

Herausforderungen des Realbetriebs von autonomen Bussen im ÖPNV entlang des Lebenszyklus

Challenges of the real operation of autonomous buses in public transport along the lifecycle

Christopher Langner^{1,*}, Markus Rehberg¹, Gregory-Jamie Tüzün¹, Daniel Roth¹, Matthias Kreimeyer¹

¹ University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design, Department for Product Development and Engineering Design

* Korrespondierender Autor:

Christopher Langner
Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Germany
☎ +49 (0) 711 685 68078
✉ christopher.langner@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract

Increasing traffic necessitates more efficient mobility solutions, resulting in a need for public transportation to be more attractive by shorter intervals or expansion in rural areas, leading to buses as a preferred concept, ideally autonomous ones. While successful pilot projects exist, full-scale implementation is slow to occur. The reasons for this are determined in this paper through industry workshops and structured along the bus lifecycle. Four main fields of action are identified: gaining more practical experience and reliable data basis, increasing the technical maturity of components, establishing regulatory standards, and developing (digital) systems for the communication between stakeholders within the system and the related management of data.

Keywords

autonomous driving, public transport, smart mobility, product-service-systems, systems engineering

1. Motivation

Die wachsende Weltbevölkerung führt zu einem steigenden Verkehrsaufkommen und hohen Verkehrsbelastungen in den Städten [1]. Zusätzlich verschärft der Klimawandel den Bedarf nach neuen Mobilitätslösungen, die den Verkehr effizienter gestalten [2]. Ein wichtiger Teil neuer möglicher Mobilitätslösungen ist der Wechsel von Individual- auf öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) [3]. Dieser ist jedoch in vielen Bereichen noch nicht attraktiv genug, um die Menschen vom Individualverkehr zum ÖPNV zu bewegen. Notwendig sind Angebote wie kürzere Taktzeiten oder ein größeres Liniennetz, aber auch haustürnahe Haltepunkte und Erweiterungen im ländlichen Raum, was Busse im Vergleich zu schienengebundenen Systemen zum Beförderungsmittel der Wahl macht [4]. Die steigenden Bedarfe lassen sich jedoch durch den verschärften Fachkräftemangel nicht durch konventionelle, gelenkte Verkehrslösungen realisieren. Hier muss durch Automatisierung und Vernetzung des ÖPNV mit fahrerlos operierenden, autonomen Fahrzeugen (ab SAE-Level 4) Abhilfe geschaffen werden [5]. Während solche Systeme in Versuchsprojekten wie „Ride4All“ oder „Ultimo“ bereits eingesetzt werden, sind diese bisher jedoch noch nicht im Realbetrieb etabliert. Über die Gründe hierzu gibt es allerdings bislang keine gesamtheitliche Betrachtung.

2. Forschungsproblem und Forschungsziel

Es existieren einige Literaturrecherchen, die die Herausforderungen des autonomen Fahrens im ÖPNV betrachten, jedoch auf einem allgemeinen Betrachtungslevel bleiben und nicht fokussiert auf die darüber hinausgehenden Ansprüche an die Implementierung in den Realbetrieb eingehen [6], oder nur Betrachtungen spezieller Teilaspekte wie beispielsweise die Services zu Shuttleangeboten vornehmen [7].

Es stellt sich daher in einer gesamtheitlichen Betrachtung die Forschungsfrage: *Welche Herausforderungen bestehen bei der Umsetzung von autonomen Bussen in den Realbetrieb eines ÖPNV und wie können diese entlang des Lebenszyklus (LZ) geordnet werden?*

Die Ordnung entlang des LZ wird gewählt, da dieser in anderen Bereichen wie Ökobilanzierungen als Ordnungsrahmen herangezogen wird. Zudem wird aus Gesprächen mit Industrieexperten davon ausgegangen, dass sich die übergeordneten Phasen des LZ durch den Wandel zu autonomen Bussen nicht ändern, sich jedoch Veränderungen innerhalb der Phasen ergeben. Diese bringen wiederum Herausforderungen mit sich, deren Bewältigung als zusätzliche Anforderungen in die integrative Planung dieser Systeme einfließen.

3. Methodik

Für den LZ werden zunächst literaturbasiert mögliche Phasen identifiziert. Zudem werden zur Forschungsfrage zugehörige Herausforderungen gesammelt. Beides dient als Grundlage für mehrere Industrieworkshops in denen zunächst der LZ iterativ angepasst und validiert wird und anschließend auftretenden Herausforderungen erarbeitet werden.

Die Workshops wurden mit einem Fahrzeughersteller, der derzeit seine ersten Prototypen autonomer Busse entwickelt und produziert, einem großen Unternehmen, das Busse und andere öffentliche Verkehrssysteme betreibt, sowie einem Verkehrsverbund, die beide in einer deutschen Millionenstadt tätig sind, durchgeführt. Alle haben bereits Erfahrungen in Pilotprojekten zur Einführung von autonomen Bussen gesammelt und arbeiten auch derzeit an solchen Projekten. Jeder Workshop dauerte drei Stunden mit einer unterschiedlichen Anzahl von Teilnehmern, welche in Bild 1 angegeben ist. Alle Teilnehmer stammen aus unterschiedlichen Fachbereichen, arbeiten an Projekten im Bereich des autonomen Fahrens und können daher wertvolle fachliche Erkenntnisse beisteuern.

Zunächst wurde der LZ auf der Metaebene vorgestellt und diskutiert, so dass als Ergebnis ein von Industrieexperten validiertes LZ-Modell präsentiert werden kann. Danach wurde der für jeden Stakeholder spezifische Teil des LZ im Detail diskutiert: alle Phasen für Hard- und

Software mit dem Hersteller, die Nutzungs- und Lebensende-Phase mit dem Betreiber und die Serviceperspektive mit dem Verkehrsverbund. Die Leitfrage „*Was verändert sich durch die Einführung von autonomen Fahrzeugen und welche Herausforderungen ergeben sich dadurch oder bestehen dazu noch?*“ wurde durch die Moderation der Autoren zur Leitung der Diskussion in jeder Phase gestellt. Die in jedem der drei Workshops geführten Diskussionen wurden dann zu dem in Kapitel 6 vorgestellten Gesamtergebnis zusammengeführt.



Bild 1: Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfrage

4. Stand der Forschung und Technik

Es existieren eine Vielzahl an Unterteilungen eines Lebenszyklus (LZ). Allgemeingültig werden dabei von Qureshi et al. [8] mit Fokus auf Produkte, von Fischbach et al. [9] für Services und von Cavalcante und Gzara [10] für Produkt-Service-Systeme (PSS) hergeleitet. In Kombination dieser Untersuchungen wird der LZ in dieser Arbeit in die fünf Hauptphasen *Planung, Entwicklung, Realisierung, gemeinsame Nutzung* und *Lebensende* unterteilt.

Azad et al. [6] extrahieren aus einer systematischen Literaturrecherche zu autonomen Bussen weitere Forschungsbedarfe. Dabei werden unzureichende technischer Reifegrade, die nötige Schaffung der noch nicht ausreichend vorhandenen Nutzerakzeptanz, offene Fragen zur Sicherstellung der Betriebssicherheit, soziale und ökonomische Aspekte wie die Veränderungen der Jobgefüge oder die Barrierefreiheit sowie fehlende oder zu unscharfe Regularien als Bereiche mit weiterem Handlungsbedarf identifiziert. Millionig und Fröhlich [11] ergänzen neben der Barrierefreiheit und der Nutzerakzeptanz die Finanzierung zur Sicherstellung sozialverträglicher Preise als Handlungsfelder. Beide nutzen dabei aber nur wissenschaftliche Quellen und beziehen keine Industrieexperten in ihre Betrachtungen ein und nehmen darüber hinaus auch keine gesamtheitliche Einordnung der Herausforderungen vor.

Bucchiarone et al. [7] identifizieren unzureichende Simulationsmöglichkeiten mit Unterstützung durch künstliche Intelligenz (KI), die Komplexität der Governance solcher Systeme und die Überzeugung der Nutzer hin zur Akzeptanz und Nutzung der Systeme als Herausforderungen, beschränken ihre Untersuchungen jedoch auf autonome Shuttles.

Strategische Handlungsempfehlungen für die Einführung von autonomen Bussen werden von Polst et al. [4] erarbeitet, woraus sich auch bestehende Herausforderungen ableiten lassen, darunter die Bereitstellung von Kommunikationssystemen und Schnittstellen zur Datenerfassung, -analyse und -weitergabe für Bedarfsanalysen, Fahrgast-Kommunikation, Zusammenarbeit im Verkehrs-Ökosystem und die Schaffung der Nutzerakzeptanz. Eine gesamtheitliche Einordnung findet hier jedoch ebenfalls nicht statt.

Seredensky et al. [12] betrachten zwar große Solobusse im Vergleich zu kleinen Shuttles, fokussieren sich aber auf die Details zur Erreichung der Nutzerakzeptanz solcher Systeme.

Eine gesamtheitliche Betrachtung der Herausforderungen zur Realbetrieb-Implementierung autonomer Busse findet also noch nicht statt, weshalb diese hier erarbeitet werden sollen.

5. Lebenszyklusmodell als Ordnungsrahmen

In der Literatur findet sich bisher kein auf den autonomen Bus zugeschnittenes Lebenszyklusmodell, weshalb zunächst ein solches Modell aufgestellt werden muss. Dieses wurde durch die Autoren in einer im Veröffentlichungsprozess befindlichen Arbeit im Detail vorgestellt [15], soll hier daher zur Einordnung kurz präsentiert werden. Es ist zunächst eine zentrale Erkenntnis zu beachten: die Notwendigkeit zur Betrachtung als Produkt-Service-

System (PSS). Nach Tukker [13] kann ein PSS als eine Kombination aus materiellen Produkten und immateriellen Dienstleistungen definiert werden, die so konzipiert sind, dass sie zusammenwirken, um Kundenbedürfnisse zu erfüllen. Hier sind das Produkt *Bus* und der Service *ÖPNV* voneinander abhängig, um als Geschäftsangebot die Mobilität von Personen zu realisieren. Dementsprechend betreffen auch die Herausforderungen sowohl das Produkt als auch den Service, weshalb wie in Bild 2 visualisiert ein service- und produkt- (Hard- und Software) integrierender LZ gewählt wurde. Insbesondere in der Nutzung ist die Betrachtung als PSS elementar, weshalb die Phase als „gemeinsame“ Nutzung titulierte wird.

Der LZ ist in zyklischer Form dargestellt, um den iterativen Charakter der stattfindenden Prozesse zu betonen. Diese Iterationen können parallel stattfinden, auch bevor ein Zyklus komplett beendet wurde, beispielsweise die Einführung einer neuen Software auf einen bestehenden Bus. Dabei sind die ersten drei Phasen sehr eng verflochten, was eine genaue Trennung der einzelnen Phasen schwierig macht, was auch grafisch so dargestellt wird.

Eine kurze Beschreibung zu den Phasen findet sich in den nachfolgenden Kapiteln, für eine detaillierte Beschreibung wird auf die o. g. Veröffentlichung von Langner et al. [15] verwiesen. Die grafische Darstellung in Bild 2 symbolisiert V-Modelle in den Entstehungsphasen von Hard- und Software in Anlehnung an den industriell anerkannten Automotive SPICE des VDA [14]. Die Nutzungsphase wird mit Phasen zur Inbetriebnahme und Wartung und einem Fahrtzyklus als zentraler Bestandteil dreiteilig dargestellt. Das Lebensende wird für Service, Hardware und Software getrennt betrachtet. Entscheidende Rollen im Lebenszyklus nehmen Daten und ihr Management, ihr Austausch und ihre Nutzung ein, weshalb dies zentral im Modell integriert ist. Besonders die Rückführung von Nutzungsdaten in die Entstehungsphasen ist elementar, was vor allem für die Absicherung der Software entscheidend ist, aber auch für die (Weiter-)Entwicklung des Mobilitäts-Services [16].

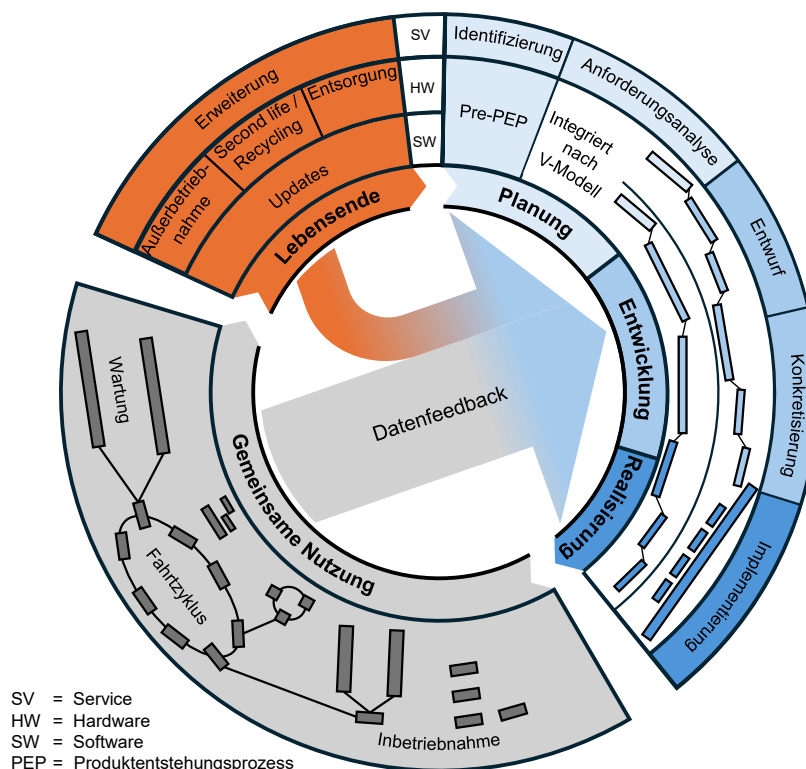


Bild 2: Übergeordnetes Lebenszyklus-Modell für den autonomen Bus

6. Identifizierte Herausforderungen

Die Herausforderungen können durch Zuordnung zu den LZ-Phasen strukturiert werden. Diese werden in den nachfolgenden Kapiteln je Phase präsentiert.

6.1. Planungsphase

In der Planungsphase werden die Anforderungen an den Service und an das Produkt definiert. Während produktseitig basierend auf Markt- und Wettbewerbsanalysen Produktideen und daraus Anforderungen definiert werden, ist im speziellen Fall der ÖPNV-Serviceplanung eine strategische Planung zur Routen-, Netz, Kosten- und Nachfrageplanung Grundlage für die Anforderungsdefinition.

Für die Service-Planung bestehen die in Tabelle 1 beschriebenen Herausforderungen. Es ist ersichtlich, dass die bisher fehlende einheitliche Definition von Schnittstellen ein großes Problem darstellt, da diese die Einsatzfähigkeit von verschiedenen Systemen in verschiedenen Umgebungen beschränken. Des Weiteren fehlen Datengrundlagen, um die zu erwartenden Bedarfe der neuen Mobilitätsangebote zu erfassen.

Tabelle 1: Herausforderungen bei der Service-Planung

Aktivität	Herausforderungen
Netzplanung/ Routenplanung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abhängigkeit von technischen Schnittstellen und Infrastruktur je nach Fahrtgebiet ▪ Schnittstellen sind bisher nicht (einheitlich) beschrieben ▪ Frühzeitige Einbindung von Vehicle-to-X-Dienstleister in Planung
Kostenplanung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarf einer Aussage über die Wirtschaftlichkeit autonomer Angebote ▪ Identifikation eines realistischen Business Cases
Bedarfsplanung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Existierende Modelle basieren zu sehr auf Annahmen → Geringe Aussagekraft ▪ Genaue Modellierung des Systemverhaltens insb. bei On-Demand schwer vorhersehbar ▪ Fehlende belastbare Datengrundlage zur Modellierung der Kundennachfrage ▪ Insgesamt verlässliche Analysen und Aussagen schwierig
Anforderungs- analyse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Befriedigung erhöhter Kommunikations-/Informationsbedarfe bei Kunden ▪ Ggf. neue Wünsche hinsichtlich Fahrzeug- und Haltestellenausstattung sowie Taktung

Bei der Planung des Produkts ergeben sich für den Hersteller des Busses wie in Tabelle 2 beschrieben völlig neue Möglichkeiten, sich hin zu eigenen Produkt-Service-Systemen (PSS) zu entwickeln. Gleichzeitig treten neue Stakeholder in den Markt ein, von Anbietern zur Kommunikationstechnologie bis hin zu Software-Herstellern, die zu managen sind. Durch fehlende einheitliche Schnittstellen könnten sich Betreiber auf bestimmte Softwareanbieter festlegen, sodass ein späterer Wechsel nur mit erheblichem Aufwand möglich ist und so Fahrzeughersteller dazu zwingt, mehrere Systeme zu unterstützen.

Tabelle 2: Herausforderungen bei der Produkt-Planung

Aktivität	Herausforderungen
Produktidee	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entwicklung neuer Services, ggf. datenbasiert, bspw. Flottenmanagement
Wettbewerbs- analyse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zunehmende Anzahl der Stakeholder im Gesamtsystem, bspw. Softwareanbieter ▪ Mögliche kundenseitige Festlegung auf bestimmte Softwaresysteme in Abhängigkeit von lokalen Randbedingungen wie bspw. Schnittstellen zu technischer Aufsicht → Notwendigkeit, je Zielmarkt ein Softwaresystem zu definieren?
Produktsteckbrief	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unbekannte Nutzungsdauer des Busses ▪ Möglichkeit zur Nachnutzung im Second Life bei Zweit-/Drittkunden unklar ▪ Definition Dauer der Softwareunterstützung
Anforderungs- definition	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fehlende Regelwerke / zu unkonkrete Regelwerke von Industrie und Gesetzgeber ▪ Zielkonflikt: Flexibilität in Richtung Softwareanbieter sollte gegeben sein, dennoch Standardisierung erforderlich ▪ Einheitliche Schnittstellen nicht vorhanden ▪ Fehlende Vorgaben für Interaktionsmöglichkeiten mit Menschen und Umfeld

6.2. Entwicklungsphase

In der Service-Entwicklung finden Festlegungen zur Route, Taktung und zur Informationsbereitstellung statt. Letztere ist dabei aus den Herausforderungen in Tabelle 3 hervorzuheben, da durch den Entfall des Busfahrers eine zentrale Informationsquelle für die Fahrgäste verloren geht, aber auch die Akzeptanz zur Nutzung der neuen Systeme durch entsprechende Aufklärung erst noch erreicht werden muss. Insgesamt können die Verkehrsbetriebe und -verbände die hohen Kosten nur durch entsprechende Förderung kompensieren. Nach Aussage der Experten sind momentan jedoch nur vereinzelte Pilotprojekte möglich, was wiederum die iterativen Lernprozesse stark verlangsamt.

Tabelle 3: Herausforderungen bei der Service-Entwicklung

Aktivität	Herausforderungen
Konzeption + Entwicklung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Iterativer, langfristiger Lernprozess bis zur Umsetzung im Realbetrieb ▪ Hohe Kosten erlauben aktuell nur erste Tests auf vereinzelt Linien → Umsetzung im großen Stil nur mit politischer Förderung möglich, Verantwortliche müssen überzeugt werden ▪ Standardisierung (bspw. von Schnittstellen oder Systemen) nötig, damit Integration unter einzelnen Verkehrsbetrieben im Verbund beherrschbar bleibt
Informationsplanung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nötige Überzeugung von Passagieren/Bevölkerung zur Nutzung autonomer Angebote ▪ Notwendigkeit zur Aufklärung für gesamtgesellschaftliche Akzeptanz der neuen Systeme

Die Entwicklungsphase wird produktseitig vor allem durch die integrierte Entwicklung von Hard- und Software dominiert, die damit einhergehenden Herausforderungen sind in Tabelle 4 aufgeführt. Hierbei sind insbesondere die Koordinierung der verschiedenen Fachbereiche und die Softwareentwicklung an sich hervorzuheben. Der Übergang zur Realisierungsphase ist dabei fließend, da der Aspekt des Testens und Validierens essentiell ist. Der Einfluss und die Auswirkungen der Fortschritte in der künstlichen Intelligenz sind dabei noch nicht abschätzbar.

Tabelle 4: Herausforderungen bei der Produkt-Entwicklung

Aktivität	Herausforderungen
Konzipierung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Im Moment noch fehlende technische Gesamtreife, viele individuelle Anpassungen je Einsatzgebiet nötig für Versuchsbetriebe ▪ Wandel der notwendigen technischen Kompetenzen für neue Technologien ▪ Erhaltung des Einflusses als Hersteller durch geschickte Schnittstellengestaltung, um Flexibilität mit Softwarepartnern zu haben ▪ Frühe Einbeziehung von Design for Recycling/Circularity-Aspekten
Integration	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gesamt-Integration aller Komponenten im System (Hard- und Software) ▪ Steigende Produktkomplexität ▪ Koordinierung der verschiedenen Domänen (Mechatronik, Software)
Softwareentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fehlende Realdaten zur Absicherung ▪ Notwendigkeit zur simulativen Datengenerierung durch X-in-the-Loop-Ansätze ▪ Sicherstellung der Funktionssicherheit in allen Fahrsituationen ▪ Rapider Fortschritt von künstlicher Intelligenz

6.3. Realisierungsphase

Die Realisierungsphase beschreibt produktseitig die Schritte der Beschaffung, Produktion und Vertrieb des Busses und serviceseitig die Ausschreibung und Implementierung des ÖPNV-Angebots. Zu letzterem werden in Tabelle 5 die Herausforderungen aufgezeigt.

Hervorzuheben ist dabei, dass im Moment die technologische Reife am Markt noch nicht vorhanden ist, um autonome Fahrzeuge in den Realbetrieb zu etablieren. Zudem sind die Ausschreibungsprozesse bisher zu lang, um flexibel auf schnelle technologische Fortschritte reagieren zu können.

Tabelle 5: Herausforderungen bei der Service-Realisierung

Aktivität	Herausforderungen
Ausschreibung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zu lange Ausschreibungsprozesse für flexible Reaktion auf Technologie-Fortschritt ▪ Zuverlässigkeit der Technologie muss für gesamten Nutzungszeitraum gewährleistet werden können, aktuell haben Fahrzeuge meist noch Prototypen-Charakter ▪ Insgesamt fehlende Reife der Technologie, um sie direkt einsetzen zu können
Auftragsvergabe (an Betreiber)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fehlende Standardisierung der (digitalen) Schnittstellen führt dazu, dass Betreiber fahrzeughersteller-spezifische Schnittstellen haben und auf diese festgelegt sind
Testen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ In Zukunft wahrscheinlich Testen des Services vor Realnutzung nötig, d. h. Probefahrten mit autonomen Systemen, um volle Funktionalität im Kontext der Einsatzumgebung sicherzustellen. Dadurch erhöhte Aufwände ▪ Erprobungen auch in Pilotprojekten, bis zur Markteinführung aber zu große Zeitspanne, sodass Projekterkenntnisse teilweise wieder veraltet sein können
Werbung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bereits o. g. Bedarfe zur Informierung müssen erarbeitet und abgebildet werden ▪ Herausforderung, neue Kunden, die bisher nicht mit ÖPNV mobil sind, zu gewinnen ▪ Neue Lösung für Feedbackmöglichkeit nötig da Busfahrer entfällt

Aus den in Tabelle 6 aufgeführten Herausforderungen bei der Produkt-Realisierung ist softwareseitig das Testen und Validieren der autonomen Fahrsoftware zu betonen. Hardwareseitig müssen in den Beschaffungsabteilungen im Bereich Elektronik und Software zunächst Kompetenzen aufgebaut werden, um mit neuen Zulieferern umgehen zu können.

Tabelle 6: Herausforderungen bei der Produkt-Realisierung

Aktivität	Herausforderungen
Materialbeschaffung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kompetenzmangel in Beschaffungsprozessen, neue Zulieferer im Bereich komplexer Elektronik- und Softwaresysteme ▪ Einkaufsentscheidungen müssen in sehr frühen Phasen getroffen werden und beeinflussen Fahrzeug stärker
Absicherung/ Versuch/ Erprobung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aufwand zum Testing der Fahrsoftware, Absicherungsproblematik ▪ Wechselnde Anforderungen durch Gesetzgeber: Was muss wann homologiert werden? ▪ Klare Schnittstellendefinition beeinflusst auch das Thema Absicherung: bei wem liegen welche Verantwortlichkeiten? ▪ Erforderliche neue Prüfstände inkl. digitaler Simulationsumgebungen
Vertrieb	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Neue Geschäftsmodelle, bspw. Leasing anstatt Kauf ▪ Entscheidung, ob Software als „Software as a Service“ (SaaS) vertrieben werden kann/soll und dadurch neue Funktionen/Dienste erst während der Nutzung „freizuschalten“ sind ▪ Nötige Abwägung, ab wann Softwareupdates als neues Produkt verkauft werden können ▪ Unklarheit, wie Bus nach dem Erstkunden weitergenutzt werden kann ▪ Bisher unbekannt, wann und aus welchen Gründen autonome Busse aus dem Markt genommen werden

6.4. Gemeinsame Nutzungs-Phase

In der Nutzungsphase kommen Produkt und Service gemeinsam als PSS zum Einsatz, weshalb in Tabelle 7 die Herausforderungen auch gemeinsam dargestellt sind. Die Phase

lässt sich unterteilen in Schritte zur Inbetriebnahme nach Kauf, der Einsatz im (täglichen) Fahrtzyklus sowie Wartungsprozesse. Parallel zur Nutzung laufen neue Entstehungsprozesse für die nächsten Generationen von Service und Planung ab, wofür die Rückführung von Daten einen zentralen Aspekt darstellt. Bei der Inbetriebnahme stellen die aktuellen Zulassungsbeschränkungen eine Herausforderung dar, da diese auf sehr stark beschränkte Bedienegebiete begrenzt sind. Hier müssen sich die Prozesse so ändern, dass sich die Zulassungen für die gesamten Nutzungsgebiete aufweiten. In der Nutzung ist dann vor allem die Realisierung der Technischen Aufsicht und der Umgang in Sondersituationen noch zu klären. Hier fehlen bisher auch IT-Systeme, einheitliche Schnittstellendefinitionen und Vorgehensweisen. Für die Wartung werden sich die benötigten Kenntnisse der Mitarbeiter verändern, wofür qualifiziertes Personal benötigt wird. Zudem bleibt offen, ob Wartungen wie bei großen Betrieben bisher üblich weiterhin vom Betreiber durchgeführt werden können oder ob die komplexen Systeme künftig durch spezialisierte Kräfte des Herstellers zu warten sind.

Tabelle 7: Herausforderungen in der gemeinsamen Nutzungsphase

Aktivität	Herausforderungen
Inbetriebnahme	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zulassung: bisher Beschränkung von Fahrzeugen auf Bedienegebiet mit definierten Routen, Realisierbarkeit für große Betreiber mit großen Gebieten als Bedienegebiet? ▪ Fehlende IT-Infrastruktur und zug. Standards für Kommunikation und Datenmanagement ▪ Förderrahmen gibt ggf. Limitierungen zum Beschaffungsumfang vor
Fahrtzyklus	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Umsetzung Technische Aufsicht und Verantwortung in Sondersituationen inkl. höherer Nachweispflicht. Fahrzeug muss in Teilen selbst prüfen, ob Notfall vorliegt ▪ Umgang mit Sondersituationen wie Innenraumvandalismus oder absichtlicher Behinderung des autonomen Fahrbetriebs ungeklärt ▪ Live-Monitoring und Kommunikationstechnik innen und außen notwendig, aktuell aber nur Aufzeichnung auf Festplatten im Bus ▪ Bus- oder Rangierfahrer führt bisher Fahrzeugprüfung vor Abfahrt durch, bei zukünftigem Entfall unklar ob dafür Personal nötig oder Automatisierung möglich ▪ Informationsplanung: Sicherstellung ausreichender Kommunikation mit Fahrgästen ▪ Bereitstellung ausreichender Ladeinfrastruktur und Ladeleistungen für Elektrofahrzeuge
Wartung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Daten für Predictive Maintenance stehen aktuell nicht zur Verfügung ▪ Undefinierte Vorgaben vom Gesetzgeber bspw. zu geänderten TÜV-Intervallen ▪ Veränderungen im Berufsfeld der Werkstattmitarbeiter: nötige Umschulungen oder anderes Personal nötig im Hinblick auf digitale Systeme ▪ Unklarheit über veränderte Rollen in der Wartung, sowohl OEM ↔ Betreiber aber auch "intern", bspw. übernehmen Rangierfahrer bisher kleine Reparaturen, weiter möglich? Können autonome Fahrzeuge zukünftig bspw. nur noch durch den OEM gewartet werden? ▪ Auch Software muss „gewartet“ werden (durch Updates). Sind ggf. Updates möglich, sodass Nutzungsphase verlängert werden kann? (<i>Siehe Lebensende</i>)
Operative Planung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fehlende Möglichkeit zum Datenfeedback für schnelle, kontinuierliche Verbesserungen ▪ Übergangsphase mit autonomen und konventionell gelenkten Fahrzeugen Herausforderung, da beide Systeme gemeinsam betrieben + überwacht werden müssen ▪ Passende Strategie für Lademanagement (generelle Herausforderung bei E-Fahrzeugen) ▪ Veränderte Personalplanung (Entfall Busfahrer, aber ggf. neue Rollen?)
Modellpflege	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfassung von Daten zur Wissensrückführung während Nutzung wichtig. Rückführung muss technisch aber auch rechtlich und mit Kunden abgeklärt sein, insb. im Hinblick auf Datenschutz und Datenhoheit. Entsprechende Governance nötig

6.5. Lebensende-Phase

Tabelle 8 zeigt die Herausforderungen während der Phase des Lebensendes auf. Während Software durch neue Updates und Versionen ein Nutzungsende finden und Serviceangebote

durch neue ersetzt werden, gestaltet sich das Lebensende des Busses komplexer. Im Sinne der Nachhaltigkeit und Zirkularität muss nach der Außerbetriebnahme zunächst eine Weiterverwendung geprüft werden. Während dies aktuell so gehandhabt wird, ist fraglich, ob autonome Busse in andere Länder für einen Second Life weiterverkauft werden können, da sich dort die Randbedingungen stark unterscheiden können. Wenn das Fahrzeug zerlegt wird, ist insbesondere das Batterie-Recycling ein herausforderndes Thema inklusive der Frage nach der Verantwortlichkeit für einzelne Recycling-Prozesse. Doch auch die Updates von Software bergen Herausforderungen wie bspw. die Frage, ab welchem Grad neue Softwares zulassungsrelevant sind und eine erneute Homologation der Fahrzeuge erfordern.

Tabelle 8: Herausforderungen am Lebensende

Aktivität	Herausforderungen
Fahrzeug-Außerbetriebnahme	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fehlende Erfahrungen, wann und aus welchen Gründen Bus außer Betrieb genommen wird ▪ Unklarheit, ob Bus wie bisher an einen Second-Life Betreiber weitergegeben werden kann ▪ Lebensende inkl. Recycling aktuell noch nicht im Fokus der Betrachtungen, zukünftig aber schon → fehlende Erfahrungswerte, Vorgehensweisen, etc.
Hardware-Recycling	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unklarheit, wer Verantwortung für Recycling von autonomen E-Fahrzeugen trägt ▪ Bisher nicht durchgehende Möglichkeiten zur Predictive Maintenance und damit fehlende Daten zur Zustandsbestimmung je Komponente für ggf. Einzelteil-Weiterverwendung
Software-updates	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unklarheit, welche Umfänge over-the-air auf Fahrzeug aufgespielt werden können und welche Werkstattbesuch nötig machen ▪ Fehlende Definition, ab welchen Umfängen Änderungen zulassungsrelevant sind ▪ Wechselwirkung Hardware-Software: benötigt verbesserte Software auch neue Hardware?
Service-Verbesserung/Erweiterung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fehlende Möglichkeit zum Feedback durch den Kunden, da dieses bisher häufig über Busfahrer erfolgt ▪ Insgesamt fehlende Möglichkeiten zum Datenfeedback und zur Datennutzung um datenbasiert "richtige" Entscheidungen zu treffen

7. Diskussion

Den vorliegenden Forschungsergebnissen können durch die Erarbeitung mit Industrieexperten eine hohe Wertigkeit zugeschrieben werden, es ist jedoch zu bedenken, dass insbesondere das vorgestellte Lebenszyklus-Modell eine Prognose in die Zukunft darstellt. Ansichten können daher durch derzeitige bewährte Prozesse verzerrt sein und andere Formen könnten im Laufe der Zeit auftreten, weshalb insgesamt auf dem Weg der Integration solcher Systeme in den Realbetrieb weiterhin ein umfangreiches Risikomanagement betrieben werden und mit bisher nicht vorhergesehenen Iterationsschleifen gerechnet werden muss. Darüber hinaus repräsentieren die konsultierten Experten die Sichtweise mehrerer Interessengruppen entlang des Lebenszyklus, allerdings wurden hier nur ein Hersteller, ein Betreiber und ein Verkehrsverbund, letztere aus der gleichen Stadt, einbezogen, die jeweils aber schon Erfahrungen aus Pilotprojekten haben. Diese Vorerfahrungen könnten Limitierungen durch bereits gelöste Herausforderungen oder in Arbeit befindlichen Lösungsansätzen hervorrufen. Eine weitere Validierung mit anderen beteiligten Interessengruppen in anderen Umfeldern sollten daher weitere Schritte darstellen.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lassen sich aus der Vielzahl der Herausforderungen wie in Bild 3 dargestellt vier Handlungsfelder zur Bewältigung ableiten: zunächst eine Intensivierung der Pilotprojekte um fehlenden Praxiserfahrungen und Datengrundlagen zu begegnen sowie in Zusammenhang damit die Weiterentwicklung zur Erreichung höherer Reifegrade der

Systembestandteile, damit diese nicht mehr wie bisher manuell adaptiert werden müssen. Des Weiteren Schaffung relevanter gesetzlicher Vorgaben und Standards. Hieran knüpft sich auch das benötigte Vorausdenken der (digitalen) Systeme an, die zur Kommunikation zwischen den Stakeholdern des Systems und zum Datenmanagement nötig sind. Über diese fehlt aktuell das Verständnis, ohne das auch die vermissten Standards nicht initiiert werden können. Es gilt daher, die benötigten Systeme vorausdenken und einheitliche Handlungsempfehlungen für ihre Gestaltung in zukünftigen Projekten und Arbeitsschritten bereitzustellen.



Bild 3: Identifizierte vier Handlungsfelder zur Bewältigung der erarbeiteten Herausforderungen

Danksagung



Diese Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsvorhabens *MINGA*, welches im Rahmen der Förderrichtlinie „Autonomes und vernetztes Fahren in öffentlichen Verkehren“ durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) mit rund 13 Millionen Euro gefördert wird.

Literaturverzeichnis

- [1] Afrin, Tanzina; Yodo, Nita: A Survey of Road Traffic Congestion Measures towards a Sustainable and Resilient Transportation System. In: Sustainability 12 (2020), Nr. 11, S. 4660-4683. [10.3390/su12114660](https://doi.org/10.3390/su12114660).
- [2] Keyvanfar, Ali et al.: Driving Behaviour and Sustainable Mobility - Policies and Approaches Revisited. In: Sustainability 10 (2018), Nr. 4, S. 1152-1179. [10.3390/su10041152](https://doi.org/10.3390/su10041152).
- [3] Holden, Erling et al.: Grand Narratives for sustainable mobility: A conceptual review. In: Energy Research & Social Science 65 (2020), Artikelnummer: 101454, S. 1-10. [10.1016/j.erss.2020.101454](https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101454).
- [4] Polst, Svenja et al.: Mobilitätswende 2030 - Vom Linienbus zur öffentlichen Mobilität der Zukunft. Kaiserslautern: Fraunhofer IESE, 2022.
- [5] Ulrich, Christian et al.: New Operating Strategies for an On-the-Road Modular, Electric and Autonomous Vehicle Concept in Urban Transportation. In: World Electric Vehicle Journal 10 (2019), Nr. 4, S. 91-107. [10.3390/wevj10040091](https://doi.org/10.3390/wevj10040091).
- [6] Azad, Mojdeh et al.: Fully Autonomous Buses: A Literature Review and Future Research Directions. In: Journal of Advanced Transportation Volume 2019, Artikelnummer: 4603548, S. 1-16. [10.1155/2019/4603548](https://doi.org/10.1155/2019/4603548).
- [7] Bucchiarone, Antonio et al.: Autonomous Shuttle-as-a-Service (ASaaS): Challenges, Opportunities, and Social Implications. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 22 (2021), Nr. 6, S. 3790-3799. [10.1109/TITS.2020.3025670](https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3025670).
- [8] Qureshi, A. J.; Gericke, Kilian; Blessing, Lucienne: Stages in Product Lifecycle: Trans-disciplinary Design Context. In: Procedia CIRP 21 (2014), S. 224-229. [10.1016/j.procir.2014.03.131](https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.131).
- [9] Fischbach, Michael; Puschmann, Thomas; Alt, Rainer: Service Lifecycle Management. In: Business & Information Systems Engineering 5, Vol. 1 (2013), S. 45-49. [10.1007/s12599-012-0241-5](https://doi.org/10.1007/s12599-012-0241-5).
- [10] Cavalcante, Juliana; Gzara, Lilia: Product-Service Systems lifecycle models: literature review and new proposition. In: Procedia CIRP 73 (2018), S. 32-38. [10.1016/j.procir.2018.03.324](https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.324).
- [11] Millonig, Alexandra; Fröhlich, Peter: Where Autonomous Buses Might and Might Not Bridge the Gaps in the 4 A's of Public Transport Passenger Needs. In: Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (2018), S. 291-297. [10.1145/3239060.3239079](https://doi.org/10.1145/3239060.3239079).
- [12] Seredynski, Marcin et al.: Benefits and Challenges of Integration of High-Capacity Autonomous Buses to Public Transport Operations. In: Transportation Research, Vol. 72 (2023), S. 4191-4198. [10.1016/j.trpro.2023.11.355](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.355).
- [13] Tukker, Arnold: Eight types of product-service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. In: Business Strategy and the Environment 13 (2004), S. 246-260. [10.1002/bse.414](https://doi.org/10.1002/bse.414).
- [14] Verband der Automobilindustrie (VDA): Automotive SPICE 4.0: Automotive SPICE Process Assessment / Reference Model (2023).
- [15] Langner, Christopher et al.: A Lifecycle Model for Autonomous Buses in Public Transport. In: Proceedings of the 26th International DSM Conference (2024). *[Akzeptiertes Paper aktuell im Druck]*
- [16] Bock, Florian et al.: Status Report on Automotive Software Development. In: Dajsuren, Yanja; van den Brand, Mark (Hrsg.): Automotive Systems and Software Engineering. Basel: Springer, 2019, S. 29-57. [10.1007/978-3-030-12157-0_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12157-0_3).