



Pilotprojekt VBSH "Linie 12"

Abschlussbericht

Bericht

3C

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1 Einführung | 5 |
| 1.1 Zweck | 5 |
| 1.2 Streckenführung | 5 |
| 1.3 Befahrene Streckenabschnitte | 6 |
| 1.4 Baustellen auf dem oberen Streckenabschnitt | 7 |
| 1.5 Austausch Trapizio mit Trapizia | 8 |
| 1.6 Funktionsweise der Ortung | 9 |
| 1.7 Überarbeitung von Karten- oder Streckenkonfiguration | 10 |
| 2 Betrieb Linie 12 | 11 |
| 2.1 Betriebszeiten | 11 |
| 2.2 Begleitpersonen | 12 |
| 2.3 Beförderte Personen | 12 |
| 2.4 Gefahrene Kilometer | 14 |
| 2.5 Verfügbarkeit | 16 |
| 3 Erfahrungen im automatisierten Fahren | 18 |
| 3.1 Verhalten im Verkehr | 18 |
| 3.2 Eingriffe der Begleitpersonen | 19 |
| 3.2.1 Präventive Eingriffe | 19 |
| 3.2.1.1 Baustellen | 19 |
| 3.2.1.2 Stau / parkierte Fahrzeuge | 20 |
| 3.2.1.3 Erschwerte Eingliederung in den fließenden Verkehr aus der Haltebuchstube Zentrum Nord | 21 |
| 3.2.1.4 Fussgängerstreifen | 22 |
| 3.2.1.5 Rechtsvortritt | 23 |
| 3.2.1.6 VBSH-Busse überqueren die Mittellinie | 24 |
| 3.2.1.7 Kreuzen mit dem Rhyfall-Express | 24 |
| 3.2.1.8 Parkierte Fahrräder am Mühleradhaus | 25 |
| 3.2.2 Korrektive Eingriffe | 26 |
| 3.2.2.1 Probleme mit der Streckenführung nach Austausch eines defekten 3D-LIDAR-Sensors | 26 |
| 3.2.2.2 Missachtung «Go-Befehl» mit Trapizio | 26 |
| 3.2.2.3 Problematik mit der Fahrspur am Industrieplatz mit Trapizio | 27 |
| 3.2.2.4 Probleme mit der Fahrspur an der Haltestelle Zentrum Süd mit Trapizio | 28 |
| 3.2.2.5 Fahrverhalten nach Software Release mit Trapizio | 28 |
| 3.2.2.6 Probleme mit der Lenkung mit Trapizia | 29 |
| 3.2.2.7 Vollbremsung bei Verlust von GNSS mit Trapizia | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2.2.8 Trapizia touchierte den Randstein..... | 30 |
| 3.2.2.9 Sicherheitsmodul von Navya nicht aktiv..... | 31 |
| 3.2.2.10 Zwischenfall am 2. Juni 2019 | 32 |
| 3.3 Keine Eingriffe der Begleitperson..... | 34 |
| 3.4 Wetter | 34 |
| 4 Erfahrungen mit der Technik | 35 |
| 4.1 Erfahrungen mit der Fahrzeugsoftware..... | 35 |
| 4.1.1 Selbstfahrsoftware | 35 |
| 4.1.2 Referenz-Karte | 35 |
| 4.1.3 Konfiguration..... | 36 |
| 4.1.4 Berechnung der Fahrspur..... | 36 |
| 4.1.5 Weitere Erkenntnisse | 36 |
| 4.2 Erfahrungen mit der Fahrzeughardware | 38 |
| 4.2.1 Batterie..... | 38 |
| 4.2.2 Bruch der Befestigungsplatte des Differenzials von Trapizio | 38 |
| 4.2.3 Software und Hardware-Probleme bei Trapizia | 39 |
| 4.2.4 Weitere Erkenntnisse | 39 |
| 5 Erfahrungen aus Sicht der Verkehrsbetriebe (Haltestelle/Leitstelle) | 40 |
| 5.1 Koordination beim Befahren von Haltestellen..... | 40 |
| 5.2 Vernetzung zur Leitstelle..... | 41 |
| 6 Erfahrungen zum Zweirichtungsbetrieb | 43 |
| 7 Erfahrungen mit anderen Verkehrsteilnehmern und Bevölkerung | 44 |
| 7.1 ETH-Studie | 44 |
| 7.2 Sicht der Projektbeteiligten..... | 45 |
| 7.2.1 Erfahrungen mit anderen Verkehrsteilnehmern | 45 |
| 7.2.2 Erfahrungen mit Fussgänger und Touristen..... | 45 |
| 7.2.3 Erfahrungen mit Fahrgästen und Bevölkerung | 46 |
| 8 Verzeichnisse..... | 47 |

Summary

Selbstfahrende Fahrzeuge – die Disruption in der Mobilität: Kein Lenkrad, kein Pedal, kein Fahrer.

Der Verkehr der Zukunft wird sich massgeblich verändern, darüber sind sich viele Verkehrsexperten einig. Automatisierte Fahrzeuge werden bald nicht nur in Pilotprojekten eingesetzt, sondern werden ein Teil des öffentlichen Verkehrs sein. Bis aber solche Fahrzeuge in grosser Stückzahl auf Schweizer Strassen unterwegs sein werden, gilt es noch einige Hürden zu überwinden.

Die zahlreichen Projekte mit selbstfahrenden Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr bereiten die Schweiz optimal auf diese Zukunft vor. Eines dieser Projekte ist die Linie 12 in Neuhausen am Rheinfall. Die Strecke befindet sich direkt neben dem Rheinfall – eine der schönsten Kulissen in der Schweiz – und führt vom Zentrum in Neuhausen über den Industrieplatz bis zum Rheinfallbecken mit Endhaltepunkt beim Schlössli Wörth. Via Kopfwechsel fährt das Shuttle ohne Wenden zurück in Richtung Zentrum.

Auf der rund zwei kilometerlangen Strecke muss das Shuttle mehrere Herausforderungen bewältigen: Uni- bzw. bidirektional, grosses Touristenaufkommen und enge Platzverhältnisse am Rheinfall, eine Steigung von bis zu 15 % und die Tempo-30-Zone auf der öffentlichen Strasse.

All dies macht die Strecke sehr anspruchsvoll und so durfte in den ersten Monaten nur auf dem oberen Streckenabschnitt gefahren werden, denn das Shuttle war nicht in der Lage, eine Steigung bzw. ein Gefälle von 15 % im Dauerbetrieb zu bewältigen. Im zweiten Quartal 2019 wurde das erste Shuttle durch eine Weiterentwicklung vom Fahrzeughersteller, ein 4x4-Fahrzeug, ersetzt. Die vier angetriebenen Räder erlaubten eine Bewältigung der 15%-Steigung, weswegen die Strecke um den unteren Streckenabschnitt erweitert wurde.

Während des Pilotprojekts fuhr das Shuttle täglich entweder eine 4-Stunden- oder teilweise an den Sonntagen bzw. Feiertagen eine 8-Stunden-Schicht. Die Begleitperson im Fahrzeug überwachte das Shuttle zu jedem Zeitpunkt und griff notfalls ein. Insgesamt war es an 446 Tagen unterwegs und beförderte rund 35'000 Fahrgäste. Aufgrund von unterschiedlichsten Gründen war ein Betrieb an 77 Tagen nicht möglich.

Das selbstfahrende Fahrzeug ortet sich in der Regel durch Verwendung von GNSS und LIDAR-Sensoren. Aber aufgrund von Ungenauigkeiten mit der GNSS-Ortung in Neuhausen wurde diese teilweise deaktiviert. So ortete sich das Shuttle grösstenteils nur mit den LIDAR-Sensoren. Dafür verglich es eine auf dem Shuttle abgespeicherte Referenz-Karte mit der Ist-Umgebung. Stimmt diese überein, so wurde das Shuttle geortet und es konnte einer vorkonfigurierten «virtuellen Schiene» nachfahren. Auf dieser wurden Fahrspur, Geschwindigkeit und andere Attribute festgelegt. Stimmt diese Karten nicht mehr überein, so war das Fahren im automatisierten Modus nicht mehr möglich und die Referenz-Karte musste neu erstellt werden. Diverse Bauarbeiten in Neuhausen veränderten die Umgebung massgeblich, was ein solches Überarbeiten erforderlich machte. Insgesamt wurde die Strecke dreimal angepasst.

Zeitweise funktionierte der Betrieb gut. Die Begleitperson musste wenig eingreifen und das Fahrzeug fuhr eigenständig der abgespeicherten Route entlang. Aber oft verlief der Betrieb wegen diversen Problemen mit Soft- oder Hardware nicht reibungslos oder musste sogar vorübergehend eingestellt werden.

Auch wenn der Fahrzeughersteller bereits in Serie produziert, steckt die Technologie noch in Kinderschuhen. Einiges funktionierte im Grossen und Ganzen gut und anderes sollte verbessert oder sogar neu entwickelt werden. Die Begleitperson war oft nicht nur als Überwachungsinstanz tätig, sondern musste, vor allem gegen Projektende, vermehrt eingreifen und die Kontrolle vom Fahrzeug übernehmen.

Trotz diversen Schwierigkeiten war das Projekt ein Erfolg und es konnten wertvolle Erfahrungen im Hinblick auf Angebot, Fahrzeugsoftware, Fahrzeughardware oder auch Akzeptanz der Bevölkerung gesammelt werden. Die Projektverantwortlichen prüfen Alternativen, um die Linie 12 schnellstmöglich wieder aufzunehmen.

1 Einführung

1.1 Zweck

Am 2. Februar 2018 wurde vom Generalsekretär des UVEK die Verfügung für einen zweijährigen Pilotversuch mit einem selbstfahrenden Fahrzeug in Neuhausen am Rheinfall (Kanton Schaffhausen) erteilt. Gemäss Verfügung soll ein Begleitbericht verfasst und halbjährlich ein Zwischenbericht abgegeben werden. In diesem Bericht sollen unterschiedlichste Aspekte zum Pilotbetrieb abgedeckt und erläutert werden.

Dies ist der Abschlussbericht zum Pilotprojekt VBSH – Automatisierter Shuttle-Bus Neuhausen am Rheinfall. Alle halbjährlichen Zwischenberichte wurden bereits eingereicht:

- Erster Zwischenbericht vom 02. Februar 2018 bis 31. Juli 2018 eingereicht am 07. September 2018
- Zweiter Zwischenbericht vom 01. August 2018 bis 31. Januar 2019 eingereicht am 01. März 2019
- Dritter Zwischenbericht vom 01. Februar 2019 bis 31. Juli 2019 eingereicht am 30. September 2019

1.2 Streckenführung

Die Linie 12 verbindet das Zentrum von Neuhausen mit dem Schössli Wörth am Rheinfallbecken (siehe Abbildung 1). Auf dem oberen Streckenabschnitt („Einrichtungsverkehr“) verkehrt das Fahrzeug auf einer öffentlichen Strasse in einer „Tempo 30“-Zone. Das selbstfahrende Fahrzeug teilt dort die Strasse mit anderen Verkehrsmitteln (Auto, LKW, Bus, Fahrrad, Fussgänger). Im unteren Abschnitt trifft das Fahrzeug grösstenteils auf Fussgänger, Fahrradfahrer, Anwohner, Gemeindeangestellte und den Touristenzug „Rhyfall Express“. Diese haben jeweils eine Spezialbewilligung auf diesem Abschnitt, wo Fahrverbot herrscht, zu fahren.

Ein Umlauf der gesamten Strecke Linie 12 ist ca. 2 Kilometer lang und umfasst neun Fussgängerstreifen, drei Rechtsvortritte, zwei Haltestellenausfahrten und ein Einbiegen auf die Hauptstrasse. An der Endhaltestelle Schössli Wörth oder bei grossem Touristenaufkommen am Rheinfallbecken macht das Shuttle einen Kopfwechsel. Das Shuttle kann so ohne Wendeschleife zurück in Richtung Zentrum Neuhausen fahren.

Die Zufahrt zur Pilotstrecke folgt über eine 300 Meter lange Strecke (siehe Abbildung 1, violett).

Weitere Informationen zur Strecke:

- auf dem Abschnitt zwischen Industriestrasse und Zentrum ist durchgängig „Tempo 30“
- die Laufengasse (zwischen Industrieplatz und Mühleradhaus) ist relativ steil (bis 15%), ab hier gilt Fahrverbot für Motorfahrzeuge
- am Rheinfallbecken herrscht allgemeines Fahrverbot
- der Touristenstrom verläuft hauptsächlich dem Wasser entlang (Schössli Wörth – Rheinfallbecken – Mühleradhaus)



Abbildung 1: Streckenführung der Linie 12

1.3 Befahrene Streckenabschnitte

Im Laufe des Projekts «Linie 12 in Neuhausen am Rheinfall» konnte das selbstfahrende Fahrzeug nicht zu jedem Zeitpunkt alle Abschnitte befahren. Nachfolgend wird eine Übersicht der befahrenen Streckenabschnitte im jeweiligen Zeitraum dargestellt:

Tabelle 1: Befahrene Streckenabschnitte im jeweiligen Zeitraum

| Zeitraum | Sektoren | Takt | Hintergrund |
|-------------------------|----------|--------|--|
| 27.03.2018 – 31.05.2018 | A-G | 10 min | Baustelle auf den Sektoren H und I |
| 01.06.2018 – 12.06.2019 | A-J | 10 min | Verfügung für unteren Streckenabschnitt nicht vorhanden |
| 13.06.2019 – 04.07.2019 | A-V | 30 min | Verfügung für gesamte Strecke vorhanden. Eröffnung der Streckenerweiterung am 13.06.2019 durchgeführt |
| 05.07.2019 – 20.08.2019 | J-V | 20 min | Sicherheitsbedingte Massnahme: Aufgrund der Vollbremsung bei Verlust von GNSS (siehe Kapitel 3.2.2.7) und dem Steering-Problem (siehe Kapitel 3.2.2.6) wurde nur der untere Streckenabschnitt befahren |
| 21.08.2019 – 31.12.2019 | - | - | Kein Betrieb aufgrund technischer Probleme |

Im Zeitraum zwischen März 18 und Mai 18 fuhr das selbstfahrende Fahrzeug auf den Sektoren A bis G. Auf den Sektoren I und J wurde eine Fernwärmeleitung installiert, was ein Befahren dieser Abschnitte verunmöglichte.

Ende Mai 2018 wurden die Bauarbeiten auf der Strasse beendet und das selbstfahrende Fahrzeug konnte alle Sektoren auf dem oberen Abschnitt befahren. Auf dem oberen Streckenabschnitt bediente es im 10-Min-Takt die Haltestellen Zentrum Nord, Industrieplatz und Zentrum Süd. Durch die Streckenerweiterung im Juni 2019 musste der Takt auf 30 Minuten erhöht werden.

Aufgrund der Problematik «Probleme mit der Lenkung» und «Vollbremsung bei Verlust von GNSS» hatte das Projektteam entschieden, dass, solange die Probleme nicht behoben sind, der obere Streckenabschnitt nicht mehr befahren werden soll. Deswegen bediente das selbstfahrende Shuttle ab dem 1. Juli 2019 nur noch die Haltestellen Industriepplatz bis Rheinfalbecken im 20-Min-Takt.

Aufgrund technischer Defekte an Hard- und Software musste der Betrieb ab dem 20. August 2019 eingestellt werden. Die Verantwortlichen im Projekt prüfen zurzeit Alternativen, wie der Betrieb der Linie 12 schnellstmöglich wieder aufgenommen werden kann.



Abbildung 2: Streckenführung Linie 12 in Sektoren

1.4 Baustellen auf dem oberen Streckenabschnitt

Im ersten Projektjahr wurden in Neuhausen am Rheinfall viele bauliche Veränderungen umgesetzt. Beispielsweise wurde auf der Hauptstrasse eine Fernwärmezuleitung verlegt, das SIG-Areal umgebaut oder ein Haus im Sektor A renoviert. Diese Bauarbeiten erstreckten sich über das gesamte

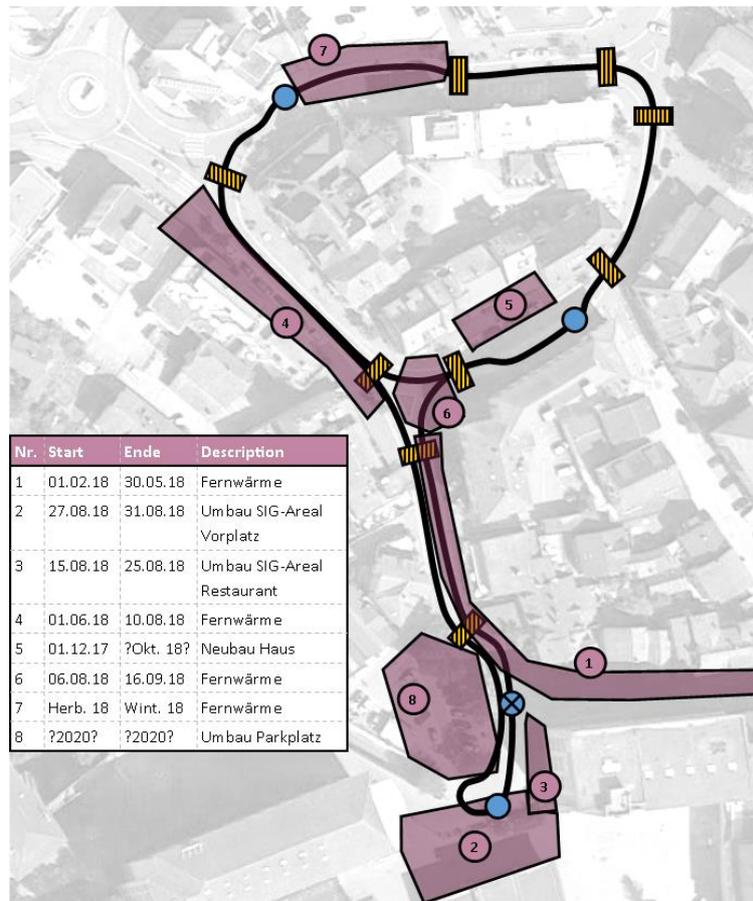


Abbildung 3: Baustellen in Neuhausen am Rheinflall

Jahr 2018. In der Abbildung 3 werden alle umgesetzten und noch geplanten Bauarbeiten mit Einfluss auf den Betrieb der Linie 12 aufgeführt.

1.5 Austausch Trapizio mit Trapizia

Das selbstfahrende Fahrzeug «Trapizio» (siehe Abbildung 4) wurde durch die Weiterentwicklung von «Trapizia» (siehe Abbildung 5) ausgetauscht. Trapizio war nicht in der Lage eine Steigung bzw. Gefälle von 15 % im Dauerbetrieb zu bewältigen. Nachdem die Fahrzeuge ausgetauscht wurden, konnte die Linie 12 um den unteren Streckenabschnitt, welcher die Haltestellen Industrieplatz bis Schlössli Wörth beinhaltet, erweitert werden.

Trapizia ist eine neuere Generation des Fahrzeugs „Navya Arma DL4“ und weist einige Verbesserungen gegenüber Trapizio auf. Beispielsweise befinden sich die Kameras oberhalb und nicht mehr unterhalb der Windschutzscheiben, zusätzliche Blinker wurden auf den Seiten angebracht und die Befestigung der Scheibenwischer wurde nach unten versetzt. Doch die wesentliche Änderung ist, dass Trapizia neu mit zwei Motoren ausgerüstet ist und somit alle vier Räder angetrieben werden.

Dank der bestandenen Inspektion vom 24. April 2019, durchgeführt durch das ASTRA und das BAV, konnte die Verfügung «Pilotprojekt VBSH Automatisierter Shuttle-Bus Neuhausen am Rheinflall» am 17. Mai 2019 auf die gesamte Strecke der Linie 12 erweitert werden. In den darauffolgenden Wochen wurde die gesamte Strecke neu eingelesen und einprogrammiert.



Abbildung 4: Trapizio



Abbildung 5: Trapizia

1.6 Funktionsweise der Ortung

Das selbstfahrende Shuttle des französischen Hersteller Navya ortete sich in Neuhausen am Rheinfall zu Beginn des Projekts nur über die LIDAR-Sensoren (bei Trapizio). Grundsätzlich würde aber dem Fahrzeug für die Ortung auch GNSS (global navigation satellite system) zur Verfügung stehen, diese konnte aber erst bei Trapizia teilweise verwendet werden.

Laut Wikipedia wird GNSS wie folgt beschrieben: «Ein globales Navigationssatellitensystem oder GNSS ist ein System zur Positionsbestimmung und Navigation auf der Erde und in der Luft durch den Empfang der Signale von Navigationssatelliten und Pseudoliten.» Für die Positionsbestimmung muss der Empfänger vom Fahrzeug die Signale von mindestens vier Satelliten gleichzeitig empfangen. Sind die Satelliten zu «nahe» beieinander und der Empfänger empfängt die Signale aus ähnlicher Richtung können Messungenauigkeiten entstehen.

Aufgrund der Tatsache, dass sich ein Teil der Linie 12 in einem kleinen Tal (Empfang zu den Satelliten aus derselben Richtung) und neben Wasser (Reflektionen der Signale) befindet und im anderen Teil die höheren Gebäude die GNSS-Ortung stören, entstanden bei der GNSS-Ortung grössere Messungenauigkeiten. Beim ersten Fahrzeug «Trapizio» musste deswegen die GNSS-Ortung komplett deaktiviert werden.

Grundsätzlich war es möglich, nur mit der LIDAR-Ortung die Strecke zu befahren. Die Ortung mit den LIDAR-Sensoren funktionierte wie folgt: Als die Strecke eingerichtet wurde, wurde eine Momentaufnahme der Umgebung aufgezeichnet. Die Ingenieure des Fahrzeugherstellers fuhren mit dem Fahrzeug die komplette Strecke ab und erstellten anschliessend eine 2-D-Karte. Diese 2-D-Karte wurde auf das Fahrzeug gespeichert und galt als Referenz-Karte. Bei jeder Fahrt verglich das Fahrzeug nun die Ist-Umgebung mit dieser Referenz-Karte bzw. Referenz-Umgebung.

Der Wechsel auf die Fahrzeugweiterentwicklung «Trapizia» führte zu Verbesserungen der Qualität der Ortung. Dank der neueren Software-Updates konnte Navya die LIDAR-Ortung verbessern. Die Referenz-Karte, welche auf dem Fahrzeug gespeichert wurde, wird in der neuen Software in 3D und nicht mehr in 2D abgespeichert. So werden zum Beispiel Bäume samt Blätter und Stamm abgespeichert, und nicht mehr wie bei der 2D-Karte die Blätter auf den Boden projiziert. Dadurch konnte die LIDAR-Ortung signifikant verbessert werden.

Grundsätzlich sollte bei Trapizia nebst den LIDAR-Sensoren zusätzlich auch GNSS für die Ortung verwendet werden. Nach ersten Versuchen mit Trapizia im oberen Streckenabschnitt haben die Projektbeteiligten aber entschieden, die GNSS-Ortung wieder zu deaktivieren, denn das Fahrzeug verlor oft die Verbindung zu den GNSS-Satelliten. Dies führte dazu, dass das Fahrzeug notfallmässig bremste und stehen blieb. Im Kapitel 3.2.2.7 wird die Ursache genauer aufgeführt.

Schlussendlich fuhr das Fahrzeug beim Rheinfallquai zwischen der Haltestelle «Rheinfallbecken» und «Schlössli Wörth» mit zusätzlicher GNSS-Ortung. Auf der restlichen Strecke wurde GNSS wieder deaktiviert.

1.7 Überarbeitung von Karten- oder Streckenkonfiguration

Wie oben beschrieben, wird bei der Kartenkonfiguration eine Momentaufnahme der Umgebung festgehalten. Gebäude, Bäume oder Strassenschilder werden eingescannt und auf der Karte vermerkt. Aufgrund der vielen Bauarbeiten in Neuhausen im Jahr 2018 musste vor allem bei Trapizio die Karte bzw. Strecke angepasst werden.

Natürlich musste auch die Karte bzw. Streckenkonfiguration bei der Streckenerweiterung angepasst werden. Nachfolgend wird in Tabelle 2 eine Liste einzelnen Karten- oder Streckenkonfigurationen aufgeführt:

Tabelle 2: Karten- und Streckenkonfiguration

| <i>Datum</i> | <i>Sektoren</i> | <i>Fahrzeug</i> | <i>Hintergrund</i> |
|------------------|-----------------|-----------------|---|
| <i>Dez. 2017</i> | A-G | Trapizio | Karten- und Streckenvorbereitung auf dem oberen Streckenabschnitt |
| <i>Aug. 2018</i> | A-G | Trapizio | Überarbeitung der Streckenkonfiguration |
| <i>Nov. 2018</i> | A-G | Trapizio | Überarbeitung der Karten- und Streckenkonfiguration aufgrund der Veränderung der Umgebung (Bauarbeiten) |
| <i>Jun. 2019</i> | A-V | Trapizia | Karten- und Streckenvorbereitung auf dem unteren Streckenabschnitt |

2 Betrieb Linie 12

Wie bereits im Kapitel 1.3 erwähnt, wurde die Linie 12 im Juni 2019 um den unteren Streckenabschnitt erweitert. Bis dahin fuhr das selbstfahrende Fahrzeug nur auf dem oberen Streckenabschnitt.

Zwischen dem 13. Juni und dem 4. Juli konnte die gesamte Strecke befahren werden. Am 5. Juli wurde durch die Projektmitglieder entschieden, dass der Betrieb aufgrund des unkontrollierten Verlustes der GNSS-Ortung, was unmittelbar eine Vollbremsung auslöste, und dem Lenkungsproblem, was zeitweise eine Down-Zeit von bis zu einer halben Stunde verursachte, auf dem unteren Streckenabschnitt reduziert wird.

Solche Situationen, in welchen das Shuttle nicht mehr fahrfähig war und nur noch mit Hilfe des Fahrzeugherstellers fahrtüchtig gemacht werden konnte, waren sehr belastend für die Begleitpersonen. Dies wurde verstärkt, wenn sich aufgrund des stillstehenden Shuttles Rückstau auf der Strasse bildete und die Autofahrer emotionsgeladen das Shuttle überholten.

Am 20. August 2019 musste der Betrieb der Linie 12 aufgrund technischer Probleme eingestellt werden. Zurzeit werden Alternativen geprüft, um möglichst bald den Betrieb im Kanton Schaffhausen wieder aufzunehmen.

Nachfolgend werden Erfahrungen und Zahlen über den Betrieb der Linie 12 in Neuhausen am Rheinfall aufgeführt.

2.1 Betriebszeiten

Die Projektbeteiligten hatten am Anfang des Projekts einen periodischen Betrieb nur während der Sommermonate vorgesehen. In den Wintermonaten sollte nur sporadisch gefahren werden. Im Verlaufe des Projekts kam die Idee auf, dass auch während der Wintermonate periodisch gefahren werden soll, um auch bei schlechteren Strassenverhältnissen Erfahrungen zu sammeln.

Um dies umzusetzen, musste die Verfügung, welche für einen sporadischen Betrieb während der Wintermonate erstellt worden war, angepasst werden. Ab Erhalt der angepassten Verfügung durfte dann zu jeder beliebigen Zeit periodisch gefahren werden.

Zwischen März und Oktober 2018 fuhr das Shuttle an den Werktagen (Montag bis Samstag) von 13:00 bis 17:00 Uhr. An den Sonn- und Feiertagen jeweils von 10:00 bis 18:00 Uhr.

Zwischen November 2018 und Januar 2019 verkehrte das Shuttle an allen Wochentagen von 12:00 bis 16:00 Uhr.

Ab dem 1. April wurde wieder nach Sommerfahrplan gefahren. Zwischen April und Juni 2019 fuhr das Shuttle an den Werktagen (Montag bis Samstag) von 13:00 bis 17:00 Uhr. An den Sonn- und Feiertagen von 10:00 bis 18:00 Uhr (siehe Tabelle 3).

Zwischen Juli 2019 und August 2019 wurde die Betriebszeit an den Sonn- und Feiertagen auf 4 Stunden – eine Schicht – reduziert. Zusätzlich wurde der Start der Schicht um eine Stunde vorgelegt. Im Sommer 2018 musste der Betrieb manchmal frühzeitig eingestellt werden. Die Batterie war für einen achtstündigen Betrieb an heissen Sommertagen zu schwach und so haben die Projektverantwortlichen entschieden, dass das selbstfahrende Fahrzeug analog zur Betriebszeit im Winter fahren soll. Ein zusätzlicher Vorteil war, dass dadurch ein einheitlicher Fahrplan über das gesamte Jahr entstand. (siehe Tabelle 4)

Wegen technischen Problemen mit dem Fahrzeug wurde der Betrieb der Linie 12 am 20. August 2019 eingestellt und bis dato nicht mehr aufgenommen. Zurzeit prüfen die Verantwortlichen Alternativen, um möglichst bald den Betrieb wiederaufzunehmen.

Die Schichtwechsel an Sonn- bzw. an den Feiertagen fand bei einem kurzen Halt auf der Strecke um 14:00 Uhr statt. Pro Tag wurde je eine halbe Stunde Vor- bzw. Nachbereitungszeit eingerechnet.

Tabelle 3: Fahrplan bis Juni 2019

| Fahrplan bis Juni 2019 | Sommer | Winter |
|-------------------------------|---|---|
| <i>Monat</i> | April – Oktober | November – März |
| <i>Betriebszeiten</i> | Montag bis Samstag: 13:00 – 17:00 Uhr Sonntag und Feiertage: 10:00 – 18:00 Uhr | Montag bis Sonntag (inkl. Feiertage): 12:00 – 16:00 Uhr |

Tabelle 4: Fahrplan ab Juli 2019

| Fahrplan ab Juli 2019 | Sommer und Winter |
|------------------------------|---|
| <i>Monat</i> | Januar – Dezember |
| <i>Betriebszeiten</i> | Montag bis Sonntag (inkl. Feiertage): 12:00 – 16:00 Uhr |

2.2 Begleitpersonen

Insgesamt wurden seit Februar 2018 sieben Schulungen durchgeführt und seit Projektstart insgesamt 15 Personen als Operator ausgebildet.

Jede Begleitperson füllte pro Schicht einen Tagesrapport aus. Falls während einer Schicht ein spezielles Ereignis vorkam, füllte die Begleitperson einen Ereignisrapport aus. Wiederkehrende Probleme wurden nach einer gewissen Zeit nicht mehr einzeln erfasst, sondern wurden entweder im Tagesrapport erwähnt oder in den zweiwöchentlichen Sitzungen mit allen Begleitpersonen angesprochen.

2.3 Beförderte Personen

Seit Inbetriebsetzung der Linie 12 am 27. März 2018 wurden rund 34'296 Personen mit dem selbstfahrenden Fahrzeug transportiert. Die Fahrgastzählung wurde mittels Handzähler durchgeführt. Wenn Personen mehrere Fahrten nacheinander mitgefahren sind, wurden sie als einzelne Person gezählt. Das Kriterium war der Ein- bzw. Ausstieg.

Die Abbildung 6 zeigt die Kurve der beförderten Personen über die Zeit (hellblau) und die Anzahl beförderten Personen pro Monat (dunkelblau). Wenig erstaunlich ist, dass während den Sommermonaten, wenn viele Touristen am Rheinflussbecken sind, das Angebot der Linie 12 am meisten genutzt wurde. Der leistungsstärkste Monat war der August 2018 mit rund 3'200 Personen.

Aufgrund von verschiedenen technischen Problemen, welche zu Betriebsausfällen führten, waren die Monate Dezember 2018, Januar und Juni 2019 die leistungsschwächsten. Die einzelnen technischen Probleme werden im Kapitel 3.2.2 näher beschrieben.

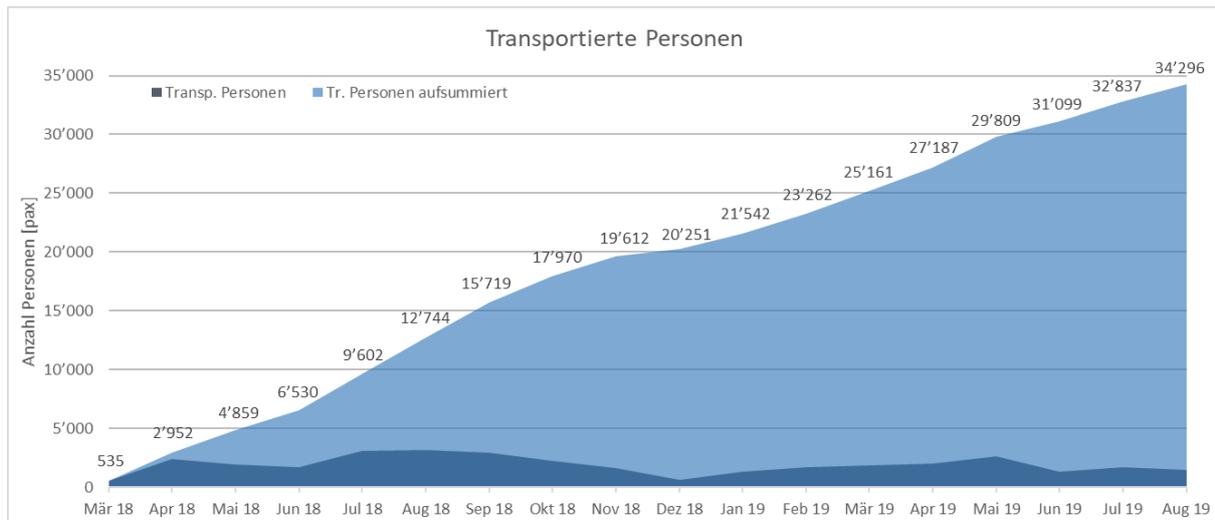


Abbildung 6: Transportierte Personen

In Abbildung 7 wird die durchschnittliche Anzahl der beförderten Personen an den einzelnen Wochentaggruppen (Mo-Fr, Sa, So) dem jeweiligen Monat gegenübergestellt. Wie oben beschrieben, wurden bis Juni 2019 in den Sommermonaten an den Sonn- und Feiertagen jeweils zwei Schichten gefahren. Deswegen ist die Kurve vom Sonntag erheblich höher als die Kurve der Werk- bzw. Samstagen.

An den Werk- und Samstagen war das Shuttle jeweils vier Stunden unterwegs (Ausnahme: Feiertage). Im Juli 2019 ist zu erkennen, dass am Wochenende (Sa und So) im Durchschnitt gleich viele Personen über die vier Stunden transportiert wurden.

Das Angebot der Linie 12 wird somit am Wochenende mehr genutzt als unter der Woche. An den Sonntagen sind es bis zu 200 Personen und während den Wochentagen nur zwischen 30 und 80 Personen. An den Samstagen werden zwischen 60 und 130 Personen befördert.

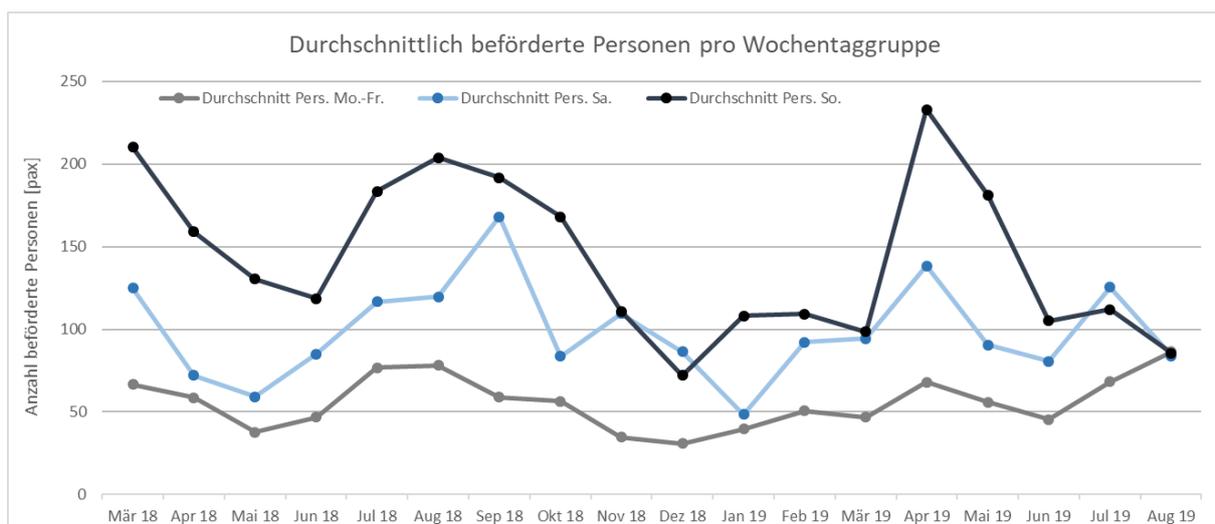


Abbildung 7: Zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen Anzahl beförderter Personen pro Wochentaggruppe

Die Abbildung 8 zeigt die Gegenüberstellung der monatlichen Durchschnittswerte von beförderten Personen pro Stunde. Im April 2019 wurden am meisten Personen pro Stunde transportiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass über das Osterwochenende sehr viele Touristen den Rheinfluss besuchten und mit der Linie 12 mitfahren.

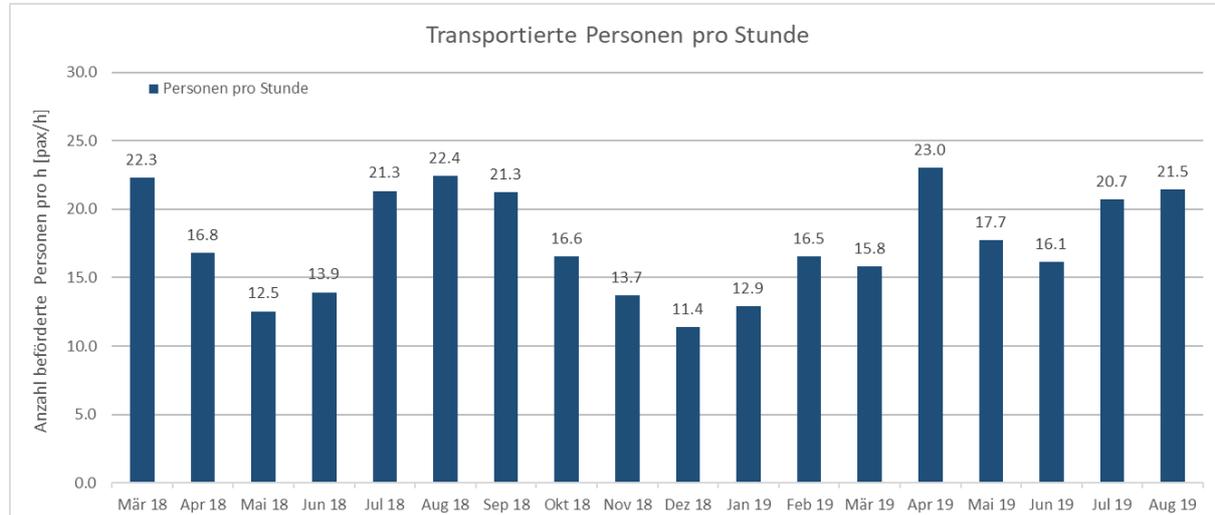


Abbildung 8: Durchschnittliche Anzahl der beförderten Personen pro Stunde

Bei einer Kapazität von insgesamt 11 Sitzplätzen und einem Takt von 10 Minuten können maximal 66 Personen pro Stunde (maximale Beförderungsleistung) transportiert werden (Annahme: keine Ein- und Ausstiege auf der Strecke). Bei einer durchschnittlichen Anzahl von 23 Fahrgäste pro Stunde (Monat April 2019) liegt die Auslastung bei 34.8 %. Im leistungsschwächsten Monat Dezember 2018 mit 11.4 Passagieren pro Stunde liegt die Auslastung aber immer noch bei 17.3 %.

Bei einem 20-Minuten-Takt, welcher seit dem 1. Juli 2019 gefahren wird, werden insgesamt sechs Fahrten (von A nach B und zurück) pro Stunde gemacht. Theoretisch können wieder maximal 66 Personen pro Stunde mitfahren (Annahme: keine Ein- und Ausstiege auf der Strecke). Somit liegt die Auslastung im Juli 2019 bei ca. 31.3 %.

2.4 Gefahrene Kilometer

Die gefahrenen Kilometer, welche Trapizio auf dem oberen Streckenabschnitt zurücklegte, betragen bei einer Vierstundenschicht ca. 12 Kilometer. Die Streckenlänge zwischen den Haltestellen Zentrum Süd, Zentrum Nord, Industrieplatz und zurück zum Zentrum Süd betrug einen halben Kilometer. Pro Stunde wird dieser Rundkurs sechs Mal befahren, was einem 10 Min-Takt entspricht. Am Sonntag, bei einem Betrieb von acht Stunden, fuhr das selbstfahrende Fahrzeug knapp 25 Kilometer. Deswegen sind die gefahrenen Kilometer pro Tag in den Sommermonaten höher als in den Wintermonaten.

Die Distanz zwischen den Haltestellen Rheinflussbecken und Industrieplatz beträgt ebenfalls ca. 0.5 km. Bei einem 20-Minuten-Takt, welcher ab Juli 2019 gefahren wurde, wurde die Strecke pro Stunde insgesamt sechsmal befahren, was rund 3 Kilometer pro Stunde entspricht. Über eine Schicht von 4 Stunden betrug die zu fahrende, theoretische Distanz 12 km. Pro Schicht kam noch ein Kilometer für die Zu- und Rückfahrt dazu.

Aufgrund der technischen Störungen (siehe Kapitel 3.2.2.6 und 3.2.2.7) und der vielen Touristen, welche die Fahrspur des Shuttles behinderten, konnte im Juni und Juli der 20-Minuten-Takt nicht eingehalten werden. Zusätzlich kam dazu, dass die Haltestelle Schössli Wörth, welche rund 260 Meter von der Haltestelle Rheinflussbecken entfernt ist, wegen des hohen Touristenaufkommens nur sporadisch angefahren werden konnte. So wurden im Juni und Juli 2019 pro Tag nur knapp 8 Kilometer gefahren (siehe Abbildung 9).

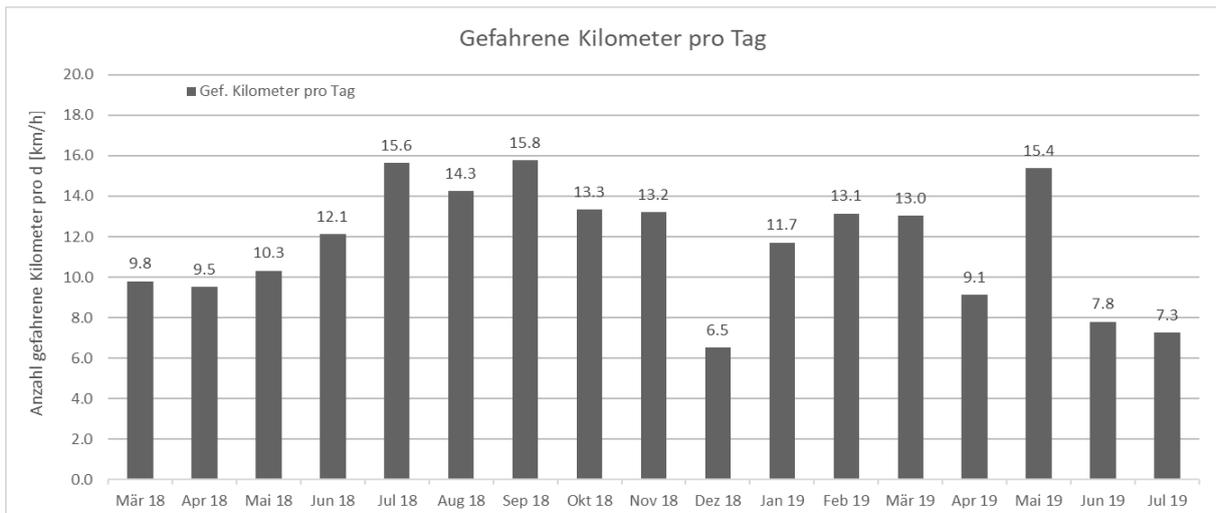


Abbildung 9: Monatsdurchschnitt der gefahrenen Kilometer pro Tag

Insgesamt wurden mit beiden Fahrzeugen, Trapizio und Trapizia, über die gesamte Projektdauer, also vom 27. März 2018 bis 20. August 2019, fast 6'000 Kilometer gefahren (siehe Abbildung 10, hellgrün). Die dunkelgrüne Fläche zeigt die monatliche Leistung an gefahrenen Kilometer.

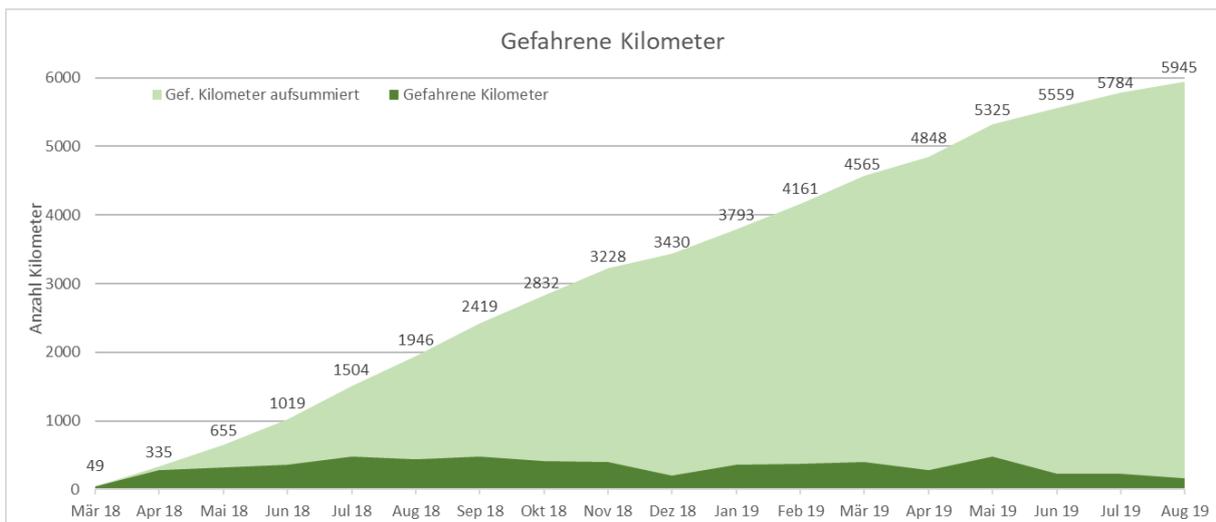


Abbildung 10: Gefahrene Kilometer

2.5 Verfügbarkeit

Das Shuttle war über die gesamte Projektdauer – vom 28. März bis 20. August 2019 – rund 1'968 Stunden im Betrieb. Total wurden an 446 Tagen Fahrgäste befördert.

An 77 Tagen (bis 31. August 2019) konnte der Betrieb nicht durchgeführt werden, da das Fahrzeug wegen technischen, organisatorischen oder wetterbedingten Ursachen nicht zur Verfügung stand. Deshalb wurde ab dem 1. September 2019 keine Statistik mehr aufgeführt.

Wie in der Abbildung 11 ersichtlich, gab es vier einschneidende Ereignisse, welche einen grossen Einfluss auf die Nichtbetriebstage und somit auf die Verfügbarkeit hatten. Es gab aber auch kleinere Unterbrüche, wobei einige geplant und andere ungeplant waren. In Tabelle 5 werden die Nicht-Betriebstage aufgeführt.

Tabelle 5: Nicht-Betriebstage

| Datum | Grund |
|----------------------------------|--|
| 10. Jun. 2018 | Korrekturer Batteriestand wird nicht ans Fahrzeug übermittelt. 12-Volt-Batterie wies eine zu geringe Spannung auf und musste geladen werden. |
| 18. – 19. Jun. 2018 | Defekter LIDAR-Sensor musste ausgetauscht und neu kalibriert werden. |
| 16. Aug. 2018 | Ausser Betrieb aufgrund Tortour 2018 (Sportveranstaltung) |
| 24. Okt. 2018 | Ausser Betrieb aufgrund Schulung von neuen Begleitpersonen. |
| 16. Dez. 2018 | Ausser Betrieb aufgrund der schlechten Wetterverhältnissen (Schnee) |
| 18. Dez. 2018 – 04. Jan. 2019 | Defekte Batterie (Siehe Kapitel 4.2.1) |
| 09. – 10. Jan. 2019 | Ausser Betrieb aufgrund Streckenanpassung |
| 26. – 27. Feb. 2019 | Ausser Betrieb aufgrund Retrofit und Software-Update |
| 06. -17. Apr. 2019 | Defekte Aufhängung bei Trapizio (siehe Kapitel 4.2.2) |
| 06. – 12. Jun. 2019 | Zwischenfall mit E-Bike-Fahrerin (siehe Kapitel 3.2.2.10) |
| 15. – 22. Jul. 2019 | Shuttle kommt gefährlich nahe an ein Eisentor (siehe Kapitel 3.2.2.9) |
| 31. Jul. 2019 | Ausser Betrieb aufgrund Rheinfl-Feuerwerk |
| 04. Aug. 2019 | Ausser Betrieb aufgrund von technischen Problemen mit Lüfter |
| 15. Aug. 2019 | Ausser Betrieb aufgrund Tortour 2019 (Sportveranstaltung) |
| Ab 20. Aug. 2019 | Technischer Defekt an Hard- und Software (siehe Kapitel 4.2.3) |

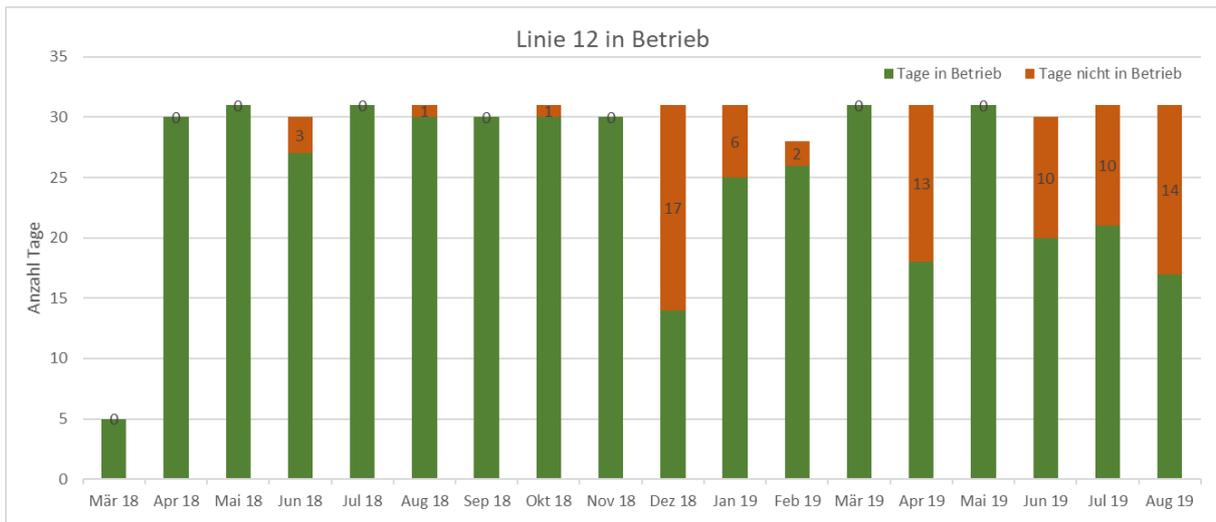


Abbildung 11: Linie 12 in bzw. nicht in Betrieb

Über die gesamte Projektdauer gesehen, weist das Fahrzeug eine Verfügbarkeit von 85.3 % auf. In der Abbildung 12 ist die Verfügbarkeit pro Monat dargestellt.

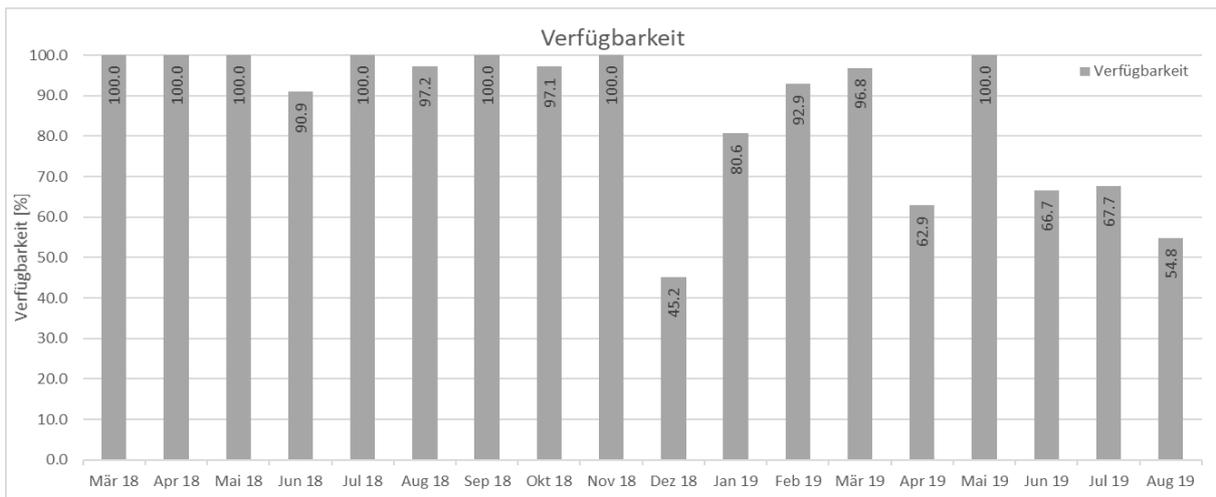


Abbildung 12: Verfügbarkeit

3 Erfahrungen im automatisierten Fahren

In diesem Kapitel werden die Erfahrungen betreffend Verhalten des automatisierten Shuttles im Strassenverkehr genauer erläutert sowie die Eingriffe der Begleitpersonen in die automatisierte Fahrt beschrieben. Vollständigkeitshalber werden zusätzlich noch Situationen erwähnt, bei denen die Begleitpersonen nicht eingreifen mussten, die aber für diesen Bericht eine gewisse Wichtigkeit aufweisen.

3.1 Verhalten im Verkehr

Das Verhalten im Verkehr des selbstfahrenden Fahrzeuges wird von den Projektverantwortlichen über die gesamte Projektdauer hinweg betrachtet als «ausreichend» eingestuft. Die «wesentlichen» Strassenverkehrsregeln werden auf einer «virtuellen Schiene» auf dem Fahrzeug abgespeichert. So berücksichtigte das selbstfahrende Fahrzeug von alleine die richtige Fahrspur, Haltepositionen, Geschwindigkeiten und das Bedienen der Richtungsanzeiger.

Mit ein wenig Unterstützung durch die Begleitperson im Fahrzeug werden die Verkehrsregeln bei den Rechtsvortritten oder Fussgängerstreifen eingehalten. Denn die Begleitperson im Fahrzeug überwacht das System jederzeit und greift notfalls ein. So kam es gelegentlich vor, dass die Begleitperson den korrekt wartenden Fussgängern am Fussgängerstreifen oder bei einer Kreuzung den von rechts kommenden Fahrzeugen den Vortritt gewährte.

Tatsache ist, dass die Konfiguration der Strassenverkehrsregeln auf dem Fahrzeug millimetergenau auf der virtuellen Karte abgespeichert wurde. Das bedeutet, es gibt eine klare Linie zwischen «berücksichtigen» und «nicht berücksichtigen». Befindet sich ein Objekt im vorkonfigurierten Bereich (Fussgänger oder Rechtsvortritt) wird es von der Software des Fahrzeuges als ein vortrittsberechtigtes Objekt berücksichtigt und den Vortritt gewährt. Erkennt die Software des Fahrzeugs, dass sich das Objekt leicht ausserhalb dieses vorkonfigurierten Bereichs befindet, wird es als «nicht vortrittsberechtigtes» eingestuft. Als Folge fährt das selbstfahrende Fahrzeug los.

Dieser Berücksichtigungsprozess findet bis zu einem weiteren definierten Punkt («Point of no return») auf der virtuellen Karte statt. Meistens befindet sich dieser Punkt kurz vor dem Fussgängerstreifen oder der Kreuzung. Bis zu diesem Punkt analysiert die Software des Fahrzeugs, ob der konfigurierte Bereich (Rechtsvortritt oder Fussgängerstreifen) frei ist und das selbstfahrende Fahrzeug weiterfahren kann oder ob sich dort ein Objekt befindet und es aufgrund dessen anhalten muss. Fussgänger oder Fahrzeug, die zu spät in diesen Bereich kommen und das selbstfahrende Fahrzeug bereits über diesen «Point of no return» gefahren ist, erhalten keinen Vortritt und die Begleitperson muss eingreifen. Die einzelnen Fälle, welche bei einem Rechtsvortritt auftreten konnten, werden im Kapitel 3.2.1.3 näher beschrieben.

Grundsätzlich wird von einem selbstfahrenden Fahrzeug erwartet, dass es Hindernisse selbstständig umfahren kann. In der Projektphase existierte kein vom Fahrzeughersteller entwickeltes Softwarestück, welches ein Umfahren von Hindernissen ermöglichte. Hindernisse auf der Fahrspur waren im Projekt für das selbstfahrende Fahrzeug problematisch, denn ein Eingreifen der Begleitperson war zwingend notwendig.

So musste die Begleitperson beispielsweise bei folgenden Hindernissen eingreifen, die Kontrolle über die Fahrfunktion übernehmen und das Fahrzeug manuell gesteuert wieder auf seine Fahrspur bringen:

- Baustellen auf der Strasse
- Falschparker auf dem Trottoir
- Abgestellte Fahrzeuge auf der Bushaltestelle
- Abgestellte Fahrräder am Strassenrand
- Fahrzeuge, welche teilweise in die Fahrspur ragen
- Kreuzen mit dem Rhyfall-Express oder anderen Fahrzeugen im unteren Streckenabschnitt

Nebst den Verkehrsregeln, welche dem Fahrzeug «beigebracht» wurden, gab es auch definierte Punkte auf der Strasse, wo die Begleitperson gezielt aufgefordert wurde, die Umgebungssituation abzuschätzen und entsprechend zu handeln. Beispielsweise musste die Begleitperson bei der Ausfahrt vom Industriepplatz auf die Industriestrasse die Weiterfahrt mittels «GO-Befehl» bestätigen. Das Fahrzeug wartete solange bis eine Einschätzung und dessen Validierung gemacht wurde. Grund dafür war, dass die Umgebungssituation für die Fahrzeugsoftware zu komplex war und nicht von allein eingeschätzt werden konnte. Der Hersteller ging so auf die sichere Seite und verlangte die Bestätigung der Begleitperson. Sobald die Bestätigung erfolgte, fuhr das Shuttle ohne weiteres Zutun der Begleitperson weiter.

3.2 Eingriffe der Begleitpersonen

In der ASTRA-Verfügung wurde verlangt, dass sich jederzeit eine geschulte Begleitperson im Fahrzeug befinden musste, welche das automatisierte Fahrzeug überwachen und ggf. eingreifen musste. Die Eingriffe der Begleitperson in die Fahrt werden in präventive und korrektive Eingriffe eingeteilt.

Aussergewöhnliche und neue Situationen wurden im Ereignisrapport festgehalten. Wiederkehrende Eingriffe mit demselben Eingriffsgrund wurden nicht nochmals in einem Ereignisrapport aufgeführt.

3.2.1 Präventive Eingriffe

Bei einem präventiven Eingriff griff die Begleitperson vorzeitig in die automatisierte Fahrt ein, um die Fahrgäste im Shuttle oder die Passanten auf der Strasse nicht unnötig zu stören, um sich nicht in bekannte kritische Situationen zu bewegen oder um die Verkehrsregeln einzuhalten. Nachfolgend sind die häufigsten Situationen beschrieben, in denen die Begleitperson vorausschauend in die automatisierte Fahrt eingegriffen hatte.

3.2.1.1 Baustellen

Wie bereits oben erwähnt, wurde in Neuhausen, vor allem im Jahr 2018, viele baulichen Massnahmen umgesetzt. Die Baustellen ragten teilweise in den Bereich der «virtuellen Schiene» bzw. in die Fahrspur des Shuttles und verunmöglichte die automatisierte Fahrt. Deswegen griff die Begleitperson ein und umfuhr die Baustelle im manuellen Modus. Am Ende der Baustelle lenkte sie das Fahrzeug zurück auf die virtuelle Schiene und wechselte zurück auf den automatisierten Modus. Dieser Wechsel zwischen automatisiertem und manuellem Modus funktionierte problemlos und hatte nur geringfügige Auswirkungen auf den Fahrbetrieb.

Zwei spezielle Situationen, welche sich im zweiten Halbjahr ereigneten, sollten hier hervorgehoben werden. Die Ausgangslage sah wie folgt aus:

Die Strasse zwischen der Haltestelle «Zentrum Nord» und «Industriepplatz» wurde aufgerissen. Die Baustelle befand sich auf der rechten Seite in Fahrtrichtung Industriepplatz und erstreckte sich über eine Länge von rund 20 Metern. Die Absperrung der Baustelle ragte über die Mittellinie auf die andere Strassenseite, so dass die Fahrzeuge aus beiden Richtungen auf das Trottoir ausweichen mussten. Der Verkehr wurde über eine Lichtsignalanlage gesteuert.

Die Begleitpersonen mussten mit dem Shuttle jeweils in beiden Richtungen an einer Ampel warten bis das Signal zur Weiterfahrt erteilt wurde. Kurz vor der Ampel griff die Begleitperson in die automatisierte Fahrt ein und wechselte in den manuellen Modus. Sobald die Ampel auf Grün schaltete fuhr die Begleitperson im manuellen Modus los und befuhr so die Baustelle.

1. Wechsel vom manuellen zum automatisierten Modus

Wie bereits oben erwähnt, fuhr das Shuttle auf einer exakt vorgegebenen Fahrspur (virtuellen Schiene). Musste die Begleitperson das Shuttle manuell um ein Hindernis lenken, so verliess sie zwangsläufig die einprogrammierte Fahrspur. Nachdem sie das Hindernis

passierte hatte, musste die Begleitperson diese Fahrspur wiederfinden und sich in diese einfädeln. Falls sich das Shuttle nahe genug, aber nicht exakt auf der vorgegebenen Fahrspur befand und die Begleitperson dort zum automatisierten Modus wechselte, konnte es vorkommen, dass das Shuttle einen Schlenker nach links oder rechts machte und danach stoppte. War das Shuttle von der vorgegebenen Fahrspur zu weit entfernt, machte es keinen Schlenker, sondern hielt an.

Als die Begleitperson einmal im Oktober nach dem manuellen Durchfahren der Baustelle zum automatisierten Modus wechseln wollte, machte das Shuttle einen Schlenker nach links und stoppte unverzüglich. Das Shuttle befand sich zu diesem Zeitpunkt nicht exakt, sondern eben nur nahe genug auf der programmierten Fahrspur.

Zum gleichen Zeitpunkt befand sich ein wartendes Fahrzeug bei der roten Ampel auf der gegenüberliegenden Strassenseite. Die linke Seite des Fahrzeuges war nahe an der Mittellinie.

Der linksgerichtete Schlenker des selbstfahrenden Fahrzeugs führte dazu, dass sich das Shuttle und das wartende Fahrzeug gefährlich nahekamen. Glücklicherweise kam es zu keinem Zusammenstoss, wie auch wurde niemand verletzt.

Die Begleitpersonen wurden in der Folge nochmals angewiesen, erst in den automatisierten Modus zu wechseln, wenn sie sich komplett sicher bezüglich der Fahrzeugposition und virtuellen Schiene sind und das Fahrverhalten des Shuttles korrekt abschätzen können.

2. Fussgängerin machte keinen Kontrollblick

Einmal wartete das Shuttle an der roten Ampel bei der Baustelle in Richtung Zentrum Süd. Bei Grün fuhr die Begleitperson im manuellen Modus los. Auf dem Trottoir bewegten sich einige Fussgänger. Am Ende der Baustelle wollte eine Fussgängerin die Strasse überqueren, ohne sich umzusehen. Zu diesem Zeitpunkt befand sich das Shuttle auf gleicher Höhe wie die Fussgängerin. Die Begleitperson bremste das Fahrzeug sofort. Die Fussgängerin erschreckte sich und ging auf dem Trottoir auf derselben Seite weiter ohne die Strasse zu überqueren.

Glücklicherweise haben die Begleitperson wie auch die Fussgängerin sofort reagiert. Schon zu Beginn im Projekt haben die Projektverantwortlichen beim Fahrzeughersteller den Wunsch geäussert, dass die Sensoren für die Hinderniserkennung auch im manuellen Modus aktiv bleiben sollten. Leider wurde diese Software-Verbesserung bis dato noch nicht umgesetzt und die Begleitpersonen mussten vor allem im manuellen Modus noch mehr darauf achten, nirgends hineinzufahren.

3.2.1.2 Stau / parkierte Fahrzeuge

Wie oben erwähnt, griff die Begleitperson manchmal ein, um die Fahrgäste im Shuttle wie auch die Verkehrsteilnehmer oder Passanten nicht zu verärgern. Beispielsweise schaltete sie in den manuellen Modus, wenn sich im Stau stehende Fahrzeuge vor dem Shuttle befanden oder wenn sich VBSH-Busse vor dem Shuttle in der Haltebucht beim Zentrum aufhielten.

Das Shuttle unterschied nicht zwischen statischen und dynamischen Objekten. Falls sich das Shuttle beispielweise im Stau befand, erkannte es das vordere im Stau stehende Fahrzeug als Hindernis. Mit der alten Software beim Fahrzeug Trapizio verhielt es sich so, dass sobald die virtuelle Schiene blockiert war, das Shuttle dreimal buzzerte und anschliessend hupte.

Mit der neuen Software beim Fahrzeug Trapizia wurde das automatische Hupen deaktiviert. Falls sich nun ein Auto oder Fussgänger vor dem Shuttle befand, hupte das Shuttle lediglich. Das Buzzern war weit weniger aggressiv und nicht so störend wie das Hupen.

Trotzdem kam es vor, dass die Begleitperson in solchen Situationen eingreifen musste, denn auch ein längeres Buzzern, ohne Aussicht auf Erfolg, war störend. Sobald die Strecke wieder frei war, schaltete die Begleitperson zurück in den automatisierten Modus und das Shuttle fuhr weiter.

3.2.1.3 Erschwerte Eingliederung in den fließenden Verkehr aus der Haltebucht Zentrum Nord

Vor allem zu Beginn des Projekts hatte das selbstfahrende Fahrzeug Mühe, sich in den fließenden Verkehr einzugliedern. An den Haltestellen Zentrum Nord und Zentrum Süd verlief diese Eingliederung nicht immer reibungslos. Das Shuttle verhielt sich oft wie ein übervorsichtiger Lernfahrer und hielt bei jeder potentiellen Gefahr an.

Laut Verkehrsregelverordnung (Art. 17, Abs. 5, VRV) müssen die von hinten herannahenden Verkehrsteilnehmer die Wegfahrt eines Busses im Linienverkehr bei einer gekennzeichneten Haltestelle ermöglichen. Der Busfahrer bzw. hier das Shuttle darf die Richtungsblinker erst betätigen, wenn es zur Wegfahrt bereit ist und muss ggf. warten, wenn von hinten herannahende Fahrzeuge nicht rechtzeitig halten können. Deswegen wurde ein Vortritts-Bereich auf der Strasse links neben der Haltestelle eingerichtet. In diesem Bereich erkannte das Shuttle, ob ein Fahrzeug den stehenden Bus überholen wird und gewährte diesem Vortritt.

Bei hohem Verkehrsaufkommen erkannte das Shuttle ständig neue Fahrzeuge die sich näherten und überliess diesen den Vortritt. Dies machte das Eingliedern fast unmöglich und die Begleitpersonen im Fahrzeug waren auf geduldige Verkehrsteilnehmer angewiesen. Die Wartezeit der anderen Verkehrsteilnehmer war aber wesentlich höher als normal, was dazu führte, dass auch geduldige Verkehrsteilnehmer das Shuttle manchmal links überholten. Gründe für die lange Wartezeit waren einerseits, dass das Shuttle nach einem Halt auf der Strecke sehr langsam beschleunigte und andererseits, dass die Begleitpersonen die Fahrt mittels Go-Button auf dem Display starten mussten.

Stand nun das Shuttle teils auf der Strasse und teils in der Haltebucht, kam es vor, dass der Vortritts-Bereich noch aktiv war und das Shuttle anhielt, wenn sich ein Fahrzeug von Links näherte. Die Begleitperson wollte aber nicht allzu lange in dieser Situation verharren und gab den Go-Befehl sobald ein Verkehrsteilnehmer anhielt. Durch das Betätigen der Go-Taste wurde zu diesem Zeitpunkt der Vortrittsbereich aufgehoben. Aus dem normalen Strassenverkehr kennen wir Handzeichen und wissen, dass die anderen Verkehrsteilnehmer warten werden. Nun konnte es sein, dass die ungeduldigen Verkehrsteilnehmer und das Shuttle gleichzeitig anfangen zu beschleunigen. Die anderen Verkehrsteilnehmer überholten links, halb auf dem Trottoir und halb auf der Strasse, um am Shuttle vorbeizukommen. Da das Shuttle bereits in Bewegung war, griff die Begleitpersonen manchmal ein, um eine verkehrskritische Situation zu vermeiden. Ob es zu einem Unfall gekommen wäre, kann schlecht beantwortet werden, da die Begleitpersonen immer aufmerksam waren.

Zu einem späteren Zeitpunkt wurde die Halteposition beim Zentrum Nord um einige Meter nach hinten versetzt. Durch diese Massnahme konnte das Fahrzeug schneller beschleunigen und das Eingliedern in den Strassenverkehr wurde dadurch vereinfacht.

3.2.1.4 Fussgängerstreifen

Wie oben beschrieben, wurden die Fussgängerstreifen in der Konfiguration der Streckenführung berücksichtigt. Im Allgemeinen waren diese gut konfiguriert. Dennoch gab es Situationen, wo ein Mensch gegenüber dem selbstfahrenden Fahrzeug anders reagieren würde. Fakt ist, dass der Mensch beinahe unschlagbar ist, wenn es darum geht, neue Situationen abzuschätzen. Zurzeit und vermutlich bis in mittlerer Zukunft kann er besser die einzelnen Motive der Passanten, aber auch der anderen Verkehrsteilnehmer abschätzen. Die Software des selbstfahrenden Fahrzeuges ist in dieser Hinsicht noch in einem frühen Entwicklungsstatus.

Um das zu veranschaulichen wird eine gängige Situation am Fussgängerstreifen beschrieben. Eine Gruppe von Personen befindet sich direkt neben dem Fussgängerstreifen. Durch Analyse der Umgebungssituation kann der Mensch abschätzen, welche unmittelbaren Handlungsmotive die einzelnen Personen vorhaben. Bei unklarer Ausgangslage nehmen die einzelnen Parteien (Fahrer und Gruppe) Augenkontakt auf und kommunizieren mittels Handbewegungen.

Dem menschlichen Fahrer wird schnell klar, dass die Gruppe nicht die Absicht hat, die Strasse zu überqueren. Beim selbstfahrenden Fahrzeug sieht das momentan noch anders aus. Das Shuttle erkennt die nahe am Fussgängerstreifen stehende Gruppe als Objekte. Seine Intelligenz ist aber noch nicht so weit ausgereift, dass er Gestik oder Mimik verarbeiten kann. Seine Befehle lauten zurzeit: Warten bis konfigurierte Zone wieder frei. Obwohl die Gruppe dem Shuttle bereits ergiebig ihre nächsten Handlungen näherbrachte, werden diese Kommunikationsversuche vom Shuttle nicht verstanden und es bleibt stehen.

Eine ähnliche Problematik liegt zurzeit in der Objekterkennung vor. Das Shuttle unterscheidet noch nicht zwischen einem lebenden und einem statischen Objekt. Befindet sich beispielsweise neben dem Fussgängerstreifen ein Strassenschild, z. B. zur Kennzeichnung des Fussgängerstreifens, so wird dieses Objekt gleich eingestuft wie ein Fussgänger, welcher die Strasse überqueren will. Beide Objekte werden als «wartendes Objekt» und als vortrittsberechtigt angesehen. Das Shuttle hält an und wartet bis dieser vorkonfigurierte Bereich nahe des Fussgängerstreifens wieder freigegeben wird.

Da Verkehrsschilder oft in der Nähe des Fussgängerstreifens montiert werden, sind solche Situationen keine Seltenheit. Würden die Projektverantwortlichen diesen «Vortrittsbereich» grösser definieren, so würde das Shuttle bei jeder Runde vor dem Schild anhalten und diesem den Vortritt gewähren. Da dies nicht sinnvoll ist, wurde eine Faustregel definiert. Diese besagte, dass sich die Zone auf etwa einen halben Meter neben jeder Seite eines Fussgängerstreifens beschränken sollte. Damit konnte ein gutes Mittelmass zwischen Fussgänger, welche erkannt werden sollten, und Verkehrsschilder, welche nicht erkannt werden sollten, gefunden werden. Trotzdem wurde jeder einzelne Fussgängerstreifen separat betrachtet und situationsbedingt konfiguriert, so dass es ggf. leicht von der Faustregel abwich.

Das Mittelmass bewirkte aber, dass auch Fussgänger nicht als vortrittsberechtigt eingestuft wurden. So kam es vor, dass das Shuttle bei schnell bewegenden Fussgängern, welche den Fussgängerstreifen überqueren wollten, jedoch aber noch zu weit von dieser konfigurierten Vortrittszone entfernt waren, nicht anhielt.

In solchen Situationen griff die Begleitperson vorzeitig in die automatisierte Fahrt ein. Natürlich hätte die Hinderniserkennung vom Fahrzeug reagiert und einen Nothalt ausgelöst, falls sich der Fussgänger unmittelbar vor dem Fahrzeug befand. Aber die Begleitpersonen strebten immer danach, möglichst keine Risiken einzugehen. In solchen Situationen hätte das Fahrzeug sehr stark gebremst und die Fahrgäste, sowie die Fussgänger ausserhalb wären unnötig in eine Gefahrensituation gebracht worden. Die Begleitperson schätzte jeweils die Situation nach eigenem Ermessen ab. Sie griff entweder ein oder liess das Fahrzeug vor dem Fussgänger passieren.

3.2.1.5 Rechtsvortritt

Die Rechtsvortritte werden vom selbstfahrenden Fahrzeug analog wie bei den Fussgängerstreifen verarbeitet. Auf der virtuellen Karte wird ein Bereich festgelegt, wo das Shuttle andere Fahrzeuge erkennt und als vortrittsberechtigt einstuft.

Auf dem oberen Streckenabschnitt musste das Shuttle drei Rechtsvortritte bewältigen. Manchmal griff die Begleitperson in die automatisierte Fahrt ein, um verkehrskritische Situationen zu vermeiden. Glücklicherweise kam es nie zu einer gefährlichen Situation, da vor allem auch die Begleitperson in solchen Situationen vorzeitig eingriff. Ob es bei diesen Situationen zu einem Unfall gekommen wäre, kann schlecht beantwortet werden. Auch hier galt das Gebot möglichst keine unnötigen Risiken einzugehen.

Nachfolgend werden die Situationen, die sich beim Befahren einer Kreuzung oder Abzweigung mit Rechtsvortritt ergaben, klassifiziert:

1. Im Vortritts-Bereich befand sich kein Fahrzeug.
2. Ein einzelnes Fahrzeug befand sich im Vortritts-Bereich und gab diesen wieder frei.
3. Eine Fahrzeugkolonne fuhr durch den Vortritts-Bereich, so dass dieser in kurzen Abständen immer wieder belegt und dann freigegeben wurde.
4. Während der Überprüfung des Rechtsvortritts-Bereichs befand sich kein Fahrzeug in diesem Bereich. Nach der Überprüfung (nachdem das Shuttle eine virtuelle Haltelinie überfuhr) fuhr ein Fahrzeug in den Vortritts-Bereich.

Fall 1: Im Vortritts-Bereich befand sich kein Fahrzeug

Das Shuttle kontrollierte den Vortritts-Bereich mittels LIDAR-Sensoren und vergewisserte sich, dass kein Fahrzeug in diesem Bereich war und fuhr los.

→ Kein manuelles Eingreifen der Begleitperson notwendig.

Fall 2: Ein einzelnes Fahrzeug befand sich im Vortritts-Bereich und gab diesen wieder frei

Das Shuttle kontrollierte den Vortritts-Bereich mittels LIDAR-Sensoren und erkannte, dass sich ein Fahrzeug näherte, das sich im Erfassungsbereich befand. Das Shuttle reduzierte die Geschwindigkeit (ggf. bis zum Anhalten) und gewährte dem Fahrzeug Vortritt. Das Fahrzeug fuhr weiter und verliess den Vortritts-Bereich. Sobald der Vortritts-Bereich wieder frei war, fuhr das Shuttle weiter.

→ Kein manuelles Eingreifen der Begleitperson notwendig.

Fall 3: Eine Fahrzeugkolonne fuhr durch den Vortritts-Bereich, so dass dieser in kurzen Abständen immer wieder belegt und dann freigegeben wurde.

Das Shuttle kontrollierte den Vortritts-Bereich mittels LIDAR-Sensoren und erkannte, dass sich ein im Erfassungsbereich befindendes Fahrzeug näherte. Das Shuttle reduzierte die Geschwindigkeit teilweise bis zum Stillstand und gewährte dem Fahrzeug Vortritt. Das Fahrzeug fuhr weiter und verliess den Vortritts-Bereich. Weitere Fahrzeuge fuhren in den Vortritts-Bereich ein und verliessen diesen wieder. Erst sobald der Rechtsvortritts-Bereich komplett frei war, fuhr das Shuttle weiter.

→ Kein manuelles Eingreifen der Begleitperson notwendig.

Fall 4: Während der Überprüfung des Rechtsvortritts-Bereichs befand sich kein Fahrzeug im Rechtsvortritts-Bereich. Nach der Überprüfung (nachdem das Shuttle eine virtuelle Haltelinie überfuhr) fuhr ein Fahrzeug in den Vortritts-Bereich.

Das Shuttle fuhr entlang seiner Fahrspur oder stand bereits aufgrund der Fälle 2 oder 3. Das Shuttle überprüfte den Vortritts-Bereich und erkannte kein Fahrzeug in diesem Bereich. So entschied sich das Shuttle, weiter zu fahren. Danach fuhr ein weiteres Fahrzeug in diesen Bereich ein und

hätte grundsätzlich Vortritt gehabt. Es wäre auch noch Platz vorhanden für das einfahrende Fahrzeug. Das Shuttle beschleunigte nun aber, weil der in der Konfiguration der Strecke vorgesehene „Point of no return“ (die virtuelle Haltelinie) überschritten wurde.

„Normale“ Autofahrer würden einen Kontrollblick machen, nochmals anhalten und dem sich von rechts nähernden Fahrzeug den Vortritt gewähren. Das Shuttle fuhr aber los und die von rechts kommenden Fahrzeuge mussten abbremsen. Fuhren diese zu schnell, griff die Begleitperson manuell ein und wartete, bis die Strecke wieder sicher befahren werden konnte.

Leider dauerte es nach einem solchen Halt zu lange, bis das Fahrzeug sich wieder in Bewegung setzte. Auch beschleunigte es sehr langsam. So konnte es vorkommen, dass noch weitere Fahrzeuge von rechts in die Lücke fuhren und das Shuttle wieder zum Stillstand brachten.

➔ Manuelles Eingreifen der Begleitperson teilweise notwendig.

All diese Situationen kamen vermehrt vor. Dabei war es irrelevant, wann, an welcher Kreuzung oder bei welchen Wetter- bzw. Strassenverhältnissen sich die Situation abspielte. Durch die aufmerksame Begleitperson im Shuttle konnte jederzeit das Risiko korrekt abgeschätzt und somit verkehrskritische Situationen vermieden werden.

3.2.1.6 VBSH-Busse überqueren die Mittellinie

Bei der Fahrt von Zentrum Nord zum Industrieplatz, auf der Höhe der vom Shuttle nicht bedienten Haltestelle Zentrum Rheinfall (siehe Abbildung 2, Sektor I), griff die Begleitperson sporadisch vorbeugend ein, um eine potentiell kritische Situation mit dem auf der anderen Strassenseite fahrenden VBSH-Bus zu vermeiden.

Die VBSH-Busse der Linie 6 bedienen die Haltestelle Industrieplatz, welche örtlich von der Haltestelle Industrieplatz der Linie 12 getrennt ist. Beim Ausfahren aus der Haltestelle holt der VBSH-Bus aufgrund des engen Kurvenradius über den Mittelstreifen aus. Dies kann dazu führen, dass der VBSH-Bus die virtuelle Schiene der Linie 12 schneidet und deshalb eine Vollbremsung des von Zentrum Nord kommenden Trapeziums bzw. Trapeziums erzeugt. Vollbremsungen waren immer sehr unangenehm für Fahrgäste im Shuttle und Verkehrsteilnehmern hinter dem bremsenden Fahrzeug. Bei den geringen Geschwindigkeiten des Shuttle hatte eine Vollbremsung noch grössere Auswirkung auf das Fahrverhalten. Denn das Fahrzeug stand innert wenigen Metern still und lose Gegenstände im Fahrzeug wurden durch die Luft geschleudert. Aus diesem Grund versuchte die Begleitperson in solchen Situationen Vollbremsungen zu vermeiden,

3.2.1.7 Kreuzen mit dem Rhyfall-Express

Auf dem unteren Streckenabschnitt, vom Industrieplatz in Richtung Schlössli Wörth, verkehrt ein für den Tourismus ausgelegtes, sonderbewilligtes Fahrzeug namens «Rhyfall-Express» (siehe Abbildung 13). Der Rhyfall-Express fährt auf der gleichen Strecke wie das selbstfahrende Fahrzeug. Er wendet aber nicht beim Schlössli Wörth, sondern fährt einen anderen Weg zurück nach Schaffhausen.

Wenn das Shuttle in Richtung Schlössli Wörth unterwegs war, konnte es vorkommen, dass der Rhyfall-Express hinter dem Shuttle herfahren musste. Bei Gelegenheit fuhr die Begleitperson das Shuttle manuell zur Seite, so dass der Rhyfall-Express überholen konnte.

Die Fahrt in Richtung Industrieplatz war herausfordernder. Es konnte vorkommen, dass sich das Shuttle und der Rhyfall-Express im engsten Strassenabschnitt kreuzten. Die Begleitperson versuchte solche Situationen zu vermeiden. Sie griff ein und fuhr das Shuttle auf die Seite, sobald sie den Rhyfall-Express sah.

Im Allgemeinen funktionierte das Kreuzen ganz gut. Beide Parteien mussten ab und zu ein wenig Geduld zeigen. Vor allem wenn die Fahrzeuge in einer Kurve aufeinandertrafen, musste das selbst-fahrende Shuttle zurückgefahren werden.



Abbildung 13: Rhyfall-Express

3.2.1.8 Parkierte Fahrräder am Mühleradhaus

Bei der Haltestelle Mühleradhaus führte die programmierte Fahrspur des selbstfahrenden Shuttles aufgrund der Platzverhältnisse nahe am Eisentor und an den Bäumen entlang. Leider wurden dort aber oft Fahrräder am Eisentor, an den Bäumen oder sonst irgendwo abgestellt. Durch diese abgestellten Fahrräder war die automatisierte Fahrt nicht möglich und die Begleitperson musste eingreifen. Als erstes suchte die Begleitperson die möglichen Besitzer der Fahrräder auf und bat sie, diese umzuparkieren. Falls die Besitzer der Fahrräder nicht auffindbar waren, umfuhr die Begleitperson die Hindernisse im manuellen Modus.

Da sich dort viele Touristen aufhalten und es nicht allzu viel Platz hat, versuchte die Begleitperson die Fahrt im manuellen Modus zu vermeiden. Um die Situation mit den Fahrrädern ein wenig zu entschärfen, wurden an den Bäumen und am Eisentor Parkverbotstafeln aufgehängt (siehe Abbildung 14). Zusätzlich wurde am Boden die Haltestellenposition mittels eines gelben Blitz markiert.

Technische Probleme an Hard- und Software führten dazu, dass der Betrieb der Linie 12 ab dem 20. August 2019 eingestellt wurde. Aufgrund dessen konnten zu wenig Erfahrungen mit dem Parkverbotstafeln gesammelt werden. Wir gehen aber davon aus, dass diese Massnahme zu einer Entschärfung der Situation beigetragen hätte.



Abbildung 14: Parkverbotstafeln beim Mühleradhaus

3.2.2 Korrektive Eingriffe

Unter korrektiven Eingriffen werden Eingriffe der Begleitperson in die automatisierte Fahrt verstanden, die nach einem speziellen Verhalten des Shuttles durchgeführt werden mussten. In diesen Situationen fuhr das Shuttle nicht exakt der konfigurierten, virtuellen Schiene nach, sondern wich von der Fahrspur ab oder missachtete notwendige Befehle, welche von der Begleitperson erteilt werden mussten.

3.2.2.1 Probleme mit der Streckenführung nach Austausch eines defekten 3D-LIDAR-Sensors

Im Juni 2018 musste der Betrieb für einige Tage eingestellt werden. Einer der 3D-LIDAR-Sensoren war defekt und deshalb nicht mehr funktionsfähig. Dies wurde durch die Fachspezialisten des Herstellers per Ferndiagnose festgestellt.

Am darauffolgenden Tag führte Navya die Instandhaltungsarbeiten vor Ort durch. Sie wechselten und kalibrierten den defekten Sensor neu. Die anschliessenden Tests auf der Teststrecke waren erfolgreich. Das Fahrzeug reagierte auf alle Arten von Objekten und bremste regelkonform.

Aus diesem Grund haben die Projektverantwortlichen entschieden, den Betrieb auf dem oberen Streckenabschnitt wiederaufzunehmen. Bei der automatisierten Fahrt auf der Linie 12 hatten die Begleitpersonen einen Versatz zwischen der programmierten und der tatsächlichen Streckenführung festgestellt. Aufgefallen war dies vor allem beim Industrieplatz, wo die Platzverhältnisse sehr eng sind. Aufgrund des grossen Versatzes von rund einem Meter konnte nicht gewendet werden.

Auch wenn es Probleme mit der Streckenführung gab, funktionierte die Hinderniserkennung trotzdem einwandfrei. Kurze Zeit später kalibrierte Navya den Sensor nochmals neu, was das Problem mit dem Versatz behob.

3.2.2.2 Missachtung «Go-Befehl» mit Trapizio

Wie bereits oben beschrieben, gab es definierte Punkte, wo die Begleitperson gezielt aufgefordert wurde, die Umgebungssituation abzuschätzen und entsprechend zu handeln.

Auf dem Streckenabschnitt vom Industrieplatz zur Haltestelle Zentrum Süd bog das Shuttle in die Industriestrasse ein. Vor dem Einbiegen in die Industriestrasse wurde einen Zwangshalt programmiert. Bei diesem Zwangshalt wurde die Begleitperson im Shuttle aufgefordert, die Verkehrssituation abzuschätzen und den Befehl für die automatisierte Weiterfahrt („Go-Befehl“) zu erteilen. Grundsätzlich wartete das Fahrzeug so lange, bis die Begleitperson den Befehl für die automatisierte Weiterfahrt via Go-Befehl erteilte.

Zwei spezielle Situationen bewirkten eine Missachtung des Go-Befehls:

Situation 1:

Im Sommer 2018 kam es einige Male vor, dass das Shuttle eigenständig auf die Industriestrasse bog und ohne dass die Begleitperson die Weiterfahrt erteilte. Die aufmerksame Begleitperson im Fahrzeug griff unmittelbar ein, stoppte das Shuttle und liess die vortrittsberechtigten Fahrzeuge passieren.

Der Fahrzeughersteller bestätigte, dass es sich um einen systematischen Software-Fehler handelte, welcher an den Stellen auftreten konnten, wo die Begleitperson die Weiterfahrt bestätigen musste. Dies war in zwei Situationen der Fall: Bei der Weiterfahrt bei den Haltestellen oder bei der Validierung auf der Strecke bei unübersichtlichen Passagen.

Der Fehler wurde dann aufgerufen, wenn die Begleitperson, z. B. wegen Baustellen, die vorprogrammierte Strecke verlassen musste. Das Fahrzeug erkannte das als «Out of path». Sobald die Begleitperson das automatisierte Shuttle wieder auf die programmierte Fahrspur zurückführte, entstand dieser systematische Fehler.

Die Validierung der Weiterfahrt war nicht mehr notwendig, sondern wurde direkt vom Fahrzeug selbst erteilt. Der Fehler konnte relativ einfach quitiert werden. Die Begleitperson musste nach

einer «Out of path»-Meldung einmal auf die Stopp-Taste auf dem Display im Fahrzeug drücken. Anschliessend konnte sie die Weiterfahrt wieder mit «Go» erteilen.

Im Laufe des Projekts wurde dieser Fehler durch den Fahrzeughersteller behoben.

Situation 2:

Nach der Konfigurationsanpassung im Januar 2019 wurde die Position des Zwangshalts im Sektor I verbessert. Das Shuttle hielt kurz vor dem Einbiegen in die Industriestrasse an und wartete dort bis die Freigabe zur Weiterfahrt über den Go-Befehl der Begleitperson erfolgte.

Falls zu diesem Zeitpunkt ein anderes Fahrzeug auf der Industriestrasse in Richtung Bahnhof Neuhausen fuhr und das Shuttle kurz vor dem Erreichen der Endposition des Zwangshalts passierte, löste dies einen Software-Fehler aus. Das Shuttle berücksichtigte den unmittelbaren Go-Befehl der Begleitperson für die Weiterfahrt auf die Industriestrasse nicht mehr.

Auch dieses Problem konnte durch eine neuere Software behoben werden.

3.2.2.3 Problematik mit der Fahrspur am Industrieplatz mit Trapizio

Im August 2018 wurde die Streckenführung an zwei Stellen durch Navya per Fernzugriff überarbeitet. Auf der Streckenkonfiguration wurden die Programmierung für den Blinker vor dem Einbiegen zum Industrieplatz, sowie die Position des Fussgängerstreifens, welcher sich vor der „Clientis“ Bank befand, angepasst.

Einige Zeit später, im Oktober 2018, bemerkten die Begleitpersonen, dass das Shuttle manchmal den Randstein in der Haltebucht beim Zentrum Süd mit dem linken Vorderrad berührte. Dieses Ereignis trat scheinbar willkürlich auf. Die Projektverantwortlichen erkannten kein Muster. Eine Vermutung war aber, dass durch die Anpassungen im August 2018 die Linienführung bei der Haltebucht Zentrum Süd unbeabsichtigt leicht verschoben wurde.

Daraufhin passte der Fahrzeughersteller die Streckenkonfiguration nochmals per Fernzugriff an. Die Linienführung an der Haltestelle Zentrum Süd wurde um einige Zentimeter verschoben und zusätzlich die Halteposition am Industrieplatz um rund zwei Meter nach hinten versetzt. Das Fahrzeug hielt so näher an der Haltestellenkante, was den Ein- bzw. Ausstieg der Fahrgäste erleichterte.

Die neue Streckenführung wurde im Oktober 2018 durch AMoTech getestet. Bei den Tests war aufgefallen, dass das Shuttle beim Wenden am Industrieplatz näher an den Randstein fuhr als zuvor. Bei jeder getesteten Runde behielt das selbstfahrende Shuttle jedoch immer den gleichen Abstand (ca. 20 – 30 Zentimeter). Nach Absprache mit dem Fahrzeughersteller wurde die angepasste Streckenführung so beibehalten. Anschliessend wurde zum regulären Betrieb gewechselt.

Einige Zeit später kam es zu einem Zwischenfall, bei dem das selbstfahrende Shuttle im automatisierten Modus auf den Randstein fuhr und die Felge sowie den Randstein verkratzte. Die Begleitperson griff schnellstmöglich ein. Es wurde dabei niemand verletzt. Der Betrieb wurde vorübergehend eingestellt und an Navya gemeldet, um diese Situation umgehend zu analysieren.

Es zeigte sich, dass aufgrund der vielen baulichen Veränderungen in Neuhausen im Jahr 2018 die auf dem Fahrzeug abgespeicherten Referenz-Karte mit der tatsächlichen Umgebung nur noch zum Teil übereinstimmte. Vor allem am Industrieplatz wurde die Umgebung massgeblich verändert. Zuvor war der Vorplatz durch eine Mauer abgetrennt worden. Diese Mauer wurde dann im Rahmen der Umnutzung des SIG-Areals demontiert.

Mit der nicht mehr vorhandenen Mauer konnte das Fahrzeug nun relativ gut umgehen. Einzig hatte das Fahrzeug Probleme, wenn sich auf dem Vorplatz ein grösserer Lieferwagen befand (siehe Abbildung 15. Der Lieferwagen wurde als ehemalige Mauer wahrgenommen und auch so in der Software vom Fahrzeug verarbeitet. Die Fahrzeugposition wurde angepasst und um einige Zentimeter verschoben. Da sich das Fahrzeug zu weit von der Mauer befand, korrigierte die Software des Shuttles dementsprechend. Als Folge fuhr das Shuttle auf den Randstein.

Nachdem die restlichen Bauarbeiten in Neuhausen abgeschlossen waren, wurde die komplette Referenz-Karte neu eingescannt und die Streckenkonfiguration nochmals überarbeitet. Durch die Neukonfiguration konnte das Problem behoben werden.



Abbildung 15: Beispiel Lieferwagen auf dem Vorplatz

3.2.2.4 Probleme mit der Fahrspur an der Haltestelle Zentrum Süd mit Trapizio

Zwischen dem Problem am Industrieplatz und der Überarbeitung der Konfiguration der Streckenführung trat ebenfalls ein Problem mit der Fahrspur bei der Haltestelle Zentrum Süd auf. Es kam vor, dass das Shuttle, obwohl die Streckenführung angepasst wurde, nach rechts schwenkte und den Randstein leicht touchierte. Diese Situationen waren grundsätzlich ungefährlich. Es kam nie jemand zu Schaden, wie auch gab es keinen Sachschaden. Aber trotzdem waren solche Situationen unangenehm.

Die Ursache war ebenfalls auf die alte Referenz-Karte zurückzuführen. Auf der gegenüberliegenden Seite bei der Haltestelle Zentrum Süd wurde ein Haus abgerissen und neu aufgebaut. Im Dezember 2017, zur Zeit der Streckenvorbereitung, befanden sich dort Baustellenabschrankungen, welche dann Ende 2018, als die Bauarbeiten fertiggestellt wurden, entfernt wurden.

Grundsätzlich konnte das selbstfahrende Fahrzeug auch diese Situation meistern. Im Zusammenspiel mit den VBSH-Linienbussen, welche sich vor dem Fahrzeug befanden, entstand aber ein Ortungsfehler. Das Fahrzeug orientierte sich einige Meter weiter hinten und bei der Weiterfahrt touchierte es den Randstein.

Auch dieses Problem wurde mit der Anpassung der Referenz-Karte behoben.

3.2.2.5 Fahrverhalten nach Software Release mit Trapizio

Im März 2019 wurde die Software von Trapizio erneuert und damit verschiedene Dinge verbessert. Nennenswert ist vor allem die Anpassung des Fahrverhaltens. Das Shuttle stoppte automatisch, wenn es um einige Zentimeter nicht auf seiner Fahrspur fuhr. Mit dem Update konnte dieses Problem behoben werden. Mit dem neuen Software-Update reduzierte das Shuttle bei Fahrspur-Ungeäuigkeiten die Geschwindigkeit, um die ursprüngliche Fahrspur zu erreichen. Ein unerwarteter Halt auf der Strasse wurde so vermieden.

Auch wenn dies eine positive Eigenschaft war, so musste sich die Begleitperson im Shuttle umgewöhnen. Denn bis zuvor fuhr das Shuttle auf den Millimeter genau. Mit der neueren Software variierte diese Fahrspur geringfügig. Die Begleitperson erkannte dies, da der Abstand zu statischen Objekten (z. B. Randsteine) nicht exakt gleich war, sondern bis zu 20 Zentimeter variierte.

Vor allem zu Beginn wurde die Begleitperson dadurch verunsichert. Plötzlich fuhr das Shuttle im gleichen Abschnitt auf einer „anderen Linie“ und kam bei Randsteinen, Parkfelder und Fahrzeugen näher als sonst. Nichtsdestotrotz bestand nie die Gefahr eines Zusammenpralls. Die Hinderniserkennung vom Shuttle funktionierte einwandfrei und das Shuttle bremste regelkonform.

Dennoch gab es manchmal in der Haltebucht von Zentrum Süd die Situation, dass das Shuttle den Randstein auf der rechten Seite leicht streifte. Es wurde dabei nichts beschädigt und auch wurde niemand verletzt. Das leichte Streifen ist vermutlich auf die neue Software und deren Verbesserung zurückzuführen.

3.2.2.6 Probleme mit der Lenkung mit Trapizia

Der Wechsel von Trapizio auf die Weiterentwicklung «Trapizia» hatte, wie bereits erwähnt, viele Verbesserungen. Dank der neusten Software konnten einige Probleme behoben werden, aber es kamen auch neue Probleme dazu.

Eines war das Problem mit dem Lenkgetriebe und der Wiederherstellung der korrekten Funktion des Lenkgetriebes auf der Strecke. Des Öfteren tauchten Fehlermeldungen im Zusammenhang mit der Lenkung auf.

Wenn diese Fehlermeldung erschien, dann hatte das von Navya entwickelte Sicherheitskonzept eingegriffen. Dieses verhinderte eine Weiterfahrt des Shuttles, wenn eine der beiden Lenkgetriebe den Lenkbefehl nicht korrekt ausführen konnte. Das Sicherheitsmodul überprüfte zu jedem Zeitpunkt, ob sich die Lenkgetriebe im Normalzustand befand. Falls ein Fehlerzustand erkannt wurde, stoppte das Fahrzeug. Das Fahrzeug konnte nicht neu gestartet werden, solange der Fehler erkannt wurde. Dadurch behielt Navya die vollständige Fahrkontrolle über das Fahrzeug.

Dieser Fehler trat öfters auf. Vor allem wenn das Fahrzeug in der Kurve durch Fussgänger oder Velofahrer ausgebremst wurde, konnte es zu diesem Fehler kommen. In den meisten Fällen konnte der Fehler einfach durch die Begleitperson behoben werden. Dabei musste diese die Räder geradestellen oder die Räder ganz rechts und dann ganz links einschlagen. Nützte dies nichts, wurden die Fahrgäste gebeten auszusteigen. Durch den Gewichtsverlust erhoffte sich der Fahrzeughersteller, dass das Problem behoben werden konnte. Die Begleitperson versuchte es dann erneut.

Konnte der Fehler nicht durch die Begleitperson behoben werden, so musste das Überwachungsteam von Navya kontaktiert werden. Dieses deaktivierte via Remote-Access dieses Sicherheitsmodul. Danach wurde die Begleitperson aufgefordert rund zehn Meter im manuellen Modus zu fahren. Anschliessend aktivierte Navya diesen Sicherheitspatch wieder. Der Fehler war für dieses Mal behoben und es konnte wieder weitergefahren werden.

Bemerkung:

Mehrfach am Tag tauchte dieser Fehler auf. Oft löste die Begleitperson das Problem selbst und die Fahrt konnte nach kurzer Zeit (1-2 Minuten) wieder fortgesetzt werden. Trotzdem musste fast täglich die Hilfe der Supervision eingefordert werden. Bis das Fahrzeug in solchen Fällen wieder betriebsbereit war, konnte es bis zu 30 Minuten gehen.

Zweimal blieb das Fahrzeug im oberen Abschnitt auf der öffentlichen Strasse stehen. Das Fahrzeug konnte nur noch mit Hilfe der Supervision bewegt werden. Solche Situationen waren zwar ungefährlich, aber eine Stresssituation für die Begleitpersonen. Daher haben wir am 1. Juli 2019 entschieden, den oberen Streckenabschnitt nicht mehr zu befahren bis das Problem mit der Lenkung durch Navya verbessert oder behoben wurde. Die Situation konnte bis zum 20. August 2019 nicht verbessert werden.

3.2.2.7 Vollbremsung bei Verlust von GNSS mit Trapizia

Das Fahrzeug machte in einigen Situationen eine Vollbremsung, ohne dass ein Hindernis im Weg war oder eine Person den Nothalt gedrückt hatte. Der Grund war der Verlust der GNSS-Ortung.

Grundsätzlich ortete sich Trapizia mittels GNSS und LIDAR-Sensoren. Falls sich das Shuttle zwischen Häusern oder grossen Bäumen befand, konnte es sein, dass die GNSS-Ortung verloren ging. Bei Verlust von GNSS ortete sich das Fahrzeug alleine mit den LIDAR-Sensoren. Der Wechsel von GNSS und LIDAR zu nur LIDAR fiel den Fahrgästen nicht auf. Das Fahrverhalten änderte sich dabei nicht.

Falls die Positionen der GNSS-Ortung und der LIDAR-Ortung aber nicht exakt übereinstimmten, konnte es vorkommen, dass eine Vollbremsung ausgelöst wurde. Diese Situation konnte auf der gesamten Strecke vorkommen. Anschliessend quittierte die Begleitperson diesen Fehler und das Shuttle fuhr automatisiert weiter.

Bemerkung:

Da unvorhergesehene Vollbremsungen schon immer ein No-Go waren, wurde die GNSS-Ortung im oberen Teil, wo das Fahrzeug im Mischverkehr fuhr, und in einigen Abschnitten im unteren Teil, deaktiviert. So ortete sich Trapizia ab Juli 2019 mehrheitlich nur noch mit den LIDAR-Sensoren. Seit der Deaktivierung trat der Fehler mit der GNSS-Unstimmigkeit nicht mehr auf.

3.2.2.8 Trapizia touchierte den Randstein

Am 16. Juni 2019 und am 1. Juli 2019 ereigneten sich zwei Situationen, in welchen das Shuttle den Randstein an der Haltestelle Industrieplatz bzw. Zentrum Süd berührte. Beide Situationen wurden von Navya untersucht.

Shuttle fuhr auf Randstein bei Haltestelle Industrieplatz

Als das Shuttle vom Mühleradhaus in Richtung Industrieplatz automatisiert unterwegs war, fuhr dieses auf den Randstein kurz bevor es den Haltepunkt beim Industrieplatz erreichte. Als die Begleitperson das Fehlverhalten des Fahrzeuges feststellte, griff sie unverzüglich ein. Es wurde nichts beschädigt und auch niemand verletzt.

Ablauf gemäss Analyse von Navya:

- 10:26:49 Das Shuttle verlässt die Haltestelle «Mühleradhaus» im automatisierten Modus. GNSS- und LIDAR-Ortung stimmen überein.
- 10:27:35 GNSS-Ortung geht verloren und wird für die Fahrzeugortung nicht mehr verwendet. Das Fahrzeug ortet sich nur mittels LIDAR-Sensoren. Das Fahrzeug fährt ohne äusserlich erkennbare Auswirkungen weiter.
- 10:28:44 Die GNSS-Ortung ist wieder vorhanden, aber aufgrund von äusserlichen Umgebungseinflüssen wird das Fahrzeug weiter links, als es tatsächlich ist, positioniert. Das Fahrzeug korrigiert fälschlicherweise die Fahrzeugposition und fährt weiter rechts.
- 10:28:48 GNSS-Ortung geht erneut verloren und wird für die Ortung des Fahrzeugs nicht mehr berücksichtigt. Das Fahrzeug ortet sich zu diesem Zeitpunkt nur noch mittels LIDAR.

Zur gleichen Zeit greift die Begleitperson ein, weil sie die Unstimmigkeit beim Fahrverhalten bemerkt.
- 10:28:49 Das Shuttle rollt noch ein wenig weiter und bleibt auf dem Randstein stehen.

Shuttle berührt den Randstein beim Zentrum Süd

Am 1. Juli 2019 fuhr das Shuttle vom Industrieplatz in Richtung Zentrum Süd. Das Fahrzeug wich von seiner Fahrspur ab und touchierte mit dem rechten Vorderrad den Randstein. Es wurde nichts beschädigt und auch niemand verletzt.

Ablauf gemäss Analyse von Navya

- 15:53:12 Das Shuttle verlässt im automatisierten Modus die Haltestelle Industrieplatz in Richtung Zentrum Süd. GNSS- und LIDAR-Ortung stimmen überein.
- 15:54:07 GNSS-Ortung geht verloren und wird für die Fahrzeugortung nicht mehr verwendet. Das Fahrzeug ortet sich nur mittels LIDAR-Sensoren. Das Fahrzeug fährt ohne äusserlich erkennbare Auswirkungen weiter.
- 15:54:08 Die GNSS-Ortung ist wieder vorhanden, aber aufgrund von Umgebungseinflüssen wird das Fahrzeug weiter links positioniert, als es tatsächlich ist. Das Fahrzeug korrigiert fälschlicherweise die Fahrzeugposition und fährt weiter rechts.
- 15:54:16 Die seitliche Verschiebung wird vom Fahrzeug erkannt und es versucht, diese Unstimmigkeit zu korrigieren, berührt aber dabei den Randstein. Das Fahrzeug fährt weiter, ohne dass die Begleitperson eingegriffen hatte. Es kommt an der Haltestelle Zentrum Süd zum Stehen.

Bemerkung:

Beide Vorfälle waren auf die ungenaue GNSS-Position zurückzuführen, die die Lokalisierung des Shuttles verzerrte und eine seitliche Abweichung hervorrief. Als das Shuttle versuchte, seine Position zu korrigieren, fuhr das Shuttle mehr rechts und berührte den Randstein.

Um dieses Problem zu verhindern, wurden auf einigen Abschnitten, auf denen die GNSS-Ortung ungenau war, diese deaktiviert. Danach ortete sich das Shuttle in diesen Abschnitten nur noch mittels LIDAR-Sensoren.

3.2.2.9 Sicherheitsmodul von Navya nicht aktiv

Am 14. Juli 2019 kam es auf der Linie 12 zu einer Situation, in der das Shuttle gefährlich nahe an das Eisentor bei der Haltestelle Mühleradhaus fuhr und die Begleitperson vorausschauend eingreifen musste. Es kam zu keinem Zusammenstoss, es wurde niemand verletzt und auch wurde nichts beschädigt. Trotzdem wurde aufgrund des Vorfalls der Betrieb der Linie 12 vorübergehend eingestellt, damit Navya die Ursache ermitteln konnte. Nach der Analyse von Navya und die darauffolgenden Tests von AMoTech, konnte der Betrieb der Linie 12 am 24. Juli 2019 wieder aufgenommen werden.

Situationsbeschreibung

Am 14. Juli um 15:45 Uhr fuhr das Fahrzeug im automatischen Modus von der Haltestelle Mühleradhaus in Richtung Laufenaufzug. Die Begleitperson bemerkte, dass das Shuttle sich nicht auf der korrekten Fahrspur, sondern näher als üblich am Tor befand. Die Begleitperson griff unverzüglich ein und stoppte das Fahrzeug, so dass eine Kollision mit dem Eisentor vermieden werden konnte. Danach setzte die Begleitperson das Fahrzeug einige Meter zurück.

Ablauf gemäss Analyse von Navya

- 15:45:28 Das Shuttle fährt im automatischen Modus und verlässt die Haltestelle Mühleradhaus in Richtung Laufenaufzug.
- 15:45:33 Das Shuttle stoppt in der Rechtskurve aufgrund von Fussgängern, welche die Fahrspur des Fahrzeugs kreuzen. Während des Bremsens sind die Räder nach links eingeschlagen.
- 15:45:37 Die Fussgänger verlassen die Fahrspur des Fahrzeugs und das Shuttle fährt weiter. Da sich das Shuttle in einer Rechtskurve befindet und die Räder leicht nach links eingeschlagen sind, sendet die Software starke Lenkbefehle, um nach rechts zu fahren.

Grundsätzlich würde das Sicherheitsmodul (siehe Kapitel 3.2.2.6) eingreifen und das Shuttle stoppen. Da aber zu diesem Zeitpunkt das von Navya entwickelte Sicherheitsmodul nicht eingeschaltet war, konnte das Fahrzeug weiterfahren.

15:45:40 Falls sich die Lenkung in einem fehlerhaften Zustand befindet und das Sicherheitsmodul nicht eingreift, werden die Hinterräder nicht mehr korrekt gelenkt. Das Fahrzeug führt nur noch die Lenkbefehle an den Vorderrädern aus. Aus diesem Grund kann die enge Kurve nicht korrekt befahren werden und das Shuttle verlässt seine Fahrspur. Zu diesem Zeitpunkt bemerkte die Begleitperson das Fehlverhalten des Fahrzeugs und stoppte das Shuttle manuell.

15:46:20 Die Begleitperson fährt das Shuttle manuell aus dem Bereich und bringt es zurück auf die Fahrspur. Während dieses Manöver verschwindet der Fehler und das Shuttle ist wieder in der Lage im automatisierten Modus weiterzufahren. Anschliessend stellte die Begleitperson den Betrieb ein.

Bemerkung

Der Vorfall war darauf zurückzuführen, dass das Sicherheitsmodul von Navya nicht eingeschaltet war und deshalb das Shuttle nicht anhielt, als es zu Problemen mit den Lenkbefehlen kam. Das Sicherheitsmodul wurde am 19. Juli 2019 durch Navya wieder aktiviert.

Damit solche Situationen vermieden werden konnten, wurde die Kommunikation zwischen Navya und AMoTech bei Problemen mit der Lenkung (Steering Problem) verbessert. Nachdem Navya das Sicherheitsmodul deaktivieren musste, forderte die Begleitperson von Navya eine schriftliche Bestätigung, dass das Sicherheitsmodul wieder aktiviert wurde.

Die Begleitperson konnte nie den Status des Sicherheitsmoduls (aktiviert oder deaktiviert) im Fahrzeug abfragen. Es war nicht möglich zu überprüfen, ob das Sicherheitsmodul wieder aktiviert wurde. Die Begleitperson verliess sich folglich auf die Aussage der Navya-Mitarbeiter.

3.2.2.10 Zwischenfall am 2. Juni 2019

Nach dem Zwischenfall vom Sonntag, dem 2. Juni 2019, wo das selbstfahrende Shuttle mit einer E-Bike-Fahrerin kollidiert ist, wurde dieses umgehend ausser Betrieb genommen, um die Umstände zu analysieren und die Lehren daraus zu ziehen.

Jeder Unfall ist einer zu viel. Dennoch konnten solche Vorkommnisse nie mit absoluter Sicherheit ausgeschlossen werden. Die auf grösstmögliche Sicherheit bedachte Konfiguration des Shuttles hat dazu beigetragen, dass die Geschwindigkeit beim Zusammenstoss gering war und daher nichts Schlimmes passiert ist.

Anhand der Analyse der Sensoraufzeichnungen konnten wir feststellen, dass die Technologie des Shuttles einwandfrei funktioniert hatte und für den Zwischenfall nicht verantwortlich gemacht werden konnte. Diverse Umstände an der Schnittstelle zwischen Mensch und Technik haben zum Vorfall beigetragen, sodass es nicht möglich war, eine einzelne Ursache zu benennen.

Die Ausfahrt aus dem Industrieplatz in die Industriestrasse war als Zwangshalt konfiguriert. Nach Wegfahrt von der Haltestelle hielt das Shuttle bei der Einmündung wie vorgesehen an. Nachdem ein Velofahrer auf der Industriestrasse von links kommend vor dem Shuttle durchgefahren war, war die Strasse frei und die Begleitperson gab den Fahrbefehl. Die E-Bike-Fahrerin war zu diesem Zeitpunkt noch ca. 40-50 m weit entfernt.

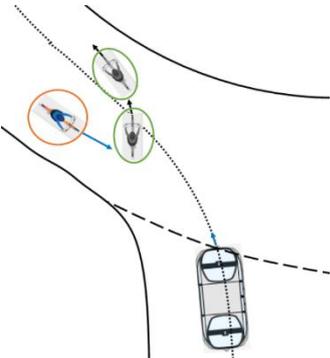
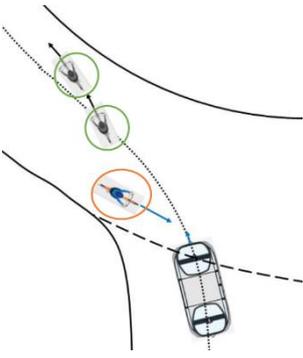
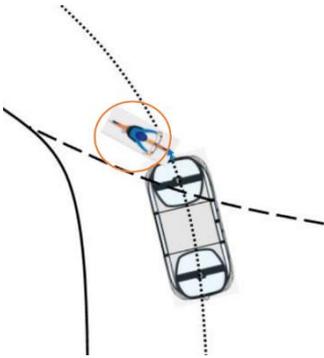
Kurz danach, noch bevor das Shuttle auf den Fahrbefehl reagiert hatte, wurde es von zwei Velofahrern überholt, die aus dem Industrieplatz nach links in die Industriestrasse einbogen. Die beiden Velofahrer wurden vom Shuttle erkannt. Das führte dazu, dass es etwas später und sehr langsam anfuhr und erst fünf Sekunden nach Erteilen des Fahrbefehls mit einer Geschwindigkeit von weniger als 5 km/h in die Industriestrasse einbog. Die Velofahrer befanden sich für einen längeren Zeitraum zwischen dem Shuttle und der E-Bike-Fahrerin.

In der Zwischenzeit hatte sich diese genähert und ihre Fahrt etwas abgebremst, um hinter den beiden Velofahrern durchzufahren. Die Begleitperson leitete den Bremsvorgang ein, als die E-Bike-

Fahrerin sichtbar wurde und noch ca. 3 Meter vom Shuttle entfernt war. Eine Kollision liess sich zu diesem Zeitpunkt aber nicht mehr vermeiden, da sich die beiden Fahrzeuge aufeinander bewegten. So kam es eine knappe Sekunde später zum Zusammenstoss. Das Shuttle bewegte sich zu diesem Zeitpunkt mit einer Geschwindigkeit von weniger als 3 km/h.

Die Freigabe zur Wiederaufnahme des Betriebs wurde vom ASTRA am 7. Juni 2019 erteilt. Die Begleitpersonen wurden am 12. Juni 2019 speziell auf derartige Situationen nachgeschult, um die Wahrscheinlichkeit solcher Vorfälle zukünftig noch weiter zu senken.

Tabelle 6: Situationsbeschreibung vom Zwischenfall mit E-Bike-Fahrerin

| Einbiegen in Industrie- strasse | Einleiten des Bremsvor- gangs | Kollision |
|--|--|--|
|  |  |  |
| Zeit: 13:45:17.0 («go» + 5.0 s) Shuttle: 4.7 km/h | Zeit: 13:45:17.6 («go» + 5.6 s) Shuttle: 5.4 km/h | Zeit: 13:45:18.5 («go» + 6.5 s) Shuttle: 3.0 km/h |

3.3 Keine Eingriffe der Begleitperson

Oft konnte das selbstfahrende Fahrzeug die Verkehrssituation eigenständig abschätzen und Handlungen korrekt ausführen. Es war nicht notwendig, dass die Begleitperson in die automatisierte Fahrt eingreifen musste.

Trotzdem konnte es vorkommen, dass das Shuttle ohne offensichtlichen Grund bremste, buzzerte oder hupte. Derartige wiederkehrende Vorkommnisse wurden durch die Begleitperson rapportiert und ggf. durch Navya analysiert und verbessert. Die Erfahrungen zeigten, dass beispielsweise Bodenunebenheiten durch die unteren 2D-Lidar-Sensoren als Hindernisse erkannt wurden. Ein anderes Beispiel ist, dass das Shuttle auf bewegende Fahnen an Laternen reagierte. Die Fahnen befanden sich ca. drei Meter über Boden und ragten nicht in das Lichtraumprofil des Shuttles, aber trotzdem wurden diese manchmal als Hindernisse erkannt. Es gab noch andere Situationen, in welchen das Shuttle ohne ersichtlichen Grund bremste oder buzzerte. Die Ursachen waren aber sehr schwer ausfindig zu machen, deswegen kann hier keine abschliessende Aussage über diese Problematik gemacht werden.

Solche Situationen waren sowohl für den Verkehrsfluss als auch für die Verkehrssicherheit unkritisch. Dennoch wurden Fahrgäste, Passanten und die Begleitpersonen durch ein derartiges Verhalten verunsichert. In einem Pilotversuch mag ein solches Verhalten noch akzeptabel sein, sobald aber selbstfahrende Fahrzeuge dieser Kategorie zum Strassenbild gehören, müssen derartige Probleme behoben sein.

3.4 Wetter

Das selbstfahrende Shuttle von Navya konnte während der Projektphase nicht in allen Wettersituationen betrieben werden. Zum Beispiel wurden die Laubblätter, die grossen Schneeflocken oder der Starkregen von den Sensoren als Hindernisse erkannt.

Aufgrund extremer Wetterverhältnissen (z. B. starker Schneefall) wurde der Betrieb einige Male früher eingestellt. Das Shuttle hielt alle paar Meter aufgrund der Hinderniserkennung an und die automatisierte Fahrt war für die Fahrgäste nicht zumutbar.

4 Erfahrungen mit der Technik

Selbstfahrende Fahrzeuge bzw. die Selbstfahrsoftware muss sich in einem sehr komplexen Gebiet zurechtfinden. Alle äusseren, wie auch inneren Faktoren müssen miteingerechnet werden. Nur wenn alle relevanten Daten korrekt verarbeitet werden, wird ein gut funktionierendes selbstfahrendes Fahrzeug sich auf dem Markt etablieren.

Auch wenn der Fahrzeughersteller in Serie produziert, steckt die Technologie noch in Kinderschuhen. Einiges konnte es bereits gut und anderes sollte noch verbessert oder sogar neu entwickelt werden.

Erfahrungen, welche wir im Bereich der Technik gemacht hatten, werden nachfolgend in Technologie und Fahrzeugtechnik aufgeteilt:

4.1 Erfahrungen mit der Fahrzeugsoftware

Die Systemgrenzen, welche in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurden, sind deutlich sichtbar. Das Shuttle von Navya muss noch in vielen Bereichen weiterentwickelt werden. Auch das neue 4x4-Fahrzeug erzielte nicht die gewünschte Verbesserung. Nachfolgend werden die Erkenntnisse aus den letzten zwei Jahren zusammengefasst.

4.1.1 Selbstfahrsoftware

Das selbstfahrende Fahrzeug konnte während der Projektphase nicht von alleine dazu lernen. Wir haben gesehen, dass es in den gleichen Situationen die gleichen Fehler machte. Ein Beispiel: Neben dem Fussgängerstreifen befand sich ein Werbeschild. Dieses ragte nicht in das Lichtprofil des Shuttles, aber in den programmierten Bereich des Fussgängerstreifen. In jeder Runde wurde das Werbeschild als Hindernis erkannt. Das Fahrzeug hielt an und wartete auf den GO-Befehl der Begleitperson.

Von einem selbstfahrenden Fahrzeug wird in Zukunft erwartet, dass es solche Situationen eigenständig abschätzen kann. Beispielsweise könnten die Objekte klassifiziert werden. Im Vorhinein wäre dann klar, dass es sich beim Werbeschild um ein statisches Objekt handelt.

Während der Projektphase war es beim Navya-Fahrzeug so, dass Verbesserungen der Konfiguration nur durch den Fahrzeughersteller vorgenommen werden konnte. Dieser konnte entweder die Referenz-Karte neu aufnehmen oder die Konfiguration der Streckenführung anpassen.

4.1.2 Referenz-Karte

Eine weitere Erkenntnis aus dem Projekt ist, dass die Referenz-Karte aufgrund der sich laufend verändernden Umgebung stetig veraltet war. Strassen wurden aufgerissen, neue Häuser gebaut oder Bäume und Gebüsche verloren Blätter bzw. veränderten ihre Wuchsform.

Das Shuttle funktionierte so: Die Umgebung wurde zum Zeitpunkt X festgehalten. Anschliessend wurde eine Referenz-Karte erstellt und auf dem Fahrzeug abgespeichert. Danach wurde sie nicht mehr verändert und das Shuttle verglich die Ist-Situation mit der Referenz-Karte.

Sobald die Unterschiede zu gross waren, konnte es sein, dass sich das Fahrzeug unkontrolliert verhielt. Plötzlich bremste es ohne ersichtlichen Grund, machte unkontrollierte Fahrmanöver oder blieb einfach stehen. Es konnte dann nicht mehr automatisiert gefahren werden. In diesen Fällen musste stets der Fahrzeughersteller kontaktiert werden. Dieser entschied dann, ob die Umgebung neu eingescannt oder die Konfiguration überarbeitet werden musste.

4.1.3 Konfiguration

Wie bereits erwähnt, fuhr das Shuttle entlang seiner «virtuellen Schiene» und berücksichtigte Fahrspur, Haltepositionen, Geschwindigkeiten, Rechtsvortritte, Fussgängerstreifen und das Bedienen der Richtungsanzeiger. Diese Konfigurationen wurden millimetergenau auf der Referenz-Karte abgespeichert.

Grundsätzlich funktionierte dies ganz gut. Aber diese einprogrammierten «Verkehrsregeln» wurden penibelst eingehalten. Als Mensch wird jede Verkehrssituation von neuem eingeschätzt und daraus unterschiedliche Handlungen abgeleitet. Im einen Fall wird dem anderen Fahrzeug Vortritt gewährt und im andern Fall nicht. Auch kann der Fahrzeuglenker im Vorhinein abschätzen, ob dem schnell bewegenden Fussgänger der Vortritt gewährt werden muss oder ob zugefahren werden kann. Nicht so bei Trapizia: Das Shuttle entschied bis zu einem gewissen Punkt auf der Strecke, ob der andere Verkehrsteilnehmer vortrittsberechtigt war oder eben nicht. Die ähnliche Situation zeigte sich bei den Rechtsvortritten.

In Zukunft ist es wichtig, dass auch Geschwindigkeit, Fahrtrichtung oder auch Objektklassifizierung in der Software verarbeitet werden. Denn auch zu schnell fahrenden Fahrzeugen muss der Vortritt beim Rechtsvortritt gewährt werden.

4.1.4 Berechnung der Fahrspur

Während der Projektdauer haben wir gesehen, dass das Fahrzeug Dellen in den Asphalt fuhr. Denn auf jeder Runde fuhr das Shuttle genau auf den gleichen Zentimetern. Der Asphalt wurde so immer an der gleichen Stelle belastet und dort überdurchschnittlich abgenützt. Vor allem beim Wenden wirkten grosse Kräfte auf den Asphalt, was sichtbare Risse im Boden verursachte (siehe Abbildung 16)

Wir sind der Meinung, dass für die Berechnung der Fahrspur zwei unterschiedliche Ansätze gewählt werden sollten. In der Haltebucht sollte das Fahrzeug auf dem betonierten Boden millimetergenau möglichst nahe an die Bordsteinkante fahren, diese aber nicht berühren. Auf der Strasse wäre ein leichtes Variieren der Fahrspur sinnvoll, denn so würde die punktuelle Abnützung der Fahrbahn vermindert werden.



Abbildung 16: Dellen im Asphalt

4.1.5 Weitere Erkenntnisse

Verschiedene Funktionen vom Fahrzeug sollten bald verbessert werden, dies versprach zumal der Fahrzeughersteller. Das eigenständige Umfahren von stillstehenden, leicht in das Lichtraumprofil ragenden Objekten, ist eine wichtige Funktion. Diese wurde im Projektzeitraum nicht umgesetzt. Im Projekt musste die Begleitperson das Zepter in die Hand nehmen und das Hindernis manuell umfahren. Zurück auf seiner Fahrspur, übergab sie die Kontrolle am Fahrzeug zurück.

Eine weitere Verbesserung, welche unumgänglich ist, ist die gesamte Sensortechnik und dessen Verarbeitung. Schneeflocken, Starkregen oder Laubblätter sollten nicht den gleichen Stellenwert haben wie Menschen, Autos oder Fahrräder. Die Sensoren müssen zwischen diesen Objekten unterscheiden können. Auch dürfen kleine Bodenunebenheiten das Fahrverhalten nicht beeinträchtigen.

Erst wenn alle relevanten Faktoren und Informationen aus der Umgebung in der Selbstfahrsoftware verarbeitet und klassifiziert werden und wenn diese in allen Wettersituationen einsetzbar ist, können die selbstfahrenden Fahrzeuge flächendeckend im Markt eingesetzt werden.

Die folgenden beiden Punkte bereiteten immer wieder Probleme und lassen auf Fehlüberlegungen in der Konzeption schliessen:

1. GNSS Ortung

Das Fahrzeug konnte mittels GNSS und LIDAR-Sensoren geortet werden. Damit die GNSS-Ortung funktioniert, braucht es eine solide Sichtbarkeit von Satelliten in guter Konstellation. In Tälern, zwischen grossen Häusern oder auch unter Bäumen kann die GNSS-Ortung aber ungenügend sein und das Fahrzeug konnte im Projekt nur noch mittels LIDAR-Sensoren geortet werden.

Der Wechsel zwischen «GNSS vorhanden» und «GNSS nicht vorhanden» darf aber keinen Einfluss auf das Fahrverhalten haben. Bei unserem Fall machte das Fahrzeug aber eine Vollbremsung, wenn die wiedervorhandene GNSS-Ortung nicht mit der der LIDAR übereinstimmte. (Siehe Kapitel 3.2.2.7)

Auch in Zukunft wird die GNSS-Ortung manchmal nicht korrekt sein. Deswegen wäre es sinnvoll, wenn die millimetergenaue Ortung der LIDAR-Sensoren übernommen und die GNSS-Ortung für die grobe Positionsbestimmung verwendet wird.

2. Türsteuerung

Das Prinzip der Türsteuerung war im Projekt nicht für den öffentlichen Verkehr ausgelegt. Die Türen schlossen beim Fahrzeug, wenn auf den Taster gedrückt wurde. In allen anderen öffentlichen Verkehrsmitteln in der Schweiz wird durch ein Betätigen der Türöffnungstaster die Türe aufgehalten. So kam es zu Situationen, wo die Fahrgäste beinahe zwischen den sich schliessenden Türen eingeklemmt wurden.

4.2 Erfahrungen mit der Fahrzeughardware

Wir haben gesehen, dass sich diese Fahrzeuggrösse für einen Einsatz für Erste und Letzte Meile eignet. Denn das Shuttle fand sich auch auf schmalen Strassen zurecht und konnte auf kleinem Gebiet wenden. Vor allem wenn in Zukunft solche Fahrzeuge bis zur Tür fahren, müssen diese mit den Herausforderungen in den Quartieren zurechtkommen. Schmale Strassen, versetzte Parkfelder, spielende Kinder stellen nur einen kleinen Teil der Herausforderungen dar.

Auch dank dem Elektromotor bewegte sich das Fahrzeug geräusch- und emissionsarm fort. Erst ab einer Geschwindigkeit von mehr als 35 km/h überwiegen die Reifen-Fahrbahn-Geräusche. Diese Geschwindigkeiten werden jedoch vermutlich selten in Wohngebieten erreicht.

Die Erfahrungen aus dem Projekt zeigten auf, dass die Technik im Fahrzeug noch in vielen Bereichen verbessert werden sollte. Der Fahrzeughersteller erarbeitete sein Wissen in der Fahrzeugkonstruktion von Grund auf. So mussten während der Projektdauer diverse Instandhaltungsarbeiten am Shuttle vorgenommen werden.

Insgesamt wurden mehrere Komponenten ersetzt. Nachfolgend wird eine grobe, nicht abschliessende Liste der ausgetauschten Komponenten aufgeführt.

- AC-Diffuser
- Modem
- LIDAR-Sensoren
- Kompressor / Federung
- hintere Kamera
- Kardan Schrauben
- 80-Volt-Batterie
- Befestigungsplatte

4.2.1 Batterie

Kurz vor Weihnachten 2018 stieg die 80-Volt-Batterie, welche für den Antrieb verantwortlich war, aus. Aufgrund eines nicht bekannten Fehlers fiel die Batterie in einen gesicherten Modus und stand nicht mehr für die automatisierte und manuelle Fahrt zur Verfügung. Glücklicherweise befand sich das Fahrzeug zu diesem Zeitpunkt bereits in der Garage, so dass das Fahrzeug nicht abgeschleppt werden musste.

Trotz mehreren Versuchen von Seiten Fahrzeughersteller konnte die Batterie nicht repariert werden. Es musste eine neue Batterie bestellt und eingebaut werden. Anfangs Januar 2019 konnte die Batterie gewechselt und der Betrieb wiederaufgenommen werden.

4.2.2 Bruch der Befestigungsplatte des Differenzials von Trapizio

Mitte März 2019 fiel den Begleitpersonen auf, dass Trapizio vermehrt spezielle Geräusche von sich gab. Beim normalen Fahren war immer wieder ein Knacken und Quietschen vorne links zu hören.

Als der Betrieb von Trapizio aufgrund eines erneuten Touchierens des Randsteines an der Haltestelle Zentrum Süd eingestellt wurde, wurde sogleich ein Instandhaltungstermin mit Navya vereinbart. Es sollte überprüft werden, was die Ursache des Knackens und Quietschens war.

Die Instandhaltungsarbeiten sollten auf dem Betriebsgelände der Schaffhauser Verkehrsbetriebe durchgeführt werden. Für den Transport dahin wurde ein Transporteur mit Abschleppwagen organisiert. Als das Fahrzeug auf dem SIG-Areal in Neuhausen am Rheinfall aufgeladen werden sollte, gab es auf der Rampe bei der Garage auf dem SIG-Areal einen Knall und die Befestigungsplatte des Differenzials von Trapizio brach. Die Begleitperson stoppte sofort das Fahrzeug und bewegte es nicht mehr.

Glücklicherweise befand sich das Instandhaltungspersonal von Navya für den vereinbarten Termin bereits in der Schweiz. Dieser konnte den Schaden am Fahrzeug gleich an der Unfallstelle beurteilen. Wir hatten Glück im Unglück und der Schaden am Fahrzeug war minimal.

Der Techniker bestellte alle notwendigen Ersatzteile in Frankreich und baute diese einige Tage später ein. Die Reparaturarbeiten konnten auf dem SIG-Areal durchgeführt werden, so dass Trapizio nun trotzdem nicht aufgeladen werden musste.

Die ausgetauschten Bauteile waren gegenüber den Originalbauteilen verbessert worden. Nach einigen Tests auf dem SIG-Areal wurde der Betrieb mit Trapizio wiederaufgenommen.

4.2.3 Software und Hardware-Probleme bei Trapizia

Am 19. August 2019 musste die Begleitperson das selbstfahrende Fahrzeug manuell und mit deaktiviertem Sicherheitsmodul in die Garage fahren. Denn zuvor blieb das Fahrzeug auf der Strecke stehen und es konnte nicht mehr weitergefahren werden. Als anschliessend das Sicherheitsmodul über Fernzugriff von Navya deaktiviert worden war, konnte das Fahrzeug wieder gesteuert werden, aber die hintere Lenkung führte keine Lenkbefehle mehr aus. Umgehend wurde der Betrieb auf der Linie 12 eingestellt.

Aufgrund der beschriebenen Defekte an der Hard- und Software wurde Ende August 2019 beschlossen, dass der Betrieb auf der Linie 12 vorerst unterbrochen wird.

Am Projekt «Linie 12» und den bereits geplanten weiteren Projektschritten wird festgehalten. Die Verantwortlichen des Swiss Transit Lab prüfen Alternativen, um den Betrieb schnellstmöglich wieder aufnehmen zu können.

4.2.4 Weitere Erkenntnisse

Auffallend war, dass nicht alle Überlegungen seitens Fahrzeughersteller bis zu Ende gedacht wurden. Gängige Überlegungen im Fahrzeugbau wurden nicht berücksichtigt. Die folgenden Überlegungen sollten in eine Weiterentwicklung einfließen.

1. Radeinschlag

Das Prinzip des Lenkeinschlags beim Wenden in sehr kleinen Radien kann ebenfalls verbessert werden. In der Theorie sollten die kurveninneren Räder mehr eingeschlagen sein als die äusseren. Beim Navya Shuttle hatten beide Räder den gleichen Einschlag. Dadurch wurden die äusseren Räder über den Strassenbelag geschoben, verschlissen überproportional und verursachten Belagsschäden.

2. Klimaanlage

Dass die Klimaanlage einer der grössten Stromfresser ist, war klar. Sie brauchte mit Abstand am meisten Energie und reduzierte die Lauffähigkeit vom Fahrzeug enorm. Alleine durch die Klimaanlage konnte die Batterie innert 8 Stunden auf null sein.

Technisch gesehen gab es noch weitere Dinge, die verbessert werden müssten. Das Kondenswasser der Klimaanlage tropfte bei Trapizio ins Innere des Fahrzeugs. Bei Trapizia tropfte das Kondenswasser über die seitlichen Sensoren und löste so eine Vollbremsung aus. Die Tropfen wurden als Hindernisse erkannt.

3. Extras

Die Anwenderfreundlichkeit des Shuttles war nicht befriedigend. Die Anordnung der Bedienelemente für die Extras waren im ganzen Fahrzeug verteilt und die Bedienschalter für Klimaanlage, Scheibenwischer oder die Position der pneumatischen Federung waren nicht über das Display ansteuerbar.

5 Erfahrungen aus Sicht der Verkehrsbetriebe (Haltestelle/Leitstelle)

Im Folgenden werden Erfahrungen beim Befahren von Haltestelle des öffentlichen Verkehrs und Erfahrungen mit der Leitstelle aufgeführt.

5.1 Koordination beim Befahren von Haltestellen

Die Koordination zwischen dem Trolleybus und dem selbstfahrenden Bus funktionierte gut. Der Fahrplan der Linie 12 war so konzipiert, dass das selbstfahrende Shuttle die Haltestellen Zentrum Nord und Zentrum Süd im Normalfall abgestimmt mit dem Fahrplan des Trolleybusses der Linie 1 befuhr.

An der Haltestelle Zentrum Nord war eine Anschlusssicherung zwischen der Linie 1 aus Schaffhausen und der Linie 12 in Richtung „Industrieplatz“ eingerichtet. Bei einer Vierstundenschicht wurden somit 24 Anschlüsse gesichert. Dies war im Leitsystem der VBSH definiert und wurde so konzipiert, dass der Abbringer (in diesem Falle Trapizia) automatisch eine Meldung erhielt, wenn er auf den Zubringer (das Fahrzeug der Linie 1) warten sollte, um die Umsteigemöglichkeit bis zum Industrieplatz (und zukünftig zum Rheinfall) sicherzustellen

An der Haltestelle Zentrum Süd konnten vom Industrieplatz (zukünftig vom Rheinfall) ankommende Fahrgäste der Linie 12 nach Schaffhausen umsteigen. Dieser Umsteigevorgang wurde vom Leitsystem jedoch nicht gesichert.

Grössere Verspätungen der Linie 12 wurden durch Kursausfall eingeholt. Da kein Fahrplan publiziert wurde, mussten die Verspätungen nicht aufgeholt werden. Es konnte auch vorkommen, dass die Linie 12 nach der Linie 1 die Haltestelle Zentrum Nord erreichte. Das Shuttle musste in diesem Fall hinter dem Bus der Linie 1 warten und den automatisierten Betrieb unterbrechen. Ansonsten hätte das Shuttle den stehenden Bus als Hindernis erkannt und diesen so lange angehupt, bis er losgefahren wäre.

Das Befahren der Haltestellen hatte sich gut eingespielt. Die Begleitpersonen erteilten dem Fahrzeug den Fahrbefehl und erreichten in den meisten Fällen die Haltestelle Zentrum Nord vor dem Bus der Linie 1. Beim Fahrdienstpersonal war das selbstfahrende Fahrzeug etabliert und wurde auch akzeptiert. Freundliches Zuwinken zwischen Begleitperson und Fahrpersonal war eines der Indizien, aus der entnommen werden konnte, dass es ein „Miteinander“ war.

Durch die Streckenerweiterung wurde auch der Takt angepasst. Das Fahrzeug fuhr nur noch alle 30 Minuten bei der Haltestelle Zentrum Nord ab. Aufgrund der Probleme mit dem Lenkgetriebe und der GNSS-Ortung wurde der obere Streckenabschnitt nach 1. Juli 2019 nicht mehr befahren. Zu diesem Zeitpunkt existierte keine Anschlussverbindung zwischen Linie 1 und Linie 12.

5.2 Vernetzung zur Leitstelle

Die Vernetzung mit der Leitstelle erfolgte über die Smartphone-App „SmartVLU“. Nach Eingabe der Linie und des Kurses wurde das Shuttle in der Leitstelle angemeldet (siehe Abbildung 17 und Abbildung 18) und hatte eine Fahrplananlage.

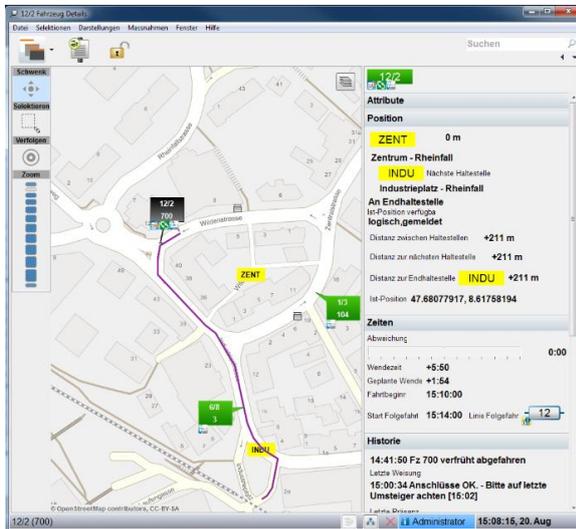


Abbildung 17: Fahrzeug Details Linie 12

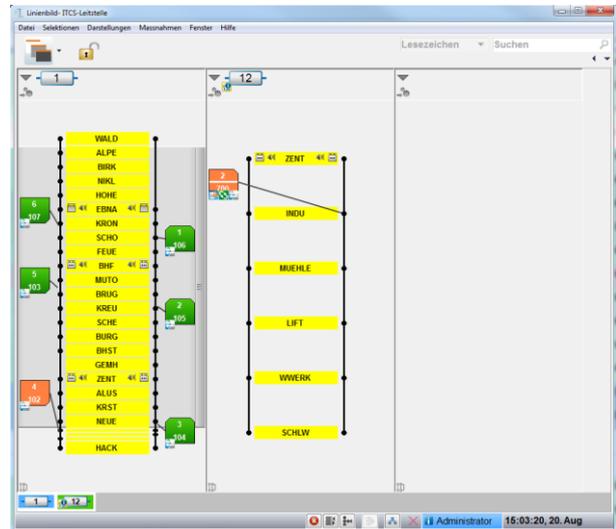


Abbildung 18: Linienbild der Linie 12

Die Begleitperson hatte somit alle für das Einhalten des Fahrplans benötigten Informationen.

Verzögerungen im Fahrplan konnten durch Verkehrssituationen (Stau, Abendverkehr) oder grossem Fahrgastandrang (Touristengruppen, etc.) verursacht werden.

Bei einer uneinholbaren Verspätung wurde ein Umlauf ausgelassen.

Die Integration in die Leitstelle der VBSH ermöglichte es, die Linie 12 auf den Haltestellenanzeigern darzustellen. Auch wurde die Linie 12 auf den Umsteigebildschirmen in den Fahrzeugen der Linie 1 dargestellt. Die Fahrgäste hatten so die benötigten Live-Informationen, um die Linie 12 für ihre weiteren Mobilitätsbedürfnisse nutzen zu können.

Für die aus Schaffhausen ankommenden Fahrgäste der Linie 1 wurde eine Anschlusssicherung eingerichtet (s.o.). Dies bewirkte, dass das Shuttle an der Haltestelle Zentrum Nord auf das Fahrzeug der Linie 1 wartet, auch wenn dieses verspätet ankam. Der Begleitperson wurde über Textmeldungen mitgeteilt, wann die Linie 12 losfahren konnte. Diese Meldungen wurden auch in der Leitstelle dargestellt (siehe Abbildung 19). Zur Linie 6, welche diese Haltestelle ebenfalls bediente, bestand keine Anschlusssicherung.

Die Haltebucht der Haltestelle Zentrum Süd war zu kurz, um das Shuttle warten zu lassen. Das Shuttle musste weiterfahren, bevor der Bus der Linie 1 in die Haltestelle einfuhr.

Dieses Konzept und das Zusammenspiel der drei Linien funktionierte reibungslos.



| Fahrzeug | Service | Position | Ziel | Abweichung | Wendezeit | Fahrer | Historie |
|------------------|---------|-------------|------------------------|------------|-----------|----------------------|--|
| 31 | 5/4 | CMC +20 m | Herblingen | -0:40 | -0:40 | Kabashi Agron | 14:35:14 Anschlüsse OK. - Bitte auf letzte Umsteiger achten [14:36] |
| 104 | 1/3 | ALUS +20 m | Waldfriedhof via Bahn | -0:30 | -0:30 | Niederer Michael | 14:47:01 Anschlüsse OK. - Bitte auf letzte Umsteiger achten [14:49] |
| 6 | 5/1 | BUCH 0 m | Herblingen | 0:00 | +4:20 | Jenni Joachim | 14:55:23 Anschlüsse OK. - Bitte auf letzte Umsteiger achten [14:56] |
| 9 | 3/1 | STEI +20 m | Krummacker | -0:40 | +3:20 | Lohr Andreas | 14:55:24 D1 Fundsach erhalten |
| 14 | 3/4 | HORN +20 m | Sommerwies | -1:10 | +0:50 | Klingler Urs | 14:13:33 Linie 6 zu spät. Anschluss brechen, falls kein Sichtkontakt beste |
| 4 | 8/3 | DE 0 m | Dienstfahrt | 0:00 | +30:30 | Rivelli Valentino | |
| 321 | 25/8 | RHEM +152 m | 25 Ramsen | -1:40 | +2:20 | Hajdin Rade | 13:12:31 Fz 321 verfrüht abgefahren |
| 5 | 8/1 | BACH +20 m | 8 Bahnhof SH | -0:30 | +16:30 | Bunjaku Ismail | 14:47:51 Anschlüsse OK. - Bitte auf letzte Umsteiger achten [14:51] |
| 21 | 6/1 | ZENT 0 m | Falkeneck via Kanton | -0:10 | +3:50 | Brandenberger Thomas | 14:44:05 Anschlüsse OK. - Bitte auf letzte Umsteiger achten [14:51] |
| 508 | 21/11 | BHOE +20 m | 21 Beggingen | -1:30 | +1:30 | Bolz Matthias | 05:39:48 Fz 508 verfrüht abgefahren |
| 102 | 1/4 | RHEN 0 m | Herbstäcker | -3:10 | +2:50 | Riesen Markus | 05:34:54 Fz 102 verfrüht abgefahren |
| 700 | 12/2 | INDU 0 m | LEER | -1:40 | -1:40 | Harlacher Monika | 14:41:50 Fz 700 verfrüht abgefahren |
| 228017000144911 | 12 | ZENT | Zentrum - Rheinflall | | +2:34 | 805 | 15:00:34 Anschlüsse OK. - Bitte auf letzte Umsteiger achten [15:02] |
| SH 49090 | | | | | | | Letzte Weisung |
| Navya-Arma-DL4 | | | | | | | 15:00:34 Anschlüsse OK. - Bitte auf letzte Umsteiger achten [15:02] |
| SCHAFFHAUSEN BUS | | | | | | | Letzte Präsenz |
| VBSH | | | | | | | 15:05:44 |
| | | | | | | | Letzte Sprecherverbindung |
| 103 | 1/5 | KREU +554 m | Herbstäcker Rheinflall | -0:10 | +5:50 | Waldvogel Harry | 15:05:09 Anschlüsse OK. - Bitte auf letzte Umsteiger achten [15:11] |
| 28 | 5/2 | BHF 0 m | Buchthalen | 0:00 | +7:00 | Schütz Heinrich | 15:03:29 Anschlüsse OK. - Bitte auf letzte Umsteiger achten [15:06] |
| 324 | 324 | | [nicht verfügbar] | | | | |
| 325 | 325 | | [nicht verfügbar] | | | | |
| 8 | 4/3 | STEI 0 m | Gruben via Säntisstra | -0:50 | -0:50 | Gleichauf Wolfgang | 14:44:07 Anschlüsse OK. - Bitte auf letzte Umsteiger achten [14:47] |

Abbildung 19: Fahrzeugtabelle inkl. Linie 12

Die Kamerabilder, die innerhalb und ausserhalb (vorne und hinten) des Fahrzeuges erfasst wurden (siehe Abbildung 20), wurden in der Leitstelle dargestellt. So war der Disponent zu jedem Zeitpunkt über die Situation informiert und konnte ggf. eingreifen. Für diese Möglichkeit gab es noch nie eine Notwendigkeit. Auf die aufgezeichneten Kamerabilder konnte noch während einer Woche zugegriffen werden. Danach wurden sie automatisch gelöscht.

Der Fahrzeughersteller musste die Stabilität der Videoüberwachung verbessern. Ab und zu gab es Übertragungsprobleme und die Videobilder wurden nicht aufgezeichnet bzw. in der Leitstelle dargestellt. Auch die Auflösung der Videobilder sollte durch leistungsstärkere Kameras in zukünftigen Fahrzeugen verbessert werden.



Abbildung 20: Kamerabilder Trapizio

6 Erfahrungen zum Zweirichtungsbetrieb

Die Software für den Zweirichtungsbetrieb wurde vom Fahrzeughersteller entwickelt und stand dem neueren Fahrzeug „Trapizia“ zur Verfügung.

Das ASTRA und das BAV hatten an der Inspektion von Trapizia eine Nachbesserung verlangt. Die Aussendisplays zeigten bei manueller Fahrt «manual driving» an. Laut Verfügung mussten aber die Hinweise für langsam fahrende Fahrzeuge und die Höchstgeschwindigkeit auf dem hinteren Display angezeigt werden.

Deswegen wurde kurzerhand beschlossen, dass AMoTech die Aussenbildschirme eigenhändig ansteuert. Nachdem konnten sie den Inhalt auf den Displays bestimmen und verändern.

Im Grossen und Ganzen funktionierte die Software für den bidirektionalen Betrieb gut. Beim automatisierten Richtungswechsel schalteten die Lichter, die Bildschirme und auch die Begleitpersonen-Steuerung um.

Der Kopfwechsel fand in der Regel an den Haltstellen Industrieplatz und Schlössli Wörth bzw. Rheinfallbecken statt. Dort stand das Fahrzeug meistens eine gewisse Zeit still, bis der Kopfwechsel gemacht wurde. Nach unserer Auffassung reagierten die sich in der Nähe befindlichen Fahrzeuglenker und Fussgänger bei einem Kopfwechsel nicht aussergewöhnlich.

7 Erfahrungen mit anderen Verkehrsteilnehmern und Bevölkerung

Die Erfahrungen, die mit anderen Verkehrsteilnehmern gemacht werden konnten, sind in der Studie der ETH wie auch in einer kurzen Stellungnahme der Projektbeteiligten aufgeführt.

7.1 ETH-Studie

Während der gesamten Dauer des Projekts wurde eine umfangreiche Studie durch die ETH durchgeführt. Diese untersuchte die Akzeptanz von selbstfahrenden Fahrzeugen bei der Bevölkerung von drei Schaffhauser Gemeinden (Neuhausen am Rheinfall, Thayngen, Stein am Rhein).

Nachfolgend befindet sich die Zusammenfassung der ETH-Studie:

Wicki, Michael und Bernauer, Thomas (2019) Public Opinion on Route 12. Interim report on the second survey on the pilot experiment of an automated bus service in Neuhausen am Rheinfall, ISTP Paper Series, 4, Institute of Science, Technology and Policy (ISTP), ETH Zürich, Zürich.

Da selbstfahrende Fahrzeuge eine Vielzahl von Vorteilen für das Verkehrssystem im Allgemeinen und für die Reisenden im Besonderen bieten können, ist es unerlässlich, die öffentliche Wahrnehmung dieser technologischen Entwicklung zu untersuchen. Die Durchführung von Testläufen mit autonomen Fahrzeugen bietet dafür eine gute Gelegenheit. Im Zusammenhang mit der Einführung der Linie 12 in Neuhausen am Rheinfall führt das Institute of Science, Technology and Policy (ISTP) der ETH Zürich eine Panelbefragung zur öffentlichen Wahrnehmung des Testlaufs sowie zum autonomen Fahren im Allgemeinen durch. Generell bietet der Testversuch in Neuhausen am Rheinfall aus wissenschaftlicher Sicht eine exzellente Möglichkeit, zu beurteilen, ob und wie sich solche Versuche auf die öffentliche Wahrnehmung speziell in Bezug auf Zweifel und Ängste auswirken. Der aktuelle Bericht beschreibt den Prozess der Datenerhebung und stellt die Ergebnisse dieser zweiten von drei geplanten Befragungen vor. Die zweite Befragung wurde zwischen November 2018 und Januar 2019 unter 957 Teilnehmenden, welche aus der ersten Umfrage rekrutiert wurden (Rücklaufquote 81.7%), durchgeführt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- *Die Bekanntheit des Testlaufs stieg um ca. 20 Prozentpunkte auf 80%.*
- *Die öffentliche Wahrnehmung der Route 12 und des autonomen Fahrens im Allgemeinen blieb auf hohem Niveau stabil.*
- *Sowohl BewohnerInnen als auch Passagiere bewerten das Projekt der Linie 12 als sinnvoll.*
- *Die Zustimmung für Testläufe ist leicht, aber signifikant gestiegen.*
- *Im Jahr 2018 nutzten insgesamt 20.251 Passagiere den Bus der Linie 12, was durchschnittlich 72 Passagieren pro Tag entspricht. Im Allgemeinen wurden an Wochenenden und heisseren Tagen deutlich mehr Passagiere registriert.*
- *Das Fahrerlebnis mit der Linie 12 wird sowohl von BewohnerInnen und Tagespassagieren als sehr positiv bewertet.*

7.2 Sicht der Projektbeteiligten

Die Akzeptanz der Bevölkerung gegenüber dem Projekt Linie 12 war im gesamten Projekt konstant geblieben. Das Projekt war über die gesamte Zeit von der lokalen Bevölkerung vollständig akzeptiert worden.

7.2.1 Erfahrungen mit anderen Verkehrsteilnehmern

Während der Projektdauer erkannten die Projektverantwortlichen unterschiedliche Reaktionen bei den Verkehrsteilnehmern. Alle Verkehrsteilnehmer mussten sich in einer neuen Situation zurechtfinden.

So reagierten einige Autofahrer wohlwollend und gaben dem selbstfahrenden Shuttle Vortritt. Andere waren ungeduldig und übten grenzwertige Überholmanöver aus, auch wenn dies aufgrund von Geschwindigkeitsanpassungen nach unserem subjektiven Empfinden in den letzten Projektmonaten abgenommen hatte.

Dann gab es verständnislose Autofahrer oder Fahrradfahrer, die ihr Gefährt auf der Fahrspur vom Shuttle parkierten und nicht aus dem Weg gehen wollten. Sie realisierten nicht, dass das Fahrzeug seiner virtuellen Schiene nachfuhr und nicht automatisiert ausweichen konnte.

Schlussendlich musste die Begleitperson im Shuttle mit dem Fahrer des anderen Fahrzeugs via Handzeichen Kontakt aufnehmen. Zum Zeitpunkt des Versuches existierte keine Kommunikation zwischen Fahrer von konventionellen Fahrzeugen und dem automatisierten Shuttle.

7.2.2 Erfahrungen mit Fussgänger und Touristen

Auch im Verhalten der Fussgänger gab es grosse Unterschiede. Die lokale Bevölkerung hatte sich schnell daran gewöhnt und überquerten im oberen Abschnitt den Fussgängerstreifen bevor das Fahrzeug vollständig zum Stillstand kam. Touristen waren da eher skeptisch und warteten, bis das Fahrzeug komplett stillstand. Einige der Fussgänger testeten auch gerne die Reaktion des Fahrzeuges. Sie sprangen vor den Shuttle auf die Strasse und zwangen es so zur Vollbremsung.

Dank der Streckenerweiterung konnten weitere, wichtige Erkenntnisse gesammelt werden.

Die Touristen am Rheinflallbecken gingen oft nicht aus dem Weg. Der eine Grund war vermutlich, dass sie das Prinzip der selbstfahrenden Fahrzeuge noch nicht verstanden haben oder der Meinung waren, dass solche Fahrzeuge doch eigenständig überholen oder ausweichen können. Beides war aber nicht der Fall und die Begleitperson musste die Touristen bitten, den Weg freizumachen. Aus diesem Grund wurde an der Haltestelle Mühleradhaus die Halteposition mit gelben Markierungen für Busse signalisiert.

Der andere Grund war, dass durch das Rauschen des Rheinflalls das Buzzern des Shuttles schlecht wahrgenommen wurde.

Zwischen der Haltestelle Rheinflallbecken und Schlössli Wörth verkehrte das Shuttle auf dem schmalsten Abschnitt. Das Fahrzeug hatte bei der engsten Stelle lediglich einen Meter Platz auf den Seiten. Bei grossem Touristenaufkommen konnte diese Strecke nur mit sehr viel Geduld befahren werden. Sobald einige Touristen dem Fahrzeug den Vortritt gewähren wollten, wurden diese von anderen Fussgängern überholt und das Fahrzeug erkannte diese wieder als Hindernisse. Dies ging so lange, bis die Strecke vor dem Shuttle komplett frei war, und das Shuttle eigenständig im automatisierten Modus weiterfuhr. Dennoch kann gesagt werden, dass alle Personen erkannt wurden und das Fahrzeug keine kritischen Verkehrsmanöver machte.

7.2.3 Erfahrungen mit Fahrgästen und Bevölkerung

Wie oben im Abschnitt zur ETH-Studie bereits beschrieben, ist die Rückmeldung aus der Bevölkerung sehr positiv. Die Fahrgäste waren sowohl interessiert als auch neugierig und fanden das Projekt eine gute Sache. Vor allem mobilitätseingeschränkte Personen profitierten von diesem Angebot. Was sicherlich noch gesteigert werden muss, ist das Vertrauen in die Technik. Auch muss die Angst vor Hackerangriffen ernst genommen werden.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis:

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Streckenführung der Linie 12..... | 6 |
| Abbildung 2: Streckenführung Linie 12 in Sektoren..... | 7 |
| Abbildung 3: Baustellen in Neuhausen am Rheinfall..... | 8 |
| Abbildung 4: Trapizio..... | 9 |
| Abbildung 5: Trapizia..... | 9 |
| Abbildung 6: Transportierte Personen | 13 |
| Abbildung 7: Zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen Anzahl beförderter Personen pro Wochentaggruppe | 13 |
| Abbildung 8: Durchschnittliche Anzahl der beförderten Personen pro Stunde | 14 |
| Abbildung 9: Monatsdurchschnitt der gefahrenen Kilometer pro Tag | 15 |
| Abbildung 10: Gefahrene Kilometer | 15 |
| Abbildung 11: Linie 12 in bzw. nicht in Betrieb | 17 |
| Abbildung 12: Verfügbarkeit..... | 17 |
| Abbildung 13: Rhyfall-Express | 25 |
| Abbildung 14: Parkverbotstafeln beim Mühleradhaus | 25 |
| Abbildung 15: Beispiel Lieferwagen auf dem Vorplatz | 28 |
| Abbildung 16: Dellen im Asphalt | 36 |
| Abbildung 17: Fahrzeug Details Linie 12 | 41 |
| Abbildung 18: Linienbild der Linie 12 | 41 |
| Abbildung 19: Fahrzeugtabelle inkl. Linie 12 | 42 |
| Abbildung 20: Kamerabilder Trapizio | 42 |

Tabellenverzeichnis:

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Befahrene Streckenabschnitte im jeweiligen Zeitraum..... | 6 |
| Tabelle 2: Karten- und Streckenkonfiguration..... | 10 |
| Tabelle 3: Fahrplan bis Juni 2019 | 12 |
| Tabelle 4: Fahrplan ab Juli 2019..... | 12 |
| Tabelle 5: Nicht-Betriebstage | 16 |
| Tabelle 6: Situationsbeschreibung vom Zwischenfall mit E-Bike-Fahrerin..... | 33 |