

EINSATZSZENARIEN AUTONOMER VERKEHRE

Wirtschaftliche Limitationen hochautomatisierter Shuttle-Dienste und mögliche
Lösungen für eine profitable Skalierung der autonomen Mobilitätslandschaft

Autoren: Johannes Wasel & Patrick Eisele

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	03
1. Einführung	05
2. Grundlagen der autonomen Mobilität	07
3. Problemstellung	09
4. Methodisches Vorgehen	11
5. Resultate	14
6. Diskussion von Lösungsansätzen zur Skalierung autonomer Mobilitätsservices	30
7. Zusammenfassung und Fazit	34
8. Literaturverzeichnis	36
9. Abbildungsverzeichnis	36
10. Tabellenverzeichnis	37
11. Abkürzungen und Definitionen	38

Zusammenfassung

Autonome Mobilität hat in Deutschland und Europa seit einigen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen, obwohl die Konzeptphase bisher noch nicht verlassen werden konnte. Innerhalb Deutschlands konnte im internationalen Vergleich frühzeitig eine flächendeckende Regulatorik eingeführt werden, die den Grundstein zur sicheren Einführung autonomer Projekte legt. Technologische Herausforderungen erhalten heutzutage die meiste Aufmerksamkeit, während die Hypothese der ökonomischen Profitabilität neuer Mobilitätsformen selten hinterfragt wird. Finanzkennzahlen bleiben oft undurchsichtig, sowohl für Außenstehende als auch für Involvierte.

Durch die direkte Beteiligung in einem von der Bundesregierung geförderten Pilotprojekts, innerhalb Europas größtem zusammenhängenden Betriebsgebiet für hochautomatisierte Shuttles, sowie Experteninterviews mit relevanten Stakeholdern wurde in dieser Arbeit eine holistische Total Cost of Ownership Analyse erarbeitet. Die Untersuchung umfasst die Kostenzerlegung in die verschiedenen Ebenen des autonomen Gesamtsystems und untersucht spezifische Sensitivitäten.

Obwohl der öffentliche Personennahverkehr meist abhängig von finanziellen Subventionen ist und durch die Routenbindung nicht die Servicequalität von Free-Floating-Services erreicht, stellt dieser trotzdem einen Zielwert für potenzielle Kosten dar. In Zukunft müssen autonome Mobilitätsdienstleistungen den Total Cost of Ownership Vergleich mit konventionellen On-Demand-Services antreten und diesen mittel- bis langfristig gewinnen. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse des hier betrachteten Förderprojektes zeigt, dass aufgrund hoher Entwicklungsaufwände, ungeachtet der Betriebsbedingungen, **eine Kostendeckung nicht realistisch ist**. Die Untersuchung ergab, dass durch Optimierung der größten Sensitivitäten **Einsparpotenziale von ~75% gegenüber dem Ausgangsszenario** mit limitierten Betriebsbedingungen realisiert werden können. Dennoch bleiben die Kosten innerhalb eines nicht wettbewerbsfähigen Bereichs.



Die Analyse potenzieller Zukunftsszenarien präsentiert sich dahingehend deutlich positiver. Auf Basis der vorliegenden konkreten Ergebnisse des KelRide Projektes und unter Berücksichtigung eines Level-4-fähigen, skalierbaren Fahrzeugsystems ergeben sich weitere Möglichkeiten zur **Reduktion der Kosten in einem Bereich von 66 bis 94 % gegenüber den bereits optimierten L4 Szenarien.**

Daher ist die gezielte Selektion adäquater Projekte essenziell, um Skalierungspotenziale zu erschließen und die entstandenen Entwicklungskosten zu rechtfertigen. Im Rahmen dieser Arbeit werden weitere Handlungsempfehlungen präsentiert, die auf dem Weg zur Kostenparität von Relevanz sind.

1. Einführung

Autonomes Fahren stellt nach der Erfindung des Automobils die bedeutendste Innovation in der Mobilitätsentwicklung dar und gewinnt durch die rasanten Fortschritte in den Bereichen Künstlicher Intelligenz (KI), Robotik und Sensorik sowie der Einführung erster Robotaxis auf öffentlichen Straßen zunehmend an Relevanz (Minx & Dietrich, 2015, S. 7).

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Förderprojekt **KelRide** bietet **die weltweit einmalige Möglichkeit**, den Vorhang zu heben und eine detaillierte Untersuchung der Kosten eines hochautomatisierten Shuttle-Services durchzuführen.

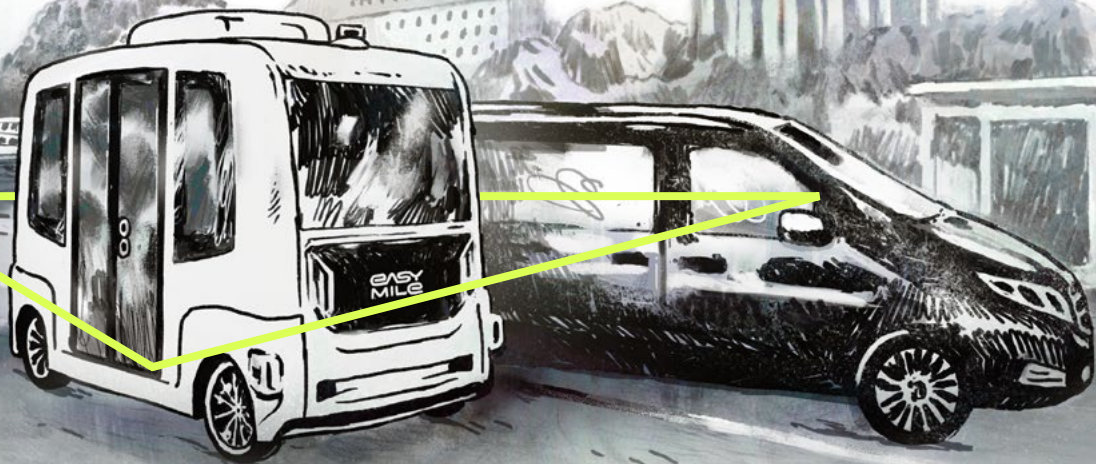
KelRide Projektspezifika

Die Durchführung des KelRide Projektes erfolgte im Zeitraum von Januar 2021 bis Juni 2024 im bayrischen Landkreis Kelheim. Das Projekt mit insgesamt sechs Projektpartnern war durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) gefördert und hatte das Ziel, einen wetterunabhängigen und hochautomatisierten On-Demand Ridesharing-Dienst als Ergänzung zum regional bestehenden öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) zu implementieren. Die Verantwortlichkeiten innerhalb des Projektes sind gemäß *Abbildung 1* definiert.

Konsortialpartner im KelRide Konsortium



Abbildung 1: Verantwortlichkeiten der Konsortialpartner innerhalb des KelRide Projektes (P3-Abbildung)



Für den operativen Betrieb in Kelheim kamen bis zu fünf hochautomatisierte- und elektrifizierte Shuttles des Fahrzeugtyps EZ10 von EasyMile zum Einsatz. Im Projektverlauf wurde das Betriebsgebiet sukzessive erweitert, und stellt in der letzten Ausbaustufe das **größte zusammenhängende, autonome Betriebsgebiet Europas dar, bestehend aus ~30 km Straßennetz** und 45 virtuellen Haltestellen. Der Service wurde an fünf Tagen der Woche im Rahmen des On-Demand-Betriebs für die Kelheimer Bevölkerung bereitgestellt.

2. Grundlagen der autonomen Mobilität

In diesem Kapitel werden die als notwendig erachteten Grundlagen dargelegt, die im Zusammenhang mit dem vorliegenden Papier von Relevanz sind. Zu Beginn erfolgt eine Erläuterung der Automatisierungsgrade gemäß der durch die Society of Automotive Engineers (SAE) definierten SAE J3016, gefolgt von einer Darstellung des autonomen Mobility-as-a-Service (MaaS)-Ökosystems.

2.1. Automatisierungsgrade nach SAE-Level

Die durch die SAE J3016 (SAE International, 2021) definierten Automatisierungsstufen, sind in *Abbildung 2* visualisiert. Die ersten drei Stufen, Level 0 bis Level 2, beschreiben fahrerunterstützende Funktionen. Die automatisierte Fahrzeugführung beginnt ab Level 3. Ab Automatisierungsstufe 4 ist keine Rückübernahme der Fahrzeugführung durch einen Fahrer mehr erforderlich. Das Fahrzeug kann jedoch nur unter spezifischen, klar definierten Bedingungen vollständig autonom operieren. Diese Systemgrenzen werden Operational Design Domain (ODD) genannt. Im Gegensatz dazu erfordert das höchste Automatisierungslevel, SAE-Level 5, dass das System in der Lage ist, das Fahrzeug unter allen Bedingungen, zu jeder Zeit und an jedem Ort sicher zu steuern.

Im Rahmen des KelRide-Projekts erfolgt der **Betrieb auf Level 2**. Dabei ist stets ein Sicherheitsfahrer an Bord, der die Verantwortung für den sicheren Betrieb trägt und in Notfallsituationen eingreifen kann. Wirtschaftliche Vorteile im Rahmen von MaaS ergeben sich jedoch erst ab Automatisierungsstufe 4. Diese Skalierbarkeit resultiert primär daraus, dass ab Level 4 der Fahrer als größter Kostenfaktor entfällt und durch eine technische Aufsicht ersetzt wird, die mehrere Fahrzeuge simultan überwachen kann. Je höher das Verhältnis zwischen Fahrzeugen und technischer Aufsicht (1:X), desto kostengünstiger kann der Betrieb gestaltet werden.

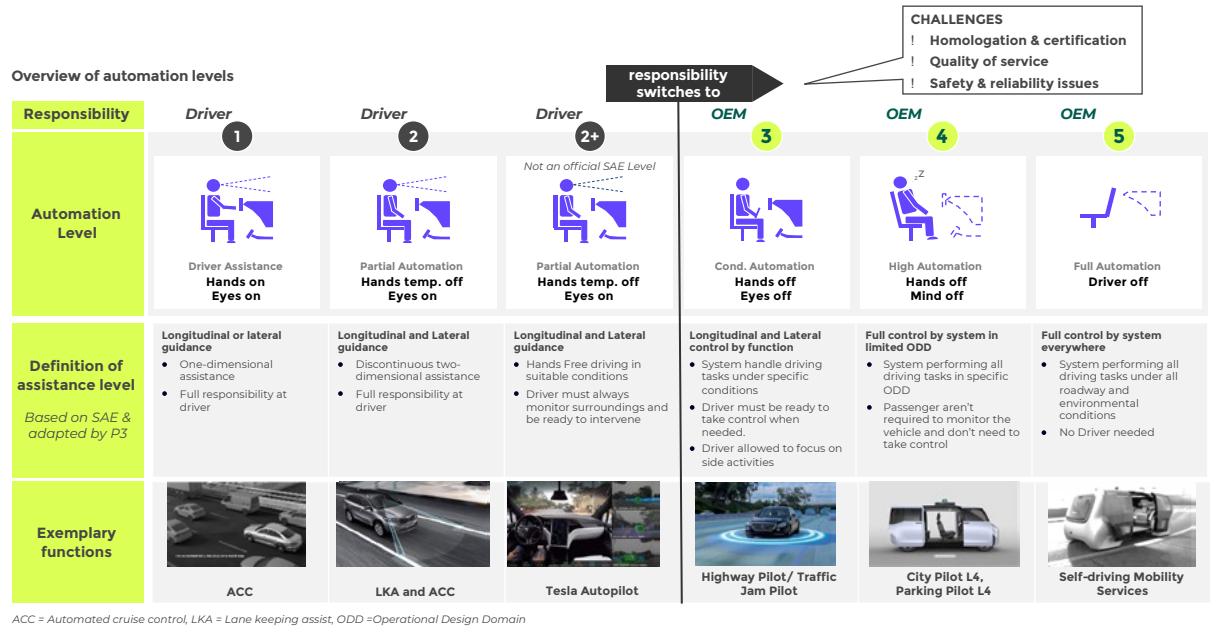


Abbildung 2: SAE J3016 – Stufen des autonomen Fahrens. Anlehnung an SAE International (2019)

2.2. Mobility as a Service Layer-Modell

Das **P3 MaaS-Layer-Modell** dient der Analyse autonomer Mobilitäts-Ökosysteme (siehe Abbildung 3). Die Darstellung des MaaS-Betriebs erfolgt anhand des fünfschichtigen Modells (vgl. (Kaempfer, 2024)). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist es von essenzieller Bedeutung, die Kostenanalysen zu segmentieren, um eine fundierte Untersuchung zu gewährleisten.

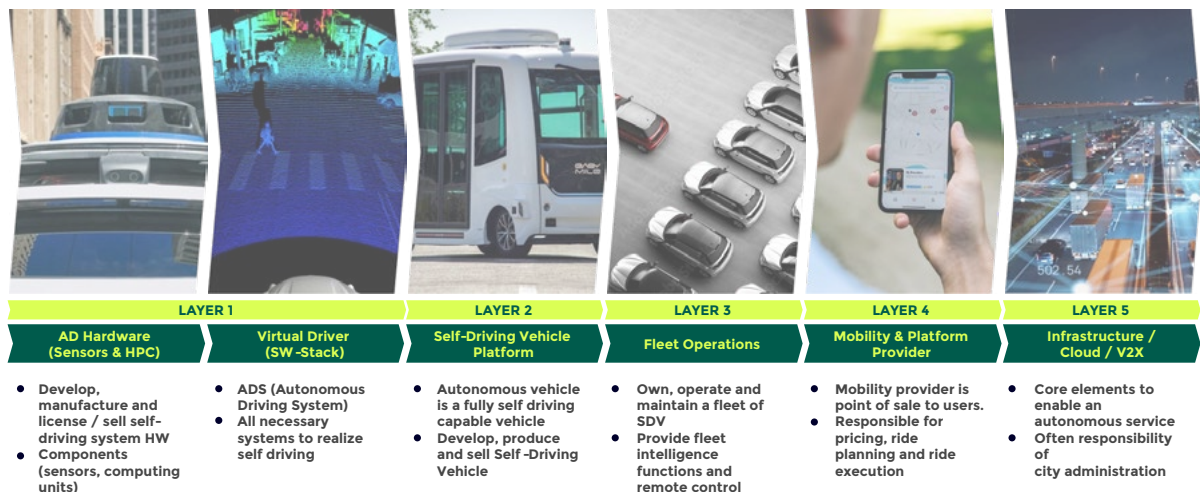


Abbildung 3: P3 MaaS-Layer-Modell zur Beschreibung des autonomen Mobilitäts-Ökosystems (Kämpfer, 2024)

3. Problemstellung

Die Implementierung und der Betrieb autonomer Mobilitätsdienste stehen vor zentralen Herausforderungen, insbesondere den hohen Entwicklungs-, Investitions- und Betriebskosten sowie einer begrenzten Finanzierungslandschaft. Um ein nachhaltiges Geschäftsmodell für autonome Mobilitätsdienste zu etablieren, müssen diese Kosten signifikant reduziert werden. Insbesondere die derzeit zögerliche Finanzierungslandschaft in Europa erschwert die Entwicklung skalierbarer Lösungen im gesamten Ökosystem autonomer Fahrzeuge. Technologische Herausforderungen erhalten heutzutage die meiste Aufmerksamkeit, während die Hypothese der ökonomischen Profitabilität neuer Mobilitätsformen selten hinterfragt wird. Finanzkennzahlen bleiben oft undurchsichtig, sowohl für Außenstehende als auch für Involvierte.

Vor diesem Hintergrund untersucht diese Arbeit die Wirtschaftlichkeit hochautomatisierter Shuttle-Services. Die Grundlage dafür bietet das KelRide-Projekt, welche die weltweit einmalige Möglichkeit darstellt, den Vorhang zu heben und Einblicke in die Kostenstruktur dieser Dienste zu erlangen. Ziel der Untersuchung ist die transparente Darstellung der Kostenstruktur eines autonomen Mobilitätsdienstes sowie die Identifizierung zentraler Hebel für den Übergang von Pilotprojekten zu wirtschaftlich tragfähigen Services.

Während das hier betrachtete KelRide-Projekt, Europas größtes zusammenhängendes Betriebsgebiet darstellt, steht es im globalen Vergleich nicht allein da. *Abbildung 4* zeigt neben dem KelRide-Projekt eine Auswahl internationaler Pilotprojekte mit autonomen Fahrzeugen auf öffentlichen Straßen. Es zeigt sich, dass insbesondere in den USA, China und Deutschland eine Vielzahl an Pilotprojekten implementiert sind und sich im operativen Betrieb befinden. In den USA sticht das Unternehmen Waymo hervor, das autonome Fahrzeuge in den Städten San Francisco, Los Angeles, Phoenix und Austin auf die Straßen gebracht hat und dort seinen Kunden bereits einen kostenpflichtigen Service anbietet. In China ist der Markt aufgrund zahlreicher Anbieter noch stärker umkämpft. Diese betreiben ihre autonomen Fahrzeuge in ausgewiesenen Testzonen chinesischer Städte, in denen Fahrgäste ebenfalls gegen Entgelt befördert werden. Auch

in Deutschland gibt es aktive Pilotprojekte, die maßgeblich von Technologieprovidern wie EasyMile, Mobileye, und Holon vorangetrieben wurden. Derzeitige Pilotprojekte umfassen in der Regel jedoch nur eine begrenzte Anzahl von Fahrzeugen und sind bislang nicht auf einen skalierbaren Service ausgelegt. Obwohl Städte wie Hamburg bis 2030 den operativen Betrieb von bis zu 10.000 autonomen Fahrzeuge anstreben, konnte bisher weltweit kein profitabler autonomer Mobilitätsservice realisiert werden (BMDV, 2023)

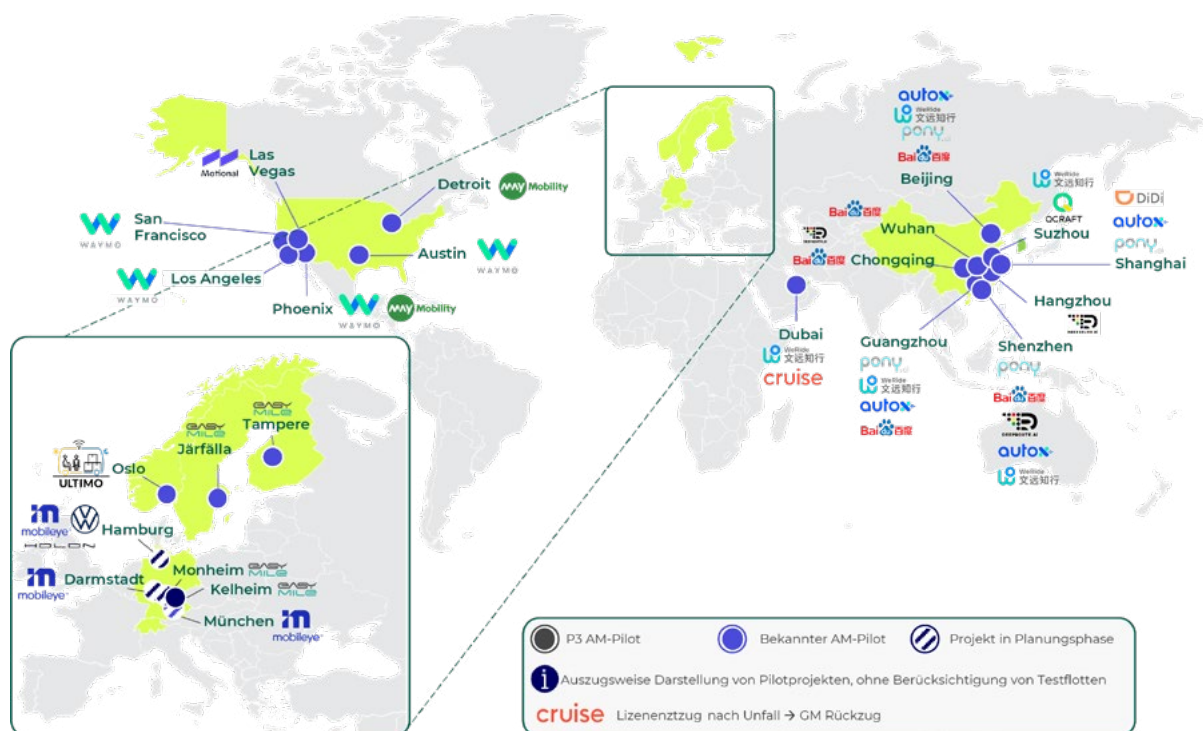


Abbildung 4: Auszugsweise Darstellung von Pilotprojekten, ohne Berücksichtigung von Test-flotten (Quelle: P3 AM, 2024)

4. Methodisches Vorgehen

4.1. Aufbau des TCO-Modells

Das Vorgehen nach dem Prinzip der Total Cost of Ownership (TCO) stellt ein weit verbreitetes Werkzeug zur Berechnung und Analyse der Gesamtkosten eines Projekts über dessen gesamte Lebensdauer dar. Das durch die P3 erstellte TCO-Modell ist ein wesentlicher Bestandteil des vorliegenden Papiers und dient dazu, die betriebswirtschaftlichen Aspekte des autonomen Shuttleprojekts KelRide's genauer zu beleuchten. Es berücksichtigt verschiedene Kostenkategorien und ermöglicht eine detaillierte Betrachtung der Kostenstruktur. Die Analyse erfolgt gemäß *Tabelle 1* nach einigen projektspezifischen Anpassungen und orientiert sich dabei am P3 Layer-Modell.

Tabelle 1: Beispielhafte Kostenpositionen im KelRide Layer-Modell

Layer 0: Projektgrundlagen	Layer 1: SDS & ODD	Layer 2: Fahrzeuge	Layer 3: Flottenbetrieb	Layer 4: Mobilitätsangebot
▪ Kosten für Projektmanagement Gesamtprojekt ▪ Kommunikationskosten wie Marketing und Website	▪ Entwicklung und Validierung der All-Weather-Proof (AWP)-Funktion ▪ ÖPNV-Integration ▪ Integration einer Ridesharing-API	▪ Projektmanagement fahrzeugseitig ▪ Fahrzeugbegutachtung und Genehmigungen	▪ Personalkosten Operatoren ▪ Wartungsvertrag ▪ Personalkosten Flottenkontrollcenter	▪ Kosten für On-Demand-App, Kundensupport und -service ▪ Erstellung synthetisches Nachfragemodell ▪ Wirkungsuntersuchung & Simulationen

4.2. Methodisches Vorgehen zur Erstellung der Zukunftsszenarien

Nach Analyse der Kostenpositionen des KelRide Entwicklungsprojektes wurden mittels einer ABC-Analyse die wichtigsten Sensitivitäten identifiziert, welche anschließend einer Sensitivitätsanalyse unterzogen wurden. Im nächsten Schritt wurden in verschiedenen Szenarien (hier: „Folgeprojekte“), Veränderungen der sensibelsten Parameter durchgespielt. Abschließend wurde innerhalb einer

Greenfield-Analyse die Anforderungen an eine zukünftige Fahrzeugplattform definiert, anhand welcher mögliche Zukunftsszenarien, unabhängig von den im KelRide Projekt vorliegenden Bedingungen, betrachtet wurden (siehe Abbildung 5).

KelRide Bedingungen

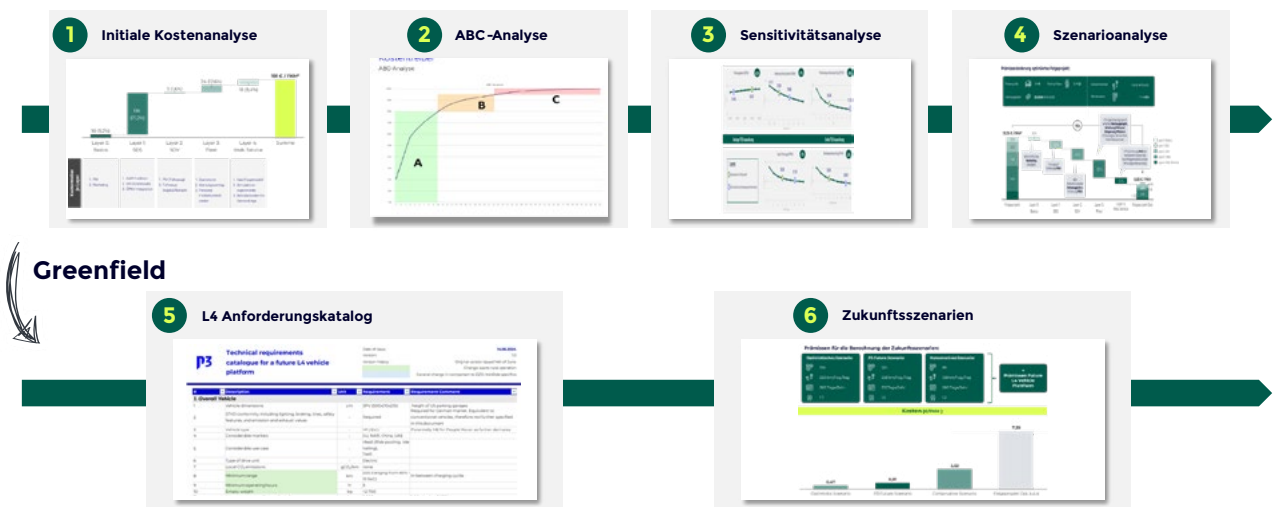


Abbildung 5: Methodisches Vorgehen in diesem Papier. Wirtschaftlichkeitsanalyse unter Projektspezifika, gefolgt von Greenfield Approach (P3-Abbildung)

4.3. Beschreibung und Charakteristika der Folgeprojekte

Nachfolgend werden die drei Szenarien hinsichtlich der Optimierungspotentiale sowie deren Nutzbarkeit für Folgeprojekte und deren zeitliche Einordnung beschrieben (siehe Abbildung 6).

a) Szenario „Folgeprojekt“: Es werden die finanziellen Auswirkungen basierend auf der Replikation des KelRide Projektes in einer vergleichbaren Umgebung (ähnliche Topologie, Größe des Betriebsgebiets und Einwohnerzahl) ohne die Betrachtung von Entwicklungskosten kalkuliert. Alle weiteren Prämissen bleiben identisch zum Referenzpunkt des KelRide Entwicklungsprojektes.

b) Szenario „Optimiertes Folgeprojekt“: Das optimierte Folgeprojekt beinhaltet die Optimierung von Parametern basierend aus der Sensitivitätsanalyse bei bestehender Verwendung der EZ10-Fahrzeugplattform, des L2-Betriebs mit

Sicherheitsfahrer sowie einem vergleichbaren Betriebsgebiet.

c) Szenario „Optimiertes L4-Folgeprojekt“: Beschreibt die Weiterentwicklung des „optimierten Folgeprojekts“ hin zu einem Level 4 Betrieb mit einer Technischen Aufsicht, mit einem erwarteten Eintrittszeitpunkt zwischen 2026 – 2027.

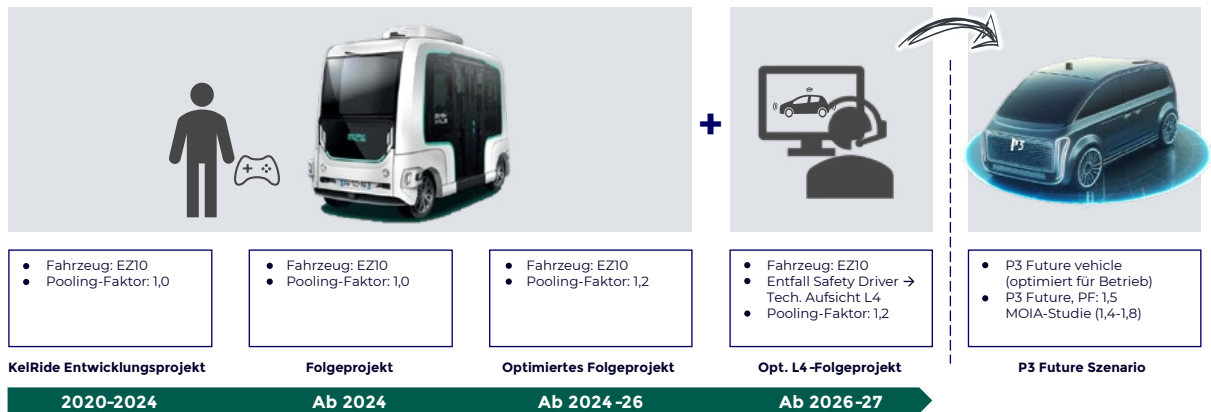


Abbildung 6: Szenarioübersicht und Charakteristika (P3-Abbildung)

Diese Herangehensweise stellt die Evaluation des Ist-Zustands dar und dient als Absprungbasis für die Analyse der Zukunftsszenarien.

5. Resultate

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Ergebnisdarstellung aller innerhalb des KelRide Projektes gesammelten und erarbeiteten Ergebnisse.

Hierbei werden im ersten Unterkapitel die TCO-Betrachtung zwischen dem KelRide Entwicklungsprojektes und einem Folgeszenario ohne Entwicklungsaufwände betrachtet.

Im nachfolgenden Unterkapiteln 5.2 und 5.3 werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sowie die aufgebauten Folgeprojekte diskutiert und verglichen.

Im Kapitel 5.4 wird der L4-Anforderungskatalog für eine zukünftige und skalierungsfähige Fahrzeugplattform eingeführt, die als Basis für die Betrachtung der in Kapitel 5.5 dargestellten P3 Zukunftsszenarien dient. Hier wird abschließend ein Ausblick in die Kostenstruktur zukünftiger L4-MaaS Dienstleistungen gegeben.

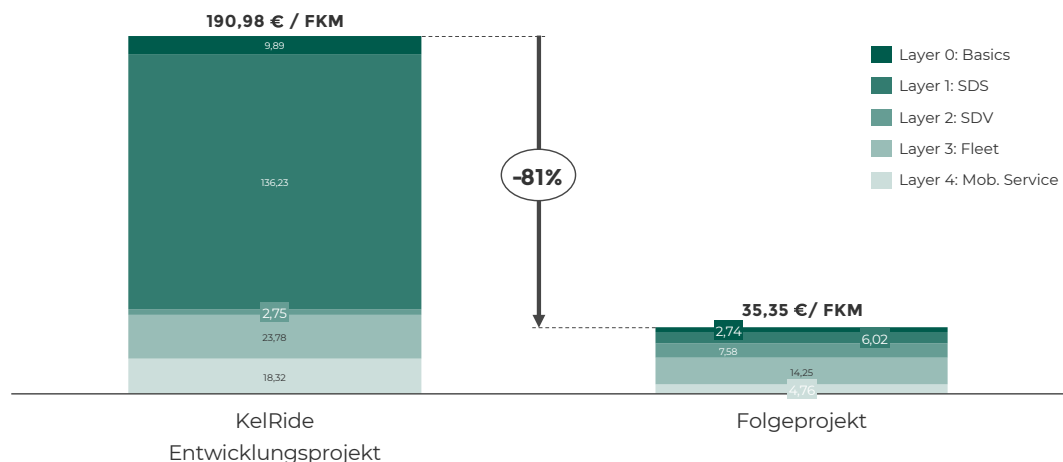
5.1. TCO KelRide Entwicklungsprojekt und Folgeprojektszenario

Im Rahmen des TCO-Modells bleiben einige wesentliche Parameter in allen Folgeszenarien unverändert, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. So wird in allen Szenarien von einer Projektlaufzeit von 36 Monaten ausgegangen. Ebenso werden das Servicegebiet, die erfassten Straßenkilometer, die Einwohnerzahl der betrachteten Stadt im Einsatzgebiet sowie die Kosten für den Betriebshub der Fahrzeuge, der Strompreis pro kWh und die spezifischen Eigenschaften der autonomen Fahrzeuge als konstant betrachtet.

Die Aufstellung der initialen Kostenaufschlüsselung des **KelRide Entwicklungsprojekts** wurde unter Berücksichtigung der aktuellen Rahmenbedingungen und in Zusammenarbeit der Konsortialpartner durchgeführt. Initial wurde das Entwicklungsprojekt lediglich mit zwei Fahrzeugen gestartet und durch den hohen Entwicklungsaufwand konnte lange

Zeit kein verlässlicher Service den Nutzer*innen angeboten werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen, wurde für die Berechnung ein Pooling Faktor von 1,0 definiert, womit die Kosten eines Fahrzeugkilometers (FKM) mit denen eines Personenkilometers (PKM) gleichgesetzt werden. Ab Dezember 2023 wurde im Zuge der letzten Betriebsgebietserweiterung, die Flottenanzahl auf 5 Fahrzeuge erhöht, was zu einer Verbesserung der allgemeinen Servicequalität beitrug.

Für die Aufstellung des „**Folgeprojekt**“ - **Szenarios** wurden sämtliche (Weiter-) Entwicklungskosten, die im KelRide-Projekt angefallen sind, entfernt. Dieses Szenario soll die Kosten eines Folgeprojektes unter ähnlichen Bedingungen in einer vergleichbaren Zielstadt bzw. mit ähnlichen Charakteristika der Service-Area in Bezug auf Kelheim aufzeigen. Dabei entsprechen die Betriebsparameter denen des Betriebs in Kelheim, was bedeutet, dass eine tägliche Betriebszeit von sieben Stunden, eine tägliche Fahrleistung von 35 Kilometern sowie 250 Betriebstage pro Jahr und der operative Betrieb mittels fünf Vollzeitarbeitskräfte (FTE) an Sicherheitsfahrern festgelegt wird. Ergänzend wird im Folgeprojekt mit einer durchgängigen Flottengröße von fünf Fahrzeugen über die gesamte Projektlaufzeit von 36 Monaten gerechnet. Die Ergebnisse der TCO-Analyse verdeutlichen, dass durch den Wegfall der Entwicklungskosten die Gesamtkosten der TCO im Folgeprojekt signifikant gesenkt werden können. Die Kosten pro Fahrzeugkilometer (FKM) reduzieren sich von **190,98 € auf 35,35 €**, was einer Reduktion von 81 % entspricht (siehe Abbildung 7).



*PKM = Personenkilometer
FKM = Fahrzeugkilometer

Pooling - Faktor: 1,0
FKM¹ = PKM²

Abbildung 7: TCO-Vergleich: Entwicklungsprojekt vs. Folgeprojektszenario (P3-Abbildung)

Trotz der enormen Kostenreduktion von 81 % gegenüber dem Entwicklungsprojekt, muss festgehalten werden, dass das Folgeprojekt **aus wirtschaftlicher Betrachtung weiterhin unattraktiv und zu teuer bleibt**. Eine wichtige Erkenntnis ist, dass unter den angenommenen Ausgangsprämissen und vor allem hinsichtlich der geringen operativen Betriebsparametern keine Kostendeckung, geschweige denn die Profitabilität erreichbar ist. Die laufenden Betriebskosten (OPEX) gewinnen gegenüber den Kapitalinvestitionen (CAPEX) immer mehr an Wichtigkeit, was die Auslastung und den operativen Betrieb der Fahrzeuge stark in den Vordergrund rückt.

5.1.1. ABC-Analyse und Ermittlung der größten Kostentreiber:

Mittels der ABC-Analyse wurden die größten Kostentreiber identifiziert. Die Abschreibungskosten der Flottenfahrzeuge sind mit 20,4 % der größte Kostenblock, gefolgt von den Kosten für Wartung und Instandhaltung (12,9 %), den Personalkosten für die Sicherheitsfahrer (12,6 %), und die Self-driving-system (SDS)-Softwarelizenzen (11,9 %). Die vorliegende Analyse ergibt, dass die vier A-Kostenpositionen einen Anteil von 57,8 % der Gesamtkosten ausmachen.

5.2. Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Mittels der Sensitivitätsanalyse wurden wesentliche Faktoren identifiziert und deren Auswirkung auf die TCO untersucht. Die Analyse berücksichtigt die folgenden sechs zentralen Stellhebel: **Fahrleistung pro Stunde pro Fahrzeug, Betriebsstunden pro Tag pro Fahrzeug, Pooling Faktor, Flottengröße, Fahrzeugkosten und Stromkosten pro kWh.**

Gemäß *Abbildung 8* zeigen die analysierten Sensitivitäten, dass operative Faktoren signifikante Auswirkungen auf die TCO haben. Die Anhebung der **Fahrleistung** von fünf Kilometer pro Stunde auf zehn km/h resultiert in einer TCO-Reduktion von 50 %. Die Verlängerung der **Betriebszeiten** von sieben auf zehn Stunden pro Tag senkt die TCO um weitere 25 %. Der **Pooling Faktor**, welcher die Effizienz der Fahrzeugauslastung beschreibt, hat ebenfalls eine erhebliche Wirkung. Die

Erhöhung von 1,0 auf 1,2 führt zu einer 17 %-igen Reduktion der TCO.

Deutlich weniger Einfluss haben die **Anzahl der Fahrzeuge** (Erhöhung der Flotte von fünf auf acht Fahrzeuge → TCO-Reduzierung um 12 %) und die **Fahrzeugkosten** (Senkung von 315.000€ auf 165.000€ → TCO-Reduzierung um 9,7 %). Abschließend festzuhalten ist, dass die **Stromkosten**, angesichts der geringen Fahrleistung im Projekt, nur eine minimale Auswirkung auf die TCO haben.



Abbildung 8: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (P3-Abbildung)

5.3. Szenarioanalyse der optimierten Folgeprojekte

Basierend auf den vorangegangenen Analysen, wurden nachfolgend zwei optimierte Folgeprojektszenarien ausgearbeitet. KelRide-spezifische Prämissen, wie die Fahrzeugplattform, die Nutzung eines entsprechenden Mobilitätshubs (Nutzungsobergrenze von acht Fahrzeugen) werden beibehalten und die untersuchten Sensitivitäten innerhalb ihrer gegebenen Grenzen optimiert.

Für beide Szenarien gelten die in *Abbildung 9* dargestellten, veränderten Prämissen und Rahmenbedingungen:

1. **Anhebung der Flottengröße** von fünf Fahrzeugen auf acht Fahrzeug (Begrenzung auf acht Fahrzeuge aufgrund der Limitierung des Mobilitätshubs)
2. Reduzierung des **Fahrzeugpreises** von 315.000€ je Fahrzeug auf 165.000€
3. Anhebung der **Fahrzeuglaufleistung** jedes Fahrzeugs von fünf Kilometer je Stunde auf zehn

4. Anhebung der **Betriebsdauer** der Fahrzeuge von sieben Stunden je Tag auf zehn Stunden (Limitierung der täglichen Betriebsstunden aufgrund der Batteriekapazität und der Ladegeschwindigkeit)
5. Anhebung des **Pooling Faktors** von 1,0 auf 1,2

Prämissenänderung optimiertes Folgeprojekt:

Flottengröße:	 5 → 8	Pooling-Faktor:	 1,0 → 1,2	Vehicle Kilometer	 5 km/h → 10 km/h
Fahrzeugkosten:	 315.000€ → 165.000€	Betriebsdauer:	 7 h → 10 h		

Abbildung 9: Prämissenänderung für das optimierte Folgeprojekt (P3-Abbildung)

Des Weiteren ist ein **optimiertes L4-Folgeprojekt** entwickelt worden, welches auf den Optimierungen des vorherigen Szenarios aufbaut und zusätzlich den L4-Betrieb integriert, in welchem der Sicherheitsfahrer durch eine technische Aufsicht ersetzt wird. Für dieses Szenario wird ein Aufsichtsschlüssel von 1:5 angenommen, was bedeutet, dass ein Remote Operator bis zu fünf Fahrzeuge beaufsichtigen kann. Durch die Einführung der technischen Aufsicht kann die 1-zu-1-Beziehung zwischen physischen Sicherheitsfahrer und Fahrzeug aufgebrochen werden.

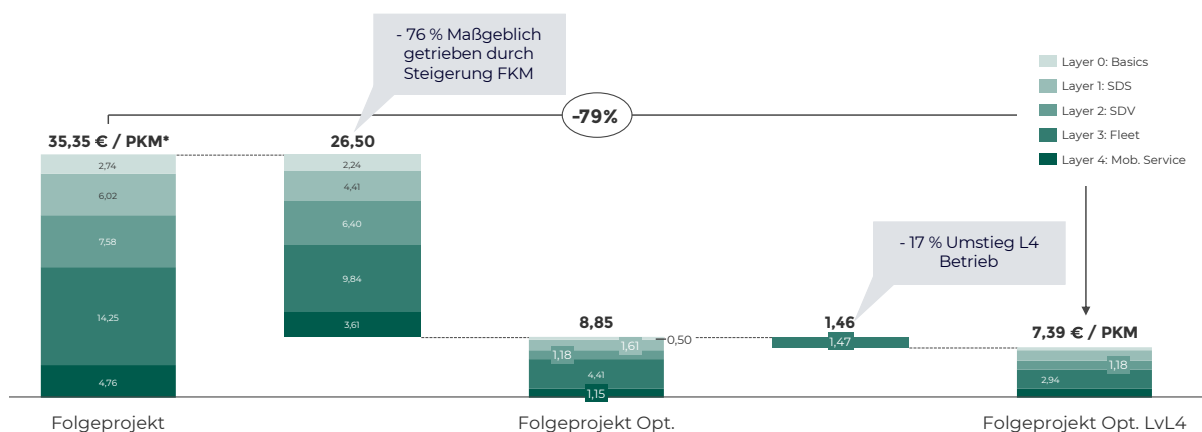


Abbildung 10: Kosteneinsparung durch den Entfall der Sicherheitsfahrer (P3-Abbildung)

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der drei Folgeprojektszenarien. Ausgehend von den ursprünglichen 35,35 € je PKM, wird durch die Optimierung der beschriebenen Parameter eine Reduzierung der TCO von 75 % auf 8,85 € je PKM erzielt. Durch die

Einführung der technischen Aufsicht, kann eine weitere Reduzierung der Kosten je PKM von 1,46 € (17 %) erzielt werden. Damit ergeben sich TCO-Gesamtkosten für das **optimierte L4-Folgeprojekt** von **7,39 € je zurückgelegtem PKM**. Das wiederum entspricht einer Reduzierung gegenüber dem Ausgangsszenario des **Folgeprojekts** von 79 %.

5.4. L4 Anforderungskatalog für eine zukunftsfähige Fahrzeugplattform

Die in [Kapitel 5.3](#) präsentierte Szenarioanalyse hat aufgezeigt, dass die im KelRide-Projekt implementierte Fahrzeugplattform des EZ10-Fahrzeugs an zahlreichen Stellen als limitierender Faktor wirkt. Auch wenn durch Software-Updates eine signifikante Steigerung der Leistungsfähigkeit des SDS hätte erzielt werden können, wären die Limitationen des Basisfahrzeugs einem rentablen Betrieb weiterhin im Weg gestanden.

Ein möglicher Ansatz zur Überwindung der identifizierten Herausforderungen liegt in der Entwicklung einer **skalierbaren Fahrzeugplattform**. Im Folgenden werden die Anforderungen an eine **Level 4-fähige Fahrzeugplattform** in Form eines Anforderungskatalogs definiert. Der Anforderungskatalog umfasst die in [Abbildung 11](#) dargestellten sieben Bereiche und soll als möglicher **Blueprint** für die Entwicklung zukunftsfähiger Fahrzeuge dienen.



Anforderungskatalog L4-Fahrzeugplattform



Abbildung 11: Aufbau des L4-Anforderungskatalogs für eine zukünftige Fahrzeugplattform (P3-Abbildung)

Insbesondere die Säulen **Gesamtfahrzeug**, **Batteriekonzept** und **SDS-Fähigkeiten** haben das Potenzial, die TCO erheblich zu senken.

Bei der Auslegung der Anforderungen des **Gesamtfahrzeuges** hat vor allem der Energieverbrauch des Fahrzeuges, die Gesamtkilometerleistung sowie Betriebsstunden über die Lebensdauer einen enormen Einfluss auf die TCO. Ein niedriger Energieverbrauch ermöglicht es den Fahrzeugen, längere Strecken zurückzulegen und länger im Betrieb zu bleiben, bevor sie wieder geladen werden müssen. Dies erhöht die Gesamtkilometerleistung und die Betriebsstunden über die gesamte Lebensdauer. Wie in [Kapitel 5.2](#) erläutert, ist die Erhöhung der täglichen Betriebsstunden ein essenzieller Bestandteil der operationellen Kostensenkung.

Im Bereich des **Batteriekonzepts** sind Batteriekapazität und Ladegeschwindigkeit die entscheidenden Faktoren für die TCO. Die Entwicklung und Integration von Batterien mit höherer Kapazität kann die tägliche Reichweite und somit die Betriebszeit der Fahrzeuge verlängern, was zu geringeren Kosten pro FKM führt. Die Einführung von Schnellladeoptionen würde die Ladezeiten erheblich verkürzen und die Verfügbarkeit der Fahrzeuge steigern, indem die Standzeiten im Hub reduziert werden. Dies resultiert in einer erhöhten Betriebszeit und einer Reduzierung der Kosten pro FKM.

Darüber hinaus kann die Weiterentwicklung und Erweiterung der **SDS-Fähigkeiten** positive Effekte auf die TCO haben. Eine hohe Verfügbarkeit der SDS-Funktionen stellt sicher, dass das Fahrzeug kontinuierlich im Betrieb bleibt. Ein Ausfall des SDS erfordert eine Betriebsunterbrechung des Fahrzeugs. Dadurch würde nicht nur die Dienstqualität gesteigert, sondern auch das Vertrauen der Nutzer gestärkt werden.

Die weiteren Säulen des Anforderungskatalogs wie die Auslegung der Plattformarchitektur, der Systemarchitektur und des Backends werden an dieser Stelle nicht vertiefend behandelt. Die Auswirkung dieser Säulen auf die TCO sind weniger stark, jedoch ist die Einhaltung der respektiven Parameter trotzdem von entscheidender Wichtigkeit, um einen sicheren und inklusiven Service anbieten zu können.

Neben den Fahrzeuganforderungen, die durch den Anforderungskatalog abgedeckt wurden, sind die Infrastruktur und die Zuverlässigkeit des Betriebs entscheidende Faktoren für die Wirtschaftlichkeit eines Shuttle-Services. Eine Optimierung der Infrastruktur durch kosteneffiziente und flexible Lösungen, wie modulare Garagensysteme oder die Nutzung bestehender Infrastrukturen, kann die CAPEX-Kosten senken. Die in diesem Kontext eingesetzten elektrischen Kleinserienfahrzeuge und deren Batteriesysteme erforderten spezifische Anforderungen an die Infrastruktur ihres Unterstands, was zu höheren Kosten führte. Eine skalierbare Fahrzeugplattform bietet hier einen entscheidenden Ansatzpunkt: Wenn die technischen Anforderungen so gestaltet werden, dass keine Sonderbehandlung autonomer Fahrzeuge mehr erforderlich ist, kann die autonome Fahrzeugflotte einfacher in bestehende, traditionelle Betriebshöfe integriert werden.



5.5. P3 Zukunftsszenarien

Nachdem die Hürden für die Skalierung von AD (autonomous driving) MaaS identifiziert und mögliche Lösungsansätze entwickelt wurden, widmet sich dieses Kapitel der Analyse der Potenziale von AD MaaS-Diensten unter Betrachtung dieser Lösungsansätze in einem Greenfield-Ansatz. Dabei erfolgt die Betrachtung unabhängig von den spezifischen Gegebenheiten des KelRide-Projekts.

Methodik

In Anlehnung an den in [Kapitel 5.4](#) beschriebenen Level 4-Anforderungskatalog wurden die Parameter Betriebsstunden, Fahrleistung, Einsatztage, Pooling-Faktor sowie weitere betriebliche Kennzahlen gezielt angepasst, um drei Zukunftsszenarien zu entwickeln. Diese Anpassungen zielen darauf ab, die im KelRide-Projekt identifizierten Limitationen zu überwinden und durch einen effizienteren operativen Betrieb die bisherigen Ergebnisse signifikant zu verbessern, insbesondere in Bezug auf die Reduzierung der Kosten pro PKM. Bei der Erstellung der Zukunftsszenarien wurde außerdem darauf geachtet, dass diese eine realistische Abbildung eines zukünftigen autonomen Mobilitätsservices darstellen. Die spezifischen Parameter und Rahmenbedingungen der einzelnen Szenarien sind in *Tabelle 2* zusammengefasst.

Tabelle 2: Rahmenbedingungen der Szenarien (P3)

	Optimistisches Szenario	P3 Zukunftsszenario	Konservatives Szenario
Betriebsstunden/ Tag [h/d]	15	12	8
Fahrleistung/ Tag [km/d]	330	228	128
Einsatztage/ Jahr [km/ a]	360	312	260
Pooling Faktor	1,7	1,5	1,2

Szenarien

Die Basis der Szenarienentwicklung bildet das **P3 Zukunftsszenario**, welches unter der Berücksichtigung der neuen Level-4 Fahrzeugplattform und der damit einhergehenden Steigerung der operativen Hebel als realistisch eintreffendes Szenario bewertet werden kann. Für dieses Szenario werden die operativen Betriebsparameter mit 12 Stunden Betriebszeit pro Tag während sechs Tagen pro Woche (= 312 Betriebstage pro Jahr), einer Fahrleistung pro Tag von 228 km pro Fahrzeug (= 19km/h Fahrleistung) sowie einem Pooling Faktor von 1,5 angenommen. Abgeleitet von diesem initialen Szenario werden zwei weitere Zukunftsszenarien definiert, wobei im ersten Fall eine konservative Auslegung der operativen Faktoren gewählt und beim letzteren eine deutlich optimistischere Auswahl vorgenommen wird.

Für das konservative Szenario werden die Werte deutlich reduziert, beispielsweise wird die Betriebszeit auf 8 Stunde pro Tag sowie die Einsatztage auf 260 Tage pro Jahr (= Betrieb an lediglich fünf Tagen pro Woche) reduziert. Des Weiteren wird mit einer Durchschnittsfahrleistung von 16 km/h, resultierend in einer Fahrleistung pro Tag pro Fahrzeug von 128 km, gerechnet. Das entspricht dem Status Quo der optimierten Folgeprojekte aus KelRide. Für das konservative Zukunftsszenario wird ebenfalls der Pooling Faktor mit 1,2 aus dem optimierten Folgeprojekt übernommen. Für die Betrachtung des optimistischen Szenarios werden die operativen Parameter im Rahmen der Machbarkeit der Level-4 Fahrzeugplattform signifikant angehoben. Es soll der Betrieb an 15 Stunden pro Tag zur Verfügung stehen und dabei eine Fahrleistung von 330 km pro Tag erreicht werden. Das entspricht einer Durchschnittsfahrleistung von 22 km/h pro Fahrzeug. Die Betriebstage werden auf 360 Tage pro Jahr erhöht, und der Pooling-Faktor wird mit 1,7 angesetzt. Diese Annahme basiert auf einer Studie des Unternehmens MOIA zu einem autonomen On-Demand-MaaS-Service in Hamburg (Kagerbauer, et al., 2021), die sogar noch höhere Pooling-Werte prognostizierte. Im Rahmen dieses Projekts wurde jedoch in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin ein bewusst konservativerer Pooling-Faktor festgelegt.

Für alle Zukunftsszenarien wurde die Betriebsgebietsgröße von ursprünglich 1,3 km² sowie die zu Beginn des KelRide-Entwicklungsprojekts (Stand Januar 2024) eingemessenen 30 Straßenkilometer auf 100 km² und 500 eingemessene Straßenkilometer erweitert.

Ergebnisdiskussion der Zukunftsszenarien:

Abbildung 12 visualisiert die wesentlichen Ergebnisse der Zukunftsszenarien, einschließlich der angenommenen und beschriebenen Prämissen. Die Ergebnisse der TCO-Analyse wird in Euro pro PKM angegeben. Zur Einordnung werden die Kosten des optimierten Folgeprojekts im Level 4 Betrieb mit den Kosten der Zukunftsszenarien verglichen. Ergänzend werden die ermittelten Kosten der Szenarien mit den Endkundenpreisen vergleichbarer Mobilitätsangebote, wie Taxi-, Uber- und KEXI*-Fahrten auf der linken Seite gegenübergestellt. Dadurch erhält der Leser nachvollziehbare Vergleichswerte.

Prämissen für die Berechnung der Zukunftsszenarien:

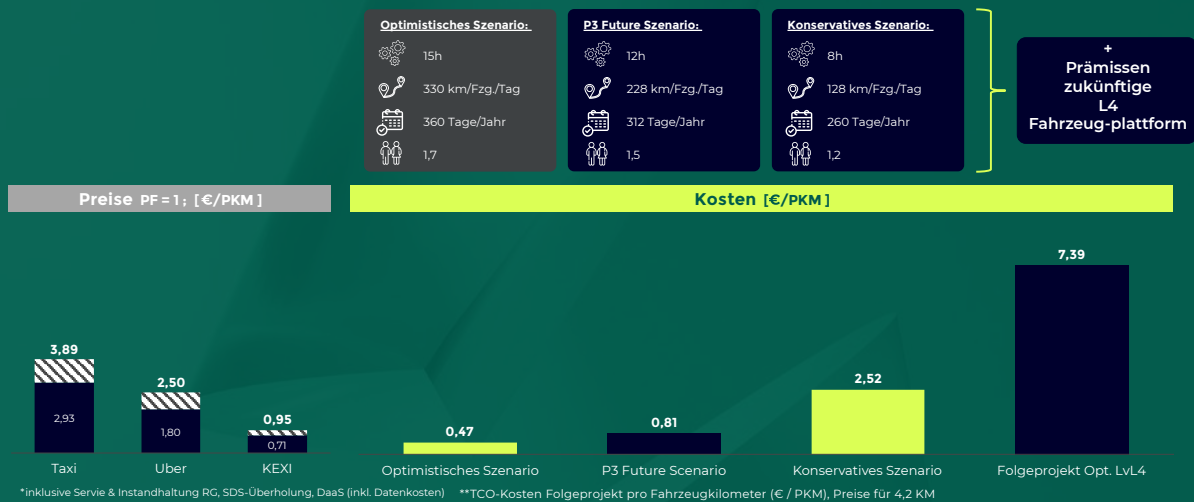


Abbildung 12: Ergebnisse der Zukunftsszenarien (P3-Abbildung)

Die Preise für vergleichbare Mobilitätsangebote reichen von 2,93 € bis 3,89 € pro PKM für Taxifahrten hin zu 1,80 € und 2,50 € pro PKM für die Nutzung der Uber-Dienstleistung. Somit bewegen wir uns innerhalb einer Preisspanne von 1,80 € bis knapp 4 € pro zurückgelegtem PKM. Im Vergleich zu Taxi- oder Uber-fahrten, weist der konventionelle On-Demand Service in Kelheim (KEXI) zwischen 60,6 und 75,6 % geringer Kosten mit lediglich 0,71 € und 0,95 € pro PKM auf. Das ist zum einen auf die Subventionierung und zum anderen auf das Kelheim-spezifische Preismodell zurückzuführen. Das Preismodell des KEXI-Services wird über einen Festpreis von drei bzw. vier Euro innerhalb von zwei Betriebsgebieten (klein bzw. groß) geregelt.

a) Das **P3-Zukunftsszenario** beschreibt eine ausgewogene Herangehensweise, bei der eine gesteigerte Auslastung mit ausreichend kalkulierten Betriebspausen kombiniert wird, die für das Nachladen und sonstige operative Aufgaben genutzt werden können. Mit einem täglichen Betrieb von 12 Stunden an 312 Einsatztagen pro Jahr, einer täglichen Fahrleistung von 228 Kilometern und einem Pooling-Faktor von 1,5, wird ein TCO-Ergebnis von 0,81 €/PKM erzielt. Dieses Ergebnis entspricht einer **Reduktion von 89 %** im Vergleich zum optimierten Level 4 Folgeprojekt.

b) Für das **konservativen Szenario** werden die Betriebsparameter deutlich pessimistischer gegenüber dem Ausgangsszenario angesetzt. Bei einer Betriebszeit von nur 8 Stunden an 5 Tagen pro Woche, einer deutlich geringeren durchschnittlichen Fahrleistung und einem niedrigeren Pooling Faktor von 1,2 ergeben sich TCO-Kosten von 2,52 €/PKM. Selbst unter diesen sehr konservativen Annahmen der Betriebsparameter, zeigt der Wert eine **Reduktion von 66 %** im Vergleich zum optimierten Level 4 Folgeprojekt.

c) Im **optimistischen Szenario** werden die Betriebsparameter, wie zuvor beschrieben, weiter erhöht, um eine hohe aber noch realisierbare Auslastung der Fahrzeuge zu erreichen. Mit einer täglichen Fahrleistung von 330 Kilometern pro Tag und einem nahezu durchgängigen Betrieb mit 360 Tagen pro Jahr sowie einem Pooling Faktor von 1,7, wird eine TCO von 0,47 €/PKM erzielt. Dies entspricht einer Reduzierung von 42 % gegenüber dem P3 Zukunftsszenario und einer **Reduzierung von 93,9 %** gegenüber dem optimierten Level 4 Folgeprojekt.

Werden diese Ergebnisse mit den Endkundenpreisen für Taxifahren oder der Nutzung des Uber-Services gegenübergestellt, wird deutlich, dass sowohl das P3 Zukunftsszenario als auch das optimistische Szenario einen signifikante Kosteneffizienz aufweisen. Selbst im konservativen Szenario zeigt der Vergleich mit den Preisen der beiden Mobilitätsdienstleistungen, dass unter der pessimistischen Annahme eine Kostenparität möglich ist. Lediglich im Vergleich zum konventionellen On-Demand Service KEXI in Kelheim erweist sich das konservative Szenario als nicht konkurrenzfähig.



Szenario 1: P3 Zukunftsszenario (a)

Beschreibung

Das P3-Zukunftsszenario beschreibt eine **ausgewogene Herangehensweise**, bei der eine **gesteigerte Auslastung mit ausreichend kalkulierten Betriebspausen** kombiniert wird, die für das Nachladen und sonstige operative Aufgaben genutzt werden können.

Prämissen



12 Stunden/Tag



312 Tage/Jahr

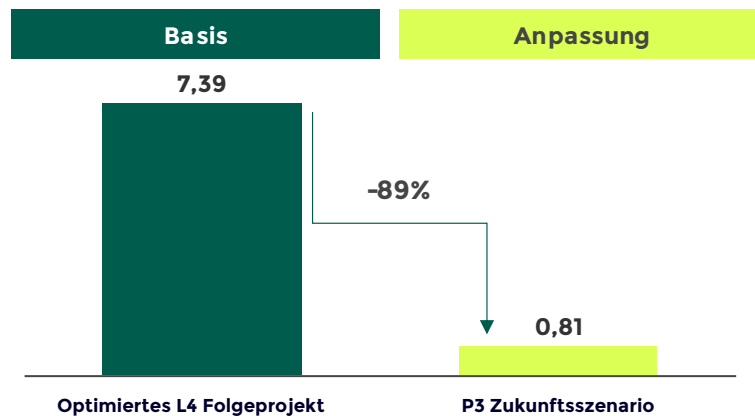


228 km/Fzg./Tag



1,5 Passagiere

Ergebnisse [€/PKM]



Ergebnisse [€/PKM]

Es wird ein **TCO-Ergebnis von 0,81 €/PKM** erzielt. Dieses Ergebnis entspricht einer **Reduktion von 89 %** im Vergleich zum optimierten Level 4 Folgeprojekt.

Szenario 2: Konservatives Szenario (b)

Beschreibung

Für das konservativen Szenario werden die Betriebsparameter deutlich **pessimistischer gegenüber dem Ausgangsszenario angesetzt**: Mit einer Betriebszeit von nur 8 Stunden an 5 Tagen pro Woche, einer deutlich geringeren durchschnittlichen Fahrleistung und einem niedrigeren Pooling Faktor von 1,2 ist dieses Szenario deutlich konservativer.

Prämissen



8 Stunden/Tag



260 Tage/Jahr

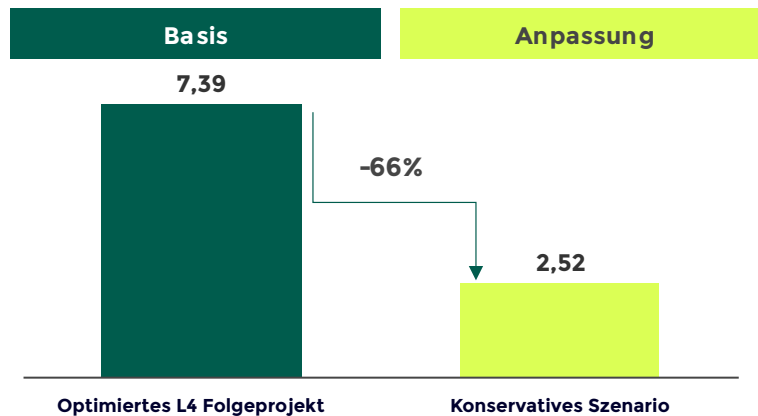


128 km/Fzg./Tag



1,2 Passagiere

Ergebnisse [€/PKM]



Ergebnisse [€/PKM]

Es ergeben sich **TCO-Kosten von 2,52 €/PKM**. Selbst unter diesen sehr konservativen Annahmen der Betriebsparameter, zeigt der Wert eine **Reduktion von 66 % im Vergleich zum optimierten Level 4 Folgeprojekt**.

Szenario 3: Optimistisches Szenario (c)

Beschreibung

Im optimistischen Szenario werden die Betriebsparameter, wie zuvor beschrieben, weiter erhöht, um eine **hohe aber noch realisierbare Auslastung der Fahrzeuge** zu erreichen. Mit einer täglichen Fahrleistung von 330 Kilometern pro Tag und einem nahezu durchgängigen Betrieb mit 360 Tagen pro Jahr sowie einem Pooling Faktor von 1,7 entsteht das optimierte Szenario.

Prämissen



15 Stunden/Tag



360 Tage/Jahr

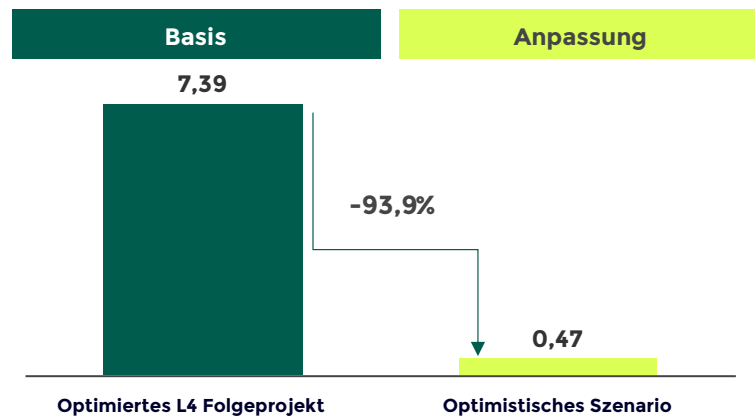


330/Fzg./Tag



1,7 Passagiere

Ergebnisse [€/PKM]



Ergebnisse [€/PKM]

Es wird eine **TCO** von 0,47 €/PKM erzielt. Dies entspricht einer **Reduzierung von 42 % gegenüber dem P3 Zukunftsszenario** und einer **Reduzierung von 93,9 % gegenüber dem optimierten Level 4 Folgeprojekt**. Werden diese Ergebnisse mit den Endkundenpreisen für Taxifahren oder der Nutzung des Uber-Services gegenübergestellt, wird deutlich, dass das optimistische Szenario eine **signifikante Kosteneffizienz aufweist**.

6. Diskussion von Lösungsansätzen zur Skalierung autonomer Mobilitätsservices

6.1. Spezifische Verwertbarkeit für Gemeinden und Kommunen

Eine direkte Übertragung der projektspezifischen Inhalte von KelRide ist entsprechend der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus Kapitel 5 nicht zu empfehlen. Auch nach Anwendung aller Optimierungsmaßnahmen kann **kein wirtschaftlich tragbares Szenario identifiziert werden**, das modellhaft für interessierte Städte und Gemeinden aufgebaut oder angestrebt werden kann.

Die finanzielle politische Unterstützung durch den Aufbau weiterer Förderprojekte ist nach eingehender Analyse P3's nicht zielführend, da individuelle Förderungen im kleinen Maßstab nicht zu empfehlen sind (siehe Kapitel 6.3). Dementsprechend wird in den nachfolgenden Kapiteln ein Maßnahmenkatalog aufgebaut, welcher realistische Handlungsempfehlungen für den Aufbau von Nachfolgeprojekten empfiehlt.

6.2. Handlungsempfehlungen und Implementierungsansätze für eine erfolgreiche Transformation der autonomen Mobilitätslandschaft in Deutschland und Europa

Die vorliegende Untersuchung des Förderprojekts offenbart, dass die erfolgreiche Implementierung autonomer Mobilität eine strategische und integrative Herangehensweise erfordert. Die Identifizierung wesentlicher Handlungsfelder ist dabei von entscheidender Bedeutung:

Öffentliche Wahrnehmung: Die Akzeptanz autonomer Mobilität muss durch transparente Kommunikation und die Einbindung in den Mobilitätsmix gesteigert werden.



Projektdurchführung: Groß angelegte, strukturierte Projekte mit klaren Zielen und messbaren Erfolgsfaktoren sind entscheidend.

Technologischer Fortschritt: Innovationen in Software und Hardware sowie ihre Integration in bestehende Systeme müssen vorangetrieben werden.

Politische Rahmenbedingungen: Regulierung und Förderprogramme sollten gezielt auf nachhaltige Mobilitätslösungen ausgerichtet sein.

Wirtschaftliche Tragfähigkeit: Eine langfristige Finanzierungsstrategie ist essenziell, um nachhaltige Ergebnisse zu gewährleisten. Unter diesen Voraussetzungen schlagen die Autoren dieses Papiers deshalb vor, ein nationales **Leuchtturmprojekt** mit einem Vielfachen des Finanzierungsvolumen aktueller Pilotprojekte und einer Laufzeit von fünf bis acht Jahren zu initiieren. Dieses Projekt sollte in mehreren Phasen durchgeführt werden:

1. **Projektsetup:** Entwicklung eines umfassenden Business Case mit Definition von Rollen, Servicekonzepten, Partnerauswahl und Integration in den öffentlichen Nahverkehr.
2. **Pilotphase:** Durchführung von Tests mit mindestens drei Konsortien in Städten wie beispielsweise Hamburg, Berlin und München. Jede

Partnerschaft sollte mindestens 50 Fahrzeuge einsetzen, um operative und technologische Erkenntnisse zu gewinnen.

3. **Evaluierung:** Bewertung der Ergebnisse und Leistungsfähigkeit der Partner sowie Ableitung von Best Practices.
4. **Skalierung:** Ausbau der Fahrzeugflotten auf mindestens 1.000 Fahrzeuge pro Anbieter bis 2030, unterstützt durch staatliche Zuschüsse oder Kreditgarantien.



6.3. Optimierung der Projektlandschaft durch Leuchtturmprojekte

Die bisherigen autonomen Mobilitätsprojekte litten unter isolierten Insellösungen, unzureichender überregionaler Koordination und kurzfristigen Finanzierungen. Leuchtturmprojekte bieten hier eine strukturierte Alternative, indem sie personelle und infrastrukturelle Ressourcen bündeln. Diese zentralisierten Ansätze fördern die Wiederverwendung von Wissen, reduzieren Redundanzen und beschleunigen die Marktreife.

Durch die Bündelung von Erfahrungen und Ressourcen ermöglichen Leuchtturmprojekte eine effiziente Projektumsetzung und fördern nachhaltige Strukturen. Dies reduziert Wiederholungen von Lernkurven und stärkt die öffentliche Wahrnehmung durch greifbare Erfolge.

Förderung eines innovativen Ökosystems

Das vorgeschlagene Förderprojekt zielt darauf ab, ein wettbewerbsfähiges und innovatives Ökosystem aufzubauen. Dabei sollten insbesondere europäische Anbieter gestärkt werden, indem Anreize für die Lokalisierung von Softwareentwicklungsaktivitäten in Europa geschaffen werden. Dies fördert die technologische Souveränität und stärkt die Position Europas im globalen Wettbewerb um autonome Mobilitätslösungen.

Durch diese integrierte Strategie kann die Grundlage für eine erfolgreiche Transformation der Mobilitätslandschaft geschaffen werden. Langfristig wird eine nachhaltige, technologisch fortschrittliche und wirtschaftlich tragfähige autonome Mobilität als Teil eines zukunftsfähigen Verkehrssystems etabliert.

7. Zusammenfassung und Fazit

Das Entwicklungsprojekt KelRide hat wertvolle Erkenntnisse geliefert, die zukünftige Planungen und Implementierungen autonomer Mobilitätsdienste maßgeblich beeinflussen können. Es ist entscheidend, diese Erkenntnisse angemessen zu interpretieren und die richtigen Schlussfolgerungen daraus zu ziehen. In den letzten Jahren dienten kleinere autonome Förderprojekte in Deutschland als Versuchslabore, in denen autonome Mobilität auf öffentlichen Straßen erprobt wurde. Technologische Fortschritte (z.B.: AWP Funktionalität) wurden gemäß der individuellen Projektspezifika erreicht. Die Projekte waren jedoch primär als Entwicklungsprojekte konzipiert und nicht auf deren Skalierung ausgelegt. Daher entstanden einige Einschränkungen, die in diesem Bericht offengelegt wurden, insbesondere in den Bereichen Fahrzeugkonzept, Verkehrssubstitution, Nachfrageentwicklung und wirtschaftliche Tragfähigkeit.

“

In den nächsten Jahren muss es uns gelingen, aus Pilotprojekten wie KelRide die richtigen Ableitungen zu ziehen und diese auf nationaler und europäischer Ebene in entschlossene und mutige Entscheidungen einfließen zu lassen. Die hier vorliegende Untersuchung zeigt dabei, dass die Erwartungen hinsichtlich der wirtschaftlichen Vorteile autonomer Mobilität gerechtfertigt sind, die Potenziale im aktuellen Entwicklungsrahmen jedoch nicht realisierbar gemacht werden.

”

Dennoch erlauben die gewonnenen Erkenntnisse einen optimistischen Blick in die Zukunft. Ein Indikator hierfür ist die rapide zunehmende technische Reife autonomer Mobilitätssysteme, wie beispielsweise die jüngsten Erweiterungen der Betriebsgebiete von Waymo in San Francisco oder die Ankündigungen für Tokio zeigen (Nagao, 2024). In Kombination mit den hier vorliegenden positiven wirtschaftlichen Prognosen ergibt sich daraus ein vielversprechendes Gesamtsystem.

Die in Kapitel 5.5 präsentierten Zukunftsszenarien demonstrieren, dass durch den Einsatz einer geeigneten Fahrzeugplattform eine substanzielle Kostenreduktion erreicht werden kann, die zu einer mittel- bis langfristigen Profitabilität autonomer MaaS-Lösungen beiträgt. Im Vergleich zu den gegenwärtig erhobenen Preisen wird nicht nur eine Vergleichbarkeit, sondern sogar ein Preisvorteil evident.

Eine der größten Hürden, für die Wirtschaftlichkeit von autonomer MaaS Lösungen sind weiterhin die geringen Stückzahlen. Durch die Erhöhung der Produktionsvolumina könnten die Fahrzeugkosten drastisch gesenkt werden. Dies würde nicht nur den Fahrzeug- und Technologieherstellern, sondern auch den Kunden entgegenkommen. Eine Möglichkeit für größere Abnahmemengen stellt die Förderung von **Leuchtturmprojekten** dar.

Zusammenfassend hat das Projekt KelRide einmalige Einsichten und praktische Erfahrungen geliefert, die für die Weiterentwicklung autonomer Mobilitätsdienste von großer Bedeutung sind. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine solide Grundlage für zukünftige Projekte und helfen dabei, die Herausforderungen zu meistern und die Potenziale autonomer Fahrdienste in Zukunft weiter auszuschöpfen.

8. Literaturverzeichnis

BMDV. (13. November 2023). *BMDV - Bund und hamburg bringen „Autonomes Ridepooling“ auf die Straße*. Von <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2023/108-wissing-autonomes-ridepooling.html>

Kaempfer, R. (27. Juni 2024). *P3 Autonomous Driving Market Insights*. Von <https://www.p3-group.com/p3-updates/p3-einblicke-in-den-markt-fuer-autonomes-fahren-maas-taas-ownership/>

Kagerbauer, P. D., M., Wilkes, M. Dandl, D.-P. F., Engelhardt, M. R., Glöckl, D.-I. U., Zwick, M. F. (2021). *Ridepoolin in Hamburg auf dem Weg in die Zukunft - Ergebnisbericht zur MOIA Begleitforschung*. Von 211207_MOIA_Ergebnisbericht_Begleitforschung.pdf

Nagao, S. (25. Dezember 2024). *Time Out*. Von <https://www.timeout.com/tokyo/news/waymo-to-begin-testing-driverless-vehicles-in-tokyo-in-early-2025-122524>

SAE International. (2021). *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles (J3016)*. J3016_202104.

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verantwortlichkeiten der Konsortialpartner innerhalb des KelRide Projektes _____ 5

Abbildung 2: SAE J3016 – Stufen des autonomen Fahrens. _____ 8

Abbildung 3: P3 MaaS-Layer-Model _____ 8

Abbildung 4: Auszugsweise Darstellung von Pilotprojekten _____ 10

Abbildung 5: Methodisches Vorgehen in diesem Papier _____ 12

Abbildung 6: Szenarioübersicht und Charakteristika _____ 13

Abbildung 7: TCO-Vergleich: Entwicklungsprojekt vs. Folgeprojektszenario _____ 15

Abbildung 8: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse _____ 17

Abbildung 9: Prämissenänderung für das optimierte Folgeprojekt _____ 18

Abbildung 10: Kosteneinsparung durch den Entfall der Sicherheitsfahrer _____ 18

Abbildung 11: Aufbau des L4-Anforderungskatalogs _____ 20

Abbildung 12: Ergebnisse optimistisches Szenario _____ 26

Abbildung 13: Ergebnisse future Szenario _____ 27

Abbildung 14: Ergebnisse konservatives Szenario 28

Abbildung 15: Lighthouse in the Iceland 30

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispielhafte Kostenpositionen im KelRide Layer-Modell 11

Tabelle 2: Rahmenbedingungen der Szenarien (P3) 22



11. Abkürzungen und Definitionen

ACC	Active cruise control (engl., zu Deutsch: Abstandsregeltempomat)
AD	Autonomous Driving (engl., zu Deutsch: Autonomes Fahren)
API	Application Programming Interface
AWP	All-Weather-Proof
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
CAPEX	Capital expenditure (dt. Kapitalinvestitionen)
FTE	Full-time-equivalent
FKM	Fahrzeugkilometer
LKA	Lane keep assist
MaaS	Mobility-as-a-Service
ODD	Operational Design Domain (dt. systembezogene Betriebsgrenzen)
OPEX	Operational expenditure (dt. laufende Betriebskosten)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PKM	Personenkilometer
SAE	Society of Automotive Engineers
SDS	Self-driving system
SDV	Self-driving vehicle
SoC	System on a chip
TCO	Total Cost of Ownership
V2X	Vehicle-to-X (dt. Kommunikation von Fahrzeug zu allem)

Noch Fragen? Melden Sie sich gerne bei unseren Experten

**Patrick Eisele**

Senior Consultant

+49 151 441 388 25

patrick.eisele@p3-group.com

**Johannes Wasel**

Senior Consultant

+49 152 099 369 58

johannes.wasel@p3-group.com

Adresse**P3 group GmbH**

Heilbronner Straße 86

70191 Stuttgart

Germany

Kontakt

+49 711 252 749-0

mail@p3-group.com

www.p3-group.com