

STL Linie 13, Schaffhausen

Schlussbericht: Erstes Dual-Mode-Fahrzeug in der Schweiz war 20 Monate ununterbrochen in Betrieb



Verfasser: A. Kaiser, C. Nägeli, C. Mauelshagen, D. Apel
Schaffhausen, 7. Juli 2025

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung.....	3
2 Projektsteckbrief	5
2.1 Der Projektträger	5
2.2 Die Projektziele.....	5
2.3 Der Projektverlauf.....	7
2.4 Die Streckenführung.....	9
2.5 Der Betrieb.....	10
2.6 Die Technologie.....	12
2.7 Die Daten.....	13
2.8 Die Funktionalität.....	14
2.9 Die Projektorganisation	15
3 Betriebsbericht	17
3.1 Inbetriebsetzung	17
3.2 Ereignisse und Besonderheiten ohne Betriebseinschränkungen	18
3.3 Ereignisse mit Betriebseinschränkungen	19
3.4 Betriebskennzahlen	20
4 Erfahrungen und Erkenntnisse.....	22
4.1 Verfügbarkeit und Effizienz (Hypothese 1).....	22
4.2 Technologieakzeptanz (Hypothese 2).....	22
4.3 Funktionalität auf SAE Level 4 (Hypothese 3)	26
4.4 Allwettertauglichkeit (Hypothese 4).....	28
4.5 Teststrecke und Betriebsmodi.....	30
4.6 Intelligente Ansprache der Passagiere	31
4.7 Erfolgsfaktoren	32
5 Herausforderungen	34
5.1 Technologieauswahl.....	34
5.2 Konkurs des Technologiepartners	34
5.3 Passagieraufkommen.....	35
6 Projektausstrahlung.....	37
7 Fazit.....	38
8 Ausblick.....	39
9 Danksagung	40

1 Zusammenfassung

Das Projekt «STL Linie 13» des [Swiss Transit Lab \(STL\)](#) war das erste Vorhaben in der Schweiz, bei dem ein automatisiertes Dual-Mode-Fahrzeug über 20 Monate im Regelbetrieb eingesetzt wurde. Im Zentrum des Erfahrungsberichts stehen die vier Hypothesen, anhand derer die Einsatzfähigkeit, Akzeptanz, technologische Reife und Wettertauglichkeit des Systems evaluiert wurden.

1. Verfügbarkeit und Effizienz (Hypothese 1): Die Entscheidung für ein seriennahes Dual-Mode-Fahrzeug erwies sich als richtig. Die technische Verfügbarkeit lag mit durchschnittlich 97 % deutlich über vergleichbaren früheren Pilotprojekten wie der «Linie 12». Besonders positiv war die Flexibilität: Der manuelle Modus erlaubte es, das Fahrzeug problemlos auch abseits der Pilotstrecke zu bewegen. Auch Wartung und Betriebskosten fielen aufgrund des vertrauten OEM-Fahrzeugs geringer aus. Insgesamt wurde die Hypothese klar bestätigt: Dual-Mode-Technologie ist robust, praxistauglich und wirtschaftlich einsetzbar im öffentlichen Verkehr.

2. Technologieakzeptanz (Hypothese 2): Die begleitend durchgeführte Akzeptanzstudie zeigte, dass der konventionelle Look des Toyota-Kleinbusses das Vertrauen der Passagiere stärkte. Besonders bei Personen, die bereits mitgefahren waren, war die Zustimmung hoch. Gleichzeitig zeigte sich: Design allein reicht nicht. Entscheidender war das Sicherheitsgefühl, das stark an die Präsenz des Sicherheitsfahrers gekoppelt war. Vor allem ältere Bevölkerungsgruppen zeigten sich zurückhaltender gegenüber der Technologie. Positiv wirkte sich aus, dass das Projekt als echter Praxisversuch wahrgenommen wurde. Die Hypothese wurde im Wesentlichen bestätigt – jedoch mit der wichtigen Einschränkung, dass Kommunikation, Sichtbarkeit und Nutzererlebnis weiterhin zentrale Erfolgsfaktoren darstellen.

3. Funktionalität auf SAE Level 4 (Hypothese 3): Die ambitionierte Zielsetzung, ein hochautomatisiertes Fahrzeug (SAE Level 4) zu betreiben, konnte nicht erreicht werden. Zwar war die Fahrt im automatisierten Modus auf der vordefinierten Strecke gut möglich. Jedoch blieb das Fahrzeug in komplexen Situationen – etwa bei parkenden Autos, Rückstau oder der Einfahrt in den Kreisverkehr – auf menschliches Eingreifen angewiesen. Ebenso fehlten automatisches Lernen, adäquate Entscheidungslogik in dynamischen Verkehrssituationen und Fähigkeiten zur selbstständigen Fehlerbehandlung. Hauptgrund war die Insolvenz des Technologiepartners sensible4, die eine Weiterentwicklung des Systems verhinderte. Die Hypothese kann auf Basis der Ergebnisse nicht aufrechterhalten werden.

4. Allwettertauglichkeit (Hypothese 4): Erfreulich war die Wetterrobustheit des Systems. Der automatisierte Betrieb funktionierte zuverlässig bei Regen, Dunkelheit und selbst auf schneebedeckten Strassen. Kleine Störungen traten nur bei grossen Schneehaufen oder starkem Laubfall auf, was aber keine sicherheitsrelevanten Probleme verursachte. Einzig starker Nebel konnten mangels Auftretens nicht getestet werden. Dank eines fortschrittlichen probabilistischen Algorithmus zur Umgebungsinterpretation konnten typische Wetterartefakte wie Regentropfen oder Schneeflocken zuverlässig ignoriert werden. Die Hypothese gilt daher mit leichtem Vorbehalt (bez. Nebel) als bestätigt.

Die erfolgreiche Umsetzung der «STL Linie 13» beruhte auf mehreren Erfolgsfaktoren. Besonders zentral war die Wahl der Dual-Mode-Technologie: Sie ermöglichte nicht nur eine hohe technische Verfügbarkeit, sondern auch einen flexiblen und wartungsfreundlichen Betrieb. Ein weiterer Schlüsselfaktor war die frühzeitige Einbindung relevanter Akteure, darunter Behörden, Technologielieferanten, Forschungspartnern. Nicht zuletzt war die Rolle der Sicherheitsfahrerinnen und -fahrer entscheidend – sowohl als technische Kontrollinstanz als auch als direkter Kontaktpunkt für die Fahrgäste. Ihre Rückmeldungen flossen systematisch in die Weiterentwicklung des Betriebs ein. Die Grenzen des Projekts lagen primär in der eingeschränkten Funktionalität der Software – ein Punkt, der für künftige Projekte mit neuem Technologiepartner essenziell verbessert werden muss.

Die Erfahrungen zeigen: Der Erfolg automatisierter Mobilitätsprojekte hängt nicht allein von der Technologie ab – entscheidend ist das Zusammenspiel aus verlässlicher Infrastruktur, partizipativer Umsetzung und einem realitätsnahen, lernorientierten Projektansatz.

Das Swiss Transit Lab stellt allen Interessierten am automatisierten Fahren eine vierteilige Kurzvideoreihe zum Verein und zum Projekt «STL Linie 13» auf der Plattform [Vimeo](#) zur Verfügung:

- [Der Verein Swiss Transit Lab](#)
- [Das Projekt](#)
- [Technologieakzeptanz](#)
- [Die Erkenntnisse](#)

2 Projektsteckbrief

2.1 Der Projektträger

Der Verein [Swiss Transit Lab](#) (STL) ist eine 2019 gegründete Non-Profit Organisation in Schaffhausen. Das STL ist ein führendes Kompetenznetzwerk zur Entwicklung und Erprobung intelligenter Mobilitätslösungen unter realen Bedingungen. Es bringt Gesellschaft, Wirtschaft, öffentliche Hand und Forschung zusammen, um innovative Mobilitätskonzepte in die Praxis zu überführen.

Das STL erarbeitet Mehrwerte durch seine konkreten Projekte. Allen diesen Projekten ist gemein, dass neue Technologien im öffentlichen Raum und unter realen Bedingungen erprobt werden. Mit den beiden Pilotprojekten zum automatisierten Fahren «[Linie 12](#)» (2018–2019) und «[STL Linie 13](#)» (2023–2024), dem innovativen Vorhaben «[Open Doors](#)» für Personen mit Mobilitätseinschränkungen sowie der Initiative «[ALAUF – Allianz automatisiertes Fahren](#)» für Kantone und Städte hat das STL bereits vier konkrete Projekte realisiert.

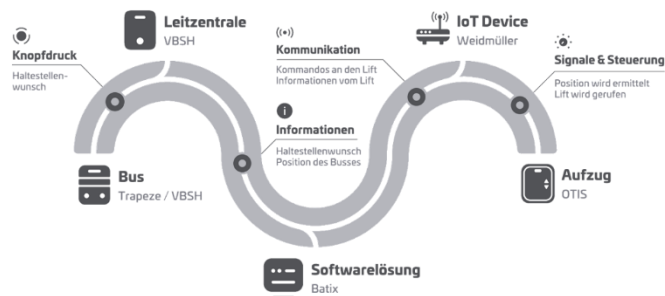


Abbildung 1: Charakteristische Projekte des Swiss Transit Lab. «Linie 12» am Rheinflall (links) und Konzept-Visualisierung von «Open Doors».

Verankert ist das STL im Kanton Schaffhausen. Als Anwendungsregion für die praxisnahe Erprobung innovativer Produkte und Dienstleistungen bietet sich der Kanton bestens an für Pilotprojekte in den Bereichen «Automatisiertes Fahren» und «Mobility as a Service». Durch die überschaubare Grösse der Region sind die Wege zu und zwischen den relevanten Entscheidungsträgern kurz. Eine optimale Voraussetzung für die effiziente Planung und Umsetzung von Projekten wie der «STL Linie 13».

Mit dem Pilotvorhaben «[Automatisierte Mobilität im Furtal](#)» bei Zürich geht das STL gemeinsam mit dem Kanton Zürich und der SBB aktuell den nächsten Schritt und möchte eine Flotte automatisierter Fahrzeuge auf die Strasse bringen. Ein ambitioniertes Vorhaben, welches ohne die Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem Projekt «STL Linie 13» nicht möglich gewesen wäre.

2.2 Die Projektziele

Das Pilotprojekt «STL Linie 13» verfolgte mehrere Ziele, die sich sowohl auf wirtschaftliche, technologische als auch städtebauliche Aspekte beziehen. Das STL hat dafür vier Hypothesen aufgestellt.

Ein Teil der Schaffhauser Buslinien, ausgeführt durch die lokalen Verkehrsbetriebe [Verkehrsbetriebe Schaffhausen \(vbsh\)](#), kann aufgrund hoher Personalkosten und bescheidener Nachfrage nicht kostendeckend betrieben werden. Das erste Pilotprojekt «Linie 12» am Touristenmagnet Rheinflall stiess auf grosses Interesse. Innerhalb kurzer Zeit wurden viele Passagiere transportiert und die Integration der automatisierten Buslinie in das Leitsystem der vbsh erfolg-

reich geschafft. Gleichzeitig zeigte das Projekt aber auch deutlich die Schwächen der damaligen Technologie auf: Das eingesetzte Fahrzeug des Herstellers [Navya](#) war wiederholt nicht einsatzbereit – in der kalten Jahreszeit musste der Betrieb sogar vollständig eingestellt werden.

Mit dem Projekt «STL Linie 13» untersuchte das STL in enger Zusammenarbeit mit den vbsh, ob ein effizienter Betrieb durch den Einsatz neuester Technologien möglich ist. Zum Einsatz kam ein selbstfahrendes Dual-Mode-Fahrzeug des finnischen Technologieanbieters [sensible4](#) auf Basis eines [Toyota ProAce Verso VIP](#). Im Schaffhauser Mühltal sammelte der Verein wertvolle Erkenntnisse zum Betrieb eines automatisierten öffentlichen Kleinbusses im urbanen Raum – im Gegensatz zum touristisch geprägten Rheinfluss. Das Projekt ermöglichte ein vertieftes Verständnis für die Integration automatisierter Fahrzeuge in den Stadtverkehr, insbesondere im Hinblick auf sogenannte First- und Last-Mile-Konzepte, die eine wirtschaftlich tragfähige Erschliessung weniger frequentierter Gebiete an das bestehende Netz erlauben.

Aus technologischer Sicht sollte das Projekt einen Beitrag zur Weiterentwicklung automatisierter Fahrzeuge im öffentlichen Raum leisten. Durch Tests unter realen Bedingungen konnten wertvolle Erkenntnisse zur Praxistauglichkeit und zur Akzeptanz automatisierter Mobilitätslösungen gewonnen werden. Gleichzeitig ist das Projekt eng in die [Smart-City-Strategie der Stadt Schaffhausen](#) eingebettet und dient als Modell für intelligente, digital vernetzte Verkehrslösungen.

Auch ökologische Aspekte spielten bei der Projektkonzeption eine Rolle: Die vbsh betreiben bereits heute eine grosse Flotte elektrisch betriebener Busse. Künftig sollen auch automatisierte Elektrofahrzeuge zur Reduktion von Emissionen beitragen. Das Projekt war daher nicht als kurzfristiger Versuch gedacht, sondern als strategischer Schritt in Richtung einer nachhaltigen Verkehrsplanung – und als Grundlage für künftige Anwendungen und Anschlussprojekte.

In der Erwartung hoher Praxistauglichkeit und technologischer Zuverlässigkeit entschied sich das Swiss Transit Lab für den Einsatz eines Dual-Mode-Fahrzeugs. Diese Technologie erlaubt es, den Kleinbus sowohl automatisiert als auch manuell zu betreiben. Als Basisfahrzeug diente ein Toyota Proace, der vom finnischen Technologiepartner sensible4 mit spezieller Hard- und Software für automatisiertes Fahren ausgerüstet wurde. Die **erste Hypothese** besagt, dass die Dual-Mode-Technologie im Vergleich zu einem speziell für autonomes Fahren entwickelten Shuttle eine bessere Einsatzfähigkeit respektive höhere Verfügbarkeit bietet. Die erwarteten Vorteile liegen insbesondere in der Robustheit des Basisfahrzeugs sowie der einfacheren Manövrierbarkeit.

Der Entscheid für ein Dual-Mode-Fahrzeug spielte auch bei der **zweiten Hypothese** eine Rolle. Diese geht davon aus, dass das vertraute Erscheinungsbild und die gewohnte Funktionsweise des Basisfahrzeugs die Akzeptanz in der Bevölkerung erhöhen. Während viele automatisierte Shuttles ein futuristisches Design (insb. kein Steuerrad) aufweisen, setzt das Projekt bewusst auf ein konventionelles Minibus-Modell, das den Menschen bereits vertraut ist.

Die **dritte Hypothese** betrifft den Automatisierungsgrad des Fahrzeugs. Beginnend auf SAE-Level 3 sollte der Kleinbus im Projektverlauf die Fahreraufgaben stetig besser übernehmen, um schlussendlich nachweislich und vom [Bundesamt für Strassen \(ASTRA\)](#) bestätigt auf SAE-Level 4 zu verkehren. Das bedeutet, dass das Fahrzeug die Busstrecke vollständig automatisiert befahren kann und sich bei potenziellen Gefahren selbstständig in einen sicheren Zustand versetzt – ohne Eingreifen der Begleitperson. Mit dem Pilotbetrieb analysiert das STL, wie oft und in welchen Situationen tatsächlich eingegriffen musste.

Die **vierte Hypothese** bezieht sich auf die Wettertauglichkeit der Technologie. Laut dem Technologiepartner sensible4 sollte das Fahrzeug in der Lage sein, auch unter widrigen Bedingungen wie Schnee, starkem Regen, Nebel oder Eis sicher zu fahren. Diese Wetterbedingungen stellen bis zum Start des Pilotvorhabens im Jahr 2023 für viele automatisierte Fahrsysteme eine grosse Herausforderung dar. In diesem Pilotprojekt wird untersucht, ob das Fahrzeug tatsächlich ganzjährig und bei allen in der Schweiz typischen Wetterlagen zuverlässig funktioniert.

Die Untersuchung dieser vier Hypothesen sollte dabei helfen, den Mehrwert von automatisierten Fahrzeugen im ÖV unter realen Bedingungen zu bewerten und mögliche Herausforderungen zu erkennen. Sollte sich die Dual-Mode-Technologie als zuverlässig und praxistauglich erweisen, könnte sie zukünftig für weitere Anwendungsfälle in grösseren Flotten in der Schweiz zum Einsatz gelangen.

2.3 Der Projektverlauf

Initiiert wurde das Projekt «STL Linie 13» Ende 2020. Der neu formierte Vereinsvorstand des Swiss Transit Labs sah grosses Potenzial darin, die Erkenntnisse aus dem ersten Projekt «Linie 12» in einem Folgeprojekt einzubringen und eine entsprechende Weiterentwicklung anzustreben.

Im Zentrum stand zu Beginn die Wahl einer geeigneten Technologie, da in diesem Bereich die grössten Herausforderungen bei der «Linie 12» bestanden. Das von Grund auf durch die Startup-Firma Navya entwickelte automatisierte Fahrzeug hatte oft allgemeine fahrzeugtechnische und mechanische Probleme, welche nicht oder kaum mit der Technik für das automatisierte Fahren im Zusammenhang standen. Der STL-Vorstand entschied sich somit im Frühling 2021 für die Beschaffung eines Fahrzeugs mit Dual-Mode-Technologie. Bei dieser wird ein handelsübliches Serienfahrzeug mit Komponenten zum automatisierten System aufgerüstet. Mit diesem Ansatz ist davon auszugehen, dass sich technische Herausforderungen im Wesentlichen auf das nachgerüstete System – die Automatisierung mit ihrer Hard- und Software – beschränken. Hierzu gelang eine Kooperation mit dem finnischen Technologiestartup sensible4.



Abbildung 2: Fahrzeugabnahme durch die Experten des Bundesamts für Verkehr (BAV) und das Schaffhausen Strassenverkehrsamt im Depot der Schaffhauser Verkehrsbetriebe vbsh

Gemeinsam wurde das Bewilligungsverfahren¹ für Pilotprojekte entsprechend der Vorgaben des ASTRA initiiert. Dieses wird im Wesentlichen durch drei Bereiche gebildet: 1. Fahrzeugtechnologie, 2. Strecke, 3. Betrieb. In allen drei Bereichen ist Sicherheit das oberste Gebot. Ein erster Entwurf des Gesuchsdossiers wurde im Juni 2022 eingereicht und nach einem mehrstufigen Prüfprozess positiv beantwortet. Einerseits mit der Strassenzulassung des Fahr-

¹ Das hier erwähnte Bewilligungsverfahren steht seit dem Inkrafttreten der neuen «Verordnung über das automatisierte Fahren» am 1. März 2025 auf einer neuen gesetzlichen Grundlage und kann deshalb in wesentlichen Teilen für künftige Vorhaben nicht mehr zutreffend sein.

zeugs durch das [Strassenverkehrsamt Schaffhausen](#) und das [Bundesamt für Verkehr \(BAV\)](#). Und final mit der Verfügung einer Pilotbetriebsbewilligung für automatisiertes Fahren von zwei Jahren durch das Departements Sekretariat des [Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation \(UVEK\)](#) im Februar 2023.

Es folgte eine umfassende Vorbereitung des öffentlichen Betriebs mit der Strecken-Kartierung, Testfahrten – beides durchgeführt von sensible4 – und dem Training der Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer, welche mehrheitlich eigens zu diesem Zweck rekrutiert werden konnten.

Am 28. April 2023 wurde die «STL Linie 13» feierlich durch den Schaffhauser Stadtpräsidenten eröffnet und in Betrieb genommen. Er bestritt gleich selbst die Jungfernfahrt. Der öffentliche Linien-Betrieb startete am Montag, 1. Mai. Von diesem Datum an verkehrte der selbstfahrende Bus an sechs Tagen pro Woche im Schaffhauser Mühlental. Die ersten Betriebswochen verliefen trotz Wetterkapriolen mit mehrfachem Starkregen und Hagel störungsfrei.



Abbildung 3: Zeitstrahl von 2020 bis 2025 mit den Meilensteinen des Pilotprojekts «STL Linie 13».

Diverse regionale, nationale und auch internationale Delegationen besuchten das Pilotprojekt. Erwartungsgemäss war das Interesse in den ersten Monaten sehr hoch und flachte mit der Zeit langsam ab.

Im Juni 2023 – kaum zwei Monate nach Projektstart – wurde das Team überraschend mit der Insolvenz von sensible4 konfrontiert. Dank rascher Reaktion konnte ein Grounding des Projekts verhindert und der Betrieb fortgeführt werden.

Im September 2023 erhielt der selbstfahrende Kleinbus einen neuen Namen. Über eine Wettbewerbsausschreibung erreichten das STL über 60 Namensvorschläge aus der lokalen Bevölkerung. Von allen kreativen Vorschlägen überzeuete der Name «Rhyder».

Parallel zum Betrieb der «STL Linie 13» führte der Verein, unterstützt durch [Swiss Association for Autonomous Mobility \(SAAM\)](#), das STL-Mitglied [UNITY Schweiz AG](#) und eine Marktforschungsagentur, eine Studie zur Akzeptanz automatisierter Mobilität in Schaffhausen durch. Die Datenerhebung erfolgte über mehrere Wochen bis Ende 2023. Eine abschliessende Fokusgruppe mit den Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrern fand kurz vor Abschluss der Studie statt. Die Ergebnispublikation erfolgte im Sommer 2024 (siehe Kapitel 4.2).

Mit Spannung erwartete das Projektteam im Winter 2023 den ersten Schnee. Er traf am 2. Dezember 2023 ein (siehe Titelbild des Berichts) und bereitete dem Betrieb entsprechend der norwegischen Referenzen von sensible4 (Ruter, Oslo) keine Mühe.

Aufgrund der Insolvenz von sensible4 und der ausbleibenden funktionalen Weiterentwicklung der Automatisierungstechnologie, war eine Ausweitung des Betriebs in die Stosszeiten nicht möglich. Hingegen konnten im Januar 2024 der Abendbetrieb und das Verhalten der Technologie bei Dunkelheit getestet werden.

Mit Blick auf die Zukunft und die Realisierung von Projekten ohne Begleitpersonal im Fahrzeug rücken neue Formen der Interaktion mit den Passagieren zunehmend in den Fokus. In diesem Kontext konnte das STL im Winter 2024 in Zusammenarbeit mit der [Commend Schweiz AG](#) ein innovatives Teilprojekt auf den Weg bringen. Durch die Integration der intelligenten Sprachassistentin IVY wurde das Fahrzeug mit einer automatisierten Passagieransprache ausgestattet.

Trotz Insolvenz von sensible4 verkehrte die «STL Linie 13» bis Ende Jahr 2024 ohne grössere Unterbrüche im Schaffhauser Mühltal. Am 12. Dezember 2024 fand in der Stahlgiesserei die **Abschlussfeier** zum erfolgreichen Pilotbetrieb der «STL Linie 13» statt. Am Samstag, 14. Dezember verkehrte «Rhyder» ein letztes Mal im Mühltal. Zwei Monate später lief die Sondergenehmigung des UVEK aus. Mit dem Fahrplanwechsel integrierten die vbsh die Route der «STL Linie 13» in die neue Buslinie 10.

2.4 Die Streckenführung

Die in Abbildung 4 dargestellte Strecke der «STL Linie 13» entlang der Mühltalstrasse verbindet den Bahnhof Schaffhausen (Kreisel Spitalstrasse/Mühltalstrasse) mit dem neuen Stadtteil [Stahlgiesserei](#). Die Gesamtlänge der Pilotstrecke betrug zwei Kilometer und die «STL Linie 13» bediente insgesamt sechs Haltestellen (Hin- und Rückweg). Die maximal erlaubte Geschwindigkeit der anderen Verkehrsteilnehmer auf dem Abschnitt betrug 50 km/h. An einigen Stellen war zudem das Überholen erlaubt bzw. es gab keine Mittellinie. Am Bahnhof führte die Strecke über einen Kreisverkehr. Bei der Stahlgiesserei diente ein grosser Parkplatz als Wendeplatz. Die beiden kritischsten Stellen der Strecke waren die Einfahrt in den Kreisverkehr und das Einbiegen auf die Strasse vom Parkplatz oberhalb der Stahlgiesserei gepaart mit der Querung der Strasse. Die gesamte Pilotstrecke konnte von «Rhyder» automatisiert befahren werden.

Entlang beider Strassenseiten gab es einen Velostreifen (gelb gestrichelt). Mit dem ASTRA, der [Schaffhauser Verkehrspolizei](#) und dem Verein [Pro Velo Schaffhausen](#) vereinbarte das Projektteam eine Ausnahmeregelung. Entgegen der spezifischen Verkehrsregel war es dem automatisierten Fahrzeug erlaubt, permanent ganz rechts auf dem Velostreifen zu fahren. Denn

ein rechtsseitiges Überholmanöver durch eine Velofahrerin oder einen Velofahrer (z.B. mit einem E-Bike) musste aus Sicherheitsgründen ausgeschlossen werden.

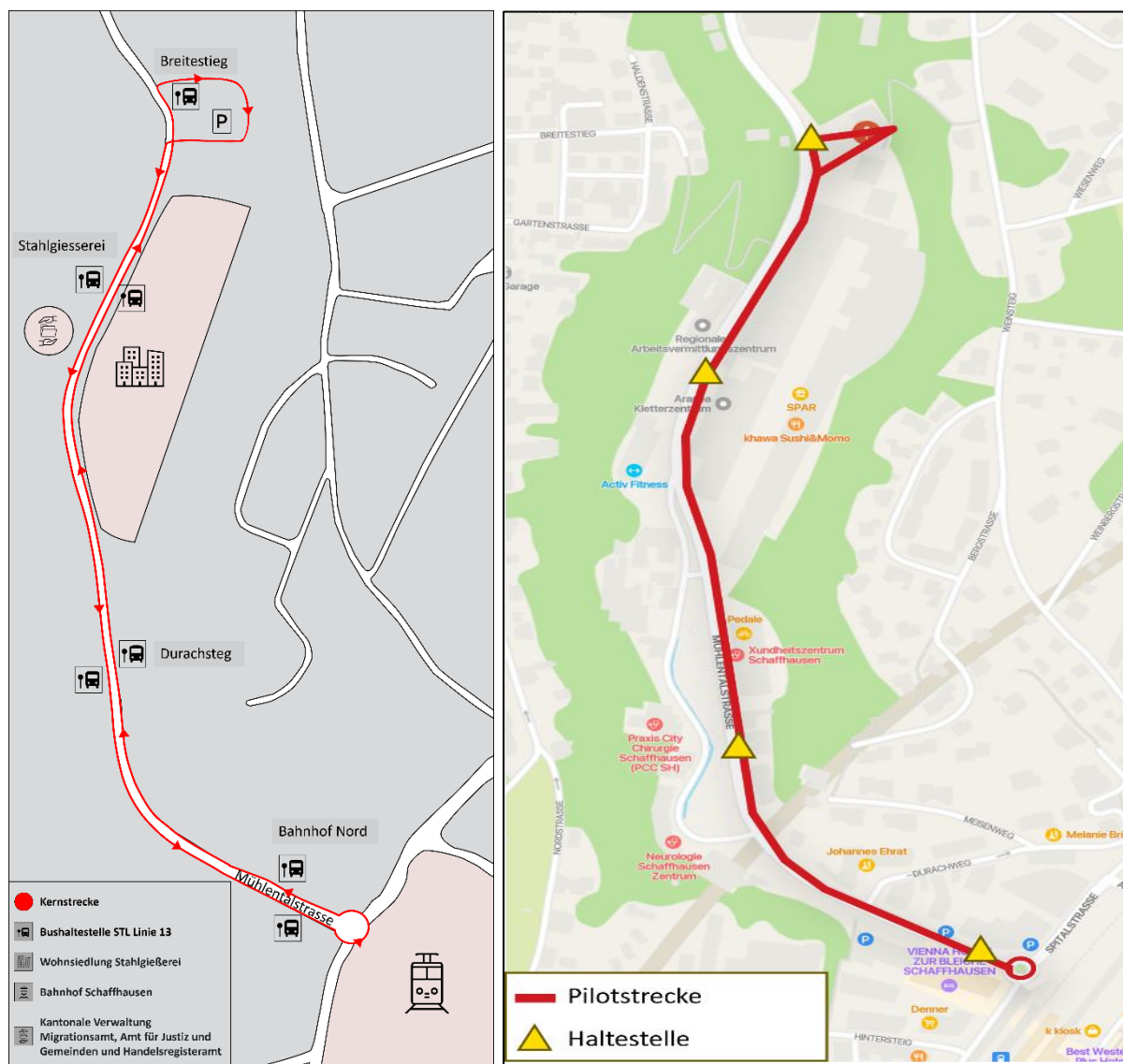


Abbildung 4: Die Pilotstrecke «STL Linie 13» in zwei Ausführungen: schematisch (links) und im Massstabgetreu. Jeweils vom Bahnhof Schaffhausen (rechts unten) zum Stadtteil Stahlgießerei (oben Mitte).

2.5 Der Betrieb

Während der ersten 12 Monate war die automatisierte Buslinie «STL Linie 13» jeweils von Montag bis Samstag zwischen 10.00 und 14.00 Uhr in Betrieb. Im Januar 2024 fand ein zweiwöchiger Testbetrieb am Abend statt – von 19.00 bis 22.00 Uhr. Ab Mai 2024 verkehrte der Kleinbus von Mittwoch bis Samstag. Die Fahrzeiten waren bewusst ausserhalb der Hauptverkehrszeiten angesetzt. Der Betrieb erfolgte nach einem Fahrplan. Dreimal pro Stunde startete «Rhyder» beim Bahnhof Nord die Runde, für die er zwischen 12 und 15 Minuten benötigte. An jeder Haltestelle hielt der Bus an, unabhängig davon, ob jemand zu- oder aussteigen wollte. «Rhyder» war noch nicht in der Lage, zu erkennen, ob Passagiere an den Haltestellen auf den Bus warteten. Zudem gab es noch keine Kommunikationsmethode, wie die Passagiere dem Bus mitteilen konnten, dass sie aussteigen möchten.

Den Betrieb plante und koordinierte das Schaffhauser Unternehmen [Weder Transport](#). Es wirkte die Rekrutierung der Begleitpersonen ab, erstellte die monatlichen Schichtpläne und kümmerte sich um die arbeitsrechtlichen Aufgaben. Ausserdem war Weder Transport zuständig für die Leitstelle der «STL Linie 13» im Fall von sicherheitsrelevanten Vorkommnissen auf

der Strecke. Am Betrieb beteiligten sich auch die [Verkehrsbetriebe Zürich \(VBZ\)](#), indem sie Fahrpersonal sowie die Haltestellenschilder zur Verfügung stellten.

Der Toyota Minibus mit sensible4-Technologie bot Platz für fünf Passagiere – zuzüglich der Begleitperson auf dem Fahrersitz. Über ein Tablet erfassten die Begleitpersonen an jeder Haltestelle die Fahrgastzahlen. Die entsprechende Applikation stammte von STL-Vereinsmitglied [p2data](#). Die Platzverhältnisse im Bus erlaubten die Mitnahme von Gepäck wie beispielsweise Ski, Snowboards, Koffer, Einkaufstaschen oder Haustieren (z.B. Hunde).

Der Verein Swiss Transit Lab stellte das Angebot kostenlos und ohne Ticket zur Verfügung. Das war möglich, da die «STL Linie 13» keine konzessionierte Buslinie war und von der öffentlichen Hand sowie privaten Sponsoren gefördert wurde.



Abbildung 5: Ein Haltestellenschild mit Informationen zu automatisiertem Fahren, zum Projekt, dem Fahrplan (rechts oben) und dem Zugang zu den aktuellen Informationen (QR-Code), welche jeweils tagesaktuell auf der STL-Website publiziert wurden.

Um die Sicherheit für Passagiere und andere Verkehrsteilnehmende zu gewährleisten, befand sich während des gesamten Pilotbetriebs ein Sicherheitsfahrer oder eine Sicherheitsfahrerin mit entsprechender Ausbildung im Cockpit. Das Sicherheitspersonal war stets in Bereitschaft, manuell Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen, falls es die Gegebenheiten oder das Verhalten der automatisierten Technologie erforderte.

Direkte Ansprechperson für die Fahrgäste war ebenfalls das Sicherheitspersonal. Ab April 2024 kam zudem die intelligente Sprachassistentin IVY der Commend Schweiz AG zum Einsatz. So wurden die Reisenden beispielsweise von IVY zum Einstieg willkommen geheissen. Mit Hilfe eines Audio-Systems und eines KI-Bots im Hintergrund konnten die Fahrgäste Fragen zur «STL Linie 13» stellen und erhielten entsprechende Auskünfte. Darüber hinaus bot IVY auch allgemeine Informationen an, zum Beispiel zum aktuellen Wetter. Die Lösung trägt ausserdem dazu bei, die Anforderungen und Bedürfnisse der Fahrgäste besser erfassen und das Angebot laufend anpassen zu können – besonders dann, wenn künftig kein Sicherheitspersonal mehr im Fahrzeug unterwegs ist.

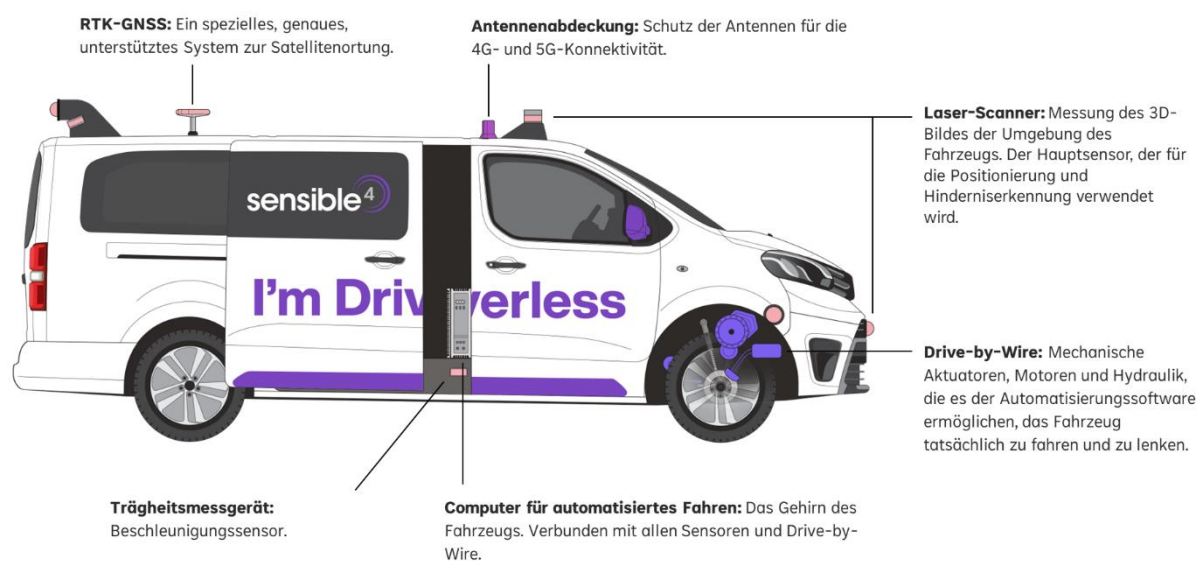
2.6 Die Technologie

Der Kleinbus der «STL Linie 13» basierte auf einem handelsüblichen Elektrofahrzeug des Typs Toyota Proace Verso Electric VIP, das mit der Technologie für automatisiertes Fahren des Technologiepartners sensible4 ausgestattet worden war. Man spricht bei dieser Technologie von einem sogenannten «Dual-Mode-System». Dual-Mode bedeutet, dass das Fahrzeug sowohl automatisiert als auch manuell gefahren werden kann. Es verfügt über ein herkömmliches Cockpit eines handelsüblichen Serienfahrzeugs. In der Schweiz war vor der «STL Linie 13» noch nie ein Dual-Mode-Fahrzeug zum Einsatz gekommen. Obwohl es technisch möglich gewesen wäre, bis zu 60 km/h zu fahren, war «Rhyder» für dieses Pilotprojekt in beiden Modi (manuell und automatisiert) auf 30 km/h limitiert. Obschon diese Geschwindigkeit als gering erscheinen mag, stellte sie zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme einen Meilenstein automatisierten Fahrens in der Schweiz dar. Frühere Pilotfahrzeuge bewegten sich mit Höchstgeschwindigkeiten bis 22 km/h.

Um ein Fahrzeug mit der Technologie für automatisiertes Fahren aufzurüsten, werden drei Systemteile benötigt:

Drive-by-Wire-System (DbW) – Dieses System erlaubt, dass sämtliche Fahrfunktionen – Lenkung, Beschleunigung und Bremsen – durch ein zentrales Steuersystem kontrolliert werden, anstatt durch eine Person und eine mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Rädern. Im Fall von «Rhyder» handelte es sich um einen Nachrüst-Bausatz aus dem Motor-Rennsport. Bei Serienfahrzeugen neuester Generation – insbesondere solchen mit Spurhalte-assistenten – ist ein DbW bereits serienmässig verbaut.

Sensor-System – Das Sensorsystem erlaubt dem Fahrzeug sich in seiner Umgebung zu orientieren und andere Verkehrsteilnehmenden zu erfassen. sensible4 hat bei der «STL Linie 13» zwei redundante Systeme verbaut – eines mit mehreren LIDAR-Sensoren (Distanzmessung mittels Laser) sowie eines mit mehreren Radar-Sensoren (Distanzmessung mittels Radars). Beide Technologien haben Vor- und Nachteile, speziell bei unterschiedlichen Wetter-Bedingungen. «Rhyder» nutzte nur das LIDAR-System. Eine Verschmelzung und Nutzung der Vorteile beider Systeme hätte die beste Funktionalität und Sicherheit geboten. Beim Start der «STL Linie 13» arbeiteten die Entwickler von sensible4 intensiv an der Verschmelzung. Eine Implementierung war geplant, blieb aber aufgrund der Insolvenz von sensible4 aus.



Quelle: <https://sensible4.fi/>

Abbildung 6: Schematische Darstellung der wichtigsten Umbau-Komponenten am Serien-Fahrzeug von Toyota, welche sensible4 zum Zweck des automatisierten Fahrens aufgerüstet hat.

Zusätzlich zu den LIDAR-Sensoren wurde die Fahrzeugposition über ein spezielles Real-Time-Kinematik-System RTK (allgemein GPS oder GNSS) erfasst und damit entsprechend die Streckenführung sichergestellt.

Steuerungs-Hardware und -Software – Die Sensordaten werden in Echtzeit im Fahrzeug von einem leistungsstarken Computer bearbeitet. Auf Basis der Daten wird eine «virtuelle Realität» erstellt und daraus wiederum die nötigen Handlungsoptionen sowie der Handlungsentscheid abgeleitet. Um die Komplexität zu vereinfachen, wird eine Art Normfall definiert. Dieser umfasst eine virtuelle Fahrspur, die Verkehrsregeln, die Haltepunkte sowie ein passendes Geschwindigkeitsprofil entlang der gesamten Strecke. Der Normfall wird im Rahmen der Vorbereitungsarbeiten unter dem Begriff «Mapping» oder «Kartierung» erfasst, optimiert und einprogrammiert. Kritische Bereiche, wie Fussgängerstreifen, Kreuzungen oder der gesamte Kreisverkehr, werden als «Zones of Interest» definiert und einprogrammiert. In diesen Zonen können die Entwickler dem Fahrzeug besondere Verhaltensregeln vorschreiben, wie beispielsweise Anhalten oder Abbremsen.

Die Software bzw. der Algorithmus zur Verarbeitung und Interpretation von Sensordaten in virtuelle Realität sowie zur Ableitung von Fahrentscheidungen bildet das Herzstück der Technologie jedes Anbieters im Bereich des automatisierten Fahrens. Im Fall von sensible4 zeichnet sich dieser Algorithmus durch eine herausragende Darstellung der virtuellen Umgebung aus, weist jedoch gleichzeitig funktionale Schwächen bei der Ableitung konkreter Handlungen auf (mehr dazu in den Kapiteln 2.7 und 4.3).

2.7 Die Daten

Mit dem Betrieb der «STL Linie 13» wurden diverse Datenpakete generiert. Die nachfolgende Aufstellung gibt eine Übersicht der Datenquellen und ihres Informationsgehalts.

Für den Support von Technologie und Betrieb sowie für die Betriebsauswertung war eine Reihe von IT-Lösungen notwendig. In der Mehrheit wurden sie so ausgelegt, dass sie als Datenlieferant für einen «Data Lake» dienten. Der Data Lake ist ein zentraler Ablageort, an dem alle strukturierten und unstrukturierten Daten in beliebigem Umfang gespeichert werden. Daten können im Ist-Zustand gespeichert werden, ohne sie erst strukturieren zu müssen.

Die Datenpakete, einschliesslich der Sensorrohdaten, die zur Erstellung der virtuellen Umgebung und der Ableitung von Handlungen verwendet wurden, wurden nach ihrer Erzeugung und Bearbeitung für einen begrenzten Zeitraum von 30 Minuten lokal im Fahrzeug gespeichert und anschliessend gelöscht. Im Falle eines Ereignisses waren sie somit abrufbar. Aufgrund des hohen Datenvolumens hätte eine kontinuierliche Speicherung den Data Lake schnell überlastet. Daher wurden regelmässig relevante Auszüge dieser Daten, die zur Auswertung der gefahrenen Distanzen, der Modusbestimmung und der Erfassung von Störungen oder Fehlern erforderlich waren, übertragen und im Data Lake abgelegt.

Die Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer füllten nach jeder Schicht einen Tagesrapport aus. Dieser enthielt Fragen zu Wetter, Strassenzustand, Verkehrsaufkommen, Passagierzahlen und speziellen Ereignissen. Alle Daten flossen ebenfalls in den Data Lake ein.

Alle Systeme wurden gegen unbefugten Zugriff auf die Daten abgesichert (Cyber Security). Zu den ergriffenen Massnahmen gehörten: Berechtigungskonzepte auf Basis des „Need to Know“-Prinzips, Schutz der Server vor DDoS-Attacken, Absicherung der Server gegen unberechtigte Zugriffe durch Firewalls, Nutzung von VPN-Zugängen sowie der Einsatz von Verschlüsselungsmechanismen.

Die intelligente Sprachassistentin IVY war von Beginn an, von allen anderen Systemen getrennt, wodurch die Daten anderer Systeme nicht eingesehen werden konnten. Dies bedeutet, dass IVY als ein separates und unabhängiges System konzipiert wurde, das keine direkte Verbindung zu anderen Systemen hatte und somit nicht auf die Daten anderer Systeme zugreifen konnte. Diese Trennung trug aktiv zur Datensicherheit und dem Schutz der Fahrgästedaten bei.

Tabelle 1: Datenquellen und Datenpakete, welche im Zusammenhang mit dem Betrieb der «STL Linie 13» generiert und teilweise in einen Data Lake einfließen.

Quelle	Datenpaket	Eingang Data Lake
Fahrzeug Toyota	- Fahrkilometer - Geschwindigkeit - Toyota ODB	*
Automatisierungstechnologie sensible4	- Positionsdaten / Ortung - Sensordaten (Rohdaten) - Virtuelle Umwelt (verarbeitet) - Abgeleitete Handlungen - Modus (manuell/automatisiert) - Störungsprotokoll	* *
Sicherheitsfahrperson	- Fahrgastzählung - Tagesrapporte - Ereignisrapporte - Informelle Umfragen	* * * *
Passagiere und allgemeine Bevölkerung	- Schwarmdialog mit BrainE4 - Technologie-Akzeptanzstudie - Passagier-Umfragen - Dialoge mit KI-Assistentin IVY	* * * *
Verfügbare Open Source Data (Können im Zusammenhang mit dem Projekt interessant sein, wurden aber nicht systematisch ausgewertet)	- Wetterdaten - Echtzeit-Verkehrszahlen - Umgebungsveränderungen (z.B. Satellitendaten) - Ereignisdaten aus der Welt des automatisierten Fahrens	*

Im Rahmen des Projekts wurden wenige sensible Daten im Sinne des Datenschutzgesetzes erfasst. Quellen von Personendaten waren: Name des Sicherheitsfahrers (Rapporte) und persönliche Daten (E-Mail-Adresse, Name, Vorname) für Wettbewerbsumfragen. Sie wurden unter entsprechenden Einverständniserklärungen erhoben.

Im Zusammenhang mit der Technologie für automatisiertes Fahren wurden keine Daten erhoben, welche Rückschlüsse auf Individuen ermöglicht hätten (z.B. keine Kamerabilder).

2.8 Die Funktionalität

«Rhyder» fuhr auf einer vorbestimmten «virtuellen Schiene» die Pilotstrecke im Mühlental ab (siehe violette Linie auf dem Screen in Abbildung 7). Abweichungen von dieser «Schiene» waren bei der vorliegenden Software-Version nicht möglich. Die Ableitung und Wahl von alternativen Routen respektive Fahrspuren, die z.B. ein Ausweichmanöver innerhalb der Fahrbahn ermöglicht hätte, befand sich zum Zeitpunkt der Insolvenz von sensible4 in Entwicklung. Als Folge dieser fehlenden Funktion hielt «Rhyder» jeweils an, wenn beispielsweise ein Fahrzeug am rechten Strassenrand zum Warenumschiag geparkt war. Das «Hindernis» musste durch Abwarten oder einen Eingriff der Sicherheitsfahrperson überwunden werden.

Die Automatisierungstechnologie von sensible4 war jederzeit in der Lage auf sich nähernde Objekte sicher zu reagieren. Objekte über einer bestimmten Grösse (50 cm, Szenario Kleinkind) wurden als Gefahrenpotenzial identifiziert und entsprechend proaktiv beobachtet. Dazu wurde die (virtuelle) Umgebung des Fahrzeugs vom Algorithmus in Zonen verschiedener Gefahrenstufen rund um das Fahrzeug eingeteilt: grün, Objekt erfordert (noch) keine Reaktion; orange, Verlangsamung der Geschwindigkeit; rot, unverzügliches Stopp-Manöver.

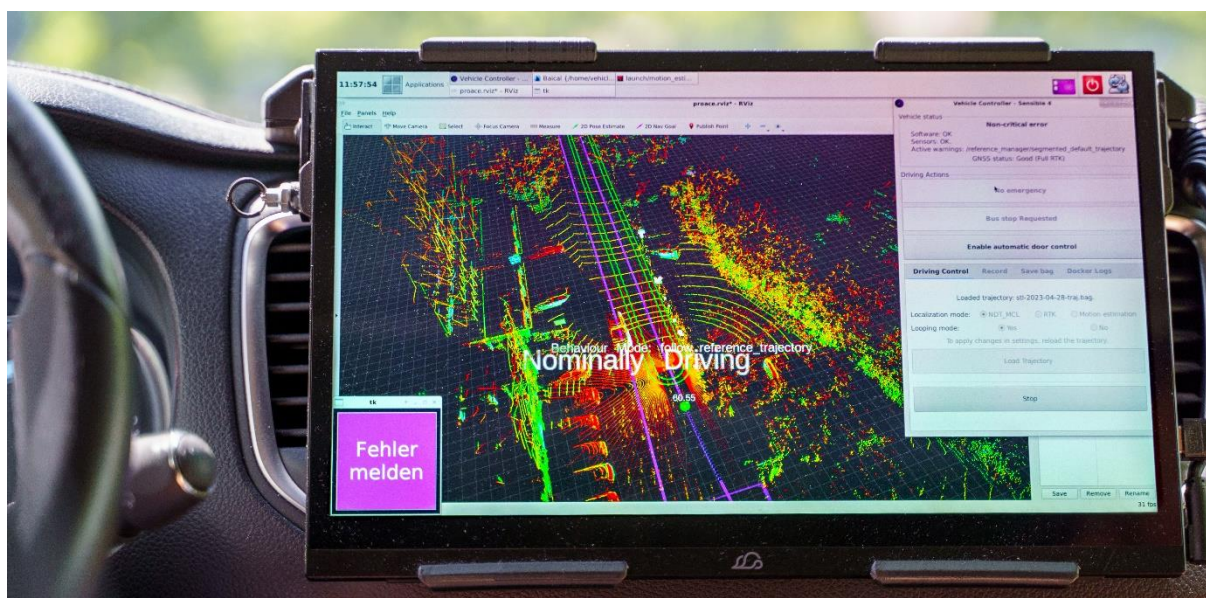


Abbildung 7: Graphische Darstellung der Echtzeitauswertung der Sensordaten im Fahrzeugcockpit mit dem Fahrzeug (schwarzer Quader mit grünem Punkt, unterhalb Bildmitte), der virtuellen Schiene (violette Linie), anderen Verkehrsteilnehmern (entgegenkommendes Fahrzeug unmittelbar vor Kreuzungsmanöver) und der stehenden Umgebung (diverse Objekte und Farben).

Ähnlich wie das Ausweichen, war auch die Interpretation (Fussgänger oder parkiertes Auto) und Antizipation (Bewegung, Richtung und Geschwindigkeit) von gefährlich grossen Objekten durch sensible4 geplant, aber noch nicht implementiert. Die Sicherheit wurde entsprechend durch genügende Abstände/Margen gewährleistet.

Über ein Human-Machine Interface (HMI) konnte die Begleitperson vom manuellen in den automatisierten Betrieb umschalten. Die Umschaltung vom automatisierten in den manuellen Modus (Übernahme der Fahrzeugkontrolle durch eine Person) erfolgte entweder durch einen bestimmten Eingriff ins Lenkrad oder die starke Betätigung der Bremse bzw. des Notfallschalters (Buzzer) in der Mittelkonsole. Betätigte das Fahrpersonal die Bremse hingegen nur leicht, bremste «Rhyder» zwar ab, schaltete aber nicht in den manuellen Modus um.

Aus bewilligungsspezifischen Gründen wurde «Rhyder» technisch auf eine maximale Geschwindigkeit von 30 km/h begrenzt (im automatisierten sowie manuellen Modus). Gemäss Angabe und Referenz von sensible4 wäre ein sicherer Betrieb mit doppelter Geschwindigkeit (60 km/h) möglich gewesen. Nach Angabe von sensible4 wäre ein Tempo von 120 km/h möglich gewesen. Entsprechende Tests und Referenzen fehlten jedoch.

2.9 Die Projektorganisation

Die Projektorganisation der „STL Linie 13“ orientierte sich an der Grundhaltung des STL und setzte auf die Zusammenarbeit verschiedener Akteure aus unterschiedlichen Bereichen. Diese Akteure, die jeweils allein nicht in der Lage gewesen wären, ein solches Projekt zu realisieren, übernahmen spezifische Verantwortlichkeiten.

Der Verein fungierte als übergeordnete Plattform, Projektträger und stellte die Projektleitung sicher. Letztere koordinierte die Beteiligten, sorgte für den Wissenstransfer und stellte die Verbindung zu Behörden, Unternehmen und Forschungseinrichtungen her.

Die Hierarchie des Projekts war sehr flach. Strategisch bedeutsame Entscheidungen wurden vom Vereinsvorstand getroffen. Das Projektteam arbeitete eigenverantwortlich und übernahm die Projektumsetzung. Die vbsh spielten eine wichtige Rolle im Aufbau und der Relevanz des Pilotprojekts für den öffentlichen Verkehr. Sie übernahmen zudem Wartung und technische Unterstützung für das Fahrzeug, stellten Infrastruktur zur Verfügung und brachten ihre ÖV-Expertise in den operativen Betrieb ein.

Der Technologiepartner sensible4 stellte den Fahrzeugumbau sicher, entwickelte die Steuerungssoftware, stellte die Sensorik und Fahrzeugtechnik bereit und unterstützte die Implementierung der automatisierten Fahrlösung in einem OEM-Fahrzeug.

Das private Unternehmen Weder Transport war für den operativen Betrieb der «STL Linie 13» verantwortlich. Es rekrutierte und disponierte das Sicherheitsfahrpersonal, organisierte die Betriebsabläufe und sorgte für einen zuverlässigen Fahrbetrieb. Die Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) unterstützten Weder Transport durch personelle Unterstützung.

Es gab mehrere weitere Akteure, die – zumindest zeitweise – fester Bestandteil des Projektteams waren. In Tabelle 2 sind diejenigen aufgeführt, die das Projekt über die gesamte Dauer oder zumindest über längere Strecken hinweg begleitet haben. Hinweis: In Kapitel 9 findet sich eine Danksagung mit allen Akteuren und Sponsoren, welche zum Gelingen der «STL Linie 13» beigetragen haben.

Tabelle 2: Das Projektteam (Kernteam) mit Akteuren, Funktionen und Anzahl involvierter Personen (ungleich VZE)

Akteur	Funktion / Rolle	Anzahl Personen
Verein Swiss Transit Lab	Projektträger	
Vorstand Swiss Transit Lab	Entscheider, Repräsentation, Netzwerk	4-6
generis AG	Projektleitung	2-4
sensible4	Technologielieferant, techn. Support	3-5
Weder Transport	Operativer Linienbetrieb / Sicherheitsfahrpersonal	6-8
vbsh	Konzeption, Garagierung, Unterhalt, techn. Support	1-5
VBZ	Sicherheitsfahrpersonal	2
Batix Schweiz	IT-Systeme und Datenmanagement	1
UNITY Schweiz AG	Teilprojekt Technologieakzeptanz	2

3 Betriebsbericht

In diesem Abschnitt erfolgt der Bericht zum Betrieb der «STL Linie 13». Es werden sämtliche Arbeiten, Kennzahlen, Erfahrungen und Erkenntnisse vom Zeitpunkt des Erhalts der Sondergenehmigung für den Pilotbetrieb bis zum Abschluss des Pilotprojekts zusammengefasst. Eine Bewertung der Erkenntnisse und Erfahrungen sowie die Beurteilung der Hypothesen erfolgt im nächsten Kapitel.

3.1 Inbetriebsetzung

Im Februar 2023 stellte das UVEK dem STL die für zwei Jahre gültige Sondergenehmigung für den Pilotbetrieb der «STL Linie 13» aus. Ab diesem Zeitpunkt lag dem STL auch die Strassenzulassung für den selbstfahrenden Kleinbus vor. So konnte das Projektteam umgehend mit den letzten Vorbereitungen für den öffentlichen Betriebsstart beginnen.

Noch im Februar 2023 reiste ein Team von sensible4 nach Schaffhausen, um die Teststrecke zu erfassen. Die Techniker fuhren die Strecke mehrfach manuell ab und dokumentierten alle relevanten Daten, die später für den automatisierten Betrieb benötigt wurden. Sie programmierten Haltestellen, Sicherheitszonen (wie Fussgängerstreifen, Abzweigungen, Kreisverkehre und Einfahrten), das Anfahr- und Bremsverhalten sowie die Fahrlinie, damit der Kleinbus im automatisierten Modus so gleichmässig und ruhig, wie ein manuell gesteuertes Fahrzeug fahren konnte. Der Mapping-Prozess zog sich über mehrere Wochen und erforderte zahlreiche Wiederholungen, bis das Fahrverhalten optimiert war.

Parallel dazu rekrutierte Weder Transport die Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer. Ihre Ausbildung begann Mitte März 2023 und umfasste sowohl theoretische als auch praktische Module, die auf einem gesperrten Areal und auf der öffentlichen Teststrecke durchgeführt wurden. sensible4 führte Eignungstests durch, die erfolgreich bestanden werden mussten. Am Ende des Trainings erhielten insgesamt neun Personen die Zulassung zum Sicherheitsfahrer bzw. zur Sicherheitsfahrerinnen. Die Trainingsphase erstreckte sich über mehrere Wochen, was auch darauf zurückzuführen war, dass nur ein einziges Fahrzeug zur Verfügung stand.

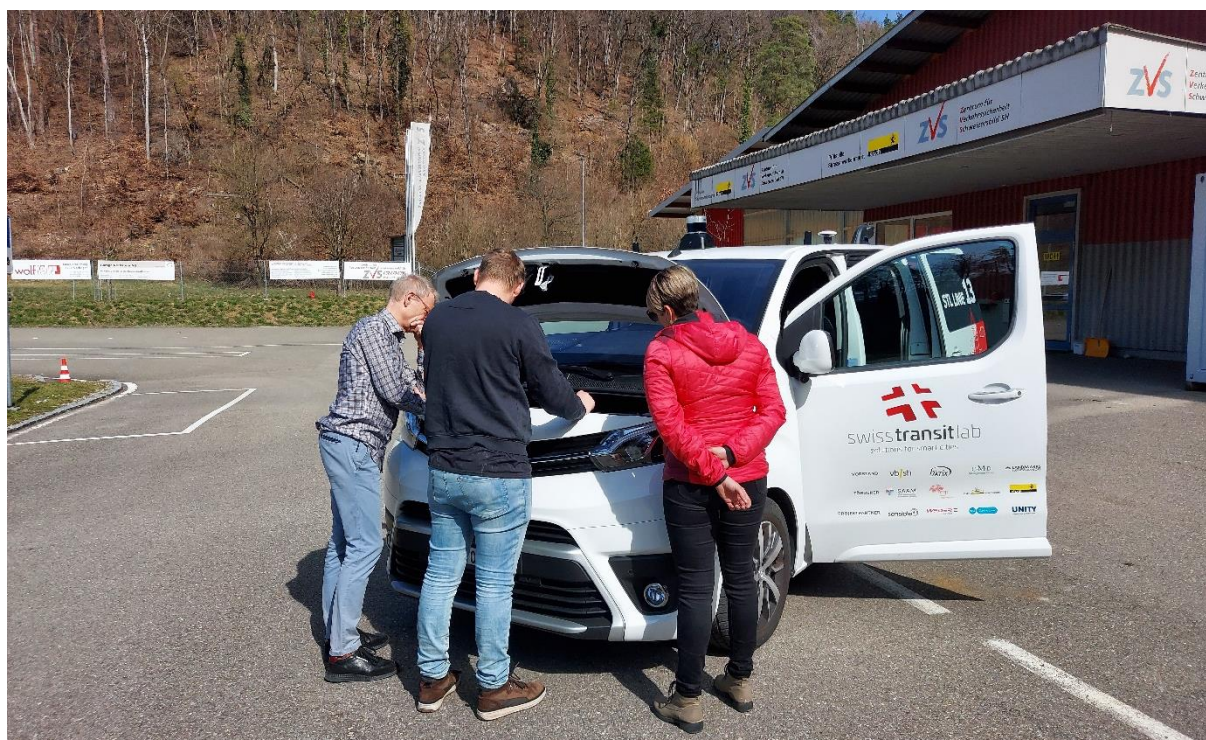


Abbildung 8: Praktische Schulung der Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer auf dem gesperrten Testgelände.

Das STL war derweil mit der Kommunikation und Information der Schaffhauser Bevölkerung befasst. An jeder Haltestelle wurde ein Haltestellenschild mit den wichtigsten Informationen für die Passagiere aufgestellt. Weiter instruierten die Projektverantwortlichen sämtliche Betriebspartner über Betriebsabläufe, Sicherheitsvorkehrungen und Kommunikationskanäle. Die Fahrpläne wurden mit der vbsh abgestimmt, damit die «STL Linie 13» nicht mit dem Linienbus 23 konfligierte. Weitere Stakeholder, wie die Stadtpolizei, wurden über den bevorstehenden Betrieb informiert.

Die gesamten Vorbereitungen nahmen rund drei Monate in Anspruch, bis die «STL Linie 13» am 28. April 2023 den Betrieb aufnehmen konnte.

3.2 Ereignisse und Besonderheiten ohne Betriebseinschränkungen

Vom ersten Betriebstag an funktionierten die Software, das Fahrzeug und die Betriebsabläufe einwandfrei. An sechs Tagen pro Woche verkehrte der selbstfahrende Bus während vier Stunden zuverlässig im Mühlental. Die Technologie des Dual-Mode-Fahrzeugs erwies sich von Beginn an als sehr robust und zuverlässig. Über die gesamte Betriebszeit hinweg lag die technische Verfügbarkeit im Durchschnitt bei über 95%. «Technische Verfügbarkeit» bedeutet, dass sämtliche für den Betrieb notwendigen technischen Komponenten des Fahrzeugs funktionierten. Mechanische Probleme traten keine auf. Vereinzelt kam es zu **Systemausfällen**. Diese ereigneten sich meist, wenn das Fahrzeug zuvor im automatisierten Modus eine **Vollbremsung** machte. In diesen Fällen entschied «Rhyder» aus Sicherheitsgründen nicht selbst, ob er weiterfahren konnte. Daher mussten die Begleitpersonen dem Fahrzeug die Anweisung zum Weiterfahren geben. Dies funktionierte nicht immer reibungslos. Die Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer mussten zunächst die Software herunterfahren und neustarten, um das Problem zu beheben. Die dadurch entstandenen Betriebseinschränkungen bewegten sich jedoch im Bereich von wenigen Minuten. Das Problem trat etwa zwei bis drei Mal pro Woche auf.

Als relevanter erwiesen sich äussere saisonale Faktoren. Im Mai und Juni 2023 stellten die Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer fest, dass **schnell wachsende Gräser und Büsche** entlang der Pilotstrecke in die Sicherheitszone des Fahrzeugs reichten. Das System interpretierte diese als Hindernis in der Gefahrenzone und reduzierte die Geschwindigkeit auf 10 km/h, was den Verkehrsfluss behinderte. Als Gegenmassnahme programmierte sensible4 die Fahrlinie neu und mit etwas mehr Abstand zu den Grünzonen. Aber auch der neue Abstand reichte nicht, um das Verlangsamen aufgrund der Büsche und Gräser zu verhindern. Eine weitere Vergrösserung des Abstands war nicht möglich, weil sonst die Gefahr von rechts überholenden Fahrrädern bestanden hätte. Auf Anfrage bei Grün Schaffhausen, ob die Büsche und Gräser zurückgeschnitten werden könnten, kam eine negative Antwort, da es sich um ökologische Ausgleichsflächen handelte, die nur zu vorgeschriebenen Zeitpunkten geschnitten werden dürfen. Das Problem bestand bis Mitte Juni 2023.

Ein weiterer äusserer Störfaktor waren **Überholmanöver durch andere Verkehrsteilnehmende**. Das Fahrzeug interpretierte knapp überholende Autos als Hindernis, was zu abrupten Bremsmanövern führte. Diese Bremsvorgänge waren für Insassen unangenehm und stellten für nachfolgende Fahrzeuge ein potenzielles Risiko dar. Solche Manöver traten häufig auf, da die «STL Linie 13» deutlich langsamer als die erlaubten 50 km/h unterwegs war. Im September 2023 kam es in der Folge zu einem leichten Auffahrunfall (siehe Kapitel 3.3). Als Präventionsmassnahme vergrösserte das STL die Aufschrift «Abstand halten» am Heck des Kleinbusses.

Im Herbst machten sich erneut saisonal bedingte Einflüsse bemerkbar. Das automatisierte System interpretierte **herabfallende Blätter oder durch Windböen aufgewirbeltes Laub** als Hindernisse, wodurch das Fahrzeug abrupt abbremsste. Da die Bremsmanöver nur schwer voraussehbar waren, bestand die einzige Gegenmassnahme darin, dass die Passagiere vorzeitig auf die Möglichkeit einer Vollbremsung hingewiesen wurden. Das Problem bestand während ungefähr zwei Wochen.

Anfang Dezember 2023 brachte der Wintereinbruch viel Neuschnee nach Schaffhausen. Auf den Betrieb der «STL Linie 13» hatte die **schneebedeckte Fahrbahn** keinen direkten Einfluss. Da der Bus stets mit 30 km/h unterwegs war, war das Fahrverhalten den Umständen angemessen. Zu kleinen Störungen führten dagegen die **Schneehaufen**, welche von den Räumungsfahrzeugen verursacht wurden. Sie erreichten teils eine gewisse Grösse, ab der sie das System als Hindernis eingestuft. Die Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer mussten vereinzelt manuell eingreifen, weil der Bus abbremste oder ganz anhielt.

Im Januar 2024 führte das STL ein testweiser **Abendbetrieb** der «STL Linie 13» durch, um das selbstfahrende System auch bei Dunkelheit zu testen. Zusammen mit den Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrern machte das STL im Anschluss eine Auswertung. Obwohl das Passagieraufkommen zu den Abendstunden höher war als zu den Mittagszeiten, entschied man sich gegen eine Veränderung der Betriebszeiten. Eine Verlagerung des Betriebs in die Morgen- und Abendstunden hätte möglicherweise positive Auswirkungen auf die eher tiefen Passagierzahlen gehabt. Allerdings erachteten die Begleitpersonen das höhere Verkehrsaufkommen als Hindernis für einen durchgängigen Betrieb des selbstfahrenden Systems. Tage mit höherem Verkehrsaufkommen hatten in der Vergangenheit gezeigt, dass der selbstfahrende Bus an seine Grenzen kommt.

Am 29. April 2024 feierte die «STL Linie 13» das einjährige Jubiläum. Trotz Konkurs von sensible4 lief das System weiterhin einwandfrei. Jedoch gab es Anpassungen bei den Betriebszeiten. Aufgrund von zwei abtretenden Begleitpersonen **reduzierte das STL die Anzahl Betriebstage** pro Woche von sechs auf vier. Ab Mai 2024 verkehrte der Bus noch von Mittwoch bis Samstag.

3.3 Ereignisse mit Betriebseinschränkungen

Sicherheitsrelevante Vorkommnisse sowie Ereignisse, welche zu einer Betriebseinschränkung geführt haben, mussten durch die Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer entsprechend dokumentiert werden. Bei den sicherheitsrelevanten Ereignissen war zudem ein Vorgehen gemäss Sicherheitskonzept erforderlich.

Im September 2023 kam es zum einzigen sicherheitsrelevanten Vorkommnis im gesamten Projektverlauf. Als ein überholendes Fahrzeug zu knapp vor der «STL Linie 13» wieder einspurte, bremste der Bus ab. Der Fahrzeugführer des dahinterfahrenden Autos reagierte zu spät und **touchierte den Bus** leicht an der linken Stossstange. Personen sind nicht zu Schaden gekommen. An «Rhyder» entstand ein leichter **Sachschaden an der Stossstange**, welcher jedoch keine Auswirkungen auf das automatisierte System hatte. Der Betrieb der «STL Linie 13» konnte noch am selben Tag wieder aufgenommen werden. Zur Sensibilisierung der anderen Verkehrsteilnehmenden nahm das STL eine Neubeschriftung am Heck des Fahrzeugs vor mit dem Hinweis, genügend Abstand zu halten.

Zu zwei grösseren Software-Fehlern kam es im Oktober und November 2023. Zwei **technische Systemfehler** führten zu Betriebsausfällen von sieben bzw. zwei Tagen. Am 7. Oktober 2023 liess sich die Software nach einem Neustart des Computers nicht mehr aufstarten. Nachdem das STL einen mechanischen Defekt ausschliessen konnte, nahm es Kontakt mit ehemaligen Mitarbeitenden von sensible4 auf, um das Problem zu lösen. Es stellte sich heraus, dass gewisse Dateien automatisch gesperrt worden waren und dies das Aufstarten der Software blockierte. Nachdem das Problem lokalisiert worden war, konnte es relativ einfach behoben werden. Zu einem zweiten Ausfall kam es am 7. November 2023. Der Computer liess sich nicht mehr hochfahren. Der Fehler lag an einem überfüllten Linux-Speicher-Medium, welches manuell geleert werden musste. Durch ein regelmässiges präventives Leeren des Speichers verhinderte das STL künftige Störungen.

Am Samstag, 27. Juli 2024 trat eine Stunde vor Betriebsende **weisser Dampf/Rauch** aus dem Fussraum auf der Fahrerseite des Fahrzeugs aus. Der Sicherheitsfahrer reagierte, indem er das automatisierte System herunterfuhr. Die Dampfentwicklung stoppte sofort und trat anschliessend nicht mehr auf. Nach Rücksprache mit der Betriebszentrale wurde der Betrieb für

diesen Tag eingestellt und das Fahrzeug ins Depot gebracht. Eine Begutachtung des Fahrzeugs durch sachverständige Personen und drei Testfahrten im manuellen und automatisierten Modus zeigten kein abnormales Verhalten des Fahrzeugs oder des Systems von sensible⁴. Das Projektteam der «STL Linie 13» entschied sich, den Betrieb am Mittwoch, 31. Juli planmässig wiederaufzunehmen. Nach dem Vorfall wurde das besagte Phänomen nicht erneut beobachtet.

3.4 Betriebskennzahlen

Der Betrieb der «STL Linie 13» wurde am 29. April 2023 aufgenommen. Insgesamt war die Linie rund 1700 Stunden in Betrieb. Tabelle 3 fasst die Kennzahlen aus dem Pilotbetrieb zusammen.

4 Erfahrungen und Erkenntnisse

4.1 Verfügbarkeit und Effizienz (Hypothese 1)

Hypothese 1: Die Dual-Mode-Technologie führt im Vergleich zu einem spezifischen automatisierten Shuttle zu einer besseren Einsatzfähigkeit mit weniger Ausfallzeiten, einfacher Manövrierfähigkeit und geringeren Betriebskosten.

Technische Zuverlässigkeit und Einsatzfähigkeit: Die technische Verfügbarkeit der «STL Linie 13» lag über die gesamte Projektlaufzeit im Durchschnitt bei 97%. Das Dual-Mode-System konnte trotz der Insolvenz des Technologiepartners sensible4 weiter betrieben werden, was für eine grundsätzlich robuste und wartungsfreundliche technische Basis spricht.

Die technische Verfügbarkeit lag deutlich über der durchschnittlichen Verfügbarkeit von Shuttle-Systemen der ersten Generation, etwa von Easymile oder Navya. Die Referenz des STL-Vorhabens «Linie 12» lag bei einem Wert von rund 80%. Die «Linie 12» wies damit eine deutlich höhere Störungsanfälligkeit auf.

Flexibilität und Manövrierfähigkeit: Ein wesentliches Merkmal der Dual-Mode-Technologie umfasst die Kombination aus manuellem und automatisiertem Fahrmodus. Im Unterschied zu dedizierten automatisierten Shuttle-Fahrzeugen, welche auf spezifische Strecken limitiert waren, konnte das eingesetzte Fahrzeug der «STL Linie 13» im manuellen Modus frei bewegt werden. Das erleichterte den operativen Betrieb und das Fahrzeug musste nicht unmittelbar bei der Pilotstrecke in der Innenstadt garagiert werden. So waren auch Fahrten zum KFZ-Mechaniker für Wartung und Reparatur, zur Beschriftung oder für Warentransporte von A nach B in Diensten des Projekts problemlos möglich. Geringfügig einschränkend war hingegen die abgeriegelte Maximalgeschwindigkeit von 30 km/h. Grössere Verlegungen des Fahrzeugs z.B. zu Showzwecken wurden somit per Verlad organisiert und durchgeführt.

Betriebskosten und Unterhalt: Ein weiterer Vorteil zeigt sich bei den Betriebskosten. Da es sich bei dem eingesetzten Fahrzeug um ein handelsübliches Modell handelt, konnten Wartung und Reparaturen über das bestehende Netz von Toyota-Fachhändlern erfolgen. Zudem ist bei einem neuen Fahrzeug, wie es zum Einsatz kam, in den ersten zwei Jahren kaum mit Reparaturen zu rechnen – das bestätigte sich erwartungsgemäss. Im Vergleich zu Spezialfahrzeugen mit proprietären Komponenten konnten mit der «STL Linie 13» Kosten reduziert und gleichzeitig die Reaktionsgeschwindigkeiten erhöht werden.

Das Dual-Mode-System war – trotz geringfügiger Hürden in der Bedienung (Usability) – schnell erlernbar. Insbesondere im Vergleich mit Systemen der bisherigen automatisiert verkehrenden Shuttles, welche per Joystick gesteuert wurden. Der Umgang mit einem seriennahen Fahrzeug war für das Sicherheitspersonal vertrauter. Eingriffe durch das Personal konnten von Projektstart an sicher durchgeführt werden, was zu geringen Schulungszeiten und -kosten führte.

Fazit: Die Erfahrungen aus dem Betrieb der «STL Linie 13» bestätigen Hypothese 1. Die Kombination aus hoher technischer Verfügbarkeit, praktischer Manövrierfähigkeit und einer grundsätzlich wartungsfreundlichen Infrastruktur macht die Dual-Mode-Technologie zu einem zukunftsfähigen Ansatz im automatisierten öffentlichen Verkehr. Die Entscheidung für ein OEM-Fahrzeug mit automatisierter Nachrüstung war aus betrieblicher Sicht sinnvoll – und im Vergleich zu vorigen automatisierten Pilot-Shuttles ein klarer Fortschritt.

4.2 Technologieakzeptanz (Hypothese 2)

Hypothese 2: Der gewohnte «Look-and-Feel» sowie die Funktionsweise des OEM-Fahrzeugs wird die Akzeptanz und das Vertrauen bei den Passagieren und der Bevölkerung im Allgemeinen erhöhen.

Begleitend zum Pilotprojekt «STL Linie 13» wurde eine mehrstufige Akzeptanzstudie durchgeführt. Die Studie startete vor Betriebsstart mit qualitativen Interviews mit zwölf verschiedenen Stakeholdergruppen, u.a. Vertreterinnen und Vertreter aus Politik, Interessensverbänden,

Smart City und ÖV-Unternehmen. Auf Basis der Interviewergebnisse wurden Anforderungen an das Projekt und den künftigen Betrieb der Linie ermittelt sowie entsprechende Hypothesen für die weiterführende quantitative Befragung vor Ort in Schaffhausen formuliert.

Die Studie wurde in enger Zusammenarbeit mit dem STL-Mitglied und Projektpartner UNITY Schweiz AG aus Zürich durchgeführt. Für die quantitative Befragung wurden im Herbst 2023 Umfragen vor Ort am Bahnhof Schaffhausen durchgeführt. Die Befragung wurde vom SAAM gefördert. Mit der Datenerhebung wurde ein unabhängiges Marktforschungsinstitut beauftragt.

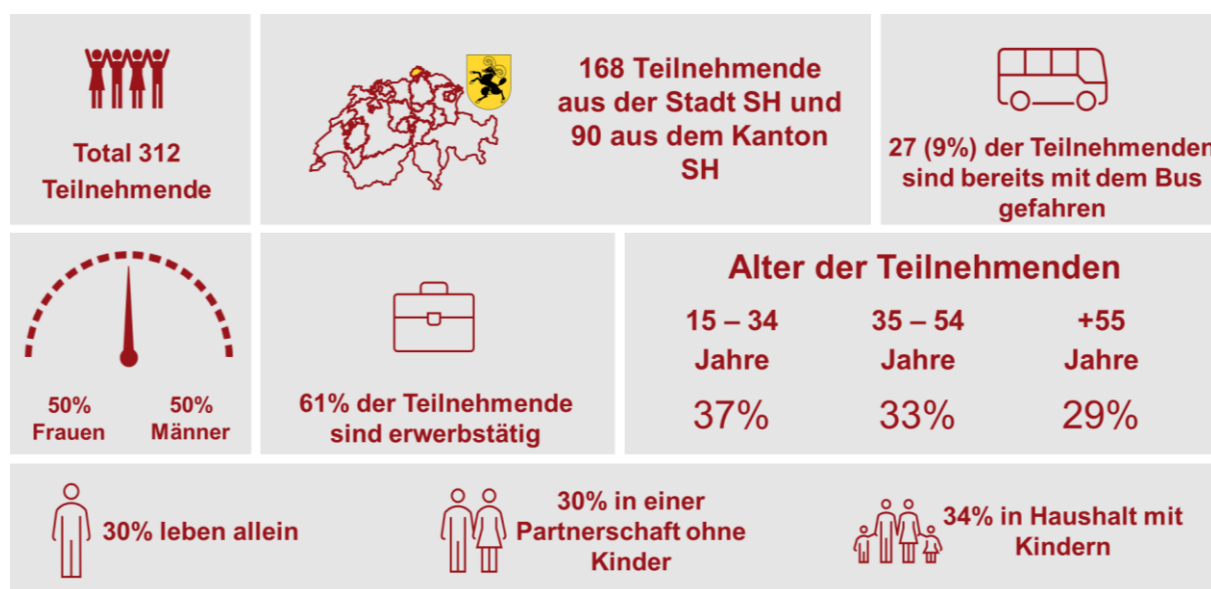


Abbildung 9: Die Stichproben-Demographie von der Befragung zur Technologieakzeptanz in Schaffhausen im Herbst 2023.

In einem letzten Schritt wurden die Erfahrungen des Sicherheitspersonals mittels einer Fokusgruppendifkussion im Herbst 2024 erhoben und aufbereitet. Die Gesamtergebnisse wurden abschliessend für weitere Pilotprojekte zusammengefasst.

Die zentralen Ergebnisse werden im Folgenden bezogen auf einzelne akzeptanzrelevante Faktoren beschrieben:

Einsatz / «Look and Feel» des OEM-Fahrzeugs: Der vertraute Charakter des eingesetzten OEM-Fahrzeugs – konkret ein umgerüsteter Toyota-Kleinbus – sollte gegenüber futuristischen, oft als Prototypen wahrgenommenen Shuttle-Designs die Akzeptanz bei den Fahrgästen und der breiten Öffentlichkeit fördern. Die qualitativen Interviews sowie die laufenden Beobachtungen und Evaluationen durch das Swiss Transit Lab lieferten hierzu differenzierte Erkenntnisse, welche die Gültigkeit dieser Hypothese grösstenteils bestätigen.

Zunächst lässt sich festhalten, dass der vertraute Fahrzeugtyp eine positive Wirkung auf die Wahrnehmung hatte. In den qualitativen Interviews mit Stakeholdern wurde mehrfach betont, dass ein «ganz normales Fahrzeug» die Schwelle zur Nutzung senke. Die Aussage «das hilft, es gibt nicht so viel Veränderung» bringt dies auf den Punkt.

Hinzu kam, dass der Kleinbus – obwohl optisch vertraut – von den Interviewten als «unspektakulär» oder «zu wenig öffentlich erkennbar» beschrieben wurde. Es wurde gewünscht, das Fahrzeug deutlicher als öffentlich zugängliches Angebot zu kennzeichnen. Die Beklebung wurde vor Betriebsbeginn entsprechend angepasst.

Hinsichtlich der mechanischen und technologischen Reife wurde das OEM-Fahrzeug mit Dual-Mode-Technologie von Projektbeginn an als «zuverlässiger» und «robuster» bewertet als Fahrzeuge in früheren Projekten, wie etwa die «Linie 12» des Swiss Transit Labs mit dem Navya-Shuttle.

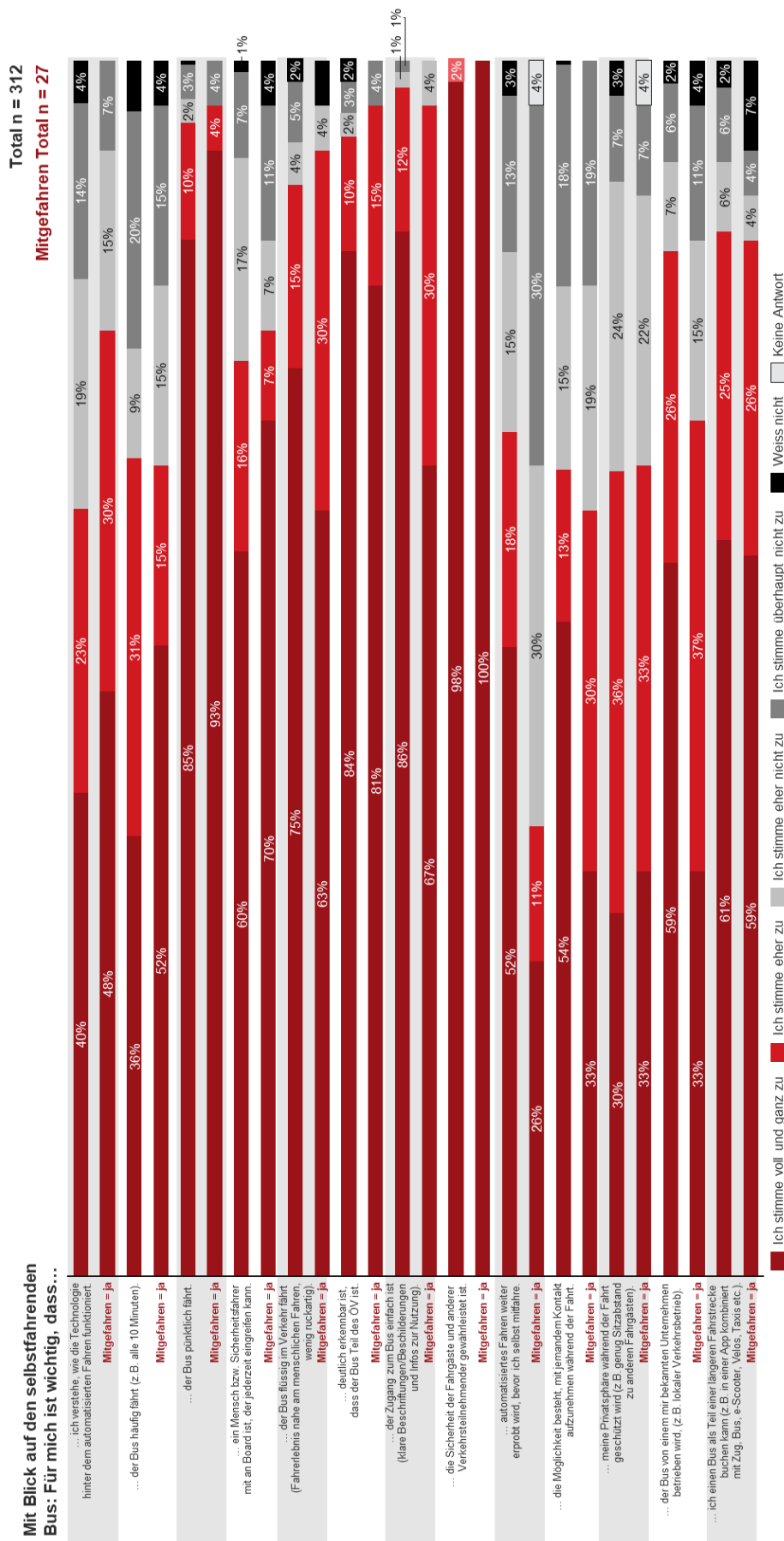


Abbildung 10: Übersicht akzeptanzfördernde und hemmende Faktoren. Oberer Balken jeweils ganze Kohorte und unterer Balken die Antworten jener, welche bereits mit dem Bus mitgefahren waren.

Trotzdem bestand beim Fahrgefühl («Feel») für «Rhyder» von Beginn an Luft nach oben, da die Bremsmanöver teils unvorhersehbar und abrupt auftraten und als unangenehm wahrgenommen wurden. Eine Weiterentwicklung der Software, Anpassungen und Verfeinerungen des Mappings mit entsprechenden Verfeinerungen des Fahrverhaltens waren vereinbart, aber nach der Insolvenz von senible4 unmöglich. Die «STL Linie 13» verkehrte bis Ende 2024 mit einer Software und Technologie auf dem Stand von Mai/Juni 2023.

Nutzenverständnis Pilotprojekt: In der quantitativen Befragung vor Ort zeigte sich, dass 72% der Teilnehmenden den Nutzen des Projekts grundsätzlich verstanden – bei Personen, die bereits mitgefahren waren, lag dieser Wert sogar bei über 80%. Die Mitfahrt erhöhte das Verständnis für den Nutzen des Pilotvorhabens deutlich.

Befürwortung des Pilotbetriebs: Etwa 57% der Befragten bewerteten den Betrieb der STL Linie 13 als gut oder eher gut. Der Zuspruch stieg bei Befragten, welche bereits mitgefahren waren, auf 75%. Eine Mitfahrt senkte somit mögliche Hemmschwellen und erhöhte das Verständnis und den Zuspruch für das Pilotvorhaben.

Bekanntheit: Obwohl mehr als 70% der Befragten bereits von der «STL Linie 13» gehört hatten, hatten nur 9% tatsächlich das Angebot genutzt. Hier zeigen sich Diskrepanzen zwischen eher positiver Wahrnehmung des Vorhabens und tatsächlicher Nutzung.

Sicherheit: Die allgemeine Sicherheit der Passagiere und der anderen Verkehrsteilnehmer gilt als unverhandelbar. Die Sicherheitsfahrperson spielte dabei eine zentrale Rolle: 76% der Befragten sahen ihre Anwesenheit als unerlässlich für das Sicherheitsgefühl an.

Demographische Unterschiede: Bei älteren Bevölkerungsgruppen (55+ Jahre) zeigten sich bezogen auf das «Nutzenverständnis» wie auch der «Befürwortung des Pilotbetriebs» deutlich höhere Vorbehalte. Nur rund ein Drittel dieser Altersgruppe stufte das Projekt positiv ein, während ein signifikanter Anteil den Nutzen und die Technologie eher kritisch sah.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Datenauswertung über alle drei Studienteile (Interviews, Befragung, Fokusgruppe) unterstreicht zudem, dass Akzeptanz nicht allein durch das Fahrzeugdesign «Look and Feel» erzeugt wird, sondern im Zusammenspiel mit Kommunikation, Sicherheit und Erfahrung durch Mitfahrten entsteht. Hierzu wurden folgende Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen zusammengefasst:

Konditionale Akzeptanz STL Line 13: Die Ergebnisse deuten auf eine breite, aber bedingte Akzeptanz der STL Linie 13 hin, die eng mit Sicherheitsbedenken verknüpft ist. Das Vorhandensein eines Sicherheitsfahrers stellt für viele Befragte einen Schlüsselfaktor dar.

Mensch im Fahrzeug: Um das Vertrauen in das automatisierte Fahren zu fördern, sollten die Fahrten in der Übergangsphase zu Level 4 von einer Person begleitet werden.

Automatisiertes Fahren erlebbar machen: Die Befragungsergebnisse zeigen, dass Bewusstsein und Verständnis für automatisiertes Fahren durch Mitfahrten steigen. So können Personen Erfahrungen aus erster Hand sammeln.

Nutzen verständlich machen: Der Nutzen des Pilotprojekts sollte durch zielgruppenspezifische Kommunikation und lokale Multiplikatoren vermittelt werden. Zudem sollte die lokale Bevölkerung die Möglichkeit haben, Feedback zum Projekt bzw. Fahrangebot zu geben.

Demographische Unterschiede: Ältere Befragte sind kritischer, was darauf hindeutet, dass die Akzeptanz nicht in allen Altersgruppen gleich stark ausgeprägt ist. Massgeschneiderte und leicht verständliche Kommunikations- sowie Aufklärungskampagnen könnten helfen, diese Kluft zu überwinden.

Fazit: Hypothese 2 wird durch die bisherigen Ergebnisse grösstenteils gestützt. Das vertraute Erscheinungsbild des OEM-Fahrzeugs wirkt akzeptanzfördernd. Dennoch ist klar: Das Design allein reicht nicht aus. Sicherheitsgefühl, Sichtbarkeit, Kommunikation und persönliche Erfah-

rung sind ebenfalls entscheidend. Die Hypothese sollte daher als notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für Akzeptanz verstanden werden. Eine ganzheitliche Strategie – technologisch wie kommunikativ und partizipativ – ist notwendig, um eine nachhaltige Akzeptanz zu erzielen.

4.3 Funktionalität auf SAE Level 4 (Hypothese 3)

Hypothese 3: Der Dual-Mode-Minibus mit sensible4-Technologie ist fähig, die programmierte Strecke hochautomatisiert (SAE Level 4, ohne Eingriff des Sicherheitsfahrpersonals) zu befahren.

Nach Definition der SAE zeichnet sich ein Fahrzeug der Automatisierungsstufe 4 dadurch aus, dass es bestimmte Fahraufgaben in einem definierten Einsatzbereich («Operational Design Domain» ODD) vollständig automatisiert und dauerhaft ohne Eingreifen eines Menschen durchführen kann. Ein Sicherheitsfahrer darf zwar mitfahren, darf aber nicht aktiv eingreifen können.

Nach Beendigung des Pilotbetriebs lässt sich festhalten, dass diese Hypothese nicht bestätigt werden kann. Zwar weist die Technologie des Systems einige fortgeschrittene Elemente auf, erfüllt jedoch zentrale Anforderungen des SAE-Level 4 nicht. Die nachfolgende Analyse fasst die wesentlichen Erfolge sowie funktionalen Defizite zusammen. Letztere verhindern bislang das Erreichen von Level 4.

Stabile Fahrt im automatisierten Modus auf definierter Strecke: Das Fahrzeug bewältigte die einprogrammierte Strecke zwischen Bahnhof Schaffhausen und der Stahlgiesserei unter bestimmten Umständen vollständig im automatisierten Modus. Dabei erfolgte das Einhalten der Fahrspur und von Sicherheitsabständen sowie die Durchfahrt des Kreisverkehrs ohne Eingriff.

Zuverlässige Hinderniserkennung: Das eingesetzte sensible4-System nutzt Lidarsensoren, die eine 360°-Umfelderfassung ermöglichen. Die Sensorik erkannte zuverlässig Objekte – stehend oder bewegt – wie Fussgänger, Fahrzeuge oder Baustellenhindernisse – und veranlasste entsprechende Reaktionen wie Bremsmanöver oder Stopps.

Wetterrobustheit bei Schnee, Regen und Dunkelheit: Der automatisierte Betrieb funktionierte bei unterschiedlichsten Wetterbedingungen, einschliesslich Schneefall, schneebedeckter Strasse und Dunkelheit. Diese Allwettertauglichkeit ist eine wesentliche Anforderung an Level-4-Systeme, da sie die Selbstständigkeit unter realistischen Bedingungen untermauert.

Intelligente Sprachassistentin IVY: Mit der Einführung der Sprachassistentin IVY wurden die Grundlagen für eine fahrerlose Kommunikation gelegt. Durch die erfolgreiche Implementierung von IVY könnten Fahrgäste in Folgevorhaben auch ohne die physische Anwesenheit einer Fahrerin oder eines Fahrers Auskunft erhalten.

Diese erreichten Funktionen zeigen: Das Projekt «STL Linie 13» hat wesentliche Bausteine in Richtung eines hochautomatisierten Betriebs umgesetzt, auch wenn für den vollen SAE-Level-4-Status noch zentrale Systemfähigkeiten fehlen:

a) Manuelle Eingriffe durch Sicherheitsfahrpersonal weiterhin notwendig: Während des gesamten Pilotbetriebs war jederzeit eine Sicherheitsfahrerin bzw. -fahrer an Bord, der oder die bei kritischen Situationen aktiv eingreifen musste – sei es zur Fehlerbehebung oder zur Umfahrung von Hindernissen, wie beispielsweise parkierten Fahrzeugen. Besonders in komplexen Verkehrssituationen wie dem Kreisverkehr mit höherem Verkehrsaufkommen musste bis zum Schluss das Fahrpersonal die Steuerung übernehmen. Auch beim Einfahren vom Wendeplatz bei der Stahlgiesserei auf die Mühlentalstrasse mussten die Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer das Fahrzeug manuell anhalten, wenn sich von links oder rechts ein Fahrzeug schnell näherte. Die Software war noch nicht in der Lage, Distanz und Geschwindigkeit der anderen Verkehrsteilnehmer richtig einzuschätzen. Sobald die Strasse frei war, konnte «Rhyder» dann automatisiert einbiegen. Weil dafür die Bremse nur leicht betätigt werden musste, schaltete «Rhyder» nicht in den manuellen Modus um.

Ausserdem mussten die Begleitpersonen bei den Haltestellen manuell die elektrische Schiebetür öffnen und schliessen sowie dem Fahrzeug den Befehl zur Weiterfahrt geben. «Rhyder» war noch nicht in der Lage zu entscheiden, ob ein Halt an der Station überhaupt nötig war, wann die Türen betätigt werden mussten und wann er weiterfahren konnte.

b) Limitierte Entscheidungslogik bei dynamischen Verkehrssituationen: Das Fahrzeug bremst stark ab, wenn überholende Fahrzeuge knapp einscheren. Die aktuelle Software von sensible4 kann nicht zuverlässig zwischen sich entfernenden und sich nähernden Objekten unterscheiden. Diese fehlende Kontextsensitivität widerspricht der Anforderung von SAE-Level 4, in denen ein Fahrzeug «alle Verkehrssituationen innerhalb seines Betriebsbereichs eigenständig und sicher» bewältigen können muss.

Eine Herausforderung stellte der Umgang mit Fussgängerstreifen dar. Obschon es technisch vorgesehen gewesen wäre, dass «Rhyder» selbständig anhält, wenn Passanten am Strassenrand warten, erwies sich diese Fähigkeit in der Praxis als unzuverlässig. Beim Mapping definierten die Entwickler von sensible4 die Fussgängerstreifen inklusive deren Wartebereiche auf dem Trottoir als «Zones of Interest». Sofern sich darin ein Objekt mit einer bestimmten Grösse befindet, hätte der Bus anhalten sollen. In verschiedenen Situationen funktionierte diese automatische Erkennung jedoch mangelhaft:

- wenn sich ein Passant in der Zone befand, jedoch die Strasse nicht überqueren wollte. Für geübte Autofahrerinnen und Autofahrer ist diese Situation eindeutig: Eine Fussgängerin läuft der Strasse entlang ohne Anzeichen, diese überqueren zu wollen. Als menschlicher Autofahrer hält man daher nicht an. «Rhyder» dagegen erkannte ein Objekt in der «Zone of Interest» und stoppte, unabhängig von der Intention des Subjekts.
- wenn sich ein entgegenkommendes Fahrzeug auf dem Fussgängerstreifen befand. Man musste den gesamten Fussgängerstreifen inkl. Wartebereich auf beiden Seiten als «Zones of Interest» festlegen. Andernfalls hätte «Rhyder» nur für Passanten angehalten, welche auf der rechten Strassenseite für eine Überquerung warteten. Befand sich nun aber auf der entgegenkommenden Fahrspur ein Auto oder Fahrrad in der Zone, hielt die «STL Linie 13» mehr oder weniger abrupt an.

Als Konsequenz wurde diese mangelhafte Funktion deaktiviert. Falls Passanten die Strasse überqueren wollten, mussten die Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer manuell eingreifen.

c) Fehlende Fahrdynamik-Anpassung bei Wetter- und Strassenzuständen: Zwar bestätigte der Betrieb die hohe Wetterresistenz (Schnee, Regen, Dunkelheit), jedoch konnte das Fahrzeug seine Fahrweise nicht automatisch an die Strassenzustände anpassen – etwa bei Glätte oder Schneematsch. Die Software passte Geschwindigkeit und Fahrstil nicht automatisch an, sondern behielt das Standardverhalten bei. Dies ist ein sehr relevanter Punkt, insbesondere dann, wenn die Fahrgeschwindigkeiten im automatisierten Betrieb künftig erhöht und die anderen Verkehrsteilnehmenden angepasst werden sollten.

d) Nicht abschliessend gelöste Systemstabilität und Fehlerdiagnostik: Trotz der enorm hohen technischen Verfügbarkeit und Robustheit des Systems, gab es gelegentliche Systemabstürze sowie Notbremsungen ohne erkennbare Ursache. Sie führten dazu, dass Fahrten manuell beendet und Systeme neu gestartet werden mussten.

e) Fehlende redundante Systemstrukturen: Level-4-Systeme benötigen eine hohe Redundanz sicherheitsrelevanter Komponenten. Im System der «STL Linie 13» sind sicherheitskritische Eingriffe jedoch weiterhin einzeln durch den Menschen möglich, nicht durch ein eigenständiges Fail-Safe-System. Die Fähigkeit zum eigenständigen sicheren Beenden der Fahrt bei Systemfehlern – eine Kernbedingung für Level 4 – ist nicht zuverlässig gegeben. Ausserdem braucht es Lösungen für den Befehl zur Abfahrt an den Haltestellen. Bei der «STL Linie 13» erteilten diesen die Begleitpersonen manuell über das Human Machine Interface HMI. Davor kontrollierten sie einerseits, dass alle Passagiere angeschnallt und bereit waren für die Abfahrt. Andererseits durften sie den Befehl erst geben, wenn sie sicher waren, dass die

Strasse frei war. Ein sich von hinten näherndes und überholendes Fahrzeug hätte «Rhyder» nicht erkannt.

Fazit: Obschon die Technologie von sensible4 in vielen Aspekten robust und zuverlässig arbeitete und zu Beginn berechnete Erwartungen auf wesentlich Weiterentwicklungen bestand, hat das Projekt «STL Linie 13» den SAE-Level 4 nicht erreicht. Ausschlaggebend hierfür sind u.a. die nach wie vor notwendige menschliche Überwachung und das nicht vollständig automatisierte Reagieren auf komplexe Verkehrssituationen. Nach Beendigung des Pilotbetriebs lässt sich festhalten, dass diese Hypothese 3 nicht bestätigt werden kann. Ein Hauptgrund dafür liegt in der bereits mehrfach erwähnten fehlenden Systemweiterentwicklung seitens des Technologiepartners sensible4 infolge seiner Insolvenz. Ein neues Projekt mit einem neuen Technologiepartner ist aus Sicht des Swiss Transit Labs der notwendige Schritt, um den Level 4-Status perspektivisch erreichen zu können.

4.4 Allwettertauglichkeit (Hypothese 4)

Hypothese 4: Die Technologie unseres Partners sensible4 ist in der Lage, unter allen in der Schweiz zu erwartenden widrigen Wetterbedingungen sicher zu funktionieren.

Diese wurde über den Verlauf des Pilotbetriebs hinweg intensiv beobachtet – mit besonderem Fokus auf die vier Jahreszeiten und die dabei auftretenden natürlichen Randbedingungen.



Abbildung 11: «Rhyder» am 2. Dezember 2023 um die Mittagszeit auf dem Wendeplatz im Mühlental bei Schneefall und (nahezu) schneebedeckter Strasse.

Bewährte Allwettertauglichkeit im Realbetrieb: Im Laufe des Betriebs von April 2023 bis Dezember 2024 konnte die Technologie ihre Wetterrobustheit mehrfach unter Beweis stellen. Bereits in den ersten Wochen zeigte sich die Technologie unbeeindruckt von Starkregenereignissen und Hagel. Besonders relevant für Hypothese 4 war jedoch der Winterbetrieb. Im Dezember 2023 und Januar 2024 verkehrte die «STL Linie 13» mehrfach bei Schneefall und auf schneebedeckter Fahrbahn zuverlässig im automatisierten Modus. Problematisch waren lediglich punktuell auftretende Schneehaufen (angehäuft durch die Schneeräumung), welche als Hindernisse erkannt wurden und ein manuelles Umfahren durch das Fahrpersonal erforderlich machten.

Auch Dunkelheit – eine häufig unterschätzte und je nach Sensortechnologie unüberwindbare Herausforderung für automatisierte Fahrzeugsysteme – beeinflusste den Betrieb nicht negativ. Während eines zweiwöchigen Abendbetriebs im Januar 2024 konnte kein Unterschied im Fahrverhalten festgestellt werden. Die Sensorik reagierte stabil und lieferte auch bei eingeschränkter Sicht verlässliche Daten.

Zu beachten ist allerdings, dass starker Nebel, der mutmasslich für Lidar-Sensorik eine Herausforderung darstellt, bislang nicht im Praxisbetrieb auftrat. Eine allumfassende Bestätigung der Hypothese über alle möglichen Wetterextreme hinweg steht daher noch aus. Anmerkung: Die geplante Sensor-Fusion zwischen LIDAR und Radar hätte diese Unsicherheit gebannt.

Herausforderungen durch saisonale Einflüsse: Neben Erfolgen bei Schnee und Regen traten auch Witterungsphänomene auf, die das System vor Herausforderungen stellten. So kam es im Frühjahr 2023 durch hohes Gras entlang der Strecke zu Fehleinschätzungen in der Objektklassifikation. Im Herbst 2023 verursachte Laubfall kurzzeitige Stopp-Manöver, da die Sensorik grosse Blätter oder Laubwolken als potenzielle Hindernisse interpretierte. Diese Effekte beeinträchtigten zwar den Betrieb, traten jedoch nur temporär auf und stellten keine Gefährdung des Betriebs dar.

Weltweit einzigartiger Algorithmus: Die Kernkomponente für die Allwettertauglichkeit der «STL Linie 13» ist ein probabilistischer Algorithmus zur Verarbeitung von Sensordaten, der von sensible4 entwickelt wurde. Dieser Algorithmus interpretiert die Daten der verschiedenen Sensoren und klassifiziert potenzielle Hindernisse nach Wahrscheinlichkeit und Relevanz. Dabei ist das System in der Lage, sich wiederholende, typische Witterungsartefakte wie Regentropfen oder Schneeflocken aus der Entscheidungslogik herauszufiltern. Diese werden vom Algorithmus als ungefährlich eingestuft, da sie über ihre physikalischen Eigenschaften (z. B. Grösse, Reflexionsverhalten, Bewegung) eindeutig identifizierbar sind. Entscheidungslogik und Fahrzeugverhalten werden so stabilisiert – etwa durch konsequentes Ignorieren von Artefakten im «roten Bereich» der Fahrspur.

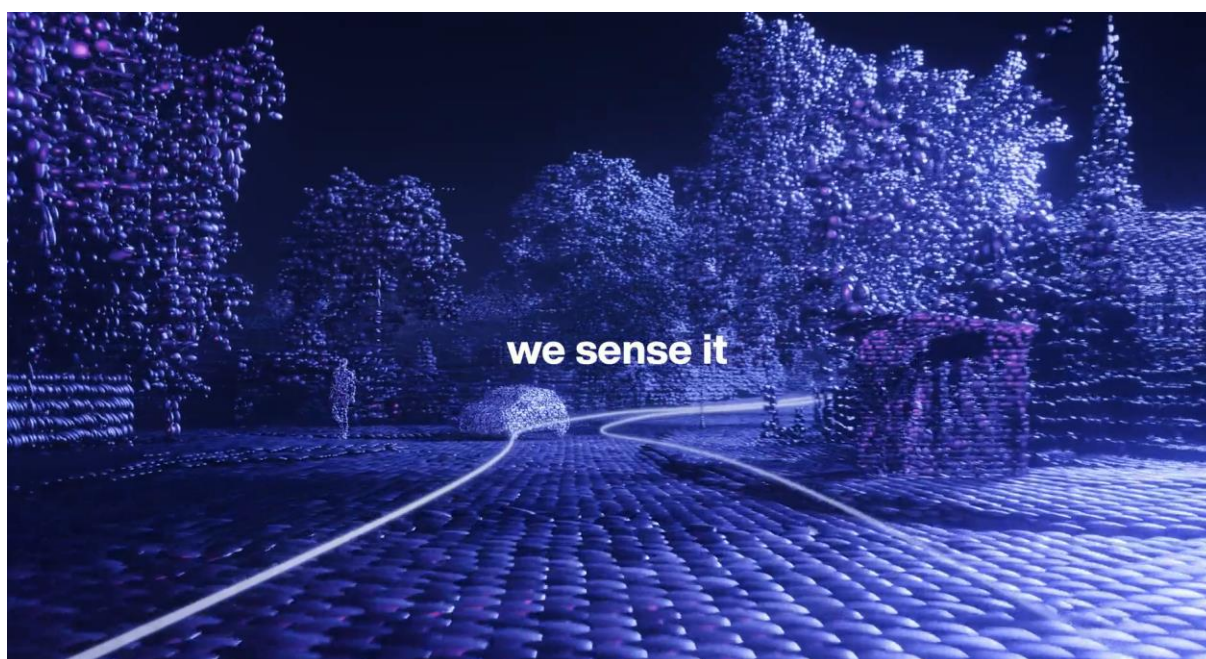


Abbildung 12: Visualisierung der verarbeiteten Sensordaten von sensible4 (virtuelle Umwelt). Die einzelnen «Blasen» stellen geschlossene Zonen der Wahrscheinlichkeitsberechnung dar, welche es dem Algorithmus erlaubt, Regentropfen oder Hagelkörner als Artefakte mit wenig Relevanz zu klassifizieren.

Im Gegensatz dazu stellen grössere und unregelmässige Objekte – etwa grosse, fallende Blätter oder Schneehaufen – weiterhin eine Herausforderung dar. Sie werden aktuell noch als fes-

te Objekte gewertet, was zu abrupten Bremsmanövern oder Fahrunterbrechungen führen kann. Eine automatische Kontextinterpretation solcher Objekte würde eine Weiterentwicklung des Softwarestands erfordern.

Fazit: Die Hypothese 4 kann mit Blick auf die getesteten (aufgetretenen) Witterungsbedingungen bestätigt werden. Das System funktionierte zuverlässig bei Regen, Schnee und Dunkelheit – typische Herausforderungen im Schweizer Wettergeschehen. Ein Vorbehalt bestehen bezüglich dem nicht aufgetretenen seltenen Phänomenen Starknebel. Insgesamt zeigt das Projekt auf, dass bereits heute eine robuste technische Grundlage für den zukünftigen automatisierten ÖV-Betrieb zu jeder Saison vorhanden ist.

4.5 Teststrecke und Betriebsmodi

Die gewählte Teststrecke vom Bahnhof Schaffhausen zur Stahlgiesserei hatte grosse Einflüsse auf den Betriebsmodus der «STL Linie 13». Im Vorfeld des Pilotbetriebs hatten Verkehrsmessungen an verschiedenen Stellen auf der Mühlentalstrasse ein schwaches bis mittleres Verkehrsaufkommen ergeben, mit Peaks während der Stosszeiten. Insbesondere stadteinwärts vor dem Kreisverkehr bildete sich im Morgen- und Abendverkehr schnell ein Rückstau. Zusammen mit sensible4 entschied das STL daher, den Pilotbetrieb ausserhalb der Stosszeiten zu starten, mit der Option, nach den ersten Monaten eine Anpassung an den Betriebszeiten vorzunehmen. Vereinzelte Sonderfahrten zu den Stosszeiten (beispielsweise für Delegationen) zeigten aber sehr bald, dass «Rhyder» bei hohem Verkehrsaufkommen Schwierigkeiten hatte. Drei Verkehrssituationen fielen dabei besonders ins Gewicht:

- **Kreisverkehr:** «Rhyder» war bei geringerem Verkehrsaufkommen in der Lage, den Kreisel selbständig befahren. Bei mittlerem bis hohem Verkehrsaufkommen und insbesondere, wenn sich bereits viele Autos links im Kreisel befanden, mussten die Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer manuell in und durch den Kreisel fahren. Das Fahrzeug reichte sich aus Sicherheitsgründen nicht in den Verkehr ein. Auch führten teils knapp vor dem Bus einspurende Autos zu abrupten Bremsmanövern im Kreisverkehr, welche für andere Verkehrsteilnehmer nicht absehbar und logisch waren. Deshalb waren die Begleitpersonen angehalten, relativ früh und vorausschauend einzugreifen.
- **Rückstau:** In Stausituationen zeigte sich bei «Rhyder», dass eher träge Reagieren auf davor fahrende Fahrzeuge. Auf ein auf der Fahrbahn stehendes oder langsam rollendes Auto reagierte der Bus früh, indem er relativ stark abbremste und sehr langsam zum Fahrzeug aufschloss. Entfernte sich das voranfahrende Fahrzeug, wartete «Rhyder» jeweils ein paar Sekunden, bevor er beschleunigte. In rollenden Kolonnen fuhr der Bus ruckartig, was unangenehm war für die Passagiere. In der Konsequenz übernahmen die Begleitpersonen das Fahrzeug manuell, sobald sich davor Stau bildete.
- **Einfahrt auf Mühlentalstrasse bei der Stahlgiesserei:** Nach dem Wenden über den Parkplatz bei der Stahlgiesserei musste «Rhyder» wieder auf die Mühlentalstrasse einbiegen. Fahrzeuge auf der Mühlentalstrasse hatten Vortritt. Wie schon in Kapitel 4.3 beschrieben, mussten die Begleitpersonen jeweils manuell abbremsen, wenn sich Autos von links oder rechts auf der Strasse näherten. War das Verkehrsaufkommen hoch, war eine automatisierte Eingliederung praktisch unmöglich.

Eine Weiterentwicklung der Software hätte diese Probleme beheben oder vermindern können. Mit dem Konkurs von sensible4 fanden ab Sommer 2023 jedoch keine technologischen Updates mehr statt. Gemeinsam mit den Begleitpersonen entschied das STL deshalb, die Betriebszeiten nicht anzupassen. Um sich dennoch ein Bild davon zu machen, wie sich die sensible4-Technologie und das automatisierte Fahren bei Dunkelheit bewähren, fand im Januar 2024 ein zweiwöchiger Testbetrieb zwischen 19.00 und 22:00 Uhr statt. Eine anschliessende Umfrage bei den Begleitpersonen ergab, dass sich Fahr- und Sicherheitsgefühl nicht veränderten. Auch auf die Technologie hatte die Dunkelheit keinen Einfluss. Ob andere Verkehrsteilnehmende den Bus anders wahrnahmen, konnte nicht in Erfahrung gebracht werden. Da

zu den Abendstunden aber andere Personen unterwegs waren als am Mittag, nutzten neue Passagiere das Angebot (vgl. Kapitel 5.3).

Die Fahrgastzahlen waren, verglichen mit der «STL Linie 12» (2018 und 2019, am Rheinfall), niedrig. Dennoch etablierte sich das Angebot im Mühltal. Rückmeldungen der Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer zeigten, dass bestimmte Passagiere regelmässig mit der «STL Linie 13» mitfahren und das Angebot als zusätzlichen ÖV-Service wahrnahmen und nutzten. Die Passagierzahlen der zur «STL Linie 13» parallel verkehrenden vbsh-Linie 23 zeigen auch, dass die Nutzung des ÖV im Mühltal über die Mittagszeit generell tief ist.

Ebenfalls einen Einfluss auf den Fahrplan hatte die vbsh-Buslinie 23, die vom Bahnhof Nord aus das gesamte Mühltal bedient. Nach den ersten Betriebswochen der «STL Linie 13» stellte sich heraus, dass «Rhyder» den Linienbus teilweise ausbremste. Zusammen mit der vbsh passte das STL den Fahrplan des selbstfahrenden Busses leicht an, um Komplikationen mit der Linie 23 zu verhindern. Ausserdem wurden die Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer entsprechend sensibilisiert, dem vbsh-Bus den Vortritt zu lassen.

4.6 Intelligente Ansprache der Passagiere

Das STL und die Commend Schweiz AG haben gemeinsam eine innovative Kommunikationsanwendung für Busse ohne Fahrerinnen und Fahrer entwickelt und getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass die intelligente Sprachassistentin IVY eine wichtige Rolle bei der Kommunikation mit Fahrgästen spielen kann.

IVY war in einem Standard Intercom-Device von Commend AG integriert, welches im Passagierraum von «Rhyder» installiert wurde. Die Aktivierung von IVY erfolgte durch einen Touch-Screen oder zwei Buzzer, die sich in der Mittelkonsole und im hinteren Bereich des Passagierraums befanden. Die Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer aktivierten IVY jeweils an den Haltestellen, um die Fahrgäste zu begrüßen und für Fragen zur Verfügung zu stehen. Auf eine Aktivierung per Voice-Signal war bewusst verzichtet worden.

IVY war in der Lage, Fragen zur «STL Linie 13» zu beantworten, wobei sie auf Informationen aus dem FAQ auf der STL-Website zurückgriff. Weiter konnte sie auch Antworten auf Fragen zum Wetter oder zur Uhrzeit liefern. Noch nicht beantworten konnte sie hingegen:

- Fragen zu allgemeinen Themen, die nicht im FAQ der Website des STL enthalten waren.
- Situative Fragen, die eine «menschliche» Einschätzung durch die Begleitperson erforderten.
- Fragen zu Ortsangaben, die weitere Informationsquellen erforderten.

Langfristig sollen intelligente Sprachassistenten auch solche Fragen beantworten können. Um dies zu erreichen, braucht es Pilotprojekte wie die «STL Linie 13». In diesem Rahmen können intelligente Sprachsysteme im realen Umfeld trainiert, weiterentwickelt und speziell auf die Bedürfnisse der Fahrgäste zugeschnitten werden. Die Kommunikationsprotokolle liefern dazu wertvolle Erkenntnisse.

Die Ergebnisse des Pilotbetriebs zeigen weiterhin, dass IVY vorwiegend aus Neugierde aktiviert wurde und dass die Fahrgäste Fragen stellten, um mehr über die «STL-Linie 13» zu erfahren. Die Auswertung der Nutzungsverteilung über den Pilotbetrieb zeigt, dass IVY im ersten Monat häufig genutzt wurde, aber danach die Nutzungszahlen sanken. Dies liegt wahrschein-



Abbildung 13: Panel zur visuellen und taktilen Interaktion mit der IVY Sprachassistentin

lich daran, dass ein grosser Teil der Passagiere der «STL-Linie 13» regelmässig mitfuhr und IVY bereits nach der ersten Mitfahrt kannten.

Interessant zu beobachten war, dass Passagiere, die zum ersten Mal mit dem Bus mitfuhren, ihre Fragen oft bereits vor dem Einsteigen stellten. Sie suchten nach Informationen über die Abfahrtszeit oder die Notwendigkeit eines Bustickets und tauschten sich dazu mit dem Sicherheitspersonal aus, meist durchs Fenster auf der Beifahrerseite. Da sich IVY im Passagierraum befand, kam sie bei diesen Interaktionen nicht zur Anwendung.

Intelligente Sprachassistenzen wie IVY bieten zukünftig eine Lösung für die Kommunikation zwischen Fahrgästen und der Betriebszentrale. Durch die Bereitstellung von Auskünften zu häufig gestellten Fragen können Passagiere schnell und einfach informiert werden, bevor sie an eine menschliche Auskunftsperson in der Betriebszentrale weitergeleitet werden. Im Falle von Notrufen muss sichergestellt sein, dass diese direkt an die Betriebsleitzentrale weitergeleitet werden, um die Sicherheit der Fahrgäste jederzeit zu gewährleisten.

Um eine optimale Funktionalität solcher Systeme zu gewährleisten, ist es von entscheidender Bedeutung, dass sie benutzerfreundlich und einfach zu bedienen sind. Idealerweise sollten Fahrgäste in der Lage sein, das Sprachsystem über eine Voice-Aktivierung oder durch einen Knopfdruck von ihrem Sitz aus zu aktivieren und damit zu kommunizieren. Da von Seiten der Passagiere offenbar schon vor dem Einsteigen ein gewisser Informationsbedarf besteht, sollte bei künftigen Projekten geprüft werden, ob ein intelligentes Sprachsystem ausserhalb des Fahrzeugs oder an den Haltestellen sinnvoll wäre. Ebenfalls wichtig ist, dass die Fragen der Fahrgäste laufend dokumentiert werden, um die Sprachassistentz den Bedürfnissen der Passagiere anzupassen.

4.7 Erfolgsfaktoren

Die Initiierung und erfolgreiche Durchführung des Pilotvorhabens «STL Linie 13» basiert auf einem Zusammenspiel mehrerer Faktoren, die das Projekt über seine technologische Innovationskraft hinaus auszeichneten.

1. Anwendungsregion und Macherort Schaffhausen: Schaffhausen bietet mit seiner überschaubaren Grösse, kurzen Entscheidungswegen und einem stark vernetzten Innovationsökosystem ideale Voraussetzungen für ein komplexes Pilotprojekt im Bereich der automatisierten Mobilität. Die Nähe zwischen Verwaltung, Wirtschaft und Institutionen ermöglicht eine direkte Umsetzung innovativer Konzepte im öffentlichen Raum. Die Wahl dieses Standorts erlaubt es, die Technologie realitätsnah zu erproben und wertvolle Erkenntnisse für künftige ÖV-Angebote und spätere Skalierungspfade zu gewinnen.

2. Kernteam aus sehr engagierten Akteuren: Ein herausragender Erfolgsfaktor ist die interdisziplinäre Teamkonstellation, bestehend aus engagierten Mitgliedern des Swiss Transit Labs (insbesondere den Vorstandsmitgliedern), regionalen Unternehmen wie Weder Transport, nationalen Partnern wie Toyota sowie internationaler Zusammenarbeit. Jede Partei allein hätte das Projekt nicht realisieren können. Dies gelang nur in Kooperation. Das Projekt lebte zudem von der Investitionsbereitschaft und Eigenleistung aller Beteiligten, was sich etwa in der schnellen und zielgerichteten Reaktion auf unerwartete Herausforderungen – wie der Insolvenz des Technologiepartners sensible4 – zeigte.

3. Projektleitung vor Ort mit aktivem Stakeholdermanagement: Die Projektleitung aus und in Schaffhausen erwies sich als Schlüsselfaktor. Sie konnte flexibel auf technische oder organisatorische Herausforderungen reagieren, pflegte engen Kontakt zu Sicherheitsfahrpersonal, Partnern und Behörden und war in der Lage, operative Anpassungen pragmatisch, ohne lange Wege vorzunehmen. Durch regelmässige Austauschtreffen mit dem Fahrpersonal und anderen Interessensgruppen konnte der Informationsfluss zwischen den Anspruchsgruppen sichergestellt werden.

4. Behörden mit Pragmatismus und Offenheit: Ein weiterer Erfolgsfaktor war die konstruktive Zusammenarbeit mit lokalen, kantonalen und nationalen Behörden. Der Verein STL und

seine Projektpartner profitierten von einer offenen Haltung gegenüber technologischer Innovation und einem pragmatischen und lösungsorientierten Umgang mit rechtlichen Rahmenbedingungen. So konnten etwa spezifische Ausnahmeregelungen bezüglich Radstreifennutzung und Personentransport erwirkt werden, die einen sicheren und finanziell tragbaren Betrieb überhaupt erst ermöglichten.

5. Passende Förderinstrumente: Nicht zuletzt trugen geeignete Fördermittel – insbesondere durch den Kanton und die Stadt Schaffhausen und mit Unterstützung privater Sponsoren – entscheidend zur Realisierung des Projekts bei. Diese Finanzierung ermöglichte den Aufbau, den Testbetrieb sowie begleitende Kommunikations- und Akzeptanzmassnahmen. Ohne die finanziellen Mittel wäre ein solches Projekt mit hohem Entwicklungskostenanteil und entsprechenden Risiken nicht realisierbar gewesen.

Diese fünf Erfolgsfaktoren verdeutlichen eindrucksvoll, dass technologische Innovation – im Zusammenspiel mit institutioneller Offenheit, lokalem Engagement sowie einem vorausschauenden Projekt- und Stakeholdermanagement – die entscheidende Grundlage für die Mobilität der Zukunft schafft.

5 Herausforderungen

5.1 Technologieauswahl

Die erste grössere Herausforderung im Projekt zeigte sich bereits in bei der Konzeption. Erfahrungen aus dem Vorprojekt mit einem eigens für automatisiertes Fahren im öffentlichen Verkehr entwickelten Fahrzeug (Navya) führten im Frühjahr 2021 zum Entscheid des STL-Vorstands, auf die sogenannte Dual-Mode-Technologie zu setzen.

Die Suche nach einem geeigneten Technologieanbieter für diesen Ansatz erwies sich jedoch als äusserst anspruchsvoll. Zwar gab es zu dieser Zeit eine Vielzahl von Unternehmen, die an entsprechenden Lösungen arbeiteten, doch mangelte es häufig an marktreifen Produkten oder verlässlichen Referenzen. Die grossen amerikanischen Anbieter mit Marktreife und Referenzen zeigten andererseits kein Interesse an einem kleinen Pilotprojekt mit nur einem Fahrzeug.

Auch die Suche nach einem geeigneten Basisfahrzeug – Minibus mit 5 bis 8 Plätzen und e-Antrieb – für die Anwendung im öffentlichen Verkehr war schwierig. Die meisten grossen Autobauer führten zu diesem Zeitpunkt keinen Minibus mit e-Antrieb im Portfolio. Und insbesondere verfügte keines der handelsüblichen Fahrzeuge serienmässig über ein Drive-by-Wire (DbW)-System, welches den Einbau der Automatisierungstechnik wesentlich vereinfacht hätte. Es musste schliesslich mit Komponenten zum Nachrüsten aus dem Bereich des Rennsports (ohne Strassenzulassung) gearbeitet werden.

Mit dem finnischen Startup sensible4 fand sich schliesslich ein vielversprechender Partner, der sich nicht nur durch technologische Kompetenz – insbesondere im automatisierten Fahren unter widrigen Wetterbedingungen – auszeichnete, sondern auch zur gemeinsamen Investition in das Pilotprojekt bereit war. Die Möglichkeit, das Fahrzeug zu leasen, trug zusätzlich zur Risikominimierung bei auf Seite des Projektträgers STL bei.

5.2 Konkurs des Technologiepartners

sensible4 bewegte sich in einem sich sehr schnell entwickelnden Marktumfeld. Nebst der laufend zunehmenden Konkurrenz – insbesondere aus den USA und China – sahen sich europäische Unternehmen im internationalen Markt für automatisiertes Fahren vor unternehmerische Herausforderungen gestellt. Einerseits schritt die technische Entwicklung langsamer voran als von Investoren angenommen. Andererseits sind in Europa die regulatorischen Hürden für automatisierte Fahrzeuge höher als in den USA und China. Konkret heisst das, für Pilotbetriebe auf öffentlichen Strassen ist es schwieriger, entsprechende Bewilligungen zu erhalten, um die eigene Technologie grossflächig zu testen: für europäische Hersteller ein Nachteil. In der Folge wurde es immer schwieriger, Investoren zu finden, was für einige Anbieter zum Konkurs führte. Darunter auch sensible4.

Die Nachricht zur drohenden und dann rasch eintretenden Insolvenz des Technologiepartners sensible4 traf das Projektteam und den Verein im Juni 2023 nach nicht einmal zwei Monaten Betrieb. Obschon sich die Technik bis dahin als sehr robust erwies, musste jederzeit mit einem Ausfall gerechnet werden. Gemeinsam mit den verbleibenden Ressourcen des Technologiepartners sensible4 führte das Projektteam eine Risikoabwägung und schliesslich den Transfer respektive die Entkopplung aller essenziellen Systemteile von Finnland zum STL nach Schaffhausen durch. Das ASTRA gab vorläufig grünes Licht für den weiteren Betrieb, da keine sicherheitsrelevanten Risiken ausgemacht werden konnten. Auch die finnische Insolvenzbehörde war mit einem Weiterbetrieb einverstanden. Ein Grounding der «STL Linie 13» konnte somit erfolgreich abgewendet werden. Dass es möglich sein würde, den Betrieb der Linie bis Ende 2024 (oder auch darüber hinaus) weiter aufrechtzuerhalten, hätte zu diesem Zeitpunkt kaum jemand im Team für möglich gehalten.

Trotz dieser erstaunlichen Robustheit der ausgewählten Technologie war die Insolvenz des Technologiepartners das einschneidendste Ereignis im Projektverlauf. Nicht nur wurde die Behebung kleinerer Software-Probleme zur Herausforderung, was sich im Oktober und Novem-

ber 2023 zweimal zeigte (vgl. Kapitel 3.3). Es schwand vor allem auch die Aussicht auf die geforderte und vereinbarte funktionale Weiterentwicklung des Systems. Dies hatte Auswirkungen auf die Projektziele und Hypothesen aber auch auf die Motivation der involvierten Akteure.

Ausserdem blieb lange unklar, was mit den materiellen und immateriellen Vermögenswerten von sensible4 geschehen würde. Während sich das Insolvenzverfahren in Finnland dahinzog, konnte das STL auf einen Weiterbetrieb der «STL Linie 13» setzen. Es bestand jedoch stets die Möglichkeit, dass ein Gerichtsentcheid die Fortsetzung stoppen würde. Deshalb entschied sich der Verein im Frühling 2024, den Toyota Proace vorsorglich aus der Konkursmasse heraus zu kaufen. Damit wurde sichergestellt, dass das Fahrzeug in Schaffhausen bleiben konnte. Zusammen mit den betriebsrelevanten Software-Komponenten auf Schweizer Servern war die Fortführung des Betriebs gesichert.

Im Rückblick stellt sich die Frage, ob bei der Technologie- und Anbieterauswahl im Jahr 2021 mögliche Hinweise auf eine drohende Insolvenz stärker hätten berücksichtigt werden können. Wie in Kapitel 5.1 erläutert, hatte der Verein damals die potenziellen Anbieter genau analysiert. Mit rund 100 Mitarbeitenden zählte sensible4 zu den grösseren Anbietern am Markt – mit einem umfangreichen Portfolio, überzeugender Technologie und unterstützenden Investoren im Hintergrund. Ein Konkurs von sensible4 war damals nicht absehbar gewesen.

5.3 Passagieraufkommen

Das Passagieraufkommen lag während des gesamten Projektverlaufs unter den Erwartungen. Dafür gab es mehrere Gründe und verschiedene Gegenmassnahmen, welche das STL ergreifen konnte.

Einerseits waren die Erwartungen an die Fahrgastzahlen durch die Erfahrungen aus dem Vorprojekt «Linie 12» beeinflusst und daher von Beginn an (zu) hoch angesetzt. Die «Linie 12» verkehrte 2018 und 2019 am Rheinfluss in Neuhausen, einem Touristen-Hotspot. Entsprechend hoch war das Aufkommen an potenziellen Fahrgästen im Vergleich zum Mühltal, wo primär Pendlerinnen, Schüler und Anwohnerinnen unterwegs sind. Ausserdem handelte es sich bei den Passanten am Rheinfluss vor allem um Ausflüglerinnen und Ausflügler, welche Zeit, Flexibilität und Neugier mitbrachten. Bei der «STL Linie 13» ging es hingegen darum, dass das automatisierte Fahren im Alltag der Stadtbevölkerung ankommt. Diese zeigen ein anderes Mobilitätsverhalten, da sie eher unter Zeitdruck stehen und daher die schnellste und zuverlässigste Mobilitätsform wählen.

Ein weiterer Grund waren die eingeschränkten Betriebszeiten der «STL Linie 13». Wie in den Kapiteln 2.5 und 4.5 erläutert, verkehrte «Rhyder» jeweils von Montag bis Samstag zwischen 10:00 und 14:00 Uhr. Zu diesen Zeiten ist das Aufkommen an Passanten im Mühltal generell mittel bis tief. Eine Verlegung der Betriebszeiten in den Stossverkehr war aus technischen Gründen nicht möglich (vgl. Kapitel 4.5). Umsetzbar dagegen war ein testweiser Betrieb am Abend zwischen 19:00 und 22:00 Uhr – also nach den Stosszeiten. Die zwei Testwochen im Januar 2024 waren mit Blick auf die Passagierzahlen überraschend erfolgreich. Das Busangebot wurde rege genutzt und geschätzt. Wegen der ungenügenden Verfügbarkeit des Fahrpersonals und Überschneidung/Konkurrenzierung mit Randzeit-Dienstleistungen der lokalen Verkehrsbetriebe vbsh sah die Projektleitung von einer permanenten Ausweitung der Betriebszeiten auf den Abend ab.

Ebenfalls negativ auf die Passagierzahlen wirkte sich die eher kurze Strecke aus. Viele Anwohnende gingen und gehen diese Distanz zu Fuss und sind nicht auf eine Buslinie angewiesen. Die Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer berichteten einheitlich, dass insbesondere ein Zusammenspiel zwischen kurzer Teststrecke und fixer Fahrzeiten dazu führte, dass die Leute nicht den Bus nahmen, sondern zu Fuss gingen. Ein Beispiel: Wollte man vom Bahnhof zur Stahlgiesserei reisen und der Bus fuhr erst in 5 Minuten los, war man zu Fuss schneller. Fuhr der Bus jedoch sofort, war er die schnellere Option. Eine Verlängerung der Teststrecke war durch den Konkurs von sensible4 nicht möglich.

Mehrmals diskutierte die Projektleitung eine Aufhebung des Fahrplans. So verkehrte «Rhyder» beim Abendbetrieb im Januar 2024 nach Bedarf (on-demand) vom Bahnhof Nord ins Mühlental ohne fixen Fahrplan. Aus folgenden Gründen entschied man sich jedoch gegen eine Aufhebung des Fahrplans:

- Der Fahrplan war so ausgerichtet, dass die «STL Linie 13» nicht den Linienbus 23 der vbsh ausbremste. Bei einem Kurs nach Bedarf und ohne Fahrplan, hätten die Begleitpersonen bei jeder Runde auf den vbsh-Bus achten und diesem allenfalls ausweichen und den Vortritt geben müssen.
- Mit dem fixen Fahrplan konnten Passagiere an jeder Station zusteigen. Wäre «Rhyder» nur noch bei Bedarf vom Bahnhof Nord losgefahren, hätte es an den anderen Haltestellen keine verlässlichen Abfahrtszeiten mehr gegeben. Wer beispielsweise bei der Stahlgieserei stadteinwärts den Bus nehmen wollte, hätte sich nicht mehr auf die «STL Linie 13» verlassen können.
- Im Laufe des Pilotbetriebs etablierten sich «Stammgäste», welche sich auf den Fahrplan stützten. Eines der Ziele der «STL Linie 13» war es, mit automatisiertem Fahren im Alltag der Bevölkerung anzukommen. Diese «Stammgäste» wären dann vermutlich genau die Zielgruppe gewesen, die man mit einem Verzicht auf den Fahrplan verloren hätte.

Zuletzt hatte die «STL Linie 13» trotz breiter Berichterstattung in diversen Medien mit einer mangelnden Bekanntheit zu kämpfen. Dies zeigen auch die Resultate der Akzeptanzstudie (vgl. Kapitel 4.2). Folglich wurde die Beschilderung am und im Bahnhof Schaffhausen verstärkt. Ein stärkerer Einbezug in das System des lokalen öffentlichen Transports hätte geholfen, die «STL Linie 13» bekannter zu machen. So wurde die «STL Linie 13» weder in den Bussen der vbsh noch in deren Mobilitätsapp oder jener der SBB angezeigt. Auch der Bus selbst war nicht auf den ersten Blick als öffentliches Verkehrsmittel zu erkennen. Er war bewusst nicht in den Farben und dem Design der vbsh gestaltet. Rückblickend hätte dies die Sichtbarkeit mutmasslich erhöht. Aufgrund erheblicher Nachteile wurde bewusst darauf verzichtet, das Pilotprojekt in den bestehenden lokalen ÖV zu integrieren. Dies hatte zur Folge, dass man zwar über Medienberichte vom Projekt erfuhr, der «STL Linie 13» in der Alltagsmobilität jedoch nicht zwangsläufig begegnete.

6 Projektausstrahlung

Das erste Dual-Mode-Fahrzeug auf Schweizer Strassen erregte national und international erhebliche Aufmerksamkeit. Gleich zu Beginn des Pilotbetriebs berichteten nationale und regionale Medien rege über die «STL Linie 13». Im September 2023 besuchte beispielsweise das SRF mit der Sendung «Einstein» «Rhyder» im Mühlental für einen [Beitrag](#). Mit einem Bericht im TCS-Magazin «Touring» konnte der auflagenstärkste Bericht (Reichweite ca. 1.2 Mio. Leser:innen) über das Pilotprojekt realisiert werden. Weiter gab es Berichte in lokalen Radios und Zeitungen sowie Fachzeitschriften, darunter ein Artikel im Tamedia Verkehrsmonitor. Aufgrund des reibungslosen Betriebs ohne Zwischenfälle gab es keinerlei Negativberichterstattung.

Besuch erhielt die «STL Linie 13» auch von vielen Delegationen aus dem In- und Ausland. Dabei verzeichnete das STL eine Verschiebung des Interessensfokus über den Projektzeitlauf. In den ersten Betriebsmonaten waren es primär Verkehrsbehörden aus anderen Kantonen und dem nahen Ausland, die nach Schaffhausen kamen. Ein Highlight war der Besuch einer 30-köpfigen Delegation aus dem Deutschen Bundesland Baden-Württemberg unter der Führung von Verkehrsminister Winfried Hermann. Dabei ging es insbesondere um Pilotprojekte für automatisiertes Fahren und wie solche Projekte an anderen Orten umgesetzt werden können. Die Technologie stand primär im Fokus.

Später empfing der Verein STL vermehrt Delegationen aus dem öffentlichen Sektor, welche an planerischen Erkenntnissen interessiert waren. So führte der Planungsdachverband Zürich (RZU) im Mühlental eine Weiterbildung zum Thema «Automatisierte Fahrzeuge» durch und absolvierte Probefahrten mit der «STL Linie 13». Auch die Wirtschaftsförderung Zürich machte mit der Netzwerkveranstaltung «Autonome Systeme mit Bodenkontakt» Halt in Schaffhausen. In einem Workshopformat diskutierten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer die heutigen technologischen und regulatorischen Herausforderungen für automatisiertes Fahren. Um ähnliche Themen ging es beim Besuch des Innovationsteams der Verkehrsbetriebe Zürich sowie Workshops mit dem Touring Club Schweiz TCS. In der zweiten Hälfte der Pilotbetriebsphase nahm die Frequenz der Schweizer Delegationsbesuche ab.

Auf internationaler Bühne empfing das STL über den gesamten Betriebszeitraum Delegationen. Den weitesten Weg machten Gruppen aus Brasilien und China. Auch hier lag der Fokus in der Anfangsphase zuerst auf funktionalen und konzeptionellen Aspekten der Technologie, so etwa bei Huawei oder WeRide aus China. Später rückten insbesondere bei den chinesischen Delegationen die behördlichen und regulatorischen Bedingungen für den Einsatz von automatisierten Fahrzeugen in den Fokus. Um diese Themen ging es beispielsweise bei den Delegationsbesuchen aus Hunan oder der Unternehmen ETown Capital und DeepRoute. Für diese Zielgruppe ging es primär darum, ein Verständnis für die rechtlichen Voraussetzungen und Zulassungsprozesse für automatisierte Fahrzeuge in der Schweiz zu gewinnen.

7 Fazit

Mit dem Projekt «STL Linie 13» ist es dem Swiss Transit Lab aus und in Schaffhausen gelungen, ein wegweisendes Pionierprojekt für automatisierte Mobilität im öffentlichen Verkehr unter realen Bedingungen umzusetzen. Über einen Zeitraum von 20 Monaten verkehrte ein automatisierter Dual-Mode-Kleinbus namens «Rhyder» zuverlässig bei jedem Wetter und mit bis zu 30 km/h auf einer definierten Stadtstrecke vom Bahnhof Schaffhausen zum neuen Stadtteil Stahlgießerei. Sowohl Dual-Mode-Fahrzeug, Geschwindigkeit wie auch Wettertauglichkeit stellten je ein Novum für die Schweiz dar.

Technologisch erwies sich die Wahl eines seriennahen Fahrzeugs mit manueller und automatisierter Steuerung als richtungsweisend. Die technische Verfügbarkeit lag bei 97%, deutlich über bisherigen Pilotprojekten mit spezialisierten Shuttles. Gleichzeitig war das System wartungsfreundlich, flexibel im Betrieb und kostengünstiger im Unterhalt. Die Technologie bewährte sich auch bei widrigen Wetterbedingungen wie Regen, Schnee und Dunkelheit – ein zentraler Nachweis für Allwettertauglichkeit.

In Bezug auf die Automatisierung zeigten sich jedoch auch Grenzen: Die Voraussetzungen für SAE-Level 4 wurden nicht vollständig erfüllt. Besonders in komplexen Verkehrssituationen wie Kreisverkehren oder Rückstausituationen blieb das Fahrzeug auf manuelle Eingriffe durch die Sicherheitsfahrpersonen angewiesen. Durch die Insolvenz des Technologiepartners sensible4 konnte die Software nicht wie erforderlich weiterentwickelt werden – und machte eine zentrale Abhängigkeit des Projekts sichtbar.

Die Ergebnisse der Akzeptanzstudie bestätigen, dass das vertraute Erscheinungsbild des OEM-Fahrzeugs die Akzeptanz positiv beeinflusst hat. Gleichzeitig wurde deutlich: Ein ansprechendes Design allein genügt nicht. Entscheidend für das Vertrauen der Bevölkerung sind das erlebte Sicherheitsgefühl, eigene Erfahrungen durch Mitfahrten sowie eine offene und transparente Kommunikation. Besonders ältere Zielgruppen zeigten sich insgesamt zurückhaltender.

Das Projekt «STL Linie 13» liefert wichtige Erkenntnisse für die Weiterentwicklung automatisierter Mobilitätslösungen in der Schweiz. Es zeigt, dass eine Skalierung – etwa hin zu fahrerlosen Systemen – grundsätzlich möglich ist, jedoch eine stabile Technologiepartnerschaft und gezielte Weiterentwicklungen erfordert. Die dabei gewonnenen Erfahrungen bilden eine fundierte Grundlage für künftige Vorhaben wie «Automatisierte Mobilität im Furttal» und leisten einen wichtigen Beitrag zum Aufbau von Know-how im Bereich des automatisierten öffentlichen Verkehrs.

8 Ausblick

Mit dem Folgeprojekt «Automatisierte Mobilität im Furttal» werden die Erkenntnisse aus «STL Linie 13» gezielt weiterentwickelt und in einen neuen räumlichen und betrieblichen Kontext übertragen. Die Projektpartner – SBB, Kanton Zürich und ab 2026 der Kanton Aargau – und das Swiss Transit Lab haben sich zusammengeschlossen, um gemeinsam die Zukunft der Mobilität aktiv zu gestalten. Konkret möchte das Team verstehen, wie selbstfahrende Fahrzeuge künftig den ÖV nutzbringend weiterentwickeln.

Ziele im Folgevorhaben «Automatisierte Mobilität im Furttal»:

- Den Mehrwert automatisierter Mobilität im öffentlichen Verkehr aufzeigen.
- Das Geschäftsmodell verstehen – inklusive Angebotsformen, Kosten, Betrieb und Rollen.
- Die schweizweite Entwicklung der automatisierten Mobilität fördern.

Erstmalig sollen in der Schweiz damit automatisierte Fahrzeuge SAE-Level 4 im Personenverkehr eingesetzt werden. Die Projektpartner sind überzeugt, dass automatisierte Mobilitätsangebote – insbesondere im öffentlichen Verkehr – grosses Potenzial bieten. Sie lassen sich flexibel und kosteneffizient betreiben und können so das Angebot in ländlichen Regionen und Agglomerationen sinnvoll ergänzen. Nach den beiden Projekten «STL Linie 12» und «STL Linie 13» in Schaffhausen wird das Furttal bei Zürich damit zu einer weiteren realen Erprobungsregion für die Mobilität von morgen.

Die Erkenntnisse und Erfahrungen aus den Vorprojekten des Swiss Transit Lab sind von Beginn an in das Folgevorhaben im Furttal eingeflossen: Zentrale Fragen rund um die Auswahl geeigneter Technologiepartner, den Aufbau des Betriebs, die IT-Infrastruktur inklusive Informationssicherheit und Datenschutz (ISDS), die Nutzerakzeptanz sowie Kommunikation, Beteiligung, Begleitforschung und Projektmarketing wurden im neuen Pilotvorhaben von Anfang an strategisch berücksichtigt und in die Projektorganisation integriert. Dadurch konnte das Projektteam im Furttal auf bewährte Erfahrungen aus dem Vorhaben «STL Linie 13» zurückgreifen und bekannte Herausforderungen frühzeitig adressieren. Insbesondere die Erkenntnisse aus dem Bewilligungsprozess sowie die enge Zusammenarbeit mit den zuständigen Stellen – etwa mit dem ASTRA, der Kantonspolizei und kommunalen Behörden – erweisen sich als wertvoller Vorsprung für einen strukturierten und effizienten Projektaufbau.

9 Danksagung

Das Projekt «STL Linie 13» ist das Resultat eines umfassenden Ökosystems rund um das Thema automatisiertes Fahren in der Schweiz und Schaffhausen im Speziellen. Die STL-Mitglieder, Partner und Sponsoren haben das Projekt «STL Linie 13» ermöglicht. Der Verein bedankt sich bei allen Organisationen, Unternehmen, Behörden und Privatpersonen, welche das Pilotprojekt materiell, personell oder finanziell unterstützt und einen Beitrag zur Mobilität der Zukunft geleistet haben:

Projektträger



Vorstand



Förderer



Projektpartner



Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer

Ein spezieller Dank geht an die Sicherheitsfahrerinnen und Sicherheitsfahrer, welche täglich mit «Rhyder» unterwegs waren. Sie bildeten einen unverzichtbaren Teil des Pilotprojekts und oft waren Geduld und Flexibilität gefragt:

Daniel Rapold, Hanspeter Weder (Weder Transport), Johannes Siefer (VBZ), Jürg Rohner, Martin Zahn (VBZ), Matthias Becker, Sandra Gutknecht, Urs Holzthüm, Cedric Nägeli