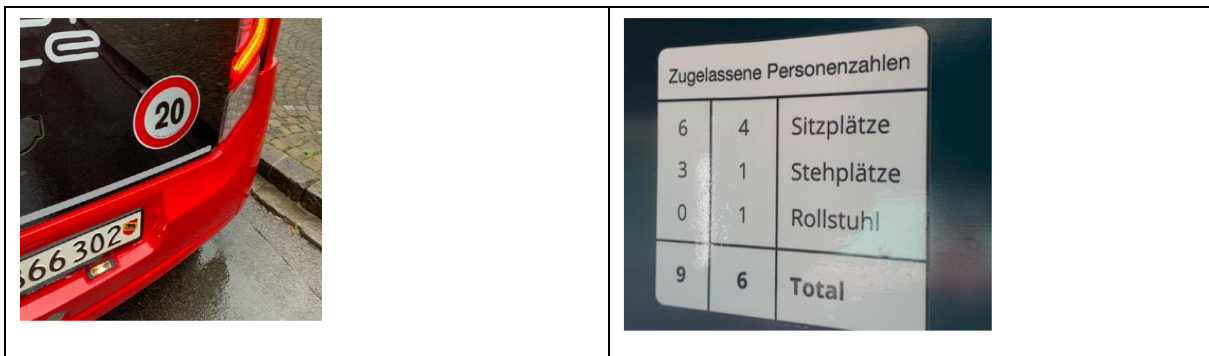


Abbildung 18: Limitierung Höchstgeschwindigkeit und Personenzahlen

Bezüglich der Beleuchtung mussten folgende Modifikationen umgesetzt werden (Abbildung 19):

- das blaue Leuchtband zwischen den Blinkern durfte nicht leuchten
- die Beleuchtung des EasyMile-Logos musste ebenfalls deaktiviert werden
- die Warnblinkanlage durfte nur in den gesetzlich vorgeschriebenen Situationen aktiv sein



Abbildung 19: Beleuchtungselemente vorne

5.6.6. Überblick der Anpassungen an den Fahrzeugen

Nachfolgend werden die wichtigsten Anpassungen an den Fahrzeugen dargestellt.

- Dezember 2018: Ausstattung des EZ10 Gen2 gemäss CH-Vorschriften für die Einzelzulassung.
- August 2019: Einbau einer 12V-Steckverbindung zum Laden der 12V-Batterie (Work-around für ein Problem mit dem Lademanagement bei längerem Aufladen)
- Juni 2020: Lieferung zweier EZ10 Gen3 und anschliessende Rückgabe des EZ10 Gen2
- August 2020: Update Voyager 8 mit CH-konformer Konfiguration der Blinker. Einbau Operator-Arbeitsplatz auf linker Fahrzeugseite; Ausrüstung mit Videokameras zur Überwachung der toten Winkel durch den Operator
- Mai 2021: Update auf EZ10 Gen3b = Einbau zusätzlicher Lidar-Sensoren vorne

5.6.7. Überblick der Software-Aktualisierungen

Während des Test- und Betriebszeitraums der EasyMile-Fahrzeuge in Bern von Dezember 2018 bis Juni 2021 waren sechs Major-Software-Releases von EasyMile im Einsatz. Jedes Release umfasste Aktualisierungen mehrerer Komponenten und wurde als "Voyager"-Release angekündigt und durch einen EasyMile Techniker vor Ort installiert. Ab Voyager 8 erhielten die Komponenten die in Abschnitt 5.6.2 dargestellten Bezeichnungen EZ Fleet, EZ Drive, EZ Move, EZ Shield und EZ Tools.

Die neueren Releases (ab Voyager 7) konnten sowohl auf der Fahrzeug-Generation 2 als auch auf der neueren Generation 3 eingesetzt werden, wobei einzelne Funktionen aufgrund von Hardware-Abhängigkeiten nur auf einer bestimmten Generation aktivierbar waren.

Nachfolgende Übersicht zeigt die Software-Versionen mit ihrem Installationszeitpunkt und der Fahrzeug-Generation in Bern:

- | | | |
|----------------|---------------|---------------------------------------|
| • "Voyager 5" | Dezember 2018 | Gen2 |
| • "Voyager 6" | Mai 2019 | Gen2 |
| • "Voyager 7" | Dezember 2019 | Gen2 / Gen3 (Lieferzustand Juni 2020) |
| • "Voyager 8" | August 2020 | Gen3 |
| • "Voyager 9" | Oktober 2020 | Gen3 |
| • "Voyager 10" | Mai 2021 | Gen3b |

5.7. Angebotskonzepte der Linie 23

5.7.1. Grundsätzliche Eckpunkte des Angebots

Die EasyMile-Kleinbusse erfüllten aufgrund der Zulassung für 8 Personen plus Begleitperson die Ausnahme gemäss Art 8.1a der Verordnung über die Personenbeförderung (VPB) und konnten in Abstimmung mit dem BAV mit einer kantonalen Bewilligung betrieben werden. Somit kamen auch die PBG-Pflichten für konzessionierte Linien nicht zur Anwendung, d.h. insbesondere bestand keine Tarif-, Betriebs- und Fahrplanpflicht.

Daher konnte das Angebot dem Versuchscharakter entsprechend flexibel gestaltet werden. Es wurde zwar ein Fahrplan für die Linie 23 publiziert, dieser wurde jedoch mit der Einschränkung versehen, dass der Betrieb je nach Betriebsbedingungen nicht gewährleistet werden kann. Dabei sollten die Fahrgäste jederzeit über die Betriebssituation informiert werden.

Weiterhin wurde kein Fahrpreis erhoben. Hauptgrund war, dass die Kosten für die Installation von provisorischen Ticketautomaten und die Einbindung in den Libero-Tarifverbund die potenziellen Einnahmen weit übertroffen hätten.

5.7.2. Angebotskonzept Linie 23 – Fahrplanbetrieb ein Fahrzeug

Das Angebot mit dem selbstfahrenden Fahrzeug auf der Pilotstrecke gemäss Abbildung 10 wurde als BERNMOBIL Linie 23 betrieben und es bestanden folgende Verknüpfungen mit dem bestehenden Liniennetz:

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

In dieser Form war die Linie 23 zwischen 01.07.2019 und 13.03.2020 von Montag bis Freitag zwischen 9 und 17 Uhr in Betrieb. Ab 16.03.2020 musste der Betrieb aufgrund der ausserordentlichen Lage während der Corona-Pandemie eingestellt werden.

Der zugehörige Fahrplan beinhaltete stündliche Abfahrten zwischen 9.00 und 16.00 an der Marzilibahn-Talstation und stündliche Abfahrten zwischen 9.30 und 16.30 am Bärenpark. Mit dem EZ10 Gen2 konnte eine Reisegeschwindigkeit von 5.5 km/h geplant werden.

Der zugehörige Tabellenfahrplan findet sich im Anhang 12.4.

5.7.3. Angebotskonzept Linie 23 - Ergänzung ab August.2020

Das Angebot mit **zwei** selbstfahrenden Fahrzeugen auf der Pilotstrecke wurde weiterhin als BERNMOBIL Linie 23 mit festem Fahrplan betrieben. Aufgrund einer Werkleitungssanierung im Bereich Schifflaube, also in der Mitte der Pilotstrecke, konnte nur eine Teilstrecke im Fahrplanbetrieb bedient werden (Abbildung 12). Details zur Wahl der Teilstrecke finden sich im Zwischenbericht Feb21 [4].

Für den West-Ast der Pilotstrecke wurde folgender Fahrplan erstellt:

- Betrieb Fahrzeug 1 von 11:00 bis 19:00 mit halbstündlichen Abfahrten an Marzilibahn und Münsterplattform (Mattelift).
- Betrieb Fahrzeug 2 von 13.45 bis 16.45 mit um 15 min versetzten, halbstündlichen Abfahrten, so dass sich in der Zeit zwischen 13.30 und 17.00 ein 15 min Takt ergibt.

Die Betriebszeiten wurden aufgrund der schwachen Nachfrage am Vormittag um 2 h nach hinten verschoben. Die beiden Fahrzeuge 037 und 038 sollten dabei wöchentlich wechselnd als Fahrzeug 1 bzw. Fahrzeug 2 zum Einsatz kommen.

Der zugehörige Tabellenfahrplan findet sich im Anhang 12.5.

5.7.4. Angebotskonzept Rufbus Linie 23 – OnDemand

In einem OnDemand-Betrieb verkehren die Fahrzeuge nur noch nach Bedarf, d.h., wenn ein Fahrtwunsch besteht. Der OnDemand-Betrieb folgt somit der Nachfrage. Die Fahrtwünsche der Fahrgäste werden dabei digital erfasst und verarbeitet. Entsprechend wurde ein Angebotskonzept mit folgenden Randbedingungen entwickelt.

Im Gegensatz zum Taxi konnte mit den selbstfahrenden Fahrzeugen nicht an beliebigen Orten auf der Strasse angehalten werden, sondern nur an abgestimmten Haltestellen. Gründe dafür waren auf der einen Seite der Genehmigungsprozess für die Pilotstrecke samt Haltestellen, auf der anderen Seite auch die Tatsache, dass das EasyMile-Backend-System mit fixen Haltestellen programmiert werden musste. Die Fahrzeuge konnten also weiterhin nur zwischen den definierten Haltestellen unterwegs sein, dies aber zu beliebigen Zeiten und auf beliebigen Routen, je nach Fahrtwünschen der Fahrgäste.

Die bis Dezember 2020 befahrene Strecke zwischen Bärenpark und Marzilibahn verlief entlang der einzigen durchgehenden Strassenverbindung am Aare-Ufer (Aarstrasse – Schifflaube – Mühlenplatz – Läuferplatz) und erlaubte keine Erweiterung zu einem Netzwerk aus unterschiedlichen Routen. Daher sollte das Bediengebiet erweitert werden. Nach Prüfung verschiedener Optionen fokussierte sich die Erweiterung auf das Marziliquartier. Die ursprüngliche Strecke wurde in Richtung Süden bis zur Berner Fachhochschule, Standort Brückenstrasse, ausgedehnt (vgl. Abbildung 13).

Die Betriebszeiten des OnDemand-Betriebs wurden wiederum auf Montag bis Freitag zwischen 9 und 17 Uhr festgelegt. Dies, weil diese Zeiten zwischen den Morgen- und Abendspitzen liegen und daher für den Einsatz von Begleitpersonen aus dem Fahrdienst am besten geeignet waren. Dabei wurde ein langer Fahrzeugeinsatz mit zwei Fahrdiensten zu 5 h und ein kurzer Fahrzeugeinsatz mit einem Dienst zu 5h vorgesehen.

Das Angebot wurde unter dem Namen "Rufbus Linie 23" vermarktet, um den Bezug zum vorherigen Fahrplanbetrieb herzustellen.

5.8. Fahrgastkommunikation für den Fahrplanbetrieb

Spezielle Ereignisse wie der Betriebsstart oder Anpassungen am Angebot wurden über die regulären Kanäle publiziert (Bernmobil-Webseite, Medienmitteilungen, Beiträge in Printmedien und digitalen Kanälen).

Die Informationen zum Fahrplan und zum Betriebszustand der Linie 23 wurden über die regulären BERNMOBIL-Kanäle publiziert. Dazu gehörten:

- 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.ch.

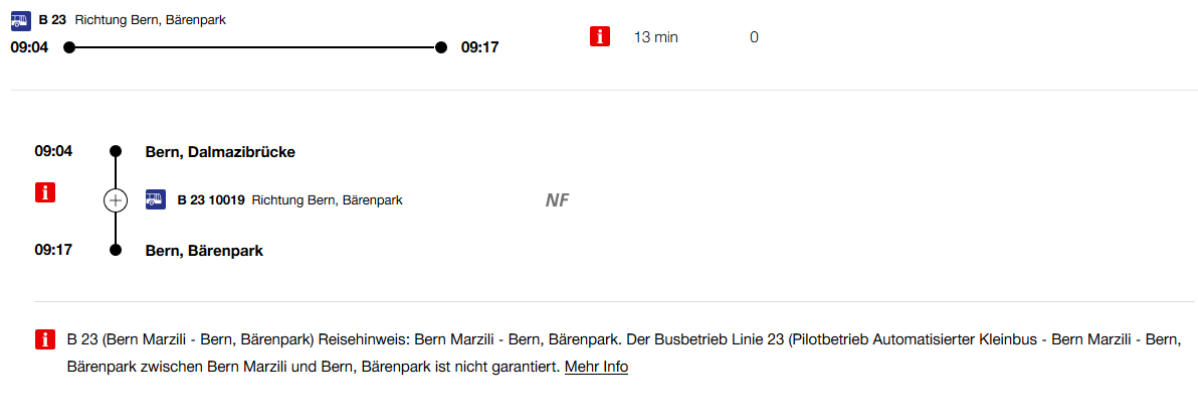


Abbildung 20: Fahrplanauskunft sbb.ch für den 23.1.2020

Die Fahrzeuge verfügten über ein Innendisplay, auf dem die Linie sowie die Haltestellen vom EasyMile-System angezeigt werden. Ein Teil des Displays konnte mit BERNMOBIL-Informationen zu Anschlüssen an den beiden Endhaltestellen bespielt werden. Eine echte Integration des Innendisplays in das BERNMOBIL Fahrgastinformationssystem war seitens EasyMile aber nicht möglich.

5.9. Fahrgastkommunikation für den OnDemand-Betrieb

Da BERNMOBIL zum Zeitpunkt des Pilotbetriebs auf den regulären Linien noch über kein OnDemand-Angebot verfügte, bestanden auch keine etablierten Kommunikationswege bzw. -systeme.

Spezielle Ereignisse wie der Betriebsstart oder Anpassungen am Angebot konnten zwar wie im Fahrplanbetrieb über die regulären Kanäle publiziert werden. Die Fahrgastinformation, also die Fahrplanauskunft sowie Meldungen über Verspätungen und den aktuellen Betriebszustand, musste jedoch unabhängig von den Standardprozessen über das zu beschaffende IT-Buchungssystem erfolgen, wobei die bestehenden Kontaktstellen (z.B. Kundencenter, Leitstelle) hier eingebunden werden sollten.

5.10. IT-Umgebung für den Fahrplanbetrieb

Mit der Beschaffung der EasyMile-Fahrzeuge war auch die Festlegung auf das EasyMile-Software-System "EZ Fleet" verbunden. Wie in Abschnitt 5.6.2 aufgezeigt, wird dies von EasyMile auf Cloud-Servern betrieben und der Zugriff seitens BERNMOBIL erfolgte einerseits über die grafische Oberfläche "SiteCC", andererseits über die bereitgestellten Schnittstellen "Monitoring API" sowie "Mission API". Letzteres erforderte entsprechend programmierte Software-Komponenten.

Für das Ziel der Einbindung der selbstfahrenden Fahrzeuge in die BERNMOBIL Leitstelle sollten die EasyMile-Schnittstellen mit dem vorhandenen Leitsystem Trapeze LIO 500 verbunden werden. Der Auftrag für die Erstellung der Software-Komponenten wurde von Amotech, einer Tochterfirma von Trapeze, ausgeführt. Damit war nicht nur das technische Fachwissen zu LIO abgedeckt, sondern es konnte auch auf etablierte Release-Prozesse zurückgegriffen werden.

Die von Amotech erstellte Software wird als AVOC (AV Operation Center) bezeichnet. Für den Operator im Shuttle gab es für die Anmeldung am System die "AVOC App" (Abbildung 21).

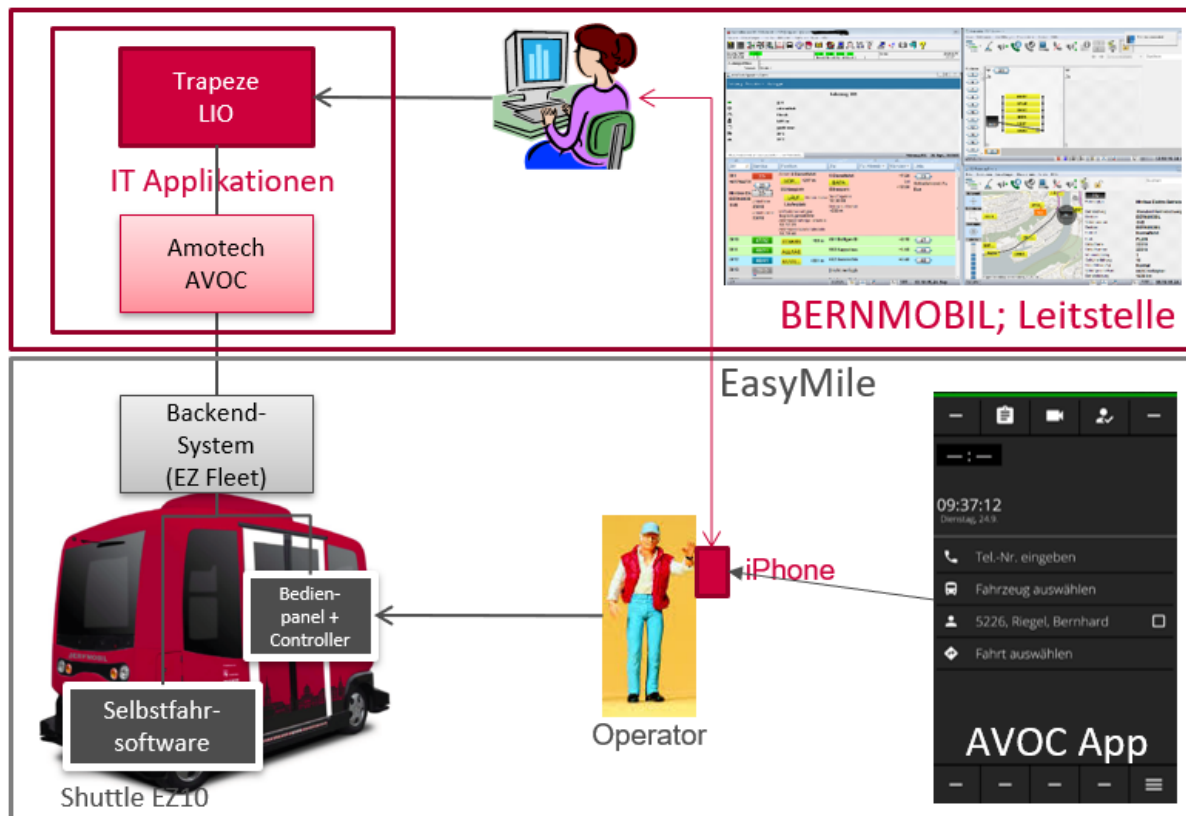


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Leitstellenanbindung

Weitere Details sind im Zwischenbericht Februar 2020 zu finden.

5.11. IT-Umgebung für den OnDemand-Betrieb

Für die Durchführung des OnDemand-Betriebs musste eine neue Software beschafft werden, die einerseits die Fahrtwünsche der Fahrgäste aufnehmen und optimieren kann, und die andererseits aufgrund guter Algorithmen entsprechende Fahraufträge an die Fahrzeuge erzeugen kann. Diese Fahraufträge sollten direkt an die Mission API von EasyMile gesendet werden können. Die Fahrtwünsche wiederum sollten von den Fahrgästen zeitgemäss über eine App erfasst werden können.

Für die Erstellung/Lieferung eines solchen Systems wurden in einem Einladungsverfahren auf Basis einer Anforderungsliste entsprechende Angebote eingeholt. Eine hohe Gewichtung erhielten aufgrund der begrenzten Projektressourcen der Preis sowie die fristgerechte Bereitstellung der Lösung.

Den Zuschlag erhielt die Firma T.DiMo für ihr gleichnamiges Buchungssystem. Auch T.DiMo gehört zu der Trapeze-Gruppe und bei der Entwicklung des Zugriffs auf die EasyMile-Systeme konnte auf vorhandenes Wissen auf Seiten Trapeze zurückgegriffen werden.

Die T.DiMo Software bestand aus 3 Komponenten (Abbildung 22):

- Dem für BERNMOBIL konfigurierten "TDimo-System" auf einem Server, mit Zugriff für BERNMOBIL
- Der BuchungsApp in einer für BERNMOBIL modifizierten Form.
- Der FahrerApp, ebenfalls für BERNMOBIL modifiziert.

T.DiMo hatte die Plattform für verschiedene Anbieter von Bedarfsverkehren mit konventionellen Fahrzeugen ("Anrufsammeltaxis") entwickelt und diese wurde für BERNMOBIL für den Einsatz mit den selbstfahrenden EasyMile-Fahrzeugen angepasst sowie für den spezifischen Einsatzort konfiguriert.

Das "System" zur Verwaltung von Buchungen sowie für Konfigurationsanpassungen wurde bei BERNMOBIL auf der Leitstelle sowie beim Projektteam bereitgestellt. Im Fall von ungeplanten Ereignissen sollten sowohl die Leitstelle wie auch die für den Pilotbetrieb verantwortlichen Projektmitarbeitenden korrigierend in das System eingreifen können. Im Normalbetrieb sollte das Buchungssystem aber ohne Eingriffe laufen.

Die FahrerApp wurde auf einem fest in den EasyMile-Fahrzeugen montierten MiniPC installiert. Über die FahrerApp sollte der Operator die Fahraufträge jeweils annehmen bzw. ablehnen können sowie die Ein/Aussteiger erfassen können.

Die BuchungsApp, eine WebApp, wurde für die Fahrgäste bereitgestellt (Link via QR-Code), so dass diese sich die BuchungsApp auf ihrem Smartphone installieren konnten. Ein zweiter Zugriffskanal für Fahrgäste (z.B. via Telefon) war nicht vorgesehen, nur im Fall von Störungen oder Reklamationen war die Telefonnummer des BERNMOBIL Infocenter hinterlegt.

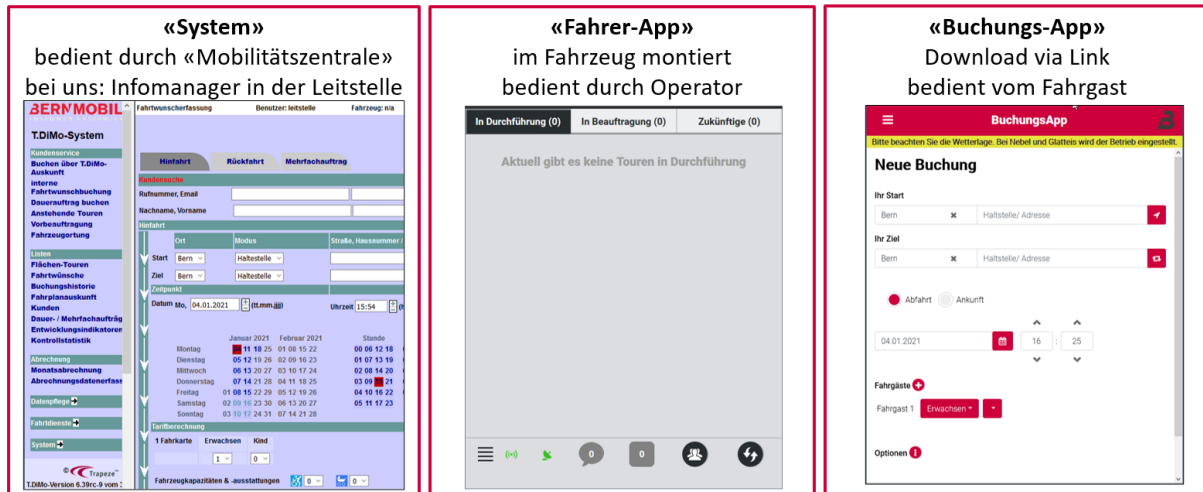


Abbildung 22: Die Komponenten der T.DiMo-Software

Der Workflow einer Buchung über das System ist in Abbildung 23 dargestellt. Er beginnt mit der Suchanfrage nach möglichen Fahrten durch den Fahrgast. Das T.DiMo-System liefert die möglichen Fahrtmöglichkeiten auf die BuchungsApp. Bucht der Fahrgast verbindlich eine der Optionen, plant das System eine entsprechende "Tour", wobei mehrere gebuchte Fahrtwünsche zu einer Tour zusammengefügt werden, wenn dies möglich ist. Anschliessend wird die Tour dem passenden Fahrzeug zugewiesen und muss dort vom Operator via FahrerApp angenommen werden.

Aus der Tour erstellt das System entsprechende Missions für die EasyMile-Schnittstelle. Diese könnte direkt an das Fahrzeug geschickt werden, welches sich unmittelbar in Bewegung setzen würde. Als Anforderung seitens BERNMOBIL muss der Operator alle Missions explizit quittieren, damit das Fahrzeug sich nicht alleine in Bewegung setzt. Dies geschieht via FahrerApp. Über diese erfasst der Operator gleichzeitig, welche Fahrgäste eingestiegen sind, und kann optional auch Korrekturen vornehmen (z.B. zusätzliche Personen mitnehmen). Nach der Bestätigung durch den Operator erhält das Fahrzeug die Mission und fährt bis zum Ziel der Mission. An Zwischenhalten bestätigt der Operator Ankunft, Aus/Einsteiger sowie die Weiterfahrt. Am Ziel der gesamten Tour muss er die Tour abschliessen.

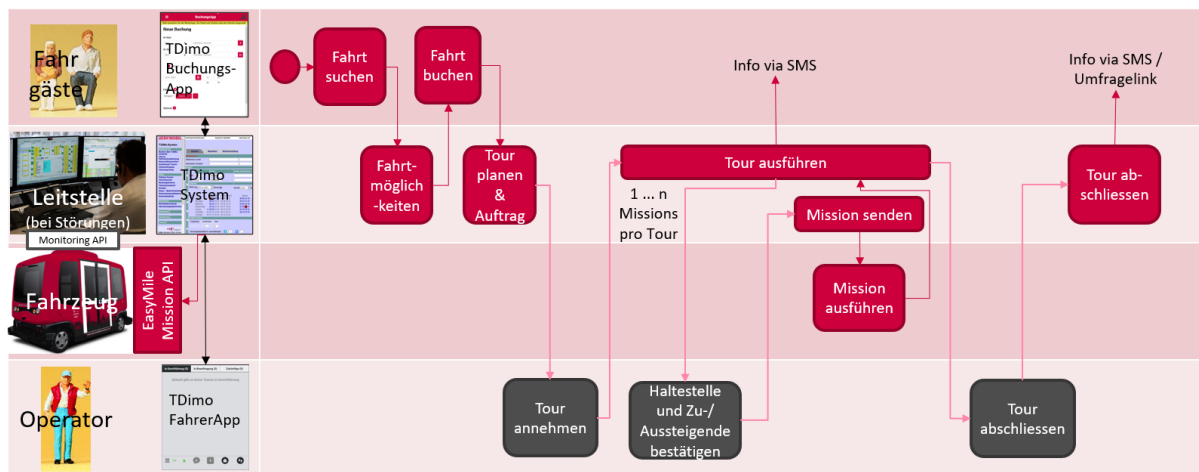


Abbildung 23: Workflow Buchungssystem T.DiMo und EasyMile Mission API

5.12. Betriebsorganisation für den Fahrplanbetrieb

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

Als Begleitpersonen (Operator) auf dem selbstfahrenden Fahrzeug kam überwiegend Fahrpersonal von BERNMOBIL zum Einsatz, welches diese Tätigkeit als befristete Zusatzfunktion im Umfang von 10-20 % neben den normalen Fahrdiensten durchführte. Weitere Begleitpersonen stammten aus anderen Unternehmensbereichen von BERNMOBIL bzw. in den ersten Betriebsmonaten von den Basler Verkehrsbetrieben (BVB) im Rahmen einer temporären Vereinbarung. Für die Einsätze wurden sogenannte "SFF-Dienste" konzipiert, die einerseits den Vorgaben von EasyMile bezüglich maximaler Einsatzzeit genügten, andererseits die Anforderungen des Schweizer Arbeitszeitgesetzes (AZG) erfüllten und zudem mit anderen Dienstteilen auf den regulären Linien kombinierbar waren. Die Dienstplanung für die "SFF-Dienste" erfolgt durch die Abteilung Produktionsplanung in Abstimmung mit dem Teilprojekt Pilotbetrieb.

Für den Betrieb der Linie 23 kamen, wo immer möglich, die Standard-Kommunikationswege von BERNMOBIL zur Anwendung. Im Tagesbetrieb war die erste Ansprechstelle für die Begleitperson auf dem EasyMile-Fahrzeug immer die Leitstelle, wo eine Verkehrsdisponentin bzw. ein Verkehrsdisponent die nötigen Massnahmen initiieren konnte und das Projekt SFF über relevante Ereignisse informieren konnte. Das Massnahmenspektrum der Leitstelle umfasste das Aufschalten der passenden Fahrgastinformation, das Aufbieten des Serviceteams, des Unfalldienstes oder das Alarmieren der Blaulichtorganisationen.

Zusätzlich wurde eine Telefon-Hotline zum SFF-Projekt eingerichtet, die während den Betriebszeiten der Linie 23 besetzt war und an welche sich in erster Linie die Leitstelle, aber auch die Begleitperson wenden konnte.

Das Ablaufschema der Kommunikation im Fall eines ungeplanten Ereignisses ist in Abbildung 24 dargestellt.

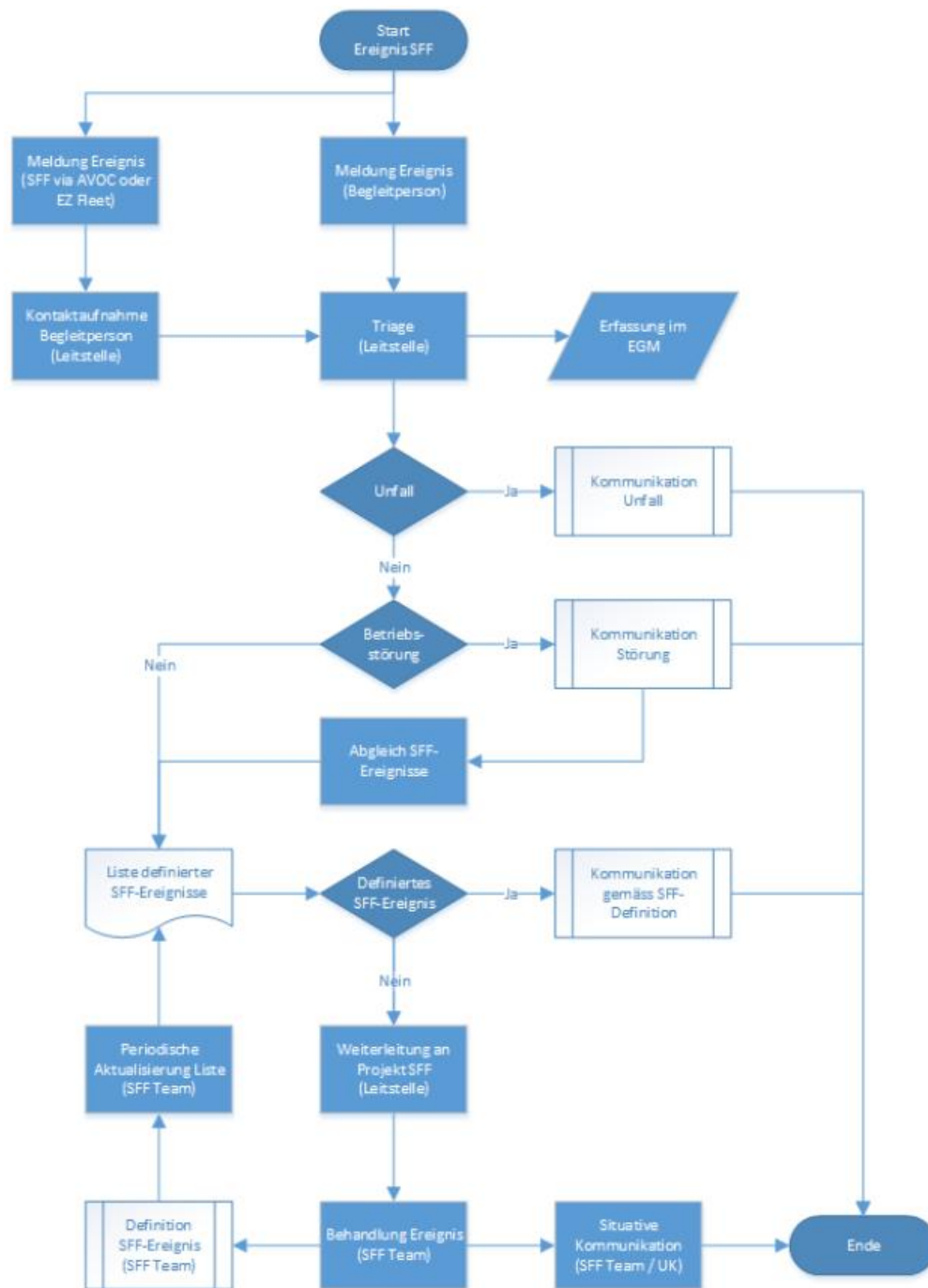


Abbildung 24: Kommunikation zwischen Operator, Leitstelle und SFF-Team.

Planbare Abweichungen der Linie 23 vom Normalbetrieb (z.B. Baustellen oder Anlässe, aber auch längere Fahrzeugausfälle) wurden zwischen dem Projektteam und dem "Team planbare Ereignisse" abgestimmt und an die zuständigen Stellen kommuniziert. Das SFF-Team hat dann entsprechend mit der Dienstplanung die Dienste umgeplant.

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

Da die Pilotstrecke im hochwassergefährdeten Bereich der Aare liegt, wurde zusätzlich mit den Verantwortlichen bei BERNMOBIL und der Berufsfeuerwehr Bern die Alarmierung sowie die nötigen Massnahmen im Fall eines Hochwasseralarms festgelegt.

5.13. Angepasste Organisation für den OnDemand Betrieb

Wo es realisierbar war, wurden die während des Fahrplanbetriebs verwendeten Standardprozesse auch im OnDemand-Betrieb weitergeführt. An mehreren Stellen waren aber Anpassungen erforderlich.

Dies betraf zum einen die Dienstplanung der "SFF-Dienste". Diese konnte weitergeführt werden. Da die eingesetzte Software DIVA für die Dienstplanung aber an die Fahrplan-Software angehängt ist, musste für den OnDemand-Betrieb ein künstlicher Sollfahrplan hinterlegt werden. Die Restriktionen der Dienstplanung hinsichtlich der Kombination mit Standarddiensten hatten wie oben erwähnt Einfluss auf die möglichen OnDemand-Betriebszeiten und die Einsatzplanung der Fahrzeuge. Die Fahrzeug-Disposition erfolgte durch das Projektteam über die Buchungssoftware T.DiMo.

Im normalen Betriebsablauf des OnDemand-Systems sollten alle Buchungen und allfällige Verspätungsmeldungen von dem T.DiMo-System bearbeitet werden (Abbildung 25).

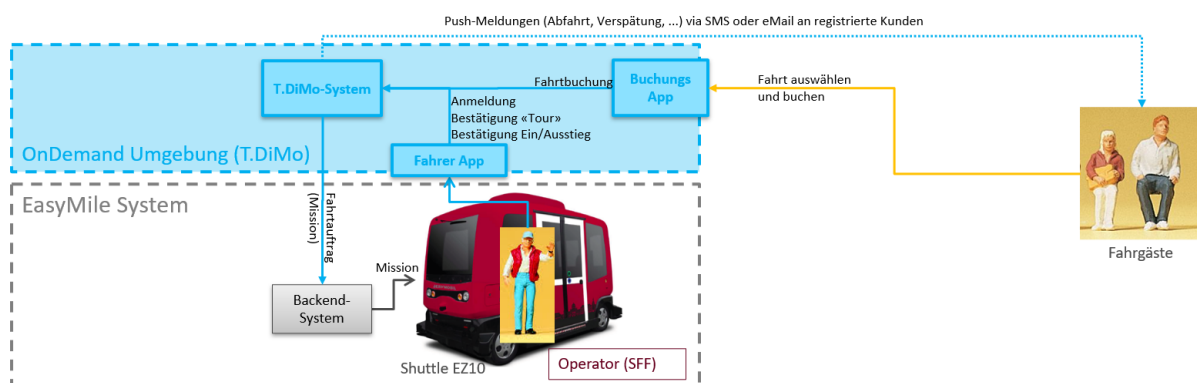


Abbildung 25: Kommunikationswege im störungsfreien OnDemand-Betrieb.

In der internen Kommunikation war weiterhin die Leitstelle als wichtiger Koordinator zwischen Operator, SFF-Team, Werkstatt und den übrigen Beteiligten im Boot. Die Verkehrsdisponenten der Leitstelle konnten die EasyMile-Fahrzeuge aber nur noch eingeschränkt überwachen, weil diese nicht mit Linie/Kurs im Leitsystem LIO angemeldet waren und somit nicht in allen Ansichten eingeblendet waren. Die Infomanager der Leitstelle erhielten mit der Bedienung des T.DiMo-Systems jedoch eine zusätzliche Funktion. Sie waren zuständig für Umbuchungen und Stornierungen durch Fahrgäste (via Infocenter) sowie für das Einpflegen von Störungsmeldungen im T.DiMo (Abbildung 26).

Weiterhin wurde das BERNMOBIL Infocenter als erste Anlaufstelle für Kundenkontakte entsprechend für die Anfragen von OnDemand-Fahrgästen geschult.

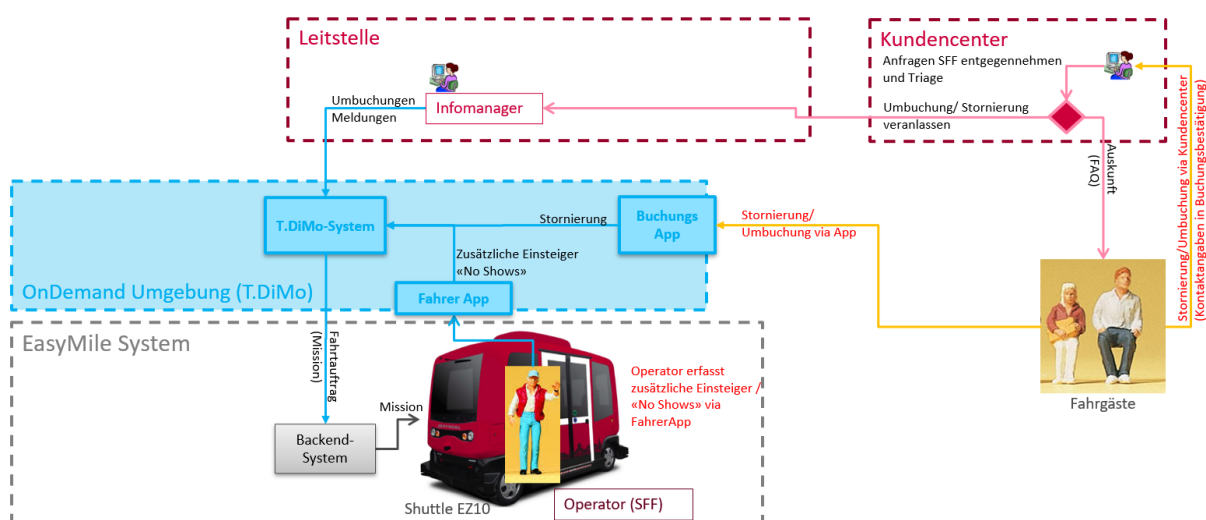


Abbildung 26: Kommunikationswege im störungsfreien OnDemand-Betrieb mit Umbuchung oder Stornierung durch Fahrgäste

Für die Kommunikation zwischen Operator und Leitstelle konnte die AVOC-App nicht mehr verwendet werden. Stattdessen wurde auf die Rückfallebene des BERNMOBIL Standard Mobilfunkgeräts (iPhone) mit den installierten Betriebs-Apps (eAgenda, Weisungstool etc.) gewechselt. Die Anmeldung des jeweiligen Operators an der Leitstelle erfolgte durch die Dienstplanung bzw. bei kurzfristigen Änderungen telefonisch durch den SFF ChiefOperator oder den Operator selbst.

Im Fall einer Betriebsstörung (z.B. Fahrzeugstörung, blockierte Strecke oder nicht geeignete Wetterverhältnisse) kontaktierte der Operator direkt den Verkehrsdisponenten in der Leitstelle. Dieser leitete die Information an einen Infomanager weiter, der eventuell vorhandene Buchungen auf das andere Fahrzeug umbuchte oder ganz stornierte. Der Infomanager informierte entsprechend den SFF Chief Operator (Abbildung 27).

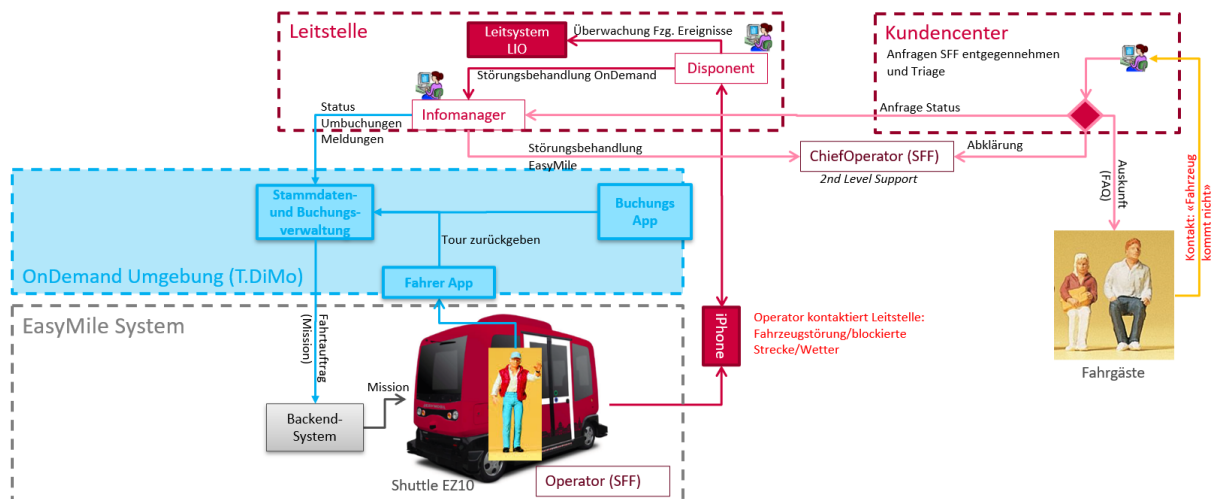


Abbildung 27: Kommunikationswege im OnDemand-Betrieb für den Fall einer Betriebsstörung

6. Projekterfahrungen zur Inbetriebnahme der automatisierten Fahrzeuge

6.1. Inbetriebnahme des EZ10 Gen2 inkl. Anbindung an die Leitstelle

Inbetriebnahme des EZ10 Gen2

Nach der in Abschnitt 5.6.3 beschriebenen Beschaffung und Lieferung des ersten Fahrzeugs erfolgte im Mai 2019 die initiale Programmierung der Pilotstrecke noch ohne die Zulassung des Fahrzeugs. Dies war möglich, weil das Fahrzeug durch eine Security-Firma in einer sogenannten Polizeiblase begleitet wurde.

Auf der Pilotstrecke mussten entlang der Aarstrasse sogenannte Orientierungstafeln montiert werden, damit die LIDAR-basierte Lokalisierung sicher funktioniert (Abbildung 28).



Abbildung 28: Aarstrasse mit weissen Orientierungstafeln an den Strassenlaternen.

Für die Abnahme des Fahrzeugs EZ10 Gen2 wurden Testfälle in Form eines Fahrmanöver-Katalogs definiert, um das Verhalten des Fahrzeugs auf dem Testgelände reproduzierbar testen zu können.

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.
- Anschliessend wird das Update im Testgelände aufgespielt und anhand der Testfälle geprüft.
- Danach erfolgt der Transport des Fahrzeugs zurück auf die Pilotstrecke, das Update der Streckenkonfiguration und die Testfahrten auf der Pilotstrecke

Anbindung an die Leitstelle

Die technische Anbindung des EasyMile-Fahrzeugs über die Schnittstelle "Monitoring API" und das AVOC-Modul von Amotech an das "LIO 500-System" von Trapeze konnte fristgerecht installiert und in Betrieb genommen werden. Das Fahrzeug "301" war mit Position, Fahrplanlage sowie weiteren Parametern auf dem Leitsystem sichtbar und konnte von den Verkehrsdisponenten überwacht werden (Abbildung 29).

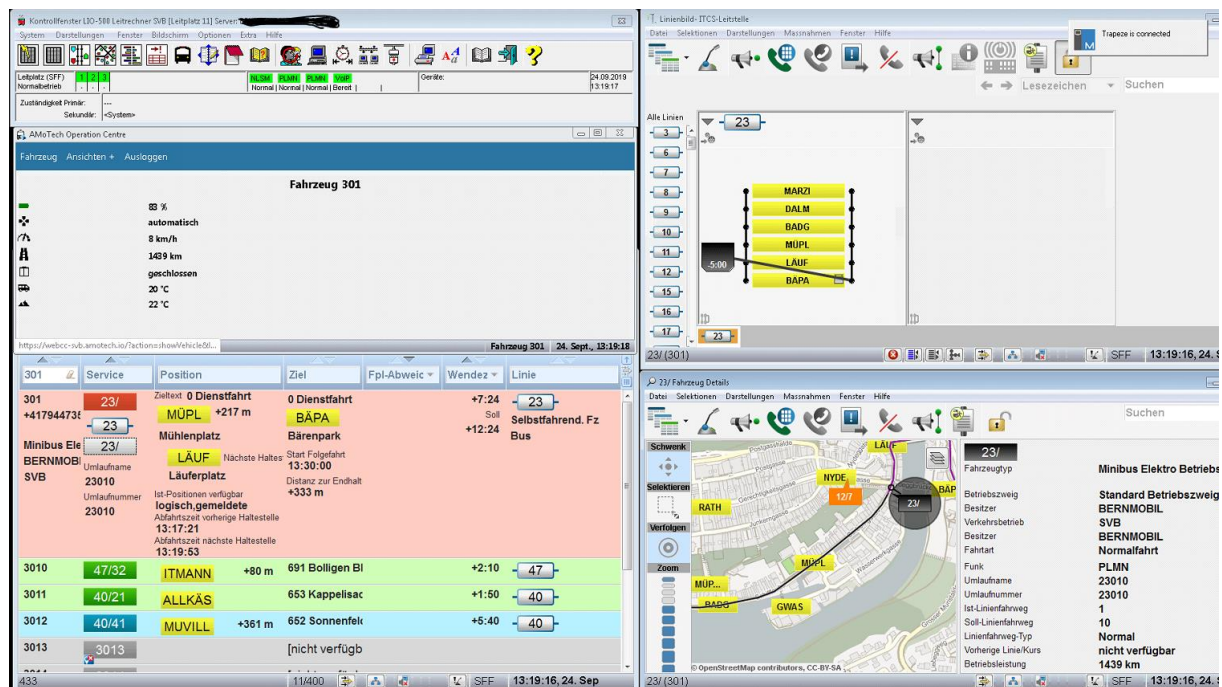


Abbildung 29: Darstellung des Fahrzeugs 301 in den Ansichten des LIO-Systems bei BERNMOBIL.

Auch in den übrigen Systemen bei BERNMOBIL war das Fahrzeug 301 integriert, die Linie 23 entsprechend in den Fahrgastinformationssystemen hinterlegt.

Abnahme Software Version 7 im Dezember 2019

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 oben dargestellte Update-Prozess wurde für das Release "Voyager 7" wie geplant durchgeführt. Es zeigte sich, dass das Update am Fahrzeug auch ein Update der Streckenkonfiguration nach sich zieht. Für beides zusammen waren mehrere Tage notwendig und alle Tätigkeiten konnten nur vom EasyMile-Experten durchgeführt werden, der nur für einen begrenzten Zeitraum vor Ort war. Daraus ergab sich ein hoher Zeitdruck für die Abnahme des Updates auf der Teststrecke.

In den Betriebstagen nach dem Update traten wiederholt Softwarefehler auf (signifikant zu hohe Zahl von unnötigen Notstopps, bis zu 10 Stopps in 30min). Diese waren auf der Teststrecke nicht aufgefallen. Sie konnten dann von EasyMile bei einem zusätzlichen Vorort-Einsatz am 23. Dezember 2019 mit einem Update zur Fehlerkorrektur behoben werden.

Weitere Details finden sich im Zwischenbericht Februar 2020.

6.2. Inbetriebnahme der EZ10 Gen3 inkl. Anbindung an Leitstelle bzw. OnDemand-System

Das Vorgehen zur Zulassung der neuen Fahrzeuge wurde in mehreren Koordinationssitzungen mit den Vertreterinnen der Bundesämter sowie des Lieferanten EasyMile im Februar und März 2020 abgestimmt. Basierend darauf wurden die Termine für die Fahrzeugprüfung am DTC (<https://www.dtc-ag.ch/>), die Elektrokonformitätsprüfung, den Einbau des Unfalldatenschreibers und die finale Abnahmeprüfung frühzeitig koordiniert und fixiert.

Der zugehörige Änderungsantrag wurde am 5.6.2020 dem ASTRA eingereicht.

Die Fahrzeuge G3 037 und G3 038 wurden pünktlich am 18.6.2020 in Bern angeliefert. Nach einem eng getakteten Zeitplan mit der Elektrokonformitätsprüfung, der Installation der Unfalldatenschreiber und der Bremstests beim DTC konnte bereits am 10.7.2020 die Abnahmeprüfung durch ASTRA, BAV und SVSA Bern stattfinden.

Schliesslich wurde BERNMOBIL bereits am 30.7.2020 vom ASTRA die neue Verfügung zugestellt.

Die Beschaffung der neuen Fahrzeuge konnte somit schlank und effizient abgewickelt werden. Folgende Gründe haben dies erleichtert:

- Der Werkliefervertrag als gute vertragliche Grundlage für die Beschaffung
- Deutliche Verbesserungen auf Seiten des Herstellers EasyMile bezüglich der Umsetzung von Anforderungen der Zulassungsstellen
- Sehr konstruktive und lösungsorientierte Zusammenarbeit seitens ASTRA und BAV und aller weiteren in die Zulassung involvierten Stellen
- Erfahrung des Projektteams sowie der mitwirkenden Firmen aus der vorhergehenden Fahrzeugzulassung des EZ10 Gen2

Die gelieferten Gen3 Fahrzeuge waren nicht in allen Punkten so ausgestattet, wie es im Dezember 2019 angekündigt wurde. Details dazu sind im Zwischenbericht Feb21 zu finden.

Abnahme Buchungssoftware T.DiMo

Die Buchungssoftware T.DiMo wurde fristgerecht im November 2020 für die Tests auf dem Depotgelände bereitgestellt. Im Januar 2021 wurde die Version für den Betrieb auf der Pilotstrecke bereitgestellt und in einem mehrwöchigen Test (Closed-User-Group) optimiert, so dass das System Ende Februar 2021 betriebsbereit war.

7. Betriebserfahrungen SFF

Nachfolgend werden die Betriebszeiträume mit den Angaben zu Fahrgastzahlen, km, Störungstagen und wichtigen weiteren Ereignissen beschrieben. Einen Gesamtüberblick zeigt Abbildung 30.

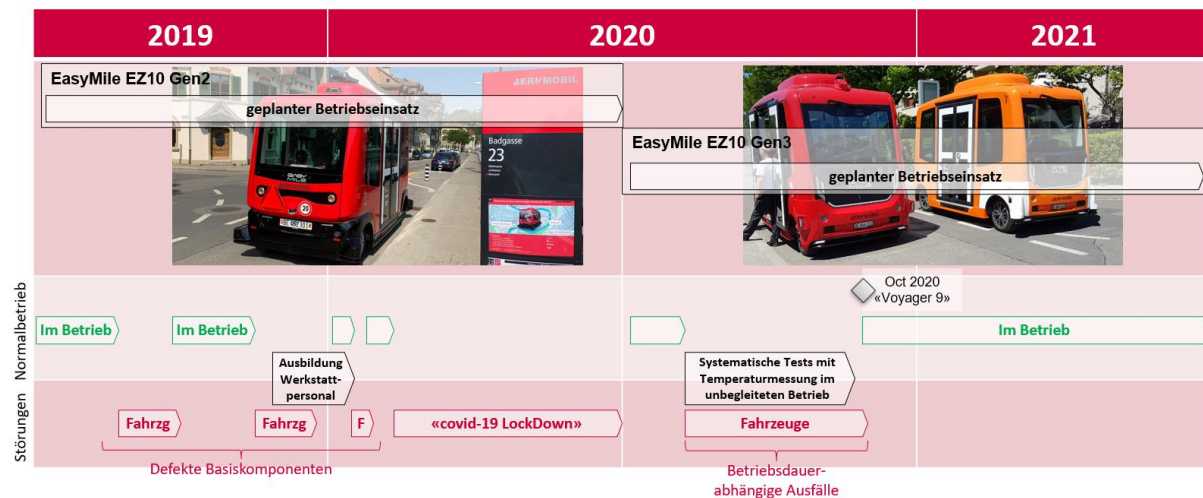


Abbildung 30: Betriebszeiträume zwischen Juli 2019 und Juni 2021

7.1. Betrieb ein Fahrzeug im Fahrplanbetrieb – Juli 2019 bis Juni 2020

Die Betriebserfahrungen im Fahrplanbetrieb mit dem EZ10 Gen2 043 vom Juli 2019 bis Juni 2020 sind in dem "Zwischenbericht Februar 2020" [2] sowie in dem "Zwischenbericht August 2020" [3] ausführlich beschrieben. Nachfolgend erfolgt eine Zusammenstellung der wichtigsten Erfahrungen. In Kapitel 8 werden dann einzelne Aspekte vertieft.

Verfügbarkeit des Fahrzeugs, km, Einsatzstunden und Fahrgastzahlen

Von den vorgesehenen Betriebstagen im Zeitraum **Juli bis Dezember 2019** konnte der Betrieb des EZ10 nicht an allen Tagen tatsächlich durchgeführt werden. Geplante Unterbrüche waren auf das Einspielen von Updates im Juli und Dezember, Ausbildungsfahrten im September und auf die Jahreswartung Ende November zurückzuführen.

Darüber hinaus kam es aber zu längeren ungeplanten Unterbrüchen, die überwiegend auf Fahrzeugstörungen zurückzuführen waren, namentlich Getriebebeschäden im August sowie blockierten Bremsen und unnötigen Notstopps im Dezember.

Dies spiegelt sich in der nachfolgenden Abbildung 31. Diese zeigt, dass im Juli und September gute und im Oktober und November sehr gute Verfügbarkeitswerte erzielt werden konnten. Dagegen gab es sowohl im August wie auch im Dezember grössere Ausfälle.

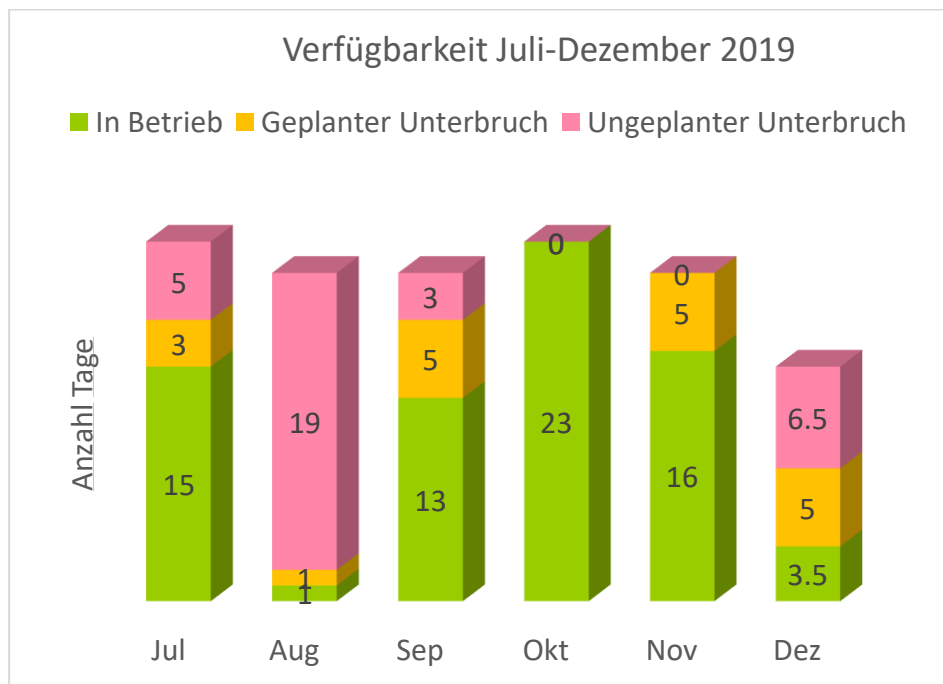


Abbildung 31: Verfügbarkeit des Fahrzeugs EZ10

Die Fahrgastzahlen wurden durch die Begleitpersonen ermittelt. Bis August erfolgte dies über einen Handzähler, ab September über ein elektronisches Erfassungstool. 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.

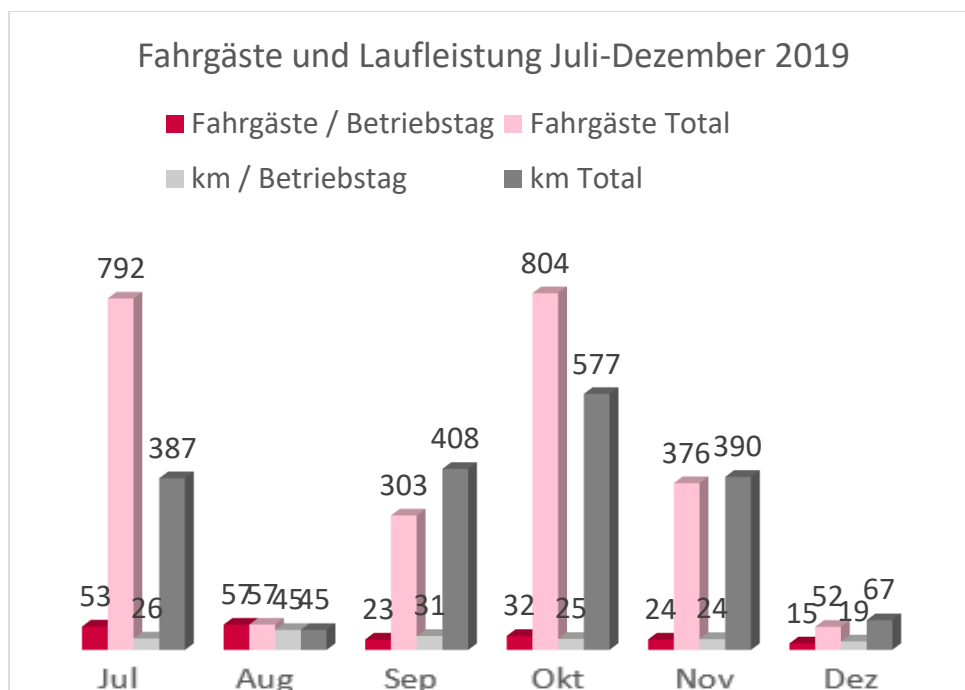


Abbildung 32: Fahrgastzahlen und Laufleistung im Betrachtungszeitraum

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.

Die langen Ausfälle wirkten sich negativ auf die Verlässlichkeit des Angebots aus und entsprechend gingen die Fahrgastzahlen während des Beobachtungszeitraums zurück.

Im Zeitraum **Januar bis Juni 2020** konnte das Fahrzeug aufgrund eines technischen Problems erst am 14.01.2020 den Betrieb wieder aufnehmen. Am 16.03.2020 musste der Betrieb aufgrund

der bundesrätlichen Massnahmen zur Bekämpfung der Corona-Pandemie bereits wieder eingestellt werden. Während der Betriebszeit gab es vier Tage Ausfall wegen eines technischen Problems am Fahrzeug, zwei Tage wegen Schneefall und weitere zwei Tage wegen einem Streckenupdate. Insgesamt war das Fahrzeug in diesem Zeitraum 26 Tage unterwegs und legte 658 km zurück, davon 606 automatisiert (km-Anteil ca. 91 %). Dabei wurden 584 Fahrgäste transportiert (im Durchschnitt 22 pro Tag).

Besondere Vorkommnisse:

Während des Betriebs sind folgende besondere Situationen gemeldet worden:

Unmittelbar nach Betriebsaufnahme gab es am 15.7.2019 eine Streifkollision eines überholenden Autos mit dem stehenden EZ10, wobei dessen Sensorabdeckung vorne links beschädigt wurde. Die Schuld lag klar bei der Autofahrerin. Diese Kollision führte zu einem kurzen Betriebsausfall. Während die Abdeckung rasch geklebt werden konnte, musste die Funktionsfähigkeit des Sensors jedoch zunächst mit Fernunterstützung von EasyMile überprüft werden, bevor EasyMile den Betrieb wieder freigeben konnte. Aus diesem Ereignis konnten folgende zwei Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Nutzung der Standard-Kommunikationswege bei BERNMOBIL hat sich bewährt (Leitstelle – Unfalldienst), der Vorfall wurde seitens der beteiligten BERNMOBIL Kollegen professionell und routiniert bearbeitet.
- Der Aufbau des EZ10 Gen2 mit den schwarzen seitlich herausragenden Sensorabdeckungen auf niedriger Höhe ist anfällig für Streifkollisionen, da die Abdeckungen schlecht sichtbar sind. Im gleichen Zeitraum wurde auch in einem Pilotversuch in Deutschland ein gleichartiger Unfall gemeldet.

Ein Gesamtüberblick der Vorkommnisse findet sich in Kapitel 8.3.

Technische und organisatorische Anbindung in die BERNMOBIL Standardprozesse

Dank des Engagements vieler Kolleginnen und Kollegen bei BERNMOBIL konnten die technische wie auch die organisatorische Anbindung des SFF-Betriebs in die Standardprozesse zu grossen Teilen umgesetzt werden.

Die Leitstellenintegration über das AVOC-Modul konnte zum Betriebsstart erfolgreich implementiert werden und in den ersten Betriebswochen nach und nach vervollständigt werden. Somit waren Soll- und Ist-Daten des autonomen Fahrzeugs im Leitsystem sichtbar und die Fahrgastinformationssysteme konnten damit versorgt werden.

Bezüglich der organisatorischen Einbindung waren für einzelne Prozessschritte Anpassungen nötig, die in Abbildung 33 in Rot dargestellt sind.

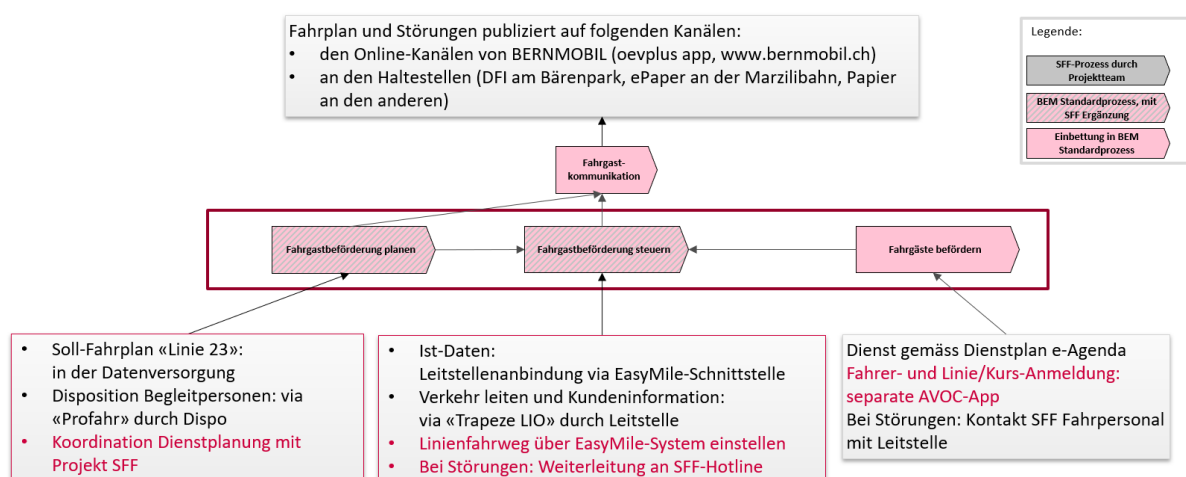


Abbildung 33: Integration SFF-Betrieb in Standardprozesse und Abweichungen (in rot)

Ausfallzeiten

Die Fahrzeugstörungen hatten jeweils lange Ausfälle zu Folge. Dies vor allem, weil zwischen der Meldung der Störung an EasyMile und des Vororteinsatzes eines EasyMile-Technikers viel Zeit

verging. Zum einen musste zunächst remote eine korrekte Diagnose erstellt werden. Zum anderen mussten die verfügbaren Techniker weltweit disponiert werden. Durch die Ausbildung zweier BERNMOBIL Kollegen aus der Buswerkstatt zu "EasyMile Maintenance Officer" im Herbst 2019 konnten die Ausfallzeiten deutlich reduziert werden.

Kommunikationswege

Sämtliche geplanten Änderungen im Betrieb der Linie 23 wurden vom SFF-ChiefOperator gemäss Standardprozess über das "Team planbare Ereignisse" an die zuständigen Stellen (Leitstelle, Kommunikation, Dienstplanung) kommuniziert. Von dort wurden die entsprechenden Systeme mit den relevanten Informationen versorgt.

Der SFF-ChiefOperator wurde von Seiten der Abteilung Sonderanlässe regelmässig über Baustellen, Veranstaltungen etc. im Bereich der Linie 23 informiert.

Ungeplante Änderungen (z.B. Kursausfall wegen blockierter Zufahrt) wurden vom Operator an die Leitstelle gemeldet und von dort an den SFF-ChiefOperator weitergeleitet. Im Fall einer Fahrzeugstörung wurde vom SFF-ChiefOperator ein Ticket im EasyMile-Helpdesk erstellt.

Da nur ein Fahrzeug auf der Linie 23 im Einsatz war, führten die Fahrzeugausfälle unmittelbar zu einer Einstellung des Betriebs auf der Linie 23. Dies konnte im Fahrgastinformationssystem erst nach einem Software-Update im Herbst 2019 korrekt dargestellt werden. Vor dem Update war die Linie 23 bei einem längeren Ausfall in den Systemen gar nicht mehr sichtbar, folglich konnten auch keine Ausfallinformationen aufgeschaltet werden.

7.2. Betrieb zwei Fahrzeuge im Fahrplanbetrieb- Juli bis Dezember 2020

Betriebstage

Die Betriebsaufnahme der neuen Fahrzeuge erfolgte am 24.08.2020. Sie waren im Zeitraum 24.08.2020 bis 31.12.2020 jedoch nur während knapp 3 Wochen im Betriebseinsatz. Aufgrund wiederholt auftretender technischer Probleme an beiden Fahrzeugen wurde am 10.09.2020 entschieden, den Fahrgastbetrieb einzustellen.

Die akuten Ausfälle (wie blockierte Bremsen) konnten zwar kurzfristig behoben werden, jedoch führte einerseits das wiederholte Auftreten zu abnehmendem Vertrauen der Operatoren in das Fahrzeug, andererseits gab das Auftreten jeweils erst nach längeren Betriebsstunden Anlass zur Vermutung, dass ein systematisches Problem zugrunde liegt. Diese Vermutung konnte durch intensive Testfahrten auf der Teststrecke bestätigt werden und erst mit dem Release "Voyager 9" Ende Oktober von EasyMile definitiv gelöst werden. Dies konnte seitens BERNMOBIL mit entsprechenden Dauertests im November 2020 bestätigt werden.

Während des Dezembers wurde dann der Fahrgastbetrieb nicht wieder aufgenommen, stattdessen wurden die Fahrzeuge zum Test des OnDemand-Systems eingesetzt.

Fahrgastzahlen und km-Leistung

Da aufgrund des installierten Fahrgastzählsystems keine Handzählung mehr gemacht wurde, das Fahrgastzählsystem jedoch anfangs nicht richtig funktionierte, liegen für die drei Betriebswochen leider keine Fahrgastzahlen vor.

Die Distanz der gefahrenen km ist in nachfolgenden Abbildungen getrennt nach Fahrzeugen für den Zeitraum August bis Dezember 2020 dargestellt, dabei sind Fahrten auf der Pilotstrecke blau dargestellt, solche auf dem Depotareal rot.

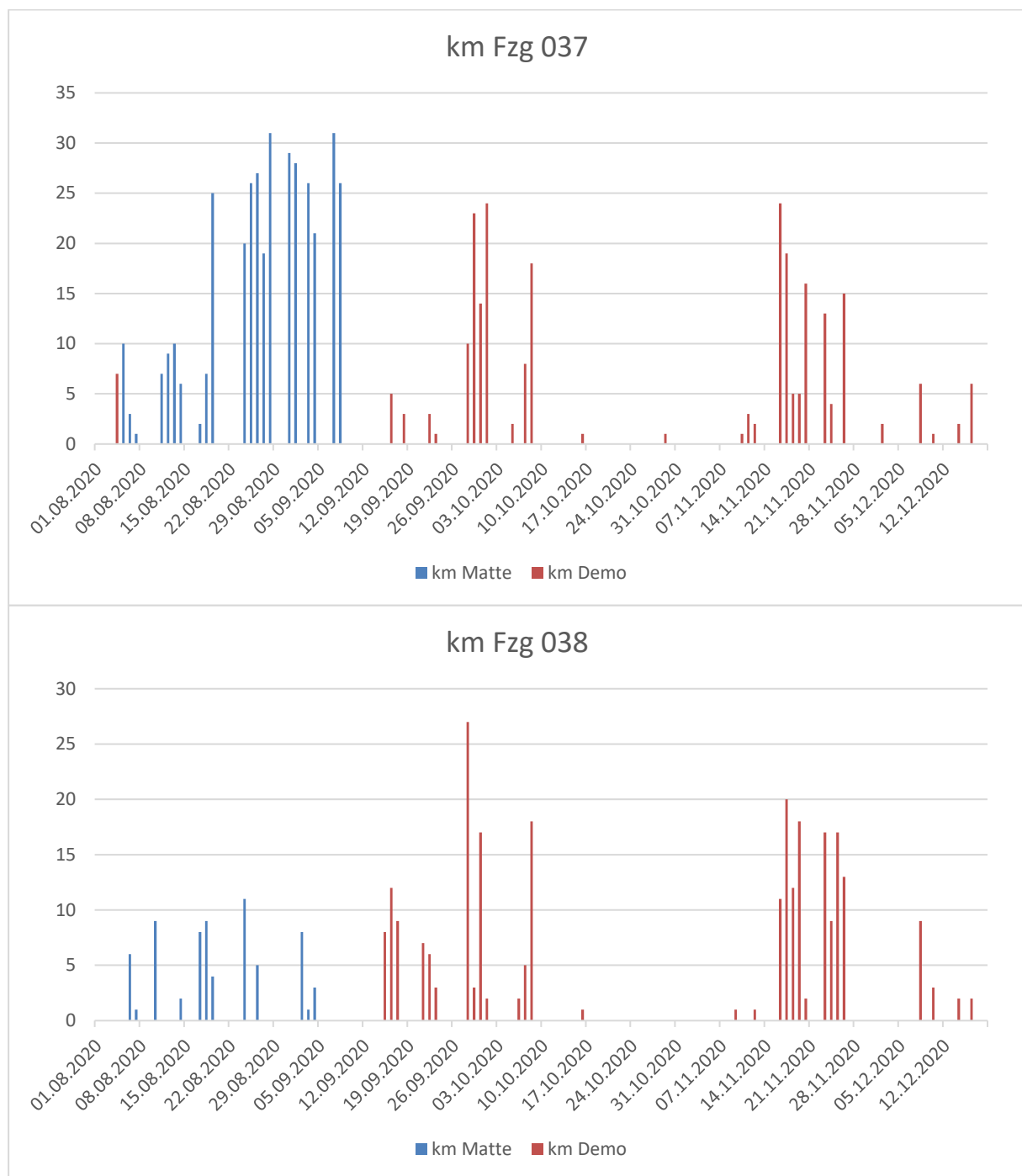


Abbildung 34: Laufleistung im Betrachtungszeitraum, oben Fahrzeug 037 (rot), unten Fahrzeug 038 (orange)

Besondere Vorkommnisse

Während des Betriebs sind mehrere Fahrzeugstörungen gemeldet worden, die zu Notstopps geführt haben.

Ein Gesamtüberblick der Vorkommnisse findet sich in Kapitel 8.3.

Ausfallzeiten

Bei einem akuten Ausfall eines Fahrzeugs aufgrund einer Störung konnte BERNMOBIL mit der Verfügbarkeit von zwei Fahrzeugen eigentlich kurzfristig das zweite Fahrzeug auf die Strecke schicken. Bei dem oben genannten systematischen Problem nützte jedoch die Verfügbarkeit von zwei Fahrzeugen nichts, da diese vom gleichen Typ waren und daher beide betroffen waren. Daher musste der Betrieb der Linie 23 zwischen 10. September und Dezember 2020 eingestellt werden.

7.3. Betrieb zwei Fahrzeuge im OnDemand-Betrieb – Januar bis Juni 2021

Nach den erfolgreichen Tests des OnDemand-Betriebs auf dem Testgelände im Dezember 2020 wurde im Januar 2021 von EasyMile die Streckenprogrammierung im Matte- und Marziliquartier vorgenommen. Neu verkehrten die Fahrzeuge zusätzlich von der Marzilibahn in Richtung Berner Fachhochschule (vgl. Kapitel 5.5.5). Anschliessend wurden im Januar 2021 interne Testfahrten durchgeführt, die dann noch in den Februar 2021 verlängert wurden, bis das Gesamtsystem rund lief. Die Betriebsaufnahme des neuen OnDemand-Angebots "Rufbus Linie 23" erfolgte per 01.03.2021 (vgl. Kapitel 5.7.4). Der planmässig letzte Betriebstag war der 30.06.2021. Insgesamt konnten zwischen 01.03. und 30.06.2021 82 Betriebstage gefahren werden.

Die beiden Fahrzeuge 302 und 303 wurden dabei abwechselnd auf einem langen "Kurs" von 9 Uhr bis 17 Uhr eingesetzt. Zusätzlich gab es einen kurzen "Kurs" von 11 Uhr bis 15 Uhr, der jedoch aufgrund von Restriktionen seitens der Dienstplanung nicht an jedem Tag in Betrieb war. Diese "Kurse" waren als solche in der Dienstplanungs-Software hinterlegt.

Für die Fahrgäste war entsprechend nur ein Fahrzeug zwischen 9 und 17 Uhr "für Buchungen verfügbar", d.h. in Betrieb, an manchen Tagen ein zweites von 11 bis 15 Uhr. Für die Fahrgäste war jedoch nicht ersichtlich, wie viele Fahrzeuge gerade in Betrieb waren. Das Buchungssystem hat Buchungen einfach auf das nächste freie Fahrzeug verteilt oder eine Buchung zum gewünschten Zeitpunkt nicht zugelassen, wenn kein Fahrzeug verfügbar war.

Betriebstage

Die Verfügbarkeit der beiden Fahrzeuge im Betriebszeitraum 1.2.2021 bis 30.6.2021 war sehr gut, das Angebot des "Rufbus Linie 23" konnte an allen publizierten Betriebszeiten tatsächlich gebucht werden. Es gab nur eine mechanische Störung bei einem Fahrzeug, die kurzfristig behoben werden konnte, die aber zu keinem Betriebsunterbruch führte. Weiterhin gab es an einzelnen Tagen Störungen im Buchungssystem, die weiter unten beschrieben werden.

Abbildung 35 zeigt die gefahrenen Distanzen je Tag und Fahrzeug nach Betriebsart (automatisiert bzw. manuell). Fahrzeug 302 (037) war 559 km unterwegs, Fahrzeug 303 (038) war 642 km im Einsatz. Da kein fester Fahrplan vorlag, variieren die gefahrenen km stark.

Über den gesamten Zeitraum waren beide Fahrzeuge zu gut 74 % der Zeit automatisiert unterwegs, dieser Wert liegt etwas höher als im Fahrplanbetrieb.

	VIN 037			VIN 038			Beide Fahrzeuge	
	Betriebstage	%auto	km	Betriebstage	%auto	km	%auto (AVG)	km (SUM)
Feb 21	15	72.02	129.69	11	75.20	82.97	73.61	212.66
Mär 21	8	80.73	103.31	15	84.00	194.37	82.36	297.69
Apr 21	14	74.51	150.38	11	69.29	86.71	71.90	237.09
Mai 21	13	75.79	131.52	9	75.34	79.13	75.56	210.65
Jun 21	7	72.54	44.41	21	68.94	198.85	70.74	243.26
Feb-Jun	57	74.78	559.31	67	74.26	642.03	74.52	1201.34

Abbildung 35: Betriebsdaten der Fahrzeuge 037 und 038 im OnDemand-Betrieb

Beide Aspekte werden im Kapitel 8.3.2 vertieft analysiert.

Im Betriebszeitraum wurden 1387 Buchungen registriert, davon wurden 837 von BERNMOBIL-Mitarbeitenden getätigt, 550 von anderen Fahrgästen. Aufgrund der Rückmeldung der Operatoren wissen wir, dass diese auf ihrem BERNMOBIL-Account im Buchungssystem viele Buchungen für die Fahrgäste vorgenommen haben. Dies vor allem aus den folgenden Gründen:

- Das Buchungssystem war nicht sehr intuitiv in der Bedienung für Fahrgäste
- Spontane Fahrgäste, die an einer Haltestelle in das gerade dort stehenden Fahrzeug einsteigen wollten, aber erst die recht zeitaufwändige Registrierung hätten vornehmen müssen. Hier hat der Operator, der bereits die terminierten Folgebuchungen im Blick hatte, aus praktischen Gründen die Buchung für die Fahrgäste vorgenommen.
- Fahrgäste, die keine Registrierung vornehmen wollten.

Die tatsächlichen Fahrgastzahlen von externen Personen sind daher höher, als es die Buchungen aufzeigen.

Besondere Vorkommnisse

Während des Betriebs ist am 15. Juni 2021 von einem Operator folgende besondere Situation gemeldet worden:

"Nach der Gelateria biegt ja der SFF in den Erlenweg (Bild 1 in Abbildung 36) ein. Dort stand auf der linken Seite (Bild 2) der Eiswagen der Gelateria mit der offenen Klappe (Bild 3) gegen die Strasse. Auch ich sah die offene Klappe aus meiner Standhöhe nicht sofort. Jedoch war mein Kollege mit an Bord und er sass auf dem Fahrgastsitz. Dadurch war er weiter unten und sah die Klappe. Ich konnte ca. 2 Meter vor der Klappe anhalten. Mit einem Rechtsschwenker kam ich aber am Hindernis vorbei. "



Abbildung 36: Situation Eiswagen mit offener Klappe bei Gelateria

Diese Meldung betrifft das rote Fahrzeug 302, das noch nicht mit dem neuen Lidar-Sensorset ausgestattet war.

In der Umfrage unter den Operatoren wurde dieser Vorfall als Beinah-Kollision gemeldet (vgl. Abschnitt 8.6.2).

Ein Gesamtüberblick der Vorkommnisse findet sich in Abschnitt 8.3.

Technische und organisatorische Anbindung in die BERNMOBIL Standardprozesse

Im OnDemand-Betrieb liegt sowohl die Dienstplanung wie auch die Fahrgastkommunikation betreffend besonderer Betriebssituationen (Ausfälle) weiterhin über die Standardprozesse, lediglich die Abfahrtszeiten sowie die Verspätungen konnten nicht mehr in den Fahrgastinformationssystemen angezeigt werden. Die Abfahrtszeit waren nur für die buchenden Fahrgäste über

die App bzw. die Verspätungen via SMS-Meldungen ersichtlich. Verspätungen konnten allerdings mangels Echtzeitdaten nicht immer rechtzeitig an den Kunden weitergegeben werden.

Die Fahrzeug-Position war weiterhin in der Leitstelle sichtbar, jedoch auch hier ohne Fahrplan und Abweichung.

Die Infomanager in der BERNMOBIL-Leitstelle wurden im Januar 2021 auf dem T.DiMo-System geschult und konnten die neue Aufgabe des Managements der OnDemand-Buchungen im T.DiMo-System im Fall von Absagen oder Verschiebungen durchführen. Durch die komplexe Bedienung des Systems kombiniert mit den seltenen Zeitpunkten, zu denen ein einzelner Infomanager dann tatsächlich aktiv werden musste, konnte sich jedoch keine Routine entwickeln. In der Folge wurde oft der ChiefOperator kontaktiert, um die nötigen Aktionen durchzuführen.

Die Fahrzeugdisposition im T.DiMo-System wurde vom jeweiligen ChiefOperator vorgenommen. Eine Integration in die Standardprozesse wäre ohne weiteres möglich gewesen, aufgrund der Kosten und Schulungsaufwände wurde jedoch darauf verzichtet.

Kommunikationswege

Grundsätzlich funktionierten die in Abschnitt 5.13 beschriebenen Kommunikationsabläufe im OnDemand-Betrieb gut, es entwickelten sich im Praxiseinsatz jedoch einige Variationen. Dies betrifft insbesondere die Fälle, bei denen das Buchungssystem nicht wie erwartet funktionierte. Teilweise kommunizierte hier das SFF-Projektteam bzw. der ChiefOperator direkt mit dem Operator im Fahrzeug und ggf. sogar direkt mit den wartenden Fahrgästen. Dies, um Informationen aus dem Kontakt zur Hersteller-Hotline (T.DiMo) direkt weiterzugeben bzw. überprüfen zu können.

Normalbetrieb OnDemand

An den meisten Betriebstagen hat das Buchungssystem reibungslos funktioniert und der Betrieb des "Rufbus Linie 23" lief selbstständig, ohne dass Leitstelle oder Infocenter involviert werden mussten. Der Fahrzeug-Einsatz wurde vom ChiefOperator mit einer Woche Vorlauf im T.DiMo-System festgelegt. Die Einsatzplanung der Operatoren lief mit dem üblichen Vorlauf von 4 Wochen über das Abstimmungs-Excel, das von der Abteilung Dienstplanung zusammen mit dem Leiter SFF-Pilotbetrieb entsprechend befüllt wurde. Im Normalbetrieb liefen sämtliche Fahrgastinformationen über die BuchungsApp bzw. dessen Backend-System über die Kanäle SMS/E-Mail.

Erfahrungen Störungen im OnDemand-Betrieb

Neben den an anderer Stelle beschriebenen Störungen z.B. wegen der Fahrzeuge oder Wetterbedingungen kamen mit dem OnDemand-System neue Fehlerquellen hinzu. Nachfolgend werden die wichtigsten davon beschrieben:

- Kommunikationsprobleme zwischen dem T.DiMo-Buchungssystem und der EasyMile-Schnittstelle:
 - Manuelle Anfahrten an eine Haltestelle mit nicht exakter Positionierung führten dazu, dass die zugehörige Mission nicht ordnungsgemäss abgeschlossen werden konnte und auf EasyMile-Seite weiter aktiv war, obwohl der Operator die Tour via FahrerApp im T.DiMo-System abgeschlossen hatte
- Konfigurationsprobleme bei der Abbildung der möglichen Fahrwege und -zeiten im T.DiMo-System: in einigen Fällen führten die EasyMile-Fahrzeuge Missionen durch, die so nicht beauftragt waren (z.B. mit einem Umweg über den Ländteweg bei einer Fahrt von der Marzilibahn Richtung Mühlenplatz).
- Fehler in der Implementierung der EasyMile-Mission API: in bestimmten, seltenen Fällen wechselte das Fahrzeug unerwartet die Fahrtrichtung und fuhr rückwärts auf der rechten Strassenseite mit der Tür links. Der Operator musste das Fahrzeug manuell wieder in die richtige Fahrtrichtung positionieren. Diese Fälle konnten durch eine Rekonfiguration der Weg-Zeit-Matrix im T.DiMo-System vermieden werden.
- Ausfall Netzwerkverbindung: an 2 bis 3 Betriebstagen verlor das T.DiMo-System die Verbindung zur EasyMile-Schnittstelle aufgrund von Authentifizierungsproblemen. Dies war für die Buchenden und für die Operatoren nicht ersichtlich, denn die Fahrten wurden im T.DiMo-System scheinbar normal bearbeitet, die Missions kamen einfach nie an den Fahrzeugen an.

- Das T.DiMo Buchungssystem stammt aus dem Bereich der Anrufsammeltaxis und war am Anfang in den Algorithmen nicht auf die langsamen automatisierten Fahrzeuge (6 km/h Reisegeschwindigkeit) ausgelegt. Dies führte anfangs zu unrealistischen Prognosen für die Abfahrtszeit. Die Wegzeiten wurden anfänglich vom EasyMile System übernommen, im Betrieb hat sich herausgestellt, dass die Wegzeiten in der Regel stark von der realen Fahrzeit abweichen, was zu verspäteten Ankünften des Fahrzeuges beim Kunden oder am Zielort der Buchung geführt hat. Wir haben die Wegzeiten daraufhin mit dem Fahrzeug gemessen und die störungsarmen Idealfälle als neue Wegzeiten im System hinterlegt. Dadurch konnte es bessere Prognosen für die Kunden liefern.
- Auch das Konzept mit virtuellen Haltestellen, an denen die Fahrzeuge zwar Fahrgäste ein/aussteigen lassen dürfen, an denen sie aber nicht auf Aufträge warten dürfen, musste über Tricks in die Konfiguration des T.DiMo-System eingebaut werden. Für diese Fälle wurden Leerfahrten zur nächsten möglichen Warteposition konfiguriert.

Sehr hilfreich bei der raschen Störungsbehebung war die direkte, telefonische Hotline zum T.DiMo-Helpdesk, eine Lösung, die sich BERNMOBIL auch von Seiten EasyMile gewünscht hätte.

7.4. Weitere Betriebserfahrungen

Folgende weitere Betriebserfahrungen sind noch erwähnenswert:

- Zur Ermittlung der Störungsursache wurden im Zeitraum September bis November 2020 Testfahrten ohne Operator auf einem abgesperrten Bereich der Demostrecke vorgenommen (siehe Zwischenbericht Februar 2021 [4]).
- Das EasyMile-Feature zur selbständigen Überwachung von definierten Streckenbereichen durch das Fahrzeug, bei dem dieses selbst über die Weiterfahrt entscheidet, wenn der Streckenbereich frei ist, konnte ebenfalls auf der Demostrecke verifiziert werden.
- Der Operator-Arbeitsplatz hat sich im praktischen Einsatz bewährt. Die Operatoren schätzten diese Verbesserung sehr.

8. Detailanalysen

Basierend auf den in Kapitel 4 genannten Zielen wurden zu einzelnen Aspekten vertiefte Untersuchungen, Datenanalysen bzw. Umfragen durchgeführt. Diese sind nachfolgend zusammengestellt. In Kapitel 8.7.10 werden daraus die Erkenntnisse abgeleitet.

8.1. Fragestellungen

Basis für die Detailanalysen waren die Fragestellungen, die sich aus den Verfügungen des ASTRA zur Genehmigung des Pilotbetriebs ergaben.

1. **Einsatz-Basisdaten der Fahrzeuge (km, Häufigkeit, Dauer der Einsätze):** diese Daten wurden im vorangehenden Kapitel 7 mit den Betriebserfahrungen aufgeführt.
2. **Häufigkeit und Beschreibung der Situationen, in denen die Begleitperson eingreifen musste:** hierzu werden in den Abschnitten 8.3 und 8.3 zunächst die Grundlagendaten dargestellt, bevor diese in Abschnitt 8.7 bewertet werden.
3. **Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmern, Häufigkeit und Beschreibung der Ereignisse:** diese Frage überschneidet sich mit 2. Auch hierzu werden in den Abschnitten 8.3 und 8.3 zunächst die Grundlagendaten dargestellt, bevor diese in Abschnitt 8.7.1 bewertet werden.
4. **Untersuchung und Beurteilung von heiklen Manövern:** hierzu werden die kritischen Situationen aus Frage 2 in Abschnitt 8.7.2 vertieft.
5. **Einstellung und Akzeptanz der anderen Verkehrsteilnehmer, insbesondere des LV:** Es wurden Umfragen unter Anwohnenden, Operatoren und auch Fahrgästen durchgeführt, die Rückschlüsse auf die Einstellung der anderen Verkehrsteilnehmer erlauben. Die Ergebnisse werden in Abschnitten 8.6.1 bis 8.6.3 dargestellt.
6. **Problematische Infrastruktur:** Hier geht es darum zu klären, bei welchen Elementen das Fahrzeug an seine Grenzen stösst. Dies basiert sowohl auf Beobachtungen der Operatoren wie auch auf einer Datenanalyse zum Anteil automatisierten Betrieb je Streckenabschnitt in Abschnitt 8.7.4.
7. **Verhalten im Verkehr:** Diese Frage ist sehr umfassend. Sie deckt zum einen Grundsatzfragen wie z.B. "Einhaltung des Rechtsfahrgebots", "Position auf der Strasse", "Verhalten des Fahrzeugs gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern und umgekehrt" oder "Eingliedern in das Verkehrsgeschehen und Fahrweise" ab. Weiterhin sind hier auch die Schwerpunktfragen enthalten, die für dieses Projekt formuliert wurden: "Verhalten des Fahrzeugs auf Abschnitten mit Gefälle von bis zu 15 % oder mit Kopfsteinpflaster". Zur Beantwortung dieser Fragen dienen sowohl die Betriebserfahrungen aus Kapitel 7 wie auch die vertieften Analysen in Abschnitt 8.7.2 und wiederum die Umfrageergebnisse in Abschnitten 8.6.1 bis 8.6.3. Die Analyse dieser Frage erfolgt in Abschnitt 8.7.5.
8. **Technische Erkenntnisse:** In dieser Frage soll das Funktionieren sowie die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge, der Systeme und Sensoren untersucht werden, weiterhin problematische Situationen und die Grenzen der Systeme (Wetter etc.), sowie die Auswirkung der Strassenunterlage "Kopfsteinpflaster" auf die Fahrzeug- und Sensortechnik. Siehe Abschnitt 8.7.6.
9. **Vernetzung:** Die Fragen zu den Themen "Funktionieren von Datenübertragung und -austausch sowie Verbindung zur Leitstelle, Erkenntnisse und Erfahrungen, Probleme im Rahmen der Vernetzung" werden in Abschnitt 8.7.7 beantwortet.
10. **Beobachtete Verbesserungen am Fahrzeug bzw. Veränderungen im Fahrzeugverhalten (Vergleich der beiden Fahrzeuggenerationen Gen2 und Gen3):** siehe Abschnitte 8.7.8 und 8.7.9.
11. **OnDemand-Halte an nicht markierten Haltestellen:** Im Abschnitt 8.7.10. werden folgende Fragen besprochen: Akzeptanz der anderen Verkehrsteilnehmenden, heikle Stellen und Situationen (Z.B. Abfahrt) und deren Ursachen, besonders geeignete Stellen, Sicherheit beim Ein- und Aussteigen.
12. **OnDemand-Betrieb:** Akzeptanz durch die Kunden, Reaktion auf Routenanpassungen während der Fahrt, Erfahrung zur elektronischen Bestellung. Siehe Abschnitt 8.7.11.
13. **Formale und inhaltliche Richtlinien zur Festlegung der Haltestellen:** Erfahrungen, Schwierigkeiten und Verbesserungspotenzial. Siehe Abschnitt 8.7.12.

Die ermittelten Daten und Umfrage bilden auch die Grundlage für die Erkenntnisse zu den Fragestellungen der Projektpartner, die in Kapitel 8.7.10 zu finden sind.

8.2. Methodik und Tools

Für die Datenanalyse wurden in den verschiedenen Projektphasen situativ unterschiedliche Methoden, Datenquellen und Tools verwendet.

In Stufe 1 (Betrieb EZ10 Gen2) zählten dazu:

- Abfragen auf dem LIO BI sowie Dateieexporte AVOC
- Datenanalyse, Notebooks zur Datenanalyse durch die Firma SPOUD AG (Technologie Kafka, Grafana)
- Eigene Umfragen
- manuelle Erfassung von Soll/Ist-Betriebsdaten durch das Projektteam
- Manuelle Fahrgastzählung sowie manuelle Erfassung der Interventionen in einer Datenbank durch die Operatoren
- EasyMile Betriebsdaten (monatliche Reports)
- Rückmeldungen der Begleitpersonen auf dem Fahrzeug bzw. der am Tagesbetrieb beteiligten Personen (ChiefOperator, Leitstelle)

In Stufe 2 (Betrieb zwei EZ10 Gen3) zählten dazu:

- EasyMile – Monitoring API (inkl. automatische Fahrgastzählung)
- EasyMile Betriebsdaten (monatliche Reports)
- T.DiMo – Excel-Exporte der Buchungsdaten
- SPOUD AG – Datenanalyse, Weiterentwicklung Entwicklung eines Datawarehouse sowie eines darauf aufsetzenden Dashboards. Dabei eingesetzte Technologie:
 - API Ingester Komponenten
 - Confluent cloud Apache Kafka
 - Time Series Datenbank InfluxDB
 - Grafana für die Visualisierung
- Rückmeldungen der Begleitpersonen auf dem Fahrzeug bzw. der am Tagesbetrieb beteiligten Personen (ChiefOperator, Leitstelle)

Es wurden während des OnDemand-Betriebs weiterhin drei Umfragen durch die Berner Fachhochschule, Departement Wirtschaft, Prof. Stefan Rose, durchgeführt. Eine unter den Fahrgästen, eine unter den Anwohnenden sowie eine unter den Operatoren.

8.3. Grundlagendaten zu manuellen Eingriffen

Beim Betrieb der automatisierten Fahrzeug gab es folgende Arten von Eingriffen durch die Begleitperson:

1. **Notstopp durch das Fahrzeug aufgrund verschiedener Ursachen.** Zu den Ursachen gehören plötzlich in kurzer Distanz erkannte Hindernisse, von der Software erkannte Unregelmässigkeiten und ein Drücken einer der Notstopp-Knöpfe. Durch den Notstopp wird eine Notbremsung ausgeführt und das Fahrzeug beendet den automatisierten Betrieb. Dies wird "Disengagement" genannt. Dieser Zustand kann nur durch Eingriff der Begleitperson wieder aufgelöst werden ("Rearming").
2. **Notstopp durch die Begleitperson während der Fahrt, ausgelöst über einen der Notstopp-Buttons:** Dies ist einer der in 1. genannten Gründe für den Notstopp, wird aber separat aufgeführt, weil hier potenziell eine vom Fahrzeug nicht erkannte Situation vom Operator übersteuert worden sein könnte. Das Drücken des Notstopp-Buttons durch den Operator ist aufgrund der Betriebsvorschriften auch beim Verlassen des stehenden Fahrzeugs erforderlich. Beide Fälle können auf der Datenschnittstelle leider nicht unterschieden werden.
3. **Anhalten des Fahrzeugs an einem sogenannten "Yield":** Dies sind geplante Stopp-Punkte, an denen das Fahrzeug auf die manuelle Freigabe durch die Begleitperson wartet. Diese werden bei der Streckenprogrammierung in der Navigationssoftware hinterlegt. Das Fahrzeug bleibt aber im automatisierten Modus und fährt nach Freigabe automatisch weiter.
4. **Automatisches Anhalten des Fahrzeugs vor einem Hindernis mit einem normalen Bremsvorgang ("SoftStopp"):** Im Unterschied zum Notstopp vor einem plötzlich auftauchenden Hindernis bleibt das Fahrzeug im automatisierten Modus. Im Standardfall wartet es, bis das Hindernis sich entfernt hat. Wurde die "Obstacle Circumvention" in

diesem Streckenabschnitt konfiguriert, versucht das Fahrzeug eine Umfahrung zu berechnen. Kann es eine Umfahrung berechnen, fordert es die Begleitperson zum Quittieren auf, und fährt danach automatisiert weiter. Kann es keine berechnen, muss die Begleitperson auf manuellen Betrieb umstellen und das Hindernis manuell umfahren. Letzteres ist auch im Fall ohne "obstacle circumvention" erforderlich, wenn sich das Hindernis nicht entfernt (Baustellen, parkierte Fahrzeuge, Pflanzen, Sonnenschirme etc.).

5. **Vorsorgliches Anhalten ("SoftStopp") und Abwarten durch die Begleitperson zur Vermeidung von Konfliktsituationen:** hierbei bleibt das Fahrzeug im automatisierten Modus, wird über "Stopp" und "Play"-Buttons jedoch vorübergehend angehalten. Dies war im Praxisbetrieb z.B. dann erforderlich, wenn in grösserer Distanz ein Fahrzeug rückwärts in eine seitliche Parklücke gefahren ist.
6. **Vorsorgliches Umschalten auf manuellen Betrieb durch die Begleitperson:** die Begleitperson kannten die Situationen, in denen sich im automatischen Betrieb voraussichtlich stressige Situationen ergeben würden. Z.B. wenn sich das Fahrzeug in einem einspurigen Abschnitt bei sehr knapper Vorbeifahrt an seitlichem Hindernis nur noch mit 2-3 km/h bewegt und so andere Verkehrsteilnehmer zu riskanten Manövern verleitet. Durch Umschalten in den manuellen Modus konnte ein besserer Verkehrsfluss erzielt werden.

Aus der Sicherheitsperspektive sind die Notstopps (1 und 2) vertieft zu betrachten. Die Notstopps aus von der Software erkannten Fehlerzuständen spielen auch bei der Beurteilung der Zuverlässigkeit der Basiskomponenten sowie des Gesamtsystems eine wichtige Rolle.

Die "Yields" und das "Anhalten vor Hindernissen" (3 und 4) zeigen, wo die Fahrzeuge heute an ihre Grenzen stossen. Dies tun auch die vorsorglichen Eingriffe der Begleitpersonen (5 und 6), diese können jedoch mit den Betriebsdaten zum Anteil automatisiertem bzw. manuellen Betriebszeiten noch detaillierter untersucht werden.

8.3.1. Datenanalyse der Notstopps

Die Zahl der Notstopps (genauer: der "Disengagements") wird von der EasyMile-Schnittstelle "Monitoring API" mit Zeit, Ort und Angabe des Grundes geliefert. Diese Daten liegen für verschiedene Betriebszeiträume vor und werden nachfolgend dargestellt.

Für das Fahrzeug Gen2 (mit Voyager 7) lieferte die Schnittstelle folgende Kategorien für die Gründe:

- 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

Nachfolgend zwei Abbildungen während des Fahrplanbetriebs des Fahrzeugs G2 043. Abbildung 37 zeigt die Daten für den Zeitraum Oktober bis November 2019. Abbildung 38 jene für den Zeitraum Januar bis März 2020. Es zeigen sich pro Betriebstag zwischen 15 und 50 solcher Notstopps (Disengagements) bei 27 gefahrenen km pro Tag (Sollfahrplan). Es ist also pro km mit einem solchen Notstopp zu rechnen (siehe auch Zwischenbericht Februar 2020 [2] und August 2020 [3]).

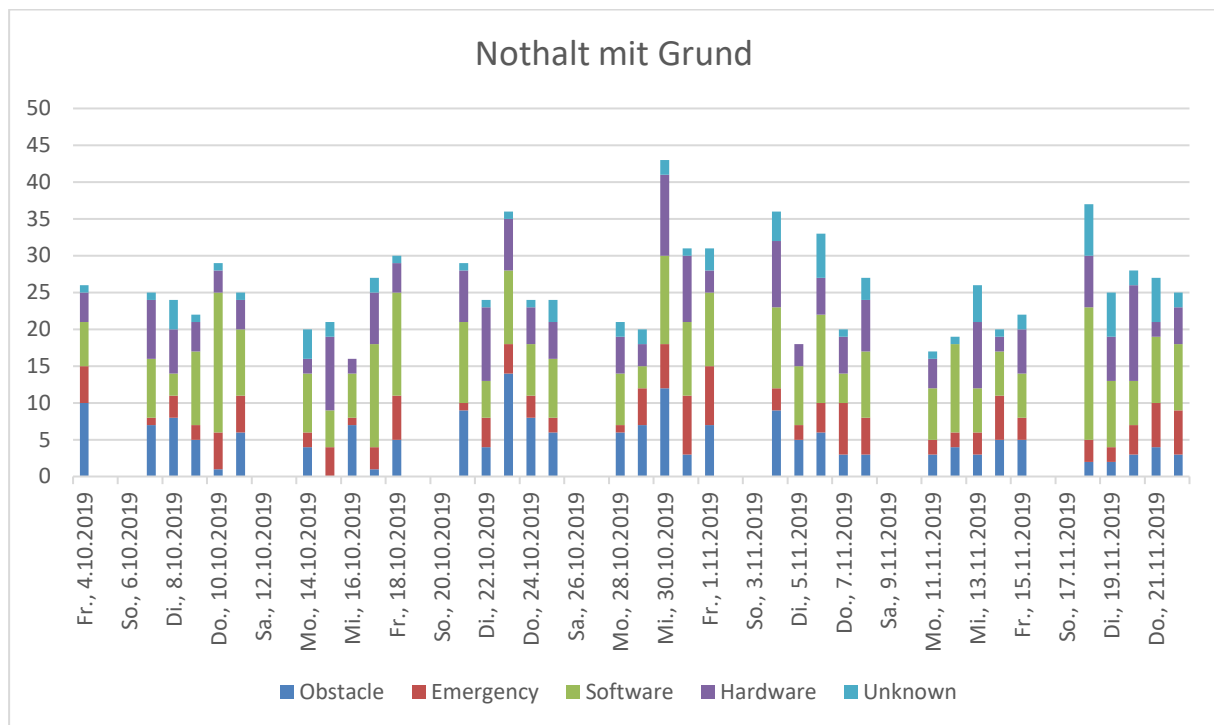


Abbildung 37: Verteilung der Nothalt-Kategorien im Oktober und November 2019

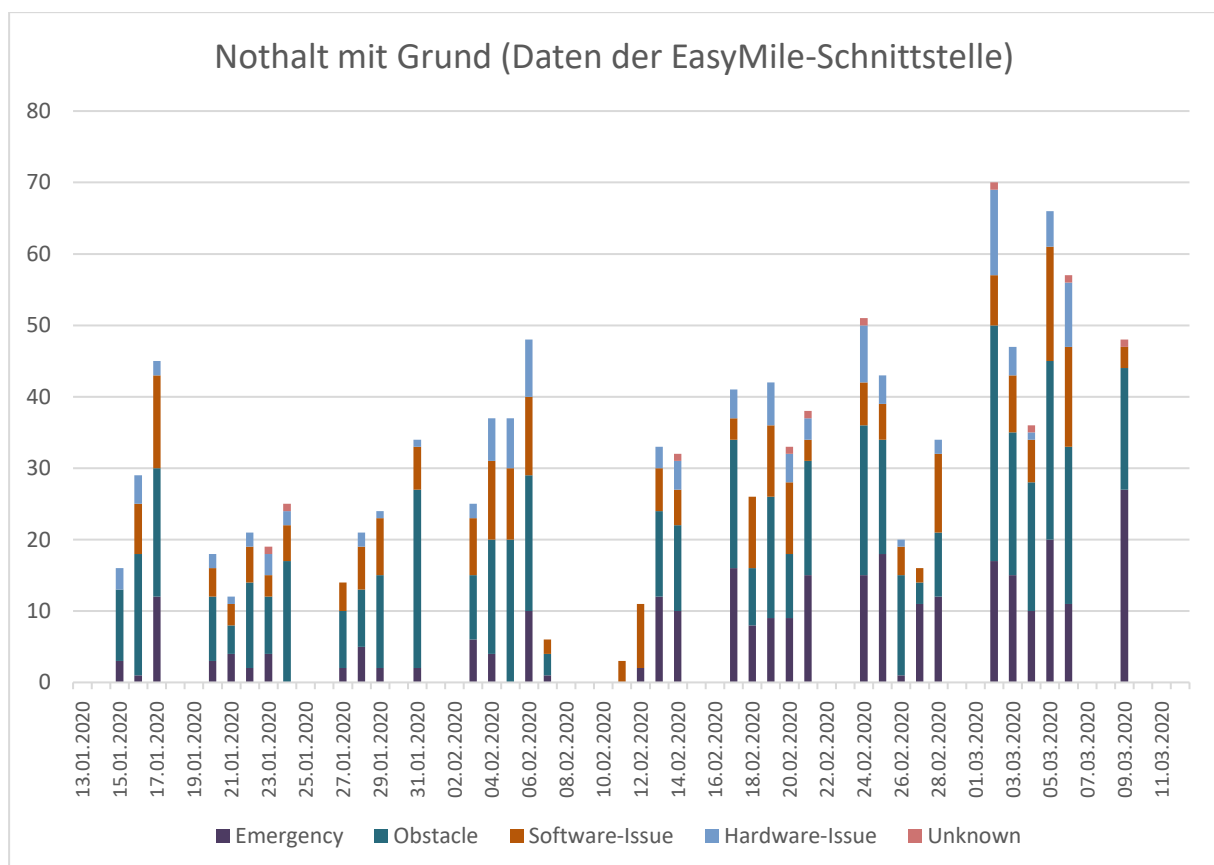


Abbildung 38: Übersicht Nothalt mit Grund im Betriebszeitraum Januar bis März 2020

Die Fragestellung des Einflusses vom Strassenbelag (Pflastersteine) wurde ebenfalls aufgrund der erfassten Notstopps untersucht. Dies wurde im Zwischenbericht Februar 2020 [2] ausführlich analysiert. Es konnte für das Gen2-Fahrzeug gezeigt werden, dass die Zahl der Nothalte aufgrund von Hard- oder Software-Fehlern pro km auf Kopfsteinpflaster signifikant höher war als auf glattem Fahrbahnbelaag (Abbildung 39).

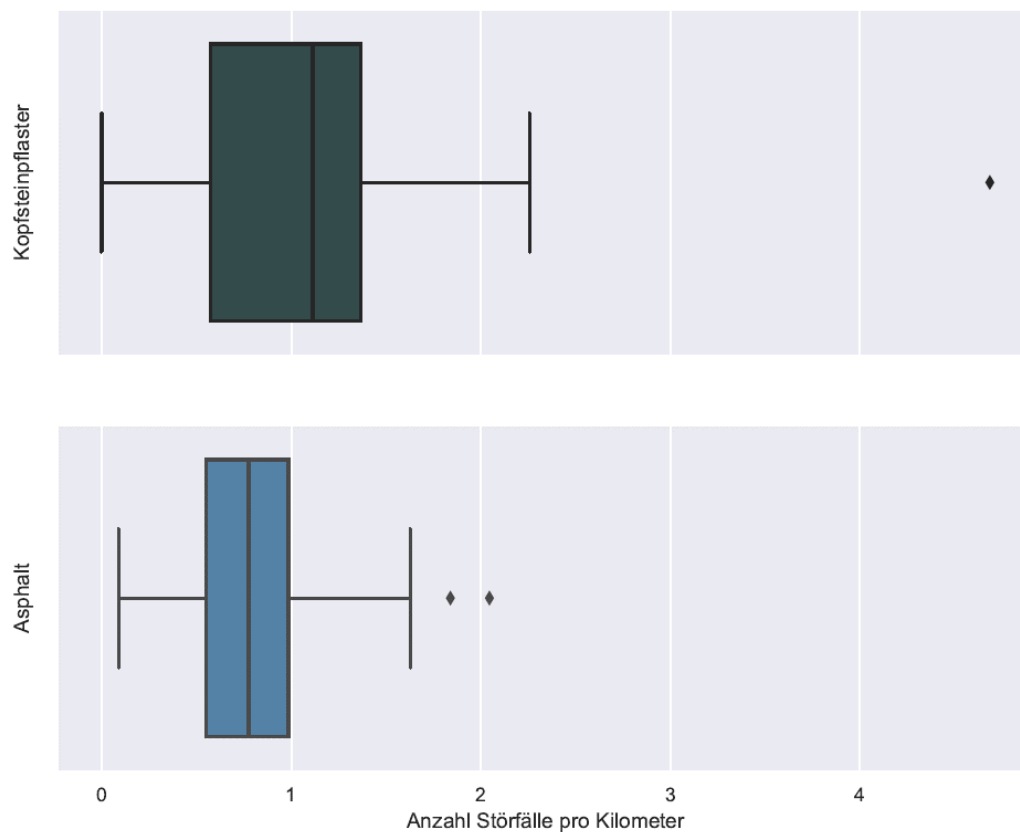


Abbildung 39: Mittelwert und Standardabweichung für die Anzahl der Störfälle pro km, getrennt nach Strassenbelag

Für die neuen Fahrzeuge mit der Software-Version "Voyager 10" lieferte die Schnittstelle zum Teil neue Bezeichnungen für die Kategorien:

- Obstacle – Nothalt ausgelöst durch Hindernis
- Button – Begleitperson oder Fahrgast hat einen Nothaltknopf gedrückt
- Navigation_software – Nothalt aufgrund einer Abweichung vom Soll-Zustand (z.B. Position, fehlende Lokalisierung)
- Platform – Nothalt auf Grund eines Fahrzeugproblems
- Unknown – Ursache unbekannt

Im OnDemand-Betrieb wurden die Nothalte (bzw. Disengagements) ebenfalls erfasst. Abbildung 40 zeigt die Werte beider Fahrzeuge kumuliert pro Betriebstag. Zusätzlich sind die gefahrenen Kilometer pro Betriebstag aufgetragen, da diese im OnDemand-Betrieb natürlich nicht mehr konstant sind. Die Zahl der Notstopps liegt in einem ähnlichen Bereich wie im Fahrplanbetrieb.

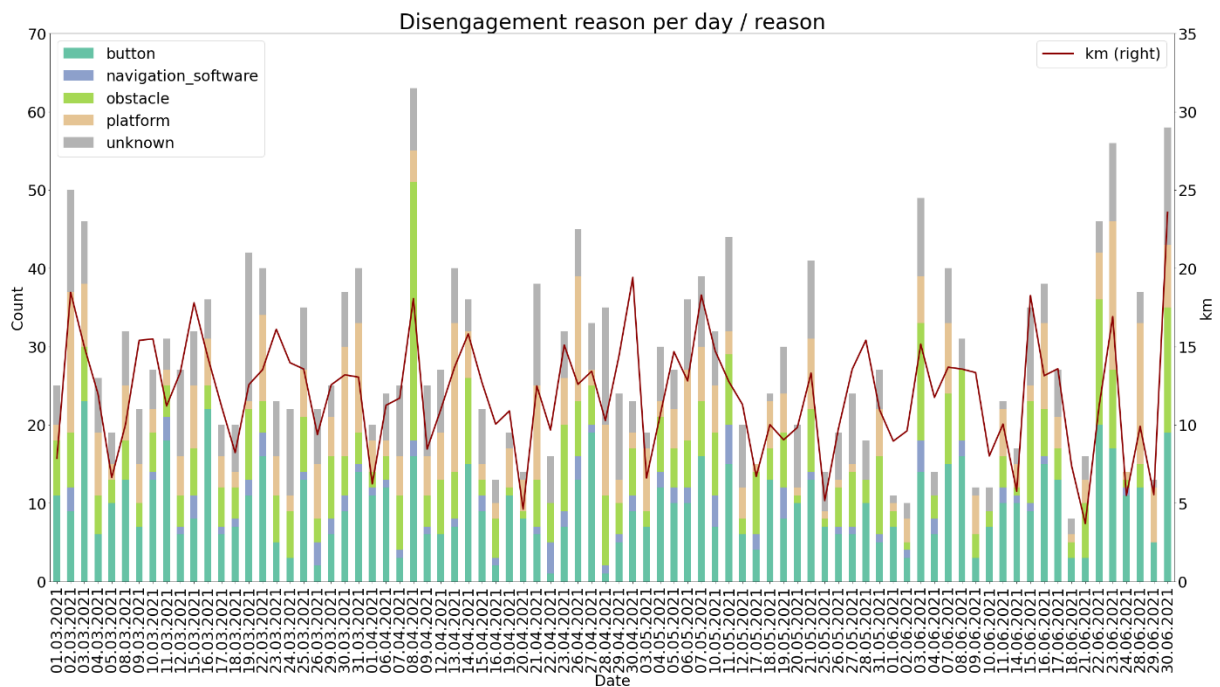


Abbildung 40: Übersicht Nothalt mit Grund im Zeitraum März bis Juni 2021 (rote Linie: gefahrene km pro Betriebstag)

In der Darstellung pro Kilometer (Abbildung 41) zeigt sich, dass pro km zwischen 1 und 3 Notstopps auftreten.

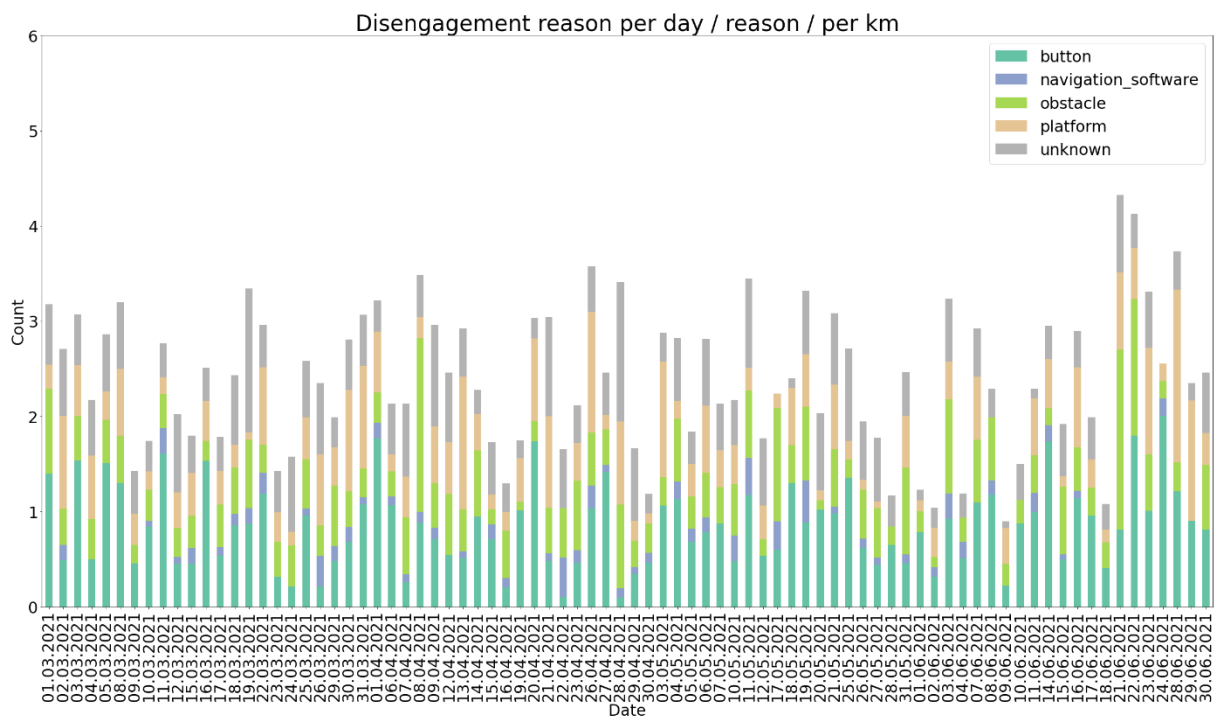


Abbildung 41: Notstopps pro Betriebstag und km

Aus den Daten wurden jene Notstopps herausgefiltert, die aufgrund eines erkannten Hindernisses erfolgten (Fussgänger, Auto, Velo, Pflanzen, Tiere, Objekte aller Art). Um herauszufinden, ob schlechte Wetterbedingungen die Zahl beeinflussen, wurden die Werte in Abbildung 42 korreliert mit der an dem Betriebstag erfassten Regenmenge. Es zeigte sich aber kein Einfluss der Regenmenge. Auch bezüglich der Windgeschwindigkeit konnte kein Zusammenhang identifiziert werden, siehe Abbildung 43 (Wind kann aufgrund umherfliegender Gegenstände Notstopps auslösen).

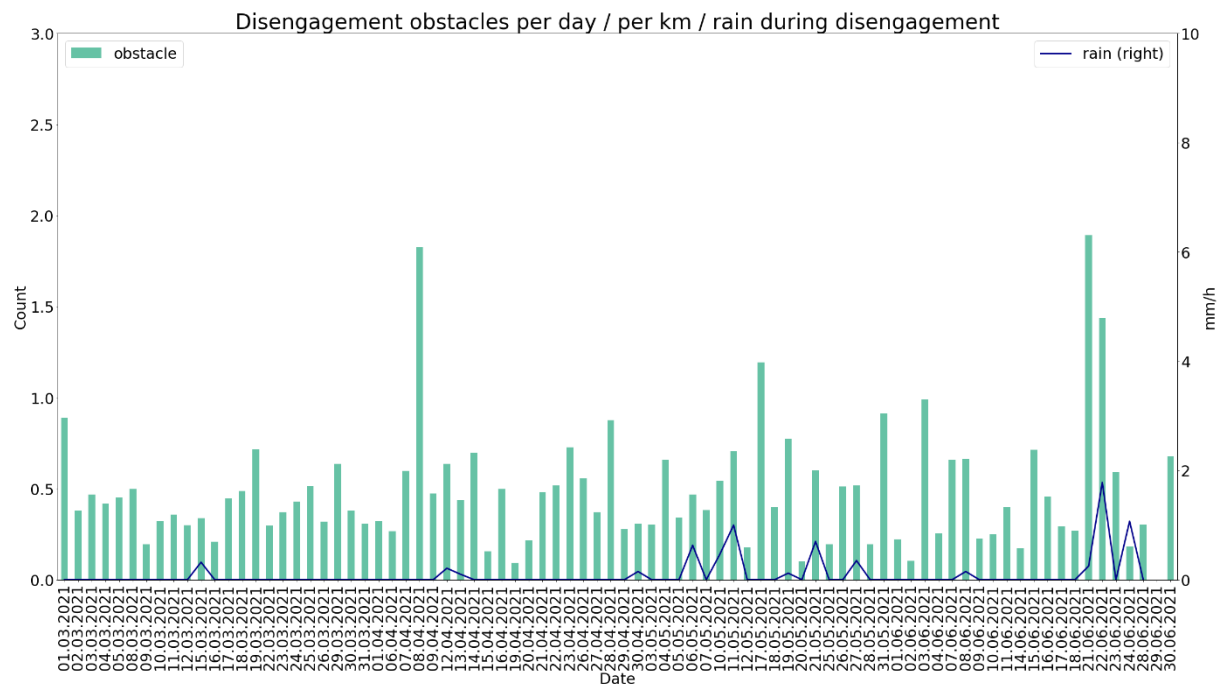


Abbildung 42: Korrelation der Nothalte aufgrund von Hindernissen mit der Regenmenge.

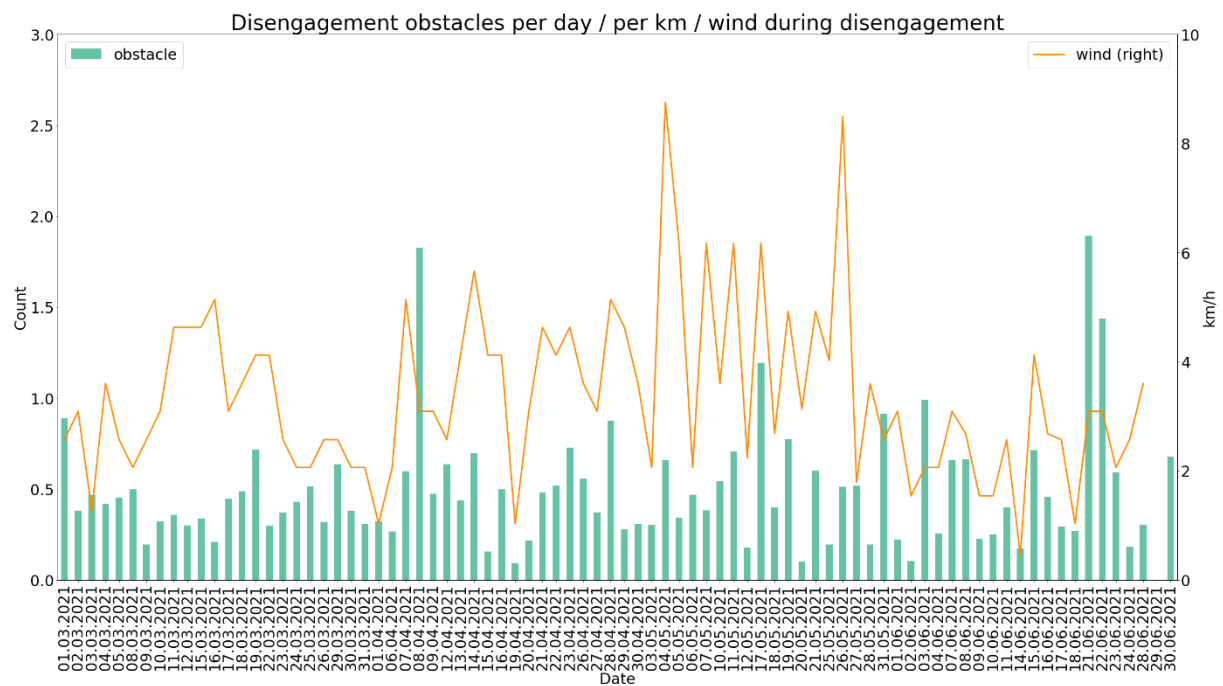


Abbildung 43: Korrelation Nothalte aufgrund von Hindernissen mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit

8.3.2. Anteil automatischer bzw. manueller Betrieb

Während des Fahrplanbetriebs mit dem Fahrzeug 301 (043) im Zeitraum Juli 2019 bis März 2020 ergeben sich folgende Basisdaten aus der EasyMile-Schnittstelle.

EZ 10 Gen2 043				
	Betriebstage	%auto	km	km/Betriebstag
Jul 19	23	79.80	490	21.30
Aug 19	6	49.25	55	9.17
Sep 19	17	77.93	398	23.41
Okt 19	24	79.74	601	25.04
Nov 19	16	75.63	409	25.56
Dez 19	8	47.78	113	14.13
Jan 20	13	68.18	359	27.62
Feb 20	18	59.01	408	22.67
Mär 20	8	60.54	223	27.88
Jul - März	133	66.43	3056	21.86

Abbildung 44: Monatswerte Fahrzeug 301 im ersten Betriebsjahr.

Es zeigen sich starke Schwankungen. Neben sehr guten Monaten mit hohen Kilometer-Werten und hohem Anteil automatisierter Betrieb (Juli und Oktober 2019) gibt es durchschnittliche Monate (September und November 2019 sowie Januar und Februar 2020) und sehr schlechte (August und Dezember 2019 sowie März 2020). Die letzteren lassen sich durch die in Abschnitt 7.1 beschriebenen Ausfälle des Fahrzeugs sowie mit anderweitigen Betriebsstörungen im März 2020 erklären.

Während des OnDemand-Betriebs zwischen Februar und Juni 2021 waren die beiden Fahrzeuge des Typs EZ10 G3 fast störungsfrei unterwegs. Daher konnten ausreichend Daten gewonnen werden, um verschiedene Aspekte zu untersuchen, auch zum Thema Anteil automatisierter Betrieb. Diese Datenanalyse erfolgte durch die Firma Spoud AG mit der in Abschnitt 8.2 genannten Methodik. Im Monat Februar war das Angebot nur für Testkunden buchbar, ab März dann für die Allgemeinheit verfügbar. Bezogen auf die Fahrzeugdaten beziehen sich die Auswertungen auf den Zeitraum Februar bis Juni 2021.

Abbildung 45 zeigt die Monatswerte der beiden Fahrzeuge (vgl. auch Abschnitt 7.3). Diese basieren auf einer Auswertung der Betriebstage im Anhang. Abbildung 54 (im Anhang) zeigt die gefahrenen Distanzen je Tag und Fahrzeug nach Betriebsart (automatisiert bzw. manuell), Abbildung 55 im Anhang den Anteil in %, den das Fahrzeug im Zustand "automatischer Betrieb" und "Geschwindigkeit > 0 km/h" war.

Bezüglich der Werte im Juni ist zu beachten, dass das Fahrzeug 303 (038) mit umgebauten Sensorset und der neuen Software-Version "Voyager 10" unterwegs war.

EZ 10 Gen3 037				EZ 10 Gen3 038 (ab Juni Gen3b)			Beide Fahrzeuge			
	Betriebstage	%auto	km	Betriebstage	%auto	km	Betriebstage	%auto (AVG)	km (SUM)	km/Betriebstag
Feb 21	15	72.02	129.69	11	75.20	82.97	20.00	73.61	212.66	10.63
Mär 21	8	80.73	103.31	15	84.00	194.37	23.00	82.36	297.69	12.94
Apr 21	14	74.51	150.38	11	69.29	86.71	20.00	71.90	237.09	11.85
Mai 21	13	75.79	131.52	9	75.34	79.13	18.00	75.56	210.65	11.70
Jun 21	7	72.54	44.41	21	68.94	198.85	21.00	70.74	243.26	11.58
Feb-Jun	57	74.78	559.31	67	74.26	642.03	102.00	74.52	1201.34	11.74

Abbildung 45: Zusammenfassung der Monatswerte der Fahrzeuge 302 und 303 im OnDemand-Betrieb im Jahr 2021.

Es zeigen sich folgende Effekte:

- Im Durchschnitt ist der Anteil automatisierter Betrieb der Fahrzeuge 302 und 303 etwas höher (74.78 %) als mit dem Fahrzeug 301 im Fahrplanbetrieb (66.43 %, vgl. Abbildung 44).
- Auch die Höchstwerte des Fahrzeugs 301 mit jeweils über 79 % im Juli und Oktober 2019 werden von den neuen Fahrzeugen 302 und 303 im März 2021 mit 80.7 % bzw. 84 % übertroffen.

- Zwischen den beiden Fahrzeugen 302 (037) und 303 (038) gibt es über den gesamten Betriebszeitraum keine systematische Abweichung beim Anteil automatisierter Betrieb.
- Der einzelne Messwert im Juni 21 für den automatisierten Betrieb für das umgebaute 303 (G3b 038) liegt mit 69 % allerdings tiefer als alle anderen Werte der G3 im nicht umgebauten Zustand.
- Es zeigen sich saisonale Schwankungen. So zeigten beide Fahrzeuge im März den höchsten Anteil automatisierter Betrieb mit Werten über 80 %. Dabei legten sie die meisten km pro Betriebstag zurück. Der Anteil automatisierter Betrieb zeigt in den Monaten danach jedoch abfallende Werte bis zum Juni mit knapp über/unter 70 %.
- Die gefahrenen km pro Betriebstag variieren stark (vgl. Abbildungen im Anhang), im Monatsmittel liegen sie jedoch bei Werten zwischen 10.6 km und 13 km um einen Mittelwert von 11.74 km relativ konstant. Dies ist deutlich weniger als im Fahrplanbetrieb mit einem Fahrzeug im ersten Betriebsjahr. Dort lag der Mittelwert bei 21.68 km mit einem Tiefstwert von 9.17 km und einem Höchstwert von 27.88 km (vgl. Abbildung 44).

Der Statuswert Automatisch/Manuell wird auch über die Monitoring API zusammen mit den Positionsdaten während des Betriebs bereitgestellt und konnte so räumlich verortet und zeitlich kumuliert werden. Nachstehende Abbildung 46 zeigt den Anteil automatisierter Betrieb in fünf Wertebereichen von grün (80 % und besser) bis rot (unter 20%).



Abbildung 46: Anteil automatischer Betrieb pro Streckenabschnitt in % (nur Zeiten mit $v > 0$ km/h)

Es können folgende Effekte beobachtet werden:

- Einen hohen Grünanteil gibt es auf der südlichen Marzilstrasse sowie auf der Aarstrasse sowie auf der Untertorbrücke. Dies sind breite Abschnitte, in denen eine Begegnung der Fahrzeuge gut möglich ist.
- Ebenfalls hohe Grünanteile zeigen der Dalmazikreisel, die Brückenstrasse zwischen Kreisel und Marzilbahn, der westliche Teil der Weihergasse (mit Ausnahme vor der Jugendherberge) und die Gasstrasse. Dies sind einspurige Abschnitte, in denen der motorisierte Verkehr nur in eine Richtung verkehrt (i.d.R. Einbahnstrassen).
- Sehr hohen Rotanteil hat der Mühlenplatz sowie die Zufahrt zum Garagenstandort. Dies erklärt sich dadurch, dass die Ein/Ausfahrten standardmässig manuell erfolgen mussten,

da die technische Haltestelle Garage nicht als solche im Buchungssystem hinterlegt werden konnte.

- Problematisch für den automatisierten Betrieb (hoher gelb und rot Anteil) waren folgende Abschnitte mit enger Fahrbahn und Gegenverkehr:
 - Durchfahrt Matteenge
 - Durchfahrt Gerberngasse und Mühleplatz
 - Durchfahrt Brückenstrasse südlich der Marzilibahn
- Ebenfalls problematisch für den automatisierten Betrieb (hoher gelb und rot Anteil) waren folgende Abschnitte mit Parkverkehr bzw. hohen Fussgängerfrequenzen
 - Der Bereich direkt vor der Marzilibahn Talstation
 - Parkplatz Klösterlistutz
- Auch der Einfluss von Vegetation, die sehr nah an der Fahrspur des Fahrzeugs wächst, lässt sich an einigen Stellen beobachten:
 - Ausfahrt Weihergasse vor dem Hammam (gegenüber Jugendherberge)
 - Brückenstrasse südlicher Abschnitt

Das Ergebnis entspricht den Beobachtungen durch die Begleitpersonen. Auf der südlichen Marzistrasse sowie auf der Aarstrasse und der Untertorbrücke werden mit über 80% die höchsten Anteile automatisierter Betrieb gemessen. Dies sind jene Abschnitte, in denen sich Fahrzeuge aufgrund ausreichender Fahrbahnbreite gut begegnen können. Ebenfalls ein relativ hoher Anteil automatisierter Betrieb zeigt sich in den zwar einspurigen, aber als Einbahnstrassen geregelten Abschnitten Weihergasse, Gasstrasse sowie Brückenstrasse zwischen Dalmazikreisel und Haltestelle Marzilibahn. Einspurige Abschnitte mit Gegenverkehr führen dagegen häufig zu Situationen, in denen manuell gefahren werden muss (z.B. südlicher Bereich der Brückenstrasse im Marziliquartier sowie Mühlenplatz über Gerberngasse bis Matteenge im Mattequartier). Von den Abschnitten mit besonders hohem Anteil manuellem Betrieb (rot) fallen die Parkplatzbereiche Mühlenplatz und Bärenpark auf, wohingegen die Zufahrt via Wasserwerkstrasse zur Garage einfach deshalb rot ist, weil sie im OnDemand-System nicht als automatisierte Strecke hinterlegt war.

Bewertung:

Im Fahrplanbetrieb des ersten Betriebsjahres kam das Fahrzeug G2 043 im Mittel auf 66% automatisierter Betrieb pro Tag ($v > 0$ km/h), wobei dieser Wert in den Spitzenmonaten Juli und Oktober bei knapp 80% lag. Im OnDemand-Betrieb des letzten Betriebsjahres betrug der Mittelwert für die beiden neuen Fahrzeuge knapp 75% mit einem Spitzenwert von 84%. Dies ist ein signifikanter Fortschritt durch die neue Fahrzeuggeneration, zeigt jedoch, dass die Begleitperson sehr häufig die Kontrolle übernehmen muss.

Weiterhin zeigt sich in der räumlichen Verteilung gut, dass Begegnungssituationen in Engstellen von den Fahrzeugen nicht beherrscht werden.

8.4. Datenanalyse OnDemand-Buchungen

Der OnDemand-Betrieb erfolgte wie beschrieben zwischen Februar und Juni 2021 war aber erst ab März für die Allgemeinheit verfügbar. Daher beziehen sich die nachfolgenden Abbildungen auf den Zeitraum März bis Juni 2021.

Abbildung 47 zeigt die Zahl der Buchungen pro Tag. Den bis zu 25 Buchungen pro Tag stehen bis zu 170 Buchungsanfragen pro Tag gegenüber, die dann nicht gebucht wurden).

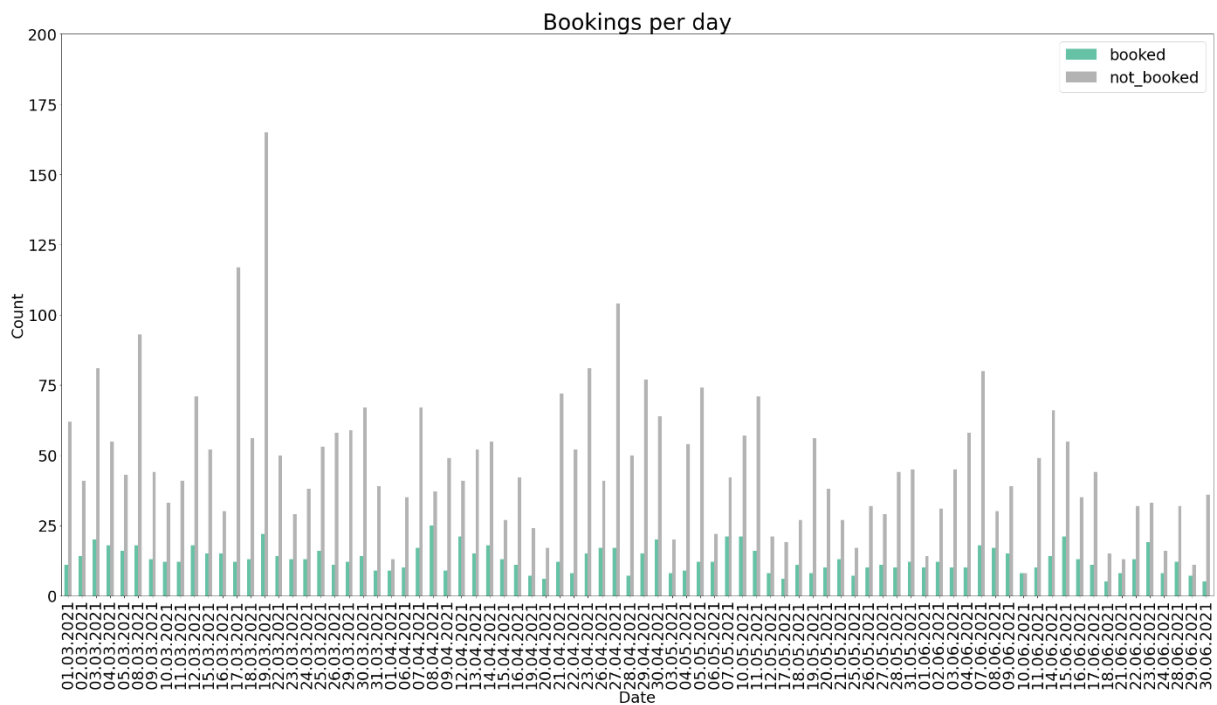


Abbildung 47: Zahl der Anfragen mit und ohne erfolgte Buchung (im Zeitraum März bis Juni 2021)

Eine Auswertung der Buchungen pro eindeutiger User-ID nach dem im Feld "email" enthaltenen Suffix "@bernmobil.ch" zeigt, dass die Operatoren auf den Fahrzeugen die meisten Buchungen gemacht haben (Abbildung 48). Der Fahrgast mit den häufigsten Buchungen brachte es auf 26 erfolgreiche Buchungen.

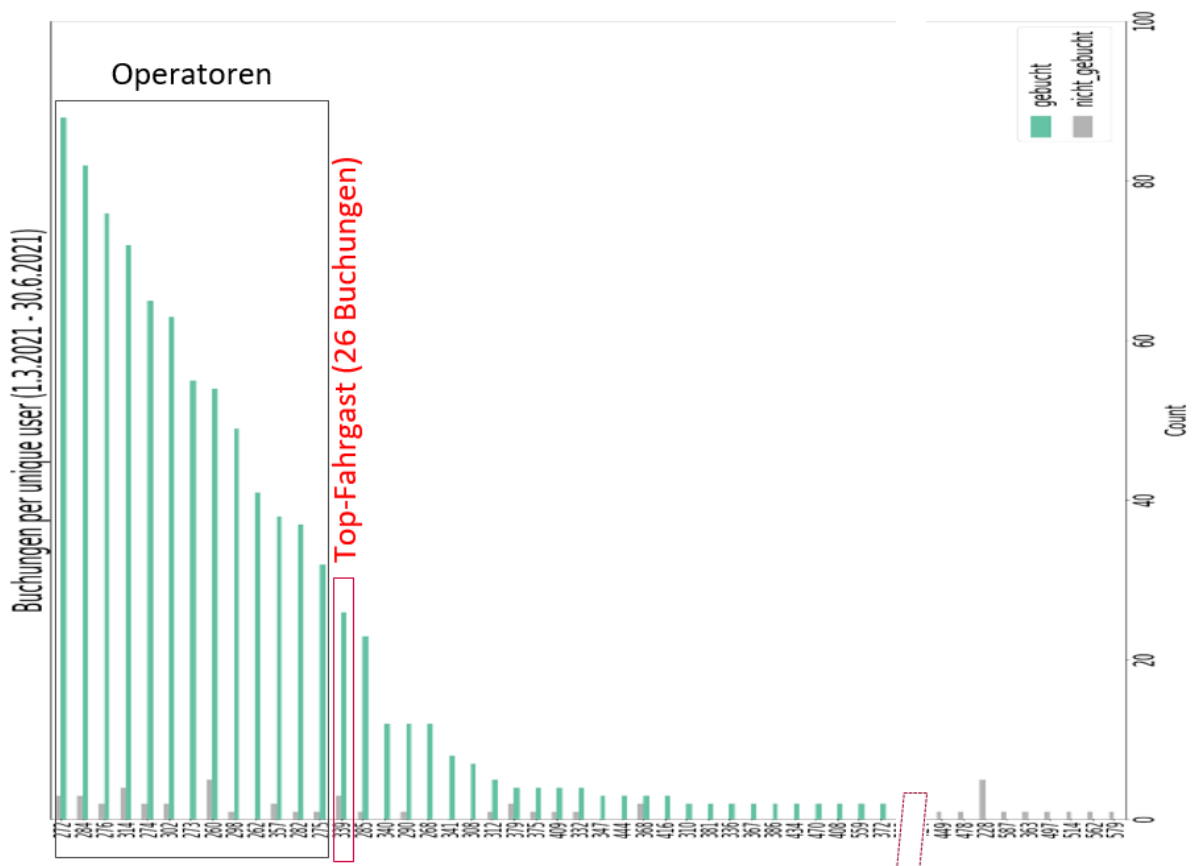


Abbildung 48: Zahl der Buchungen pro eindeutige User-ID (Zeitraum März bis Juni 2021)

Insgesamt wurden **1387** erfolgreiche Buchungen verzeichnet, davon konnten **837** aufgrund der E-Mail-Endung BERNMOBIL-Mitarbeitenden zugeordnet werden, **550** Kundinnen und Kunden. Wie in Abschnitt 7.3 beschrieben, buchten die Operatoren teilweise für Fahrgäste, so dass die tatsächliche Zahl der Fahrgäste über 550 liegt.

Daneben gab es eine projektinterne Anweisung, bei über längere Sicht ausbleibenden Buchungen selbst Fahrten zu buchen, um entsprechende Fahrdaten zu generieren. Ausserdem wurden die beiden Ein/Ausfahrten pro Tag und pro eingesetztes Fahrzeug von den Operatoren als Leerfahrten gebucht ($2 \times 125 = 250$ Buchungen).

Es ist also davon auszugehen, dass die Fahrgastzahl zwar über 550 Personen liegt, jedoch deutlich unter 1000 über einen Betriebszeitraum von 4 Monaten, also weniger als 250 Fahrgäste pro Monat. Demgegenüber beförderte das automatisierte Fahrzeug im Fahrplanbetrieb in den beiden besten Monaten Juli und Oktober 2019 jeweils ca. 800 Fahrgäste pro Monat.

Hierbei ist zu beachten, dass während des ganzen Betriebszeitraums im OnDemand-Betrieb Beschränkungen der Fahrgastzahl im Fahrzeug aufgrund der Covid-19-Massnahmen bestanden. Auch indirekte Einflüsse der Pandemie wie ausbleibende Touristen müssen berücksichtigt werden. Daher sind die Zahlen aus den beiden Betriebsphasen nicht direkt vergleichbar.

Abbildung 49 zeigt die Verteilung der Ein/Aussteiger auf die Haltestellen, Abbildung 50 stellt dies auf der Karte dar. Die Daten basieren auf den vom EasyMile-Passagierzählsystem gelieferten Werten (nicht jene vom Buchungssystem).

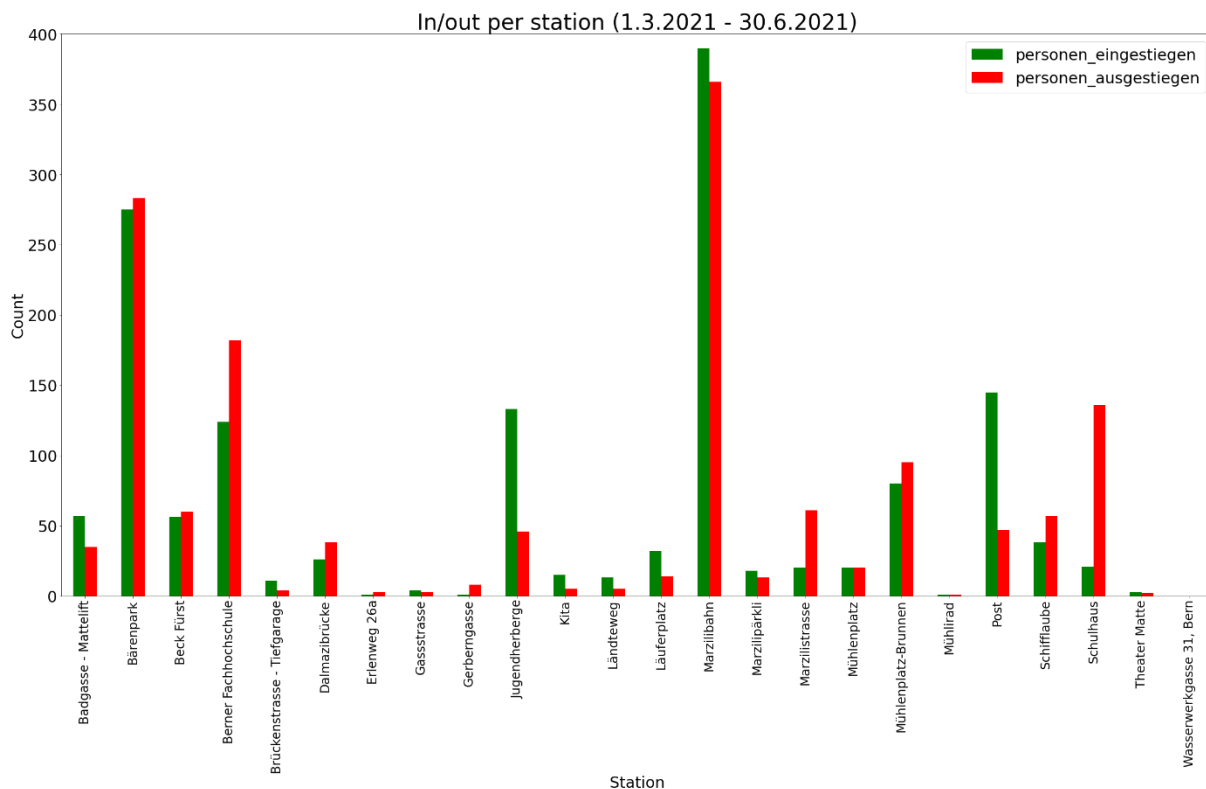


Abbildung 49: Ein/Aussteiger pro Haltestelle.

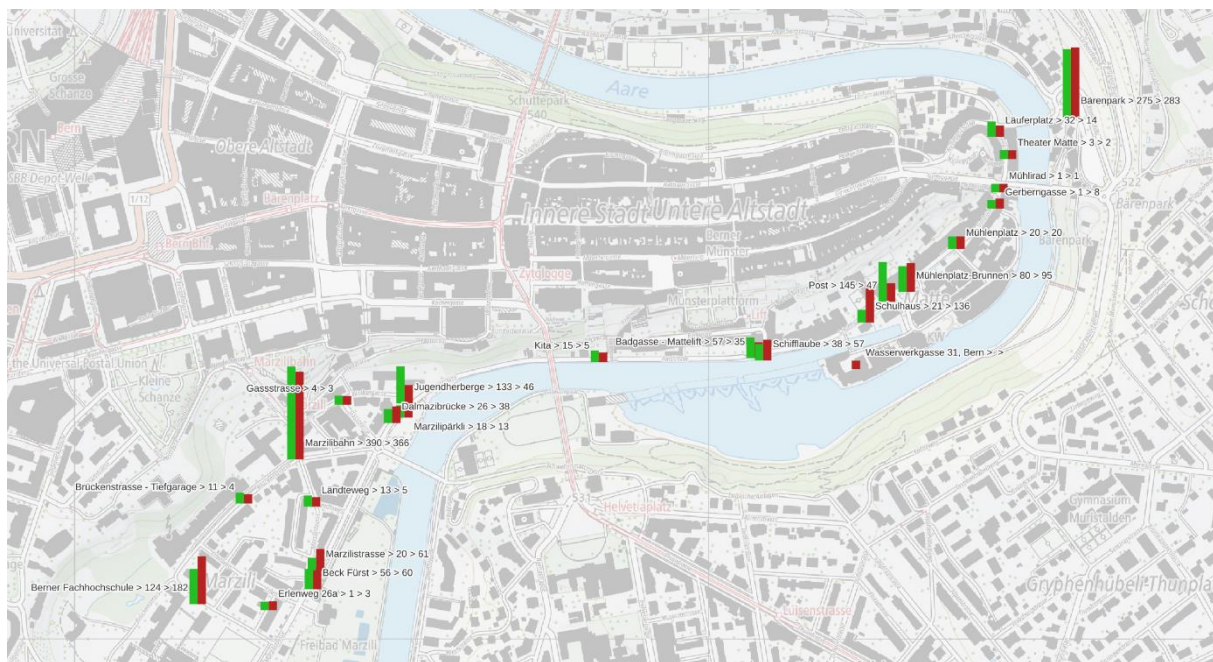


Abbildung 50: Ein/Aussteiger nach Haltestelle, Kartendarstellung.

Die häufigste Ein- und Aussteige-Station war die "Marzilbahn Talstation", gefolgt vom "Bärenpark". Diese beiden haben Anschluss an ein ÖV-Angebot und waren auch die Endstationen im Fahrplanbetrieb.

An der "Marzilbahn Talstation" fanden allerdings auch die Dienstwechsel für Kurs 1 statt, so dass diese täglich durch Buchungen seitens der Operatoren angefahren wurde.

Wenn man die Zahl der Buchungen pro Woche in Relation setzt zu den gefahrenen Kilometern, findet man tatsächlich bei niedrigen Buchungszahlen auch entsprechend weniger Kilometer (Abbildung 51). Eine Ausnahme bildet die letzte halbe Betriebswoche 26 (28.-30.6.). Diese erklärt sich damit, dass der Betrieb am letzten Tag ohne das Buchungssystem durchgeführt wurde.



Abbildung 51: Buchungen und gefahrene km pro Woche

8.5. Zusammenstellung besondere Vorkommnisse im Projektzeitraum

Wie im Abschnitt 8.3 dargestellt, trat mindestens ein Notstopp pro km auf. Je nach Betriebsphase wurden darüber hinaus ¼ bis 1/3 der Betriebszeit manuell gefahren.

Es traten also sehr häufig "Sondersituationen" auf. Nachfolgende Tabelle listet nur die als relevant eingeschätzten Vorkommnisse auf.

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 Stopp aus). Ebenso rollt es bergab schneller als programmiert, was wiederum einen Emergency Stopp 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 produzierten 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 + Kundeninformation
17. Dezember 2019 – 16. Januar 2020	Extrem viele unnötige Notstopps / CAN-Bus Controller
Beschreibung:	signifikant zu hohe Zahl von unnötigen Emergency-Stopps, 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

6.-13. Januar 2020	Technisches Problem durch
Beschreibung:	Häufige Notstopps aufgrund fehlender Lokalisierung
Folge:	Ungeplanter Betriebsunterbruch ca. 3 Tage
Massnahme:	Ersatz des Navigations-PC durch EasyMile
7.-12. Feb 2020	Getriebschaden
Beschreibung:	Fahrzeugstörung durch Getriebschaden
Folge:	ungeplanter Betriebsunterbruch 3.5 Tage
Massnahme:	Betriebseinstellung und Reparatur nach Eintreffen Ersatzteil
26./27. Feb 2020	Schneefall
Beschreibung:	Zeitweise Schneefall
Folge:	Fahrzeug fährt nur ruckelig, bei stärkerem Schneefall ist der Betrieb nicht durchführbar
Massnahme:	Betriebspausen bzw. vorzeitiges Betriebsende
10./11. März 2020	Update Streckenprogrammierung
Beschreibung:	Erweiterung der Strecke von der Einmündung Badgasse zum Mattelift.
Folge:	Geplanter Betriebsunterbruch 2 Tage
Massnahme:	Keine
16. März 2020	Betriebseinstellung Corona
Folge:	Ungeplanter Betriebsunterbruch bis einschliesslich Juni

17. Aug. 2020	Prediction Timeout beim Fzg 038
Beschreibung:	Fahrzeug bleibt nach längerer Betriebszeit stehen und ist mindestens 15 min blockiert
Folge:	Kein stabiler Fahrplanbetrieb möglich

Massnahme:	Entscheid: bis auf Weiteres kein Einsatz im Regelbetrieb
24. Aug. 2020	Bremsstörung am Fzg 037
Beschreibung:	Ein Bremsmotor war blockiert, musste ersetzt werden.
Folge:	Pannendienst für Fahrt ins Depot
Massnahme:	Analyse der Störung und rasche Behebung durch BERNMOBIL Werkstatt-Team unter Verwendung eines Ersatzteils aus dem abgestellten Gen2-Fahrzeug.
27. Aug. 2020	TractionController Errors Fzg 037
Beschreibung:	Häufige Notstopps mit der o.g. Fehlermeldung. Sie konnte jeweils vom Operator durch Rearming behoben werden
Folge:	Weiter in Betrieb
Massnahme:	Erfassung der Störung im Helpdesk-System
8. Sept. 2020	Blockierte Bremsen am Fzg 037
Beschreibung:	Alle 4 Bremsmotoren blockiert
Folge:	Ausfall Betrieb; Einsatz Pannendienst
Massnahme:	Analyse der Störung und Entscheid über Massnahmen
10. Sept. 2020	Generelle Betriebseinstellung bis zur definitiven Lösung
Beschreibung:	Projektteam beschliesst, den Betrieb erst wieder aufzunehmen, wenn die Fahrzeugprobleme von EasyMile nachhaltig gelöst wurden.
Folge:	Kein Betrieb für unbestimmte Zeit
Massnahme:	Kundeninformation; Keine Abnahme der Fahrzeuge
21./22. Sept. 2020	Update Voyager 8
Beschreibung:	Update Voyager 8 durch EasyMile an beiden Fahrzeugen durchgeführt.
Folge:	Korrekturen vorgenommen, Fahrzeuge bereit für Tests
Massnahme:	Planung und Durchführung von Dauertests; darauf basierend Entscheid über Abnahme
9./10. Nov. 2020	Update Voyager 9
Beschreibung:	Update Voyager 9 durch EasyMile an beiden Fahrzeugen durchgeführt
Folge:	Korrekturen vorgenommen, Fahrzeuge bereit für Tests
Massnahme:	Planung und Durchführung von Dauertests; darauf basierend Entscheid über Abnahme
11. Dez. 2020	Abnahme der Fahrzeuge
Beschreibung:	Aufgrund positiver Testresultate werden die Fahrzeuge vom Lenkungs ausschuss abgenommen
Folge:	Fahrzeuge einsatzbereit; sollen jedoch für Tests mit OnDemand-Software zunächst im Depot eingesetzt werden.
Massnahme:	Planung der Wiederinbetriebnahme mit OnDemand System für Anfang 2021

11.-15. Januar 2021	Update Streckenprogrammierung
Beschreibung:	Erweiterung der Strecke bis zur Berner Fachhochschule
Folge:	Geplanter Betriebsunterbruch
Massnahme:	Keine
24. Februar 2021	Lenkung defekt
Beschreibung:	Nach einem Notstopp direkt am Trottoir Rand versuchte das Fahrzeug, die Räder gegen den Widerstand des Trottoirs geradezustellen. Dabei nahm das Lenkgestänge Schaden
Folge:	ungeplanter Betriebsunterbruch 5 Tage
Massnahme:	Ersatz durch intaktes Fahrzeug
17.-28. Mai 2021	Umbau Fahrzeug 038 zu Gen3b und Streckenupdate
Beschreibung:	Fahrzeug 038 erhält neue Sensoren und eine neue Software-Version; anschliessend muss die Streckenprogrammierung aktualisiert werden
Folge:	Während des Umbaus in Woche 20 steht nur Fahrzeug 037 zur Verfügung, während des Streckenupdates kommt es zu einem kurzzeitigen Betriebsunterbruch
Massnahme:	Fahrgastinformation
15. Juni 2021	Beinahe Kollision mit offener Klappe
Beschreibung:	Offenstehende Klappe eines Eiswagens (Gelateria) wurde vom Fahrzeug 037 (302) nicht rechtzeitig erkannt.
Folge:	Begleitperson musste manuell anhalten und das Hindernis umfahren
Massnahme:	Als besonderes Vorkommnis notiert

30. Juni 2021	Geplanter letzter Betriebstag
Beschreibung:	Auf den Abschiedsrunden am letzten Betriebstag waren die Fahrzeuge permanent im Umlauf und haben Fahrgäste ohne vorherige Buchung mitgenommen.

8.6. Umfragen

Um die Akzeptanzfragen zu klären, wurden die folgenden Umfragen durchgeführt.

Die Umfragen wurden von Prof. Stefan Rose und seinem Team an der Berner Fachhochschule aufgesetzt, durchgeführt und anschliessend ausgewertet. Die Fragestellungen wurden im Vorfeld zwischen BERNMOBIL und der BFH abgestimmt.

8.6.1. Akzeptanz bei Fahrgästen

Bei der Umfrage unter den Fahrgästen im OnDemand-Betrieb im Zeitraum März bis Juni 2021 erhielten die Fahrgäste nach der Fahrt einen Link zu einer Online-Umfrage. Insgesamt haben 80 Fahrgäste geantwortet, davon 68 % männlich und 30 % weiblich. Der vollständige Bericht ist diesem Schlussbericht beigelegt.

Die zentralen Aussagen sind:

- Insgesamt wird die Testfahrt mit dem autonomen Kleinbus sehr positiv beurteilt. Die Testfahrgäste fühlen sich sicher und drei von vier Testfahrgästen würden den Kleinbus erneut nutzen, wäre dieser im öffentlichen Nahverkehr verfügbar.
- Ein On-Demand Betrieb wird insgesamt als ansprechend empfunden, ist jedoch für etwa ein Drittel der Testfahrgäste nicht von persönlicher Relevanz. Bevorzugte Buchungsoption ist per Smartphone-App. Die Testfahrgäste möchten einen autonomen Kleinbus idealerweise On-Demand oder ganz ohne Buchung nutzen.
- Insgesamt sind die Testfahrgäste mit dem elektronischen Bestellprozess zufrieden. Verbesserungspotenzial besteht hinsichtlich der Verfügbarkeit von Informationen bei Verspätungen sowie der automatischen Anzeige freier bzw. alternativer Slots bei der Buchung.
- Idealerweise sollte eine Nutzung des autonomen Kleinbusses im Libero-Tarif 110 inkludiert sein.

8.6.2. Akzeptanz bei Anwohnenden

Unter den Anwohnenden entlang der Teststrecke des autonomen Kleinbusses wurde im Zeitraum Mai-Juni 2021 eine explorativ qualitative Online-Befragung durchgeführt. Hierzu wurden entlang der Teststrecke Infoblätter mit einem entsprechenden Link (QR-Code) verteilt. Von den 68 Antwortenden waren 51 % männlich und 49 % weiblich.

Die Fragestellungen wurden im Vorfeld zwischen BERNMOBIL und der BFH abgestimmt. Der vollständige Bericht ist diesem Schlussbericht beigelegt.

Die zentralen Erkenntnisse dieser Befragung sind:

- Die aktuell noch geringe Geschwindigkeit und das unvorhersehbare Fahrverhalten lassen den autonomen Kleinbus im Anwohnerverkehr häufig zum Hindernis werden.
- Aufgrund der fussläufigen Distanzen bietet der autonome Kleinbus aus Sicht der Anwohnenden als Verkehrsmittel innerhalb der Quartiere einen nur geringen Mehrwert. Sinnvoller wäre aus Sicht der Befragten eine Erschliessung der Quartiere mit direkten Verbindungen zur Stadt bzw. Bahnhof.
- Befürworter betrachten den autonomen Kleinbus als umweltfreundliche und geräuscharme Alternative. Des Weiteren sehen die Befragten einen Mehrwert für ältere Anwohner oder Anwohnende mit eingeschränkter Mobilität sowie als Transportmittel für die letzte Meile.
- Die Begegnungen mit dem autonomen Kleinbus werden von den Befragten überwiegend als sicher empfunden.

- Verbesserungspotenzial ergibt sich für die befragten Anwohner vor allem in einer Erhöhung der Geschwindigkeit und Vorhersehbarkeit sowie einem geeigneteren Einsatzgebiet in Verbindung mit einem regelmässigen Fahrplan.

8.6.3. Akzeptanz bei Operatoren

Die Umfrage unter den als Operator auf den selbstfahrenden Fahrzeugen eingesetzten Mitarbeitenden von BERNMOBIL erfolgte in Form von anonymisierten Interviews, die durch Stefan Rose und sein Team im Zeitraum Mai-Juni 2021 durchgeführt und anschliessend ausgewertet wurde. Der vollständige Bericht ist diesem Schlussbericht beigelegt.

Die zentralen Erkenntnisse dieser Interviews sind:

- Für die befragten Operatoren ist autonomes Fahren die Beförderung der Zukunft, allerdings noch nicht ausreichend entwickelt, um Fahrgäste damit im öffentlichen Raum zu transportieren.
- Im Testbetrieb mit dem autonomen Kleinbus machen die Operatoren überwiegend positive Erfahrungen und finden es spannend ein Teil dieses Projekts zu sein. Allerdings ist der Bus aus ihrer Sicht noch nicht alltagstauglich, zu weit vom tatsächlichen autonomen Fahren entfernt und kann aktuell keinen Mehrwert als öffentliches Verkehrsmittel im Quartier bieten.
- Besonders positiv befinden die Operatoren die Interaktion mit den Testfahrgästen. Diese zeigen sich sehr interessiert an der Funktionsweise des Kleinbusses, wodurch die Operatoren zu Vermittlern werden. Auch die Sicherheit des Busses wird positiv bewertet.
- Negativ empfinden die Operatoren die noch nicht hinreichende Hinderniserkennung des Fahrzeugs. Hindernisse müssen zu häufig manuell umfahren werden, das Fahrzeug stoppt bereits bei Schneefall oder Ästen und kann nicht erkennen, ob ein Hindernis problemlos passiert werden kann oder nicht.
- Die häufigen Notstopps und das abrupte Bremsen führen zu unangenehmen Situationen mit anderen Verkehrsteilnehmern, da der Kleinbus selbst zum Verkehrshindernis wird. Diese Situationen werden zum Teil als sehr stressig und nervenaufreibend empfunden.
- Um den Betrieb des Kleinbusses zu verbessern, muss aus Sicht der Operatoren ein selbstständiges Erkennen und Umfahren von Hindernissen möglich sein. Zusätzlich sollte der autonome Kleinbus besser in Aussenquartieren mit weniger Verkehr eingesetzt werden oder eine eigene Fahrspur erhalten. Die Geschwindigkeit sollte der zugelassenen Richtgeschwindigkeit entsprechen. Des Weiteren wird erwähnt, dass das Cockpit tote Winkel aufweist, wodurch die Operatoren in unübersichtliche Situationen geraten.

8.7. Schlussfolgerungen zu den Fragestellungen

Aus den vorgenannten Datenanalysen können folgende Schlussfolgerungen zu den Fragestellungen aus Abschnitt 8.1 gezogen werden.

8.7.1. Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmenden

Da der selbstfahrende Kleinbus mit Geschwindigkeiten zwischen 6 und 14 km/h unterwegs war, dabei zwar gut von Zweirädern überholt werden konnte, nicht aber von Autos oder grösseren Fahrzeugen, ergaben sich hauptsächlich mit Autofahrenden bzw. dem Lieferverkehr Konflikte. Von diesen wurde das Fahrzeug oft als Verkehrshindernis wahrgenommen.

In unserer Umfrage unter den Anwohnenden zeigt sich das deutlich, die in Kapitel 8.6.2 näher beschrieben ist.

Weiterhin waren die Fahrmanöver des SFF auf der fix programmierten Fahrspur für andere Verkehrsteilnehmenden teilweise nicht zu antizipieren (wenn das Fahrzeug z.B. einen leeren Parkplatz umfährt). Zu der Irritation trägt auch die ungewöhnliche Fahrdynamik mit der Vierradlenkung bei (Heck schert aus). Die anfängliche zögerliche Beschleunigung des Gen2 konnte mit den aktuellen Software-Versionen auf dem neueren Gen3 deutlich verbessert werden.

8.7.2. Heikle Manöver

Im automatisierten Fahrbetrieb führte die Fahrzeuge keine von der programmierten Spur abweichenden Bewegungen durch. Für die mit der programmierten Fahrspur vertrauten Begleitpersonen führten die Fahrzeuge daher keine heiklen Manöver durch.

Für die anderen Verkehrsteilnehmer widersprach die programmierte Fahrspur jedoch teilweise dem zwar nicht immer regelkonformen, aber dennoch gewohnten Verhalten. Dies insbesondere in Engstellen, an denen nicht besetzte Ladezonen, Parkplätze, teilweise auch Trottoir-Flächen bei der Begegnung von Fahrzeugen befahren werden. Beispiele hierfür auf der Pilotstrecke sind z.B.:

- Die Ladezone in der Matteenge
- Die Behindertenparkplätze in der Gerberngasse

Die automatisierten Fahrzeuge bleiben auch in diesen Situationen stur auf ihrer fixen Fahrbahn, wodurch es zu Konflikten mit dem entgegenkommenden Fahrzeug gibt, dessen Lenker ein Ausweichen des automatisierten Fahrzeugs erwartet.

Weitere heikle Situationen ergaben sich aufgrund der sehr langsamen Geschwindigkeit der Fahrzeuge, durch die sich andere Verkehrsteilnehmende zu riskanten Überholmanövern verleiten liessen.

In knappen Situationen stoppten die Fahrzeuge automatisch per Notstopp, in den einzelnen Fällen griffen die Begleitpersonen jedoch per manuellem Notstopp vorsorglich ein.

Die Hinderniserkennung durch das Fahrzeug erfolgte übervorsichtig, d.h. es wurden viel mehr Objekte als Hindernisse erkannt als nötig. Es gab nur ein gemeldetes heikles Manöver infolge eines nicht erkannten Hindernisses. Dies war der in Abschnitt 8.5 genannte Vorfall mit der offenen Klappe des Eisverkaufswagens der Gelateria vom 15.06.2021. Dort musste die Begleitperson das Fahrzeug per Notstopp anhalten.

Notstopps des Fahrzeugs mitunter kritische Situationen im Fahrzeug zur Folge. Zu nennen wären Fahrgaststürze im Fahrzeug G2 043, die jedoch alle glimpflich abgegangen sind.

Weiterhin gab es folgende kritische Situation im Gefälle am Klösterlistutz: dort fuhr das Fahrzeug 301 aufgrund eines Getriebeschadens etwas schneller bergab als programmiert, erkannte dies aber und führte einen Notstopp aus. Siehe Vorfall im August 2019 in Abschnitt 8.5 sowie die Details zum Steigungsverhalten in Abschnitt 8.7.4.

8.7.3. Akzeptanz Verkehrsteilnehmer

Die Akzeptanz der Anwohnenden wurde gezielt in einer Umfrage ermittelt (siehe Abschnitt 8.6.2). Von diesen wurden die selbstfahrenden Fahrzeuge oft als Verkehrshindernis wahrgenommen, da es sehr langsam fährt und bisweilen "unnötig" (z.B. wegen einer Pflanze) stehen bleibt. Aus den Rückmeldungen der Operatoren wissen wir, dass speziell auch die Lenker und Lenkerinnen von Lieferdiensten sowie solche, die die Strecke entlang der Aare als schnelle Abkürzung verwenden wollten, teilweise sehr ungehalten auf die langsamen Fahrzeuge reagierten.

Von Seiten der Velofahrenden und Fussgänger gab es praktisch keine ungehaltenen Reaktionen wegen der langsam fahrenden Fahrzeuge. Diese konnten das selbstfahrende Fahrzeug problemlos passieren. Im Bereich der Marzilibahn gab es vereinzelt Reklamationen, weil die Haltestelle auf einer beliebten Abkürzungsrouten für Fussgänger lag. Es kam weiterhin vor, dass die Wirkungsweise der Sensoren gezielt getestet wurde, z.B. durch schnelles Einscheren der Velofahrenden.

8.7.4. Infrastruktur

LIDAR-Lokalisierung

Für die LIDAR-Lokalisierung benötigen die Fahrzeuge ausreichend viele feste und gut reflektierende Referenzpunkte im Blickfeld der für die Lokalisierung zuständigen Sensoren. Pflanzen und bewegliche/veränderliche Objekte sind nicht geeignet. Dagegen sind z.B. Häuser und Verkehrsschilder gute Referenzpunkte. Für das Fahrzeug 301 (Gen2) mit den auf dem Dach platzierten LIDAR für die Lokalisierung mussten entlang der Aarstrasse zusätzliche Tafeln montiert werden, um eine sichere Lokalisierung zu gewährleisten. Dies weil es auf der Seite der Aare gar keine Referenzpunkt gibt und vor den Häusern auf der Gegenseite grosse Bäume stehen.

Haltestellen

Die auf beiden Achsen lenken Fahrzeuge stellten eine Besonderheit bei der Festlegung der Haltestellen dar. Da das Heck beim Lenken ausschert, benötigen die Fahrzeuge zum Losfahren mehr Platz als aufgrund ihres kurzen Achsstands und ihres engen Wendekreises anzunehmen wäre.

Weiterhin verfügen die Fahrzeuge über einen Absenkmekanismus und eine elektrische Rollstuhlrampe zum barrierefreien Einstieg. Beide Mechanismen sind gekoppelt und werden über den Rollstuhl-Taster durch die Fahrgäste aktiviert. Dies kann nicht pro Haltestelle gesteuert oder deaktiviert werden. Der Absenkmekanismus ist bei hohen Kanten problematisch (z.B. Haltestelle "Theater Matte"), weil die teils überstehenden Lidar-Abdeckungen mit der Kante kollidieren können. Die Rollstuhlrampe ist problematisch, weil nach dem Ausfahren an einigen Haltestellen nicht mehr genug Navigationsfläche zwischen der Rampe und der Hauswand (bzw. am Mühlenplatz: dem Wassergraben) bleibt. Beide Mechanismen müssten pro Haltestelle individuell konfigurierbar sein.

Steigungsverhalten

Stufe 1: Während des Betriebs des Gen2-Fahrzeugs im Fahrplanbetrieb mit dem Steigungsabschnitt (12 % Steigung / 15 % Gefälle) traten mehrfach Getriebschäden auf. Diese sind in den Zwischenberichten Februar 2020 [2] und August 2020 [3] ausführlich beschrieben. Es musste festgestellt werden, dass das Fahrzeug den Betrieb in der 12 %-Steigung mit Haltestelle nicht beherrscht.

Stufe 2: Es musste festgestellt werden, dass auch die neuen Gen3-Fahrzeuge das Anfahren in der Steigung im Dauerbetrieb nicht zuverlässig beherrschten. Durch die verbesserte Software-Überwachung des Antriebs kam es zwar nicht mehr zu einem Versagen der Hardware. Dafür verursachte die Überwachungs-Software neue Fehlerzustände, die den Fahrbetrieb unterbrachen. Dies führte dann zu Endlosschleifen aus "Notstopp durch Software-Überwachung" – "Lösen der Bremse" – "kurzes Zurückrollen" – "Notstopp durch Software-Überwachung". Ein zuverlässiges Anfahren in der Steigung war daher weiterhin nicht möglich. Im letzten Betriebszeitraum vom Januar bis Juni 2021 wurde auf das Befahren der Steigungsstrecke am Bärenpark komplett verzichtet.

Kopfsteinpflaster

Stufe 1: Es konnte mit dem Fahrzeug Gen2 eine höhere Wahrscheinlichkeit für Notstopps auf Kopfsteinpflaster nachgewiesen werden (siehe Zwischenbericht Februar 2020 [2]). Diese beeinträchtigte den Betrieb aber nicht spürbar. Kopfsteinpflaster kann daher von den Fahrzeugen genauso befahren werden wie Asphalt.

Stufe 2: Mit den neuen Gen3-Fahrzeugen wurde hierzu keine weitergehende Analyse vorgenommen.

Hindernisse

Diverse im Stadtumfeld übliche Objekte erwiesen sich als Hindernisse für das Fahrzeug. Dazu zählen:

- Aufgespannte Sonnenschirme
- Zur Abfuhr bereitgestellte Kehrricht-Container oder -Gebinde
- Absperrungen von kleineren Baustellen
- Pflanzenkübel mit wuchernden oder im Wind bewegten Pflanzen
- Vegetation, die mit der Zeit in das Lichttraumprofil hineinwächst

Versenkbarer Poller

Auf der Pilotstrecke befindet sich auf der Aarstrasse unmittelbar nördlich der Einmündung Weiergasse ein versenkbarer Poller. Dieser ist zwischen 9.00 und 17.00 abgesenkt. In den übrigen Zeiten kann er durch die Berechtigten abgesenkt werden. Zu den Berechtigten zählen Anwohnende, Blaulichtorganisationen, aber auch BERNMOBIL für die Durchfahrt der Linie 30.

Das Absenken kann über einen Badge oder einen Schlüssel durch den Fahrer oder über eine Bodenschleife durch die Fahrzeuge erfolgen. Der entsprechende Funksender konnte aufgrund der Abmessungen leider nicht in den EasyMile-Fahrzeugen installiert werden.

Eine automatische Kommunikation mit den EasyMile-Fahrzeugen via V2X OBU war im Projekt zwar geplant, konnte aber aus verschiedenen Gründen nicht umgesetzt werden. Da der Poller während der Hauptbetriebszeiten ohnehin immer abgesenkt war, musste er nur in Einzelfällen durch die Begleitperson manuell bedient werden.

8.7.5. Verhalten im Verkehr

Engstellen

Stufe 1: Auf der Pilotstrecke bestanden insbesondere im Mattequartier durch längsparkierende Fahrzeuge zahlreiche Engstellen mit Gegenverkehr. Diese Situationen konnte das Fahrzeug EZ10 Gen2 nicht automatisch beherrschen. Dies aufgrund seines simplen Mechanismus "Folgen einer fixen Fahrspur und Anhalten vor Hindernissen". Stattdessen musste die Begleitperson hier den Bereich überwachen und die Durchfahrt freigeben, sobald kein Gegenverkehr in Sicht war. Siehe Zwischenbericht Februar 2020 [2].

Stufe 2: Wie im Abschnitt zu den Sensoren erwähnt, reagieren die neuen Fahrzeuge deutlich besser auf nah vorbeifahrende Velos. Daher können sie Engstellen flüssiger passieren. Ein selbstständiges Agieren des Fahrzeugs durch Überwachung des zu befahrenden Areals wurde zwar mit dem Release Voyager 9 implementiert und konnte auf der Demostrecke auch verifiziert werden. Für die komplexen Situationen auf der Pilotstrecke wurde dieses Feature seitens EasyMile aber nicht eingesetzt. Somit musste die Begleitperson diese Engstellen weiterhin vorausschauend beurteilen und bei Befahrbarkeit den jeweils vor der Engstelle befindlichen Yield bestätigen

8.7.6. Technische Erkenntnisse

Die technischen Erkenntnisse bezüglich Infrastruktur sind im Abschnitt 8.7.4. zusammengefasst.

Nachfolgend die wichtigsten Erkenntnisse zur Technologie der Fahrzeuge. Ein detaillierter Vergleich der eingesetzten Fahrzeug-Generationen folgt in den nachfolgenden Abschnitten.

Das Gesamtsystem aus Fahrzeug und Kontroll-Software funktioniert zuverlässig. Der Fahrzeug-Zustand ist jederzeit im Überwachungs-System SiteCC sichtbar. Verliert das Fahrzeug die Verbindung, dann bringt es sich selbst in einen risikominimalen Zustand (Notstopp). Über definierte Schnittstellen seitens EasyMile lassen sich die Fahrzeug-Informationen von externen Systemen (z.B. in der Leitstelle) auslesen sowie Fahrbefehle ("fahre von Haltestelle A nach Haltestelle B") an das Fahrzeug senden.

Die Lokalisierung des Fahrzeugs funktioniert sehr zuverlässig, das gilt insbesondere für die neue Generation 3 der Fahrzeuge mit multi-GNSS-Lokalisierung.

Ebenfalls zuverlässig funktioniert die Hinderniserkennung innerhalb des spezifizierten Bereichs. Alle Hindernisse über 28 cm Höhe werden erkannt. Die Stand Juli 2021 verfügbare "small obstacle detection" für kleinere Hindernisse konnte im Pilotversuch nicht getestet werden.

Die Objektklassifizierung ist dagegen noch nicht vorhanden, d.h. das Fahrzeug kann nicht zwischen harmlosen Hindernissen (ein in die Fahrbahn ragender Zweig) von realen Hindernissen (ein Bauzaun) unterscheiden. Es hält immer an.

Die Vorhersage des Fahrweges von anderen Verkehrsteilnehmenden (Auto, Velo) wurde im Lauf des Pilotversuchs seitens EasyMile verbessert und funktioniert im Nahbereich gut. Bei einem knapp überholenden Fahrzeug bremst das Shuttle zwar ab, macht aber keinen Notstopp mehr. Ebenso kann das Shuttle mit der aktuellen Software definierte Flächen auf Hindernisse überprüfen und bei Hindernisfreiheit weiterfahren. Dies wurde im Pilotversuch auf der Teststrecke auf dem Depotgelände verifiziert, aber nicht im Alltagsbetrieb eingesetzt.

Spurführung, Spurwechsel, Überholen: aktuell fährt das Fahrzeug exakt auf der vorgegebenen Spur ("virtuelle Schiene"). Bei kleineren stehenden Hindernissen in bestimmten Streckenabschnitten (diese müssen bei der Programmierung definiert werden) kann das Shuttle die Hindernisse selbstständig umfahren, falls keine weiteren Hindernisse auf dem berechneten Umfah-

rungsweg im Weg sind. Findet die Software die Situation zu unsicher, fordert sie die Begleitperson zum manuellen Eingreifen auf. Die automatische Hindernisumfahrung funktionierte im Pilotbetrieb aber noch sehr unzuverlässig. Dabei war für das Projektteam nicht ersichtlich, unter welchen Bedingungen die Hindernisumfahrung funktioniert. Manchmal wurden Hindernisse umfahren, die laut Definition eigentlich zu gross gewesen wären. Sehr oft hätte die Situation eigentlich eine Umfahrung zulassen müssen, die Software konnte sie aber dennoch nicht berechnen.

Eine freie Wahl der Fahrspur innerhalb einer definierten Strassenfläche war nicht möglich, ebenso wenig ein Überholen von fahrenden Fahrzeugen (was bei der langsamen Geschwindigkeit des Shuttles ohnehin kein praxisrelevanter Fall ist).

Die LIDAR basierte Sensortechnologie funktioniert bei trockenem Wetter sowie bei leichtem bis mittlerem Regen gut, kommt aber bei Starkregen, Nebel und insbesondere Schneefall schnell an ihre Grenzen. Im Pilotversuch war bei Schneefall kein automatisierter Betrieb möglich, auch Staubwolken (z.B. durch Laubbläser) oder vom Wind aufgewehrte Blätter werden als Hindernisse erkannt und stoppen die automatisierte Fahrt. Die Sensoren funktionieren auch bei Dunkelheit.

Verkehrsregeln kennt das Fahrzeug nicht. An Stellen mit Vortritt für andere Verkehrsteilnehmer (Fussgängerüberweg bzw. Einmündung von Rechts) wird ein künstlicher Stopp (Yield) programmiert, bei dem die überwachende Begleitperson die Weiterfahrt explizit quittieren muss.

Die EasyMile-Fahrzeuge können auch entgegenkommende Fahrzeuge in einspurigen Abschnitten nicht richtig antizipieren oder gar mit ihnen kommunizieren. Ohne Eingriff der Begleitperson würden die Fahrzeuge dem Gegenverkehr entgegenfahren, bis die Sicherheitsabstände ein Abbremsen auslösen. Wenn der Gegenverkehr nicht ausweicht, würden sich beide Fahrzeuge in der Engstelle blockieren. In der Praxis des Pilotbetriebs musste die Begleitperson jeweils die Einfahrt in die Engstelle freigeben und bei unklaren Situationen per Handzeichen mit den anderen Verkehrsteilnehmern kommunizieren.

8.7.7. Vernetzung

Die EasyMile-Fahrzeuge benötigen für den Betrieb eine Netzwerkverbindung zum EasyMile-Kontrollsystem EZFleet. Diese Verbindung wird über das Mobilfunknetz bereitgestellt. Dafür verfügten die Fahrzeuge über ein 4G-Modem. Bricht diese Verbindung ab, bleiben die Fahrzeuge stehen. In der Anfangsphase des Pilotprojekts ist dies gelegentlich passiert, in den letzten Betriebsmonaten bis Juni 2021 praktisch nicht mehr.

Eine weitere Vernetzungsmöglichkeit besteht in der OnBoard-Unit für eine Vehicle-2-Infrastructure Kommunikation (V2X), die jedoch im Projekt nicht verwendet wurde.

8.7.8. Vergleich der Fahrzeuggenerationen 2 und 3 des EZ10



Abbildung 52: die drei eingesetzten EZ10-Fahrzeuge, links die neuen "Gen3", rechts das alte "Gen2"

Es konnten folgende Fortschritte der neuen Gen3-Fahrzeuge festgestellt werden:

- Hindernisse auf Dachhöhe wurden neu zuverlässig erkannt. Ausserdem hatte der 3D-LiDAR gute Sicht, auch über kleine Hindernisse hinweg. Die Positionierung des VLP-LiDAR auf dem Dach des Gen3 statt wie beim Gen2 auf Höhe der Scheinwerfer (ca. 80 cm über Boden) bewährte sich. (In der Konsequenz waren für das Gen3 auch tiefhängende Äste nicht passierbare Hindernisse).
- Das neue Sensorset aus SCALA-LiDAR an der Seite und VLP-LiDAR auf dem Dach erkannte die Fahrwege der anderen Verkehrsteilnehmer besser. Es erfolgten nur noch in wirklich kritischen Situationen Notstopps. Dies vermied einerseits unnötige Notstopps und die zugehörigen Gefahrsituationen für nachfolgende Fahrzeuge und Insassen, und führte andererseits auch zu einem spürbaren Komfortgewinn für die Fahrgäste.
- Die bessere Ausstattung der Fahrzeuge (komfortablere Sitze, besseres Heiz-System) führte in der Fahrgast-Umfrage zu einer deutlich besseren Bewertung des Komforts.
- Der bessere Umgang der Sensoren mit schwierigen Wetterverhältnissen konnte nur für Regen bestätigt werden. Regen verursachte nur noch bei extremen Regenmengen Notstopps. Bezüglich Nebel und Schnee führten die sensibleren Sensoren dagegen eher zu einer empfindlicheren Reaktion der neuen Fahrzeuge und die versprochenen Filtermechanismen in der Software konnten dies noch nicht kompensieren.
- Sehr erfreulich war die deutlich verbesserte softwareseitige Überwachung des Antriebssystems. In vielen Fällen konnte sich das System jetzt selbst wieder in einen funktionsfähigen automatischen Betriebszustand bringen, ohne dass dies vom Operator durch eine Reset-Operation forciert werden muss (z.B. durch Betätigen des Notstopps und nachfolgendem "Rearming" oder gar durch Neustart des ganzen Fahrzeugs).
- Neu konnte das Fahrzeug definierte Flächen automatisch überwachen, ob sie hindernisfrei sind und dann selbstständig in diese Flächen einfahren. Dies konnte auf der Demostrecke im Tramdepot verifiziert werden.

Den Verbesserungen standen allerdings nach wie vor Defizite gegenüber, die einem zuverlässigen Betrieb im automatisierten Modus im Weg standen. Nachfolgend die wichtigsten Punkte mit Fokus auf die beim Gen2-Fahrzeug bereits benannten Defizite.

- Leider beherrschten die Gen3 Fahrzeuge das zuverlässige Anfahren in der Steigung (12 %) weiterhin nicht.
- Die erwarteten Fortschritte durch den Einbezug von Radar und Kamera-basierten Sensoren zur Objekterkennung konnten leider nicht bestätigt werden. Die Radar-Sensoren waren gar nicht eingebaut und die eingebaute Stereokamera wurde noch nicht zur Objekterkennung verwendet.

8.7.9. Vergleich EZ10 Gen3/Gen3b

Kurz vor Projektende, in der letzten Mai-Woche 2021 wurde das Fahrzeug 303 (038) von Easy-Mile mit weiteren Lidar-Sensoren sowie dem neuesten Software-Release "Voyager 10" ausgerüstet. Durch diesen als Retrofit bezeichnete Umbau erhielt das Fahrzeug die Bezeichnung EZ10 Gen3b. Das Fahrzeug 302 (037) sollte bis Projektende weiterhin mit dem bisherigen Sensoraufbau und "Voyager 9" unterwegs sein. Dies gab dem Projekt die Möglichkeit, beide Fahrzeuge unter gleichen Bedingungen parallel in Betrieb zu haben und zu vergleichen.

Es wird folgende Fragestellung für die Untersuchung gewählt: kann der Datenvergleich zeigen, dass sich das Fahrzeug durch den Umbau nach einem Disengagement geschmeidiger verhält, also schneller wieder die Normalgeschwindigkeit einnimmt. Dieser Vergleich wurde auf den Streckenabschnitt mit den besten Betriebsbedingungen beschränkt. Dies ist die Aarstrasse zwischen der Einmündung Weihergasse (ab Poller) und der Einmündung Badgasse (vgl. Abbildung 46).



Über die Monitoring API wurde im Juni bei beiden Fahrzeugen im 5-Sek Intervall die Geschwindigkeit ausgelesen. Aus den gesammelten Daten wurden die Disengagements ermittelt, sowie die zugehörigen Geschwindigkeiten im Zeitfenster 30 s vor bis 90 s nach dem Disengagement ($v = 0$ km/h). In nachfolgender Abbildung 53 ist die Differenz zu v_{\max} für beide Fahrzeuge übereinander dargestellt. Die orange markierten Spalte mit der Zeit 0 stellen die Disengagements dar (Differenz zu v_{\max} ist maximal, hier invers dargestellt, daher als tiefster Wert). Für das Fahrzeug 303 (Gen3b) liegen 689 Messwerte vor, für das 302 (Gen3) liegen 281 Messwerte vor (dieses Fahrzeug war meist mit der kurzen Betriebszeit unterwegs).

Es zeigt sich, dass das Gen3b vor dem Disengagement näher an v_{\max} fährt und danach auch schneller (in 20s) wieder v_{\max} fährt. Das nicht umgebaute Gen3 braucht mit 40s länger, bis es wieder v_{\max} erreicht. Allerdings streuen die Geschwindigkeitswerte ab 40s nach dem Disengagement für das Gen3b stärker als für das Gen3. Der Grund für diese Abweichung ist nicht bekannt.

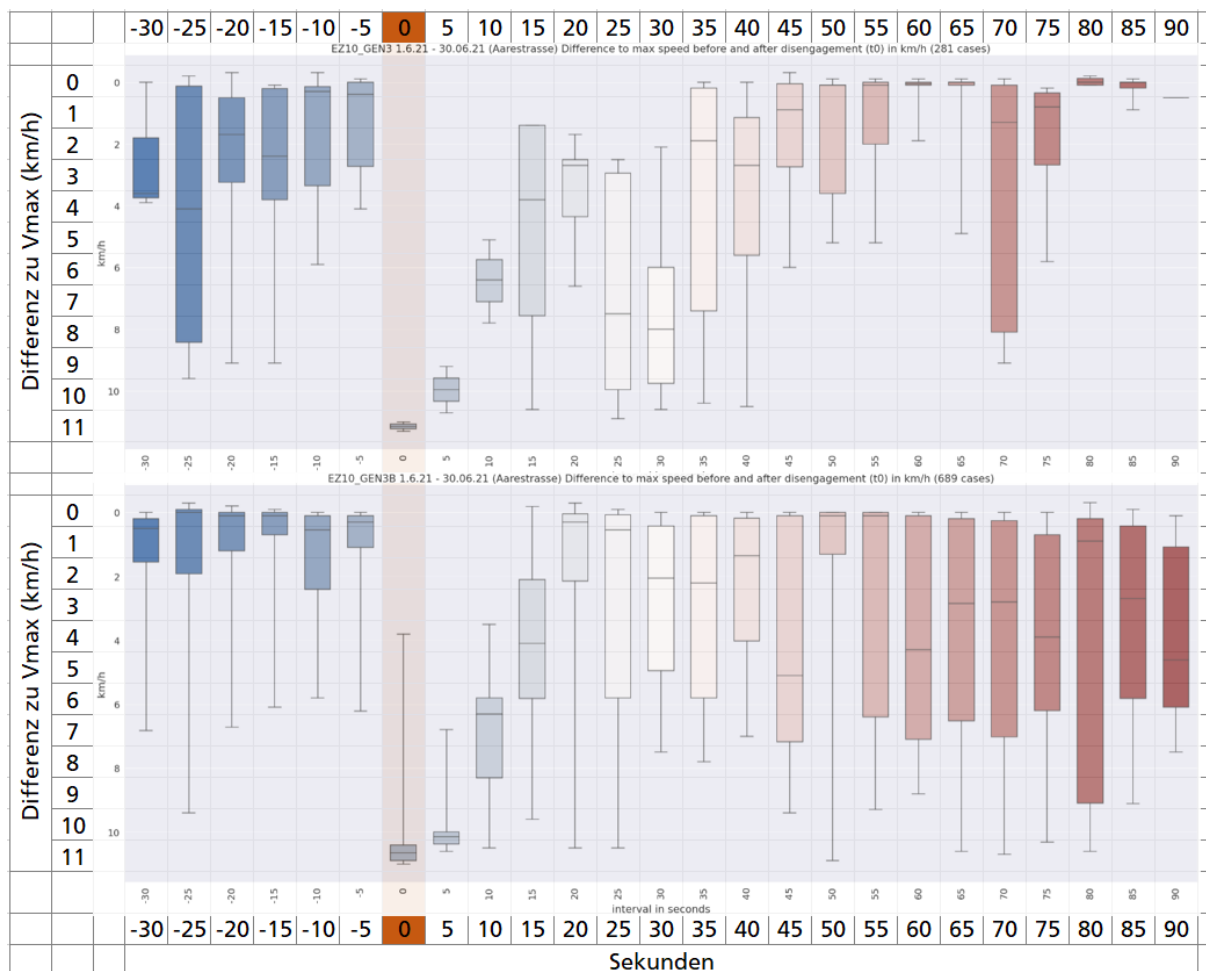


Abbildung 53: Vergleich Gen3 (oben) zu Gen3b (unten)- Verhalten vor und nach Disengagements.

8.7.10. OnDemand Haltestellen

Auf der Pilotstrecke gab es feste Haltestellen, an denen die Fahrzeuge auch länger stehen durften, sowie virtuelle Haltestellen, an denen sie nur kurz zum Fahrgastwechsel anhalten durften (vgl. Abschnitt 5.5.5).

Die Fragestellungen

- Akzeptanz der anderen Verkehrsteilnehmenden
- heikle Stellen und Situationen (Z.B. Abfahrt) und deren Ursachen

- besonders geeignete Stellen
- Sicherheit beim Ein- und Aussteigen

beziehen sich eigentlich auf nicht markierte virtuelle Haltestellen. Bei der Festlegung der virtuellen Haltestellen wurde jedoch aus pragmatischen Gründen entschieden, diese mit einer mobilen Haltestellen-Tafel zu markieren, wie sie bei Baustellen und Umleitungen zum Einsatz kommen. Alle Haltestellen der befahrenen Strecken im OnDemand-Betrieb waren somit für andere Verkehrsteilnehmende als solche erkennbar.

Es gab folgende Situationen an den virtuellen Haltestellen (vgl. Abbildung 13):

- Am Trottoir-Rand: Gerberngasse, Mühlirad, Schule, Kita, Ländteweg, Jugendherberge
- An Einfahrten: Post, Erlenweg, Brückenstrasse, Gasstrasse
- Am Strassenrand mit Wiese: Marzilipärkli

Dabei waren die Haltestellen am Trottoir-Rand und am Strassenrand unproblematisch für die anderen Verkehrsteilnehmenden wie auch für die Passagiere. Der Einstieg am Marzilipärkli über die Wiese könnte theoretisch für einen Passagier mit Elektrorollstuhl schwierig werden, wir hatten aber im Betriebszeitraum keinen einzigen Passagier mit Rollstuhl und somit auch keine konkreten Rückmeldungen hierzu.

Als etwas schwieriger erwiesen sich die Einfahrten. Gelegentlich war es nötig, das automatisierte Fahrzeug im manuellen Betrieb aus dem Einfahrtsbereich zu bewegen, um einem Pkw die Zufahrt zu ermöglichen, z.B. an der Haltestelle "Post" (Zufahrt zum Parkplatz) oder an der Haltestelle "Beck Fürst" (ebenfalls Parkplatzzufahrt).

Die Sicherheit beim Ein- und Aussteigen war jederzeit gewährleistet. Bei den Einfahrten sorgte das stehende automatisierte Fahrzeug mit eingeschaltetem Blinker dafür, dass die anderen Verkehrsteilnehmenden die Situation korrekt einschätzen konnten.

8.7.11. OnDemand Betrieb

Die Anbindung der EasyMile-Fahrzeuge über die Schnittstelle "Mission-API" an das T.DiMo-Buchungssystem war IT-technisch ohne grössere Probleme möglich. Unschön war, dass das EasyMile-System zwischen Start und Ende einer Mission nur den Prozentteil der bereits gefahrenen Route meldet, nicht aber die exakte Fahrzeugposition oder gar eine Ankunftsprognose.

Als Herausforderungen erwiesen sich die Konfiguration der Fahrzeuge einerseits und der EasyMile-Routen andererseits im T.DiMo-Buchungssystem. Bei den Fahrzeugen erwies sich die langsame Geschwindigkeit in Verbindung mit der fehlenden Ankunftsprognose als schwierig für die korrekte Planung der Folgebuchungen. Die Weg-Zeit-Matrix im Buchungssystem musste anhand von Messfahrten in mehreren Zyklen schrittweise an die realistischen Fahrzeiten angepasst werden. Zudem musste der Mechanismus des EasyMile-Routings einbezogen werden, der zwischen zwei Haltestellen einer Mission selbst die kürzeste Strecke ermittelt.

Die Routenwahl des Fahrzeugs entsprach nicht immer der Erwartung, in einzelnen Fällen fuhr das Fahrzeug einen Umweg. Sehr hilfreich erwies sich hierbei die kurzfristig erreichbare telefonische Hotline von T.DiMo, die diese Fälle analysierte und die Konfiguration des Buchungssystems weiter optimierte.

Aufgrund der Pandemie-Restriktionen waren anfangs nur 2 Personen im Fahrzeug zugelassen. Daher kam es sehr selten zu Zubuchungen zu einem bereits laufenden Fahrtauftrags. Aussagen zum Pooling können daher aus diesem Projekt leider nicht abgeleitet werden.

Die Operatoren auf den Fahrzeugen haben sich sehr rasch an die Handhabung der FahrerApp gewöhnt. Dazu gehörte das Annehmen eines Fahrtauftrags, das Erfassen der Einsteiger/Aussteiger, die Bestätigung an Ankunft/Abfahrt an einer Haltestelle sowie das Beenden eines Fahrtauftrags.

Bei spontanen Mitfahrtwünschen haben die Operatoren die Fahrgäste zunächst auf die BuchungsApp verwiesen, bei digital weniger affinen Personen haben sie die Fahrt jedoch auch oft auf ihr eigenes Konto im Buchungssystem gebucht. Siehe dazu auch die Buchungsstatistiken in 8.4 die Umfragen unter Fahrgästen (Abschnitt 8.6.1) und Operatoren (Abschnitt 8.6.3).

Die fehlende Verspätungsprognose und die nur rudimentäre Fahrgastinformation via SMS führten des Öfteren zu der Situation, dass Operator bzw. ChiefOperator grössere Verspätungen des

Fahrzeugs für einen Folgeauftrag eines Fahrgasts vorhergesehen haben, aber dies im Buchungssystem nicht adäquat behandeln konnten (z.B. durch Push-Nachricht via BuchungsApp). Dies führte zu Reklamationen seitens der Fahrgäste.

Durch den in Abschnitt 7.3 beschriebenen, an einzelnen Tagen aufgetretenen Verbindungsverlust zwischen dem Buchungssystem, das die Fahraufträge (Missions) erzeugt, und dem EasyMile-System, das die Missions entgegennimmt, konnten während dieser Unterbrüche keine automatisierten Fahrten über das Buchungssystem gestartet werden. Als Workaround mussten die Fahraufträge durch den ChiefOperator mithilfe des EasyMile-ControlCenter manuell als Mission erstellt werden.

Fixe Fahrspur verunmöglicht Überholen der automatisierten Fahrzeuge untereinander. Dies ist aber erforderlich, wenn die Mission des vorausfahrenden Fahrzeugs an einer Haltestelle unterwegs endet, während die des nachfolgenden Fahrzeugs noch weiterfährt. Dieses Problem ist lösbar, weil man im EasyMile-System eine alternative Routenführung festlegen kann, falls eine Haltestelle nicht angefahren wird.

8.7.12. Richtlinien zur Festlegung der Haltestellen

Das in Abschnitt 5.5.5 beschriebene Verfahren zur Festlegung der neuen Haltestellen bei der Bewilligung der Streckenerweiterung für den OnDemand-Betrieb hat sich sehr bewährt. Dadurch konnte die notwendige Flexibilität bei der Festlegung erreicht werden, die aus den folgenden Gründen erforderlich ist. Die tatsächliche Eignung einer Strecke oder einer Haltestellenposition konnte erst bei der Programmierung durch den EasyMile-Techniker festgestellt werden. Kurzfristig nötige Anpassungen konnten auf kurzem Dienstweg mit den städtischen Ansprechpartnern sowie dem Ansprechpartner der Kantonspolizei abgestimmt werden.

Ausserdem brachte das Vorgehen deutliche organisatorische Vorteile und damit einen spürbaren Zeitgewinn im Verfahren. Beim alten Verfahren hätte für die Strecken- und Haltestellen-Programmierung durch EasyMile ein Sicherheitsdienst organisiert werden müssen, weil das Befahren der Strecke noch nicht bewilligt war. Erst anschliessend hätte der finale Antrag zu Händen des ASTRA eingereicht werden können. D.h. zwischen Programmierung und der für den Betrieb nötigen Bewilligung hätte es eine zeitliche Verzögerung gegeben. Durch das neue Verfahren konnten mit der bereits vorliegenden Verfügung des ASTRA die Programmierung der Haltestellen und deren Dokumentation sowie die anschliessende Betriebsaufnahme nahtlos aufeinanderfolgen.

8.8. Integration in die Leitstelle

Stufe 1: Die Integration des selbstfahrenden Fahrzeugs in das Leitstellen-System wurde erfolgreich implementiert, zwar nicht alle ursprünglich geplanten Elemente, aber die für die Überwachung wesentlichen. Dazu gehören die Positionsdaten, die Fahrzeugdaten sowie die Ereignisse, die das Fahrzeug erzeugt (z.B. bei einem Disengagement). Eine genauere Betrachtung findet sich im Zwischenbericht Februar 2020 [2].

Stufe 2: In einem Test im Depotareal konnte gezeigt werden, dass die Ereignisse der EasyMile-Fahrzeuge (z.B. Notstopps), die über die Monitoring-API geliefert werden, wie gewünscht bei BERNMOBIL im Leitstellensystem zu einem Eintrag in der Ereignistabelle führen. Vom Paket "Events" aus der Leitstellenintegration konnte somit auch das letzte Puzzlestück realisiert werden.

9. Erkenntnisse aus dem Pilotprojekt

9.1. Reifegrad der Fahrzeuge

Wie die Betriebsdaten in Kapitel 7 zeigen, gab es bei allen drei eingesetzten EasyMile Fahrzeugen EZ10 G2 043, EZ10 G3 037 und 038 mehrere Ausfälle von wichtigen Komponenten wie Getriebe oder blockierte Bremsen, aber auch immer wieder Software-Fehler. Alle führten aus Sicherheitsperspektive korrekterweise zum Notstopp, der nur durch menschliches Eingreifen gemanagt werden konnte. Dabei umfasst dieses Eingreifen nicht nur das wieder Inbetriebsetzen des Fahrzeugs, sondern auch die Interaktion mit den Fahrgästen im Fahrzeug.

In einem späteren unbegleiteten, automatisierten Betrieb ist ein blockiertes Fahrzeug unbedingt zu vermeiden. Einerseits, um die Akzeptanz bei den Fahrgästen nicht zu gefährden, andererseits auch, um den Einsatz mobiler Einsatzkräfte zu vermeiden und somit einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen. Daher müssen die Basiskomponenten von automatisierten ÖV-Fahrzeugen absolut zuverlässig funktionieren.

Die in diesem Pilotversuch eingesetzten Fahrzeuge sind im Mittel in 75% der täglichen Betriebszeit automatisiert gefahren, in der übrigen Zeit mussten sie manuell durch die Begleitperson gefahren werden. Auf der Pilotstrecke im Berner Matte- und Marziliquartier waren pro km zwischen ein und drei Eingriffe nötig (Abbildung 41). Eingriffe durch die Begleitperson waren also die Regel und auch im automatisierten Betrieb musste die Begleitperson jederzeit aufmerksam sein. Die Detailbetrachtung zeigte, dass insbesondere die im Versuchsgebiet häufigen einspurigen Abschnitte mit Begegnungsverkehr von den Fahrzeugen nur selten automatisiert gemeistert wurden (Abbildung 46). Daraus folgt, dass die Sensortechnik und Software der automatisierten Fahrzeuge noch erheblich weiterentwickelt werden müssen, damit diese dereinst in einer komplexen Umgebung wie dem Matte- und Marziliquartier in Bern ohne Begleitperson fahren können.

Die EasyMile Fahrzeuge hielten sich präzise an die programmierten Fahrspuren und verhielten sich damit für die Begleitpersonen vorhersehbar. Ausser Notstopps führten sie keine unerwarteten Manöver aus. Die Lokalisierung mittels GNSS und LIDAR-Technologie in Kombination mit Odometrie und weiteren Fahrzeugmessdaten funktionierte zuverlässig, auch in den engen Gassen des Matte-Quartiers. Die Lokalisierung des Fahrzeugs funktioniert somit sehr zuverlässig, das gilt insbesondere für die neue Generation 3 der Fahrzeuge mit multi-GNSS-Lokalisierung.

Aus Sicherheitsgründen waren die Fahrzeuge mit maximal 14 km/h und im Mittel mit etwa 6 km/h unterwegs. Während diese Geschwindigkeit für Fussgängerbereiche gut geeignet ist, wirken die langsamen Fahrzeuge im motorisierten Verkehr als Hindernisse. Mit einer Verdoppelung der Geschwindigkeit (max. 30 km/h und 12 - 15 km/h im Durchschnitt) kämen die automatisierten Fahrzeuge in den Bereich der regulären Bus- und Tramlinien in der Innenstadt und könnten sich besser in den städtischen Verkehrsraum einfügen.

Die erwähnte fix programmierte Fahrspur war für die anderen Verkehrsteilnehmenden teilweise nicht nachvollziehbar, da man im engen Strassenraum der Pilotstrecke nur mit "flexiblem Ausweichen" (z.B. über Parkflächen) aneinander vorbeikommt. Dies war der häufigste Grund für heikle Manöver der anderen Verkehrsteilnehmenden. Die flexible Fahrspurwahl ist ein weiteres wichtiges Element, damit automatisierte Fahrzeuge in den Alltagsverkehr integriert werden können.

Vor Hindernissen hielten die EasyMile-Fahrzeuge zuverlässig an. Allerdings auch vor unkritischen Hindernissen wie z.B. ins Lichtprofil gewachsene Pflanzen. Die durch Software-Updates mögliche Funktionalität der Umfahrung von feststehenden Hindernissen (mit nicht zu grossen Abmessungen) konnte zwar durch das Projektteam verifiziert werden. Dies funktionierte aber in der Praxis auf der Pilotstrecke so selten, dass es keinen beobachtbaren Fortschritt hinsichtlich einer flüssigeren Fahrt gab. Temporäre Hindernisse wie z.B. Baustellen oder falsch parkierte Fahrzeuge konnten die Fahrzeuge nicht reproduzierbar selbstständig umfahren. Weiterhin wurden sämtliche die Grösse ändernden oder bewegliche Objekte wie auf/zugeklappte Sonnenschirme, Topfpflanzen am Strassenrand oder Vegetation nahe der Fahrbahn als Hindernisse wahrgenommen. Die Objektklassifizierung und eine der Situation angepasste Reaktion durch die Software waren somit noch nicht ausgereift.

Das Vorhersehen der Bewegung anderer Objekte, insbesondere von Fahrzeugen, hat EasyMile im Lauf des Pilotversuchs deutlich verbessert. Insbesondere auf überholende Fahrzeuge und alle anderen, die sich ausserhalb seiner programmierten Fahrspur bewegen, konnte das EZ10 vorausschauender reagieren und seine Geschwindigkeit anpassen oder sanft abbremesen, anstatt einen Notstopp auszulösen. Das funktionierte aber nicht in den weiter oben erwähnten verengten Abschnitten, in welchen komplexe Situationen beurteilt werden mussten.

Generell konnten die Fahrzeuge alle Situationen, in denen eine Verständigung via Sichtkontakt zwischen den Verkehrsteilnehmenden erforderlich war, nicht sinnvoll bewältigen. Dies betraf insbesondere:

- Einspurige Strassen mit Gegenverkehr
- Fahrbahnverengungen auf zweispurigen Strassen
- Parkplatz mit Parkverkehr
- Einmündungen mit rechts-vor-links Regelung

Auch Verkehrsregeln kannte die Fahrzeug-Software nicht. An Stellen mit Vortritt für andere Verkehrsteilnehmer (Fussgängerüberweg bzw. Einmündung von rechts) musste ein künstlicher Stopp (Yield) programmiert werden, bei dem die überwachende Begleitperson die Weiterfahrt explizit quittieren musste.

Nicht alle neuen Funktionen wurden von EasyMile für die Pilotstrecke freigegeben. So konnten die EZ10 Gen3 ab Software "Voyager 10" definierte Flächen auf Hindernisse überprüfen und bei Hindernisfreiheit weiterfahren. Dies konnte auf der Teststrecke auf dem Depotgelände verifiziert werden, aber leider nicht im Alltagsbetrieb auf der Pilotstrecke.

Zu guter Letzt schränkten bestimmte Wetterbedingungen den automatisierten Betrieb der Fahrzeuge ein. Während die LIDAR-Technologie unabhängig von den Lichtverhältnissen nachts genauso funktioniert hat wie tagsüber, liess sie unter bestimmten Wetterbedingungen keinen zuverlässigen automatisierten Betrieb mehr zu:

- Schneefall
- Staub (z.B. durch Laubbläser)
- von starkem Wind aufgewirbelte Gegenstände
- bei Starkregen

9.2. Anbindung der EasyMile-Systeme an die BERNMOBIL IT-Landschaft

Das Gesamtsystem aus Fahrzeug und Kontroll-Software funktionierte zuverlässig. Der Fahrzeug-Zustand war jederzeit im bereitgestellten EasyMile-Überwachungssystem sichtbar. Verlor das Fahrzeug die Verbindung, brachte es sich selbst in einen risikominimalen Zustand (Notstopp).

Die EasyMile-Fahrzeuge liessen sich über die bereitgestellten Schnittstellen sehr gut in die IT-Systeme bei BERNMOBIL einbinden. Dies gilt einerseits für die Monitoring-API, mit der die Fahrzeug-Position und weitere Statuswerte über die AVOC-Software von Amotech im Trapeze-Leitstellensystem dargestellt werden konnten. Dies gilt andererseits für die Mission-API, über die die Fahrzeuge an das T.DiMo-OnDemand-Buchungssystem angebunden werden konnten und ihre Fahraufträge erhalten konnten.

Bei der Leitstellen-Integration ist für den Fahrplanbetrieb es gelungen, neben Fahrzeug-Position und Status-Werten (Batterie, Türstatus etc.) letztendlich auch die vom Fahrzeug ausgelösten Ereignisse ("Events") in der Ereignistabelle des Leitstellensystems darzustellen. Dagegen konnte die geplante Integration der Kommunikationssysteme im Fahrzeug in die der Leitstellen-Systeme nicht vollständig realisiert werden (Sprechverbindung ins Fahrzeug oder Kamera-Aufschaltung etc.). Hauptgrund waren IT-Sicherheitskonfigurationen, die nicht mit den Anforderungen der EasyMile-Systeme in Einklang zu bringen waren. Als Workaround wurde das webbasierte EasyMile-ControlCenter "SiteCC" in der Leitstelle bereitgestellt. Durch die Einbindung der Position der selbstfahrenden Fahrzeuge in das Leitstellen-System konnten im Fahrplan-Betrieb Verspätungsprognosen an die nachgelagerten IT-Systeme weitergeleitet werden und auch für die Fahrgäste dargestellt werden (z.B. in der SBB-App).

Das Buchungssystem T.DiMo arbeitet webbasiert wurde mandantenspezifisch für BERNMOBIL bereitgestellt. Auch die beiden Apps (BuchungsApp und FahrerApp) sind Webanwendungen, die

über eine URL aufgerufen werden können. Für die Nutzung des Buchungssystems waren daher nur ein Webbrowser sowie die Zugangsdaten nötig.

Da die Fahrzeuge im OnDemand-Betrieb nicht mehr nach Fahrplan fahren, konnten aus dem Leitsystem LIO auch keine Verspätungsmeldungen mehr generiert werden. Dies musste aus dem Buchungssystem selbst geschehen, und zwar pro Buchung durch fahrgastspezifische Meldungen aufgrund der konfigurierten Schwellwerte. Leider konnten diese Meldungen nur per SMS oder E-Mail versendet werden.

Die Optimierung der OnDemand-Konfiguration für den OnDemand-Betrieb erforderte zwar mehrere Test- und Update-Zyklen, führte aber letztlich zu dem gewünschten stabilen Betrieb des Angebots "Rufbus Linie 23".

Die Basisfunktionalität des Buchungssystems erfüllte daher die an das System gestellten Erwartungen. Fahrtwünsche wurden korrekt in Fahraufträge an die Fahrzeuge umgewandelt und an diese übermittelt. Die Operatoren hatten dabei über die FahrerApp jederzeit die Kontrolle über die Aktionen des Fahrzeugs.

Das grösste Manko des Buchungssystems waren die fehlenden Push-Meldungen via Buchungs-App an die Fahrgäste im Fall von Verspätungen und/oder Ausfällen. Generell wurde von den Fahrgästen die Benutzerfreundlichkeit der BuchungsApp als verbesserungswürdig eingestuft.

Die Dienstplanung der Begleitpersonen in den automatisierten Fahrzeugen wurde analog den Standard-Fahrzeugen über das IT-System "Diva" vorgenommen. Dieses ist mit dem Soll-Fahrplan verknüpft. Um die Dienstplanung auch im OnDemand-Betrieb weiterführen zu können, musste ein "proforma"-Soll-Fahrplan erstellt werden.

9.3. OnDemand Betrieb Rufbus Linie 23

BERNMOBIL konnte das Rufbus Angebot der Linie 23 erfolgreich in Betrieb nehmen und über die 4 Monate betreiben. Das System aus EasyMile-Fahrzeugen und T.DiMo-Buchungssystem hat weitgehend reibungslos funktioniert.

Die Kombination eines OnDemand-Betriebs mit automatisierten Fahrzeugen ist mit Blick auf eine bedarfsorientierte Erschliessung der "letzten Meile" grundsätzlich sinnvoll. Elementare Grundlage sind jedoch zuverlässige und 100% automatisiert fahrende Fahrzeuge sowie durchdachte Konzepte für die Interaktion mit den Fahrgästen. Solange eine Begleitperson im Fahrzeug erforderlich ist, bringt die Automatisierung des Fahrzeugs auch für den OnDemand-Betrieb keinen Mehrwert.

Aufgrund der Begleitperson im Fahrzeug musste der OnDemand-Betrieb auf die Erfordernisse der Dienstplanung abgestimmt werden. Daraus ergaben sich z.T. Dienstfahrten ohne Fahrgäste zu den Übergabepunkten bei Dienstwechsel. Es zeigte aber auch deutlich auf, dass die vielfältigen Aufgaben der Begleitperson nicht so einfach mit technischen und/oder organisatorischen Mitteln ersetzt werden können. Diese erstrecken sich von der Unterstützung der Fahrgäste bei der Buchung und beim Einsteigen (z.B. im Fall von älteren Fahrgästen) über die Störungsbehebung am Fahrzeug, die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmenden bei blockiertem Verkehrsfluss bis hin zur Kommunikation mit der Leitstelle und der Inbetriebnahme/Ausserbetriebnahme des Fahrzeugs.

Die Fahrgastzahlen und km-Leistungen der Fahrzeuge lagen im OnDemand-Betrieb 2021 deutlich unter den Werten des Fahrplanbetriebs im Herbst 2019. Daraus lassen sich aufgrund seit März 2020 andauernden Pandemie-Situation jedoch keine eindeutigen Rückschlüsse auf Effekte der neuen Angebotsform ziehen.

Die Zahl der Fahrgäste zeigt, dass das Rufbusangebot zwar genutzt wurde, aber nicht wirklich einem Mobilitätsbedarf im Quartier entsprach. Die Rückmeldungen der Bewohnerinnen und Bewohner aus dem Matte- bzw. Marzili-Quartier in den Umfragen bestätigten, dass diese primär Richtung Bahnhof/City fahren wollen und eher selten zwischen den beiden Quartieren. Als Zubringer zur Marzili-Bahn aus dem Marziliquartier bzw. Mattelift und 12er-Bus aus dem Mattequartier war der Rufbus Linie 23 wegen der langsamen Geschwindigkeit auf den fussläufigen Distanzen aber meist unattraktiv.

9.4. Auswirkungen auf die Organisation eines ÖV-Unternehmens

Der Einsatz automatisierter Fahrzeuge mit Begleitperson zeigte vor allem in folgenden Bereichen starke Auswirkungen auf ein ÖV-Unternehmen:

- IT: die Verfügbarkeit von Fachexperten wie auch die Zuverlässigkeit der IT-Systeme sind essenziell für einen stabilen Betrieb automatisierter Fahrzeuge.
- Lieferanten: Auf Seiten der Systemlieferanten ist eine direkte Hotline für den ÖV-Betreiber ebenso zwingend erforderlich wie kurze Reaktionszeiten, ausfallsichere, redundante Backend-Systeme mit standardisierten Schnittstellen sowie ein qualitativ hochstehendes Release-Management.
- Leitstelle: die Fahrzeuge müssen mit ihrem Status jederzeit sichtbar sein und geeignete Ereignismeldungen senden. Dabei müssen sich die neuen IT-Systeme nahtlos in die bestehenden Arbeitsplätze integrieren lassen. Die neuen Ereignissituationen eines automatisierten Fahrzeugs müssen einerseits speziell geschult werden, andererseits organisatorisch und in den technischen Systemen mit den passenden Massnahmen verknüpft werden.
- Technik: eine gute Schulung des Werkstatt-Personal ermöglicht schnelle Reaktionszeiten im Fall von Störungen und Wartungsaufgaben der neuen Technologien (Sensoren). Ein enges Zusammenspiel mit der IT wird hierbei mit der zunehmenden Bedeutung der Software erforderlich.
- Fahrpersonal: das Anforderungsprofil des Fahrpersonals als Begleitperson verschiebt sich hin zu Überwachungsaufgaben, zur Fahrgastkommunikation sowie zur flexiblen Störungsbehebung. Praxiserfahrung im ÖV-Stadtverkehr bleibt aber unverzichtbar, um im Verkehrsfluss mit den anderen Verkehrsteilnehmenden einen stabilen Betrieb sicherzustellen.
- Rollmaterialdisposition: die speziellen Vorgänge beim Aufrüsten/Abrüsten der Fahrzeuge sowie bei der Reinigung müssen berücksichtigt werden.
- Pannenbehebung: die Abschleppdienste müssen speziell für das Abschleppen und/oder Verladen der neuartigen Fahrzeuge geschult werden und ggf. spezielle Hilfsmittel verfügbar haben (z.B. Road Jacks).

Auf die übrigen Bereiche gab es durch die automatisierten Fahrzeuge mit Begleitperson weniger starke Auswirkungen:

- Auf die Angebotsplanung hat die Automatisierung des Fahrzeugs selbst wenig direkte Auswirkungen. Der batterieelektrische Antrieb ist ein separates Thema und die niedrigen Geschwindigkeiten werden sich mit dem Technologiefortschritt ändern. Die grösste Auswirkung ergibt sich bei der Festlegung der Haltestellen, wo neue Aspekte geprüft werden müssen.
- Die Fahrgastkommunikation im Fahrplanbetrieb kann weitgehend gemäss den Standardprozessen laufen. Im OnDemand-Betrieb gibt es diesbezüglich Abweichungen, die aber keinen Zusammenhang mit der Automatisierung haben.
- In der Produktionsplanung waren leicht angepasste Prozesse nötig, einerseits um die vom Hersteller vorgegebenen maximalen Dienstlängen auf den automatisierten Fahrzeugen berücksichtigen zu können, andererseits wegen der recht störungsanfälligen Betriebssituation und der damit nötigen Flexibilität bei der Disposition. Dies scheinen aber Hersteller bzw. Fahrzeug-abhängige Effekte zu sein, die sich nicht unbedingt generalisieren lassen.

Ein späterer Einsatz von automatisierten Fahrzeugen ohne Begleitperson würde noch weitere Auswirkungen haben. Zum Beispiel im Bereich der Fahrgastkommunikation und -hilfestellung, oder Seite im Bereich der mobilen Einsatzteams für die Störungsbehebung.

In diesem Pilotprojekt wurden diese Effekte auf die Betriebsorganisation aber nicht untersucht.

9.5. Auswirkungen auf den städtischen Verkehr

Für die eingesetzten automatisierten Fahrzeuge waren nur sehr geringe Anpassungen an der städtischen Strassen-Infrastruktur nötig, namentlich die in Abschnitt 6.1 beschriebenen Orientierungstafeln entlang der Aarstrasse. Mit fortschreitender Technologie, in diesem Fall der "groundbased location", werden diese Tafeln künftig nicht mehr erforderlich sein.

Bezüglich der digitalen Infrastruktur war die bestehende Netzabdeckung mit 4G-Mobilfunk im Pilotgebiet für einen stabilen Betrieb sehr gut geeignet. Ein 5G-Netz war für die EasyMile-Fahrzeuge nicht erforderlich. Vor dem Hintergrund, dass automatisierte ÖV-Fahrzeuge auf absehbare

Zeit noch eine Überwachung benötigen und sich nur bei Überwachung mehrerer Fahrzeuge aus einer Leitstelle ein Ansatz für einen Business Case ergeben kann, stellt sich künftig dennoch die Frage nach einer Mobilfunkabdeckung mit kurzen Latenzzeiten und genügend Upstream-Kapazität.

Einen deutlichen Mehrwert im Pilotprojekt hätte die Ausstattung der Poller-Anlage mit einer Road-Side-Unit gemäss V2X-Standard gebracht. Die Städte sollten den Einsatz von Road-Side-Units gemäss V2X-Standard in den LSA und sonstigen beeinflussbaren Verkehrsanlagen prüfen.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich automatisierte Fahrzeuge im städtischen Verkehr nur dann etablieren können, wenn sich die nötigen infrastrukturseitigen Investitionen in Rahmen der üblichen Erneuerungskosten bewegen.

Im Pilotversuch konnte gezeigt werden, dass automatisierte Fahrzeuge gleichermassen im Fahrplan-Betrieb wie auch im OnDemand-Betrieb eingesetzt werden könnten. Die Bewertung des OnDemand-Angebots durch die Fahrgäste (Abschnitt 8.6.1) ist nur bedingt aussagekräftig, weil die sehr langsamen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge das Angebot auf den fussläufigen Distanzen nicht attraktiv erscheinen liessen. Es lassen sich daher aus diesem Pilotversuch keine Rückschlüsse auf die Einführung von OnDemand-Angeboten in einer Stadt wie Bern ziehen. Die in der Schweiz laufenden OnDemand-Pilotversuche mit konventionellen Fahrzeugen liefern hier aussagekräftigere Resultate (z.B. der Pilotversuch "pikmi" der vbz).

Am ehesten sind automatisierte Fahrzeuge in verkehrsberuhigten Bereichen mit ausreichend breitem Strassenraum einsetzbar, wo der übrige Verkehr selten und langsam unterwegs ist und wo Fahrzeugbegegnungen im Strassenraum unproblematisch sind.

Solange die Fahrzeuge so langsam unterwegs sind, sind Einsatzszenarien in Fussgängerzonen (z.B. Sightseeing) oder aber in Bereichen mit starken Steigungen (anstelle des Neubaus einer Standseilbahn) denkbar.

Für die ÖV-Betreiber ergeben sich am ehesten im Depot-Bereich oder bei den Zufahrten zu den Depots Anwendungsfälle.

9.6. ÖV Anwendungsszenarien in den nächsten 10 Jahren

Das Pilotprojekt hat gezeigt, dass die eingesetzten Fahrzeuge auf öffentlicher Strasse nicht ohne permanente Begleitung verkehren können. Aus dem langsamen Entwicklungsfortschritt der Fahrzeuge über den gesamten Projektzeitraum von 4 Jahren lässt sich folgern, dass die Einsatzreife auch in den kommenden 10 Jahren nicht erreicht sein wird. Die automatisierten Fahrzeuge haben noch erheblichen Weiterentwicklungsbedarf.

Ein Anwendungsfall aus Sicht eines ÖV-Betreibers kann sich jedoch aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus erst dann ergeben, wenn die automatisierten Fahrzeuge nicht mehr 1:1 begleitet werden müssen.

Daraus lassen sich vier Stossrichtungen ableiten:

1. Die Fahrzeugautomatisierung wird zunächst nur in Form von Assistenzsystemen genutzt, die das Fahrpersonal unterstützen (Analog zur Entwicklung im Automobilbereich). Die Erzielung von Einspareffekten ist aufgrund der aktuell sehr hohen Technologiekosten auch hier eine Herausforderung.
2. Bei den Einsatzszenarien von automatisierten Fahrzeugen werden zunächst "geschützte Räume" wie z.B. Depot-Fahrten näher geprüft. In diesen sind die Umgebungsbedingungen so stark vereinfacht, dass diese von den automatisierten Fahrzeugen beherrscht werden können. Es ergeben sich jedoch neue Randbedingungen wie z.B. die Anbindung in das Depot-Managementsystem oder die Indoor-Navigation, daher sollte dies in separaten Projekten betrachtet werden.
3. Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Fernüberwachung und -steuerung aus einer Leitstelle, so dass eine Person mehrere Fahrzeuge überwachen und notfalls eingreifen kann. Hier ergeben sich zwar zusätzlich zu den am Ende von Abschnitt 9.4 genannten Anforderungen für unbegleitete Fahrten noch zusätzliche Herausforderungen bezüglich Netzabdeckung, Upstream und Latenzzeiten des Mobilfunk-Netzes. Jedoch wäre so ggf. eine Wirtschaftlichkeit zu erreichen, ohne dass die Fahrzeuge jede Situation beherrschen müssen.

4. Es wird empfohlen, die Entwicklung der Sensor- und Software-Technologie in den Bereichen "Allwettertauglichkeit" und "intelligenter Umgang mit Pflanzen" aktiv zu verfolgen. Wären diese zwei, für einen stabilen ÖV-Betrieb essenziellen Aspekte zufriedenstellend gelöst, wäre ein Einsatz der automatisierten Fahrzeuge auf räumlich abgetrennten Fahrspuren denkbar.

9.7. Herausforderungen durch automatisierte Fahrzeuge im ÖV

Trotz des noch bescheidenen Entwicklungsstand lassen sich einige Herausforderungen und Risiken antizipieren, die vollständig automatisierte Fahrzeuge im ÖV (ohne Begleitperson) mit sich bringen würden. Diese ergeben sich im Wesentlichen aus der Komplexität des Gesamtsystems aus automatisierten Fahrzeugen und den umgebenden IT-Systemen sowie aus der im städtischen Verkehr immer nötigen Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmenden.

Zu den Herausforderungen zählen:

- Interaktion der automatisierten Fahrzeuge mit anderen Verkehrsteilnehmenden
- Allzeit korrekte Kontextinterpretation der Software
- Durchgängige Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit aller Komponenten (Fahrzeug, Mobilfunk, Internet, IT-Systeme)
- Rechtliche Verantwortlichkeiten, grenzüberschreitende Kompatibilität und Standard-Schnittstellen zu den Umsystemen
- Langzeitqualität und Alltagstauglichkeit der Sensortechnik (waschanlagentauglich, verschmutzungsresistent)
- Langzeitqualität der eingesetzten Software (Herstellergarantie für Updates über Fahrzeug-Lebensdauer)
- Stromverbrauch der AV-Bordrechner, insbesondere mit der Reichweithematik bei Elektrofahrzeugen

Folgende neue Risiken ergeben sich für den ÖV-Betreiber:

- IT-Security (Hacker-Angriffe hätten Impact auf Fahrgast-Sicherheit)
- IT-Ausfall (Unterbrochene Internetverbindungen zum Rechenzentrum würden zum Betriebsstillstand führen)
- Neue Vandalismus-Auswirkungen (Beschädigung der teuren Sensoren, absichtliche Irreführung der Systeme mit künstlicher Intelligenz, z.B. durch Aufkleber und Schilder)

9.8. Pilotversuche mit automatisierten Fahrzeugen in der Schweiz

Bewilligungsverfahren

Das Bewilligungsverfahren bestehend aus Einzelzulassung der automatisierten Fahrzeuge sowie der damit verknüpften Streckenbewilligung erforderte den Einbezug sehr vieler Stakeholder und die Abstimmung aller Einzelaspekte und war entsprechend zeitaufwändig.

Die frühzeitige Kontaktaufnahme mit den zuständigen Ansprechpartnern der Bundesämter ASTRA, BAV und BAKOM erlaubte BERNMOBIL, den zeitlichen Ablauf des Gesuchs- und Bewilligungsverfahrens richtig einzuschätzen.

Bewährt hat sich dabei 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.

Sehr wichtig erscheint ein offener Austausch unter allen Akteuren. Dies wurde 2018 von BERNMOBIL bereits so umgesetzt, indem für die Einzelzulassung des EasyMile Fahrzeugs auf die Erfahrungen der Firmen Amotech, RappTrans, SBB und Mobility aufgesetzt wurde.

Die Genehmigung der befahrenen Pilotstrecke für den Fahrplanbetrieb hat sich als sehr aufwändig erwiesen, da das Gesuch an die Bundesämter sämtliche Streckendetails beinhalten musste (sämtliche Haltestellen in detaillierter Ausgestaltung mit Plan, alle Verkehrszeichen, Bilder von jedem Streckenabschnitt). Hierfür waren neben dem Hersteller EasyMile, der ebenfalls eine detaillierte Streckenprüfung vornimmt, sämtliche involvierte Partner (Strasseneigentümer, Polizei etc.) im Vorfeld bereits einzubeziehen.

Im Ergänzungsantrag für die Streckenerweiterung für den OnDemand-Betrieb konnte bezüglich der virtuellen Haltestellen ein eleganteres Verfahren geprüft werden. Im Antrag an die Bundesämter werden neben den befahrenen Strassen nur die Randbedingungen für die Einrichtung der

virtuellen Haltestellen detailliert beschrieben (z.B. keine Blockierung von Zufahrten, Mindestabstände zu Parkfeldern etc.), die genaue Ausgestaltung der einzelnen Haltestellen wurde dann nach Genehmigung mit den Strasseneigentümern, der Polizei etc. abgestimmt und zu Händen des ASTRA dokumentiert.

Dieses Verfahren ist aus Sicht BERNMOBIL sehr gut geeignet und sollte in künftigen Versuchen noch erweitert werden. Optimal wäre, wenn neben dem befahrenen Gebiet (Perimeter) nur die generellen Rahmenbedingungen für die befahrenen Strassen definiert werden müssten. Z.B. maximal erlaubte Verkehrsmenge auf der Strasse.

Fahrzeugbeschaffung

Rückblickend hat sich der Aufwand für das Ausschreibungsverfahren in der Fahrzeugbeschaffung 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.

Sehr hilfreich war auch ein mehrstufiges an die Zahlungen geknüpftes Abnahmeverfahren im Werkliefervertrag mit EasyMile.

Finanzierung

Die Finanzierung dieses Pilotversuches war eine grosse Herausforderung und war nur möglich dank unseren Partnern. Sollen solche Projekte weiterhin durchgeführt werden, orten wir folgenden Handlungsbedarf: Zum einen müssen regionalen und städtischen ÖV-Unternehmen i.R. der gesetzlichen Vorgaben mehr Handlungsspielraum für innovative Projekte zugewiesen werden. Zum anderen empfehlen wir nationalen Förderprogramme mit durchdachter Roadmap und entsprechenden Finanzierungsmöglichkeiten, wie sie in den umliegenden Ländern Deutschland, Frankreich oder Österreich bzw. auf EU-Ebene durchgeführt werden.

Zusammenarbeit

Sehr gut funktioniert in der Schweiz die Zusammenarbeit. Einerseits die Zusammenarbeit innerhalb des konkreten Pilotprojekts mit allen Stakeholdern inklusive jenen der zuständigen Bundesämter. Andererseits auch die Kooperation unter allen im Bereich automatisiertes Fahren aktiven Organisationen, Firmen und Hochschulen. Dieser Kooperation konnte mit der Gründung des Vereins "Swiss Association of Autonomous Mobility" (SAAM) ein entsprechender Rahmen gegeben werden.

10. Zusammenfassung

In den Jahren 2018 bis 2021 führten die Projektpartner BERNMOBIL, Stadt Bern, Migros Aare, ewb und SBB in Bern den Pilotversuch "selbstfahrendes Fahrzeug im ÖV" (SFF) durch. Hierzu wurden auf der gewählten Pilotstrecke entlang der Aare am Südrand des historischen Stadtkerns selbstfahrende Fahrzeuge des Herstellers EasyMile eingesetzt. Diese fuhren ab Juli 2019 im Fahrplanbetrieb als Linie 23 und dann zwischen Januar und Juni 2021 im OnDemand-Betrieb als "Rufbus Linie 23".

Die Projektpartner lernten in dem Pilotversuch, wie selbstfahrende Fahrzeuge in die Betriebsabläufe eines städtischen ÖV-Unternehmens integriert werden können und ob und wie sie sich im komplexen städtischen Verkehrsfluss einfügen.

Es zeigte sich, dass die Selbstfahr-Technologie der Fahrzeuge ausreichend gut ist, um mit einer Begleitperson an Bord einen Fahrplan- oder OnDemand-Betrieb durchzuführen. Jedoch mussten die Begleitpersonen sehr häufig die Fahrzeugsteuerung übernehmen, weil die Fahrzeuge viele Situationen allein nicht bewältigen konnten. Ausserdem entsprachen die erreichten Geschwindigkeiten nicht den Erwartungen an ein ÖV-Fahrzeug. Der Entwicklungsstand der selbstfahrenden Fahrzeuge ist daher von einer Anwendungsreife für einen automatisierten Betrieb ohne Begleitperson noch sehr weit entfernt.

Der Fokus in den nächsten Jahren liegt auf Assistenzsysteme in den Standard-Fahrzeugen sowie auf mögliche Automatisierungsschritte im gut überwachten Depotbereich.

Die weitere Entwicklung verfolgt BERNMOBIL nun als Mitglied der "Swiss Association of Autonomous Mobility" (SAAM) [5], in der sich Akteure aus öffentlicher und privater Mobilität, Forschungseinrichtungen und Firmen national koordinieren und gegenseitig unterstützen.

11. Quellen

- [1] ASTRA Webseite zu Pilotversuchen: <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/intelligente-mobilitaet/pilotversuche.html>
- [2] Zwischenbericht SFF BERNMOBIL Februar 2020: https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/abteilung_strassennetzeallgemein/bernmobil-zwischenbericht-februar-2020.pdf.download.pdf/SFF%20Bernmobil%20-%20Pilotprojekt%20selbstfahrendes%20Fahrzeug%20-%20Zwischenbericht%20Februar%202020.pdf
- [3] Zwischenbericht SFF BERNMOBIL August 2020: https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/abteilung_strassennetzeallgemein/bernmobil-pilotprojekt-august2020.pdf.download.pdf/bernmobil-pilotprojekt-august2020.pdf
- [4] Zwischenbericht SFF BERNMOBIL Februar 2021: https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/abteilung_strassennetzeallgemein/sff_bernmobil_februar21.pdf.download.pdf/SFF_Bernmobil_Pilotprojekt_selbstfahrendes_Fahrzeug_-_Zwischenbericht_Februar_2021.pdf
- [5] Webseite "Swiss Association of Autonomous Mobility" (SAAM): <https://www.swissaam.ch/>
- [6] Webseite "EasyMile": <https://easymile.com/>
- [7] Perret F., Arnold T., Fischer R., de Haan P., Haefeli U. (2020), Automatisiertes Fahren in der Schweiz: Das Steuer aus der Hand geben?, In TA-SWISS Publikationsreihe (Hrsg.): TA 71/2020. Zürich: vdf

12. Anhang


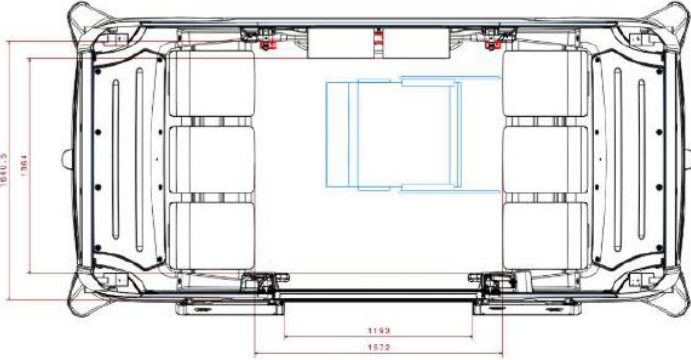


12.1. EasyMile Begriffe

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

Von EasyMile konzipierte Ausbildungslevel im Zusammenhang mit dem Handling der EZ10 Fahrzeuge. Mit dem erfolgreichen Abschluss ist ein entsprechendes Zertifikat verbunden.	
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 auf abgesperrten Arealen, Level 2: auch auf öffentlichen Strassen
Von EasyMile definierte Level für die Wartungsarbeiten an den EZ10 Fahrzeugen	
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
Begriffe im Zusammenhang mit dem von den EZ10 befahrenen Gebieten	
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
Yield	Virtueller Stoppunkt, bei dem das Fahrzeug anhält und erst nach Bestätigung weiterfährt. Die Bestätigung erfolgt derzeit meist manuell durch den Operator, soll aber zukünftig auch durch die Software erfolgen können.
Area	Definierte Abschnitte der Strecke, in denen sich die EZ10 nicht begehen können (weil die virtuellen Fahrspuren zu nah liegen)
Modus	Betriebsmodus "metro", "bus" etc. definiert die Art, wie die Fahrzeuge auf der Site betrieben werden.
Begriffe aus der Software-Welt von EasyMile	
SiteCC	Site Control Center. Mandantenfähige Benutzeranwendung (webbasiert) zur Kontrolle der Fahrzeuge auf einer Site. Für BERNMOBIL gibt es zwei Instanzen, einen für die produktive Site in der Matte, einen für die Test-Site im Tramdepot. SiteCC ist das Frontend des EZ Fleet. Die Zugriffsberechtigung ist an die Ausbildung zum ChiefOperator oder Training Officer geknüpft.
EZ Fleet	Software zur Überwachung der Fahrzeuge auf der Site
EZ Tools	Deployment-Tools und Maintenance-Tools
EZ Move	low level embedded Software auf dem Fahrzeug
EZ Shield	Von EZ Drive unabhängiges Kollisionsvermeidungs-System
EZ Drive	high level embedded Software auf dem Fahrzeug
Release Notes	Detaillierte Release-Informationen zu den Software-Updates
Voyager X	Marketing-Name der Software-Updates. Ein Voyager-Release (z.B. "Voyager 9") umfasst dabei die neuen Versionen der oben genannten Pakete EZ Fleet, EZ Tools etc.

12.2. Steckbrief EasyMile EZ10 Generation 2

Kennzahlen und Bedienung

<p>Fahrzeughülle: Länge: 4.02 m, Breite: 1.98 m, Höhe inkl. Klimaanlage: 2.87 m</p> <p>Sensoren und Beleuchtung sind vorne und hinten symmetrisch konzipiert. Das Zweirichtungsfahrzeug wird durch die seitliche Tür rechts zum Einrichtungsfahrzeug (Rechtsverkehr).</p> <p>Die Beleuchtung des Fahrzeugs musste vom Hersteller in die zulassungskonforme Ausführung mit Scheinwerfern vorne und Rücklichtern hinten umgebaut werden.</p>	
<p>Innenraum:</p> <p>8 Plätze (6 Sitzplätze und 2 zum Anlehnen im Stehen) und einem Stehplatz für die Begleitperson. Bei Mitnahme eines Rollstuhls reduziert sich die Platzzahl auf 4 Sitzplätze.</p>	
<p>Antrieb:</p> <p>Das Fahrzeug ist mit einer Akkukapazität von 30 kWh sowie zwei Fahrmotoren zu 8 kW ausgestattet.</p>	
<p>Kommunikation mit Begleitperson:</p> <p>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.</p>	
<p>Eingriff und Übernahme durch Begleitperson:</p> <p>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 Möglichkeit, das Fahrzeug mit einer normalen Betriebsbremsung zum Stillstand zu bringen (SoftStopp).</p> <p>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 Fussgängerstreifen. Um einen flüssigen Betrieb zu ermöglichen, kann die Begleitperson die Quittierung bereits beim Annähern an die definierten Stellen</p>	

vornehmen. In diesem Fall wird das Fahrzeug nicht anhalten, sondern seine Fahrt fortsetzen	
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 gelöst 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 Notruf-funktion eine Sprechverbindung mit der Leitstelle aufbauen.	
Türbedienung: Die Fahrgäste können die Tür über den grünen Taster öffnen/schliessen bzw. über den blauen Taster die Rollstuhlrampe und das Absenken des Fahrzeugs aktivieren.	
Pannenbehebung: Das Fahrzeug kann bei Ausfall der automatischen Fahrfunktion manuell über die Bedienkonsole gesteuert werden. Bei Ausfall des Antriebs können die Bremsen über einen Schalter gelöst werden und das Fahrzeug mit Hilfe der beiliegenden Abschleppösen auf ein Abschleppfahrzeug verladen werden. Bei Ausfall der Elektrik ist der Einsatz von Road Jacks nötig	

Übersicht über die automatisierten Fahrfunktionen des EZ10 Gen2 mit Softwarestand Voyager 7 (Stand Dezember 2019):

Selbstfahrfunktion, Ortung und Orientierung:

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.

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 korreliert mit der maximalen Geschwindigkeit (je enger der Korridor, desto kleiner die programmierte Maximalgeschwindigkeit).

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.
Einhalten der Verkehrsregeln: Die Software des Fahrzeugs kennt keine Verkehrsregeln. Vortrittsgewährung wird dem Fahrzeug durch sogenannte Yields einprogrammiert. Yields sind programmierte Stopps, an denen die Begleitperson die Weiterfahrt quittieren muss.
Vermeidung von Kollisionen: 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 Kollisionsvermeidung basiert auf den Daten der LIDAR-Sensoren. 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 programmierten 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 Lichthupe zum Einsatz.
Ausweichen bei festen Hindernissen: Das Fahrzeug kann kleineren Hindernissen auf der Fahrspur unter Idealbedingungen 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.
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.

Sensorausstattung:

Sensoren Gen2	Verbesserung Gen3 gegenüber Gen2
GPS	GPS Empfänger
VLP16 Lidar	Symmetrisch vorne und hinten (80cm über Boden): Objekterkennung
2 LDMRS (Lidar)	2 LIDARs auf dem Dach für die Lokalisierung
LMS (Lidar)	1 Layer – Kollisionsvermeidung
Mono B/W Kamera	Keine Verwendung durch Selbstfahr-Software

12.3. Steckbrief EasyMile EZ10 Generation 3

Kennzahlen und Bedienung

<p>Fahrzeughülle: Gewicht leer: 2150 kg; Zul. Ges.Gewicht: 3050 kg</p> <p>L: 4050 mm; B: 1892 mm; H: 2871 mm</p> <p>Sensoren und Beleuchtung sind asymmetrisch konzipiert. Das Fahrzeug verfügt vorne über deutlich mehr Sensoren als hinten.</p>	
<p>Innenraum:</p> <p>8 Plätze (6 Sitzplätze und 2 zum Anlehnen im Stehen) und einem Stehplatz für die Begleitperson. Bei Mitnahme eines Rollstuhls reduziert sich die Platzzahl auf 4 Sitzplätze.</p> <p>Die Fahrzeuge waren mit Stoffsitzen und Sicherheitsgurten ausgestattet. Weitere Ausstattungen:</p> <p>Fussbodenheizung.</p> <p>Passagierzählsystem</p> <p>Rollstuhlbefestigungsösen am Boden</p>	
<p>Antrieb: elektrisch - 2 Motoren a 8 kW Batterie: 38.4 kWh 48V (LiFePo4)</p>	

Operator-Arbeitsplatz (Eigenbau-Lösung BERNMOBIL):

Bessere Absicherung gegen Stürze für die Begleitperson, mit Stauraum für Utensilien.



Bedienung wie beim Gen2 – siehe 12.2

Sensorausstattung und weitere Komponenten:

Sensoren Gen3	Verbesserung Gen3 gegenüber Gen2
VLP32 Lidar (auf dem Dach)	Höhere Dichte für Erkennung und Tracking, auch auf grosse Entfernung. Bessere Positionierung
-	Lokalisierung beim Gen3 wird durch VLP32 und in weiteren Lidar-Sensoren (abhängig vom Software-Stand) übernommen.
MRS (Lidar)	4 Layer statt 1, bessere Filterung von Staub, zusammen mit SCALA Input für Kollisionsvermeidung
4 SCALA (Lidar)	Automatische Grundfilterung; Möglichkeit, weit vorausszusehen für Vorhersage der Fahrwege
4 ARS (Radar) (*)	Unterstützung für Objekt-Identifikation und -tracking; Schlechtwetterbetrieb
Stereo Color Kamera	Hochauflösende, bessere Wahrnehmung von unkonventionellen Fahrzeugen
GSM/EDGE/UMTS/LTE+WiFi Modem	
Multi-constellation GNSS Modem	Besserer Satelliten-Empfang als Gen2
V2X OnboardUnit der Firma Naevia	Als Zusatzoption

12.4. Tabellenfahrplan im ersten Betriebsjahr, 1 Fahrzeug

[illegible]

12.5. Tabellenfahrplan mit 2 Fahrzeugen

Pilotversuch SFI Teilstrecke West: Fahrplan ab Montag, 10.08.2020																									2 Fahrzeuge / Reisegeschwindigkeit: 5.5 km/h / 30' - bzw. 15' -Takt / 23 Kurspaare											
Marzili - Münsterplattform												Montag - Freitag: 11 - 13.30 Uhr 30' -Takt / 13.30 - 17 Uhr 15' -Takt / 17 - 19 Uhr																								
Marzilibahn, Bergstation												alle 3 Minuten																								
Marzilibahn, Talstation																																				
Distanz (m)	Fahrzeit		Ø km/h		11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	13:45	14:00	14:15	14:30	14:45	15:00	15:15	15:30	15:45	16:00	16:15	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30										
Marzili	275	4.2	00:04:12	3.9	11:04	11:34	12:04	12:34	13:04	13:34	13:49	14:04	14:19	14:34	14:49	15:04	15:19	15:34	15:49	16:04	16:19	16:34	17:04	17:34	18:04	18:34										
Badgasse	535	4.6	00:04:36	7.0	11:08	11:38	12:08	12:38	13:08	13:38	13:53	14:08	14:23	14:38	14:53	15:08	15:23	15:38	15:53	16:08	16:23	16:38	17:08	17:38	18:08	18:38										
Münsterplattform	80	0.9	00:00:54	5.3	11:09	11:39	12:09	12:39	13:09	13:39	13:54	14:09	14:24	14:39	14:54	15:09	15:24	15:39	15:54	16:09	16:24	16:39	17:09	17:39	18:09	18:39										
890	9.7	00:09:42	5.5																																	
												2. Fahrzeug im Einsatz: 15' -Takt																								
Münsterplattform - Marzili												Montag - Freitag: 11 - 13.30 Uhr 30' -Takt / 13.30 - 17 Uhr 15' -Takt / 17 - 19 Uhr																								
Distanz in m	Fahrzeit		Ø km/h		11:15	11:45	12:15	12:45	13:15	13:45	14:00	14:15	14:30	14:45	15:00	15:15	15:30	15:45	16:00	16:15	16:30	16:45	17:15	17:45	18:15	18:45										
Münsterplattform	265	2.9	00:02:54	5.5	11:16	11:46	12:16	12:46	13:16	13:46	14:01	14:16	14:31	14:46	15:01	15:16	15:31	15:46	16:01	16:16	16:31	16:46	17:16	17:46	18:16	18:46										
Badgasse	95	1.0	00:01:00	5.7	11:21	11:51	12:21	12:51	13:21	13:51	14:06	14:21	14:36	14:51	15:06	15:21	15:36	15:51	16:06	16:21	16:36	16:51	17:21	17:51	18:21	18:51										
Marzili	190	3.2	00:03:12	3.6	11:24	11:54	12:24	12:54	13:24	13:54	14:09	14:24	14:39	14:54	15:09	15:24	15:39	15:54	16:09	16:24	16:39	16:54	17:24	17:54	18:24	18:54										
1'155	12.1	00:12:06	5.7																																	
Marzilibahn, Talstation												alle 3 Minuten																								
Marzilibahn, Bergstation																																				
Ausfahrt: Garage Wasserwerkasse - Badgasse - Marzili																																				
Distanz in m	Fahrzeit		Ø km/h		10:40																															
Garage Wasserwerkasse					10:40																															
Badgasse	415	5.5	00:05:30	4.5	10:45																															
Marzili	795	9.0	00:09:00	5.3	10:54																															
1'210	14.5	00:14:30	5.0																																	
Einfahrt: Marzili - Badgasse - Garage Wasserwerkasse																																				
Distanz (m)	Fahrzeit		Ø km/h		16:40																															
Marzili					16:40																															
Badgasse	275	4.2	00:04:12	3.9	16:44																															
Garage Wasserwerkasse	535	4.6	00:04:36	7.0	16:48																															
	370	5.5	00:05:30	4.0	16:54																															
1'180	14.3	00:14:18	5.0																																	

12.6. Datenanalyse OnDemand-Betrieb

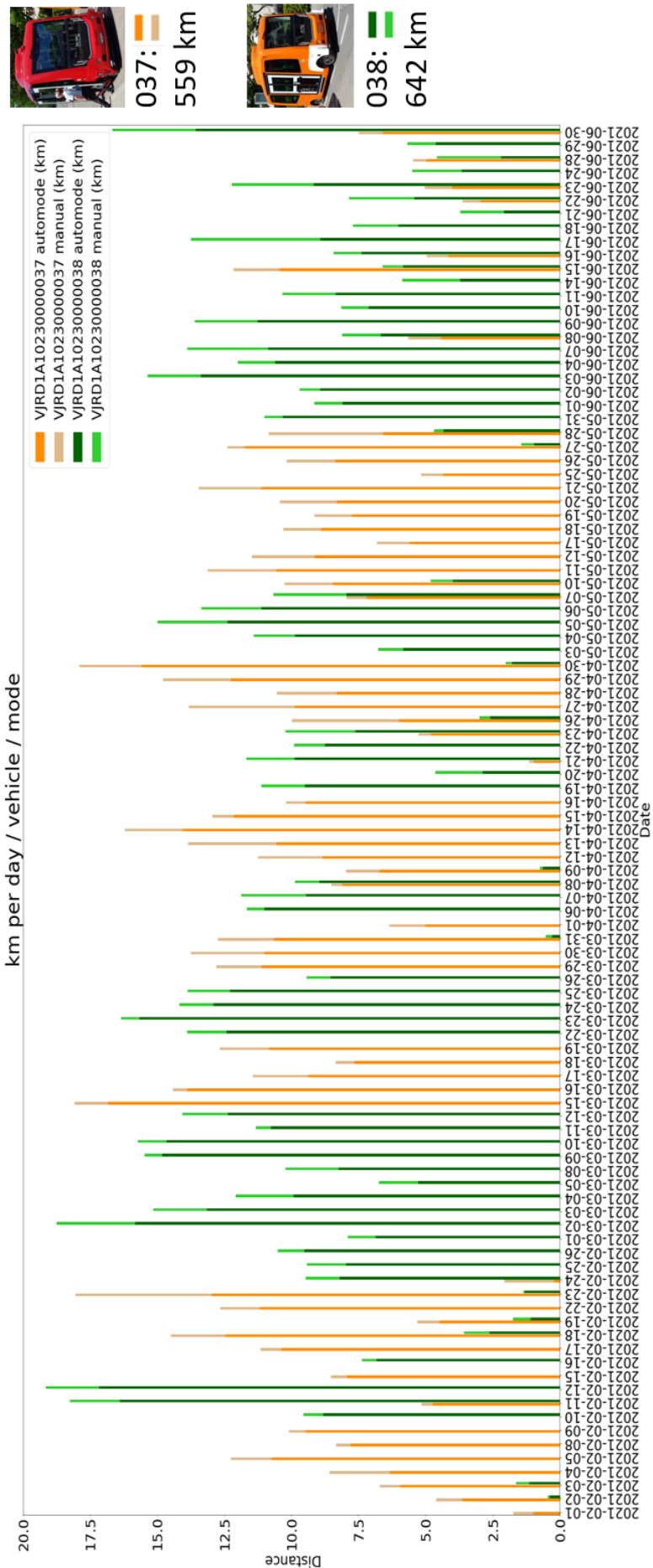


Abbildung 54: Distanz (km) pro Tag und Fahrzeug nach Betriebsart (automat./manuell) im Zeitraum 1.2.-30.6.2021

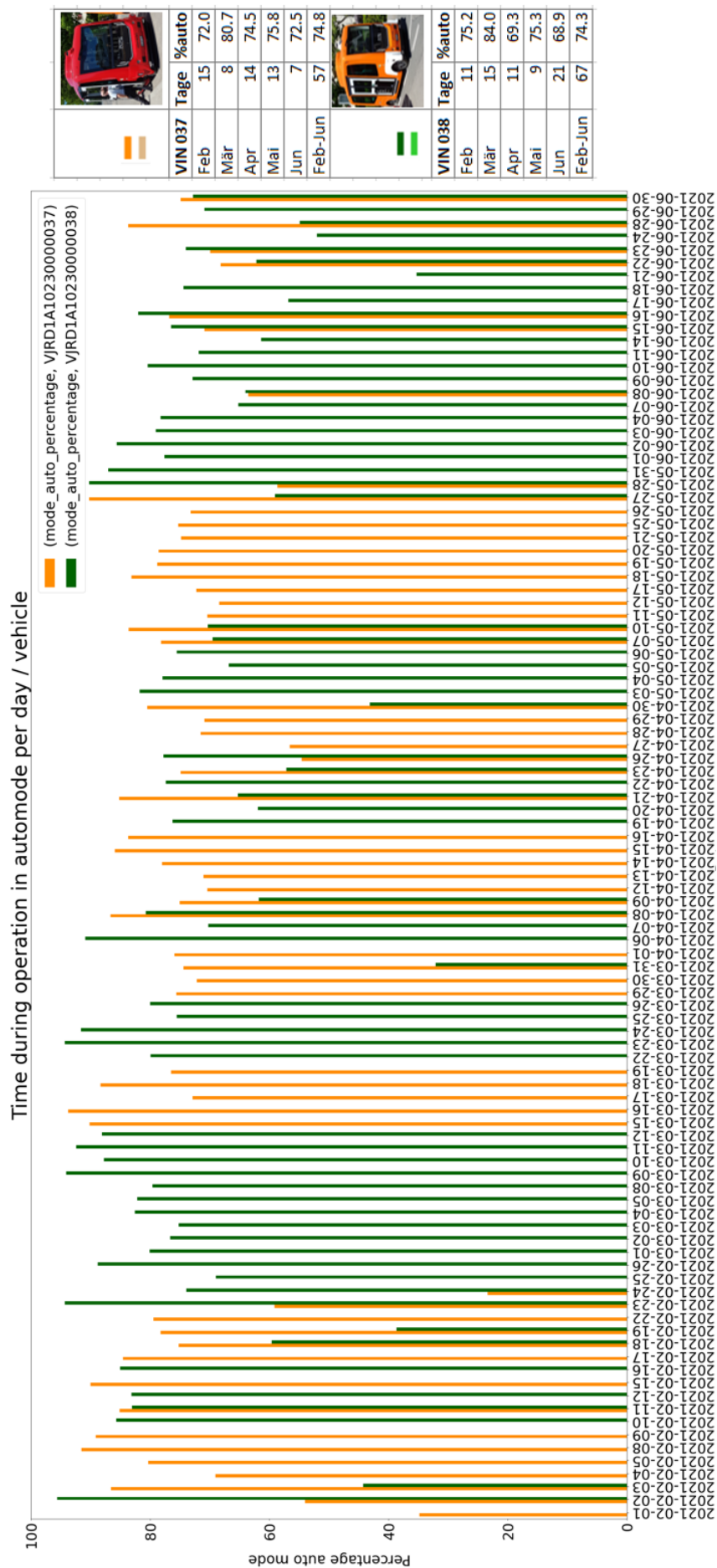


Abbildung 55: Anteil automatischer Betrieb pro Tag und Fahrzeug in % (nur Zeiten mit v > 0 km/h)

13. Übersicht beiliegende Anhänge

Folgende Anhänge liegen als separate Dokumente bei:

- Umfrage Fahrgäste OnDemand-Betrieb
- Umfrage Anwohnende OnDemand-Betrieb
- Umfrage Operatoren OnDemand Betrieb