

U-Shift MAD

Managed Automated Driving für U-Shift

Machbarkeitsstudie

Zulassungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit

Projektförderung

Förderprogramm: „IKT für Elektromobilität 2019/1“
Förderkennzeichen: 01ME19005A
Teilvorhaben: Zulassungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit

Förderzeitraum

16.10.2019 - 30.06.2020

Projektpartner

- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) (Koordinator)
- Institut für Fahrzeugkonzepte (DLR-FK)
- Institut für Verkehrssystemtechnik (DLR-TS)
- FZI Forschungszentrum Informatik (FZI)

Autorinnen/ Autoren

Miriam Grünhäuser	(DLR-TS)
Alexander Wiemer	(DLR-TS)
Anne Brunßen	(DLR-TS)
Marc Zofka	(FZI)
Tobias Fleck	(FZI)
Marcus Conzelmann	(FZI)
Christian Ulrich	(DLR-FK)
Mascha Brost	(DLR-FK)
Ines Österle	(DLR-FK)
Marco Münster	(DLR-FK)
Jürgen Weimer	(DLR-FK)

Datum

30.06.2020

Kontakt

Jürgen Weimer
Juergen.Weimer@dlr.de

1	ZUSAMMENFASSUNG	4
2	U-SHIFT UND MAD – KONZEPTE UND ANWENDUNG	6
2.1	U-SHIFT – FAHRZEUGKONZEPT	6
2.2	MANAGED AUTOMATED DRIVING - MAD	7
2.2.1	MAD Hypothese	8
2.2.2	Steuerung in der Infrastruktur	9
2.2.3	Sensorik in der Infrastruktur	10
2.2.4	Einordnung von MAD	11
2.2.5	Infrastruktur Streckenklassifizierung	12
3	ANWENDUNGSFÄLLE	14
4	TECHNISCHE MACHBARKEIT UND MAD-ARCHITEKTUR	15
4.1	ANFORDERUNGEN AN DIE INFRASTRUKTUR UND DAS FAHRZEUG	16
4.2	TECHNISCHE GRUNDLAGEN	17
4.2.1	Infrastrukturgestütztes Automatisiertes Fahren – Bisherige Arbeiten	18
4.2.2	Vernetzung.....	19
4.2.3	Favorisierte Netzwerk-Topologie für U-Shift-Control	21
4.2.4	Kommunikation	22
4.2.5	Service- und Softwarearchitektur im Backend	25
4.3	INTELLIGENZVERTEILUNG ZWISCHEN INFRASTRUKTUR UND FAHRZEUG	26
4.3.1	„AD“-Ausprägung	27
4.3.2	„MAD“-Ausprägung.....	28
4.3.3	„PMAD“-Ausprägung.....	28
4.4	SENSORSETUP INFRASTRUKTUR UND FAHRZEUG.....	29
4.4.1	Ausstattung der Sensordpfosten.....	29
4.4.2	Sensorausstattung des U-Shift-Fahrzeugs	30
4.5	TECHNISCHE HERAUSFORDERUNGEN.....	30
4.5.1	Sensorpositionierung.....	30
4.5.2	Erkennung und Identifizierung der U-Shift-Fahrzeuge.....	31
4.5.3	Kommunikation	32
4.6	AUSBLICK AUF DIE VISION 2040	32
5	MACHBARKEIT ZULASSUNG	33
5.1	MOTIVATION/ ÜBERBLICK/ EINLEITUNG	33
5.2	RECHTLICHE GRUNDLAGEN.....	34
5.3	AKTUELLE ZULASSUNGSPROZESSE UND -VERFAHREN	39
5.4	FUNKTIONALE SICHERHEIT.....	41
5.5	DATENSCHUTZGRUNDVERORDNUNG (DSGVO)	44
5.6	SECURITY	46
5.7	ROLLE DER INFRASTRUKTUR BEI MAD	47
5.8	WAS KÖNNEN WIR AUS DER VORGEHENSWEISE ANDERER VERKEHRSFORMEN LERNEN.....	48
5.9	MÖGLICHKEITEN UND RISIKEN FÜR KONZEPT MAD.....	49
5.10	ZULASSUNGSMÖGLICHKEITEN MODULARE FAHRZEUGKONZEPTE – KONZEPT U-SHIFT	51
6	MACHBARKEIT WIRTSCHAFTLICHKEIT	55
6.1	USE CASE 1: PILOT	56
6.2	USE-CASE 2: ROLL-OUT	59
6.3	USE CASE 3: VISION 2040	63
6.3.1	Methode.....	64
6.3.2	Kosten und Nutzen.....	65
6.3.3	Verkehrliche Wirkungen	67
6.3.4	Sensorausstattung	68
6.3.5	Ergebnisse der Kosten-Nutzen Analyse	69
6.3.6	Sensitivitätsanalyse	70

7	SYNTHESE – BEWERTUNG ANWENDUNGSFÄLLE UND SYSTEMARCHITEKTUREN.....	72
7.1	BEWERTUNG DER UNTERSUCHTEN ANWENDUNGSFÄLLE	72
7.1.1	<i>Bewertung Use-Case 1: Pilot</i>	<i>72</i>
7.1.2	<i>Bewertung Use-Case 2: Roll-Out.....</i>	<i>74</i>
7.1.3	<i>Bewertung Use-Case 3: Vision 2040.....</i>	<i>76</i>
7.2	BEWERTUNG UNTERSCHIEDLICHER KONZEPTE FÜR DIE SYSTEMARCHITEKTUR	77
7.2.1	<i>Bewertung des Konzepts AD.....</i>	<i>79</i>
7.2.2	<i>Bewertung des Konzepts PMAD</i>	<i>81</i>
7.2.3	<i>Bewertung des Konzepts MAD</i>	<i>82</i>
7.2.4	<i>Fazit zum Vergleich der Konzepte AD, PMAD und MAD.....</i>	<i>84</i>
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	85
9	TABELLENVERZEICHNIS.....	85
10	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	86

1 Zusammenfassung

Um heutigen Herausforderungen im Mobilitätsbereich, wie CO₂-Emissionen, Luftverschmutzung und Stau in Städten entgegen zu wirken, wurde beim DLR das innovative Fahrzeugkonzept U-Shift entwickelt. Im Wesentlichen werden bei U-Shift sowohl beim Fahrzeug als auch bei der Automatisierung vollkommen neuartige Ansätze verfolgt. Das Fahrzeug basiert auf einer dynamischen On-the-Road-Modularisierung, um effektiv den kombinierten Transport von Personen und Gütern zu ermöglichen. Es besteht aus einem U-förmigen Driveboard sowie beliebigen anwendungsoptimierten Transportkapseln. Ein erstes Fahrzeug (Mock-Up) wird im September 2020 vorgestellt. Die Automatisierung von U-Shift soll mit dem neuen Ansatz des Managed Automated Driving (MAD) erfolgen. Von der Anwendung her kommend, soll die Automatisierung deutlich stärker mit der Infrastruktur verknüpft werden als heutige Varianten des automatisierten Fahrens (AD, CAD, CCAD)¹. Die U-Shift Flotte wird über eine Leitzentrale gesteuert und die Strecke über umfassende Infrastruktursensorik abgesichert. Funktionalitäten, die bei AD, CAD, CCAD im Fahrzeug realisiert werden, können bei MAD sicherheits- und effizienzsteigernd in einem Backend abgebildet werden. MAD ist nicht nur für U-Shift Fahrzeuge geplant, sondern anwendbar und für alle automatisierten Fahrzeuge im urbanen Verkehrsraum nutzbar.

Der MAD Ansatz geht deutlich weiter als heutige Forschungs- und Entwicklungsprojekte und basiert auf der Hypothese, dass bei zunehmender Durchdringung von automatisierten Fahrzeugen im urbanen Verkehrsraum MAD hinsichtlich Verkehrsleistung, Sicherheit, Energieeffizienz und Kosten zunehmend Vorteile gegenüber der fahrzeugbasierten Automatisierung hat. Bedingt durch die Neuheit von U-Shift und MAD gibt es verschiedene, noch zu bewertende Risiken. In dieser Studie wird daher der vorgesehene Ansatz der Automatisierung weiter verfeinert und die kritischen Punkte der Zulassungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit von MAD im Allgemeinen und mit U-Shift im Speziellen untersucht.

Als Basis für diese Studie werden im ersten Kapitel das U-Shift Fahrzeugkonzept und die MAD Automatisierung beschrieben sowie drei aufeinander aufbauende Anwendungsszenarien als Grundlage für die spätere Bewertung definiert. Im Folgenden wird die Automatisierungsarchitektur diskutiert da diese sich bei MAD physikalisch aber auch funktional von der heutigen Automatisierungsarchitektur unterscheidet und erhöhte Anforderungen an die Infrastruktur hat.

Im Kapitel „Machbarkeit Zulassung“ wird die aktuelle Vorgehensweise bei der Zulassung automatisierter Fahrzeuge, die Regularien und Standards und die daraus resultierenden Probleme aufgezeigt. Ergänzend zur einer möglichen Vorgehensweise für die Zulassung von MAD werden die Zulassungsmöglichkeiten des U-Shift Fahrzeuges im Speziellen untersucht und aufgezeigt. Das Ergebnis ist, dass die Zulassungsfähigkeit von MAD genau wie alle anderen Automatisierungsvarianten in erster Linie von der Ausgestaltung zukünftiger Regulierungen abhängt. Der Vorteil der besseren Abbildung der Verkehrssituation bei MAD über die Infrastruktursensorik könnte die Zulassung durch die höhere Sicherheit und durch standardisierte Infrastruktur erleichtern, wobei die Security Anforderungen durch die intensivere Vernetzung an Bedeutung gewinnen. Darüber hinaus wurde die grundsätzliche Zulassungsfähigkeit des Fahrzeugkonzeptes nachgewiesen, mit dem TÜV abgestimmt und noch existierende Problemfelder aufgezeigt.

Im Kapitel „Wirtschaftlichkeit“ wird das ökonomische Potenzial von MAD und U-Shift anhand dreier Anwendungsfälle bewertet: In den Fällen „Pilot“ und „Roll-Out“ erfolgt eine detaillierte betriebswirtschaftliche Analyse von einer ersten prototypischen Anwendung bis hin zu einem ersten Roll-Out in ei-

¹ Automated Driving (AD); Connected Automated Drivings (CAD); Cooperative Connected Automated Driving (CCAD)

ner exemplarischen Stadt. Der Anwendungsfall „Pilot“ betrachtet den prototypischen Aufbau in einem Testumfeld und dient in erster Linie zur betriebswirtschaftlichen Modellierung, ist aber wegen der geringen Auslastung im Vergleich zum Status Quo nicht für den Nachweis der Wirtschaftlichkeit vorgesehen. Im Anwendungsfall „Roll-Out“ werden die MAD Strecken und U-Shift Transportumfänge schrittweise über einen Einführungszeitraum sinnvoll erweitert. Dort zeigt sich, dass die Kombination aus einer U-Shift Flotte und dem MAD Automatisierungsansatz betriebswirtschaftlich sinnvoller ist, als die fahrzeugseitige Automatisierung. Die Amortisationszeit beträgt etwa 6-9 Jahre bei der MAD Lösung (je nach Parameter), während beim State-of-the-Art AD im Betrachtungszeitraum von 10 Jahren keine Amortisation möglich war. Im Anwendungsfall „Vision 2040“, also einer angenommenen flächendeckenden Einführung von MAD in einer Beispielstadt, erfolgt eine volkswirtschaftliche Betrachtung durch eine Kosten-Nutzen Analyse. In diesem Anwendungsfall wird angenommen, dass U-Shift maximal ausgelastet wird und die Vorteile der Modularisierung optimal nutzt. Bei unverändertem, typischem urbanen Transportleistungsbedarf können dann 100% der gesamten Transportleistung im Güterverkehr und ca. 30% des motorisierten Individualverkehrs (MIV) mit U-Shift abgedeckt werden. Es bestätigt sich, dass MAD umfassende volkswirtschaftliche Vorteile aufweist. So sind beispielsweise für MAD Einsparungen in den Gesamtinvestitionskosten für Fahrzeuge und Infrastruktur in Höhe von ca. 15% realisierbar. Auch der gesellschaftliche Nutzen von MAD bei Verkehrssicherheit, Klimawirkung und Schadstoffemissionen erhöht sich um 25% gegenüber einer Extrapolation heutiger Technologien.

Im Kapitel Synthese erfolgt eine zusammenfassende Bewertung der untersuchten Anwendungsfälle und Konzeptvarianten der Systemarchitektur (AD, PMAD, MAD) von U-Shift und zeigt mögliche Schritte auf, um das Gesamtkonzept U-Shift MAD und U-Shift Control zu realisieren.

Die Studie hat gezeigt, dass für MAD und U-Shift grundsätzlich eine Zulassung möglich ist. Bei der Automatisierung mit MAD ergeben sich grundsätzlich keine zusätzlichen Risiken oder Anforderungen gegenüber anderen Automatisierungskonzepten. Mittel- und langfristig könnte die Zulassung bei MAD gegenüber AD aufgrund der besseren funktionalen Sicherheit durch die Infrastruktur sogar einfacher werden. Mittel- und langfristig wird es bei MAD gegenüber AD u.A. durch die angestrebte Standardisierung in der Infrastruktur sogar einfacher. Das Fahrzeug kann trotz seiner ungewöhnlichen Ausprägungen ohne besondere Einschränkungen zugelassen werden. Kritische Elemente, die durch aktuell verschärfte Randbedingungen im ÖV neu dazu kommen (Sitzanordnung), betreffen alle Fahrzeuge im ÖV und werden zukünftig auch beim U-Shift Fahrzeugdesign berücksichtigt. Die Hypothese, dass MAD gegenüber AD trotz der notwendigen Investitionen in Infrastruktur betriebswirtschaftlich und auch volkswirtschaftlich günstiger ist, wurde anhand von unterschiedlichen Anwendungsfällen bestätigt. Wie erwartet, ergeben sich bei der Automatisierung von U-Shift mit MAD Kostenvorteile gegenüber der üblichen Automatisierung (AD). Der Break-even wurde im gewählten Anwendungsfall „Roll-Out“ bei ca. 300 Fahrzeugen ermittelt.

2 U-Shift und MAD – Konzepte und Anwendung

2.1 U-Shift – Fahrzeugkonzept

Um heutige Herausforderungen im Mobilitätsbereich, wie CO₂-Emissionen, Luftverschmutzung und Stau in Städten entgegen zu wirken, entwickelt das DLR technologische Lösungen, die einen nennenswerten Beitrag zur Bewältigung dieser Verkehrs- und Umweltprobleme leisten können. Aktuell werden in Deutschland und global in vielen Projekten Anwendungen mit People- und Cargo-Movern und neue Geschäftsmodelle mit zum Beispiel Mobility-as-a-Service (MAAS), Logistic-as-a-Service (LAAS), oder als Demand-Responsive-Transport (DRT) untersucht und demonstriert. Aus Sicht des DLR werden diese Ansätze zwar den urbanen Verkehr verändern, aber nennenswerte Verbesserungen der urbanen Verkehrsbelastung oder eine wirtschaftliche Realisierbarkeit sind noch nicht klar erkennbar. Solche Ansätze könnten sich auch negativ auf den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) auswirken und z.B. durch Attraktivitätssteigerung zu einer Verlagerung der Mobilitätsnachfrage zugunsten des motorisierten Individualverkehrs (MIV) mit unerwünschten Folgen wie beispielsweise der Erhöhung der Verkehrsleistung oder der Emissionen führen².

Eine deutliche Entlastung ist insbesondere dadurch möglich, dass man Fahrzeuge und deren Anwendung neu denkt und derart universell gestaltet, dass sie sowohl für Personen- als auch Gütertransport genutzt werden. Grundsätzlich ist mit solchen modularen Fahrzeugen ein Betrieb rund um die Uhr realisierbar. Mit entsprechend technischen Ausprägungen ermöglichen solche Konzepte zum einen wirtschaftliche Geschäftsmodelle und können zum anderen zu einer wirklichen Verbesserung der Verkehrsbelastung führen. Der Modularisierungsansatz ist nicht einzigartig und wird von verschiedenen Herstellern verfolgt. In der Machbarkeitsstudie für das U-Shift Fahrzeug³ wurden mehrere modulare Mover analysiert und es wurde gezeigt, dass die übliche technische Ausführungen als „Skateboard“ (eine Lösung bei der die Transporteinheit – „ein Hut“ - auf eine Karosserie – „Skateboard“ – gesetzt wird) wenig geeignet sind und z.B. deutliche Nachteile beim Kapselwechsel haben: Hubeinrichtungen in den Kapseln sind keine wirtschaftlich sinnvollen Lösungen da man bei modularen Anwendungen immer deutlich mehr Kapseln nutzen wird als Fahrzeuge und Hubeinrichtungen als Krananlagen in der Infrastruktur sind unflexibel und teuer. Auch von OEMs publizierte modulare Konzepte mit verbreiterbaren belasteten Achsen und Rädern oder Konzepte mit futuristischen Fluggeräten die Kapseln vom Skateboard abheben sind offensichtlich keine technisch sinnvolle Lösung oder einfach in urbanen Räumen nicht realistisch.

Um den Vorteil der Modularisierung gewinnbringend zu nutzen, hat das DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte daher ein neuartiges u-förmiges, modulares Fahrzeugkonzept für den Transport von Personen und Gütern konzipiert (U-Shift, Abbildung 1). Das u-förmige Driveboard zur Aufnahme verschiedener Kapseln hat sich als besonders flexibel und effizient herauskristallisiert, da hiermit ein besonders einfacher Kapselwechsel möglich ist. Das Heben und Absetzen der Kapsel erfolgt in wenigen Sekunden durch das integrierte Hubfahrwerk. Die Kapseln, von denen man je nach Anwendung etwa die 5- bis 20-fache Anzahl gegenüber von Driveboards braucht, können sehr kostengünstig und einfach realisiert werden.

² www.emobil-sw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Studie_AutomatisiertesFahren.pdf - Zugriff 10.3.2020

³ Machbarkeitsstudie ModECaP auf www.U-Shift.de Zugriff - 10.3.2020



Abbildung 1: U-Shift Fahrzeugkonzept

Bei diesem Fahrzeugkonzept gibt es verschiedene technische Herausforderungen⁴. Neben den sehr fahrzeugspezifischen Problemstellungen wie Packaging der Komponenten, Achslasten, Steifigkeiten, Gewichte, Hub- und Koppelinrichtungen, gibt es einige spezifische Forderungen für die Automatisierung. Basierend auf den vorgeschlagenen Geschäftsmodellen⁵ müssen die Kapseln grundsätzlich kostengünstig aufgebaut werden. Das bedeutet, dass für die Automatisierung ggf. notwendige Sensoren (z.B. für die Sicherheitsfahrfunktion) nicht an einer Kapsel angebracht werden dürfen. Die Sensoren werden daher i.A. im Driveboard auf Beleuchtungsebene integriert und haben damit eine etwas anderes Blickfeld gegenüber den heute üblicherweise auf Dachebene angebrachten Sensoren. Eine weitere Herausforderung ist der Betrieb mit langen Kapseln (Personenkapsel mit „Überhang“ hinten, siehe Abb.1 Mitte, unten) bei denen mit den zuvor genannten Sensorrandbedingungen nicht oder nur erschwert rückwärts rangiert werden kann. Abbildung 2 zeigt Hub-Varianten mit Road-Capturing-Units (RCUs integriert in der Straßenbeleuchtung) mit denen das Sichtfeld aus der Infrastruktur auf die Rangierfläche erweitert wird. Diese notwendige Sichtfelderweiterung über die Infrastruktur im Hub⁶ ist eine Basis für das im folgenden Kapitel beschriebene MAD.



Abbildung 2: Beispiel: U-Shift Hub mit RCUs in den Straßenlaternen

2.2 Managed Automated Driving - MAD

Das Konzept des Managed Automated Driving ist aus den spezifischen Anforderungen des U-Shift Fahrzeugkonzeptes und einer strikten, geschäftsmodell-getriebenen Vorgehensweise entstanden. MAD ist durch zwei wesentliche Besonderheiten gekennzeichnet: 1) **Vollständige Steuerung über das Backend** - In der vollen MAD Ausprägung wandert der überwiegende Anteil der Automatisierungsfunkti-

⁴ Ulrich, Ch.; Technologies for a modular vehicle concept used in passenger and goods transport. Stuttgarter Symposium; 2019

⁵ Friedrich, H.E.: New vehicle concepts for future business models. Stuttgarter Symposium; 2019

⁶ Begriff „Hub“ hier englischsprachlich, im Sinne des „Umschlagplatzes“ – Der gleichlautende deutsche Begriff „Hub“ wird an anderer Stelle im Sinne von heben genutzt.

onalität in die Infrastruktur (world-model, decision&control semantic understanding etc.) bis dahin, dass das Fahrzeug zum einfachen Aktuator wird (mit notwendiger Sicherheitsfunktionalität). 2) **Vollständige sensorische Abdeckung der urbanen Strecke über die Infrastruktur**. In der idealen MAD Ausprägung ist entlang der gesamten Strecke eine entsprechende Objektsensorik (RCU) aufgebaut, um einen umfassend sicheren und optimierten Fahrbetrieb auch in komplexen Streckensituationen zu ermöglichen.

2.2.1 MAD Hypothese

Die Notwendigkeit einer infrastrukturbasierten Automatisierung kann man an einem einfachen Gedankenspiel erkennen. Geht man davon aus, dass sich automatisierte Fahrzeuge in beliebigen Verkehrsräumen durchsetzen, wird deren Anzahl steigen. Vergleicht man dann die heute übliche fahrzeugbasierte Automatisierung mit einer infrastrukturbasierten Automatisierung (MAD), dann ergibt sich folgender Zusammenhang:

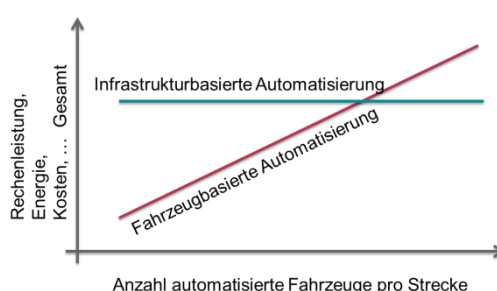


Abbildung 3: MAD Hypothese

Bei der fahrzeugbasierten Automatisierung wird jedes dieser automatisierten Fahrzeuge notwendigerweise umfassend mit Automatisierungskomponenten (Sensor, Rechner, ...) ausgerüstet sein. Es ist eine anerkannte Tatsache, dass durch diese Komponenten entsprechende Kosten pro Fahrzeug entstehen. In einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung, also über alle Fahrzeuge, werden damit die Gesamtkosten in erster Näherung linear mit der Anzahl der Fahrzeuge steigen. Gleiches gilt für weitere systemische Eigenschaften wie beispielsweise die installierte Rechenleistung und damit auch den Energieverbrauch im Fahrzeug. Gerade dieser Energieverbrauch durch eine fahrzeugbasierte Automatisierung ist von hoher Bedeutung, da diese i.A. über die Fahrbatterie bereitgestellt werden muss. Eine einfache Analyse der Batteriekapazitäten heutiger Mover-Systeme zeigt, dass für den Fahrbetrieb mit kleinen Geschwindigkeiten und damit auch sehr kleinen Leistungs- bzw. Energiebedarf, sehr große Batterien installiert sind und damit die Batterien für die Versorgung der Automatisierung ausgelegt sind und nicht für die eigentliche Fahrfunktion. Belastbare Zahlen sind aktuell aber noch nicht verfügbar. Systemlieferanten gehen davon aus, dass nach Optimierung immer noch ein Energiebedarf von ca. 2,5 kW für die Automatisierung benötigt wird. Je nach Fahrprofil sind damit über 40% der Batteriekapazität für die Automatisierung notwendig⁷. Insbesondere in urbanen Anwendungen bei niedrigen Geschwindigkeiten oder geringerer Fahrleistung wird dieser Anteil noch größer.

Bei der infrastrukturbasierten Automatisierung entstehen Kosten und Aufwand als Anfangsinvestition für die Infrastruktur und für den laufenden Betrieb annähernd unabhängig von der Anzahl der automa-

⁷ Rechenbeispiel: Fahrenergie: 3 Schichten a 200km mit 15 kWh/100km typ Verbrauch = 90kWh/d; Automatisierungsenergie; 2,5kW * 24h = 60kWh entspricht 40% Energiebedarf für die Automatisierung bezogen auf den gesamten Tagesbedarf (Auslegungsbeispiel ModECaP)

tisierten Fahrzeuge im jeweils geplanten Anwendungsbereich. In diesem Fall sind damit Automatisierungskosten, Energieverbrauch etc. in erster Näherung konstant.⁸

Wesentlich ist nun, dass sich die beiden Kurven bei einer bestimmten Anzahl von automatisierten Fahrzeugen im Anwendungsfeld schneiden. Das führt zu der Hypothese, dass eine infrastrukturbasierte Automatisierung wie sie bei MAD verfolgt wird gegenüber der heute üblichen fahrzeugbasierten Automatisierung langfristig immer einen Vorteil haben wird. Beispiele verschiedener Anwendungen in verschiedenen Roll-Out Phasen werden in dieser Studie betrachtet, um eine erste Abschätzung für den Schnittpunkt zu bekommen.

2.2.2 Steuerung in der Infrastruktur

U-Shift wird immer in einer Flotte betrieben und braucht daher grundsätzlich eine Plattform mit der ein Betreiber die Fahrzeuge/Driveboards und die große Anzahl an Kapseln „managen“ kann. Nach ersten betriebswirtschaftlichen Berechnungen verschiedener Anwendungen im Vorfeld dieser Studie braucht man je nach Anwendungsfall etwa 5-20-mal mehr Kapseln als Driveboards. Der Koordinationsaufwand der Objekte im urbanen Raum entspricht dann z.B. dem eines Busbetreibers in einem Mittelzentrum. Idealerweise gibt es zum Managen der U-Shift Driveboards und Kapseln eine Leitwarte (Frontend), ähnlich wie die bekannten Leitzentralen für den Busse und Bahnen. Dies betrifft aber nicht nur U-Shift. Wenn man den vielen Ankündigungen folgt, in denen autonome Peoplemover, Robot-Taxis bis hin zu autonomen Pizza-Bots die Innenstädte fluten sollen, dann wird jeder weitere Betreiber seine autonome Flotte koordinieren müssen. Viel wichtiger ist, dass man frühzeitig ein gemeinsames Management entwickelt, ansonsten werden die positiven Effekte auf das Verkehrssystem, die jeder verspricht, nicht eintreffen. MAD ist daher zwingend notwendig für U-Shift, aber offen für alle anderen Anwender. Die Notwendigkeit eines gemeinsamen Leitsystems ist bekannt. Beispielsweise wird im EU-Projekt TransAID, für eine höhere Durchdringung von automatisierten Fahrzeugen im Verkehrssystem, ein „advanced traffic management scheme“ gefordert⁹.

Grundsätzlich ist ein solches „off-board fleet management“ auch heute schon in den Architekturen von AD, CAD oder CCAD berücksichtigt (Abbildung 4a). Der wesentliche Unterschied von MAD zu diesen bekannten Ansätzen ist die Allokation der eigentlichen Automatisierungsfunktionen (cognitive driving intelligence) im Backend (Abbildung 4b). Das Fahrzeug selbst wird damit zu einem einfachen Aktuator. AD, CAD, und CCAD sind getrieben durch die Automobilindustrie, die möglichst viel Wertschöpfung im Fahrzeug generieren will. MAD ist eher ein hierarchischer Industrieansatz wie man ihn von Industrie 4.0¹⁰ oder ersten von Zuliefern getriebenen Projekten in übersichtlichen Vallet-Parking Anwendungen her kennt¹¹.

⁸ Die Hypothese gilt für eine einzelne definierte Anwendung. Bei einem Roll-Out über eine stufenweise Markteinführung, also einem Ausbau mehrerer, mit MAD ausgerüsteten Strecken, ähnlich dem Linienausbau im ÖV, wäre die infrastrukturbasierte Automatisierung in Abbildung 3 eine Treppenfunktion, was aber aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt wird.

⁹ <https://elib.dlr.de/124129/> - Zugriff 18.03.2020

¹⁰ Referenzarchitektur RAMI 4.0 -Achse „Hierarchy Levels“, Hierarchiestufen der IEC 62264, entspricht etablierter Automatisierungspyramide.

¹¹ <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/highlights/automatisierte-mobilit%C3%A4t/automated-valet-parking/> - Zugriff 18.03.2020

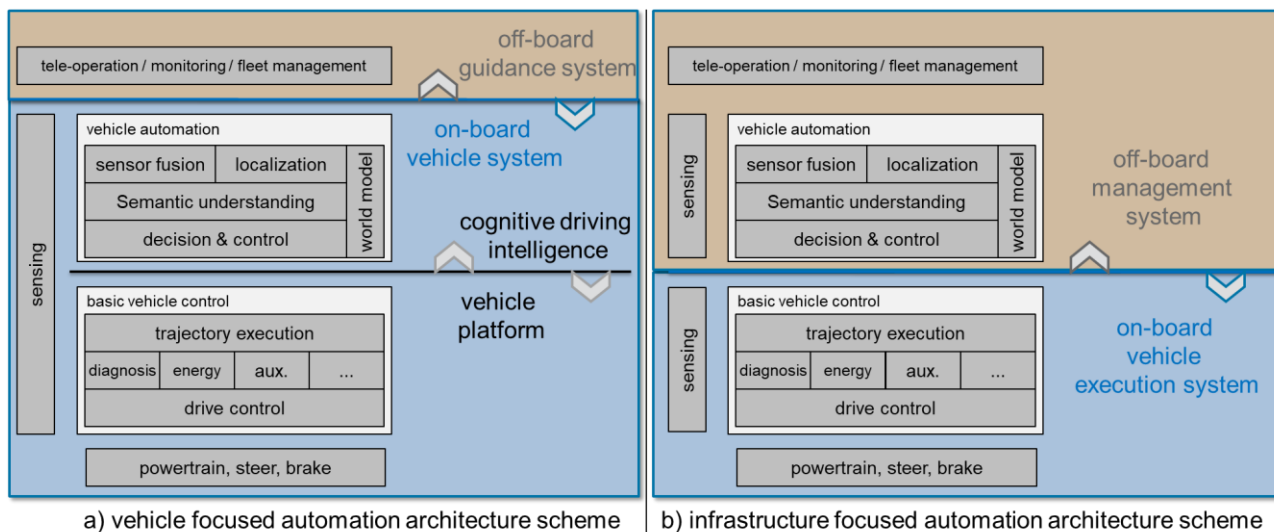


Abbildung 4: Architekturansatz a) AD b) MAD

Bei MAD wird die Automatisierungsfunktionalität in die Infrastruktur verschoben. Durch die sensorische Erfassung der Strecke lässt sich ein vollständiges Abbild der Verkehrssituation (World Model) generieren. Bei AD ist man immer auf die Sichtfelder der Sensorik eingeschränkt, was gerade in urbanen Umfeldern mit teilweise verdeckten Situationen nicht zufriedenstellend funktioniert, z.B. Nichterkennen von „Vulnerable Road Users“ (VRU) mit dem Risiko einer Unfallsituation oder stehende Fahrzeuge mit dem Risiko einer nicht auflösbaren Blockade¹². Durch das umfassend verfügbare World Model („Digitaler Zwilling“ des Verkehrs) ist offensichtlich zu erwarten, dass das Situationsverständnis und die Steuerung aller Fahrzeuge im Gesamtkontext nach gleichen Regeln im Sinne aller Verkehrsteilnehmer erfolgt. Darüber bietet ein umfassendes Verkehrsabbild eine deutlich bessere Datenbasis für Anwendungen der Künstlichen Intelligenz (KI) als die jeweiligen Ausschnitte einzelner automatisierter Fahrzeuge.

Die beiden Varianten in der Abbildung oben sind zwei Extreme einer Reihe von möglichen Architekturen. Dazwischen sind Varianten möglich (siehe Kapitel 2.2.4).

2.2.3 Sensorik in der Infrastruktur

Die Notwendigkeit der Unterstützung des automatisierten Fahrens durch die Infrastruktur ist grundsätzlich erkannt und wurde bzw. wird in verschiedenen Projekten – wie z.B. AIM oder HEAT - bereits untersucht. Aktuell fehlt es an Definitionen. Schon länger etabliert sind sogenannte „Road Side Units“ (RSU), die i.A. als Kommunikationssystem in der Infrastruktur installiert sind. Infrastruktursensorik kann bekannte Sensorsysteme wie Kamera, Lidar oder Radar umfassen und soll hier allgemein mit dem neuen Begriff „Road Capturing Unit“ zusammengefasst werden. Beide Systeme RSU und RCU sind i.A. an einem Pfosten (z.B. Straßenlaterne) oder an Gebäuden angebracht (siehe auch Kapitel 4.4.1).

Bei einer Einführung von MAD sind die Investitionen in die Infrastruktursensorik offensichtlich ein relevanter Faktor. Dies darf aber nicht einer singulären Betrachtung folgen, bei der man diese Investitionen nur dem automatisierten Fahren zuordnet. Grundsätzlich findet man in verschiedenen anderen Bereichen eine nennenswerte Zunahme von Überwachungseinrichtungen. Transport for London nutzt schon seit Jahren kamerabasierte Systeme für die Zufahrtsüberwachung der Londoner Innenstadt¹³; in Deutschland ist bereits eine Kameraüberwachung vieler hoch belasteter Streckenabschnitte über Ver-

¹² Siemens, Demonstration Testfeld automatisiertes Fahren Singapur.
¹³ <http://content.tfl.gov.uk/streetscape-guidance-.pdf> - Zugriff 25.03.2020

kehrslitzzentralen üblich¹⁴; ÖV –Betreiber überwachen Haltestellen¹⁵; Behörden (Polizei) überwachen ausgewählte sicherheitskritische Bereiche in Innenstädten¹⁶; Neue Geschäftsfelder entstehen durch Lidar Sensoren an Häuserfronten, um Bewegungsprofile von Personen zu erfassen¹⁷; Viele Projekte versuchen sensorisch verfügbare Parkplätze zu erfassen¹⁸. Ein großes Potential, aber auch eine große Herausforderung ist es, diese Aktivitäten zu bündeln. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die RCUs den heutigen Datenschutz und Security Anforderungen entsprechen (Kapitel 5.5 und 5.6).

Ein weiterer Aspekt der Infrastruktursensorik ist der Ausbau der dazugehörigen digitalen Infrastruktur, wie der international geplante 5G Netzausbau¹⁹. Wegen der gewünschten höheren Datenübertragungsraten und der damit notwendigen höheren Frequenzen sind die Reichweiten von 5G gegenüber heute eingesetzten 3G, 4G oder LTE Frequenzen deutlich geringer und betragen nur wenige 100m²⁰. Insbesondere im urbanen Umfeld sind daher keine Funkmasten sondern Smart Cells vorgesehen²¹. Diese kleinen Antennen werden in stark frequentierten Bereichen installiert und haben hinsichtlich Standortwahl, Installation (z.B. Glasfaseranschluss), Genehmigungen etc. sehr ähnliche Anforderungen wie bei MAD. Die potentiellen Synergien beim 5G Netzausbau und einem möglichen MAD Netzausbau sind nicht Teil dieser Studie sondern sollen in einer weiteren Studie zusammen mit geeigneten Industriepartnern untersucht werden.

2.2.4 Einordnung von MAD

Der infrastrukturbasierte Ansatz von MAD passt nicht in heute übliche Definitionen zum automatisierten Fahren. In Anlehnung z.B. an Inframix²² werden demnach folgende Ausprägungen unterschieden:

- Autonomes Fahren: Autonomie bedeutet, dass man in der Lage und in der Lage ist, selbständig und eigenverantwortlich Entscheidungen zu treffen. Im Falle des autonomen Fahrens kann ein einzelnes Fahrzeug seine Fahrentscheidung selbstständig treffen.
- (AD) Automatisiertes Fahren: Automatisierung befasst sich mit der Ausführung von Prozessen und Verfahren ohne menschlichen Eingriff. Automatisiertes Fahren bedeutet also Fahren ohne menschliches Zutun. Manchmal wird eine weitere Differenzierung zwischen vollautomatischem Fahren und den verschiedenen Automatisierungsstufen nach SAE vorgenommen.
- (CAD) Vernetztes automatisiertes Fahren: Beim vernetzten Fahren werden Informationen sowohl zwischen automatisierten als auch nicht-automatisierten Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern und/oder der Infrastruktur automatisiert ausgetauscht.
- (CCAD) Kooperatives vernetztes automatisiertes Fahren: Bei vernetztem Fahren: Kooperatives vernetztes Fahren bedeutet, dass einzelne Fahrzeuge und Fahrer im Verkehr kooperativ handeln. Dies bedeutet, dass die einzelnen Verkehrsteilnehmer ihre mikroskopischen Ziele und Handlungen im Hinblick auf verbesserte makroskopische Gesamteffekte koordinieren.

Für MAD kann man in ähnlicher Form definieren:

- - (MAD) Managed Automated Driving bedeutet, dass alle Einzelfahrzeuge von einer externen Verkehrsmanagementzentrale verwaltet werden. Die gesamte Verkehrssituation wird durch stationäre Sensorsysteme erfasst. Die Fahraufgaben der einzelnen Verkehrsteilnehmer, mikroskopi-

¹⁴ <https://verkehrsinfo-bw.de> – Zugriff 25.03.2020

¹⁵ <https://www.ssb-ag.de/kundeninformation/sicherheit/sicherheit-an-strecken-haltestellen-fahrzeuge/> - Zugriff 25.03.2020

¹⁶ Innenministerium Baden-Württemberg, Startschuss für die algorithmenbasierte Videoüberwachung. 03.12.2018.

¹⁷ <https://hystreet.com/methodology> - Zugriff 25.3.2020

¹⁸ <https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/strasse/parkloesungen/intelligent-parking-solutions.html> - Zugriff 25.03.2020

¹⁹ <https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2018/Entscheidungsentwurf.pdf> - Zugriff 25.03.2020

²⁰ <https://www.5g-anbieter.info/ratgeber/reichweite.html> - Zugriff 25.03.2020

²¹ <https://www.5g-anbieter.info/technik/smart-cells.html> Zugriff 25.03.2020

²² J. Vreeswijk, MAP traffic management, the Netherlands; INFRAMIX workshop; 14 May 2019, Barcelona

schen als auch makroskopische Ziele und Handlungen, werden in verschiedenen Ebenen des Back-Ends umgesetzt.

Der Übergang von Automated Driving (AD) zum Managed Automated Driving (MAD) kann sich fließend gestalten (Abbildung 5):

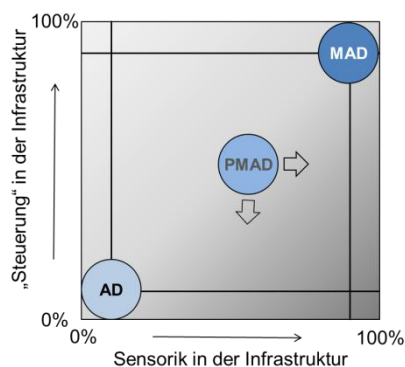


Abbildung 5: Einordnung MAD

Die Sensorabdeckung der Fahrstrecke durch die Infrastruktur kann von 0-100% variieren. Die Zuordnung von AD, bzw. MAD zu den beiden Extremen dieser Achse in Abbildung 5 ist nicht realistisch und daher als Bereich dargestellt. Beim AD sind zumindest Infrastrukturdaten wie hochgenaue Karten notwendig und bei MAD muss mit einer Abdeckungslücke in der Sensorik gerechnet werden. Auch bei der Steuerung in der Infrastruktur ist theoretisch eine Skalierung von 0-100% möglich. Bei AD ist es üblich, dass z.B. der Fahrauftrag über eine Backend Plattform erfolgt, also auf oberster Ebene eine Vorgabe erfolgt (Abb.4 „off-board guidance system“). Wandert immer mehr und mehr der Funktionalität der „cognitive driving intelligence“ in die Infrastruktur, so nimmt der Grad der Steuerung in der Infrastruktur zu. Aber auch bei MAD ist absehbar, dass hier keine 100% erreicht werden, da für die Sicherheitsfunktionalität immer eine einfache Steuerung im Fahrzeug verbleiben muss.

Ziel von U-Shift MAD ist die maximale Verlagerung der Steuerung des Fahrzeugs, sowie Sensorik in die Infrastruktur. In dieser Studie wird jedoch auch ein „Partially Managed Automated Driving“ (PMAD) definiert und in verschiedenen Anwendungsszenarien als möglicher Migration oder Alternative bewertet.

Ähnlich wie man heute in der SAE J3016 die „Levels of Driving Automation“ über die Zuordnung von Funktionalitäten / Verantwortung zwischen Driver und System definiert – „SAE-Levels 0-5“, braucht man zukünftig auch eine Einteilung oder Klassifizierung für die beiden Dimensionen „Sensorik in der Infrastruktur“ oder „Steuerung in der Infrastruktur“. Für die Infrastruktursensorik gibt es erste Ansätze die im folgenden Kapitel beschrieben werden.

2.2.5 Infrastruktur Streckenklassifizierung

Die Nutzung der Infrastruktur im Kontext der Fahrzeugautomatisierung wird / wurde schon in einigen Projekten untersucht. Einige Aspekte sollen als PDI (Physical Digital Infrastructure) auch in dem neuen „FP9“ Rahmenprogramm der Europäischen Union (EU) weiter betrachtet werden²³. Im Rahmen des EU-Projektes Inframix²⁴ wurde erstmalig eine Streckenklassifizierung erstellt, die in der ERTRAC „Connected

²³ ERTRAC; European Partnership under Horizon Europe; Connected, Cooperative and Automated Mobility (CCAM) [draft 13 March 2020]

²⁴ www.inframix.eu – Zugriff 19.03.2020

Automated Driving Roadmap 2019²⁵ aufgenommen wurde. Bei dieser Klassifizierung wird der Grad, in dem automatisiertes Fahren durch die Infrastruktur unterstützt wird durch ISAD (Infrastructure Support Levels of Automated Driving) Level gekennzeichnet (Abbildung 6). Bei einer konventionellen Infrastruktur sind entweder keine digitalen Informationen vorhanden (Level E) oder lediglich digitale Karten mit statischen Verkehrszeichen ausgestattet (Level D). Digitale Infrastruktur versorgt das automatisierte Fahrzeug zusätzlich mit Informationen über Wechselverkehrszeichen (VMS = Variable-message signs), Warnungen und Wetter (Level C) sowie mikroskopische Verkehrssituationen (Level B). Level A liefert außerdem Echtzeitinformationen zu Fahrzeugbewegungen und kann so bezüglich Geschwindigkeit, Lücken und Spurwechseln anleiten.

	Level	Name	Description	Digital information provided to AVs				
				Digital map with static road signs	VMS, warnings, incidents, weather	Microscopic traffic situation	Guidance: speed, gap, lane advice	
Digital infrastructure	A	Cooperative driving	Based on the real-time information on vehicle movements, the infrastructure is able to guide AVs (groups of vehicles or single vehicles) in order to optimize the overall traffic flow.	X	X	X	X	
	B	Cooperative perception	Infrastructure is capable of perceiving microscopic traffic situations and providing this data to AVs in real-time	X	X	X		
	C	Dynamic digital information	All dynamic and static infrastructure information is available in digital form and can be provided to AVs.	X	X			
Conventional infrastructure	D	Static digital information / Map support	Digital map data is available with static road signs. Map data could be complemented by physical reference points (landmarks signs). Traffic lights, short term road works and VMS need to be recognized by AVs.	X				
	E	Conventional infrastructure / no AV support	Conventional infrastructure without digital information. AVs need to recognise road geometry and road signs.					

Abbildung 6: ISAD Levels – Infrastructure Support Levels of Automated Driving

Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für einen Teil des Straßennetzwerks, dem ISAD Level zugeordnet sind. Dadurch ist es möglich den Betreibern automatisiert fahrender Fahrzeuge eine Übersicht der aktuellen Möglichkeit der Unterstützung durch Infrastruktur zu geben. Inframix fokussiert sich in der Beschreibung auf den Bereich der Autobahnen und verweist zum urbanen Bereich lediglich auf eine analoge Übertragbarkeit.

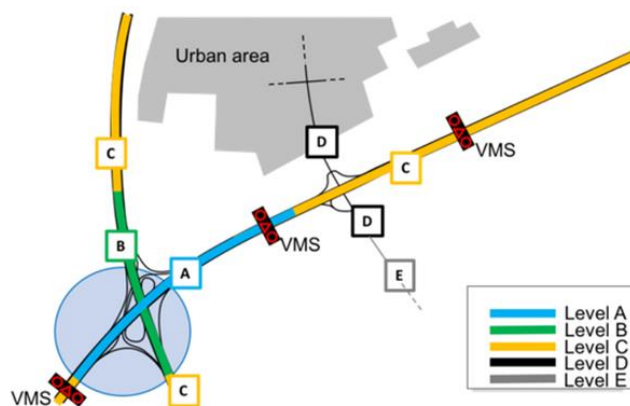


Abbildung 7: Anwendungsbeispiel ISAD

Der vorgestellte ISAD Ansatz ist eine erste Klassifizierung, die nur von dem heutigen CCAD ausgeht. Dieser erste Klassifizierungsvorschlag ist sehr positiv zu bewerten um die notwendige Infrastrukturklassifizierung überhaupt auf die Agenda der relevanten Gremien zu bekommen. Eine Erweiterung und Anpassung ist im Rahmen der CCAM Partnership auf EU-Ebene vorgesehen.

²⁵ <https://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id57/ERTRAC-CAD-Roadmap-2019.pdf> - Zugriff 19.03.2020

Aus MAD Sicht und bei der Anwendung in urbanen Räumen hat die ISAD Definition noch einige Schwächen. Wesentlich sind z.B.:

- Auf dem höchsten Level A gibt die Infrastruktur nur „Empfehlungen“ (guide = leiten, anleiten, durchschleusen), ein verbindliches Managen des Verkehrs oder eine echte Steuerung aus über ein Backend / Edge ist noch nicht berücksichtigt. Für MAD braucht man ein oder mehrere Level über dem Level A (In Anlehnung an die ISAD Nomenklatur z.B. A+, A++).

- Das höchste Level A ist offensichtlich nur in kurzen Streckenabschnitten vorgesehen (Abbildung 7: Autobahnkreuz) was auf die im Inframix Projekt gewählten Anwendungsszenarien und vorgesehenen Manöver (z.B. „Bottlenecks“, Einfahrten) zurück zu führen ist. Komplexe oder kritische Fahrsituationen können aber auf allen Streckenabschnitten existieren. Aus Anwendungssicht müssen die Bereiche mit der höchsten Infrastrukturunterstützung deutlich größer gewählt werden.

- Inframix hat lediglich Autobahnen untersucht und verweist für den Stadtverkehr einfach auf eine Übertragbarkeit „could be easily extended to urban and rural roads“. Die Komplexität des urbanen Verkehrssystems ist aber deutlich höher und ist nicht „einfach“ von der Autobahnanwendung zu übernehmen. Hier bedarf es einer deutlich umfassenderen Definition.

Für MAD könnte die ISAD Definitionen als Basis dienen, müssten aber für die urbane Anwendung deutlich erweitert und konkretisiert werden. Erste Überlegungen dazu wurden in einem Workshop erarbeitet und sind im Anhang aufgeführt. Abstimmungen im Rahmen der CCAM Partnership im Anschluss an diese Studie sind geplant.

3 Anwendungsfälle

Als gemeinsame Basis für die Diskussion und Bewertung der Zulassung, Architektur und Wirtschaftlichkeit von U-Shift und MAD wurden drei Anwendungsfälle oder auch „Use Cases“ definiert. Die Anwendungsfälle reflektieren drei verschiedene Implementierungstufen von U-Shift MAD. Die Abstufung von einer ersten Einzelimplementierung in einem Demonstrationsprojekt über eine Teilimplementierung z. B. über einen ersten Flotteneinsatz bis hin zur Vollimplementierung, also einer erfolgreichen flächen-deckenden Markteinführung, reflektiert damit auch ein „Roll-Out Szenario“ bei der vorgesehenen Verwertung von U-Shift MAD. Der Anhang umfasst eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Use Cases, Definitionen sowie Methodik zur Erarbeitung der Anwendungsfälle.

Anwendungsfall 1 „Pilot“

- Beispiel „Hub-2-Hub“

- Hoher Detailgrad
- Granulare Details für Wirtschaftlichkeit
- Basis für erste Kennziffern
- Betriebswirtschaftliche Betrachtung
- Keine Zeitvarianz
- Zulassung Forschungsprojekt / Einzelzulassung
- Automatisierung nur U-Shift Fahrzeuge
- Referenzfall: Status Quo
- Zeithorizont/Basis: 2025

Anwendungsfall 2 „Roll-Out“

- Beispiel „Stuttgart - Vaihingen“

- Anwendung von Kennziffern
- Standardisierung von Infrastruktur Ausbaulevels (ISAD)
- Betriebswirtschaftliche Betrachtung

- Roll-Outbeispiel (Zeitvarianz)
- Zulassung Typgenehmigung (Fokus Deutschland)
- Automatisierung offene Plattform - U-Shift Fahrzeuge (incl. AD anderer Hersteller in MAD Infrastruktur)
- Referenzfall: Private-led vehicle-focused Automation (AD); nur U-Shift Fahrzeuge (verschiedene Automatisierungsarchitekturen)
- Zeithorizont/Basis: 2030-2040

Anwendungsfall 3 „Vision 2040“ - Beispiel „Stuttgart“

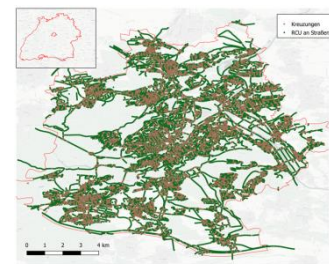
- Kosten-Nutzen Analyse
- Volkswirtschaftliche Betrachtung
- Zulassung von U-Shift als Großserie
- Automatisierung offene Plattform – U-Shift Fahrzeuge und ÖV (Option mit MAD)
- Referenzfall: fahrzeugbasierte Automatisierung bis SAE Level 3 mit heute gängigen Fahrzeugkonzepten
- Zeithorizont: 2040



Anwendungsfall 1



Anwendungsfall 2



Anwendungsfall 3

Abbildung 8: Übersicht der Anwendungsfälle; größere Darstellung und Quellenverweis im **Fehler!**
Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..

4 Technische Machbarkeit und MAD-Architektur

Im folgenden Abschnitt werden die technische Machbarkeit und Herausforderungen des U-Shift-MAD Konzepts am konkreten Anwendungsfall 1 „Pilot“ hergeleitet und qualitativ erörtert. Die Methodik ergibt sich wie folgt: Der betrachtete Anwendungsfall wird in konkrete Teilfunktionalitäten partitioniert, die zur Erfüllung der Gesamtfunktionalität nötig sind. Aus den erhobenen Teilfunktionalitäten werden Implementierungsmöglichkeiten abgeleitet, wie die spezifische Funktionalität erbracht werden kann (Hardware, Software). Als Implementierungsmöglichkeiten werden dabei drei Ausprägungen betrachtet: „MAD“, „PMAD“ (Partially Managed Automated Driving) und „AD“ (Automated Driving). Die Ausprägung „MAD“ sieht vor möglichst viel der Automatisierung in die Infrastruktur zu verlagern. Legt man die im Projekt Inframix²⁶ definierte Kategorisierung von Infrastrukturunterstützung zugrunde, entspricht dies einer Erweiterung des ISAD-Level A. Als „AD“ wird die Implementierung ohne oder nur mit bisher bestehender Infrastruktur bezeichnet und entspricht somit ISAD-Level D. „PMAD“ stellt eine Mischung von beiden Implementierungen dar. Die jeweiligen Ausprägungen werden erörtert und gemäß eines in dieser Studie definierten Kriterienkatalogs bewertet. Hierbei werden Herausforderungen der jeweiligen Ausprägung, als auch deren Potential hervorgehoben.

²⁶ <https://www.inframix.eu/infrastructure-categorization> - Zugriff 09.03.2020

4.1 Anforderungen an die Infrastruktur und das Fahrzeug

Die Liste der Teilfunktionen des Anwendungsfalls 1 „Pilot“ besteht aus: Aufnehmen von Kapsel, Fahrt auf Firmengelände / Hub, Durchfahrt eines Einlass-Tores, Freifahrt / Folgefahrt auf Firmenstraße, Auf-fahren auf Landstraße, Fahrt durch Kreisverkehr, Fahrt auf Landstraße, Fahrt Innerorts, Fahrt durch T-Kreuzung, Abbiegen an T-Kreuzung, Fahrt durch Unterführung, Abladen von Kapsel, Signal: Kapsel aufnehmen nicht möglich, Signal: Kapsel abladen nicht möglich, Umfahren von parkenden Fahrzeugen. Tabelle 1 zeigt exemplarisch die Funktion „Umfahren von parkenden Fahrzeugen“.

Für jede dieser Funktion wurden Akteure, externe Akteure, die Geschwindigkeit des U-Shift-Fahrzeugs und die möglichen Risiken ermittelt. Daraus konnten die technischen Anforderungen an Fahrzeug und Infrastruktur abgeleitet werden. Für die Umsetzung werden folgende Komponenten benötigt:

- Drive-by-Wire-Aktuatoren und Sensoren im U-Shift-Driveboard für Lenkung, Gas und Bremse
- Hochgenaues Lokalisierungssystem (Hardware + Software) der U-Shift-Driveboards und hoch-genaues Kartenmaterial
- Perzeptionssensorik und -Software für die Umgebungswahrnehmung
- Pfadplanungskomponenten (Software) für Fahrt auf Landstraße/Innerorts, Durchfahrt von Kreis-verkehr, Abbiegevorgang, Aufnahme- und Abladesequenz von Kapsel
- Manöverplanungskomponente mit Vorfahrtsregelung (Software)
- Kommunikationsmodule (Hardware + Software) mit der Infrastruktur, geeignete Kommunikati-ons-Protokolle auf Anwendungs- und Übertragungsebene
- Flottenverwaltungssystem und Backend-Services
- Teleoperatorsystem zur Fernsteuerung der Driveboards im Fehlerfall (nötig z.B. für Wiederauf-nahme des Betriebs nach Fehlerfall)

Die Verteilung der Komponenten auf Infrastruktur und Fahrzeug für die drei verschiedenen Ausprä- gungen und welche Vor- und Nachteile sich daraus ergeben, wird in Abschnitt 4.3 beschrieben.

Tabelle 1: Umfahren von parkenden Fahrzeugen

Funktion 0015	
Name	Umfahren von parkenden Fahrzeugen
Beschreibung + Skizze	<p>Das Driveboard (grün) fährt an Fahrzeuge heran, die auf der eigenen Spur stehen. Das Driveboard er- kennt die Ursache, warum die Fahrzeuge auf der Straße stehen, und unterscheidet, ob es sich um Stau oder parkende Fahrzeuge handelt.</p> <p>Das Driveboard umfährt die parkenden Fahrzeuge, sobald der Gegenverkehr (rot) dies zulässt. Stehen die Fahrzeuge aufgrund der Verkehrsführung (z.B. Lichtsignalanlage oder Stau), dann bleibt das Dri- veboard hinter den Fahrzeugen stehen.</p>
Akteure	Driveboard

Externe Akteure	Parkende / stehende Fahrzeuge auf der eigenen Spur, andere Verkehrsteilnehmer auf der entgegengerichteten Spur
Geschwindigkeit (langsam 0-15 Km/h, mittel (15-50 Km/h, hoch (50-80 km/h)	langsam-mittel
Risiken	Fehleinschätzung der Ursache der stehenden Fahrzeuge; Verdeckungen (Kurven, Bäume, Zäune, etc.), die das Erkennen des Gegenverkehrs verhindern / erschweren; Nicht erkennen / nicht rechtzeitiges Erkennen von Gegenverkehr beim Umfahren der Fahrzeuge

4.2 Technische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die technischen Grundlagen für U-Shift MAD erläutert. Dazu wird eine kurze Übersicht über Projekte gezeigt, die im Bereich des infrastrukturunterstützten Fahrens angesiedelt sind. Zudem werden verschiedene Infrastruktur-Architekturen und die Kommunikation innerhalb der Infrastruktur untersucht, die in diesen Projekten zum Einsatz kommen. Unter dem Begriff Architektur verstehen wir die Netzwerktopologie, die Kommunikation innerhalb des Netzwerkes, die einzelnen Teilnehmer und die Softwarearchitektur, die in den verschiedenen Recheneinheiten zur Anwendung kommen. Die einzelnen Teilnehmer sind je nach Architekturtyp ein globales Backend, mehrere dezentrale Recheneinheiten (MEC-Server, Multi-access Edge Computing), Sensornpfosten, die sich am Straßenrand befinden und mit Kommunikationseinheiten (Roadside-Unit - RSU) und Sensorik (Road-Capturing-Unit - RCU) ausgestattet sind, und Fahrzeuge, die mit einer Kommunikationseinheit (On-Board-Unit – OBU) ausgestattet sind. Eine Übersicht dieser Teilnehmer und die Kommunikationswege sieht man beispielhaft in Abbildung 9. Je nach Architektur können hier Unterschiede auftreten.

In den nächsten Abschnitten wird näher auf die Teilkomponenten und deren Aufgabe eingegangen und die Kommunikation zwischen diesen erläutert.

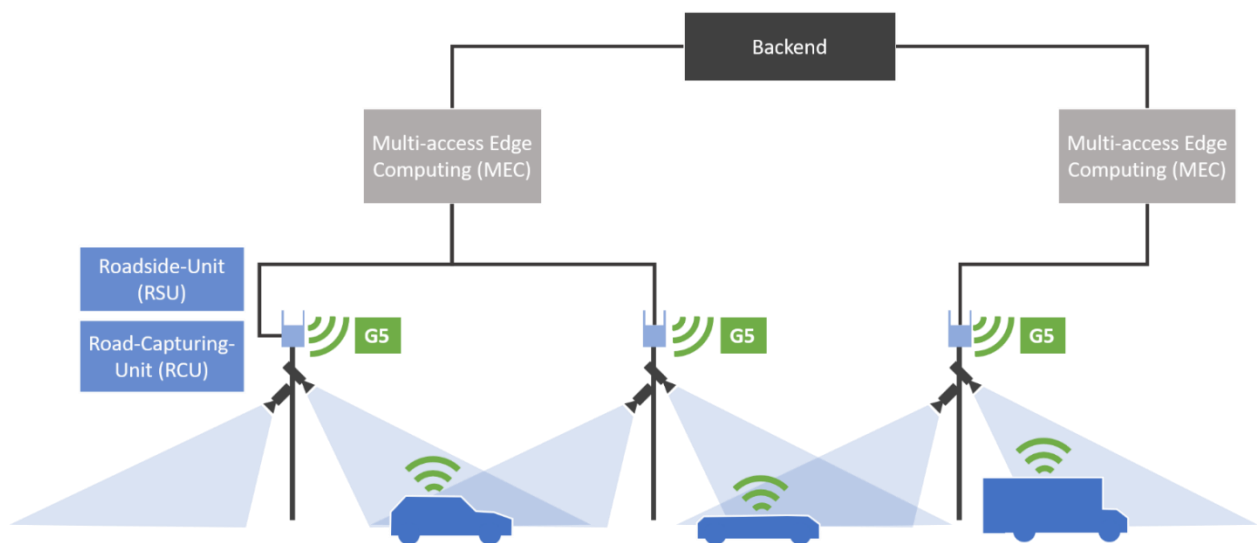


Abbildung 9: Mögliches Architekturkonzept für MAD mit allen Teilnehmern, Sensorik und Vernetzung.

4.2.1 Infrastrukturgestütztes Automatisiertes Fahren – Bisherige Arbeiten

Das Projektziel von **INFRAMIX**²⁷ ist es, die Infrastruktur für die Koexistenz von konventionellen und automatisierten Fahrzeugen vorzubereiten. Dafür werden physische und digitale Elemente der Infrastruktur entworfen, verbessert, angepasst und getestet. In dem Projekt werden drei Szenarien betrachtet, die sich hauptsächlich auf Autobahnen wiederfinden: dynamische Spurzuweisung, Baustellen und Engpässe (z.B. Auffahrten). Getestet wird in einer eigens entwickelten Simulationsumgebung und auf zwei Teststrecken in Spanien und Österreich. Zusätzlich wurde ein Klassifikationsschema für den Ausbauzustand der Infrastruktur entworfen (ISAD-Level).

In **ICT4CART**²⁸ soll ICT (Information & Communication Technology) -Infrastruktur entworfen, implementiert und unter echten Bedingungen getestet werden. Diese Infrastruktur soll den Übergang für die höheren Level der Automatisierung (SAE L3 & L4) ermöglichen. Dabei werden hybride Vernetzungsformen, Datenmanagement, Cyber-Security, Datenschutz und die exakte Lokalisierung behandelt. Getestet wird auf Teststrecken in Österreich, Deutschland und Italien. Eine grenzüberschreitende Teststrecke an der Grenze zwischen Österreich und Italien soll aufgebaut werden.

In **MEC-View**²⁹ findet eine Erweiterung des Erfassungsbereichs fahrzeuggebundener Sensorik durch infrastrukturseitige Sensorik statt. Für die Fusion der infrastrukturseitigen und fahrzeugseitigen Umfeldmodelle werden hochauflösende digitale Karten, ein performantes Mobilfunknetz und ein Multi-access Edge Computing (MEC) Server eingesetzt. Durch Infrastruktursensoren können Informationen über verdeckte Verkehrsteilnehmer an den lokalen MEC-Server weitergegeben und von dort über LTE/5G an hochautomatisierte Fahrzeuge gesendet werden. Getestet wurde das Konzept an einer Pilotkreuzung in Ulm.

In dem Projekt **UNICARagil**³⁰ sollen vollständig fahrerlose elektrische Fahrzeuge entwickelt werden. Das Fahrzeugkonzept, das aus Nutz- und Antriebseinheit besteht, soll sich an vielfältige Anwendungsfälle wie z.B. Logistik- oder Personentransport anpassen können. Das Fahrzeug kann mit einer Cloud, der Infrastruktur und einer Sensordrohne kommunizieren.

Innerhalb des Projekts **AutoTruck**³¹ soll ein System für den vollautomatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen in Logistikzentren und definierten, räumlich begrenzten Gebieten des öffentlichen Straßenverkehrs entwickelt werden. Sobald ein solches Gebiet befahren wird, soll der vollautomatisierte Betrieb beginnen und beim Verlassen des Gebiets wieder beendet werden. Dabei stehen vor allem Funktionen wie hochgenaue Ortung und Navigation, sicherere Kollisionsvermeidung, Vehicle-2-Infrastructure-Kommunikation, Echtzeit-Manöverplanung und vollautomatische Nahfeldnavigation im Fokus. Ebenfalls sind Koordination, Steuerung und Überwachung der LKWs durch einen Online-Leitstand geplant.

Automated Valet Parking^{32 33} ist ein Projekt von Bosch und Daimler, bei dem das Parkhaus des Mercedes-Benz Museums in Stuttgart mit einem automatisierten Vorfahr- und Einparkservice ausgestattet wurde, der ohne Fahrer auskommt, und ist damit die weltweit erste behördlich für den Alltagsbetrieb zugelassene vollautomatisierte und fahrerlose Parkfunktion nach SAE Level 4. Die Infrastruktursensorik innerhalb des Parkhauses überwacht den Fahrkorridor und dessen Umfeld und liefert die Informationen für die Steuerung des Fahrzeugs. Die Technik im Fahrzeug setzt die Fahrhinweise der Infra-

²⁷ <https://www.inframix.eu/>

²⁸ <https://www.ict4cart.eu/> besucht am 20.03.2020

²⁹ <http://www.mec-view.de/> besucht am 20.03.2020

³⁰ <https://www.unicaragil.de/> besucht am 20.03.2020

³¹ <http://www.autotruck-projekt.de/> besucht am 20.03.2020

³² <https://www.mercedes-benz.com/de/innovation/daimler-bosch-automated-valet-parking/> besucht am 20.03.2020

³³ <https://www.bosch.com/de/stories/automated-valet-parking/> besucht am 20.03.2020

struktur in Fahrmanöver um. Das Fahrzeug selbst braucht neben einer Kommunikationseinheit keine eigenen exterozeptiven Sensoren.

Im Verbundprojekt **IMAGInE**³⁴ werden innovative Assistenzsysteme für kooperatives Fahren entwickelt. Kooperative Manöverplanung, die über eine Kommunikation der Fahrzeuge untereinander oder über die Infrastruktur abgestimmt wird, soll dazu beitragen Unfälle und Staus zu vermeiden und das Autofahren allgemein sicherer zu machen. Um die kooperativen Fahrfunktionen zu ermöglichen wurden Rahmenspezifikationen für die Kommunikation und ein gemeinsames, fahrzeugübergreifendes Umweltmodell definiert, neue Mensch-Maschine-Schnittstellen entwickelt und die Interaktion zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern in einer Simulationsumgebung abgebildet.

Im Projekt **Optimiertes Transportsystem basierend auf selbstfahrenden Elektrofahrzeugen - OTS 1.0**³⁵ wurde vernetztes automatisiertes Fahren und dessen Facetten getestet und ein Testfeld auf dem Gelände der Siemens AG in München Perlach aufgebaut. Für den Betrieb eines eingesetzten Kleinstfahrzeugs als Shuttle ist ein Zusammenspiel von Leittechnik, Infrastruktursensorik und dem Fahrzeug selbst erforderlich. Der Rundkurs auf dem Testfeld ist mit Radarsensoren und an ausgewählten Stellen mit zusätzlichen Lidarsensoren ausgestattet. Ebenso wurden Roadside-Units angebracht, die für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur benötigt werden. Die Umwelterfassung durch die Infrastruktursensorik wird mit zusätzlichen statischen Daten in einem Echtzeitmodell gespeichert und dem Fahrzeug zur Verfügung gestellt.

Neben dem Betrieb des Shuttles in München Perlach wurde innerhalb des OTS Projekts ein weiteres Betreiber- bzw. Geschäftsmodell untersucht, das das autonome Fahrzeug als Zubringer zum ÖPNV für das neu entstehende Stadtquartier Gartenfeld in Berlin vorsieht. Es wurde auch eine mikroskopische Verkehrsflusssimulation durchgeführt, die die Vorteile der On-Demand OTS-Shuttles gegenüber dem motorisierten Individualverkehr aufzeigen soll.

Weitere Projekte, die Vehicle-to-Vehicle (V2V) – Kommunikation zur Umsetzung von Platooning untersuchen, sind beispielsweise **ENSEMBLE**³⁶ und **CONCORDA**³⁷. Im Projekt **CAT - Connected Automated Trucks**³⁸ sind fahrerlose LKWs mit einem Control-Tower verbunden und können von dort überwacht und bei Bedarf auch ferngesteuert werden.

4.2.2 Vernetzung

In Abbildung 10 sind drei verschiedene Netzwerk-Topologien, also die Vernetzungsstruktur, schematisch dargestellt. Links im Bild sind die Kommunikationseinheiten und die Sensorik der Infrastruktur direkt an ein **globales Backend** angebunden, in der Mitte ist eine Infrastruktur für **Multi-access Edge Computing (MEC)** dargestellt und rechts ist eine Kombination von **MEC und globalem Backend** zu sehen. Teilnehmer sind, je nach Topologie, ein globales Backend, dezentrale Recheneinheiten (MEC-Server), Roadside-Units (RSUs) an den Sensorpfosten und die On-Board-Units (OBU) der U-Shift-Fahrzeuge.

Die Kommunikation innerhalb der Infrastruktur findet in unterschiedlichen Ausprägungen statt. So gibt es eine lokale Kommunikation zwischen den in Fahrzeugen verbauten On-Board-Units (OBU) und den einzelnen Kommunikationseinheiten der Infrastruktur, den sogenannten Roadside-Units (RSU). Eine Roadside-Unit befindet sich an einem Sensorpfosten am Straßenrand und stellt die Schnittstelle für die

³⁴ <https://imagine-online.de/> besucht am 20.03.2020

³⁵ <https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2019-01/OTS%201.0%20Abschlussbericht.pdf>

³⁶ <https://platooningensemble.eu/> besucht am 20.03.2020

³⁷ <https://connectedautomateddriving.eu/project/concorda/> besucht am 20.03.2020

³⁸ <https://www.drivesweden.net/en/projects-5/cat> besucht am 20.03.2020

Kommunikation der Fahrzeuge mit der Infrastruktur dar. Kommunikation der RSUs untereinander ist ebenfalls möglich. Auch eine direkte Kommunikation zwischen den in den Fahrzeugen verbauten OBU's ist somit möglich (V2V-Kommunikation), wird aber in U-Shift nicht angestrebt. Die Kommunikation zwischen Roadside-Units und den dezentralen Recheneinheiten bzw. zwischen den dezentralen Recheneinheiten untereinander, wird Edge-Kommunikation genannt. Bei der globalen Kommunikation können, je nach Architektur, die RSUs direkt mit dem Backend kommunizieren oder es findet eine Kommunikation zwischen den dezentralen Recheneinheiten und dem Backend statt. In Abschnitt 4.2.4 werden die verschiedenen Ausprägungen der Kommunikation genauer beschrieben.

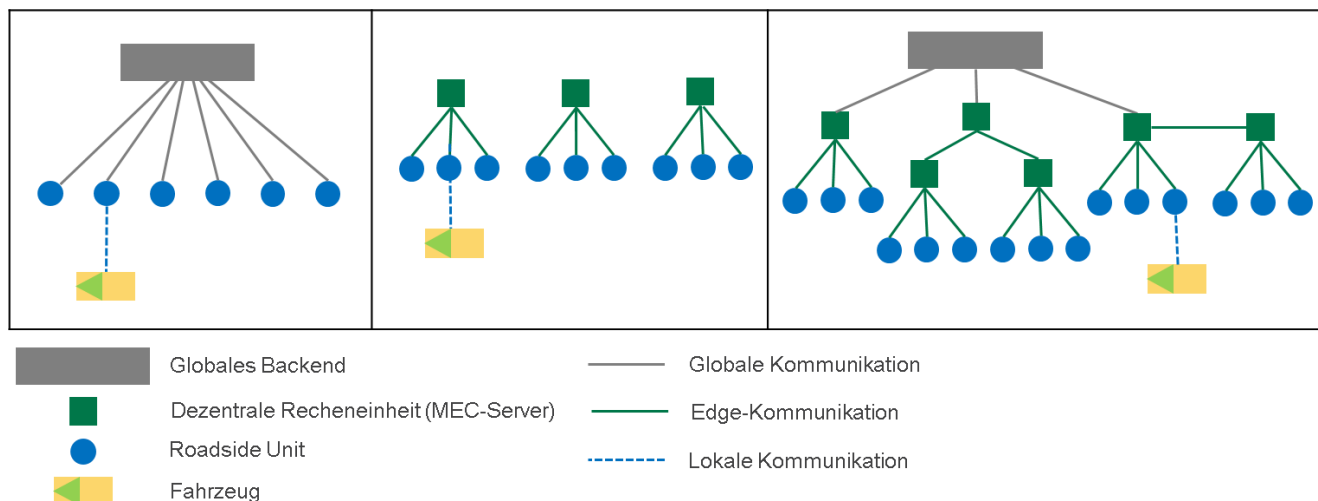


Abbildung 10: Übersicht verschiedener Netzwerk-Topologien der Infrastruktur. Links: globales Backend, Mitte: Multi-access Edge Computing (MEC), rechts: MEC + globales Backend

4.2.2.1 Globales Backend

In einer Topologie mit globalem Backend sind die Roadside-Units direkt mit dem Backend verbunden (Abbildung 10 links). Diese Architektur ermöglicht es global zu kommunizieren und die gesamte Datenverarbeitung findet zentral in einem Rechenzentrum statt. Dies vereinfacht bzw. erleichtert die Instandhaltung und Wartung der Infrastruktur im Vergleich zu einer dezentralen Datenverarbeitung. Da alle Daten an einer Stelle zentral verarbeitet werden, kann aus den Daten ein globales Umweltmodell aufgebaut werden, das auch für potentielle Echtzeitanwendungen genutzt werden kann. Ein großer Nachteil ist die Skalierbarkeit dieses Ansatzes. Der lokale Informationsaustausch, also die lokale Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur bzw. zwischen den Roadside-Units untereinander, hat sehr hohe Anforderungen an die Latenz um Echtzeitfähigkeit und somit sicheres Fahren zu ermöglichen. Um die Latenzzeiten zwischen den Roadside-Units und dem Backend möglichst gering zu halten wäre eine durchgängige globale Glasfaservernetzung oder eine schnelle globale 5G Vernetzung nötig. Dies scheint derzeit jedoch nicht realistisch oder ist auf jeden Fall als stark ambitioniert einzuschätzen.

Dieser Architekturtyp wird beispielsweise in den Projekten INFRAMIX³⁹ oder UNICARagil⁴⁰ verwendet.

³⁹ <https://www.inframix.eu/> besucht am 20.03.2020
⁴⁰ <https://www.unicaragil.de/> besucht am 20.03.2020

4.2.2.2 Multi-access Edge Computing

Bei einer Multi-access Edge Computing (MEC) Architektur findet die Datenverarbeitung dezentral statt. Dazu werden RSUs und die dazugehörige Sensorik, die räumlich benachbart verortet sind, mit einer dezentralen Recheneinheit (MEC-Server) verbunden, die sich ebenfalls in der Nähe der RSUs befindet (Abbildung 10 Mitte). Durch die Nähe der Recheneinheiten zur angebundenen Hardware wird der Transportweg der Daten reduziert und somit werden sehr geringe Latenzzeiten der Datenübertragung und dadurch Echtzeitfähigkeit ermöglicht. Die einzelnen dezentralen Recheneinheiten sind in der Regel nicht miteinander vernetzt und können somit nicht miteinander kommunizieren. Eine globale Kommunikation ist daher nicht möglich und innerhalb der MEC-Server kann nur ein lokales Umweltmodell erstellt werden.

Eine Architektur mit einem MEC-Ansatz wird in dem Projekt MEC-View⁴¹ angewendet. Innerhalb dieses Projekts wurde jedoch der Fokus auf eine einzelne Forschungskreuzung gelegt. Dementsprechend wurde nur ein MEC-Server verwendet. Dieser Ansatz bietet ebenfalls Nachteile, was die Skalierbarkeit und die langfristige Anwendbarkeit angeht, da ein globales Management für übergeordnete Geschäftsfelder und Services (Ticketing, Flottenmanagement, ...) von zentraler Bedeutung sind.

4.2.2.3 MEC und globales Backend

Die Architektur, wie sie in Abbildung 10 rechts zu sehen ist, ist eine Kombination aus Multi-access Edge Computing und globalem Backend. Die Roadside-Units und Sensorik der Infrastruktur sind, wie im vorherigen Abschnitt bereits beschrieben, mit lokalen Recheneinheiten verbunden. Diese Recheneinheiten sind weiterhin direkt oder indirekt mit einem globalen Backend verbunden. Wie in Abbildung 10 rechts zu sehen ist, können die Recheneinheiten über verschiedene Hierarchieebenen (Baum-Topologie) miteinander verbunden bzw. ans Backend angebunden werden. Zwei dezentrale Recheneinheiten können direkt miteinander verbunden sein und daher muss auch nicht jede Recheneinheit direkt mit dem Backend verbunden werden.

Diese Architektur vereinigt die Vorteile eines globalen Backends und des Multi-access Edge Computings. Es wird eine geringe Latenz bei der Datenverarbeitung der Sensoren und der Kommunikation mit Fahrzeugen ermöglicht. Eine globale Kommunikation und eine zentrale Datenverarbeitung, die größere Latenzen erlaubt (z.B. Buchung, Routing, etc.) ist im Backend ebenso möglich. Eine derartige verteilte und vernetzte Architektur stellt aber erhöhte Anforderungen an deren Wartung und Betrieb.

Im Projekt ICT4CART⁴² und im Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg⁴³ ist diese Architektur im Einsatz.

4.2.3 Favorisierte Netzwerk-Topologie für U-Shift-Control

Die Umsetzung von U-Shift hat verschiedene Anforderungen an die verwendete Architektur. Dabei können die Anforderungen in zeitkritische und nicht zeitkritische Anforderungen unterteilt werden.

Die Steuerung bzw. Koordination der U-Shift-Fahrzeuge sollen über eine zentrale Plattform möglich sein. Dazu muss in der zentralen Plattform das Flottenmanagement stattfinden, das Routing zum Zielort der einzelnen U-Shift-Fahrzeuge erfolgen und Services wie z.B. das Buchen von U-Shift-Fahrzeugen bereitgestellt werden. Diese Funktionen benötigen Informationen von allen vorhandenen U-Shift-Fahrzeugen, wie z.B. die aktuelle Position oder den Zielort, damit an einer zentralen Stelle, dem Ba-

⁴¹ <http://www.mec-view.de/> besucht am 20.03.2020

⁴² <https://www.ict4cart.eu/> besucht am 20.03.2020

⁴³ <https://taf-bw.de/> besucht am 20.03.2020

ckend, ein globales Umweltmodell erzeugt werden kann. Die U-Shift-Architektur muss also eine Kommunikation zwischen dem Backend und jedem einzelnen U-Shift-Fahrzeug ermöglichen (globale Kommunikation). Die Daten, die für Erstellung des Umweltmodells benötigt werden, sind keine zeitkritischen Daten und die Latenz bei der globalen Kommunikation ist daher vernachlässigbar.

Zeitkritische Anforderungen entstehen bei der Übertragung von Informationen, die für die Fahrfunktionalität benötigt werden. Dazu gehören die Objekterkennung, die Pfadplanung und die Manöverplanung. Damit die Dauer der Übertragung, und damit auch die gesamte Dauer der Sensordatenverarbeitung möglichst kurzgehalten wird, ist es sinnvoll neben einem schnellen Übertragungsmedium auch die Distanz zwischen den RSUs und der Recheneinheit, in der die jeweiligen Daten verarbeitet werden, gering zu halten.

Die Anforderungen, die U-Shift an die Architektur hat, werden am besten durch eine Kombination aus globalen Backend und Multi-access Edge Computing erfüllt und ist in Abbildung 9 dargestellt.

4.2.4 Kommunikation

Wie bereits beschrieben, kann die Kommunikation in drei verschiedene Bereiche unterteilt werden: lokale Kommunikation, Edge-Kommunikation und globale Kommunikation. Im Folgenden wird dabei ein besonderer Fokus auf lokale Kommunikations- und Anwendungsprotokolle für automatisiertes Fahren gelegt.

4.2.4.1 Lokale Anwendungs-Kommunikationsprotokolle

Für die Verkehrsvernetzung (Vehicle-to-Everything, V2X) wurden und werden von der Standardisierungsorganisation ETSI (European Telecommunications Standards Institute) Protokolle und Standards für verschiedene Nachrichtentypen entwickelt, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Diese Nachrichten sind für konkrete Anwendungsfälle definiert und ermöglichen es unter anderem Objektdaten zwischen Fahrzeugen untereinander, aber auch zwischen Fahrzeug und Roadside-Units, die Teil der stationären Infrastruktur sind, zu übertragen. Die ausgetauschten Nachrichten und Protokolle regeln dabei nicht nur die Vernetzung selbst, sondern auch die Anwendungsfallsspezifische Semantik der Information. An die zu übertragenden Daten werden hohe Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit und deren Übertragungszeit gestellt, was bei dem Entwurf der Protokolle und Standards berücksichtigt wurde. Nachrichtentypen, die bereits standardisiert wurden oder derzeit entwickelt werden, werden im Folgenden kurz erläutert.

Nachrichtentyp	Status	Beschreibung
Cooperative Awareness Message (CAM) ⁴⁴	Standardisiert	Kommunikation des internen Fahrzeugzustands an andere Verkehrsteilnehmer. Dieser Zustand enthält u.a.: Position, Fahrtrichtung, Geschwindigkeit, Fahrzeugtyp, Ausdehnung/Größe, sowie zusätzliche Informationen.
Signal Phase and Timing (SPaT) und Map (MAP) ⁴⁵	Standardisiert	In SPaT-Nachrichten sind Informationen über die Zustände von Lichtsignalanlagen enthalten, also in welcher Signalphase sie sich befinden und wie lange diese noch anhält. In

⁴⁴ Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service

		Verbindung mit MAP-Nachrichten, in denen sich Karteninformationen befinden, kann somit ausgewertet werden, welche Spuren aktuell befahrbar sind.
Decentralized Environmental Notification (DENM)⁴⁶	Standardisiert	DENM Nachrichten werden genutzt um die Position und Typ von dynamischen Änderungen im Fahrzeugumfeld zu kommunizieren. Hierzu zählen z.B. ungewöhnliche Verkehrsaufkommen, Baustellen, Spuränderungen, aufgetretene Unfälle oder ähnliches.
Cooperative Perception Message (CPM)⁴⁷	Draft	CPM Nachrichten enthalten Informationen über erkannte Objekte wie Hindernisse oder andere Verkehrsteilnehmer. Hierzu werden in der Nachricht Informationen über die sendende ITS-S Einheit (Intelligent Transport System-Station), ihre Sensorausstattung und die erkannten Objekte angegeben in Form von Position, Ausdehnung, Geschwindigkeit, etc. Die Objekte werden im Bezugssystem der sendenden ITS-S angegeben, das georeferenziert ist, sodass sie von Verkehrsteilnehmern, die mit einem globalen Lokalisierungssystem (z.B. GPS) ausgestattet sind, interpretiert und verwendet werden können.
Manoeuvre Coordination Messages (MCM)	Draft	MCM Nachrichten enthalten Manöverinformation, die zum kooperativen Fahren eingesetzt werden kann.

Die definierten Nachrichten auf Anwendungsebene werden typischerweise über Dedicated Short Range Communication (DSRC), auch ITS-G5 (WLAN 802.11p) genannt, kommuniziert, wofür bereits Steuergeräte und Softwarelösungen verfügbar sind. ITS-G5 hat in großen Teilen einen fortgeschrittenen Entwicklungsstand, sodass es im Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg⁴⁸ und Testfeld Niedersachsen⁴⁹ zur anwendungsnahen Erprobung kommt. Durch die bereits fortgeschrittene Entwicklung sind Kommunikationsprotokolle bereits ausgereift und können für die Erprobung von Anwendungsfällen direkt zum Einsatz kommen.

Als Alternative zu ITS-G5 wird Cellular V2X (C-V2X) gesehen, das derzeit das LTE-Netz nutzt und in Zukunft auf 5G Kommunikation erweitert werden soll⁵⁰. Cellular V2X wird vom 3rd Generation Partnership Project (3GPP) entwickelt und dessen Anwendung im Mobilitätsbereich derzeit eher im ameri-

⁴⁵ ISO/TS 19091:2019 Intelligent transport systems — Cooperative ITS — Using V2I and I2V communications for applications related to signalized intersections

⁴⁶ Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service.

⁴⁷ Intelligent Transport System (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Specification of the Collective Perception Service (nicht öffentlich zugänglich)

⁴⁸ T. Fleck, K. Daaboul, M. Weber, P. Schörner, M. Wehmer, J. Doll, S. Orf, N. Sußmann, C. Hubschneider, M. Zofka, F. Kuhnt, R. Kohlhaas, I. Baumgart, R. Zoellner, J.M. Zöllner: „Towards Large Scale Urban Traffic Reference Data: Smart Infrastructure in the Test Area Autonomous Driving Baden-Württemberg“, IAS-15, 2018.

⁴⁹ <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/testfeld-niedersachsen-fuer-automatisierte-und-vernetzte-mobilitaet/kommunikationstechnik>, besucht am 09.03.2020

⁵⁰ <https://www.telekom.com/de/konzern/details/autos-im-gespraech-5g-versus-wlan-573078>, besucht am 24.03.2020

kanischen und chinesischen Raum vorangetrieben⁵¹, wobei in Europa Uneinigkeit bezüglich dessen Bevorzugung bei den beteiligten Stakeholdern herrscht. So geht die 5G Automotive Association (5GAA), deren Mitglieder auch viele europäische OEMs und Tier-1 Zulieferer sind, von einer kurzfristigen Einführbarkeit und Verfügbarkeit der 5G Technologie aus⁵², wohingegen andere Stakeholder wie Volkswagen auf eine schnelle Markteinführung von ITS-G5 durch Integration in die Serienfertigung drängen⁵³. Sowohl 5G, als auch WLAN basierte Kommunikation habe Vor- bzw. Nachteile. Einer der Hauptkritikpunkte von 5G liegt unter anderem in der Frage der Flächenabdeckung und deren Finanzierung. Demgegenüber stehen die Marktreife von ITS-G5 und dessen schnelle Anwendbarkeit durch den fortgeschrittenen Teststatus. Welche Technologie sich letztendlich durchsetzen wird, ist derzeit noch offen.

Die Wahl und Abwägung des Übertragungsprotokolls (ITS-G5 oder C-V2X) spielt für die Erprobung des Konzepts U-Shift keine direkte Rolle und ist eher langfristig von Interesse. Da aus Automatisierungssicht derzeit noch die Standardisierung und Erprobung der Anwendungsprotokolle im Vordergrund steht und bisher noch nicht vollends klar ist, welche Szenarien unter welchen Bedingungen mit den bereits standardisierten Protokollen umsetzbar sind, ist hier der Schwerpunkt zu setzen. Dies liegt zum einen am hoch innovativen Konzept, das über bisherige Aufteilungen von Intelligenz zwischen Infrastruktur und Fahrzeug weit hinaus geht und somit nicht direkt oder erst als Draft (Vorabversion) standardisiert ist. Die Frage ob zum Beispiel eine Übertragung von Rohdaten für Automatisierung nötig ist, wie sie eventuell durch 5G Technologie möglich wäre, lässt sich derzeit nicht zufriedenstellend klären, so dass die Erprobung und Demonstration von vernetztem Fahren und dessen Möglichkeiten bzw. Limitierungen derzeit bevorzugt mit ITS-G5 Technologie zu bewerkstelligen ist. Im Vorhaben U-Shift-Control wird deshalb voraussichtlich ITS-G5 basierte Kommunikation bevorzugt.

Für Teleoperations-Anwendungen, die benötigt werden um das U-Shift-Fahrzeug im Fehlerfall oder in Situationen, die das Fahrzeug nicht selbstständig auflösen kann, steuern zu können, ist konzeptionell 5G vorgesehen, wobei dies in der Erprobung durch LTE umgesetzt werden kann. Die Entwicklung bzw. der Ausbau des 5G-Netzes bringt jedoch einiges an Potential mit sich. Neben der hohen Datenrate von bis zu 10 Gbit/s ist vor allem die Dienstgüte, die durch Ultra-Reliable and Low-Latency Communications (uRLLC) ermöglicht wird, interessant. Neben Latenzzeiten von wenigen Millisekunden bis zu unter einer Millisekunde werden auch eine hohe Bandbreite und hohe Zuverlässigkeit der Datenübertragung zugesichert. Laut Vorgabe dürfen beispielsweise bei der Übertragung von 20-Byte-Paketen nicht mehr als 0.001% der Pakete bei der Übertragung innerhalb 1ms fehlschlagen⁵⁴.

4.2.4.2 Globale Kommunikation und Edge-Kommunikation

Da die globale Kommunikation von Informationen der Edge-Devices zum Backend typischerweise keine harten Anforderungen an deren Echtzeitfähigkeit stellt, reichen zu deren Erprobung herkömmliche Kommunikationstechnologien wie z.B. LTE aus. So genügt zum Beispiel beim Senden von Routinginformationen vom Backend zum Fahrzeug eine geringe Bandbreite und auch die Latenz der Information ist nicht notwendigerweise kritisch, da dadurch keine sicherheitskritischen Zustände des Fahrzeugs erreicht werden können. Dies ermöglicht es einzusetzende Hardwareressourcen auch in Cloud-Dienste zu verlagern, die nicht notwendigerweise örtliche Nähe zum Fahrzeug haben.

⁵¹ <https://www.telekom.com/de/konzern/details/autos-im-gespraech-5g-versus-wlan-573078>, besucht am 24.03.2020

⁵² 5GAA: „Cellular V2X Communications Toward 5G“, Whitepaper. <https://5gaa.org/news/5gaa-releases-updated-white-paper-on-c-v2x-deployment-timeline>, besucht am 26.03.2020

⁵³ <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2018/10/car2x-networked-driving-comes-to-real-life.html>, besucht am 26.03.2020

⁵⁴ <https://www.a10networks.com/blog/5g-network-reliability-explained/> besucht am 26.03.2020

4.2.5 Service- und Softwarearchitektur im Backend

Durch das innovative Konzept U-Shift werden neue Geschäftsfelder und Servicemodelle möglich und notwendig, die auf globale Informationen setzen. Neben multimodalem Routenmanagement eröffnen Services wie Ticketing und Energiemanagement neue Anwendungs- und Forschungsfragen, die maßgeblich zur Akzeptanz eines derartigen Systems durch den Benutzer beitragen und diese bedingen. Auch Bezahlmodelle und Betreibermodelle spielen dabei eine Rolle, da durch die Mehrfachnutzung von U-Shift-Driveboards für Personenverkehr, als auch Güterverkehr neue Fragen eröffnet werden.

Die zugrunde liegende Software- und Servicearchitektur muss hierbei unterstützen und den passenden Rahmen bieten. Im Kontext Industrie 4.0 und Luftfahrt stehen derzeit ähnliche Architekturen zur Diskussion, weshalb im Folgenden kurz deren Ideen erläutert werden.

4.2.5.1 Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI-4.0)

Abseits der Automotive Domäne finden sich Bestrebungen ein einheitliches Rahmenwerk für die Automatisierung der jeweiligen Domäne zu schaffen, so z.B. im Kontext Industrie 4.0.

Als Referenzrahmenwerk im Kontext Industrie 4.0 wurde ein Architekturmodell entworfen (RAMI 4.0)⁵⁵, das mehrere Abstraktionsebenen der Industrieautomatisierung vereint. So werden Geschäftsfelder, Kommunikation, aber auch Wartung und Verwaltung von Produktionsketten in einem holistischen Gesamtmodell abgebildet, das sowohl dem gemeinsamen Verständnis der Domäne, als auch deren Entitäten und deren Interaktion dient. Ein dreidimensionales Schichtenmodell definiert unterschiedliche Nutzerperspektiven auf das automatisierte Gesamtsystem und betrachtet neben Maschinen und deren Vernetzung auch Produktionsprozesse und Verwertungsketten. RAMI 4.0 stellt dabei eine Service Orientierte Architektur dar, die unter anderem auf die einfache Kombination und Reorganisation von Produktionsprozessen abzielt. Die Frage der Vernetzung und Interoperabilität von Systemen spielt in der Domäne Industrie 4.0 ebenso eine Rolle wie deren Orchestrierung durch z.B. Service-Orientierte Architekturen⁵⁶.

Für das vernetzte automatisierte Fahren und das Konzept U-Shift stellt die RAMI Architektur ein Beispiel einer Domänenontologie und Gesamtarchitektur dar, die das Zusammenspiel und die Interaktion einzelner Teilkomponenten definiert. Langfristig ist eine derartige Architektur von Nutzen, um die Interoperabilität mehrerer Systeme und Hersteller zu unterstützen. Konkrete Fragestellungen wie z.B. welche Kommunikationsprotokolle innerhalb RAMI zum Einsatz kommen, und welche Anforderungen an Services bezüglich ihrer Qualität (Quality-of-Service) gestellt werden, werden im vernetzten automatisierten Fahren sicherlich domänenspezifisch zu lösen sein.

4.2.5.2 New Network Management System Architecture

In der Luftfahrt Domäne lassen sich die auftretenden Herausforderungen im Managen und Betreiben sicherheitskritischer verteilter Systeme besonders gut beobachten und deren Lösungen diskutieren. So besteht in der Luftfahrt Domäne eine der größten Herausforderungen vor allem im Hemmen von Innovation durch Altsysteme, die einen langen Lebenszyklus haben und deren Konzeption keine fortlaufende Anpassung vorsieht, da diese starken regulatorischen Maßnahmen unterliegen. Dies zeigt sich zum

⁵⁵https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/rami40-einfuehrung-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=7, besucht am 23.03.2020

⁵⁶https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Themen/Industrie_4.0/Das_Referenzarchitekturmodell_RAMI_4.0_und_die_Industrie_4.0-Komponente/pdf/Industrie_4.0_Komponente_Download.pdf, besucht am 26.03.2020

Beispiel in der Definition der „New NM System Architecture“⁵⁷, in der eine gesamtheitlich serviceorientierte Architektur und moderne Entwicklungsprinzipien wie modellbasierte Entwicklung die Einführungszeiten von neuen Komponenten durch Modularisierung und eine serviceorientierte Sichtweise verkürzen sollen. Hierbei werden verschiedene Anwendungsfälle in der Architektur abgebildet, von der Flugplanung, über Monitoring von Flügen, bis hin zu zur Cyber-Security-Überwachung des Gesamtsystems. Deren Orchestrierung findet über modulare Services statt, die durch ihre lose Kopplung einfacher austauschbar sind, als bisherige Komponenten.

Die Übertragbarkeit aus der Luftfahrt domäne hin zum vernetzten automatisierten Fahren ist durch die Adaption einzelner eingesetzter Paradigmen gegeben. So bieten serviceorientierte Architekturen wie die „New Networkmanagement System Architecture“ einen Mehrwert, was Verteilung, Modularisierung und Austauschbarkeit einzelner Services angeht und unterstützen damit fortlaufende Innovationsfähigkeit der Gesamtsystemarchitektur. Die konkrete Umsetzung ist aber auch hier von der Verkehrsdomäne und der Infrastrukturdomäne abhängig, da diese langfristig interagieren müssen und eigene Anforderungen und Geschäftsprozesse haben bzw. entwickeln müssen.

4.3 Intelligenzverteilung zwischen Infrastruktur und Fahrzeug

Im Folgenden werden drei verschiedene Ausprägungen von der Verteilung der Intelligenz in Infrastruktur und Fahrzeug betrachtet. In der „AD“-Ausprägung ist die gesamte Sensorik im U-Shift-Fahrzeug verbaut und es werden keine Informationen aus der Infrastruktur für die Fahrfunktionen verarbeitet. Lediglich High Level Services wie das Flottenmanagement finden innerhalb der Infrastruktur statt. Die Ausprägung „MAD“ ist ganzheitlich orthogonal zur Ausprägung „AD“. Die Sensorik und Verarbeitungsknoten und damit die Intelligenz werden hierbei in die Infrastruktur verlagert. Das U-Shift-Fahrzeug ist dabei nicht in der Lage ohne Infrastrukturunterstützung automatisiert zu fahren, lediglich Sicherheitsfunktionen wie Anhalten im Fehlerfall sind vom Fahrzeug zu erbringen. In der dritten Ausprägung „PMAD“ besitzt das U-Shift-Fahrzeug genug Sensorik, um ohne Infrastrukturunterstützung zu fahren. Die Sensorik der Infrastruktur kann das Fahrzeug an kritischen und herausfordernden Szenarien (Kreuzungen, Kreisverkehr, etc.) mit weiteren Informationen unterstützen und die Pfad- und Manöverplanung kann ebenfalls in der Infrastruktur stattfinden, um als Absicherung der fahrzeugeigenen Sensorik zu dienen.

Die Verteilung der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Funktionen auf Infrastruktur und Fahrzeug für die verschiedenen Ausprägungen ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 2: Verteilung von Funktionen auf Fahrzeug und Infrastruktur

Typ	Funktionen im Fahrzeug	Funktionen in der Infrastruktur
AD	<ul style="list-style-type: none"> • Drive-by-Wire-Aktuatoren • Lokalisierungssystem und hochgenaues Kartenmaterial • Perzeptionssensorik • Pfadplanungskomponenten • Manöverplanungskomponente • Kommunikationseinheit (OBU) • Trajektorienregelung 	<ul style="list-style-type: none"> • Flottenverwaltungssystem • Teleoperatorsystem • Kommunikationseinheit (RSU)

⁵⁷ EUROCONTROL: „NEW NM SYSTEM ARCHITECTURE“, Executive Summary, 2019, url: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-05/nm-future-architecture-executive-summary-update.pdf>, besucht am 26.03.2020

PMAD	<ul style="list-style-type: none"> • Drive-by-Wire-Aktuatoren • Lokalisierungssystem und hochgenaues Kartenmaterial • Perzeptionssensorik • Pfadplanungskomponenten • Manöverplanungskomponente • Kommunikationseinheit (OBU) • Trajektorienregelung 	<ul style="list-style-type: none"> • Lokalisierungssystem und hochgenaues Kartenmaterial • Perzeptionssensorik (RCU) • Pfadplanungskomponenten • Manöverplanungskomponente • Flottenverwaltungssystem • Teleoperatorsystem • Kommunikationseinheit (RSU)
MAD	<ul style="list-style-type: none"> • Drive-by-Wire-Aktuatoren • Kommunikationseinheit (OBU) • Lokalisierungssystem und hochgenaues Kartenmaterial (inkl. Odometriesensorik) • Trajektorienregelung 	<ul style="list-style-type: none"> • Lokalisierungssystem und hochgenaues Kartenmaterial • Perzeptionssensorik (RCU) • Pfadplanungskomponenten • Manöverplanungskomponente • Flottenverwaltungssystem • Teleoperatorsystem • Kommunikationseinheit (RSU)

4.3.1 „AD“-Ausprägung

Die „AD“-Ausprägung stellt automatisiertes Fahren ohne Infrastrukturunterstützung dar. Dabei ist die komplette verwendete Sensorik im U-Shift-Fahrzeug verbaut. Das erhöht die Kosten der U-Shift-Driveboards und bei dieser Ausprägung haben die Driveboards auch den höchsten Energiebedarf.

Da das Fahrzeug keine Informationen aus der Infrastruktur erhält, ist es auch nicht auf eine funktionierende Kommunikation zur Infrastruktur angewiesen und kann auch in Gebieten fahren, in denen die Infrastruktur nicht ausgebaut ist. Beim Ausfall eines Sensors im Fahrzeug kann nicht auf redundante Sensorik in der Infrastruktur zurückgegriffen werden und das Fahrzeug muss selbst redundante Sensoren besitzen, um den Sensorausfall zu mitigieren.

Die Umgebungswahrnehmung der „AD“-Ausprägung ist im Vergleich zu den anderen beiden Ausprägungen deutlich eingeschränkt und hat bei bestimmten Szenarien große Nachteile oder kann das Szenario gar nicht lösen. In der Funktion „Umfahren von Parkenden Fahrzeugen“ (siehe Tabelle 1) wird ein solches Szenario beschrieben, das mit der „AD“-Ausprägung und mit automatisierten Fahrzeugen im Allgemeinen nur schwer zuverlässig, effizient und sicher zugleich gelöst werden kann.

Wie im Szenario zu sehen ist, befindet sich eine Kurve nach der Stelle, an der die parkenden Fahrzeuge umfahren werden müssen. Zusätzlich wird die Sicht in der Kurve durch Bäume und einen Zaun weiter eingeschränkt. Ein zuverlässiges Erkennen des Gegenverkehrs und somit das sichere Umfahren der Fahrzeuge ist mit Onboard-Sensorik nicht gewährleistet. Wenn das U-Shift-Fahrzeug an ein auf der Straße stehendes Fahrzeug heranfährt, kann durch die Sensorik, die sich im Fahrzeug befindet, nicht der Grund erkannt werden, warum das Fahrzeug auf der Straße steht. Ohne die Unterscheidung, ob das Fahrzeug auf der Straße parkt oder selbst darauf wartet, bis es aufgrund des Verkehrsflusses weiterfahren kann, ist es nicht möglich zu entscheiden, ob das U-Shift-Fahrzeug hinter dem anderen Fahrzeug warten oder es umfahren muss.

Erfolgt der Halt durch eine Lichtsignalanlage, kann diese zum Beispiel kommunizieren, dass das Fahrzeug nicht überholen darf. Auch das Fehlen von frühzeitiger Erkennung von verdeckten Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern kann die Ausprägung „AD“ ineffizient und unsicher machen, da das Fahrzeug in derartigen Szenarien durch fehlende Umgebungsinformation unverhältnismäßig langsam fahren müsste oder stehen bleiben muss.

4.3.2 „MAD“-Ausprägung

Eine Verteilung der Funktionen bzw. der Sensorik, bei der das U-Shift-Fahrzeug selbst möglichst wenig Sensorik besitzt und der Großteil der Sensoren sich in der Infrastruktur befinden, hat den Vorteil, dass die U-Shift-Driveboards günstiger werden und weniger Gewicht haben. Auch die fehlenden Rechereinheiten, die für die Automatisierung nötig sind, werden ausgelagert, weshalb ein geringerer Energiebedarf zu erwarten ist. In der „MAD-Ausprägung“ wird eine solche Verteilung angestrebt. Neben den Vorteilen für den Aufbau des Fahrzeugs bietet diese Ausprägung auch Vorteile für die Fahrfunktionalität. Da die Objekterkennung bzw. Umgebungswahrnehmung in der Infrastruktur stattfinden, ist es möglich einen größeren Bereich der Umgebung zu erkennen, als es bei der „AD“-Ausprägung möglich ist und die Umgebungswahrnehmung wird auch nicht durch die Verdeckung durch andere Fahrzeuge o.ä. eingeschränkt. Dadurch ist es beispielsweise möglich, die Verkehrslage an einer Kreuzung einschätzen zu können, bevor das U-Shift-Fahrzeug die Kreuzung befahren hat. Besonders bei Kreuzungen mit schlecht einsehbaren Straßenarmen ist das von Vorteil, da durch die Informationen aus der Infrastruktur vermieden werden kann, dass das Fahrzeug langsam in die Kreuzung einfahren muss, um die Straßenarme der Kreuzung einsehen zu können. Auch Hindernisse, die sich auf der Straße befinden, können durch die Infrastruktur erkannt und dem Fahrzeug mitgeteilt werden. Dadurch erhöht sich nicht nur die Sicherheit der U-Shift-Fahrzeuge im Straßenverkehr, es wird auch der Fahrkomfort für Passagiere verbessert, da die Informationen der Infrastruktur vorrausschauendes Fahren ermöglichen.

Auch das bereits beschriebene Szenario, bei dem entschieden werden muss, ob ein Fahrzeug auf der Straße parkt oder aufgrund des Verkehrsflusses wartet, kann mit der „MAD“-Ausprägung bewältigt werden. Durch die Umgebungswahrnehmung über die Infrastruktur kann z.B. erkannt werden wie lange ein Fahrzeug bereits an dieser Stelle steht, ob vor dem stehenden Fahrzeug weitere Fahrzeuge auf der Straße stehen oder ob sich eine rote Ampel vor dem stehenden Fahrzeug befindet und dadurch entschieden werden kann, ob das Fahrzeug umfahren werden muss. Ebenso kann der Gegenverkehr zuverlässig erkannt und somit ein sicheres Umfahren der parkenden Fahrzeuge ermöglicht werden.

Für die Fahrfunktionalität bietet dieses Setup jedoch einige Herausforderungen. Bei einem Ausfall der Kommunikation mit der Infrastruktur erhält das Fahrzeug keine neuen Informationen über sein Umfeld und muss daher schnell in einen sicheren Zustand, d.h. zum Stillstand gebracht werden. Auch kurze Unterbrechungen der Verbindung sind problematisch, da das Fahrzeug in der Zeit der Unterbrechung „blind“ fahren würde und ggf. durch Ausführen eines Sicherheitsmanövers zum Stillstand kommen müsste. Dadurch könnten die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der U-Shift-Fahrzeuge stark beeinträchtigt werden.

Auch bei einer funktionierenden und stabilen Kommunikation zwischen Infrastruktur und Fahrzeug könnte die Latenzzeit von der Aufnahme der Sensordaten, Senden und Verarbeiten der Daten in einer Recheneinheit, Zurücksenden der verarbeiteten Daten zur Infrastruktur und dann die Weitergabe der Daten von der Infrastruktur zum Fahrzeug ein Problem sein und muss genauer untersucht werden.

Da die Ausprägung „MAD“ der Automatisierung potentielle Kostenvorteile liefert, gilt es zu untersuchen welche Teilkomponenten der automatisierten Fahrfunktion sich in die Infrastruktur verlagern lassen und welche Auswirkungen und Anforderung dies an ein derartiges System stellt.

4.3.3 „PMAD“-Ausprägung

Die „Partially Managed Automated Driving“-Ausprägung („PMAD“) ist eine Mischung aus „MAD“ und „AD“. Dabei besitzt das Fahrzeug die gleiche Sensorausstattung wie in der „AD“-Ausprägung und kann zusätzlich die Sensorik und Informationen der Infrastruktur nutzen. Bei dieser Ausprägung ist das

Fahrzeug in der Lage, ohne die Unterstützung der Infrastruktur automatisiert zu fahren und somit ist die Fahrfunktionalität auch bei Kommunikationsabbrüchen mit der Infrastruktur noch gegeben. Auch in Gebieten, in denen die Infrastruktur nicht ausgebaut ist, kann gefahren werden. In Gebieten, in denen eine ausgebaute Infrastruktur vorhanden ist, können benötigte Fahrfunktionen wie z.B. Manöver- und Pfadplanung in die Infrastruktur ausgelagert werden. Wie eine sinnvolle Verteilung der Funktionalität auf Fahrzeug und Infrastruktur aussieht, ist noch nicht bekannt und muss in U-Shift-Control getestet werden.

Die Vorteile der „MAD“-Ausprägung in Bezug auf die Fahrfunktionalität sind in der „PMAD“-Ausprägung ebenfalls vorhanden. Durch die Sensorik in der Infrastruktur verbessert sich also die Umgebungswahrnehmung, wodurch sich auch die Sicherheit und der Fahrkomfort verbessern. Weiterhin ist durch die Sensorik, die sich sowohl im Fahrzeug als auch in der Infrastruktur befindet, Redundanz geboten. Dadurch können zum einen die Objekterkennung aus der Infrastruktur und dem Fahrzeug abgeglichen und verbessert werden und zum anderen erhöht sich durch die Redundanz die Ausfallsicherheit.

Im Vergleich zur „MAD“-Ausprägung ist ein Verbindungsabbruch zwischen Fahrzeug und Infrastruktur weniger gravierend und führt nicht notwendigerweise zu einem Ausfall der Fahrfunktionalität.

4.4 Sensorsetup Infrastruktur und Fahrzeug

In diesem Abschnitt wird grobgranular auf die Sensorausstattung des U-Shift-Fahrzeugs und der Sensorposten der Infrastruktur eingegangen. Hierbei werden Sensoren bzw. Komponenten erörtert, die sich für die Automatisierung eignen und notwendig sind.

4.4.1 Ausstattung der Sensorposten

Die Ausstattung der Sensorposten (SP) kann in zwei Kategorien unterteilt werden, die Roadside-Unit (RSU) und die Road-Capturing-Unit (RCU) (siehe Abbildung 11). Die Roadside-Unit ist die Schnittstelle der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur. Die Road-Capturing-Unit besteht aus verschiedenen Sensoren (Kamera, LiDAR, Radar), die für die Objekterkennung verwendet werden. An jedem Sensorposten befindet sich eine RCU. Eine RSU muss sich nicht an jedem Sensorposten befinden, da die Reichweite der Datenübertragung größer ist als die Sichtweite der Sensorik. Die Sensorposten sind über Glasfaser an das Backend bzw. an einen MEC-Server angeschlossen.

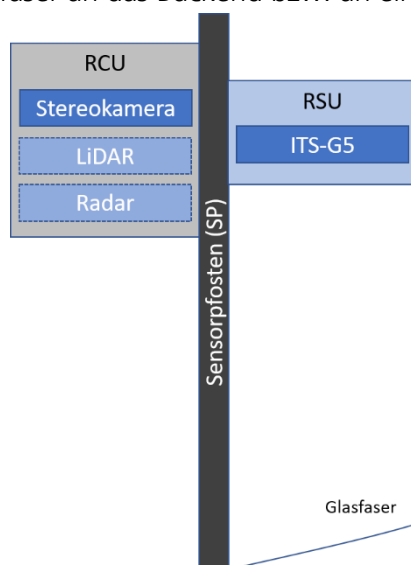


Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Sensorpostens

Bei der Ausstattung der RCUs werden zwei verschiedene Ausprägungen betrachtet: eine Minimalausstattung, als Road-Capturing-Unit A deklariert, und eine Maximalausstattung, als Road-Capturing-Unit B deklariert. In Tabelle 3 ist die Sensorausstattung der beiden RCUs zu sehen. Die Ausprägungen der RCUs sind unabhängig von den verschiedenen Ausprägungen der Verteilung der Fahrfunktionen („MAD“, „AD“ und „PMAD“). D.h. zu der „MAD“-Ausprägung gehört nicht automatisch die Maximalausstattung von Road-Capturing-Unit B.

Für eine Schätzung der zu erwartenden Sichtweite dienen bereits erprobte Sensorpfosten des Testfelds Niedersachsen und des Testfelds Autonomes Fahren Baden-Württemberg (TAF) als Referenz. Die Sensorpfosten des Testfelds Niedersachsen, die an einer Autobahn angebracht sind, haben eine Sichtweite von ca. 125m⁵⁸. Die Sensorpfosten des TAF, die für die Überwachung von Kreuzungen verwendet werden, haben eine Sichtweite von ca.40-60m⁵⁹ pro Sensor.

Für U-Shift-Control sind unterschiedliche Ausstattungen der RCUs für unterschiedliche Streckenabschnitte wie z.B. 30er-Zone, Landstraße oder Kreuzungen denkbar.

Tabelle 3: Ausstattung der Road-Capturing-Unit in zwei verschiedenen Ausprägungen.

Road-Capturing-Unit A (Minimalausstattung)	Road-Capturing-Unit B (Maximalausstattung)
<ul style="list-style-type: none"> • 2x Stereokameras (Tiefenbildkameras) 	<ul style="list-style-type: none"> • 2x Stereokameras (Tiefenbildkameras) • 2x LiDAR Sensoren • 4x RADAR Sensoren

4.4.2 Sensorausstattung des U-Shift-Fahrzeugs

Die Sensorausstattung der U-Shift-Fahrzeuge ist von der jeweiligen Ausprägung abhängig. In Tabelle 4 sind die Sensorausstattungen der verschiedenen Ausprägungen zu sehen.

Tabelle 4: Sensorausstattung U-Shift-Fahrzeug - Ausprägungen „AD“, „PMAD“ und „MAD“.

AD	PMAD	MAD
<ul style="list-style-type: none"> • Kommunikationseinheit (OBU) • DGPS + Inertiale Messeinheit (IMU) • Odometrie- und Lenkwinkelsensoren • 3 Kameras • 4 Lidare • 6 Radare 	<ul style="list-style-type: none"> • Kommunikationseinheit (OBU) • DGPS + Inertiale Messeinheit (IMU) • Odometrie- und Lenkwinkelsensoren • 3 Kameras • 4 Lidare • 6 Radare 	<ul style="list-style-type: none"> • Kommunikationseinheit (OBU) • GPS • Odometrie- und Lenkwinkelsensoren

4.5 Technische Herausforderungen

In diesem Abschnitt werden technische Herausforderungen diskutiert, die im Konzept U-Shift in der Automatisierung relevant sind.

4.5.1 Sensorpositionierung

⁵⁸ <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/testfeld-niedersachsen-fuer-automatisierte-und-vernetzte-mobilitaet/erfassungstechnik>
⁵⁹ Abschätzung aus einer TAF-Kreuzung

Eine geringe Bauhöhe der Driveboards bringt Vorteile und eine größere Skalierungsmöglichkeit, da zu transportierende Kapseln billiger gestaltet werden, was auch die Wartung und Robustheit jener vereinfacht. Die geringe Höhe des Driveboards zieht allerdings schlechte Blickwinkel für Sensoren und daraus resultierende Herausforderungen in der Objekterkennung, sowie der relativen Lokalisierung (SLAM, ...)

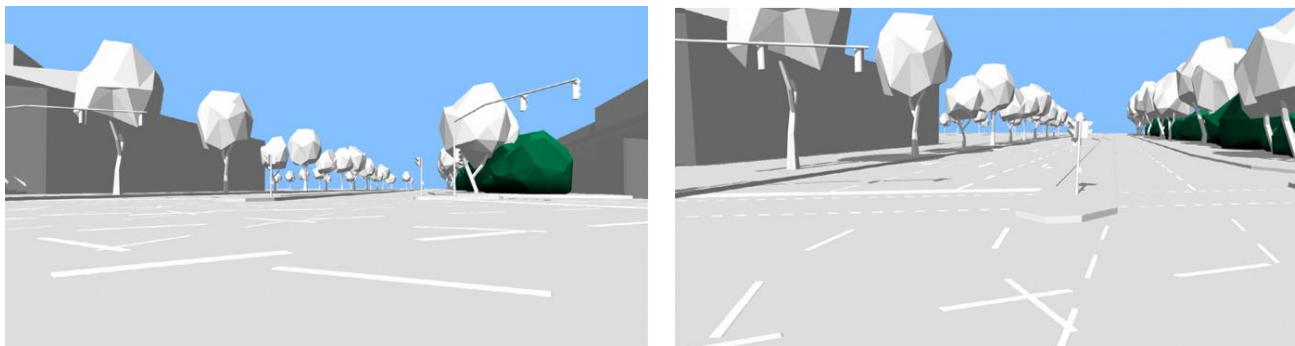


Abbildung 12: Blickwinkel einer Kamera mit unterschiedlicher Einbauhöhe. Links: höchste Stelle des U-Shift-Driveboards (ca. 90 cm), rechts: höchste Stelle an einer aufgenommenen Kapsel (ca. 2m)

mit sich. Abbildung 12 verdeutlicht diese Herausforderung durch Simulation einer Kamera, die im linken Bild am Driveboard, im rechten Bild an der Kapsel (ca. 2m Höhe) angebracht ist. Durch die höhere Einbauhöhe der Kamera ist es möglich Fahrbahnmarkierungen und Objekte in weiterer Entfernung besser und zuverlässiger zu erkennen. Dieses Problem besteht ebenfalls bei anderen Hochautomatisierungskonzepten, wenn eine fundamentale Änderung des Fahrzeugdesigns, z.B. durch Anbringung von Sensoraufbauten auf dem Dach des Fahrzeugs, vermieden werden soll.

Das Anbringen von Sensorik am Heck des Driveboards stellt ebenfalls eine Herausforderung dar. Diese Sensoren sind nötig, um andere Verkehrsteilnehmer zu erkennen, werden aber bei Fahrten mit Kapsel von dieser verdeckt. Eine mögliche Lösung hierfür ist die Anbringung von günstiger Sensorik an den Kapseln, z.B. Kameras oder Radare, die in diesem Fall z.B. überholende Fahrzeuge detektieren und die Fahrfunktionalität gewährleisten. Das Rangieren des U-Shift-Fahrzeugs an Hubs kann durch Infrastruktursensorik (Road-Capturing-Units und Roadside-Units) unterstützt werden, sodass in diesem speziellen Szenario potentiell keine oder nur am U-Shift-Driveboard angebrachte Sensorik zur Verfügung stehen muss. Die technische Umsetzung einer derartigen Steuerung des Fahrzeugs stellt eine zu untersuchende Forschungsfrage dar.

4.5.2 Erkennung und Identifizierung der U-Shift-Fahrzeuge

Damit die infrastrukturbasierte Automatisierung, aber auch Services wie Flottenmanagement und die Pfad- sowie Manöverplanung ermöglicht werden, muss die Infrastruktur U-Shift-Fahrzeuge hochgenau lokalisieren und deren Identität bestimmen können. Als Alternative kann dies auch fahrzeugseitig passieren, wobei derzeit unklar ist, welcher Ansatz zielführender ist. Da die Kommunikation (zum Beispiel in ITS-G5) broadcastbasiert ist, muss in den zum Fahrzeug kommunizierten Nachrichten eine Kodierung der Identität der Fahrzeuge vorgenommen werden, damit diese ihre eigene Position in den Nachrichten verorten können.

Eine mögliche Lösung für das Identifizieren der U-Shift-Fahrzeuge ist das Anbringen von Markern an den Fahrzeugen, die von der Infrastruktursensorik erkennbar sind (z.B. QR Code, Kennzeichen, LiDAR-Landmarken mit Muster, etc.), sodass die Zuordnung von Lokalisierungsdaten zu eindeutigem Merkmal gegeben ist.

Eine zweite Identifizierungsmöglichkeit ist ein Abgleich von Positionsdaten, die vom U-Shift-Fahrzeug selbst an die Infrastruktur übermittelt werden, mit den Fahrzeugpositionen, die durch die Objekterkennung der Infrastruktur erzeugt wurden. Hierzu wird jedoch ein GPS-Empfänger im U-Shift-Fahrzeug benötigt und die Zuverlässigkeit der Zuordnung ist von der Genauigkeit der GPS-Lokalisierung abhängig. Aktuell preiswerte Empfänger haben eine Genauigkeit von mehreren Metern und die Präzision der Lokalisierung ist stark umgebungsabhängig. Fahren zwei oder mehrere U-Shift-Fahrzeuge nebeneinander, ist eine korrekte Identifizierung der Fahrzeuge in der Infrastruktur somit, je nach Szenario, nur erschwert möglich. Eine Steigerung der Präzision kann zwar durch Differential GPS erreicht werden, Schutz vor Lokalisierungsfehlern und dadurch bedingten Assoziationsfehlern mit Infrastrukturdaten durch z.B. Hochhäuser im urbanen Bereich, ist dadurch aber nicht notwendigerweise gegeben.

4.5.3 Kommunikation

Wie bereits in Abschnitt 4.3.2 diskutiert, ist für die „MAD“-Ausprägung die Kommunikation mit der Infrastruktur von zentraler Bedeutung. Eine Unterbrechung bzw. ein kompletter Abbruch der Kommunikation führt dazu, dass die Fahrfunktionalität zum Erliegen kommt und das U-Shift-Fahrzeug schnellstmöglich in einen sicheren Zustand überführt werden muss. Da das Fahrzeug in der „MAD“-Ausprägung selbst keine Sensoren für die Umgebungswahrnehmung besitzt, wird das Überführen in einen sicheren Zustand durch sofortiges Anhalten umgesetzt. Die Stabilität der Verbindung zwischen Fahrzeug und Infrastruktur ist, aufgrund der kabellosen Kommunikation, von äußeren Einflüssen abhängig. Angriffe oder Störfälle können die Kommunikation gänzlich zum Erliegen bringen und somit die U-Shift-Fahrzeuge fahruntfähig machen. Dies gilt im Allgemeinen für funkbasierte Kommunikationsmechanismen. Das Sicherheitskonzept des Fahrzeugs muss deshalb vorsehen, dass in einem solchen Fall ein sicherer Zustand erreicht wird, indem das Fahrzeug hält.

Neben der Stabilität der Verbindung müssen auch die Latenzzeiten berücksichtigt und ggf. durch Verhaltensanpassung oder Prädiktion kompensiert werden. Die Zeit, die benötigt wird um die Daten der Sensoren zu verarbeiten, tritt sowohl bei einer Datenverarbeitung im Fahrzeug als auch bei der Datenverarbeitung in der Infrastruktur auf. Bei der Datenverarbeitung innerhalb der Infrastruktur kommt zu dieser Zeit noch die Zeit dazu, die benötigt wird um die Sensordaten zur Recheneinheit und die ausgewerteten Daten zum Fahrzeug zu übertragen. Ob bzw. welche Auswirkungen die zusätzliche Zeit auf die Fahrfunktionalität hat, muss untersucht werden. Auch eine hochgenaue Zeitsynchronisierung der vernetzten Systeme gilt es zu untersuchen, um die Zusammenführung der verteilten Datenquellen zu ermöglichen.

4.6 Ausblick auf die Vision 2040

Der perspektivische Ausblick auf eine langfristige Realisierung des U-Shift Konzepts beinhaltet eine vollständig vernetzte Architekturlandschaft, in der die Infrastruktur nicht ausschließlich U-Shift Fahrzeugen zur Verfügung steht, sondern als Mehrzwecksystem auch anderen Verkehrsteilnehmern und z.B. Endnutzern durch Access Points zur Verfügung steht. Aus diesem Grund spielt die Interoperabilität der zu entwickelnden Systeme eine immer größer werdende Rolle bei deren Vernetzung. Auch Wartung und Abwärtskompatibilität gewinnen an Gewicht, wobei eine übergeordnete Managementstruktur oder Architektur erforderlich wird. Verschiedene Versionen von Fahrzeugtypen und Kommunikationsmechanismen, die die Infrastruktur nutzen, interagieren mit dem vernetzten System. Abbildung 13 zeigt einen Überblick der Architektur.

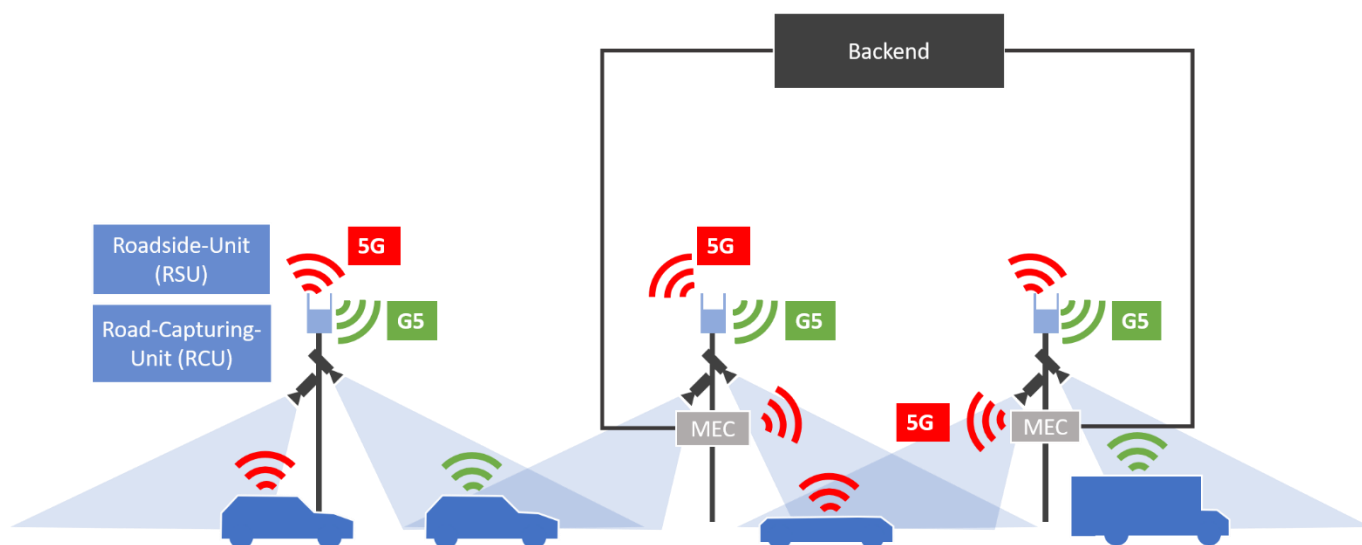


Abbildung 13 Ausblick auf die Architektur für die Vision 2040

Die Vernetzungstopologie ist dabei stark an die Topologie angelehnt, wie sie in Abschnitt 0 für die favorisierte Architektur für U-Shift-Control beschrieben ist und besteht aus hierarchischer Kombination von globalem Backend und Datenhaltung und dezentrale Recheneinheiten (MEC-Server), die echtzeitkritische Information verarbeiten. Durch den Fortschritt der Rechentechnik ist perspektivisch davon auszugehen, dass die Perzeptionstechnik kleiner, effizienter und vor allem kostengünstiger betreibbar wird, sodass die Verarbeitungshardware direkt an den Sensorpfosten angebracht werden kann. Sensorpfosten, an denen sich ein MEC-Server befindet, sind weiterhin über Glasfaser an das globale Backend angeschlossen.

Durch den potentiellen Ausbau des 5G-Netzes wird es möglich, dass die Kommunikation zwischen MEC-Servern über 5G stattfinden kann und auch die lokale Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur hiermit realisiert wird. Falls sich die ITS-G5 Technologie durchsetzt und sich derart von Infrastruktur abhängige Konzepte wie U-Shift damit realisieren lassen, stellt auch dies eine mögliche Umsetzung dar.

5 Machbarkeit Zulassung

5.1 Motivation/ Überblick/ Einleitung

Voraussetzung für die allgemeine Zulassung von Fahrzeugen in Europa ist die EG-Typengenehmigung des jeweiligen Fahrzeugmodells. Hierbei handelt es sich um ein Genehmigungsverfahren, das jedes Modell vor Serieneinführung durchlaufen muss. Die Typengenehmigung wird in Deutschland durch das KBA (Kraftfahrtbundesamt) erteilt. Sie ist die Anerkennung der Vorschriftsmäßigkeit eines Fahrzeuges und dient der Verkehrssicherheit. Bei dem vorliegenden Fahrzeugkonzept U-Shift handelt es sich um einen grundsätzlich neuen Fahrzeugtyp, so dass für die Zulassung des Prototyps zunächst einmal der Weg einer Ausnahme- oder auch Einzelbetriebserlaubnis genauer untersucht wird.

In diesem Kapitel werden zunächst die **rechtlichen Grundlagen** auf nationaler und internationaler Ebene genauer betrachtet. Der **aktuelle Zulassungsprozess** wird daraufhin dargestellt sowie die Aspekte funktionale Sicherheit, Datenschutz und Security. Danach wird die **Rolle der Infrastruktur** betrachtet. Jeweils wird zunächst der aktuelle Stand betrachtet und anschließend Möglichkeiten für das

MAD-Konzept beleuchtet. Die Vorgehensweisen **anderer Verkehrsformen** werden im Anschluss beschrieben.

In einem zweiten Schritt werden Möglichkeiten, Chancen und Risiken für die Zulassung eines automatisiert fahrenden Prototypen geschildert. Abschließend findet die Einschätzung einer perspektivisch möglichen Serienzulassung eines U-Shift statt.

Abschnitte 5.2 bis 5.9 thematisieren die Machbarkeit der Zulassung von Fahrzeugen, die auf dem Automatisierungskonzept MAD basieren bzw. generell die Zulassung von automatisierten Fahrzeugen. Kapitel 5.10 beleuchtet unabhängig von der Automatisierung die Zulassungsfähigkeit des modularen Fahrzeugkonzepts U-Shift.

5.2 Rechtliche Grundlagen

Eine generelle Zulassung für automatisiert fahrende Fahrzeuge ist abhängig von verschiedenen Rechtskreisen wie dem Völkerrecht zum Beispiel durch das Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr, dem Europarecht bis hin zum nationalen Recht:



Abbildung 14: Rechtskreise

In Deutschland können autonom fahrende Fahrzeuge momentan nicht generell zum Straßenverkehr zugelassen werden, da sie die Vorschriften des Straßenverkehrsrechts nicht erfüllen. Im Einzelfall kann solch ein Fahrzeug jedoch durch eine Ausnahmegenehmigung der obersten Landesbehörde betrieben werden. Seit 2017 ist eine beschränkte Zulassung automatisierter Fahrfunktionen möglich. §1a des StVG beschreibt Kriterien für die Zulässigkeit von Fahrzeugen mit hoch- oder vollautomatisierter Fahrfunktion. Technische Einrichtungen müssen jederzeit durch den Fahrzeugführer übersteuert werden können. §1b beschreibt die Rechte und Pflichten von Fahrzeugführern bei der Nutzung hoch- und vollautomatisierter Fahrfunktionen.

Im StVG wird eindeutig ein Fahrzeugführer gefordert, um ein Kraftfahrzeug zu bewegen. Dies wird durch die Erlaubnispflicht im Sinne eines Führerscheins deutlich. Außerdem ist der Fahrer Anknüpfungspunkt für die Haftung. Das Zulassungsrecht ist mit dem Verhaltensrecht verknüpft, Fahrzeuge können nur zugelassen werden, wenn die technischen Voraussetzungen für die Einhaltung des Ordnungsrechts erfüllt sind. Auch die Definition des Fahrzeugführers eines hochautomatisierten Fahrzeuges und seine Pflichten sind im StVG geregelt. Dort ist festgelegt, dass er nach aktueller Rechtslage das Fahrzeug nicht verlassen darf, also selbst anwesend sein muss. (Genauerer zum „Fahrer“ im Recht siehe

Anhang Kapitel C.) Aktuell gibt es Bemühungen auf nationaler Ebene, fahrerloses Fahren im Regelbetrieb einzuleiten. Es liegt ein Gesetzesentwurf vor, der eine Änderung des Straßenverkehrsgesetzes sowie der Straßenverkehrs-Ordnung vorsieht⁶⁰. Es werden sowohl neue Gesetze vorgeschlagen, die die Voraussetzungen und Pflichten für das fahrerlose Fahren regeln, als auch Änderungen für Bestehende empfohlen, die bis jetzt eindeutig einen Fahrer forderten.

Anknüpfend an die bisherigen rechtlichen Vorgaben des Achten Gesetzes zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes zum Gebrauch von Kraftfahrzeugen mit hoch- und vollautomatisierter Fahrfunktion stellt sich die Notwendigkeit dar, über die im öffentlichen Straßenverkehr bereits mögliche Erprobung fahrerloser Fahrzeuge hinaus zu gehen und deren Regelbetrieb einzuleiten. Zunächst sollen fahrerlose Fahrzeuge dafür in festgelegten Betriebsbereichen eingesetzt werden können. Mangels internationaler, harmonisierter Vorschriften bedarf es bei derart weitreichenden technischen Entwicklungen Regelungen des Gesetzgebers zum Betrieb von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion sowie Anforderungen an die Beteiligten und an das Kraftfahrzeug selbst.

Das deutsche Kfz-Zulassungsrecht besteht aus der **Fahrzeugzulassungsverordnung (FZV)** sowie der **Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO)**. Die bedeutsamere FZV setzt europäisches Recht mit Bezug zu UN-Regelungen um. Es wird von einem Fahrer ausgegangen. Z.B. sieht die UN-Regelung Nr. 79 über Lenkanlagen deutlich einen Fahrer vor. Deutschland und die EU halten sich an diese Regelung. Theoretisch ist eine Entledigung der Bindung möglich, jedoch unwahrscheinlich. Realistischer ist es, einen Vorschlag zur Revision im Verwaltungsausschuss einzubringen, um diese Regelung zu ändern.

Das **Wiener Übereinkommen** über den Straßenverkehr von 1968 ist ein völkerrechtlicher Vertrag, der den Straßenverkehr durch Standardisierung sicherer gestalten soll. Auch hier beziehen sich viele Regelungen auf einen Fahrzeugführer. Jedes Fahrzeug muss, wenn es in Bewegung ist, einen Führer haben. Dieser wird als eine Person definiert, die ein Kraftfahrzeug oder ein anderes Fahrzeug lenkt. Mitglieder dieses Abkommens (wie Deutschland) können ein autonomes Fahrzeug nicht generell zulassen, ohne völkerrechtswidrig zu handeln. Fahrassistenzsysteme sind in Art. 8 erlaubt, wenn der Fahrzeugführer sie übersteuern und deaktivieren kann.

Durch Ausnahmegenehmigungen haben in Deutschland die obersten Landesbehörden allerdings die Möglichkeit, Ausnahmen von allen Vorschriften der StVZO (§§ 70 f.), der **Straßenverkehrsordnung (StVO - §46 Abs. 2)** sowie der FZV (§47 Abs. 1) zu genehmigen. So können praktische Erfahrungen mit dem automatisierten Verkehr generiert werden. Um dies nicht von Einzelfallentscheidungen abhängig zu machen, wird von Experten vorgeschlagen ein abstrakt-generelles Ausnahmeregime für den Test autonomer Fahrzeuge auf dem Verordnungsweg zu definieren.⁶¹

Allgemein dürfen gemäß § 3 Abs. 1 FZV Fahrzeuge „auf öffentlichen Straßen nur in Betrieb gesetzt werden, wenn sie zum Verkehr zugelassen sind. Die Zulassung wird auf Antrag erteilt, wenn das Fahrzeug einem genehmigten Typ entspricht oder eine Einzelgenehmigung erteilt ist und eine dem Pflichtversicherungsgesetz entsprechende Kraftfahrzeug-Haftpflichtversicherung besteht.“ Die **Typgenehmigung** ist die Bestätigung der Typgenehmigungsbehörde, dass ein serienmäßig in größerer Stückzahl hergestellter Typ gleichartiger Fahrzeuge oder Fahrzeugteile den Vorschriften entspricht. Auf Basis der Typgenehmigung kann eine allgemeine Betriebserlaubnis nach § 20 StVZO erlangt werden. Alternativ dazu kann ein Antrag auf Erteilung einer **Einzelbetriebserlaubnis** gemäß § 21 Abs. 1 StVZO bei der zuständigen obersten Landesbehörde unter Vorlage eines durch einen amtlich anerkannten Sach-

⁶⁰ BMVi: Entwurf einesGesetzes zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften – Gesetz zum autonomen Fahren in festgelegten Betriebsbereichen. April 2020. Arbeitsversion. Unveröffentlicht.

⁶¹ „Autonomes Fahren“ von Oppermann /Stender-Vorwachs S. 429-438, 2019

verständigen angefertigtes Gutachten eingereicht werden. Gemäß § 70 Abs. 1 Nr. 2 StVZO ist die zuständige oberste Landesbehörde oder die von ihr bestimmte oder nach Landesrecht zuständige Stelle für die Erteilung der Ausnahmegenehmigung zuständig.⁶² In Baden-Württemberg ist die oberste Landesbehörde das Verkehrsministerium.

Für das EU-Recht 2007/46/EG wird ein Kraftfahrzeug erst als solches gesehen, wenn es eine Geschwindigkeit von mehr als 25 km/h aufbringen kann. Wenn ein Fahrzeug im gesamten Betrieb unter 25 km/h bleibt, findet demnach nicht das EU-Recht Anwendung, sondern nur das nationale Recht. Damit fallen einige Regelungen für die Zulassung von Fahrzeugen weg. Dies wird bisher bei als Ausnahme zugelassenen automatisierten Fahrzeugen in Anspruch genommen, weswegen diese auch eine Geschwindigkeit von **25 km/h** nicht überschreiten dürfen.

Der Aspekt der **Haftung** ist bei automatisiertem Fahren momentan ein schwieriger Punkt, der zukünftig Klärungsbedarf aufwirft. Die Zulassungsfähigkeit betrifft dies nur indirekt, dieser Aspekt wird aber hier der Vollständigkeit halber kurz angesprochen. Aktuell gibt es außer der Gefährdungshaftung des Fahrzeughalters (§ 7 StVG) die Haftung des Fahrzeugführers (§ 18 Abs. 1 StVG). Nach dem (am 21.06.2017 in Kraft getretenen) § 1 a Abs. 4 StVG gilt auch als Fahrzeugführer, wer eine automatisierte Fahrfunktion aktiviert und dabei das Kraftfahrzeug nicht eigenhändig steuert. Der Fahrzeugführer kann allerdings in diesem Fall nachweisen, dass ihn kein Verschulden trifft (§ 18 Abs. 1 Satz 2 StVG). „Fahrzeugbegleiter“, welche Eingriffs- und Steuerungsmöglichkeiten besitzen, werden ebenfalls als Fahrzeugführer im Sinne von § 18 Abs. 1 Satz 2 StVG gesehen. In welchem Ausmaß sich der Fahrzeugbegleiter von der Haftung befreien kann, wenn das automatisiert fahrende Fahrzeug einen Schaden verursacht, ist noch nicht im Einzelnen geklärt. Es bedarf eben noch der Auslegung, wann ein Erkennen Müssen vorliegt. Wenn ein Assistenzsystem des automatisiert fahrenden Fahrzeugs den Fahrzeugbegleiter zum Eingreifen auffordert oder er merken müsste, dass das System fehlerhaft arbeitet, muss er eingreifen. Andernfalls kann er nicht von der Haftung befreit werden.⁶³

Welche rechtlichen Grundlagen für das geplante MAD-Konzept relevant sind, wird im Folgenden beleuchtet. Allgemein kann gesagt werden, dass eine neue Technologie zunächst auf dem Markt vorhanden und sicher umgesetzt sein muss, bevor Vorschriften für die Zulassung und das Recht daran angepasst werden können. Je weiter die Technik ist und je weiter auch die jeweiligen Hersteller die Technologie vorantreiben, desto weiter passen sich in der Regel die Gesetze an. Unter anderem müssen haftungsrechtliche Fragestellungen geklärt werden, bevor eine Technik sich auf der Straße durchsetzen kann. Es ist z. B. wichtig, wer bei einem Unfall die Verantwortung übernimmt.⁶⁴

Aus rechtlicher Sicht gibt es aktuell verschiedene Perspektiven. Auf der einen Seite gibt es die Aussage des TÜV Nord, der die Entwicklung bezüglich der Zulassungsmöglichkeiten für automatisiert fahrende Fahrzeuge skeptisch sieht. Diese Aussage begründet der TÜV mit den rechtlichen Rahmenbedingungen, die sich erfahrungsgemäß nur sehr langsam entwickeln. Auf der anderen Seite gibt es Vertreter beim VDV, die die Situation sehr viel positiver sehen. Diese Aussage fußt auf dem Wissen, dass es aktuell auf EU-Ebene viele Aktivitäten zum Thema Zulassungsrahmenbedingungen für automatisiert fahrende Fahrzeuge gibt. Welche Bemühungen es bis jetzt gab und wie die Perspektiven aussehen, wird im Folgenden von Rechtsanwältin Prof. Dr. J. Stender-Vorwachs (Leibniz Universität Hannover) beschrieben. (Genauere Informationen sind im Anhang Kapitel C zu finden.)

⁶² <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/autonomer-bus-bad-birnbach.pdf> - Zugriff: 03.03.2020

⁶³ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/autonomer-bus-bad-birnbach.pdf> - Zugriff: 03.03.2020

⁶⁴ K. Baumeister (TÜV NORD)

Das **Wiener Übereinkommen**, ein völkerrechtlicher Vertrag zu technischen Standards, lässt sich in einem vereinfachten Verfahren ändern. Dabei ist es nicht erforderlich, dass alle Vertragsparteien ein Änderungsabkommen aushandeln. Vielmehr ist ein schriftliches Verfahren möglich, in dem ein Änderungsvorschlag auch nur einer Vertragspartei dann zur wirksamen Vertragsänderung führt, wenn die übrigen Vertragsparteien sich nicht (gegenteilig) äußern.

Um rechtliche Unsicherheiten zur Zulässigkeit von Fahrassistenzsystemen zu beseitigen, wurde eine Ergänzung des Wiener Übereinkommens auch durch Deutschland vorgeschlagen und durch Stillschweigen der anderen Vertragsparteien angenommen. Die im März 2016 in Kraft getretene Ergänzung besagt, dass neben Fahrzeugsystemen, die den Bedingungen der internationalen Rechtsinstrumente entsprechen, auch solche eingebaut werden können, die den Bedingungen nicht entsprechen aber vom Fahrzeugführer übersteuert und abgeschaltet werden können.

Zwei Gruppen von Fahrzeugsystemen sind daher mit der Pflicht zur Beherrschung des Fahrzeugs nach Art. 8 Abs. 5 und Art. 13 Abs. 1 WÜS vereinbar: erstens alle übersteuerbaren Systeme und zweitens alle Systeme, die einer – bestehenden oder neuen – ECE-Regelung entsprechen. Damit wird die künftige Entwicklung des automatisierten Fahrens an den Stand von ECE-Regelungen geknüpft.

ECE-Regelungen beruhen auf dem Fahrzeugteileübereinkommen von 1958. Es sieht vor, dass ein Verwaltungsausschuss aus Mitgliedern aller Vertragsparteien technische Fahrzeugstandards („Regelungen“) unter anderem zugunsten der Sicherheit des Straßenverkehrs beschließt (Art. 1 Abs. 1). Die Vertragsparteien des Abkommens sind verpflichtet, alle für sie geltenden ECE-Regelungen einem nationalen Verfahren der Typgenehmigung zugrunde zu legen (Art. 2). Änderungen von Regelungen im Verwaltungsausschuss bedürfen einer 2/3 – Mehrheit und gelten als angenommen, wenn sie nicht von mehr als 1/3 der Vertragsstaaten abgelehnt werden (Art. 1 Abs. 2). Sie sind also leichter zu erwirken als die Änderung eines völkerrechtlichen Vertrages. In Deutschland können ECE-Regelungen durch eine Verordnung des Bundesverkehrsministeriums in Kraft gesetzt werden. Mit der Ergänzung des Art. 8 Abs. 5 WÜS, der auf ECE-Regelungen verweist, wird die Möglichkeit mannigfaltiger Formen automatisierten Fahrens eröffnet – solange noch ein Fahrzeugführer vorhanden ist. Die Bestimmung steht weiterhin dem rein automatisierten Fahren entgegen.

Man könnte überlegen, ob der Begriff des „Führers“ in Art. 8 Abs. 1 WÜS auch ein Computersystem umfasst. Dieser Auslegung widersprechen aber Art. 1 lit. v WÜS („Person“) sowie die dem Fahrzeugführer im WÜS zugeschriebenen menschlichen Eigenschaften (z.B. physische und geistige Verfassung, Wissen und Fähigkeiten gemäß Art. 8 Abs. 3 und 4). Daher müsste das Wiener Übereinkommen angepasst werden. Zwei Modelle sind dazu meines Wissens diskutiert worden.

1. Die Vertragsstaaten Belgien und Schweden hatten vorgeschlagen, Art. 1 lit. v WÜS dahingehen zu ergänzen, dass neben der fahrenden Person auch das Fahrsystem, das den Fahrvorgang vollständig kontrolliert, als „Fahrer“ anzusehen sei. Damit würden menschlicher und maschineller Fahrer gleichgesetzt und die Verhaltenspflichten auch an die Maschine adressiert. Die Folge wäre, dass automatisierte Systeme Träger von Rechtspflichten würden. Damit würde das rechtliche Konstrukt einer „elektronischen Person“ geschaffen. Fraglich ist allerdings, ob die pauschale Gleichsetzung von menschlichem und maschinellem Fahrer in der vorgeschlagenen Form sinnvoll und praktikabel ist, insbesondere deshalb, weil das Wiener Übereinkommen viele auf den menschlichen Fahrer bezogene Verhaltensanforderungen enthält.

2. In einem weiteren, mir bekannten Vorschlag haben Belgien und Schweden einen förmlichen Änderungsvorschlag eingebracht, der automatisierte Systeme ausdrücklich im Rahmen von Art. 8 WÜS anerkennt. Der Änderungsvorschlag unterscheidet drei unterschiedliche Kategorien an Fahrautonomie. Der

bisherige Art. 8 Abs. 5bis WÜS erfasst lediglich Systeme zur Übernahme „einiger Fahrfunktionen“. Hier ist der Fahrer weiterhin verpflichtet, Nebenbeschäftigungen zu minimieren (Art. 8 Abs. 6 WÜS). Er muss jederzeit auf Anforderung des Fahrsystems in der Lage sein, unverzüglich die Herrschaft über das Fahrzeug zu übernehmen. Neu eingefügt würden Art. 8 Abs. 5ter und Abs. 6quater WÜS. Art. 8 Abs. 5ter WÜS regelt automatisierte Fahrsysteme ohne Beschränkung auf Teilfunktionen und ordnet an, dass der Fahrer zwar ebenfalls jederzeit und unverzüglich die Fahrherrschaft übernehmen können muss, gestattet aber Nebenbeschäftigungen, indem Art. 8 Abs. 6 WÜS nicht gilt. Art. 8 Abs. 5quater schließlich ermöglicht automatisierte Fahrsysteme, indem er darüber hinaus auch von der allgemeinen Notwendigkeit eines Fahrers und von gewissen Anforderungen für den menschlichen Fahrer befreit.⁶⁵

Hinsichtlich der Fragestellung in welchem Zeitfenster mit einer möglichen Öffnung der Rechtslage im europäischen Kontext zum automatisierten Fahren zu rechnen ist, gibt es folgende Aussage von Frau Prof. Dr. Jutta Stender-Vorwachs. Die **Regelung Nr. 79** der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Lenkanlage - erfasst automatisierte Lenkanlagen ausdrücklich nicht.

An einer Weiterentwicklung von ECE-Regelungen beteiligt sich die EU als Vertragspartei des Fahrzeugteileübereinkommens, wobei die Position der EU auf Vorschlag der Kommission durch den Rat festgelegt wird.

Die „UNECE Working Party on Regulatory Cooperation and Standardization Policies (WP.6)“ dient als Plattform für Regierungen und andere Verwaltungsebenen zur Weiterentwicklung von Standardisierungen. Die Working Party gibt Empfehlungen heraus. Auf sie greift auch die Europäische Union zurück.

Im Februar 2018 hat das „Inland Transport Committee (ITC)“ der UNECE das „World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, WP.29“ gebeten, eine „Working Party on Automated/Autonomous and Connected Vehicles (GRVA)“ einzurichten.

Diese hat bereits mehrfach getagt. Auf der Agenda für das 5. Treffen vom 10. bis zum 14. Februar 2020 stand zum Thema automatisierte Fahrzeuge, dass die GRVA „einen Vorschlag für eine neue UN-Regelung über einheitliche Vorschriften betreffend die Zulassung von Fahrzeugen im Hinblick auf Spurhalteassistenzsysteme [erwägt...].GRVA wird darüber hinaus einen Vorschlag der Informal Working Group zu Tests von Spurhalteassistenzsystemen überprüfen.“ Eine Dokumentation wird angekündigt. Auch die Agenda des 6. Treffens am 3., 4. März 2020 enthält die Überprüfung des genannten Vorschlags der Informal Working Group.⁶⁶

Wenn schon der GRVA ein Vorschlag für eine neue ECE-Regelung vorliegt und sie diesen prüft, dürfte bald der Verwaltungsausschuss mit der Materie befasst werden. Wie lange dann der Entscheidungsprozess dauert, muss allerdings abgewartet werden.⁶⁷

Die nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) auf Bundesebene beschreibt in einem White Paper Handlungsempfehlungen zur Typp Genehmigung und Zertifizierung für eine vernetzte und automatisierte Mobilität. Demnach sollten in Bezug auf die Zertifizierung der Infrastruktur aktuelle regulatorische Anforderungen für Kommunikationsinfrastruktur angepasst werden und eine periodische Überwachung stattfinden. Da beim automatisierten und vernetzten Fahren höhere Anforderungen an die Straßeninfrastruktur gestellt werden aufgrund der maschinellen Detektion, sind auch hier neue Prozesse notwendig sowie die Erstellung und Instandhaltung eines digitalen Zwillings der Infrastruktur.

⁶⁵ Prof. Dr. iur. habil. J. Stender-Vorwachs (Leibniz Universität Hannover)

⁶⁶ www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grva/agendas.htm - Zugriff: 26.03.2020

⁶⁷ Prof. Dr. iur. habil. J. Stender-Vorwachs (Leibniz Universität Hannover)

Nachdem die UN-Regelung 79 (Lenkanlagen) für assistiertes Spurhalten und Spurwechseln erweitert worden ist, wurde eine eigene Regulierung für Automated Lane Keeping Systems (ALKS) in 2020 eingeführt. Hier gelten die Einschränkungen, dass nur die Fahrt auf Autobahnen bis zu einer maximalen Geschwindigkeit von 60 km/h sowie die Spurführung (und nicht der Spurwechsel) bei Pkw zulässig sind. Es gibt bereits die UNECE Arbeitsgruppe „Functional Requirements for Automated Vehicles“, die diese Beschränkungen auflösen und generische Anforderungen für die Zulassung automatisierter Fahrzeuge schaffen möchte. Eine andere Arbeitsgruppe „Validation Methods for Automated Driving“ verfolgt das Ziel, einheitliche Methoden zu entwickeln um die Erfüllung der Anforderungen an automatisierte Fahrzeuge nachzuweisen. Nach aktuellem Diskussionsstand werden sowohl ein Audit als auch ein Simulationsteil, physische Tests und eine Beurteilungsfahrt auf öffentlichen Straßen gefordert werden.⁶⁸

Für die Zulassung von automatisierten Fahrzeugen lassen sich nachfolgende Aussagen aus dem Straßenverkehrsgesetz ableiten. Eine detaillierte Begründung dieser Bestimmungen ist in Anhang Kapitel C zu finden.

- 1) Für Einzelgenehmigungen können von den Mitgliedstaaten Ausnahmen von internationalen Regelungen zugelassen werden, wenn sie „alternative Anforderungen“ festlegen.
- 2) Der Hersteller kann Typpgenehmigungen für Fahrzeuge, Systeme, Bauteile und selbstständige technische Einheiten zur Verwirklichung neuer Techniken und Konzepte beantragen, auch wenn sie gegen internationale Regelungen verstoßen. Die Genehmigungen können nur mit Autorisierung der Kommission erteilt werden.
- 3) Die Kommission muss in diesem Fall tätig werden und auf die Änderung der entsprechenden internationalen Regelung hinwirken.
- 4) Für Kleinserienfahrzeuge wird von den Mitgliedstaaten eine Typpenehmigung nur erteilt, wenn die internationalen Regelungsanforderungen erfüllt sind. Es steht jedoch im Ermessen der Kommission, die technischen Anforderungen durch sog. delegierten Rechtsakt zu ändern. Ein solcher tritt in Kraft, wenn weder das Europäische Parlament noch der Rat innerhalb von zwei Monaten Einwände erheben.⁶⁹

5.3 Aktuelle Zulassungsprozesse und -verfahren

Die Zulassung ist abhängig vom Grad der Automatisierung, welcher in SAE Level (Society of Automotive Engineers) klassifiziert wird. Für Level 5 (Automatisiertes Fahren unter allen Konditionen), welches keinen Fahrer bzw. Sicherheitsbegleiter oder ähnliches beinhaltet, gibt es aktuell keine Zulassungsverfahren. Auch Level 3 und 4 werden in Deutschland aktuell nicht zugelassen, da vom Sicherheitsfahrer gefordert wird, jederzeit eingreifen zu können. Level 2 kann wie in den später folgenden Beispielen mit einer Einzelbetriebserlaubnis zugelassen werden.

Die Zulassung von automatisierten Fahrzeugen, meistens Shuttle bzw. Peoplemover, durch eine Ausnahmebegutachtung wird anhand folgender Vorgehensweise durchgeführt. Zunächst wird das Fahrzeug ohne die automatisierte Fahrfunktion begutachtet. Die in autonomen Erprobungsfahrzeugen übliche Steer-by-wire und Brake-by-wire Funktionalität, durch die der Sicherheitsbegleiter das Fahrzeug bei ausgeschalteter Automation steuern kann, wird begutachtet und geprüft. Nachdem für dieses manuelle

⁶⁸ Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, „Handlungsempfehlungen zur Typpenehmigung und Zertifizierung für eine automatisierte und vernetzte Mobilität“- 05.2020

⁶⁹ Prof. Dr. iur. habil. J. Stender-Vorwachs (Leibniz Universität Hannover)

Fahren eine Ausnahmegenehmigung erteilt wurde, können Einmess-Fahrten sowie eine Fahrerschulung auf der angestrebten Strecke durchgeführt werden. Die Genehmigung erfolgt nur für die im Vorhinein speziell festgelegte und für diesen Anwendungsfall präparierte Strecke. Hier ist in der Regel ein zeitlicher Rahmen von 10 Tagen gesetzt. Nach dieser Zeit wird die automatisierte Fahrfunktion dem Sachverständigen vorgeführt. Hierbei können, je nachdem wie die Fahrt verläuft, Auflagen gesetzt werden. Ein Beispiel wäre das Verbot des automatisierten Linksabbiegens, sodass das Fahrzeug vorher anhalten und auf eine Operator-Freigabe warten müsste. Nach erfolgreichem Bestehen der Begutachtung kann unter Vorbehalt der Auflagen die automatisierte Fahrfunktion als klar definierter Softwarestand genehmigt werden. Die Einzelzulassung des automatisierten Fahrzeugs erfolgt dann für die bestimmte Strecke und für entsprechend ausgebildete Fahrer. Als zusätzliche Auflage muss (nach §63a StVG) ein Programm zur Fahrtaufzeichnung vorhanden sein, welches die Fahrtdaten im Fehlerfall für die Aufsichtsbehörde sichert. Außerdem muss für den Haftungsfall eine spezielle Versicherung vorhanden sein.⁷⁰

Ein exemplarischer Zulassungsprozess für eine Einzelgenehmigung, wie er bei einem automatisierten Shuttle durchlaufen wurde, zeigt Abbildung 14.

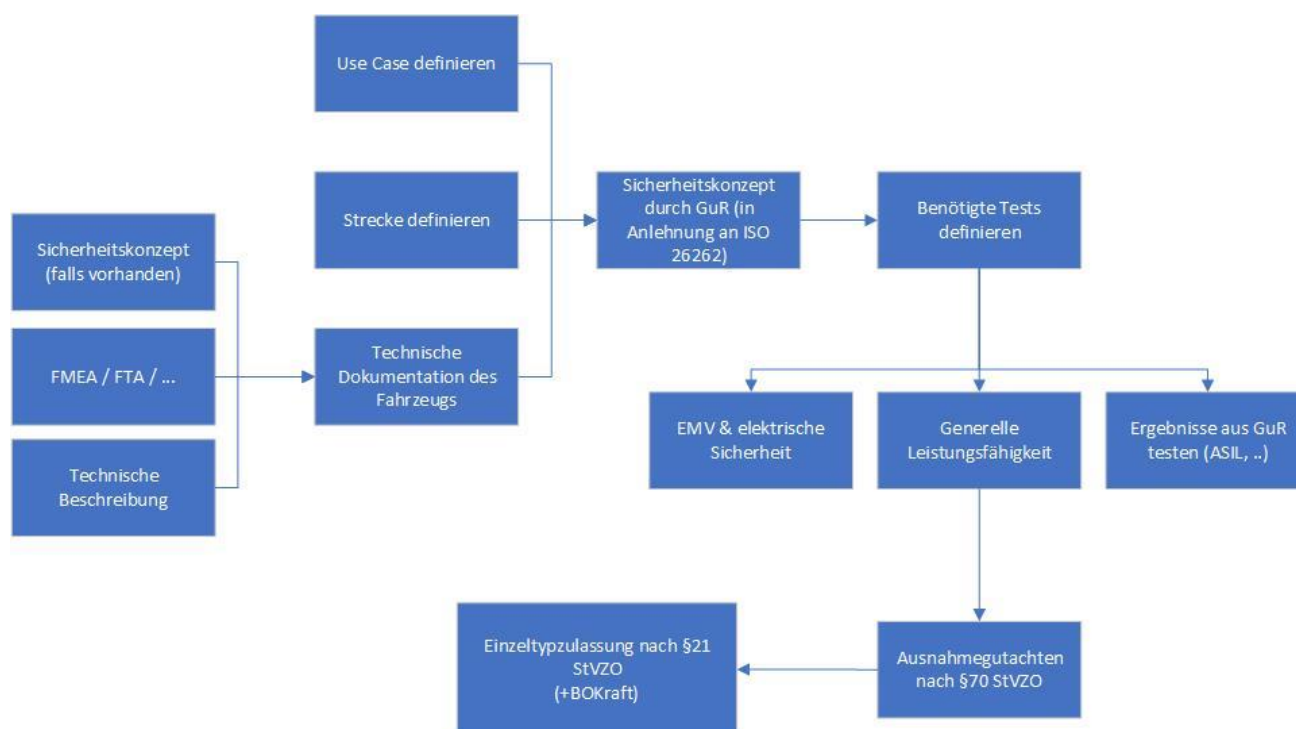


Abbildung 15 Exemplarischer Zulassungsprozess

Für Einzelgenehmigungen auf Basis von Ausnahmegutachten gibt es aktuell noch **Unterschiede in den einzelnen Bundesländern**, da die einzelnen Landesbehörden für die Genehmigung von Ausnahmen zuständig sind. Da es bisher kein einheitliches Vorgehen für die Entscheidung von Ausnahmen gibt, wird von Fall zu Fall und von Bundesland zu Bundesland unterschiedlich agiert. Zunächst können die anerkannten Sachverständigen der technischen Prüforganisationen (u.a. TÜV) das Recht unterschiedlich interpretieren und dadurch für ihre Gutachten unterschiedliche Schwerpunkte setzen und

⁷⁰ Interview K. Baumeister (TÜV NORD)

andere Herangehensweisen zeigen. Anschließend können die verantwortlichen Behörden der einzelnen Länder diese Gutachten unterschiedlich werten. Einzelgenehmigungen sind daher länderspezifisch, wobei einige Länder innovationsgetriebener sind als andere und daher eher Ausnahmen für Erprobungsfahrzeuge genehmigen. Baden-Württemberg hat bisher Innovationswillen bewiesen.⁷¹ Dort gibt es ein relativ einheitliches Verfahren zur Genehmigung automatisierter Shuttle.

Für die **Zulassung von MAD Fahrzeugen** bietet sich zunächst die Erprobung durch Einzelgenehmigungen an, bis die Technik in einem ausgereiften Zustand ist und eine genügend große Stückzahl für eine Typgenehmigung produziert wird. Bei jährlich bis zu 1500 produzierten Fahrzeugen in der EU oder bis zu 250 produzierten Fahrzeugen in einem Mitgliedstaat kann ein Typgenehmigungsverfahren für eine Kleinserie durchlaufen werden (VO (EU) 2018/858 Anh. V). Bei einer höheren Stückzahl müssen die Vorgaben für Großserien erfüllt sein und umfassendere Anforderungen erfüllt werden. Beispielsweise müssen dann auch zerstörende Prüfungen wie Crashtests durchgeführt werden.⁷²

Die Erteilung von Ausnahmegenehmigungen erfolgt derzeit noch nicht einheitlich innerhalb Deutschlands. Aktuell gibt es aber Bemühungen, die Einzelzulassung von automatisierten Fahrzeugen (insbesondere Peoplemover) zu vereinheitlichen, um die Erprobung und Ausrollung der Technologie voranzutreiben. Bis jetzt liegt es an den unterschiedlichen Sachverständigen, das Recht hinsichtlich ihrer Ausnahmegutachten zu interpretieren. Diese Sachverständigengutachten werden wiederum von den zuständigen länderspezifischen Behörden individuell gewertet. Um diese Einzelfallentscheidungen zu standardisieren, haben die technischen Prüfstellen (TÜV, DEKRA) gemeinsam mit Ländervertretern eine bundeseinheitliche Verfahrensweise bei der Zulassung erarbeitet. Dabei wird für von den Vorschriften nicht abgedeckte Technologien wie zum Beispiel die Steuerung über einen Joystick geklärt, welche Ausnahmen möglich sind und wie die Ausfallszenarien durchgetestet werden können.

In den Anforderungskatalog fließen Erfahrungen aus unterschiedlichen Pilot-Projekten ein. Ziel ist es, eine einheitliche Basis für die Begutachtung der Sachverständigen und die Genehmigung durch die Behörden zu schaffen. Anforderungen hinsichtlich der funktionalen Sicherheit und Cyber-Security der Fahrzeuge sowie geeignete Prüfverfahren spielen dabei eine Rolle. Diese abgestimmte Vorgehensweise soll bei der nächsten Zusammenkunft im BLFA-TK den Ländern zur Genehmigung vorgelegt werden. Anschließend kann davon ausgegangen werden, dass die Einzelzulassung für automatisierte Fahrzeuge bundeseinheitlich beurteilt wird.^{73 74}

Für den Zulassungsprozess der ersten U-Shift / MAD-Fahrzeuge wird man sich demnach an diesem Katalog orientieren können, sobald er abgestimmt und veröffentlicht wurde. Typgenehmigungsverfahren für MAD sind aktuell noch nicht möglich.

5.4 Funktionale Sicherheit

Funktionale Sicherheit behandelt mögliche Risiken, die durch Fehlfunktionen von E/E-Systemen (Elektrisch-elektronische Systeme) entstehen und deren Ursache im jeweiligen System selbst zu finden ist. Um Produkte / Systeme funktional sicher zu entwickeln, gibt es Normen. Die Anwendung dieser ist für die Homologation nicht verpflichtend, hier sind EG-Richtlinien und ECE-Regelungen bindend. Die

⁷¹ Interview K. Baumeister (TÜV NORD)

⁷² Interview K. Baumeister (TÜV NORD)

⁷³ Interview K. Baumeister (TÜV NORD)

⁷⁴ https://www.vdtuev.de/dok_view?oid=780475 Zugriff - 24.03.2020

Normen geben allerdings den „Stand der Technik“ wieder und sind somit eine technische Empfehlung insbesondere im Hinblick auf Produkthaftung.

Funktionale Sicherheit ist für die Fahrzeugzulassung (sowohl Typp Genehmigung als auch Einzelgenehmigung) jedoch von Relevanz, da sie u.a. in den sogenannten Elektronikhängen der UN-ECE-Regelungen 79 für Lenkanlagen im Anhang 6 sowie Regelung 13 für Bremsanlagen im Anhang 6 gefordert wird. In den „Speziellen Vorschriften für die Sicherheitsaspekte komplexer elektronischer Fahrzeugsteuersysteme“ wird unter anderem ein Sicherheitskonzept des Herstellers verlangt. Hierbei wird dann unter anderem auf technischer Seite die Erstellung essentieller Arbeitsprodukte wie Systembeschreibung und Risikoabschätzung gefordert. Diesem ist eine Analyse zugrunde zu legen, die das Verhalten des Systems beim Auftreten eines definierten, die Fahrzeugsicherheit beeinträchtigenden Fehlers untersucht. Vorgeschlagen wird eine FMEA, Fehlerbaumanalyse oder vergleichbarer Analyseverfahren. Genauer spezifiziert wird die Vorgehensweise beim Erstellen des Sicherheitskonzeptes nicht, sodass es sinnvoll erscheint hier auf die Vorgehensweisen aus den erprobten Normen zur funktionalen Sicherheit zurückzugreifen.^{75 76 77}

Die Grundnorm für funktionale Sicherheit ist die IEC 61508 („Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems“). Daraus abgeleitet wurde die ISO 26262 „Road vehicles – Functional Safety“, welche an die Gegebenheiten von Kraftfahrzeugen (Pkw, Busse, Lkw und Motorräder) angepasst ist. Ergänzend dazu kann die ISO 21448 („Safety of the Intended Functionality“) genannt werden, die die Sicherheit der Sollfunktion thematisiert (im Gegensatz zu Fehlfunktionen der funktionalen Sicherheit).

Auch beim Schienenverkehr werden eigene Normen angewendet, u.a. die DIN EN 50128 („Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme - Software für Eisenbahnsteuerungs- und Überwachungssysteme“) sowie die DIN EN 50129 („Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme – Sicherheitsbezogene elektronische Systeme für Signaltechnik“). Diese Normen gehen besonders auf die Leittechnik mit ein.

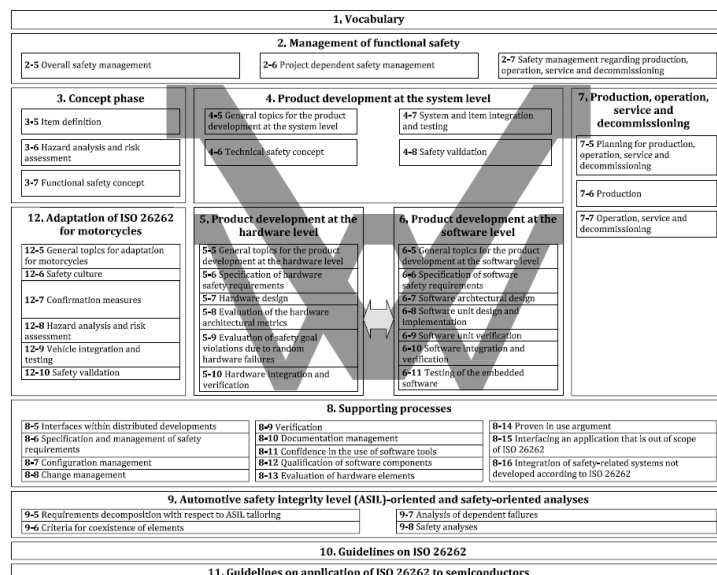


Abbildung 16: ISO 26262 Übersicht

⁷⁵ [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:42008X0527\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:42008X0527(01)) Zugriff – 13.03.2020

⁷⁶ <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2018/R013hr4e.pdf> Zugriff - 13.03.2020

⁷⁷ Dr. T. Wenzel (TÜV NORD Mobilität)

Eine FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) wird benutzt, um mögliche Fehler in einem Produkt oder System zu identifizieren und im Hinblick auf ihre Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit sowie Bedeutung zu bewerten. Anschließend können Maßnahmen definiert werden, um die Risiken der betrachteten Fehler zu mitigieren.

Nach der in ISO 26262 beschriebenen Vorgehensweise wird nach der Item Definition, also der Festlegung der funktionalen Anforderungen, der Umweltbedingungen, der Elemente des Items sowie der Klärung der gesetzlichen Anforderungen, eine Gefährdungsanalyse durchgeführt. Hier wird eine Gefährdungs- und Risikoanalyse (GuR) empfohlen. In dieser Analyse werden zunächst Szenarien festgelegt, indem Fahrsituationen (Operational situations) mit den Fahrzeugzuständen (Operating modes) kombiniert werden. In Verbindung mit möglichen Fehlfunktionen (Malfunctioning behaviour) entstehen Hazardous Events. Durch eine Bewertung der Schwere, Aufenthaltsdauer /-häufigkeit und Kontrollierbarkeit der einzelnen Hazardous Events entstehen Sicherheitsintegrationslevel (ASIL). Daraus lassen sich Sicherheitsziele, Functional Safety Requirements und damit das Funktionale Sicherheitskonzept ableiten. Aus diesem Konzept werden Maßnahmen und Bedingungen ersichtlich, die z.B. im Kontext einer Ausnahmegenehmigung befolgt werden können.

Im Rahmen des Projekts U-Shift ist die funktionale Sicherheit für das **MAD-Konzept** bei der Entwicklung sicherheitsrelevanter elektrischer/elektronischer Systeme gemäß verschiedenen Richtlinien / Standards zu berücksichtigen.

Gründe gegen eine Berücksichtigung der ISO 26262 sind einerseits, dass diese nicht in den Zulassungsregelungen gefordert bzw. referenziert ist, andererseits aber auch, dass der Scope des Standards selbst eine Anwendung nur für Serienfahrzeuge fordert. Allerdings ist es dennoch sehr empfehlenswert die ISO 26262 bei der Entwicklung zumindest ansatz- oder teilweise heranzuziehen, da sie als „Best Practice“ eingestuft wird und somit einen gewissen Stand der Technik in der Automobilindustrie repräsentiert.

Obwohl die ISO 26262 das automatisierte Fahren noch nicht explizit berücksichtigt, ist sie die passendste Norm für den Automobilbereich. Wenn automatisiertes Fahren weitere Verbreitung findet und vor allem auch eine angemessene rechtliche Untermauerung, ist es möglich, dass diese Norm perspektivisch auch das automatisierte Fahren mit aufnimmt. Dies ist aber frühestens in 5 bis 6 Jahren möglich, da zu diesem Zeitpunkt mit einer Veröffentlichung der neuen Edition 3 zu rechnen ist. Es ist wahrscheinlich, dass auf aktuelle Technik eingegangen wird, in welchem Ausmaß das automatisierte Fahren berücksichtigt wird, bleibt abzuwarten. Aktuell werden in der ISO 26262 alle Fahrfunktionen generisch aufgenommen, sodass auch ein automatisiertes Fahrzeug normkonform entwickelt werden kann. Laut Norm muss für alle Gefahren ein sicherer Zustand inklusive Sicherheitsmechanismus definiert werden. Beim automatisierten Fahren müsste dieser Zustand fail operational sein, das Fahrzeug im Fehlerfall also weiterhin funktionsfähig sein, um zu einem sicheren Halt zu gelangen. Dies kann auch aus der jetzigen Norm interpretiert werden, wird aber in zukünftigen Editionen wahrscheinlich näher spezifiziert.⁷⁸

Wie die Absicherung des automatisierten Fahrens durch Tests in Zukunft vorgenommen wird, ist noch nicht komplett absehbar. Es werden Teststrecken aufgebaut, auf denen verschiedene Testszenarien geprüft werden können, beispielsweise die Erkennung von Verkehrszeichen. Prüforganisationen überlegen sich reale Teststrecken, auf denen sie Prüfungen vornehmen können. Außerdem existieren Forschungsbemühungen, wie automatisierte Fahrzeuge bzw. einzelne automatisierte Fahrfunktionen mit Hilfe von Simulationen abgesichert werden können. Als Beispiel kann hier das Projekt PEGASUS genannt werden,

⁷⁸ Dr. T. Wenzel (TÜV NORD Mobilität)

an dem u.a. verschiedene OEM und das DLR beteiligt sind.⁷⁹ Es finden Gespräche zwischen Normungsgremien, Prüforganisationen, Verkehrsministerien und dem KBA statt, wie die Tests für unterschiedliche Automatisierungslevel (SAE Level 3, 4 und 5) aufgebaut sein sollten. Es ist denkbar, dass zukünftig eine Mischung aus realen Tests auf Teststrecken und Simulationstests gefordert wird.

Für die Infrastrukturkomponente des MAD kann auch die ISO 26262 herangezogen werden. Da Teile der Fahrfunktion auf die Infrastruktur ausgelagert sind, muss diese mit in das Sicherheitskonzept des Fahrzeugs einbezogen werden. Ob sich ein für die Fahrfunktion benötigtes Steuergerät im Fahrzeug befindet oder in der Infrastruktur, ist im Fehlerfall irrelevant. Es erscheint daher sinnvoll, die gleiche Norm für Fahrzeug und die Fahrfunktion unterstützende Infrastruktur heranzuziehen.

Laut ISO 26262 ist ein „Tailoring of the Safety Lifecycle“ möglich. Demnach müssen nicht alle in der Norm empfohlenen Methoden oder Techniken angewendet werden, mit entsprechender Argumentation können Methoden ausgelassen oder durch andere ersetzt werden. So würde es sich z. B. anbieten, für die Kommunikation mit der Infrastruktur aufgrund der Ähnlichkeit zur Signaltechnik Methoden aus den Bahnnormen EN 50126, EN 50128 (Software) und EN 50129 (Elektronik) zu übernehmen. Aufgrund der gleichen Zielsetzung der Normen, der Absicherung zufälliger und systematischer Fehler, wird hier kein Risiko gesehen.

Da die Standards zur funktionalen Sicherheit sich neben strukturellen Fragen auf technischer Ebene hauptsächlich mit der Vermeidung der Verletzung von Sicherheitszielen aufgrund systematischer und zufälliger Fehler der Elektronikkomponenten befassen, bleiben eine Reihe von potentiellen Fehlerursachen unberücksichtigt. Diese werden aber von Standards wie der ISO CD 21448 Norm (Safety of the Intended Functionality – SOTIF) abgedeckt, bei dem auch konzeptuelle und umweltbedingte Fehlerursachen berücksichtigt werden.

Daher wird empfohlen, dass im Projekt U-Shift nicht nur die Anforderungen zur funktionalen Sicherheit aus den UNECE-Regelungen, sondern soweit anwendbar auch die Anforderungen der ISO 26262, der ISO CD 21448 sowie der ISO/SAE 21434 (siehe 5.6 zu Security) bedacht werden sollen.⁸⁰

5.5 Datenschutzgrundverordnung (DSGVO)

Ziel der DSGVO ist unter anderem der Schutz natürlicher Personen vor Verarbeitung ihrer personenbezogenen Daten ohne entsprechende Zustimmung, um ihre Grundrechte und -freiheiten zu schützen.⁸¹

Ein wesentliches Element des MAD Konzeptes ist die sensorische Überwachung von Verkehrsräumen mit verschiedenen Infrastruktursensoren wie Video, Radar und Lidar. Insbesondere die bilderfassenden Systeme wie Kameras sind wegen der Erkennbarkeit z.B. von Gesichtern oder auch Kennzeichen hinsichtlich der DSGVO zu betrachten. Grundsätzlich ist für eine langfristige Verkehrsbeobachtung mit Anlagen zur automatischen Datenerfassung eine Einwilligung der unbeteiligten Verkehrsteilnehmer nicht erforderlich, da dies unter anderem unverhältnismäßig ist.

Um die Videoinformationen zu anonymisieren, wird die Auflösung des zu speichernden Materials so verringert bis keine Personen und Kennzeichen mehr erkennbar sind. Ziel im MAD-Konzept ist es statt den Videoaufzeichnungen lediglich Informationen erkannter Objekte zu übertragen. Optional kann al-

⁷⁹ Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen; <https://www.pegasusprojekt.de> ; Zugriff: 26.03.2020

⁸⁰ Dr. T. Wenzel (TÜV NORD Mobilität)

⁸¹ <https://dsgvo-gesetz.de/art-1-dsgvo/> - Zugriff – 28.03.2020

lerdings auch in Abstimmung mit den Behörden stellenweise im öffentlichen Interesse eine Videoüberwachung eingerichtet werden.

Neben den zu erhebenden Videodaten, kann die Kommunikation zwischen der Infrastruktur und den Fahrzeugen auch eine Gefahr für den Schutz personenbezogener Daten darstellen. Kontinuierlich kommuniziert werden unter anderen detaillierte Positionsdaten aller vernetzten Verkehrsteilnehmer. Diese Daten können innerhalb der Funkreichweite abgehört und aufgezeichnet werden, um beispielsweise die gefahrene Route einer Person zu rekonstruieren. Es kann nicht direkt aus der übermittelten Nachricht auf den Fahrer des entsprechenden Fahrzeugs geschlossen werden. Dennoch besteht eine Wechselwirkung zwischen einem Fahrzeug und dem Fahrer sowie der Start- und Endposition einer gefahrenen Strecke, die letztendlich einen Fahrer und sein Fahrverhalten offenbaren können.

Um diesen Schutz auch im Rahmen von Forschungsprojekten sicherzustellen, wird in den Projekten ein Datenschutzkonzept benötigt, das die näheren Umstände der entsprechenden Datenverarbeitung beschreibt. Alle Beteiligten des jeweiligen Projekts haben sich entsprechend dem Konzept zu verhalten. Im Zulassungsprozess kann dann bei dem Aspekt der DSGVO-Konformität auf das Datenschutzkonzept verwiesen werden.

Die Verarbeitung personenbezogener Daten ist unter anderem dann rechtmäßig, wenn die datenerhebende Organisation einer berechtigten Aufgabe im öffentlichen Interesse nachgeht (Art. 6 abs. 1 e) DSGVO). Sofern die Datenerhebung zur Erreichung dieses Forschungszwecks zwingend notwendig ist, stehen diesem Interesse keine schutzwürdigen Interessen betroffener Personen entgegen. Werden im Rahmen der Datenverarbeitung Bildaufzeichnungen erstellt, in denen unbeteiligte Verkehrsteilnehmer erfasst werden könnten, ist eine ausreichende Kennzeichnung erforderlich. Die Kennzeichnung muss eine Auskunft über die Datenerhebung geben, bevor die jeweiligen Verkehrsteilnehmer den aufgezeichneten Bereich betreten haben. Ein Beispiel dafür zeigt die folgende Abbildung:



Abbildung 17: Kennzeichnungspflicht im Rahmen von Forschungsprojekten

Das Beschaffen von relevanten Daten für die Umsetzung automatisierter Fahrfunktionen im Rahmen des MAD-Konzeptes muss auch gemäß der DSGVO realisiert werden. Da in allen drei Anwendungsfällen größere Streckenabschnitte und ganze Bereiche des öffentlichen Lebens erfasst werden, sind auch hier unbeteiligte Verkehrsteilnehmer vor dem Einfahren in den entsprechenden Bereich über die Videoerfassung zu informieren (vgl. Abbildung oben). Zusätzlich kann auch hier eine Reduzierung der Videoauflösung durchgeführt werden, bevor die Daten zentral verarbeitet werden. So kann gewährleistet

werden, dass u.a. Gesichter und Kennzeichen nicht erkennbar sind. Dieses Verfahren zur Anonymisierung kann in U-Shift Control bei Bedarf angepasst werden.

Ein Datenschutzkonzept für das U-Shift-Projekt enthält neben den allgemeinen Aspekten, wie der Beschreibung und Zielsetzung des Projektes, eine Beschreibung der Umsetzungsaspekte, die im Sinne der DSGVO zu betrachten und zu gestalten sind. Wichtige Themenfelder sind hier das Sammeln personenbezogener Daten, die Datenverarbeitung unter und ohne Ausschluss Unbeteiligter, die langfristige Verkehrsbeobachtung, die das MAD-Konzept mit sich bringt, und die Videoaufzeichnung von Verkehrsszenarien ohne Anonymisierung. Hier ist unter anderem ein Verzeichnis aller Verarbeitungstätigkeiten sowie Beschreibung der technischen und organisatorischen Maßnahmen zur Einhaltung der DSGVO (Art. 24ff.) inhaltlich auszuführen. Weiterhin ist in dem Datenschutzkonzept die verantwortliche Stelle, Kontaktdaten des Datenschutzbeauftragten, Beschreibungen der Forschungszwecke und der -vorhaben, sowie der Nutzen der Forschung für die Allgemeinheit aufzuführen. Wenn es um die genauen systematischen Verarbeitungstätigkeiten geht, sollte die Erhebung, Speicherung, Anonymisierung, Pseudonymisierung und Löschung der Daten ebenso wie der Ablauf der Datenverarbeitung beschrieben werden. Zudem werden die Ausnahmen der DSGVO bei Forschungszwecken, andere Rechtsgrundlagen, Rechte der Betroffenen, Vorgehen bei Datenschutzverletzungen und Hinweise zur Kennzeichnung und Erfüllung der Informationspflichten im Rahmen der Videoüberwachung dargestellt.

5.6 Security

Security behandelt die Fehler, die durch böswilliges Eingreifen Dritter verursacht werden. Die Norm ISO/SAE 21434 „Road vehicles – Cybersecurity engineering“ behandelt Aspekte der Cybersecurity im Automotive-Bereich. Allerdings ist diese noch in der Entwicklung und dementsprechend lediglich als Draft vorhanden.⁸²

Die Vehicle-to-Everything-Kommunikation (V2X-Kommunikation) ist eine Technologie, um Informationen zwischen Fahrzeugen oder Fahrzeugen und Infrastruktur mit Hilfe von On-Board-Units (OBU) und Road-Side-Units (RSU) auszutauschen. Da es sich beim Straßenverkehr um einen sicherheitskritischen Bereich handelt, ist die Vertrauenswürdigkeit der zu übermittelnden Daten unabdingbar. Dementsprechend ist dafür zu sorgen, die Daten vor unrechtmäßiger Manipulation zu schützen. Anforderungen dafür werden durch das European Telecommunications Standard Institute (ETSI) zusammengetragen. Einen Ansatz das böswillige Versenden falscher Daten zu unterbinden bietet die Verwendung einer Public-Key-Infrastructure (PKI). Das Umsetzen einer V2X-PKI würde dazu führen, dass die OBUs und die RSUs mit Zertifikaten ausgestattet werden, die es erlauben zu sendende Nachrichten mit einer Signatur zu versehen. Nachrichten ohne eine gültige Signatur können somit als nicht vertrauenswürdig eingestuft werden. Zum Schutz der personenbezogenen Daten ist es möglich, die Zertifikate der OBUs regelmäßig zu wechseln, damit durch die versendeten Nachrichten kein Rückschluss auf die Route eines Fahrers getroffen werden kann. Bei der PKI handelt es sich um einen zentralen Ansatz die Daten vor Missbrauch zu schützen, da die diversen Zertifikate durch eine zentrale Instanz vergeben werden. Es werden auch dezentrale Ansätze diskutiert, bei denen beispielsweise die Fahrzeuge selbst für die Zertifikatsgenerierung verantwortlich sind. Dieses Verfahren nennt sich Direct Anonymous Attestation (DAA).

Im Rahmen einer Kooperation zwischen dem TÜV Süd und dem italienischen Unternehmen Drivesec wird das Dienstleistungspaket „Cybersecurity Assessment for Automotive Components“ entwickelt.

⁸² https://de.wikipedia.org/wiki/ISO/SAE_21434 - Zugriff – 28.03.2020

Damit sollen Hersteller im gesamten Entwicklungszyklus von entsprechend sicherheitsrelevanten Software- und Hardwarekomponenten unterstützt werden.^{83 84 85}

Das Thema Security ist beim MAD-Konzept von größerer Bedeutung als beim konventionellen fahrzeugbasierten automatisierten Fahren, da sicherheitskritische Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und der Infrastruktur stattfindet. Daher ist es notwendig, bei MAD ein Security-Konzept nach dem aktuellen Stand der Technik zu erstellen und dies umzusetzen. Anhaltspunkte kann die Norm ISO/SAE 21434 bieten. Die Orientierung an ihr ist für den in 3 beschriebenen Anwendungsfall Pilot noch nicht unbedingt notwendig. Langfristig muss die Norm allerdings Anwendung finden. Dies gilt voraussichtlich für die beiden auf Pilot folgenden Anwendungsfälle Roll-Out und Vision 2040. Für Prototypen und Einzelgenehmigungen ist die unmittelbare Einhaltung zunächst zu vernachlässigen. Teil der Betrachtung nach dieser Norm ISO/SAE 21434 ist eine Abschätzung wie groß die Gefahr ist, dass jemand Drittes böswillig in das System eingreift. Für Tausende oder gar Millionen von automatisiert auf der Straße fahrender Serienfahrzeuge ist davon auszugehen, dass es einen größeren Kreis von Personen gibt, der ein Interesse daran hat dem System böswillig zu schaden. Bei einem Forschungsprojekt, wie U-Shift Control in der Pilot-Phase, mit zunächst wenigen Fahrzeugen, kleiner Strecke und einem Sicherheitsfahrer, wäre das Verfolgen eines böswilligen Handelns von geringerem Interesse. Aufgrund dessen ist von einem geringeren Risiko von böswilligen Eingriffen Dritter auszugehen, zumal der Sicherheitsfahrer beispielsweise durch das Auslösen des Notausschalters auf einen potentiellen Angriff reagieren könnte.

Security bei automatisiert fahrenden Fahrzeugen ist allgemein wichtig und bei Kommunikation mit der Infrastruktur umso mehr. Bei den ersten Erprobungen der Prototypen im Anwendungsfall Pilot kann abgewogen werden, die Aspekte der Cyber Security erst später genauer zu betrachten. Bei den späteren Anwendungsfällen ist die Einhaltung der Norm ISO/SAE 21434 allerdings zu beachten, gerade wenn es um ganze Fahrzeugserien geht, um für die Sicherheit der U-Shift-Fahrzeuge und der von ihnen transportierten Güter und insbesondere Personen zu sorgen.

5.7 Rolle der Infrastruktur bei MAD

Die Infrastruktur übernimmt beim MAD-Ansatz eine entscheidende Rolle, da sie zum einen die Sicherheit des Gesamtsystems – Fahrzeug + Infrastruktur – erhöht und zum anderen die Kosten für voll ausgestatteten automatisiert fahrende Fahrzeuge reduziert, um nur zwei Punkte aufzuführen. Die Erhöhung der Sicherheit gelingt durch einen besseren Überblick über das Verkehrsgeschehen zu dem die Infrastruktur aufgrund Ihrer baulichen Höhe einen großen Anteil beiträgt. Hindernisse oder auch unübersichtliche Straßenbereiche können in ihrer Gesamtheit überschaut werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, den im Verkehrsgeschehen Beteiligten eine für das Gesamtsystem sicherere optimale Handlungsanweisung zu erteilen. Die Reduzierung der Kosten ergibt sich durch die Tatsache, dass ausschließlich die Infrastruktur mit Sensorik auszustatten ist.

Schwierigkeit besteht bei der Frage wer die Kosten für den Aufbau der Infrastruktur übernimmt und wer für die Wartung dieser Anlage verantwortlich ist. Auch der Aufbau bedeutet ein großes Finanzvolumen, um Masten für die Technik aufzustellen. Eine weitere Herausforderung beinhaltet die besitzrechtlichen Gegebenheiten für die Aufstellfläche der Infrastruktur. Hinzu kommt die Frage nach dem Betreiber oder auch Verkehrsmanager.

⁸³ <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01978187/document> - Zugriff – 28.03.2020

⁸⁴ https://www.researchgate.net/publication/335089342_Securing_V2X_Communications_for_the_Future_Can_PKI_Systems_offer_the_answer - Zugriff – 28.03.2020

⁸⁵ <https://intellicar.de/hardware-and-software/cybersecurity-normen-fuer-fahrzeugkomponenten/> - Zugriff – 28.03.2020

Der entscheidende Unterschied zwischen den zwei Ausprägungen MAD und AD ist die Tatsache, dass es sich bei AD um ein einzelnes Fahrzeug und bei der Ausprägung MAD um ein System handelt, das aus mehreren Komponenten besteht. Das System besteht aus dem Fahrzeug und der Infrastruktur an der für das Fahrzeug zugelassenen Strecke. Dabei wird sowohl die Objekterkennung als auch die Umgebungswahrnehmung in der Infrastruktur stattfinden. Es handelt sich hierbei um wesentliche Informationen für die Fahrfunktion des Fahrzeuges. Ohne Infrastruktur ist das Fahrzeug nicht fahrfähig.

Daher muss bei der Zulassung von MAD-Fahrzeugen die Infrastruktur mitberücksichtigt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, Straßen bzw. Straßenabschnitte allgemein nach ihrer Infrastrukturausstattung durch ISAD-Level zu klassifizieren und die Fahrzeugzulassung auf zuvor definierte ISAD-Level zu beschränken. Konventionelle oder AD Fahrzeuge bekämen demnach eine Zulassung für alle ISAD-Level. MAD Fahrzeuge sind dagegen auf bestimmte Sensoren bzw. Intelligenz aus der Infrastruktur angewiesen und bekommen daher nur eine beispielsweise auf ISAD Level A+ beschränkte Genehmigung. (Hier wird eine Erweiterung der bestehenden Level vorgeschlagen.) Um dies zu ermöglichen, muss die Infrastruktur nach ISAD-Leveln standardisiert sein. Es muss also festgelegt werden, welche Ausstattung an Sensoren usw. die Infrastruktur bei welchem ISAD-Level vorweisen muss. Hier wird ein eigener Zulassungsprozess für die Infrastrukturkomponenten benötigt, um bei der Fahrzeugzulassung auf diese Level verweisen zu können. In die Genehmigungsverfahren der Fahrzeuge muss die Kommunikationsschnittstelle zur Infrastruktur inklusive Untersuchungen der funktionalen Sicherheit und Security mitaufgenommen werden.

5.8 Was können wir aus der Vorgehensweise anderer Verkehrsformen lernen

Basierend auf einem DLR-internen Bericht zur Forschung am Thema Verkehr 5.0 werden die unsere Studie betreffenden Ergebnisse bezogen auf den aktuellen Zeitpunkt in diesem Kapitel betrachtet.

Der **Straßenverkehr** zeichnet sich durch seine Individualität, Flexibilität und Spontanität aus. Dadurch ist seine Planbarkeit eingeschränkt. Die Interessen des Einzelnen stehen im Vordergrund. Dadurch ist die Möglichkeit durch eine Verkehrsmanagementzentrale über Wechselverkehrszeichen oder Lichtsignalanlagen Einfluss zu nehmen gering. Einen Zulassungsprozess gibt es ausschließlich für Fahrzeuge.

Im **Luftverkehr** werden Flüge im Voraus geplant, angemeldet und auch durch die Flugsicherung überwacht. Durch eine gezielte Routenplanung des Fluges kann, mit Blick auf die gesamte Verkehrslage, der individuelle Flugverkehr so gesteuert werden, dass das prognostizierte System im Ganzen bestmöglich funktioniert. Hier gibt es einen Zulassungsprozess für die Flugzeuge, der im weiteren Projektverlauf untersucht wird, wenn sich die Notwendigkeit dazu ergibt.

Der **Bahnbereich** zeichnet sich durch eine flächendeckende Überwachung der Bewegung des Zuges von der Infrastruktur aus. Der Triebfahrzeugführer erhält Fahrvorgaben, an die er sich strikt zu halten hat. Abweichungen davon werden nicht geduldet. Es gibt Zulassungsprozesse sowohl für Züge als auch für die Infrastruktur. Diese einzelnen Elemente unterliegen strengen Richtlinien.

In der **Schifffahrt** gibt es in viel befahrenen Gewässern Überwachungseinrichtungen und Systeme, die den Verkehr regeln. Sie werden von nationalen Verkehrsbehörden oder Seehäfen betrieben. In Europa gibt es eine Richtlinie, die im Rahmen einer Harmonisierungsmaßnahme 2010 vorsieht, dass jedes Land verpflichtet ist ein solches System zu betreiben. Darüber werden bspw. An- und Abmeldung von Schiffen gesammelt und an die entsprechenden Häfen weitergeleitet. Zulassungsprozesse gibt es für diverse Schiffsausrüstung.

Im Folgenden werden ausschließlich die Luftfahrt und der Schienenverkehr betrachtet, da sich hier laut Studie die hilfreichsten Ansätze befinden. Mit Blick auf die Luftfahrt könnte beispielsweise die Ver-

kehrsmanagementzentrale durch das Anmelden von Fahrten unterstützt werden. Diese Informationen müssten dann intensiver genutzt werden, indem individuelle Routenplanungen als Anweisung für die Routenplanung per V2I-Message (vehicle to infrastructure) an das Straßenfahrzeug versendet würden. Allerdings würden hiermit die Einzelinteressen dem gesamtoptimierten Verkehrsinteresse untergeordnet werden. Das ist kritisch zu sehen, solange der Fahrer die Entscheidungshoheit über sein Fahrzeug hat. Aus diesem Grund handelt es sich eher um eine Empfehlung. Es gibt Ansätze einen Anreiz zu systemkonformem Verhalten über Gebühren zu fördern, wodurch mehrschichtige Aspekte wie Kapazität und Umweltschutz berücksichtigt werden können. Voraussetzung für eine derartige Steuerung ist eine Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Verkehrsmanagement. Hier gibt es eine weitere Herausforderung, da die technische Ausrüstung aller Fahrzeuge aktuell nicht gegeben ist. Eine Pflicht für die Nachrüstung im Straßenverkehr besteht nicht – im Gegensatz zum Luftverkehr, in dem teilweise regulatorisch eine Nachrüstung vorgeschrieben wird, wenn Sicherheit und Effizienz dadurch erhöht werden. Bis zur flächendeckenden Ausrüstung von Straßenfahrzeugen wird ein Produktlebenszyklus verstreichen. Bis dahin ist eine Einbindung dieser Fahrzeuge nicht oder nur eingeschränkt möglich. Eine weitere Möglichkeit aus dem Bereich der Luftfahrt zu lernen, ist die Strukturierung des genutzten Raumes analog der Luftraumklassen. Hierbei wird mit Hilfe von Umgebungs- und Fahrzeugeigenschaften beispielsweise das Durchfahren einer Verbots- oder Sperrzone geregelt. Über diesen Weg könnte es definierte Zonen geben, die ausschließlich Rettungsdienste oder Zulieferer nutzen dürfen und solche, die von Fahrzeugen mit festgelegten Standards wie Abgas, Vernetzung oder Automatisierung befahren werden dürfen. Vergleichbar der Verbotszonen für Dieselfahrzeuge in Innenstädten. Es ist ebenfalls vorstellbar, dass die Rolle des Verkehrsmanagements gestärkt wird und dessen Anweisungen Folge zu leisten ist. Zu guter Letzt gäbe es auch Zonen, in denen jeder frei fahren darf. Eine teilweise Nutzung für das Projekt ist vorstellbar.

Bei der Betrachtung des Schienenverkehrs fällt die hohe Compliance bei der Einhaltung von Vorgaben auf. Sobald es eine Regelüberschreitung gibt, werden Gegenmaßnahmen eingeleitet. Das unterscheidet den Schienenverkehr stark vom Straßenverkehr. Bei voll automatisiertem Verkehr wäre eine ähnlich hohe Compliance denkbar. Dadurch wäre bei hohen Verkehrsdichten eine bessere Steuerung möglich. Bei einer mittleren bis geringen Verkehrsdichte ist dagegen eine dezentrale Steuerung performanter. Hinzu kommt, dass insbesondere die Ortung als auch die hohen Latenzen das Vertrauensintervall des Fahrzeuges vergrößern – damit wird der Bereich bezeichnet, der für das Fahrzeug freigehalten wird, um Kollisionen zu vermeiden. Dadurch gehen Kapazitäten verloren. Eine Übertragung der Vorgehensweisen aus dem Schienenverkehr auf den Straßenverkehr ist aus den genannten Gründen lediglich bei einer Zugbildung von Fahrzeugen (Bspw. LKW oder PKW mit Standardgeschwindigkeit) vorteilhaft. Abschließend ist festzuhalten, dass sich hierdurch keine relevanten Vorteile für das Projekt ergeben, da die Verkehrsdichte im untersuchten Bereich gering ist.

5.9 Möglichkeiten und Risiken für Konzept MAD

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass im Rahmen des Projektes für den Anwendungsfall 1 (Pilot) nur die Zulassung des vorgestellten Fahrzeugkonzeptes über eine Einzelgenehmigung aus den oben genannten Gründen möglich erscheint. Die Komponenten sind neu entwickelt und können somit auf keinerlei bestehende Zulassung zurückgreifen. Die Infrastruktur wird in diesem Fall keinem Zulassungsverfahren unterliegen, da das Fahrzeug alle notwendigen Funktionalitäten alleine ausführen kann. Allerdings handelt es sich bei der Einzelgenehmigung um ein aufwändiges und zeitintensives Verfahren, das ausschließlich den Prototypen das Fahren auf einer definierten Strecke erlaubt, so dass ein mög-

lichst früher Beginn dieser Aktivitäten im Folgeprojekt empfohlen wird. Aus politischer Sicht wird die Zulassung mit einer Einzelgenehmigung als weitestgehend risikoarm eingeschätzt, da insbesondere die Regierung in Baden-Württemberg der Entwicklung von automatisiertem Fahren aufgeschlossen gegenübersteht. Es ist durch das Ministerium für Verkehr in BW bereits ein „Hinweisblatt zum Genehmigungsverfahren automatisierter Shuttle-Busse“ online zur Verfügung gestellt worden, das klare Rahmenbedingungen und eine Anleitung beinhaltet, um die Zulassung für alle Beteiligten so eindeutig und klar wie möglich zu gestalten. Die Zulassungsstelle – also das zuständige Regierungspräsidium - benötigt im Rahmen dieser Einzelgenehmigung unter anderem ein Gutachten, das durch einen amtlich anerkannten Sachverständigen (TÜV und DEKRA) erstellt werden muss. Durch die Nutzung von Beratungsleistungen des Projektteams durch den TÜV Nord ist auch hier eine frühzeitige Einbindung erfolgt, um das Risiko zu minimieren. Die Zulassung des neu entwickelten Fahrzeugs könnte ein Risiko darstellen, welches durch eine enge Zusammenarbeit mit dem TÜV Nord als Unterauftragnehmer so weit wie möglich minimiert wird.

Für den Anwendungsfall 2 (Roll-Out) ist die Zulassung der U-Shift Fahrzeuge mit einer Typengenehmigung für eine Kleinserie denkbar, da es sich um ein prognostiziertes Fahrzeugvolumen unter 1.000 Stück handelt. Hierbei ist die Zulassung des gesamten MAD-Systems zu betrachten, das aus dem Fahrzeug (Driveboard + Kapsel) und der Infrastruktur besteht. In diesem Abschnitt wird überwiegend die Infrastrukturseite betrachtet. Für die Zulassung dieses neuartigen Systems sind einige Grundlagen zu schaffen, die eine Voraussetzung für den Anwendungsfall 2 darstellen. Eine erste und aus unserer Sicht sehr wichtige Voraussetzung ist die Schaffung eines Standards für die Infrastruktur, auf den sich die Zulassung der Fahrzeuge beziehen kann. Hier gilt es sowohl den Umfang als auch die technischen Merkmale der Infrastruktursensorik festzulegen und zu standardisieren. Im Nachgang ist es notwendig einen Prozess für die Zulassung dieser Infrastrukturelemente zu schaffen, um verpflichtende Rahmenbedingungen wie Qualität, Verantwortlichkeiten, Haftung etc. herzustellen. Als Grundlage kann hierzu der Bahnbereich genutzt werden, in dem es bereits ein Zulassungsverfahren und standardisierte Infrastrukturelemente gibt. Es hat sich gezeigt, dass hier schon eine europäische Standardisierung langwierig ist, da viele verschiedene nationale Interessen zu berücksichtigen sind. Es scheint aufgrund des genannten Beispiels trotzdem möglich und von großem Nutzen zu sein diesen Weg einer infrastrukturseitigen Unterstützung zu gehen. Eine weitere Grundlage ist die Einteilung der zu befahrenden Bereiche bspw. analog der ISAD-Level, da es sich hier um eine Fahrzeugzulassung handelt, die verpflichtend eine definierte und standardisierte Ausrüstung der Infrastruktur voraussetzt. Für den MAD-Bereich ist eine neue Klasse wie z.B. A+ möglich. Die in diesem Zulassungsverfahren skizzierten Fahrzeuge dürfen dann ausschließlich in mit Infrastruktur ausgestatteten Bereichen fahren. Für alle anderen Bereiche besteht keine Zulassung für diese Fahrzeuge.

Perspektivisch ist im Anwendungsfall 3 (Vision 2040) bei einer Vollimplementierung die Typengenehmigung für eine Großserienzulassung denkbar. In diesem Fall handelt es sich um eine Vollimplementierung von U-Shift Fahrzeugen. Der Zulassungsprozess wird sich aus unserer Sicht, verglichen mit Anwendungsfall 2, nicht unterscheiden, da die Voraussetzung für die Schaffung eines Zulassungsprozesses für die Infrastruktur bereits erwähnt wurde. Hier wird lediglich der Bereich mit entsprechend ausgestatteter MAD-Infrastruktur nach ISAD-Level A+ erweitert.

Die aktuellen rechtlichen Einschränkungen insbesondere bezüglich der maximalen Geschwindigkeit und dem Sicherheitsfahrer (Level 4 und 5) sind extern vorgegebene Faktoren, deren Entwicklung zeitlich und auch bezogen auf das Ergebnis aktuell schwer abzuschätzen sind. In bestehenden Arbeitsgruppen

auf europäischer Ebene finden Aktivitäten statt, deren zeitliche Entwicklung nicht eingeschätzt werden kann. Erst danach ist eine Umsetzung in nationales Recht möglich (wie oben beschrieben).

Abschließend ist zu sagen, dass die Standardisierung und die Schaffung eines neuen Zulassungsverfahrens für die Infrastruktur einen wichtigen Baustein für MAD darstellen. Eine Aussage zum zeitlichen Rahmen kann aufgrund verschiedener Akteure mit diversen Zielrichtungen nicht getätigt werden. Eine Vereinheitlichung dieser Standards auf europäischer Ebene ist in jedem Fall anzustreben und auch denkbar, da vergleichbare Aktivitäten in verschiedenen europäischen Ländern zu beobachten sind.

5.10 Zulassungsmöglichkeiten Modulare Fahrzeugkonzepte – Konzept U-Shift

Der MAD-Konzeptansatz soll an dem Fahrzeugkonzept U-Shift angewendet werden. Hierzu wird im folgenden Kapitel die Thematik der zulassungsrelevanten Themen mit Bezug zum Fahrzeug mit einigen Punkten untersucht. Welche Anforderungen an Beleuchtung, Rückhaltesysteme, Einstiegsbereich usw. benötigt der Demonstrator des U-Shift Fahrzeugs für eine Einzelabnahme, Kleinserie oder eine zukünftige mögliche Typenzulassung. Fahrzeuge sind heutzutage durch Typenbezeichnungen auf EU-Ebene klassifiziert (Abbildung 18). Hierbei unterscheiden sich die Hauptklassen „M“ für Personenbeförderung, „N“ für Güterbeförderung und „O“ für Anhänger (Güter/Personen). Diese werden dann wie im Beispiel in Abbildung 18 durch Zahlen in Unterklassen gegliedert.

Fahrzeugklasse		
Sitzplätze	Gesamtmasse	
Zusatz		
M: Personenbeförderung (M)	N: Güterbeförderung (N)	O: Anhänger (Güter und Personen)
Klasse M1 max. 8+1 Sitzplätze k.A. keine Stehplätze zulässig	Klasse N1 max. 6+1 Sitzplätze Max. 3,5 t	Klasse O1 k.A. max. 0,75 t
Klasse M2¹ mehr als 8+1 Sitzplätze max. 5 t Stehplätze zulässig	Klasse N2¹ max. als 8+1 Sitzplätze 3,5 t < m < 12 t	Klasse O2 k.A. 0,75 t < m < 3,5 t
Klasse M3 mehr als 8+1 Sitzplätze mehr als 5 t Stehplätze zulässig	Klasse N3 max. als 8+1 Sitzplätze mehr als 12 t	Klasse O3 k.A. 3,5 t < m < 10 t
Hinweis: ¹ Fahrzeuge dieser Klasse bis 4,25t. dürfen mit der Fahrerlaubnis der Klasse B geführt werden [nach Vierter Verordnung über Ausnahmen von den Vorschriften der Fahrerlaubnis-Verordnung gültig bis Dezember 2019]		Klasse O4 k.A. mehr als 10 t
Hinweis: Sitzplätze: Passagierplätze + Fahrerplatz Rollstuhlplatz zählt als ein Sitzplatz		

Abbildung 18: Übersicht Genehmigung und Klassifizierung nach EU-Verordnung Nr. 678/2011

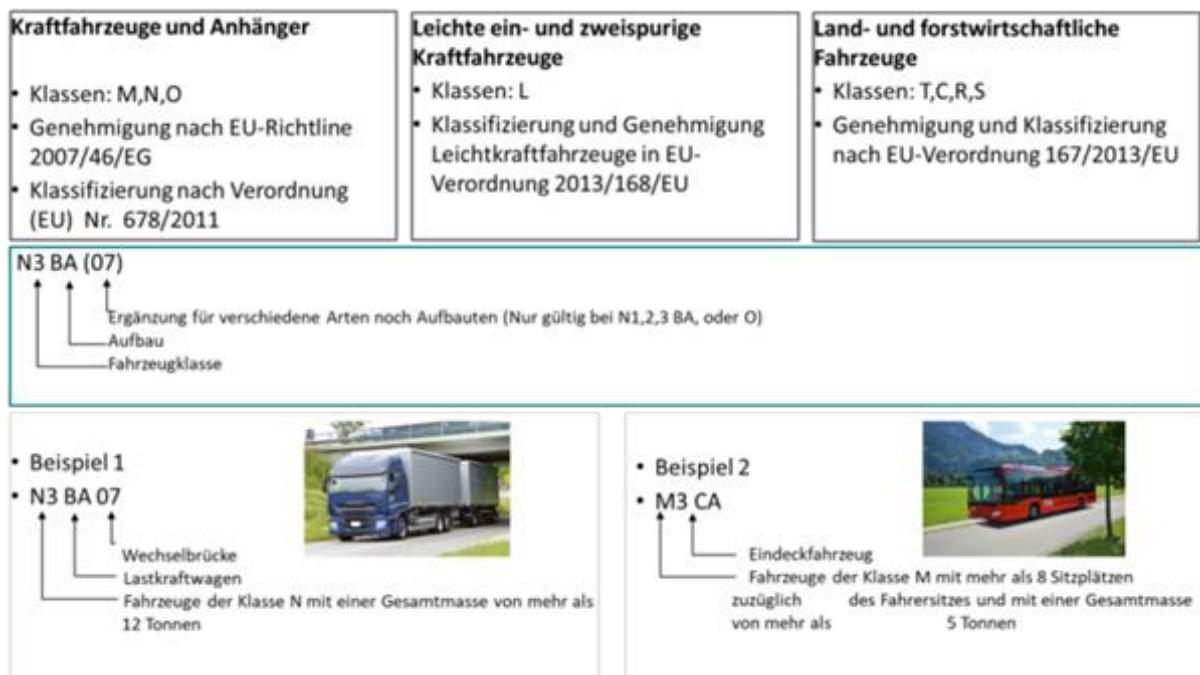


Abbildung 19: Beispiele für Typenbezeichnungen (M-O) [nach EU-Verordnung Nr. 678/2011]

Das U-Shift Konzept mit den Wechselaufbauten kann in keine dieser Klassen eingruppiert werden. Es besteht die Möglichkeit, das U-Shift Konzept durch eine eigene Klasse zu beschreiben oder das Konzept in eine ggf. dem U-Shift ähnliche, sehr kleine und spezifische bestehende Unterklasse einzugruppiert. Um überhaupt für den öffentlichen Straßenverkehr zugelassen werden zu können, muss das U-Shift-Konzept die Anforderung der StVZO erfüllen.⁸⁶ Diese beinhaltet unterschiedliche Themen wie B. Fahrzeuge, I. Zulassung von Fahrzeugen im Allgemeinen, II. Betriebserlaubnis und Bauartgenehmigung, III. Bau- und Betriebsvorschriften usw.

Fahrzeugklasse M ₁	EU-/EG-/EWG-Richtlinie oder Verordnung	ECE-Regelung	StVZO			
Anforderungen an die aktive Fahrzeugsicherheit (Unfallvorbeugung)						
Lenkanlagen	70/311/EWG	R 79	§ 38	Rückstrahler	76/757/EWG	R 3 § 53
Bremsanlagen	71/320/EWG	R13-H	§ 41	Umrissleuchten, Begrenzungsleuchten, Schlussleuchten, Bremsleuchten	76/758/EWG	R 7 § 51, 51b, 53
Austauschbremsbeläge	71/320/EWG	R 90	§ 22	Seitenmarkierungsleuchten	76/758/EWG	R 91 § 51a
Einrichtungen für Schallzeichen	70/388/EWG	R 28	§ 55	Fahrtrichtungsanzeiger	76/759/EWG	R 6 § 54
Sichtfeld	77/649/EWG	R 125	§ 35b	Scheinwerfer für Fern- und/oder Abblendlicht	76/761/EWG	R 1, 8, 20, 112, 113 § 50
Entfrosts- und Trocknungsanlagen für verglaste Flächen	VO (EG) 672/2010	-	§ 35b	sowie ihre Lichtquellen	76/761/EWG	R 37 § 22a
Scheibenwischer und Scheibenwischer	VO (EG) 1008/2010	-	§ 40	Gasentladungsscheinwerfer	-	R 98 -
Einrichtungen für indirekte Sicht	2003/97/EG	R 46	§ 56	sowie ihre Lichtquellen	-	R 99 -
Heizungen (Motorabwärme und Zusatzanlagen)	2001/56/EG	R 122	§ 35c	adaptive Frontscheinwerfer	-	R 123 -
Beleuchtungsanbau, Warmblinklicht	76/756/EWG	R 48	§ 49a, 53a	Nebelscheinwerfer	76/762/EWG	R 19 § 52
				Abbiegeleuchten	-	R 119 -
				Nebelschlussleuchten	77/538/EWG	R 38 § 53d

Abbildung 20: Richtlinien, Verordnungen, Gesetze (Auszug) – Fzg. im öffentlichen Straßenverkehr

Das U-Shift Fahrzeug wird gemäß nationalem Straßenverkehrsrecht behandelt. Wegen der neuartigen Bauart ist eine neue Bezeichnung der Fahrzeugart zu wählen. Die heranzuziehenden Vorschriften sind jeweils gemäß der nächstliegenden, bekannten Fahrzeugklasse zu wählen. Hierbei werden Teilumfänge

⁸⁶ http://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/ - Zugriff 11.3.2020

gemäß internationalem Recht geprüft (z. B. Anbau der lichttechnischen Einrichtungen gemäß UN R48.06, Außenkanten gemäß UN R26.03 oder Anbau des amtlichen Kennzeichens gemäß VO (EU) 1003/2010).

Wegen der neuartigen Bauart sind Abweichungen von den vorhandenen Vorschriften zu erwarten. Hier können Ausnahmegenehmigungen erteilt werden. Die Sachverhalte sind umfangreich zu beschreiben und ein angemessenes Sicherheitsniveau gemäß dem Stand der Technik ist nachzuweisen. Da gem. aktuellen Vorschriften noch ein Sicherheitsfahrer in gewissen Situationen in der Lage sein muss das Fahrzeug zu führen (Siehe hierzu auch Kapitel 5.3), ist U-Shift ohne Fahrerarbeitsplatz noch nicht realisierbar. Eine große Herausforderung des U-Shift-Fahrzeugkonzepts ist daher die temporäre Einrichtung eines Fahrerarbeitsplatzes, um das automatisierte U-Shift Konzept in der Einführungsphase in SAE Stufe 2 einzustufen.

Für U-Shift wurden auszugswise einige besondere Anforderungen ausgewählt, in einem Workshop mit dem TÜV diskutiert und vorab bewertet. Eine umfassende Betrachtung aller Vorschriften ist im Rahmen des Entwicklungsprojektes U-Shift Control vorgesehen. Die folgenden Beispiele zeigen exemplarisch, dass die entsprechenden Regelungen eingehalten werden können:

Beispiel 1: In der UNECE Regelung 125 sind die einheitlichen Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich des Sichtfeldes des Fahrzeugführers nach vorne definiert.⁸⁷ Wichtig sind hierbei u.a. die Größe der A-Säule und deren Verkleidung (Abbildung 21).

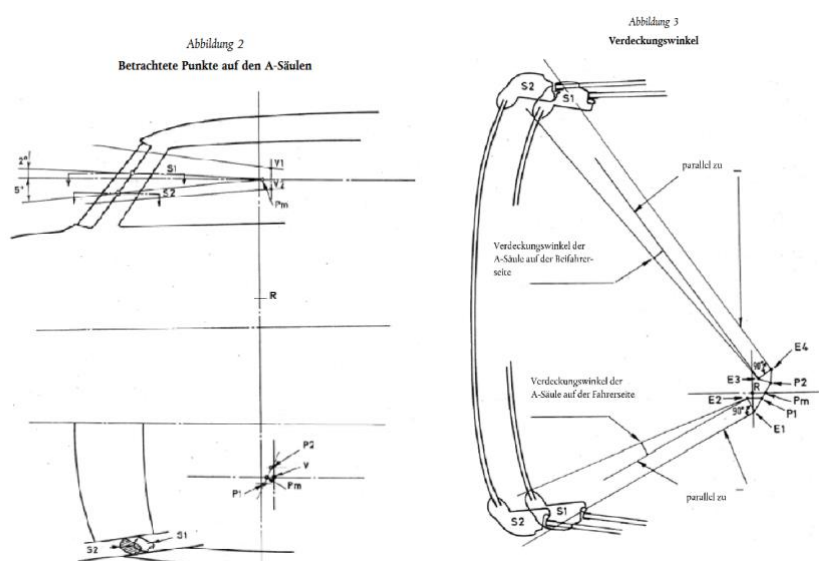


Abbildung 21: Gesetzliche Normen zu Sitzstrahlen für den Fahrzeugfahrerarbeitsplatz⁸⁸

Beispiel 2: Das U-Shift-Konzept verfügt wie in Abbildung 22 a) dargestellt derzeit nicht über einen Fahrerarbeitsplatz nach den gesetzlichen Vorgaben, wie eine Anpassung aussehen könnte ist in b) visualisiert. Für die Zulassung im geringen Geschwindigkeitsbereich könnte die Fahrfunktion des Fahrzeugführers auch von außerhalb des Fahrzeugs ausgeführt werden. Bei einer Zulassung für höhere Geschwindigkeiten > 50 km/h sind die seitliche Sitz-Konfiguration und die fehlenden Rückhaltesysteme kritisch zu bewerten. Im aktuellen Fahrzeugbestand (also z.B. heute in öffentlichen Verkehr eingesetzte Busse) sind diese Rückhaltesysteme noch nicht vorhanden, dies muss aber für neue Fahrzeuge erfüllt werden.

⁸⁷ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42018X0116&from=ES> – Zugriff 11.3.2020

⁸⁸ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42018X0116&from=ES> – Zugriff 11.3.2020

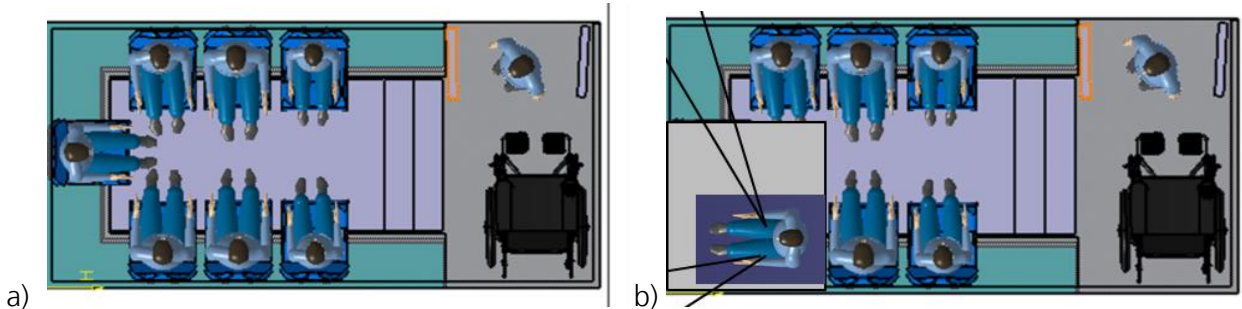


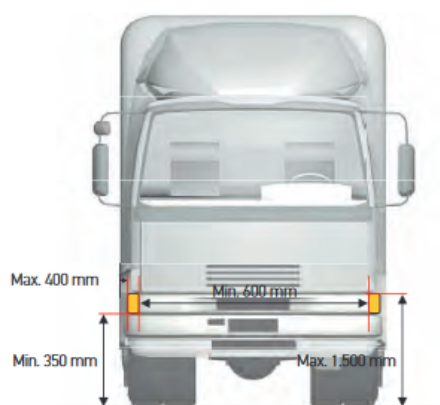
Abbildung 22: a) U-Shift-Konzept ohne Fahrerarbeitsplatz für Vision SAE 5;
 b) U-Shift-Konzept mit Fahrerarbeitsplatz für SAE 2 und Vision SAE 5

Beispiel 3: Ferner sind auch alle üblichen Anforderungen an z.B. die Scheinwerferlage oder den Einbau der Blinker mit dem U-Shift-Konzept zu erfüllen. Bei U-Shift werden die fahrzeugseitig notwendigen Sensoren für die Automatisierung in die Beleuchtung integriert. Bei dieser Neuentwicklung werden alle hierfür gültigen Vorschriften (siehe Abbildungen 22 und 23) erfüllt.

Scheinwerfer für Abblendlicht ECE-R48 § 6.2, ECE-R98 und ECE-R112 (ECE-R123 hat weitere besondere Bedingungen)	
Anbringung ECE-R48 § 6.2.1	Vorgeschrieben für alle Kfz.-Klassen.
Anzahl ECE-R48 § 6.2.2	2 Stück
Farbe ECE-R48 § 5.15	Weiß
Anbaubreite ECE-R48 § 6.2.4.1	Max. 400 mm vom äußersten Punkt der Fahrzeugbreite. Min. 600 mm zwischen beiden Abblendscheinwerfern. Min. 400 mm, wenn die Fz.-Gesamtbreite < 1.300 mm ist (gilt nicht für M ₁ - und N ₁ -Fz.).
Anbauhöhe ECE-R48 § 6.2.4.2	Min. 500 mm, max. 1.200 mm, max. 1.500 mm an N ₃ G-Fz.
Geom. Sichtwinkel ECE-R48 § 6.2.5	Horizontal 10° nach innen und 45° nach außen. Vertikal 15° nach oben und 10° nach unten.
Elektrische Schaltung ECE-R48 § 6.2.7	Beim Einschalten des Fernlichts darf das Abblendlicht anbleiben.
Einschaltkontrolle ECE-R48 § 6.2.8	Zulässig
Sonstige Vorschriften ECE-R48 § 6.2.9	Bei LED-Scheinwerfern muss eine automatische Leuchtweitenregelung verbaut sein. Sind die Scheinwerfer mit Lichtquellen > 2.000 Lumen (in der Regel Xenon) ausgestattet, müssen eine automatische Leuchtweitenregelung und eine Scheinwerfer-Reinigungsanlage verbaut sein. 2 zusätzliche Kurvenlichter sind zulässig.

Abbildung 23: Einbauvorschrift Scheinwerfer für Abblendlicht⁸⁹

⁸⁹ https://www.hella.com/hella-com/assets/media_global/673_Gesetzliche_Vorschriften_Broschuere_HELLA_DE.pdf



Vorderer Fahrtrichtungsanzeiger (Blinkleuchte) ECE-R48 § 6.5 und ECE-R6	
Anbringung ECE-R48 § 6.5.1	Vorgeschrieben für alle Kfz.-Klassen. Kategorie 1, 1a oder 1b.
Anzahl ECE-R48 § 6.5.2	2 Stück
Farbe ECE-R48 § 5.15	Gelb
Anbaubreite ECE-R48 § 6.5.4.1	Max. 400 mm vom äußersten Punkt der Fahrzeugbreite. Min. 600 mm zwischen beiden Blinkleuchten, jedoch min. 400 mm bei Fahrzeugbreiten < 1.300 mm.
Anbauhöhe ECE-R48 § 6.5.4.2	Min. 350 mm, max. 1.500 mm (Ausn.: 2.100 mm)*.
Geom. Sichtwinkel ECE-R48 § 6.5.5	Horizontal 45° innen bis 80° außen, Vertikal ±15°, jedoch bei Anbauhöhe < 750 mm auch 5° nach unten (und 20° nach Innen bei M ₁ -Fz. und N ₁ -Fz.)
Elektrische Schaltung ECE-R48 § 6.5.7	Das Aufleuchten muss unabhängig von anderen Leuchten erfolgen (außer anderen Blinkleuchten). Alle Blinkleuchten sind auf der gleichen Fahrzeugseite durch dieselbe Betätigungseinrichtung zum Aufleuchten und Erlöschen zu bringen. Sie müssen synchron blinken.
Einschaltkontrolle ECE-R48 § 6.5.8	Vorgeschrieben
Sonstige Vorschriften ECE-R48 § 6.5.9	Eine Fehlfunktion des Fahrtrichtungsanzeigers muss im Fahrzeug signalisiert werden.

Abbildung 24: Einbauvorschrift für vorderer Fahrtrichtungsanzeiger⁹⁰

Die erste gemeinsame Analyse der Fahrzeugzulassung zusammen mit dem TÜV zeigt, dass es für das U-Shift Fahrzeug keine besonderen Zulassungshemmnisse gibt, die über die üblichen Forderungen hinausgehen. Grundsätzlich kann U-Shift in einem realistisch übersehbaren Einsatzszenario (z.B. Use-Case 2) heute schon problemlos als Sonderfahrzeug zugelassen werden, auch in den dafür notwendigen Stückzahlen. Eine Fahrzeugklassenzuordnung oder sogar eine Klassenerweiterung gem. EU-Recht ist nicht erforderlich. Es müssen, wie bei allen Fahrzeugen, zuerst die entsprechenden nationalen Zulassungsvorschriften erfüllt werden. Eine Auflistung und Kurzbewertung aller Unterparagrafen ist in der Anlage aufgeführt

6 Machbarkeit Wirtschaftlichkeit

In den folgenden Analysen werden die ökonomischen Nutzen und Kosten des Fahrzeugkonzeptes U-Shift in Kombination mit verschiedenen Automatisierungsarchitekturen untersucht und gegenübergestellt. Die Analysen erfolgen anhand der Anwendungsfälle 1-3 (Kapitel 3) zum einen auf betriebswirtschaftlicher und zum anderen auf volkswirtschaftlicher Ebene. Dabei sind nicht alle möglichen Kombinationen aus Use-Case, Sensor-Setup, Fahrzeugflotte und Berechnungsmethode sinnvoll. Zum Beispiel ist für den Pilot Use-Case 1, bei der eine Hub2Hub Belieferung auf einer einzigen konkreten Strecke erfolgt, kein volkswirtschaftlicher Effekt zu erwarten. An dieser Stelle werden nur betriebswirtschaftliche Größen untersucht. Vielmehr ist der Vergleich zwischen dem Status Quo und der U-Shift Flotte von Interesse. Im Use-Case 2 ist die zeitliche Dynamik durch einen Roll-Out Plan gegeben. Dadurch wird eine möglich Einführung der U-Shift Flotte in den Markt unter verschiedenen Automatisierungskonzepten untersucht. Bei der visionären Annahme eine komplette Stadt vollumfänglich mit automatisierten U-Shift Fahrzeugen auszustatten wird abschließend in Use-Case 3 das volkswirtschaftliche Potential des

⁹⁰ https://www.hella.com/hella-com/assets/media_global/673_Gesetzliche_Vorschriften_Broschuere_HELLA_DE.pdf

Konzeptes untersucht. Tabelle 5 stellt die Kombinationen vor, die in den folgenden Kapiteln eingehend untersucht werden.

Da die Use-Cases 1 und 2 beide betriebswirtschaftlich (BWL) untersucht werden, nutzen sie dieselben bzw. ähnliche Annahmen. Der dritte Anwendungsfall wird volkswirtschaftlich (VWL) auf Basis einer Kosten-Nutzen Analyse analysiert. Die Daten und Annahmen sowie das methodische Vorgehen sind im Anhang aufgeführt. In den folgenden Abschnitten werden vorwiegend die Ergebnisse der Analysen, nach Use Cases sortiert, behandelt.

Tabelle 5: Übersicht über die Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalysen verschiedener Use-Cases

	Use-Case 1	Use-Case 2	Use-Case 3
Bezeichnung	Pilot – „Dachser2L’Oréal“	Roll-Out – „Vaihin- gen“	Vision 2040 – „Stutt- gart“
Betrachtete Fahrzeuge	U-Shift Prototyp, U-Shift Vision, Status Quo	U-Shift Vision	U-Shift Vision, Status Quo
Betrachtete Automatisierung	U-Shift: AD, PMAD, MAD Status Quo: SAE Level 2	U-Shift: AD, PMAD, MAD	U-Shift Vision: MAD, AD Referenzfahrzeuge: SAE2/3
Zeithorizont	Statisch für das Jahr 2025, keine Ausbaus- strategie	Dynamisch mit Aus- baustrategie (Roll- Out) von 2030 bis 2040	Statisch für das Jahr 2040
Wirtschaftliche Bewertung	BWL	BWL	VWL
Verfahren der Wirtschaftlichkeitsrechnung (BWL)	Statischer Kosten und Ertragsvergleich	Dynamisches Kapi- talwertverfahren über die Zeit	entfällt
Verfahren der gesamtwirt- schaftlichen Bewertung	entfällt	entfällt	Kosten-Nutzen Analy- se
Granularität	Detaillierte Betrach- tung	Fokus auf zeitliche Entwicklung (gröber)	Aggregierte Effekte einer flächendecken- den Implementierung

6.1 Use Case 1: Pilot

Ziel der Analyse ist es die betriebswirtschaftliche Vorteilhaftigkeit eines Vorhabens zu zeigen. Für die Anwendungsfälle 1 und 2 wird die Kapitalwertmethode angewandt. Dies ist ein Verfahren der dynami- schen Investitionsrechnung und berücksichtigt Ein- sowie Auszahlungen über mehrere Perioden hin- weg. Das Vorgehen zur Erstellung des Wirtschaftlichkeitsmodells ist in Abbildung 25 dargestellt. Die Methodik und Formel der Kapitalwertmethode sowie eine Erklärung des Vorgehens werden im Anhang beschrieben.

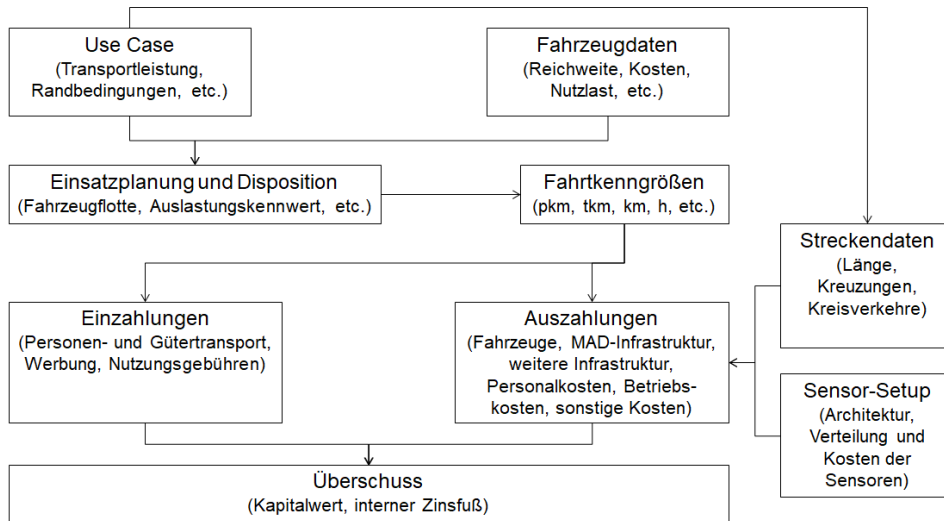


Abbildung 25: Methodisches Vorgehen bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Für den Anwendungsfall 1, der Pilot-Einsatz von U-Shift als Hub2Hub Transport, wird die Status Quo-Fahrzeugflotte, bestehend aus einem 40t-Wechselbrückenzug und einem Großraumtaxi, mit U-Shift verglichen. U-Shift wird dabei unter verschiedenen Automatisierungskonzepten AD, PMAD, MAD betrieben. U-Shift sowie die Automatisierungskomponenten werden als Prototypen mit den entsprechend hohen Kosten kalkuliert. Im Referenzszenario erbringen ein 40t-Wechselbrückenzug und ein Großraumtaxi die erforderliche Transportleistung (Status Quo). Für dieselbe Leistung werden ein U-Shift Driveboard in Kombination mit einer Personenkapsel und einer Güterkapsel benötigt.

Für die Analyse dieses Use-Cases wird eine vereinfachte Form der Kapitalwertrechnung angewandt. Dies ist möglich, da einerseits gemäß Tabelle 5 eine statische Analyse erfolgt, d.h. nur ein einziges Jahr wird betrachtet. Da keine zukünftigen Zahlungen existieren, die abgezinst werden müssen, leitet sich aus Formel [1] ab.

$$C_0 = E_0 - A_0, \text{ mit } L_0 = 0 \tag{1}$$

Andererseits sind die Einnahmen aus dem Personen-, sowie dem Gütertransport für alle Szenarien⁹¹ dieselben. Damit bleibt zuletzt der reine Kostenvergleich. Für eine konsistente Analyse beider Use-Cases werden aber neben den Auszahlungen auch die Einzahlungen sowie der Überschuss des Anwendungsfalles aufgeführt. Der Überschuss entspricht in diesem speziellen Fall dem Kapitalwert.

In Tabelle 6 werden zunächst alle Einzahlungen aufgeführt, die durch die Beförderung der Warenströme sowie des Betriebs als Personenshuttle zu dem jeweiligen Schichtbeginn bzw. -ende (Anhang D) generiert werden. Die Werte sind für alle Fahrzeugflotten konstant.

Tabelle 6: Einzahlungen im Zeitraum 01/2025-12/2025, in €₂₀₂₅

	Wert
Gütertransport	382 Tsd. €
Personentransport	22 Tsd. €
Summe	404 Tsd. €

⁹¹ Als Szenario wird die Durchführung desselben Use-Cases mit verschiedenen Fahrzeugflotten verstanden.

Die Auszahlungen, bestehend aus Investitionskosten sowie Betriebs- und Personalkosten (Anhang D), unterscheiden sich für die verschiedenen Szenarien allerdings gravierend. Diese sind in Abbildung 26 aufgeführt. Die Investitionskosten für das prototypische U-Shift Driveboard und die Kapseln (Anhang D) sind deutlich höher als der Listenpreis der Referenzfahrzeuge, da in diese Kosten auch Forschungs- und Entwicklungsaufwand einfließen. Bei PMAD und AD müssen neben den Driveboards die Kapseln mit Automatisierungskomponenten (v.a. Sensorik) ausgestattet werden, da der Kapselüberhang das Sichtfeld der Driveboard-Sensoren verdeckt. Daher sind die Fahrzeuginvestitionskosten bei MAD geringer. Dagegen müssen hohe Anfangsinvestitionen für den MAD-Infrastrukturausbau in MAD und PMAD getätigt werden. Diese Infrastruktur verursacht auch die Differenz bei den Betriebskosten von AD zu PMAD bzw. MAD. Die Personalkosten sind bei U-Shift höher, da das Driveboard länger im Einsatz ist als das Referenzfahrzeug und daher die Lagerarbeiter im Dreischichtbetrieb arbeiten müssen.

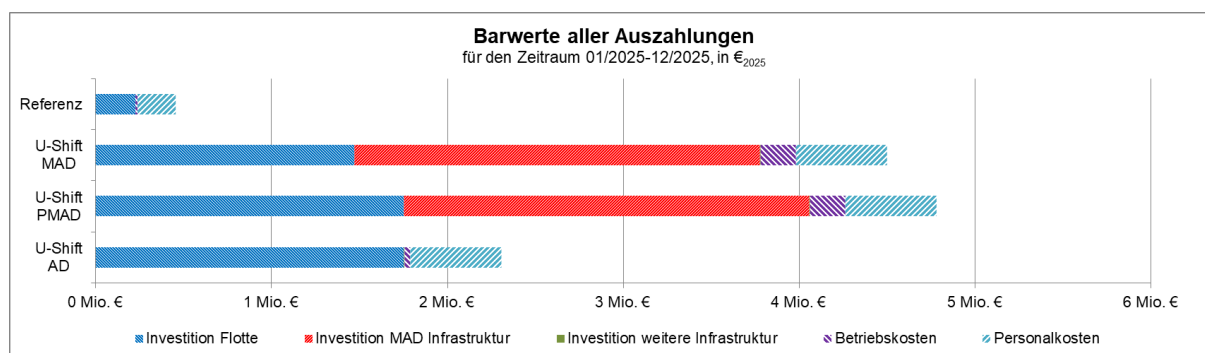


Abbildung 26: Vergleich der Auszahlungen (Barwerte im Zeitraum 01/2025-12/2025, in €₂₀₂₅)

Aus den Ein- und Auszahlungen wird in Tabelle 7 der Überschuss für das Jahr 2025 berechnet. Nach Formel [1] ergibt sich für keines der Szenarien ein Überschuss. Der Referenzfall besitzt allerdings den geringsten Verlust. Außerdem scheint das Automatisierungskonzept AD vorteilhafter als PMAD oder MAD. In Use-Case 2 wird untersucht, ob dies auch bei größeren Stückzahlen und über mehrere Perioden hinweg der Fall ist.

Tabelle 7: Überschuss im Zeitraum 01/2025-12/2025, in €₂₀₂₅

	Referenz	U-Shift AD	U-Shift PMAD	U-Shift MAD
Einzahlungen	0,40 Mio. €	0,40 Mio. €	0,40 Mio. €	0,40 Mio. €
Auszahlungen	-0,46 Mio. €	-2,31 Mio. €	-4,78 Mio. €	-4,50 Mio. €
Überschuss	-0,06 Mio. €	-1,95 Mio. €	-4,38 Mio. €	-4,10 Mio. €

Die anfänglichen Investitionskosten für die U-Shift Flotte und für die MAD Infrastruktur führen bei der Betrachtung für ein einziges Jahr zu hohen Verlusten. Erst bei einer Betrachtung über mehrere Perioden hinweg wie Use-Case 2 werden diese kompensiert. Da U-Shift in diesem Use-Case als Prototyp eingeführt wird, war dieses Ergebnis zu erwarten. Die Umsetzung im Use-Case 1 dient zur Entwicklung der Kalkulationsmodelle und sollte vor allem die technische Machbarkeit und weniger den ökonomischen Nutzen zeigen. Dies ist auch die Intention der Standortleiter der beiden Logistikhubs in diesem angestrebten Demonstrationsprojekt: Die Erprobung eines innovativen Fahrzeug- und Automatisierungskonzept und das Ableiten des Potentials für ein Roll-Out im urbanen Bereich.

6.2 Use-Case 2: Roll-Out

Im zweiten Anwendungsfall werden drei Szenarien betrachtet. Allen werden die U-Shift Fahrzeuge und Kapseln zugrunde gelegt. Ein Status Quo Fahrzeug als Referenz wird in diesem Fall nicht betrachtet. Die Szenarien unterscheiden sich in dem Automatisierungskonzept, AD, PMAD oder MAD, unter dem die Fahrzeuge betrieben werden. Diese Analyse zielt damit vor allem auf den detaillierten ökonomischen Vergleich der unterschiedlichen Automatisierungsarchitekturen ab.

Für die Analyse wird ein Roll-Out Plan (Anlage A) herangezogen. Basierend darauf werden jährlich alle anfallenden Personenströme und Güterströme ermittelt: zum einen Mithilfe von GIS-Analysen (Geoinformationssystem) und zum anderen mit den Verkehrsprognosedaten der Verkehrsregion Stuttgart. In Anhang D werden die Ansätze beispielhaft erläutert und die Annahmen quantifiziert. Im Folgenden werden die verschiedenen Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse vorgestellt und interpretiert:

In Abbildung 27 sind die Barwerte der Auszahlungen nach Kostenkategorien aufgeführt. Dazu wurden die jährlichen Auszahlungen auf das Jahr 2030 abgezinst und addiert. Es wird deutlich, dass sich die Auszahlungen in den drei Szenarien vor allem in den Investitionskosten unterscheiden. So sind die einzelnen Driveboards bei AD teurer, die MAD Infrastruktur bei PMAD sowie MAD bedeutet aber eine deutlich höhere Anfangsinvestition. Die Betriebskosten unterscheiden sich nur marginal. Bei MAD ist der Energieverbrauch der Fahrzeuge niedriger, der Verbrauch der MAD Infrastruktur wird allerdings addiert. Dagegen ist der Verbrauch der AD-Driveboards höher, was sich mit der steigenden Anzahl der Fahrzeugkilometer entsprechend auswirkt.

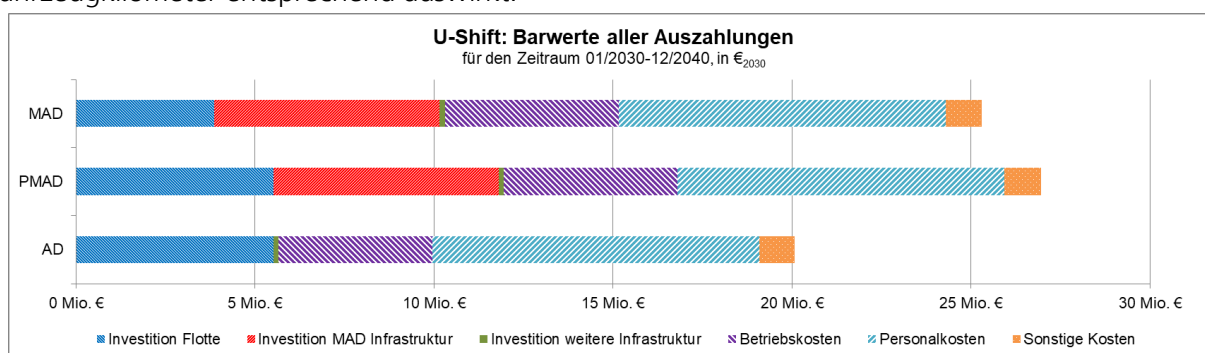


Abbildung 27: Vergleich der Auszahlungen (Barwerte im Zeitraum 01/2030-12/2040, in €₂₀₃₀)

Die Einnahmen durch den Transport von Personen, Gütern (aus Paletten bzw. in Gitterrollwägen) und Paketen (Betriebsgrößen s.o.) unterscheiden sich nicht. Auch die Einnahmen durch die Vermietung der Driveboards und v.a. Kapseln als Werbeflächen führt bei allen Szenarien zu denselben Einnahmen. Bei den beiden Szenarien, bei denen Strecken mit MAD-Infrastruktur ausgebaut wurden, werden aber zusätzliche Einnahmen generiert: Gebühren Dritter für die Nutzung der Infrastruktur (ähnliches Prinzip bei einer Maut). In Anhang D sind die Kalkulationsdaten die den Einnahmen zugrunde liegen beschrieben.

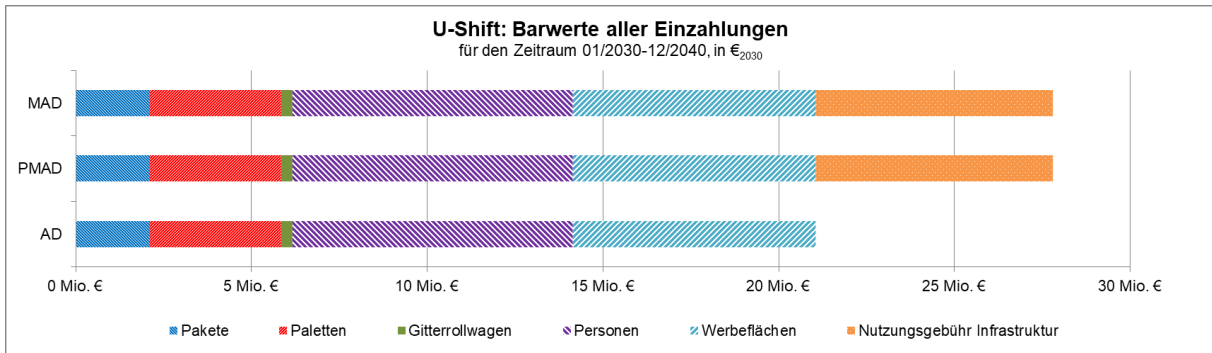


Abbildung 28: Vergleich der Einzahlungen (Barwerte im Zeitraum 01/2030-12/2040, in €₂₀₃₀)

Abbildung 29 stellt die jährlichen Überschüsse (keine Barwerte!) dar. Eine überlagerte Kurve gibt die kumulierten Werte wieder. Die Darstellung zeigt die Dynamik des Roll-Out Plans: vor allem die Kurven der Überschüssen von PMAD und MAD variieren stark. Dies ist auf die fortlaufende Investition in die Erschließung neuer Stadtgebiete bzw. Einsatzzwecke (Anhang A) und den damit verbundenen Infrastrukturausbau zurückzuführen. Die AD-Überschuss-Kurve ist dagegen deutlich weniger volatil. Die Zahlungsströme sind in dieser Darstellung nicht auf ein bestimmtes Jahr abgezinst, sondern stellen den Wert im jeweiligen Jahr dar. Das bedeutet auch, dass positive Überschüsse in Abbildung 29 nicht auf einen positiven Kapitalwert schließen lassen. Dieser ist vielmehr die Summe der abgezinsten jährlichen Überschüsse und wird in Tabelle 8 eingeführt (Anhang D).

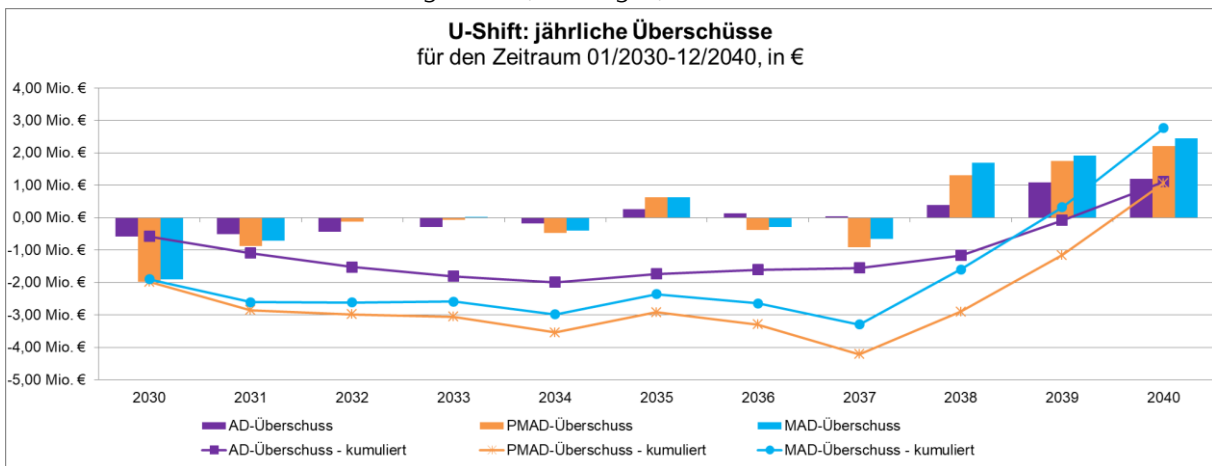


Abbildung 29: Verlauf der jährlichen Überschüsse

In Tabelle 8 sind die Barwerte der Ein- und Auszahlungen des zweiten Anwendungsfalls für die jeweiligen Szenarien, U-Shift AD, PMAD und MAD, aufgeführt. Aus der Differenz ergibt sich der Kapitalwert des Investitionsvorhabens (Formeln im Anhang). Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass der Kapitalwert für alle Ansätze unter diesen Rahmenbedingungen und Annahmen nach 10 Jahren positiv und damit betriebswirtschaftlich sinnvoll ist. Die Kombination aus U-Shift mit einer MAD-Architektur hat den höchsten Kapitalwert und ist demzufolge das zu verfolgende Investitionsvorhaben.

Tabelle 8: Barwerte aller Zahlungen im Zeitraum 01/2030-12/2040, in €₂₀₃₀ (Basisszenario)

	AD	PMAD	MAD
Einzahlungen	21,06 Mio. €	27,81 Mio. €	27,81 Mio. €

Auszahlungen	-20,06 Mio. €	-26,94 Mio. €	-25,29 Mio. €
Kapitalwert	1,00 Mio. €	0,87 Mio. €	2,52 Mio. €

Mit den Angaben zu der Amortisationsdauer in Tabelle 9 wird der Zeitpunkt bestimmt, ab dem der Kapitalwert erstmals größer als Null ist. Demnach war das MAD Szenario bereits nach 9 Jahren betriebswirtschaftlich sinnvoll, PMAD und AD exakt nach dem betrachteten Zeithorizont von 10 Jahren.

Tabelle 9: Amortisationsdauer der Systeme in Anwendungsfall 2 im Basisszenario

Architektur	AD	PMAD	MAD
Amortisationsdauer [Jahre]	10	10	9

Werden nur die Kosten verglichen, die direkt mit den Automatisierungsarchitekturen zusammen hängen, ergibt sich der in Abbildung 30 dargestellte Kostenverlauf. Dafür werden die bisherigen Kosten und Annahmen genutzt und basierend für das im Jahr 2040 ausgebaute Streckennetz in Vaihingen eine Analyse durchgeführt. Die Anzahl der Driveboards bzw. allgemeiner, der automatisierten Fahrzeuge, bildet dabei die Variable. Die Kosten setzen sich aus den Investitionskosten bzw. Anschaffungskosten für die Driveboards sowie die MAD-Infrastruktur (sofern vorhanden) zusammen. Zusätzlich werden die Wartungs- und Energiekosten eingerechnet, da sich diese in den jeweiligen Automatisierungsansätzen ebenfalls grundlegend unterscheiden. Ziel der Analyse ist es herauszufinden, ab welcher Anzahl an Driveboards die Automatisierungskosten je Driveboard bei der PMAD- bzw. MAD-Architektur günstiger sind als bei dem AD-Ansatz. Diese Untersuchung stützt damit die einleitende Hypothese in Abbildung 3.

Die Flotte besteht dabei aus x Driveboards ($x \geq 1$) und anteilig eingerechneten Kapseln. Diese werden auf Basis des Driveboard zu Kapsel Verhältnis im Jahr 2040 berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 30 visualisiert und zeigen einen Schnittpunkt zwischen 115 und 116 Driveboards für den Vergleich von AD und MAD. Die Kurven für AD und PMAD konvergieren nur sehr langsam – der Schnittpunkt wird bei ca. 2.500 Driveboards berechnet. Die Kurven von PMAD und MAD divergieren, d.h. die Kosten von PMAD werden stets höher sein als die bei MAD.

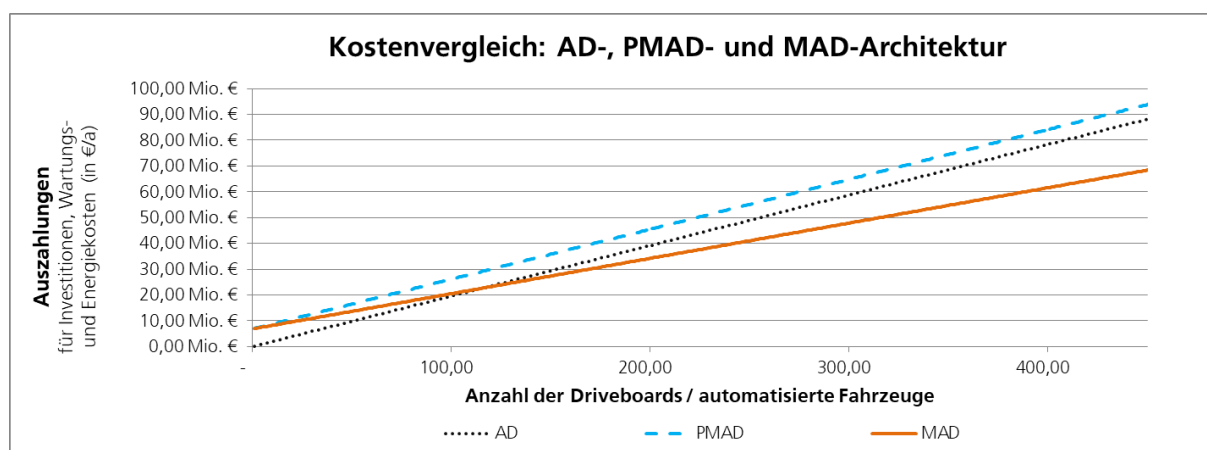


Abbildung 30: Kostenvergleich unterschiedlicher Automatisierungsarchitekturen (AD, PMAD, MAD)

Abschließend werden die Sensitivitäten der Kapitalwertrechnung für den zweiten Anwendungsfall untersucht. Dazu werden die Kapitalwerte der einzelnen Szenarien bei der Veränderung verschiedener Pa-

parameter berechnet. Durch den Vergleich mit der Ausgangssituation, der Basis, wird die prozentuale Änderung ersichtlich. Das Investitionsvorhaben, das unter den jeweiligen Annahmen betriebswirtschaftlich am sinnvollsten ist, wird hervorgehoben. Die Analyse ist in Tabelle 10 dargestellt.

Vor allem die Anschaffungskosten der MAD-Infrastruktur und deren Energieverbrauch sind empfindliche Parameter für die Vorteilhaftigkeit der MAD-Architektur gegenüber dem AD-Ansatz. Ähnliches gilt für PMAD. Für den AD-Ansatz bilden die Anschaffungskosten der Driveboards einen kritischen Faktor. Der Kalkulationszinssatz ist eine entscheidende Größe der Kapitalwertmethode und kann diese signifikant verändern. In dem Basisszenario wurde mit einem Zinssatz von 0,5%⁹² gerechnet. Aber auch bei $i = 2,5\%$ sind die PMAD- und MAD-Ansätze wirtschaftlich noch sinnvoll.

Tabelle 10: Sensitivitätsanalyse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für den Use-Case 2

Parameter	Faktor	Kapitalwert C_0 [in Mio. € ₂₀₃₀] ⁹³		
		AD	PMAD	MAD
Basisszenario	-	0,99	0,87	2,52
Kalkulationszinssatz i	x5 (i=2,5%)	0,23 (-77%)	-0,28 (-132%)	1,22 (-52%)
	x20 (i=10%)	-1,49 (-251%)	-2,93 (-437%)	-1,84 (-173%)
Einzahlungen	-30%	-5,32 (-637%)	-7,47 (-959%)	-5,82 (-331%)
	+30%	7,31 (638%)	9,21 (959%)	10,87 (331%)
Auszahlungen	-30%	7,01 (608%)	8,95 (929%)	10,11 (301%)
	+30%	-5,02 (-607%)	-7,21 (-929%)	-5,06 (-301%)
Personalkosten	-30%	3,75 (279%)	3,62 (316%)	5,28 (110%)
	+30%	-1,76 (-278%)	-1,88 (-316%)	-0,23 (-109%)
Anschaffungskosten Driveboard	x1/5	3,00 (203%)	2,87 (230%)	3,71 (47%)
	x5	-9,03 (-1.012%)	-9,16 (-1.153%)	-3,42 (-236%)
Anschaffungskosten Sensoreinheit Typ A	x1/5	0,99 (0%)	5,93 (582%)	7,59 (201%)
	x5	0,99 (0%)	-24,46 (-2.911%)	-22,80 (-1.005%)
Energieverbrauch MAD Infrastruktur	X1/5	0,99 (0%)	1,21 (39%)	2,87 (14%)
	x5	0,99 (0%)	-0,85 (-198%)	0,80 (-68%)
Einnahmen durch MAD-Nutzung	x1/5	0,99 (0%)	-4,54 (-622%)	-2,88 (-214%)
	X5	0,99 (0%)	27,9 (3.107%)	29,55 (1.073%)

In Use-Case 2 wurde ein dynamischer Verlauf der Wirtschaftlichkeit über eine Zeitspanne von 10 Jahren untersucht. In dieser wurde kontinuierlich ein Stadtgebiet durch Infrastruktursensorik ausgerüstet und so nach und nach neue Einsatzzwecke erschlossen. Die Wirtschaftlichkeit von U-Shift in Kombination mit MAD wurde an diesem Anwendungsfall gezeigt. Nach 9 Jahren war der Kapitalwert des Investitions-

⁹² Nach Bundesfinanzministerium, „Kalkulationszinssätze für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen“, 12. April 2019, www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Oeffentliche_Finzen/Bundeshausalt/personalkostensatze.html.

⁹³ In Klammern: Prozentuale Veränderung zum Basisszenario.

titionsvorhabens aus U-Shift und MAD-Architektur positiv, und damit betriebswirtschaftlich sinnvoll. Dabei zeigte sich, dass sich das Ergebnis verbessert je höhere die Stückzahl der Driveboards ist.

Für die Unterstützung der Hypothese in Kapitel 2.2.1 werden die Kosten untersucht, die die Automatisierungsarchitekturen betreffen. Dazu werden die Kosten für die MAD-Infrastruktur, die Driveboards und die Betriebskosten der Infrastruktur und der Driveboards betrachtet. Nach dieser Analyse sind die Kosten für den PMAD-Ansatz ab ca. 2.500 Driveboards niedriger als bei AD. Für MAD wird der Punkt bereits ab 115 Driveboards erreicht. Diese Aussagen basieren auf den Randbedingungen des Use-Case 2.

Ein erstes Modell der Wirtschaftlichkeitsanalyse anhand der Kapitalwertmethode ist hiermit erstellt. Damit der Anwendungsfall besser realen bzw. zukünftigen Bedingungen aus der Praxis entsprechen, muss der Roll-Out Plan zusammen mit externen Stakeholdern aus Stadtplanung, Speditionsbranche, ÖPNV, Paketdienste etc. diskutiert werden. Für einen besseren Vergleich mit dem Status Quo muss außerdem die Implementation einer Referenzflotte erfolgen.

Die Strecken des Roll-Outs werden bisher manuell bzw. nur zum Teil mit GIS-Tools analysiert. Für eine höhere Genauigkeit müssen die Strecken automatisiert mittel GIS ausgewertet und in Simulationsprogramme eingepflegt werden. Davon ausgehend wird die Disposition, bzw. die Verteilung der Kapseln auf die Driveboards erfolgen. Durch den Einsatz einer Logistiko Optimierung (Lösen des Vehicle Routing Problems) kann das Verhältnis von Driveboard zu Kapseln vermutlich erhöht werden, und die Effizienz des System gesteigert werden.

Außerdem kann das Kalkulationsmodell um weitere Analysen erweitert werden: Beispielweise um die Methode des „internen Zinsfuß“, welche angibt zu welchem Kalkulationszinssatz der Kapitalwert erstmals positiv ist. Zuletzt sollte neben der rein ökonomischen, auch noch eine ökologische bzw. gesellschaftliche Bewertung der Systeme erfolgen. Zum Beispiel anhand einer Ökobilanzierung.

6.3 Use Case 3: Vision 2040

Anwendungsfall 3 ist eine Vision für einen flächendeckenden Einsatz von U-Shift im Stadtverkehr im Jahre 2040 (siehe Kapitel 3 und Anhang A für Details). In dieser Vision wird der innerstädtische Gütertransport durch U-Shift Fahrzeuge abgedeckt. *Urban consolidation centres* sollen dafür an den Stadträndern entstehen, wo Güter von Lastwagen auf U-Shift Fahrzeuge umgeladen werden, um eine effiziente und umweltfreundliche Lösung der letzten Meile zu ermöglichen. Während der Hauptverkehrszeiten morgens und abends werden die Driveboards für den Transport von Personen in Form eines Ride-Sharing Systems genutzt.

Autonomen Fahrzeugen werden Potentiale zur Verbesserung der Verkehrssicherheit zugeschrieben.⁹⁴ Falls diese in einem geteilten Mobilitätssystem eingesetzt werden, könnten zusätzlich CO₂-Emissionen und Luftschadstoffe gesenkt werden.⁹⁵ Anwendungsfall 3 dient dazu, diese gesamtwirtschaftlichen Wirkungen der Einführung von U-Shift mithilfe einer Kosten-Nutzen Analyse zu bewerten. Dabei werden die Investitionskosten, Betriebskosten, Verkehrssicherheit, Klimawirkung und Schadstoffemissionen quantifiziert und mit dem heutigen Mobilitätssystem verglichen.

Die Studie führt die Kosten-Nutzen Analyse exemplarisch anhand der Einführung von U-Shift in Stuttgart durch. Dabei werden zwei mögliche Varianten bezüglich der Sensorausstattung berücksichtigt: inf-

⁹⁴E-Mobil BW, 2017, Automatisiertes Fahren im Personen- und Güterverkehr. Auswirkungen auf den Modal-Split, das Verkehrssystem und die Siedlungsstrukturen.

⁹⁵ Universität Stuttgart Institut für Straßen- und Verkehrswesen, 2016, MEGAFON (Modellerggebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs), Schlussbericht.

rastrukturbasiert (MAD) und fahrzeugbasiert (AD) (siehe Kapitel 4.4 für eine Beschreibung der Sensorausstattungen). Beide Varianten werden mit einem Referenzszenario verglichen. Die Kosten-Nutzen Analyse bewertet und vergleicht dementsprechend die folgenden drei Szenarien:

- **Vision 2040 – U-Shift MAD:** 2040 wird die gesamte Güterverkehrsnachfrage in Stuttgart durch U-Shift Fahrzeuge abgedeckt. Zusätzlich wird U-Shift über ein Ride-Sharing-System während der Hauptverkehrszeiten für den Personentransport genutzt. Dadurch wird ein Teil des MIV ersetzt, was unter anderem zu einer Reduktion des Besitzes von Personenkraftwagen (Pkw) führt. Es wird von einer infrastrukturbasierten Automatisierung (MAD) ausgegangen.
- **Vision 2040 – U-Shift AD:** Wie MAD, mit dem Unterschied, dass in diesem Szenario von einer fahrzeugbasierten Automatisierung ausgegangen wird.
- **Referenzszenario 2040:** 2040 ist vergleichbar mit dem derzeit vorherrschenden Verkehrssystem in Stuttgart – basierend auf motorisiertem Individualverkehr und privatem Güterverkehr. Die gegenwärtig stattfindende Elektrifizierung des Antriebsstrangs und der Zunahme von Fahrerassistenzsystemen wird in langsamem Tempo fortgeschrieben, so dass 2040 von einer Automatisierungsstufe SAE 3 der Bestandsflotte ausgegangen wird.

6.3.1 Methode

Die Kosten-Nutzen Analyse ist eine etablierte und weit verbreitete Methode der Ökonomie, um die ökonomischen, ökologischen und sozialen Kosten und Nutzen eines Vorhabens zu untersuchen und zu bewerten. Dabei werden alle Kosten und Nutzen berücksichtigt, unabhängig davon, welche gesellschaftlichen Akteure davon betroffen sind, bzw. profitieren. Kosten-Nutzen Analysen quantifizieren Kosten und Nutzen in monetären Einheiten, was es ermöglicht, die absolute Effizienz einer Maßnahme zu untersuchen. Im ersten Schritt werden hierfür die Wirkungen eines Vorhabens in physischen Einheiten quantifiziert (z.B. in t CO₂) und in einem weiteren Schritt in monetäre Einheiten umgerechnet (z.B. mithilfe des Faktors 230€/ t CO₂, das den monetären Wert einer Tonne CO₂ ausdrückt).

Ziel der Kosten-Nutzen Analyse in dieser Studie ist, die gesamtwirtschaftliche Vorteilhaftigkeit von U-Shift im Falle des Anwendungsfalls 3 (Einführung von U-Shift in einer Stadt, anhand des Beispiels Stuttgart) zu untersuchen. Die Beurteilung der gesamtwirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit erfolgt auf Basis der Kosten-Nutzen Differenz und dem Kosten-Nutzen Verhältnis. Demnach kann ein Vorhaben gesamtwirtschaftlich als sinnvoll betrachtet werden, wenn:

- Kosten-Nutzen Differenz > 0: die Nutzen des Projekts sind größer als dessen Kosten
- Kosten-Nutzen Verhältnis > 1: die Nutzen des Projekts sind größer als dessen Kosten und demnach gesamtwirtschaftlich sinnvoll.

Die vorliegende Studie richtet sich, soweit sinnvoll und möglich, nach den gängigen Verfahrensanleitungen (insbesondere BMVi (2016a)⁹⁶; BMVi (2016b)⁹⁷.

Wo aktuellere Studien zur Verfügung standen, wurden diese angemessen berücksichtigt. Ein Beispiel dafür sind die Kostensätze für externe Effekte, die vom Umweltbundesamt für Anwendung in Kosten-Nutzen Analysen berechnet wurden:

- Umweltbundesamt (2019). Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze. Stand 02/2019.

⁹⁶ BMVi (2016), Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im schienegebundenen öffentlichen Personennahverkehr, Version 2016

⁹⁷ BMVi (2016), Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030

Die oben genannten Verfahrensanleitungen des BMVi bieten keine ausreichende Grundlage für die Bewertung neuer Technologien, zu denen auch U-Shift gehört. Methoden für die Bewertung innovativer Technologien wurden zum Beispiel im Rahmen von Forschungsprojekten der Europäischen Kommission entwickelt, auf die in dieser Studie Bezug genommen wird:

- eIMPACT (2006), Socio-economic Impact Assessment of Stand-alone and Co-operative Intelligent Vehicle Safety Systems in Europe.

Eine wachsende Zahl von Studien befasst sich mit der Wirkungsermittlung von teil-/vollautomatisierten bis hin zu autonomen Fahrzeugen. Bestimmte Eingangsparameter dieser Studie, wie zum Beispiel die Annahme der Verbesserung der Verkehrssicherheit von autonomen Fahrzeugen, basieren auf aktuellen Studien (z.B. Mueller et al., 2020⁹⁸).

6.3.2 Kosten und Nutzen

Die Kosten-Nutzen Analyse quantifiziert für das Referenzszenario, U-Shift MAD und U-Shift AD Investitionskosten, Betriebskosten und Auswirkungen auf Verkehrssicherheit, Klimawirkung und Schadstoffemissionen, die in der folgenden Tabelle beschrieben sind.

Tabelle 11: Beschreibung der Kosten und Nutzen: Anwendungsfall 3

Kostentyp	Beschreibung	Referenz	U-Shift MAD	U-Shift AD
Investitionskosten:				
U-Shift Kapseln+Driveboards	Kosten für die Anschaffung von U-Shift Kapseln und Driveboards (anteilig für 2040).	-	Driveboard: 50.600 € Güterkapsel: 29.500 € Personenkapsel: 11.400 €	Driveboard: 85.300 € Güterkapsel: 37.500 € Personenkapsel: 14.900 €
Infrastrukturausstattung MAD	Kosten für digitale Aufrüstung der Straßeninfrastruktur, um automatisiertes Fahren zu ermöglichen. Kosten je Sensorkpaket setzen sich aus den Sensoren (RCU), RSU und Pfosten zusammen. Außerdem werden je Sensorkpaket anteilig Kosten für das Backend, Software und Glasfaseranschluss berechnet. Insgesamt ergeben sich Gesamtkosten von rund 15.000 € je Sensorkpaket.	-	Es werden rund 38.000 Sensorkpakete benötigt.	-
Pkw	Kosten für die Anschaffung von Pkw (29.000 € / Fzg); anteilig für 2040.	Es werden knapp 305.000 Pkw benötigt.	Es werden rund 235.000 Pkw benötigt.	Es werden rund 241.000 Pkw benötigt.
Lnf	Kosten für die Anschaffung von Lnf (27.000 € / Fzg.); anteilig für 2040.	Es werden rund 18.000 Lnf benötigt.	Lnf werden komplett durch U-Shift Fahrzeuge ersetzt.	Lnf werden komplett durch U-Shift Fahrzeuge ersetzt.
Snf	Kosten für die Anschaffung von Snf (107.000 € / Fzg.); anteilig für 2040.	Es werden rund 3.800 Snf benötigt.	Snf werden komplett durch U-Shift Fahrzeuge ersetzt.	Snf werden komplett durch U-Shift Fahrzeuge ersetzt.

⁹⁸ Mueller, A.S., Cicchino, J.B, Zuby, D.S., 2020, What humanlike errors do autonomous vehicles need to avoid to maximize safety? Insurance Institute for Highway Safety.

Betriebskosten:				
U-Shift Kap- seln+Driveboards	Kraftstoff-/Stromkosten, Wartungs-, Instandhaltungs- und Versicherungs- kosten für 2040.	-	✓	✓
Personal MAD	Personal für den Betrieb der Verkehrs- leitzentrale und Wartung / Instandhal- tung der digitalen Infrastruktur.	-	Wartung von rund 38.000 Sensorpa- keten.	-
Stromkosten MAD	Strombedarf, der für den Betrieb der Sensoren, sowie für die Datensamm- lung und -verarbeitung notwendig ist.	-	Betrieb von rund 38.000 Sensorpa- keten.	-
Pkw	Kraftstoff-/Stromkosten, Wartungs-, Instandhaltungs- und Versicherungs- kosten für 2040.	✓	✓	✓
Lnf		✓	-	-
Snf		✓	-	-
Gesamtgesellschaftliche Kosten und Nutzen:				
Verkehrssicherheit	Umfasst die gesamtwirtschaftlichen Kosten von Verkehrsunfällen. Sie set- zen sich zusammen aus den Scha- denskosten im Sinne von Sachschä- den, Bergungs- und Behandlungskos- ten und entgangene Wertschöpfung („Ressourcenansatz“) sowie einer ge- schätzten durchschnittlichen Zah- lungsbereitschaft der Bevölkerung für die Senkung des Risikos, bei einem Unfall zu sterben oder verletzt zu werden („Risk Value“).	✓	✓	✓
Klimawirkung	Für die Abschätzung der Klimawir- kung wurden Treibhausgasemissio- nen (Well-to-Tank und Tank-to- Wheel) berechnet. Die Monetarisie- rung folgt dem Schadenskostenan- satz, der auf der Schätzung der Höhe der Schäden basiert, die der (globa- len) Gesellschaft durch Treibhaus- gasemissionen und dem daraus resul- tierenden Klimawandel entstehen.	✓	✓	✓
Schadstoffemissionen	Die Bewertung der Gesamtemissio- nen berücksichtigt Gesundheitseffek- te sowie Gebäude-/Materialschäden. Bei ersterem wurde auch Zahlungsbe- reitschaft zur Vermeidung von immate- riellen Gesundheitsschäden (Schmerzen und Leid) berücksichtigt.	✓	✓	✓

Kosten und Nutzen werden in €2019 Werte berechnet. Als Bewertungsjahr wird 2040 festgelegt. Das heißt, die Kosten-Nutzen Analyse berücksichtigt die Investitionskosten für Fahrzeuge und Automatisierungskomponenten nicht in ihrer Gesamtsumme, sondern anteilig für das Jahr 2040 (unter Berücksichtigung der jeweiligen Lebensdauer der Investitionsgüter). Betriebskosten und Nutzen werden jeweils für das Jahr 2040 berechnet. Eine ausführliche Beschreibung der Eingangsparameter und Methode zur Berechnung enthält Anhang D. Die folgenden Abschnitte 6.3.3 und 6.3.4 geben einen Überblick über die

erwarteten verkehrlichen Wirkungen, sowie benötigte digitale Aufrüstung der Infrastruktur. Sie sind wichtige Treiber der Kosten und Nutzen und werden deshalb im Folgenden kurz erläutert.

6.3.3 Verkehrliche Wirkungen

Die Einführung von U-Shift hat das Potential, das Mobilitätssystem grundlegend zu verändern. Für diese Studie wurden Kennziffern der verkehrlichen Wirkungen für Anwendungsfall 3 berechnet (siehe Indikatoren des Verkehrs und der Fahrzeugflotte sind wichtige Eingangsgrößen für die Berechnung der Kosten und Nutzen. Diese sind in folgender Tabelle zusammengefasst. Zum Vergleich sind aktuelle Werte von „heute“ in der ersten Spalte aufgeführt.

Tabelle 12). Der hier gewählte Ansatz basiert auf Simulationen, die im Rahmen des MEGAFON Projekts⁹⁹ durchgeführt wurden, das unter anderem die verkehrlichen Wirkungen von Ride-Pooling-Diensten mit autonomen Fahrzeuge in der Region Stuttgart untersucht hat. Die Studie fokussierte der Anhang D enthält eine ausführliche Beschreibung der Methode und Eingangsparameter.

Indikatoren des Verkehrs und der Fahrzeugflotte sind wichtige Eingangsgrößen für die Berechnung der Kosten und Nutzen. Diese sind in folgender Tabelle zusammengefasst. Zum Vergleich sind aktuelle Werte von „heute“ in der ersten Spalte aufgeführt.¹⁰⁰

Tabelle 12: Kennwerte des Verkehrs und Fahrzeugflotte

Kennwert	Heute	Referenzszenario 2040	U-Shift MAD	U-Shift AD
Fahrleistung				
Pkw (km)	3.609 Mio.	3.707 Mio.	2.868 Mio.	2.936 Mio.
Lnf (km)	341 Mio.	461 Mio.	0	0
Snf (km)	39 Mio.	53 Mio.	0	0
U-Shift Personen (km)	0	0	328 Mio.	352 Mio.
U-Shift Güter (km)	0	0	1.094 Mio.	1.172 Mio.
Beförderungsleistung				
Pkw (pkm)	4.692 Mio.	4.820 Mio.	3.728 Mio.	3.817 Mio.
Lnf (tkm)	597 Mio.	807 Mio.	0	0
Snf (tkm)	299 Mio.	404 Mio.	0	0
U-Shift Personen (pkm)	n.a.	n.a.	1.091 Mio.	1.002 Mio.
U-Shift Güter (tkm)	n.a.	n.a.	1.211 Mio.	1.211 Mio.
Durchschnittliche Auslastung Fahrzeuge				
Pkw (Personen/Fahrzeug)	1,3	1,3	1,3	1,3

⁹⁹ Universität Stuttgart Institut für Straßen- und Verkehrswesen, 2016, MEGAFON (Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs), Schlussbericht.

¹⁰⁰ Wo Daten vorhanden waren, beziehen sich die aktuellen Daten auf das Jahr 2019. Die Anzahl der Fahrzeuge bezieht sich auf den Bestand in Stuttgart am 1. Januar 2019 (Quelle: Kraftfahrtbundesamt). Die Fahrleistung bezieht sich auf das Jahr 2017 (Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg). Die Lebensdauer der Fahrzeuge wurde auf Grundlage von Zeitreihen 1999-2006 des Durchschnittsalters der Fahrzeuge zum Zeitpunkt ihrer Außerbetriebsetzung, die vom Kraftfahrtbundesamt veröffentlicht werden.

Lnf (t/Fahrzeug)	1,8	1,8	n.a.	n.a.
Snf (ab 3,5 t) (t/Fzg.)	7,6	7,6	n.a.	n.a.
U-Shift Personen (Personen/Fahrzeug)	n.a.	n.a.	3,5	3,0
U-Shift Güter (t/Fahrzeug)	n.a.	n.a.	1,2	1,1
Anzahl Fahrzeuge				
Pkw	304.632	304.632	235.643	241.275
Lnf	13.599	18.359	n.a.	n.a.
Snf	2.818	3.804	n.a.	n.a.
U-Shift Kapseln (Personen)	n.a.	n.a.	12.158	13.026
U-Shift Kapseln (Güter)	n.a.	n.a.	18.237	19.540
U-Shift Driveboards	n.a.	n.a.	12.158	13.026

Quellen: Kraftfahrtbundesamt; Statistisches Landesamt Baden-Württemberg; IVS (2016)¹⁰¹; eigene Annahmen

6.3.4 Sensorausstattung

Die Umsetzung einer infrastrukturbasierten Automatisierung des Straßenverkehrs, wie im Falle von U-Shift MAD anvisiert, erfordert die digitale Aufrüstung der Straßeninfrastruktur. Konkret werden straßenseitig verschiedene Sensoren und Prozessoren benötigt, sowie Software, Datenspeicher und -verarbeitung (siehe Kapitel 4). Im Anwendungsfall 3 Vision 2040 wird angenommen, dass die infrastrukturseitige Aufrüstung mit Sensorpaketen des Typs A erfolgt (Anhang D). Kosten setzen sich aus Sensoreinheit (RCU), RSU und dem Masten zusammen. Außerdem werden je Sensoreinheit anteilig Backend, Software und Glasfaseranschluss berechnet.

Für die Ausstattung der Straßen mit RCUs wurde von einer Sichtweite von 70 Metern ausgegangen. Für die Ausstattung von Kreuzungen und Kreisverkehren wurde angenommen, dass pro Arm ein Sensorpaket benötigt wird. Die Ermittlung der benötigten Anzahl von Sensorpaketen für eine flächendeckende Ausrüstung des Stuttgarter Straßennetzes entsprechend dieser Annahmen erfolgte durch eine GIS-Analyse von *Open Street Map* Daten (siehe Anhang D für eine ausführliche Beschreibung). Basierend auf dieser Analyse werden rund 38.000 Sensorpakete für die digitale Aufrüstung der Stadt Stuttgart benötigt (Tabelle 13).

¹⁰¹ Universität Stuttgart Institut für Straßen- und Verkehrswesen, 2016, MEGAFON (Modellerggebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs), Schlussbericht.

Tabelle 13: Anzahl benötigter Sensorpakete Typ A, U-Shift Vision 2040

Infrastrukturkategorie	U-Shift MAD Vision 2040	U-Shift AD Vision 2040
Straßen	12.522	0
Kreisverkehre	237	0
Kreuzungen	24.926	0
Gesamt	37.685	0

Quelle: Eigene Analyse basierend auf Open Street Map Daten

6.3.5 Ergebnisse der Kosten-Nutzen Analyse

Folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Kosten-Nutzen Analyse für das Referenzszenario, sowie U-Shift Vision 2040 MAD und AD.

Tabelle 14: Ergebnisse Kosten-Nutzen-Analyse Anwendungsfall 3

Kategorie	Referenzszenario	Vision 2040 - MAD	Vision 2040 - AD	Vision 2040 - MAD	Vision 2040 - AD
	<i>Absolute Werte</i>	<i>Absolute Werte</i>	<i>Absolute Werte</i>	<i>Relativ zum Referenzszenario</i>	<i>Relativ zum Referenzszenario</i>
I. KOSTEN					
Investitionskosten					
U-Shift Kapseln+Driveboards	€0 M	€107 M	€171 M	€107 M	€171 M
Infrastrukturausstattung MAD	€0 M	€58 M	€0 M	€58 M	€0 M
Pkw	€811 M	€628 M	€643 M	-€184 M	-€169 M
Lnf	€41 M	€0 M	€0 M	-€41 M	-€41 M
Snf	€38 M	€0 M	€0 M	-€38 M	-€38 M
Investitionskosten Gesamt	€890 M	€792 M	€814 M	-€98 M	-€77 M
Betriebskosten					
U-Shift Kapseln+Driveboards	€0 M	€369 M	€412 M	€369 M	€412 M
Personal MAD	€0 M	€46 M	€0 M	€46 M	€0 M
Stromkosten MAD	€0 M	€4 M	€0 M	€4 M	€0 M
Pkw	€636 M	€492 M	€503 M	-€144 M	-€132 M
Lnf	€59 M	€0 M	€0 M	-€59 M	-€59 M
Snf	€27 M	€0 M	€0 M	-€27 M	-€27 M
Betriebskosten Gesamt	€721 M	€911 M	€915 M	€190 M	€194 M
II. NUTZEN					
Verkehrssicherheit	-€354 M	-€306 M	-€339 M	€49 M	€15 M

Klimawirkung	-€153 M	-€108 M	-€113 M	€45 M	€40 M
Schadstoffemissionen	-€96 M	-€73 M	-€75 M	€24 M	€21 M
Nutzen Gesamt	-€604 M	-€487 M	-€527 M	€117 M	€76 M
III. INDIKATOREN					
Nutzen-Kosten Differenz				€26 M	-€41 M
Nutzen-Kosten Verhältnis				1,3	0,7

Die Ergebnisse der Kosten-Nutzen Analyse zeigen, dass der größte Nutzen von U-Shift MAD und AD in einer Reduktion der Investitionskosten des Mobilitätssystems im Vergleich zum heutigen System liegen (Ersparnisse von knapp €100 M im Jahre 2040 im Falle von U-Shift MAD). Außerdem können die Verkehrssicherheit und Klimaschäden im Vergleich zum Referenzszenario reduziert werden. Allerdings sind die laufenden Kosten für beide betrachteten U-Shift Szenarien MAD und AD höher als im Referenzszenario. Im Falle von Vision 2040 AD sind die Gesamtkosten (Anschaffungskosten und Betriebsgrößen) höher als im Referenzszenario. Dementsprechend ist die Nutzen-Kosten Differenz negativ. Im Gegensatz dazu ist die Nutzen-Kosten Differenz der Vision 2040 MAD positiv und somit rentabel. Der Treiber der hohen Betriebskosten sind Wartungskosten der U-Shift Fahrzeuge. Diese Studie nimmt hierfür einen Wert von 22ct/km an, was verglichen mit anderen Studien eine konservative Schätzung ist.

6.3.6 Sensitivitätsanalyse

Tabelle 15 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse.

Tabelle 15: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Kosten-Nutzen Analyse

Sensitivitätstest	Vision U-Shift MAD		Vision U-Shift AD	
	Nutzen-Kosten Differenz	Nutzen-Kosten Verhältnis	Nutzen-Kosten Differenz	Nutzen-Kosten Verhältnis
Core Szenario	€26 M	1,3	-€41 M	0,7
CO ₂ Intensität Strom 2040	€26 M	1,3	-€41 M	0,7
Jahresfahrleistung U-Shift	-€1 M	1,0	-€75 M	0,4
Energieverbrauch digitale Infrastruktur	-€30 M	0,8	-€141 M	0,4
Kosten Sensorpaket Max.	€17 M	1,2	-€41 M	0,7
Kosten Sensorpaket Min.	-€30 M	0,8	-€41 M	0,7
Investitionskosten +20%	€76 M	2,8	-€41 M	0,7
Investitionskosten -20%	-€7 M	0,9	-€75 M	0,5
Nutzen +20%	€59 M	2,0	-€7 M	0,9
Nutzen -20%	€123 M	2,4	€64 M	1,5

An den negativen Werten bei AD erkennt man, dass es bei konventionellem AD grundsätzlich schwer wird, einen wirtschaftlichen Betrieb zu realisieren. Unter pessimistischen Annahmen bei MAD bezüglich des Energieverbrauchs der digitalen Infrastruktur, Kosten der Sensorkomponenten und Investitionskosten ist die Vision 2040 MAD wirtschaftlich nicht mehr rentabel verglichen mit dem Referenzszenario. Dies bedeutet, dass erwartungsgemäß die Kosten in der Infrastruktur bei MAD ein wesentlicher Erfolgsfaktor sind.

7 Synthese – Bewertung Anwendungsfälle und Systemarchitekturen

In diesem Kapitel werden die unter Kapitel 3 beschriebenen Anwendungsfälle und die unter Kapitel 4 aufgeführten Systemarchitekturen verglichen. Hierzu werden die unter den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Ergebnisse zusammengeführt und somit Aspekte der technischen Machbarkeit, Zulassungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit ganzheitlich betrachtet.

7.1 Bewertung der untersuchten Anwendungsfälle

Die Machbarkeitsstudie untersucht drei Use-Cases, „Pilot“, „Roll-Out“ und „Vision 2040“ (siehe Kapitel 3). Hauptunterschiede bestehen dabei in dem technologischen Reifegrad der eingesetzten Technologie, der Größe des Einsatzgebietes, dem Grad der Marktdurchdringung, also der Anzahl der Driveboards und Kapseln im Einsatzgebiet, sowie dem Hauptzweck des jeweiligen Anwendungsfalls. Letzterer reicht von der Erprobung einer neuen Technologie mit Erforschung des Potenzials bis hin zur Implementierung eines tragfähigen und nachhaltigen Geschäftsmodells mit Bereitstellung einer attraktiven Mobilitätslösung. Die Unterschiede der Anwendungsfälle sind mit verschiedenen Vorteilen und Herausforderungen hinsichtlich der technischen Machbarkeit, Zulassungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit verbunden, die nachfolgend für jeden Fall aufgezeigt werden. Dabei werden für den ersten Fall auch allgemeingültige Herausforderungen beschrieben, auf die bei den beiden nachfolgenden Use-Cases nur noch verwiesen wird. Prinzipiell könnte jedes der drei untersuchten Konzepte für die Systemarchitektur (AD, PMAD und MAD) für die verschiedenen Use-Cases zum Einsatz kommen. Vor- und Nachteile dieser Konzepte werden im nachfolgenden Kapitel 7.2 detailliert aufgezeigt und bei den Use-Cases entsprechend nur kurz erwähnt.

7.1.1 Bewertung Use-Case 1: Pilot

Dieser Use-Case dient der Erprobung von U-Shift in einem realen Umfeld und soll unter Verwendung eines prototypischen Systems Vorteile des Konzepts sowie Optimierungsbedarf aufzeigen. Für U-Shift ist die einfache Verbindung zweier Logistikzentren als erster Anwendungsfall besonders gut geeignet, da die Komplexität für einen Pilot mit Fokus auf MAD nicht zu groß ist. Zudem bietet der Use-Case durch eine mögliche Anbindung des Testbetriebs an den öffentlichen Verkehr mit Nutzung der Personenkapsel eine ideale Möglichkeit, um auch die Vorteile der Modularität des Fahrzeugs aufzuzeigen.

Technische Machbarkeit eines U-Shift Prototypenfahrzeugs

Herausforderungen mit Hinblick auf die technische Machbarkeit eines U-Shift Prototypenfahrzeugs bestehen insbesondere bezüglich des Kopplungsmechanismus, des Hubfahrwerks in den Schenkeln, der Achslastverteilung, dem aktuell gewählten kurzen Radstand, des Gesamtpackages der Komponenten wie Antrieb oder auch Sensorik sowie ähnlichen typische Fahrzeugentwicklungsdetails. Wie bei allen Ausprägungen von automatisierten Fahrzeugen bestehen auch bei U-Shift noch technologische Herausforderungen für die Umsetzung des fahrerlosen Fahrens, für die im Rahmen der Pilotanwendung Lösungsansätze erprobt werden sollen. Einige für U-Shift besonders relevante Aspekte werden im Folgenden kurz erläutert.

Technische Machbarkeit der Fahrzeugautomatisierung von U-Shift

Umfeldererkennung: die Umfeldererkennung beinhaltet das Erfassen und die Interpretation von Umgebungsdaten. Je nach Konzept für automatisiertes Fahren stehen dafür unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung, dabei zeigen bei U-Shift die Konzeptvarianten PMAD und MAD Vorteile gegenüber einer rein fahrzeugbezogenen Automatisierungsausstattung. Das im Anwendungsfall „Pilot“ zu erstellende prototypische System erlaubt erstmalig den neuen MAD-Ansatz einer umfassenden Integration von Infrastrukturdatenerfassung für das automatisierte Fahren zu untersuchen und zu testen. Dabei sind bei der konkreten Detailplanung des Pilotbetriebs Lösungsansätze zu entwickeln, wie umfassende Infrastruktur für den Test aufgebaut werden kann. Limitierungen könnten durch Kosten und regulatorische Aspekte, auch im Zusammenhang mit der Dauer von Genehmigungsverfahren entstehen.

Energiebedarf: die Höhe des Energiebedarfs für das automatisierte Fahren wird in Expertenkreisen durchaus unterschiedlich eingeschätzt. Alle bekannten Abschätzungen gehen jedoch von einem erheblichen Energiebedarf für Automatisierungskomponenten aus, der zusätzlich zur benötigten Antriebsenergie entsteht. Dass Einsparungen durch Effizienzmaßnahmen wie Eco-Driving, Eco-Routing diesen Mehrbedarf auf Fahrzeugebene kompensieren können, scheint derzeit eher unwahrscheinlich. Dies fällt beim Prototyp weniger ins Gewicht, stellt aber mit Blick auf die Serie eine große Herausforderung dar. Einen vielversprechenden Lösungsansatz für dieses Problem bietet insbesondere das Konzept MAD durch fahrzeugübergreifende Dienste, die von der Infrastruktur bereitgestellt werden und somit den Energiebedarf des Einzelfahrzeugs senken. Dies kommt insbesondere zum Tragen, wenn die Infrastruktur von vielen Fahrzeugen genutzt wird. Auch wenn beim Use-Case „Pilot“ nur wenige Fahrzeuge eingesetzt werden ist es wichtig, um das Konzept im Detail zu erproben und zu optimieren.

Datenübertragung: Herausforderungen betreffen hier insbesondere die Datenübertragung zwischen Fahrzeug und Infrastruktur oder anderen Verkehrsteilnehmern. Im Pilotbetrieb kann eine Sicherheitsperson auf einen möglichen Ausfall oder eine Störung der Kommunikation durch technische Ursachen oder gezielte Angriffe reagieren, so dass der Aufwand für weitere Sicherheitsmaßnahmen in diesem Demonstrationsfall relativ niedrig ist. Für die Serienausführung ist ein Sicherheitskonzept entsprechend Standards wie der ISO 26262 vorgesehen, wobei auf Fahrzeugebene eine Grundfahrfunktion mit reduzierter Automatisierung noch ein sicheres Anhalten ermöglicht. Neben Ausfällen oder Störungen stellen Latenzzeiten zum jetzigen Stand der Technik eine Schwierigkeit dar. Voraussichtlich müssen darüber hinaus geeignete Nachrichtentypen entwickelt werden, die den Anforderungen der Informationsart entsprechen, z. B. Übertragung einer Pfadplanung (gilt auch für PMAD). Wie beim PMAD Konzept ist ggfs. detailliert zu prüfen, in welchem Umfang Infrastruktur im Pilotbetrieb ausgestattet werden kann.

Eine strategische Herausforderung liegt in der Wahl der grundsätzlichen Art der Datenübertragung. Ganz unabhängig von diesem Projekt ist derzeit offen, ob in Zukunft mit Cellular Vehicle-to-everything (C-V2X) ein auf LTE bzw. 5G basierender Mobilfunk-Kommunikationsstandard, oder mit ITS-G5 die WLANp Technologie genutzt werden wird. Da die beiden Standards nicht ohne weiteres kompatibel sind, ist hier ggfs. eine strategische Entscheidung zu treffen, ohne den Ausgang von auf internationaler Ebene stattfindenden Abstimmungen zu kennen bzw. ohne zu wissen, welche Technologie sich auf dem Markt durchsetzt. Derzeit ist im Pilot die Verwendung eine Kombination beider Standards im Projekt vorgesehen, um flexibel zu bleiben.

Zulassungsfähigkeit im Rahmen einer Einzelbetriebserlaubnis

Die untersuchte Erstimplementierung ist ein sehr spezifischer exemplarischer Anwendungsfall, um das U-Shift Konzept zu demonstrieren. Da es sich bei der Art der Zulassung um eine jeweilige Einzelbetriebserlaubnis einer geringen Anzahl von Fahrzeugen handelt, wie sie in ähnlicher Form in anderen Projekten erteilt wurde, werden auf Basis von Gesprächen mit dem TÜV Nord keine grundlegenden Schwierigkeiten erwartet. Nach Einschätzung des TÜV Nord sollte dabei der Umfang der Nutzung von Infrastruktur keine grundsätzliche Schwierigkeit darstellen, da ohnehin durch die Anwesenheit eines Sicherheitsbegleiters die Reaktion auf unterschiedlichste Fehlerfälle sichergestellt werden muss. Allerdings führt die Nutzung von Infrastruktur sowohl bei einer Einzelbetriebserlaubnis wie auch in der späteren Typzulassung dazu, dass das Thema Cybersecurity an Bedeutung zunimmt. Sicherheitsbegleiter können im Pilotbetrieb zwar reagieren, aber es besteht grundsätzlich die Gefahr, dass Handlungen durch Manipulation übersteuert werden. Hier ist ein entsprechendes Sicherheitskonzept vorzusehen. Pilotbetriebe mit autonomen Shuttles wurden bereits auf diversen Strecken genehmigt. Voraussichtliche Auflagen wie die Anwesenheit eines Sicherheitsbegleiters, oder das Einmessen einer spezifischen Strecke sind erfüllbar. Für eventuell benötigte Sicherheitseingriffe ist es hier unerheblich, ob Komponenten in der Infrastruktur oder im Fahrzeug Störungen aufweisen. Auf Basis der in Kapitel 5 beschriebenen derzeitigen Zulassungspraxis und der geplanten Ausgestaltung des Pilotbetriebs wird die Zulassungsfähigkeit für den Demonstrator im Rahmen des Use Case 1 positiv bewertet.

Wirtschaftlichkeit der Pilotanwendung

Die Implementierung eines hochautomatisierten Verkehrs zwischen den Logistikzentren von L'Oréal und Dachser dient in erster Linie der Erprobung der neuen Technologie und der Untersuchung des Potenzials für einen wirtschaftlich effizienten, nachhaltigen und für Personen attraktiven Verkehr. Bei dem Pilotprojekt ist zwar auf einen effizienten Einsatz von Ressourcen zu achten, eine Wirtschaftlichkeit im klassischen Sinne wird hier jedoch nicht erwartet, da der Neuartigkeit des Konzepts entsprechend unvermeidbar hohe Kosten für Forschungs- und Entwicklungsaufwände entstehen, die nicht über Einnahmen finanziert werden können.

Der Use-Case 1 ist gut geeignet, um die Vorteile des U-Shift Konzepts zu demonstrieren. Die Anwendung in einem begrenzten Raum und mit spezifischen Transportaufgaben von Personen und Gütern erlaubt einerseits eine vergleichsweise einfache Zulassung und ist andererseits durch das Befahren öffentlicher Straßen komplex genug, um die technischen Systeme zu erproben und zu optimieren. Die technischen Herausforderungen entsprechen bezüglich des Schwierigkeitsgrads denen vergleichbarer Projekte, während die Potenziale bezüglich Kosten- und Energieeffizienz sowie Sicherheit höher bewertet werden. Der Use-Case 1 erlaubt eine erste Untersuchung dieser Potenziale, die in den weiteren Use-Cases noch weitgehender zum Tragen kommen können.

7.1.2 Bewertung Use-Case 2: Roll-Out

Dieser Use-Case beschreibt die Implementierung von U-Shift in einem begrenzten städtischen Betriebsgebiet am Beispiel Stuttgart-Vaihingen (siehe Kapitel 3). Hiermit werden Chancen und Herausforderungen von U-Shift beim Einsatz in größerem Maßstab und erweitertem Anwendungsspektrum wie beispielsweise einer Bündelung von Fahrtwünschen aufgezeigt. Bei der

Konzeption des Use-Cases wird ein Bottom-Up Ansatz verfolgt, indem die derzeitigen Verhältnisse und Anforderungen in Vaihingen analysiert werden und dementsprechend ein Anwendungsfall für U-Shift aufgesetzt wird. U-Shift fügt sich also in das bestehende System ein, statt das Verkehrssystem vom Grundsatz her neu zu denken und an U-Shift auszurichten (neue Ansätze der Logistik, wie Urban Consolidation Center werden aber berücksichtigt). Bezüglich der Fahrzeuge, also der Driveboards und der Kapseln wird von (Klein-)Serienausführungen ausgegangen.

Sinnhaftigkeit des Konzepts mit Hinblick auf die Anforderungen des Use-Case 2

Der Anwendungsfall „Roll-Out“ betrachtet am Beispiel Stuttgart-Vaihingen ein Betriebsgebiet mit Wohn- und Gewerbeeinheiten. Entsprechend ergeben sich Bedarfe für den Personentransport, zum Beispiel für Freizeitwege, Pendlerverkehr und berufliche Wege und Bedarfe für den Gütertransport wie zum Beispiel die Belieferung von Läden, Firmen oder auch von Privathaushalten. Mit U-Shift können Fahrten des ÖPNV effizient durchgeführt werden, für die große Transporteinheiten wie Linienbusse oder S-Bahnen mit Hinblick auf niedrige Fahrgastzahlen weniger geeignet sind. In Zeiten, in denen kein Personentransport erforderlich ist, können Driveboards durch Wechseln der Kapseln im Bereich des Gütertransports verwendet werden. Durch das automatisierte, elektrische, modulare Konzept ist es dabei auch möglich, Waren nachts zu einem Zielort zu bringen und die gefüllte Transportkapsel dort abzustellen. Sie muss dabei nicht direkt entladen werden und somit kann die nächtliche Ruhe gewahrt bleiben. So können Verkehrsspitzen vermieden, Ressourcen effizient genutzt und eine hohe Flexibilität bei der Güterlogistik geschaffen werden.

Zulassungsfähigkeit

Die Art des in Frage kommenden Zulassungsverfahrens hängt bei diesem Use-Case von der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge und weiteren Faktoren wie der Begrenzung des Betriebs auf gewisse Strecken ab. Dabei kommen unabhängig vom gewählten Konzept der Systemarchitektur (AD, PMAD, MAD) grundsätzlich eine jeweilige Einzelbetriebserlaubnis für alle Fahrzeuge oder eine allgemeine Typgenehmigung, ggfs. als Kleinserie in Frage. Für eine allgemeine Typgenehmigung sind auf internationaler Ebene diverse Anpassungen der derzeitigen Regulierung notwendig, damit fahrerlose Fahrzeuge allgemein zulassungsfähig sind. Eine besondere Herausforderung bei der Zulassung ist ein Betrieb im Mischverkehr und dies hängt von der zukünftigen Ausgestaltung der Regulierung ab. Generell müssen die automatisierten Fahrzeuge allerdings unabhängig vom Mischverkehr immer andere Verkehrsteilnehmer zuverlässig erkennen.

Wirtschaftlichkeit

Dieser Use-Case sieht einen Einsatz von Driveboards und Kapseln in wesentlich höherer Stückzahl als bei Use-Case 1 vor. Durch die zunehmenden Stückzahlen reduzieren sich die relativen Kosten für Fahrzeuge und Infrastruktur. Die Höhe der somit erzielbaren Kosteneffizienz ist in hohem Maße abhängig vom Konzept für die Systemarchitektur (AD, PMAD, MAD). In Kapitel 6.2 wird die wirtschaftliche Tragfähigkeit für die Konzepte PMAD und MAD für ein Szenario mit einem Betrachtungszeitraum von 10 Jahren aufgezeigt. Dabei lässt sich beim Konzept MAD nach 9 Jahren Betriebsdauer erstmals Gewinn erzielen. Dass das Konzept AD einen deutlich geringeren Kapitalwert nach 10 Jahren als MAD hat, liegt maßgeblich daran, dass zwar die Anfangsinvestitionen sehr viel niedriger sind, die hohen Aufwendungen für den Aufbau von Infrastruktur erfordern, dafür jedoch auf Seiten der Einnahmen die Vermarktung der Infrastrukturnutzung für Dritte entfällt. Vergleicht man die Konzepte AD und MAD für den Use-

Case 2 mit Stuttgart-Vaihingen als Anwendungsgebiet, so tritt ein Break-even bezüglich der Investitionen bei 115 Driveboards ein, für den Vergleich von AD und PMAD liegt dieser Punkt erst bei ca. 2.500 Driveboards.

Use-Case 2 beschreibt ein Szenario mit einer realistischen Roll-Out-Stückzahl von Driveboards und Kapseln. Er eignet sich hierdurch gut, um wirtschaftliche Aspekte der drei Konzepte AD, PMAD und MAD zu analysieren. Dabei zeigt sich bereits bei diesem Use-Case ein deutlicher Vorteil des Konzepts MAD gegenüber AD und PMAD. Dieser Vorteil steigt mit höherer Anzahl von Fahrzeugen und somit höherer Auslastung der Infrastruktur. Die grundlegenden Vorteile von MAD, nämlich die kosten- und ressourceneffiziente Bündelung von Funktionalitäten in der Infrastruktur und deren Bereitstellung für viele Fahrzeuge sowie die intelligente, zentrale Verkehrssteuerung kommen dann besonders zum Tragen. Unter den getroffenen Annahmen ergeben sich Amortisationsdauern von ca. 9-10 Jahren. Technische Herausforderungen sind bei den drei betrachteten Use-Cases im Grundsatz vergleichbar, allerdings sind Aspekte wie der Energiebedarf und eine kostengünstige technische Umsetzung des Konzepts bei einer Serienausführung wie in Use-Case 2 von hoher Relevanz, während bei dem prototypischen Fahrzeug von Use-Case 1 der Fokus auf der generellen Machbarkeit liegt.

7.1.3 Bewertung Use-Case 3: Vision 2040

Dieser Fall beschreibt eine großflächige Anwendung von U-Shift am Beispiel der Stadt Stuttgart. Hauptunterschiede zum Use-Case 2 bestehen in der Anzahl der Fahrzeuge, der Größe des Betriebsgebietes und dem Vorgehen bei der Konzeption der Applikation von U-Shift. Dabei wird ein Top-Down Ansatz verwendet, bei welchem das Verkehrssystem neu organisiert wird und sich dabei an einem möglichst hohen gesamtgesellschaftlichen Nutzen ausrichtet. Hierzu dienen Kriterien wie eine effiziente Nutzung von Verkehrsflächen sowie von finanziellen und materiellen Ressourcen bei gleichzeitiger Beachtung von Umwelt- und Klimaschutzaspekten. In dieser Vision wird der innerstädtische Gütertransport vollständig durch U-Shift Fahrzeuge abgedeckt. Während der Hauptverkehrszeiten stehen außerdem die Driveboards, zusammen mit Personenkapseln, für den Transport von Personen in Form eines Ride-Sharing Systems zur Verfügung.

Sinnhaftigkeit des Konzepts mit Hinblick auf die Anforderungen des Use-Case 3

Beim Use-Case 3 kommt der Vorteil des modularen Ansatzes mit Kapselwechsel, der infrastrukturbauierten Automatisierung und der zentralen Verkehrssteuerung durch das größere Anwendungsgebiet und die grundlegend neue Organisation des Personen- und Gütertransports und somit eine mögliche Gestaltung des Systems unter Einbeziehung des Konzepts U-Shift voll zum Tragen. Dabei ist auf ein geeignetes Verhältnis von Driveboards zu Güterkapseln zu achten, um wirtschaftliche und verkehrliche Vorteile nutzen zu können. Abhängig vom Konzept für die Systemarchitektur (AD, MAD) ergeben sich im Use-Case 3 unterschiedlich hohe gesamtgesellschaftliche Vorteile. Die größten Vorteile entstehen bei Verwendung des Konzepts MAD.

Zulassungsfähigkeit

Durch die vorgesehene große Anzahl von Fahrzeugen für den Betrieb des Systems in Use-Case 3 ist unabhängig vom gewählten Konzept der Systemarchitektur (AD, PMAD, MAD) eine allgemeine Typge-

nehmung der Fahrzeuge nötig. Dies erfordert eine Anpassung internationaler Regelungen, die derzeit von verschiedenen Interessensgruppen und auf unterschiedlichen Ebenen intensiv vorangetrieben wird. Eine Beschreibung derzeitiger Aktivitäten und eine Einschätzung zu Typengenehmigungsaspekten werden unter Kapitel 5.3 und 5.9 für die unterschiedlichen Konzepte der Systemarchitektur gegeben.

Wirtschaftlichkeit

Die Grundaussagen aus Use Case 2 sind weiterhin gültig, zusätzlich steigt durch höhere Stückzahlen und die effizientere Bündelung von Fahrtwünschen die Rentabilität der Systeme weiter an. Die Gesamtkosten für ein Verkehrssystem mit maximaler Anwendung des MAD Konzepts gemäß Anwendungsregeln sind bezüglich Anschaffung und Betrieb der Fahrzeugflotte und Infrastruktur für eine Stadt wie Stuttgart in Vision 2040 erheblich günstiger als bei einem System mit nicht-automatisierten, individuell besessenen und geführten Fahrzeugen, wie es heute existiert. Zudem zeigen sich positive volkswirtschaftliche Effekte durch die Reduzierung von externen Kosten, wie beispielsweise verkehrsbedingte Ausgaben im Gesundheitsbereich (z. B. durch Unfälle und Erkrankungen) und Kosten für Effekte, zu denen Treibhausgasemissionen des Verkehrs beitragen (z. B. Wetterextreme wie Dürren oder Hochwasser und damit verbundene Ernteaufälle). Auf Unterschiede zwischen den drei untersuchten Konzepten für die Systemarchitektur (AD, PMAD, MAD) wird im nachfolgenden Kapitel 7.2 eingegangen.

Use-Case 3 beschreibt ein Szenario mit umfassender Anwendung des U-Shift Konzepts mit Ersatz von privat besessenen Fahrzeugen. Der Use-Case dient insbesondere der Analyse gesamtgesellschaftlicher Auswirkungen. Die Ergebnisse der Kosten-Nutzen Analyse fallen für die verschiedenen Systemarchitekturen (AD, MAD) unterschiedlich aus. Während in der Gesamtbilanz die Nutzen-Kosten Differenz für AD negativ ausfällt, ist sie für MAD positiv und somit rentabel. Die Analysen berücksichtigen dabei auch eine Reduzierung der externen Kosten, die vom Verkehr verursacht werden (monetäre und monetarisierte Werte). Durch die großflächige Anwendung von U-Shift können hier technische Optimierungen des Fahrzeugs bzw. der Infrastruktur im Bereich der Effizienz ein großes Potenzial bezüglich der Nutzung von finanziellen, materiellen und energetischen Ressourcen entfalten, somit zur Lösung der drängenden Probleme beim Schutz von Klima und Umwelt sowie bezüglich der Flächenknappheit beitragen und dabei eine bezahlbare und für alle Nutzergruppen zugängliche Mobilität bieten.

7.2 Bewertung unterschiedlicher Konzepte für die Systemarchitektur

Neben Unterschieden von Anwendungsfällen, gibt es auch verschiedene Möglichkeiten zur technischen Umsetzung der Fahrzeugautomatisierung, also verschiedene Konzepte für die Systemarchitektur. Diese reichen von einem Einbau der notwendigen Automatisierungstechnologie ausschließlich im Driveboard (ähnlich AD) über einen Ansatz mit verteilten Funktionalitäten (PMAD) bis hin zur ausschließlich in der Infrastruktur vorgehaltenen Technologie zur Erfassung von Umwelt und Verkehrsteilnehmern, Interpretation der erfassten Daten und Steuerung aller Pkw und Nutzfahrzeuge (ähnlich MAD). Im ersten Fall wäre das Fahrzeug vollständig autonom funktionsfähig und im entgegengesetzten Fall wäre das Fahrzeug lediglich ein Akteur ohne jegliche Intelligenz. Beides sind extreme Varianten für eine theoretische Betrachtung. Bei heutigen automatisierten Fahrzeugen ist fast immer ein GPS, Kommunikation mit anderen Objekten (C2X), hochgenaue digitale Karten oder ähnliches implementiert, so dass auch in dieser „AD“ Konfiguration Infrastrukturdaten genutzt werden oder eine einfache Kommunikation zur Infrastruktur besteht. Ebenso geht die extreme Variante von ausschließlich in der Infrastruktur verbauter

Sensorik und Intelligenz über MAD hinaus, da bei MAD noch eine minimale Grundausstattung im Fahrzeug verbleibt wie Sensorik für die Lokalisierung (GPS) (Kapitel 2.2.3).

Zur Abwägung von Vor- und Nachteilen der verschiedenen Konzepte für die Systemarchitektur wurde eine Nutzwertanalyse für die drei Systeme AD, PMAD und MAD durchgeführt. Hierzu wurden zunächst Bewertungskriterien wie beispielsweise Ausfallsicherheit, Amortisationsdauer oder Konformität mit Aspekten der StVZO festgelegt. Danach erfolgte die Bewertung dieser Kriterien und deren Gewichtung, also die Einordnung der jeweiligen Relevanz. Die Summe der einzelnen Produkte von Kriterium und Gewichtung ergibt die Gesamtbewertung. Tabelle 16 zeigt als Beispiel einen Auszug der Nutzwertanalyse.

Tabelle 16: Auszug aus der Nutzwertanalyse – ausgewählte Kriterien der technischen Machbarkeit und Bewertung bzw. Gewichtung für das Konzept PMAD für die Systemarchitektur

Bewertungskriterien technische Umsetzbarkeit bzgl.	- Erläuterung Einschätzung	Bewertung*	Gewichtung**
Funktionale Sicherheit - Ausfallsicherheit (Redundanzkonzept) Systemverhalten im Fehlerfall, Überführung in einen sicheren Zustand	verteilte Funktionen erhöhen die Ausfallsicherheit durch unabhängige und diverse Systeme, kritisch sind Latenzzeiten	2	3
Security	höheres Risiko im Vergleich zu AD durch umfangreichere Datenübertragung, mehr Einfallstellen für potenzielle Angriffe, geringeres Risiko als bei MAD durch erhöhte Intelligenz im Fahrzeug	1	3
Zuverlässigkeit / Verfügbarkeit der Anwendung, Robustheit	weniger komplexe Fahrzeugtechnik reduziert den Wartungsaufwand und Ausfallzeiten, andererseits entsteht durch die Infrastruktur ein zusätzlicher Aufwand	2	3
Reichweite und Güte der Objekterkennung	im Vergleich zum System AD verbesserte Reichweite und Objekterkennung durch Integration von Infrastruktursensorik, vergleichbar mit MAD	3	2
Fahrkomfort, gleichmäßige Fahrweise	besser als bei AD durch höhere Reichweite und Güte der Objekterkennung, vergleichbar mit MAD	3	1
Kühlung von Automatisierungskomponenten	durch Verlagerung eines Teils der Sensorik / Datenverarbeitung bessere Kühlmöglichkeiten für die im Fahrzeug verbleibenden Komponenten. Kühlung in Infrastruktur unproblematisch	2	2
*Bewertungsfaktoren:	0 (negativ) bis 3 (positiv, gute Umsetzbarkeit)		
**Gewichtungsfaktoren:	0 (unwichtig) bis 3 (sehr wichtig)		

Aufgrund der Komplexität der Thematik ist das Ziel der Nutzwertanalyse nicht die Ableitung eines quantitativen Zahlenwertes zur Beurteilung der verschiedenen Systemkonzepte. Vielmehr dient sie als methodisches Werkzeug zur differenzierten Betrachtung der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Systeme und deren Vergleich. Daher werden hier keine Zahlenwerte wiedergegeben und diskutiert, sondern es wird eine qualitative Gesamtbewertung gegeben. Nachfolgend wird das Ergebnis zum Ver-

gleich der drei Konzepte AD, PMAD und MAD dargestellt, indem Vor- und Nachteile bzgl. Technischer Machbarkeit, Zulassungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit aufgezeigt werden. Die Erläuterungen ergänzen den vorherigen Abschnitt zu den unterschiedlichen Anwendungsfällen und gelten mit folgenden Rahmenbedingungen:

- Technisches System: Serienausführung
- Zulassung: allgemeine Typgenehmigung
- Wirtschaftlichkeit: beim Use-Case 2 Roll-Out stehen direkt auf das System bezogene wirtschaftliche Aspekte im Vordergrund, während bei Use-Case 3 Vision 2040 volkswirtschaftliche Auswirkungen analysiert werden. Dieses Vorgehen bei den unterschiedlichen Use-Cases wurde gewählt, um zu untersuchen, ob sich bereits bei mittelgroßen Systemgrößen ein tragfähiges Geschäftsmodell ergeben kann. Da sich volkswirtschaftliche Auswirkungen jedoch erst in signifikantem Maße bei großflächiger Implementierung von U-Shift ergeben, dient für diese Aspekte der Use-Case 3 als Grundlage.

7.2.1 Bewertung des Konzepts AD

Herausforderungen der technischen Machbarkeit bestehen bei diesem Konzept bezüglich des hohen technischen Aufwands für die Automatisierungsausstattung des Fahrzeugs und damit verbundenen Kosten sowie dessen hohen Energiebedarfs im Betrieb. Letzteres ist entweder mit dem Einsatz großer, schwerer und teurer Batterien sowie hohen Ladezeiten oder aber mit geringen Reichweiten verbunden. Daneben stellt ein hoher Energiebedarf auch mit Hinblick auf die Erreichung nationaler und internationaler Klimaschutzziele Schwierigkeiten dar, da regenerative Energie auf absehbare Zeit nur begrenzt zur Verfügung steht. Zudem benötigen Batterien Materialien, deren Gewinnung (ebenso wie die von fossilen Kraftstoffen) unter sozialen und umwelttechnischen Gesichtspunkten problematisch sind und deren Verbrauch somit minimal gehalten werden sollte. Eine weitere technische Herausforderung stellt, wie oben geschildert, gewisse Fahrsituationen wie das Umfahren von stehenden Fahrzeugen dar (siehe Kapitel 4.1). Da aus Kostengründen auf teure Sensorik in den Kapseln verzichtet werden soll, ist keine zufriedenstellende Lösung für die Umfelderkennung verfügbar.

Bezüglich der Zulassungsfähigkeit von Fahrzeugen der SAE Level 3, 4 oder 5 sind für eine allgemeine Typgenehmigung unabhängig vom Konzept der Systemarchitektur grundsätzliche Anpassungen der derzeitigen Regulierung auf nationaler und internationaler Ebene nötig (siehe Kapitel 5.2).

Derzeit wird die Anpassung der Regulierung von unterschiedlichen Akteuren vorangetrieben, insbesondere von Politik, Automobilherstellern, Anbietern von Sensorik, Aktorik und Datenverarbeitungstechnologie, sowie von Verbänden wie dem VDV oder VDA (detailliertere Recherchen werden im weiteren Projektverlauf durchgeführt). In diversen Gremien und Arbeitsgruppen auf nationaler Ebene, in der EU und internationalen Institutionen wie der UN werden Möglichkeiten zur Anpassung diskutiert und erarbeitet. Im Februar 2018 hat beispielsweise das „Inland Transport Committee (ITC)“ der UNECE das „World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, WP.29“ gebeten, eine „Working Party on Automated/Autonomous and Connected Vehicles (GRVA)“ einzurichten. Zur internationalen Abstimmung dienen auch Formate wie die „UNECE Working Party on Regulatory Cooperation and Standardization Policies (WP.6)“ als Plattform für Regierungen und andere Verwaltungsebenen zur Weiterentwicklung von Standardisierungen.

Da keine gültige Regulierung vorliegt, ist eine Einordnung der Zulassungsfähigkeit in Abhängigkeit unterschiedlicher Konzepte für die Systemarchitektur schwierig. Von den drei untersuchten Konzepten entspricht AD am ehesten dem Grundprinzip des heutigen Verfahrens, bei dem Fahrzeuge ohne Bezug

auf ergänzende Komponenten wie Infrastruktur zugelassen werden, was sich für die Zulassung positiv auswirken könnte. Ebenso könnte der Entfall von Datenaustausch mit Infrastruktur zu einer Vereinfachung mit Hinblick auf Datenschutzaspekte führen. Dies könnten möglicherweise Vorteile des Konzepts AD sein, allerdings sind Anpassungen der Regularien mit Einbeziehung von Infrastrukturnutzung wahrscheinlich, so dass der Vorteil gering ausfallen mag. Es ist sogar gut möglich, dass der Verzicht auf die Nutzung von Infrastruktur eine Zulassung erschweren könnte, da mit dieser ein Sicherheitsgewinn gegenüber rein fahrzeugbasierten Systemen erzielt werden könnte.

Aus wirtschaftlicher Sicht sind beim Konzept AD die niedrigen Anfangsinvestitionen positiv zu bewerten, die durch den Entfall von aufwendiger Infrastruktur gering gehalten werden können. Allerdings verringert sich dieser Vorteil mit steigender Anzahl von Fahrzeugen. Je höher die Anzahl von Fahrzeugen in einem Gebiet ist, also je geringer die Anzahl von Fahrzeugen pro Straßenkilometer mit Automatisierungsinfrastruktur, desto unwirtschaftlicher wird das Konzept AD im Vergleich zu MAD durch die hohen Kosten pro Driveboard und auch pro Kapsel (Kapselversion mit Überhang). Bei letzterer muss eine gewisse Ausstattung mit Sensorik vorgesehen werden, um fehlende Informationen aus der Infrastruktur zu kompensieren. Zudem sind beim Konzept AD keine Einnahmen durch Nutzungslizenzen der Infrastruktur für Fahrzeuge von Drittanbietern generierbar.

Im Betrieb können im Vergleich mit einem zentral geregelten Verkehrssystem Kosten für Teleoperation entfallen, falls diese nicht unabhängig von einer zentralen Steuerung als Sicherheitsebene vorgehalten werden soll. Möglichen Einsparungen bei der Teleoperation stehen jedoch höhere volkswirtschaftliche Kosten (im Vergleich zum Status Quo) durch Staus und durch negative Effekte auf Verkehrssicherheit, Klimawirkung und Schadstoffemissionen entgegen. Die Automatisierungskomponenten erfordern beim Konzept AD den erheblichen Anteil von rund 50 % des Energiebedarfs für den Betrieb des Fahrzeugs. Durch diesen erhöhten Energiebedarf ergeben sich entsprechend negative Umweltauswirkungen durch Stromerzeugung und Ressourcenbedarf, die letztendlich einen finanziellen volkswirtschaftlichen Schaden darstellen.

Kurzfasit AD: Bezüglich der technischen Machbarkeit weist dieses Konzept beträchtliche Herausforderungen auf. Die rein fahrzeugbasierte Umfelderkennung lässt nur relativ geringe Erfassungsreichweiten zu und der Betrieb von Automatisierungskomponenten in jedem einzelnen Fahrzeug führt zu einem sehr hohen Energiebedarf für den Betrieb. Allerdings bietet der Entfall von umfangreicher Kommunikation mit Objekten außerhalb des Fahrzeugs gewisse Vorteile mit Hinblick auf Cybersecurity, da sich die Zahl potenzieller Einfallstore für aggressive Manipulationen reduziert.

Die Zulassungsfähigkeit hängt wie bei allen Formen des automatisierten Fahrens von der Ausgestaltung zukünftiger Regularierungen ab. Es ist dabei denkbar, dass die Defizite bei der Umfelderkennung eine Hürde bei der Zulassung darstellen.

Auch bezüglich der Wirtschaftlichkeit sind Herausforderungen festzustellen. Driveboards müssen über eine umfangreiche Ausstattung mit Sensorik und Komponenten zur Datenverarbeitung verfügen, die die Kosten in die Höhe treiben. Eine gewisse Minimalausstattung mit Sensorik ist zudem auch bei den Kapseln notwendig. Da beim Konzept AD keine zentrale Verkehrssteuerung vorgesehen ist, können volkswirtschaftliche Vorteile wie die Reduzierung von Staus mit entsprechenden finanziellen Schäden nicht im gleichen Maße reduziert werden, wie dies für MAD möglich wäre. Von den drei untersuchten Konzepten für die Systemarchitektur wird das Konzept AD am schlechtesten bewertet.

7.2.2 Bewertung des Konzepts PMAD

Das Konzept PMAD bietet Vorteile bzgl. der technischen Machbarkeit, da sich anders als beim Konzept AD Sensorik und Datenverarbeitung von Fahrzeug und Infrastruktur ergänzen. So ist beispielsweise eine hohe Güte und Reichweite der Umfelderkennung möglich, da Informationen von mehreren Masten der Infrastruktur zusätzlich zu den vom Fahrzeug erhobenen Daten genutzt werden können. Wie bei der Variante MAD bestehen Herausforderungen bzgl. der Datenübertragung und Security, allerdings in geringerem Umfang, da das Fahrzeug selbst eine Ausstattung für automatisiertes Fahren besitzt. Die Kombination von Daten seitens Infrastruktur und Fahrzeug bietet höhere Hürden für gezielte Manipulationen als eine einzelne Informationsquelle, da ein umfangreicheres Datenset modifiziert werden muss.

Durch die in der Regel nutzbare Möglichkeit zur Verlagerung von Funktionen aus dem Fahrzeug in die Infrastruktur kann zudem ein geringer Energieverbrauch für den Betrieb von Sensorik, Datenverarbeitung und Kühlung im Fahrzeug erzielt werden. Dies ergibt sich daraus, dass Automatisierungskomponenten im Fahrzeug nicht genutzt werden, sofern Infrastruktur nutzbar ist. Allerdings muss das Kühlsystem so ausgelegt sein, dass die Komponenten im Fahrzeug ein Fahren auch ohne Infrastrukturunterstützung erlauben und auch beim Bauraum ergeben sich Nachteile im Vergleich zum Konzept MAD.

Hinsichtlich der Zulassungsfähigkeit ist zu unterscheiden, ob das Fahrzeug nur für Strecken zugelassen werden soll, die über eine hinreichende Ausstattung mit Infrastruktur verfügen (denkbar ist dabei ein Bezug auf ISAD Level), oder ob das Fahrzeug auch eine Zulassung für das Fahren in Bereichen ohne Infrastrukturunterstützung erhalten soll. Auch bei der ersten Variante könnte eine Ausstattung für automatisiertes Fahren auf Fahrzeugebene sinnvoll sein, da die Sicherheit dadurch maßgeblich erhöht wird. Dies könnte entsprechend auch dazu führen, dass ein solches System einfacher eine Zulassung erhält. Für den zweiten Fall, also eine Zulassung des Betriebs des Fahrzeugs auch auf Strecken ohne Infrastruktur gelten die beim Konzept AD aufgeführten Herausforderungen und Vorteile.

Die betriebswirtschaftliche Analyse zeigt grundsätzlich ein tragfähiges Geschäftsmodell für das Konzept PMAD auf. Dabei ist im Vergleich zum ebenfalls tragfähigen Geschäftsmodell mit dem Konzept MAD nachteilig, dass sowohl hohe Investitionskosten für die Infrastruktur wie auch für Driveboards und Kapseln anfallen. Eine steigende Anzahl von Driveboards und Kapseln in Relation zu Streckenkilometern, die mit Infrastruktur ausgestattet sind, wirken sich damit auch weniger vorteilhaft aus als bei MAD. Das System ist demnach insgesamt sehr teuer. Als Vorteil im Vergleich zum Konzept AD lassen sich allerdings wie beim Konzept MAD Einnahmen durch Lizenzgebühren für die Nutzung von Infrastrukturdiensten durch Dritte, also durch Fahrzeuge anderer Unternehmen, generieren.

Kurzfasit PMAD: Bezüglich der technischen Machbarkeit weist dieses Konzept Vorteile gegenüber AD und MAD auf, da die hohen Sicherheits- und Securityanforderungen an automatisiertes Fahren durch die Nutzung einer Kombination von Umfelderkennung und Datenverarbeitung im Fahrzeug und in der Infrastruktur leichter erfüllt werden können. Zudem erhöht die im Konzept vorgesehene zentrale Verkehrssteuerung die Verkehrssicherheit, zum Beispiel durch eine intelligente Organisation des Gesamtverkehrs und indem die Regeln der StVO durchgehend eingehalten werden. Nachteilig an der Automatisierungsausstattung der Fahrzeuge ist allerdings, dass der für Automatisierungskomponenten benötigte Bauraum und das Gewicht der Komponenten inkl. eines leistungsfähigen Kühlsystems die Driveboards weniger kompakt bzw. weniger leicht macht. Auch der Energieverbrauch ist höher als beim Konzept MAD.

Ein hohes Maß an allgemeiner Betriebssicherheit, Ausfallsicherheit und eine zuverlässige Objekterkennung mit hoher Reichweite könnten sich auch bezgl. der Zulassungsfähigkeit positiv auswirken. Diese hängt unter anderem davon ab, ob Fahrzeuge ausschließlich auf Strecken mit Infrastruktur betrieben werden sollen, oder auch in anderen Gebieten.

Mit Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit sind hohe Anfangsinvestitionen in sowohl Infrastruktur als auch Driveboards zu nennen. Diese können vermutlich auch nicht aufgewogen werden durch den Umstand, dass die Kombination von Fahrzeugintelligenz und Infrastrukturnutzung ein hohes Potenzial für geringe Ausfallzeiten und damit eine hohe Verfügbarkeit bietet. Da wie beim Konzept MAD eine zentrale Verkehrssteuerung vorgesehen ist, können entsprechende volkswirtschaftliche Vorteile erzielt werden.

Im Vergleich zu den beiden anderen Konzepten wird das Konzept PMAD etwas weniger gut als das Konzept MAD, aber deutlich besser als das Konzept AD bewertet. In der weiteren Detaillierung des Konzepts wäre zu untersuchen, wie weit man sich dem MAD annähern kann, also bis zu welchem Maße die Automatisierungsausstattung im Fahrzeug minimiert werden kann.

7.2.3 Bewertung des Konzepts MAD

Ein großer Vorteil von MAD liegt in der effizienten Bündelung von Komponenten für das automatisierte Fahren in straßenseitiger Infrastruktur an Stelle einer teuren und mit hohem Energiebedarf verbundenen Ausstattung jedes einzelnen Fahrzeugs. Einen weiteren Vorteil stellt die vorgesehene zentrale Verkehrssteuerung dar. Für beide Aspekte ist die der Sicherstellung einer stets verfügbaren Kommunikation mit genügend geringen Latenzzeiten eine grundlegende Voraussetzung, die neuartiger technischer Lösungen bedarf. Dabei kann die gleichzeitige Nutzung der Daten mehrerer Sensorposten und eine entsprechend weitblickende Erfassung des Verkehrsgeschehens dazu führen, dass Latenzzeiten eine weniger große Rolle spielen, als es bei kurzen Reichweiten von Sensorik und einer geringeren Menge verfügbarer Daten der Fall wäre. Zudem werden Sicherheitskonzepte bei MAD sicherstellen, dass Fahrzeuge bei Störungen oder Ausfall der Infrastruktur in einen sicheren Zustand überführt werden. Weitere Herausforderungen bezüglich der hochgenauen Lokalisierung und Identifizierung von Fahrzeugen, die benötigt wird, damit mit Hinblick auf die zentrale Verkehrssteuerung die Pfad- und Manöverplanung adäquat erfolgen kann. Hierzu bestehen verschiedene Lösungsansätze wie Markern an den Fahrzeugen. Weitere Möglichkeiten werden in 4.5.2 beschrieben. Im Vergleich der Konzepte MAD und PMAD ist festzustellen, dass der Schutz gegen Cyberangriffe und die Ausfallsicherheit bei PMAD durch die Redundanz vieler Systeme höher sind bzw. das Fahrzeug im Falle einer Störung weiter betreibbar ist. Dafür lassen sich bei PMAD Potenziale der Kosten- und Energieeinsparung nicht ausschöpfen. Mit Hinblick auf die Entwicklungen des Klimawandels ist davon auszugehen, dass letzterer Aspekt in Zukunft an Wichtigkeit weiter gewinnen wird.

Bezüglich der Zulassungsfähigkeit gilt grundsätzlich wie oben beschrieben, dass die heutige Regulierung angepasst werden muss. Herausforderungen des Konzepts MAD betreffen wie bei PMAD einerseits die Zulassung von Fahrzeug und Infrastrukturkomponenten und andererseits das System einer zentralen Verkehrssteuerung. Es ist davon auszugehen, dass letztere getrennt vom Fahrzeug zugelassen wird und dass Fragen der Nutzerdatenverarbeitung, der Haftung und Sicherheit eine Rolle spielen werden. Beim Konzept MAD ist es darüber hinaus auch bezüglich der Fahrzeuge und der Infrastruktur denkbar, dass diese separat voneinander zugelassen werden, wie es derzeit auch im Bahnbereich üblich ist. Da das Konzept MAD auf der Nutzung einer straßenseitigen Infrastruktur basiert, ist es gut denkbar,

dass die Fahrzeuge mit Berufung auf eine standardisierte Infrastruktur zugelassen werden. Eine Standardisierung der Infrastruktur ist ohnehin wünschenswert, um unterschiedlichste Fahrzeuge verschiedener Hersteller mit derselben Infrastruktur betreiben zu können.

In Gebieten mit Infrastruktur könnten neben Fahrzeugen, die von einer zentralen Verkehrsleitstelle gelenkt werden, auch andere, automatisierte oder nicht-automatisierte, Fahrzeuge fahren, die dann beispielsweise nur standardisierte Verkehrsinformationen und Fahrempfehlungen erhalten. Generell müssen die automatisierten Fahrzeuge unabhängig von Mischverkehr immer andere Verkehrsteilnehmer zuverlässig erkennen. Gerade hier liegt der Vorteil von MAD mit der vollumfassenden Erfassung aller Verkehrsteilnehmer in einem digitalen Zwilling (World Picture) des Verkehrs. Da die Erfassung bei AD auf das Sichtfeld einzelner Fahrzeuge eingeschränkt ist, hat MAD hier einen immensen systemischen Vorteil. Aufgrund dieses Vorteils bei der Erkennung und der damit verbundenen sinkenden Relevanz von Latenzzeiten wird MAD gegenüber AD immer deutliche Vorteile bei der Zulassung haben. Zudem vereinfacht dem TÜV Nord zufolge die konzeptbedingte Beschränkung von MAD Fahrzeugen auf Zonen mit entsprechender Infrastruktur die Zulassung.

Um das Optimierungspotenzial einer zentralen Verkehrssteuerung voll ausschöpfen zu können, wäre eine Beschränkung von Zonen mit Automatisierungsinfrastruktur auf den Betrieb kompatibler Fahrzeuge interessant. Nicht kompatible, also individuell automatisiert oder nicht automatisiert geführte Fahrzeuge wären dementsprechend in diesen Zonen nicht zugelassen. Beispiele für ein solches Vorgehen gibt es im Flugbereich mit Fluggebots- und -verbotszonen. Die Beschränkung von Gebieten auf Fahrzeuge, die MAD kompatibel sind (also zentral gesteuert werden), ist mit Hinblick auf die heutige Mobilitätskultur, die emotionale Verbindung vieler Menschen zum Autofahren und rechtliche Aspekte herausfordernd. Allerdings ist hier ein Wandel denkbar, der die Lösung heutiger Verkehrsprobleme unterstützen würde.

Bezüglich der Wirtschaftlichkeit sind bei MAD wie bei PMAD hohe Anfangsinvestitionen für die Infrastruktur zu nennen. Allerdings besteht MAD anders als bei PMAD ein großer Vorteil durch kostengünstige Driveboards und Kapsel, da teure Komponenten der Automatisierung zentral durch die Infrastruktur vorgehalten und Fahrzeuge nur minimal ausgestattet werden. Dies bedeutet, dass das Geschäftsmodell mit dem Konzept MAD umso erfolgreicher ist, je höher die Stückzahlen von Driveboards bzw. Kapsel pro mit Infrastruktur ausgestattetem Kilometer sind. Dabei können auch durch Vergabe von Lizenzen zur Nutzung der Infrastruktur an Fahrzeuge von Drittanbietern Gewinne erzielt werden. Zusätzlich führt auch bei MAD, wie bei AD und PMAD, die Möglichkeit des Betriebs vieler Kapseln mit einer geringen Anzahl an Driveboards zu Kosteneinsparungen und somit zu potenziellen Gewinnen.

Wird das Konzept MAD großskalig angewendet, sind auch volkswirtschaftliche Auswirkungen interessant. Die zentrale Verkehrssteuerung und die Bündelung von Fahrten führen bei MAD dazu, dass Staus reduziert werden können und die Möglichkeit, dass eine MAD Fahrzeugflotte gesamtgesellschaftlich kostengünstiger zu bewerten ist, als eine Flotte mit AD Fahrzeugen. Gemäß der in Kapitel 6.3.5 vorgestellten Kosten-Nutzen Analyse kann mit einer relativ kleinen Fahrzeugflotte ein gewisser Teil des Personenverkehrs, sowie der gesamte Gütertransport einer Stadt bewerkstelligt werden. Dies bezieht sich beim Personentransport auf die Fahrten, die derzeit individuell, also nicht mit dem öffentlichen Personennahverkehr durchgeführt werden. Dieser besitzt weiterhin auf vielen Strecken große Vorteile und soll bei einem Szenario mit MAD bestehen bleiben. Mit den zentral gesteuerten Fahrzeugen, deren Automatisierung infrastrukturbasiert erfolgt und dem Ride-Pooling Konzept lassen sich neben direkten Kosten auch externe Kosten einsparen. Diese begründen sich vor allem auf die reduzierte Fahrleistung der Flotte durch die geteilte Nutzung von Fahrzeugen als auch auf den geringen Energiebedarf auf

Grund der zentralen Bereitstellung von Sensorik und Rechnerkapazität über die Infrastruktur. Dies führt dazu, dass der Energiebedarf pro Fahrzeug deutlich sinkt und somit signifikant kleinere Batterien samt weniger kritischen Rohmaterialien eingesetzt werden können, ohne an Reichweite zu verlieren. Die großen Vorteile des Konzept MAD liegen somit im (gesamt-)wirtschaftlichen Bereich, wobei der Umwelt- und Klimaschutz als Kostenfaktor explizit mit zu nennen ist.

Kurzfasit MAD: Das Konzept MAD ist durch die Neuartigkeit und die intensive Nutzung von Infrastruktur technisch herausfordernd, wobei Lösungsansätze für die Herausforderungen bestehen. Zulassungstechnisch ist die Einbeziehung von Infrastruktur bei definierten Standards durch die potenzielle Erhöhung der Sicherheit vielversprechend. Auch die zentrale Verkehrssteuerung verspricht einen Gewinn an Sicherheit und Effizienz.

Die besonderen Vorteile von MAD liegen in den positiven wirtschaftlichen und gesamtgesellschaftlichen Potenzialen, die in der Reduzierung von Kosten, Materialaufwand und Energie liegen. Das Teilen von Ressourcen durch den infrastrukturbasierten Ansatz für die Automatisierung, die Bündelung von Fahrten und den modularen Ansatz mit Driveboard und Kapseln bietet einen Lösungsansatz für drängende Probleme des Verkehrsbereichs. Dies kann ein Baustein sein für einen wirtschaftlich und sozialverträglichen effektiven Klimaschutz, effiziente Nutzung der Kapazitäten des Straßennetzes und eine sichere Mobilität für alle Verkehrsteilnehmer. Unter Berücksichtigung aller bisherigen Analysen wird das Konzept MAD als am vorteilhaftesten bewertet. Mit Hinblick auf technische und zulassungsrechtliche Fragen bei der weiteren Entwicklung ist zu untersuchen, inwieweit in den Fahrzeugen auch bei umfassender Nutzung von Infrastrukturkomponenten eine Minimalausstattung für das automatisierte Fahren vorzuhalten ist.

7.2.4 Fazit zum Vergleich der Konzepte AD, PMAD und MAD

Die drei Konzepte unterscheiden sich insbesondere bezüglich der Anforderungen an die Sensor- und Datenverarbeitungsausstattung im Fahrzeug bzw. in der Infrastruktur und die Datenübertragung. Die Verlagerung von Sensorik und Datenverarbeitung in die Infrastruktur bringt insbesondere beim Konzept MAD Vorteile bzgl. der Gesamtkosten, des Gesamtenergiebedarfs und der Optimierung des Verkehrsgeschehens. Zudem bieten sich auch Vorzüge mit Hinblick auf die weitreichende Umfelderkennung, die Kühlung von Komponenten sowie ein geringes Fahrzeuggewicht. Bezüglich eines Betriebs im Falle einer Störung der Infrastruktur bzw. der Kommunikation bietet die Variante PMAD Vorteile, die allerdings durch wirtschaftliche und gesamtgesellschaftliche Vorteile des Konzepts MAD überkompensiert werden.

Auf Basis der durchgeführten Analysen ist die Variante MAD am erfolgversprechendsten. Gegebenenfalls ist zur Erfüllung der hohen Sicherheits- und Securityanforderungen an das fahrerlose Fahren eine gewisse Grundausstattung des Fahrzeugs vorzusehen, die über ein sicheres Anhalten hinausgeht und noch ein gewisses Weiterfahren bei einer Störung oder einem Ausfall der Kommunikation mit der Infrastruktur ermöglicht. Um dabei Kosten und Energiebedarf möglichst gering zu halten, ist anzustreben, einen großen Anteil von Funktionalitäten in der Infrastruktur zu verorten und nur noch eine Minimalausstattung im Fahrzeug anzusiedeln.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: U-Shift Fahrzeugkonzept	7
Abbildung 2: Beispiel: U-Shift Hub mit RCUs in den Straßenlaternen.....	7
Abbildung 3: MAD Hypothese.....	8
Abbildung 4: Architekturansatz a) AD b) MAD	10
Abbildung 5: Einordnung MAD	12
Abbildung 6: ISAD Levels – Infrastructure Support Levels of Automated Driving	13
Abbildung 7: Anwendungsbeispiel ISAD	13
Abbildung 8: Übersicht der Anwendungsfälle	15
Abbildung 9: Mögliches Architekturkonzept für MAD mit allen Teilnehmern, Sensorik und Vernetzung.	17
Abbildung 10: Übersicht verschiedener Netzwerk-Topologien der Infrastruktur. Links: globales Backend, Mitte: Multi-access Edge Computing (MEC), rechts: MEC + globales Backend.....	20
Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Sensorpfostens.....	29
Abbildung 12: Blickwinkel einer Kamera mit unterschiedlicher Einbauhöhe. Links: höchste Stelle des U- Shift-Driveboards (ca. 90 cm), rechts: höchste Stelle an einer aufgenommenen Kapsel (ca. 2m)	31
Abbildung 13 Ausblick auf die Architektur für die Vision 2040	33
Abbildung 14: Rechtskreise	34
Abbildung 15 Exemplarischer Zulassungsprozess.....	40
Abbildung 16: ISO 26262 Übersicht.....	42
Abbildung 17: Kennzeichnungspflicht im Rahmen von Forschungsprojekten.....	45
Abbildung 18: Übersicht Genehmigung und Klassifizierung nach EU-Verordnung Nr. 678/2011	51
Abbildung 19: Beispiele für Typenbezeichnungen (M-O) [nach EU-Verordnung Nr. 678/2011]	52
Abbildung 20: Richtlinien, Verordnungen, Gesetze (Auszug) – Fzg. im öffentlichen Straßenverkehr	52
Abbildung 21: Gesetzliche Normen zu Sitzstrahlen für den Fahrzeugfahrerarbeitsplatz.....	53
Abbildung 22: a) U-Shift-Konzept ohne Fahrerarbeitsplatz für Vision SAE 5; b) U-Shift-Konzept mit Fahrerarbeitsplatz für SAE 2 und Vision SAE 5.....	54
Abbildung 23: Einbauvorschrift Scheinwerfer für Ablendlicht.....	54
Abbildung 24: Einbauvorschrift für vorderer Fahrrichtungsanzeiger.....	55
Abbildung 25: Methodisches Vorgehen bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse	57
Abbildung 26: Vergleich der Auszahlungen (Barwerte im Zeitraum 01/2025-12/2025, in € ₂₀₂₅)	58
Abbildung 27: Vergleich der Auszahlungen (Barwerte im Zeitraum 01/2030-12/2040, in € ₂₀₃₀)	59
Abbildung 28: Vergleich der Einzahlungen (Barwerte im Zeitraum 01/2030-12/2040, in € ₂₀₃₀)	60
Abbildung 29: Verlauf der jährlichen Überschüsse.....	60
Abbildung 30: Kostenvergleich unterschiedlicher Automatisierungsarchitekturen (AD, PMAD, MAD) ..	61

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Umfahren von parkenden Fahrzeugen.....	16
Tabelle 2: Verteilung von Funktionen auf Fahrzeug und Infrastruktur.....	26
Tabelle 3: Ausstattung der Road-Capturing-Unit in zwei verschiedenen Ausprägungen.	30
Tabelle 4: Sensorausstattung U-Shift-Fahrzeug - Ausprägungen „AD“, „PMAD“ und „MAD“.....	30
Tabelle 5: Übersicht über die Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalysen verschiedener Use-Cases.....	56
Tabelle 6: Einzahlungen im Zeitraum 01/2025-12/2025, in € ₂₀₂₅	57
Tabelle 7: Überschuss im Zeitraum 01/2025-12/2025, in € ₂₀₂₅	58
Tabelle 8: Barwerte aller Zahlungen im Zeitraum 01/2030-12/2040, in € ₂₀₃₀ (Basisszenario).....	60
Tabelle 9: Amortisationsdauer der Systeme in Anwendungsfall 2 im Basisszenario.....	61

Tabelle 10: Sensitivitätsanalyse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für den Use-Case 2	62
Tabelle 11: Beschreibung der Kosten und Nutzen: Anwendungsfall 3	65
Tabelle 11: Kennwerte des Verkehrs und Fahrzeugflotte.....	67
Tabelle 12: Anzahl benötigter Sensorkomplexe Typ A, U-Shift Vision 2040.....	69
Tabelle 13: Ergebnisse Kosten-Nutzen-Analyse Anwendungsfall 3	69
Tabelle 14: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Kosten-Nutzen Analyse.....	70
Tabelle 15: Auszug aus der Nutzwertanalyse – ausgewählte Kriterien der technischen Machbarkeit und Bewertung bzw. Gewichtung für das Konzept PMAD für die Systemarchitektur	78

10 Abkürzungsverzeichnis

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
5G	<i>Fünfte Generation [des Mobilfunks]</i>
5GAA	<i>5G Automotive Association</i>
DRT	<i>Demand-Responsive-Transport</i>
DSRC	<i>Dedicated Short Range Communication</i>
EU	<i>Europäische Union</i>
GIS	<i>Geoinformationssystem</i>
ISAD	<i>Infrastructure Support Levels of Automated Driving</i>
KI	<i>Künstliche Intelligenz</i>
LAAS	<i>Logistic-as-a-Service</i>
LTE	<i>Long Term Evolution - Mobilfunkstandard der dritten Generation</i>
MAAS	<i>Mobility-as-a-Service</i>
MAD	<i>Managed Automated Driving</i>
MEC	<i>Multi-access Edge-Computing</i>
MIV	<i>Motorisierter Individualverkehr, Motorisierter Individualverkehr</i>
OBU	<i>On-Board Unit</i>
ÖPNV	<i>Öffentlicher Personennahverkehr</i>
PDI	<i>Physical Digital Infrastructure</i>
Pkw	<i>Personenkraftwagen</i>
PMAD	<i>Partially Managed Automated Driving</i>
RAMI 4.0	<i>Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0</i>
RCU	<i>Road Capturing Unit</i>
RSU	<i>Road Side Unit</i>
TAF	<i>Testfelds Autonomes Fahren Baden-Württemberg</i>
uRLLC	<i>Ultra-Reliable and Low-Latency Communication</i>
VRU	<i>Vulnerable Road User</i>