

IV₂X

INTEGRIERTE BETRACHTUNG FAHRZEUGKOMMUNIKATION

Dr. Robert Protzmann
Dr. Ilja Radusch

Fraunhofer FOKUS

Dr. Andreas Festag
Dr. Richard Fritzsche

Fraunhofer Institut für Verkehrs-
und Infrastruktursysteme IVI

Marco Rehme

IVM Institut für Vernetzte
Mobilität gGmbH

Projektnummer: <141488>
Berlin, 13.04.2018

IN ZUSAMMENARBEIT MIT / GEFÖRDERT VON

Inhalt

1	Hintergrund und Zielsetzung	4
2	Konzeption und Methodik	6
2.1	Gesamtkonzeption	6
2.2	Abgrenzung des Untersuchungsbereiches	7
2.3	Methodik des Konzepts	8
3	Stakeholder des Gesamtsystems	10
3.1	Überblick	10
3.2	Primäre Stakeholder	11
3.3	Sekundäre Stakeholder	13
3.4	Sonstige Stakeholder	14
4	Anwendungsklassen und deren Anforderungen	15
4.1	Existierende und anvisierte V2X-Anwendungen	15
4.1.1	Bereits heute verfügbare Anwendungen	15
4.1.2	ETSI ITS RoadSafety Application Modell	16
4.1.3	C2C-CC Kommunikationsanwendungen	17
4.1.4	5G-PPP Vernetzungsanforderungen im ITS Bereich	18
4.2	Eigene Klassifikation	18
4.2.1	Anforderungen der Anwendungen	19
4.2.2	Vorwiegend mobilitätsbezogene Anwendungen	19
4.2.3	Vorwiegend personenbezogene Anwendungen	22
4.2.4	Einordnung der Klassen	23
5	Technologiebewertung	25
5.1	Übersicht der Technologievarianten	25
5.1.1	WLAN-V2X	25
5.1.2	Backend-V2X	26
5.1.3	Cellular-V2X	28
5.2	Kriterien der Technologiebewertung	29
5.2.1	Bewertungskriterien	29
5.2.1.1	Leistungskriterien	30
5.2.1.2	Funktionale Kriterien	31
5.2.1.3	Entwicklungskriterien	32
5.2.2	Gewichtung der Bewertungskriterien	33
5.2.3	Ergebnisse der Nutzwertanalyse für V2X-Kommunikationstechnologien	34
5.2.4	Alternative Gewichtung und Bewertung der Nutzwertanalyse für V2X-Kommunikationstechnologien	38
6	Einführungsszenarien	40
6.1	Allgemeine Megatrends und Technologietrends	40
6.2	Kritische Deskriptoren für die Szenarien-Unterscheidung	41
6.3	Wechselwirkungen zwischen Technologievarianten bei der Systemeinführung	42
6.3.1	Technologielebenszyklen	42
6.3.2	Technologische S-Kurven	44
6.4	Beschreibung der Einführungsszenarien	45
6.4.1	Herleitung und Gesamtüberblick	45

6.4.2	Szenario A – WLAN-V2X stärker verbreitet	46
6.4.3	Szenario B – Backend-V2X bei geringer Verbreitung von WLAN-V2X und Cellular-V2X	47
6.4.4	Szenario C – Cellular-V2X stärker verbreitet	47
7	Kostenanalyse	49
7.1	Bestandteile der Gesamtsystemkosten und Zuordnung zu Stakeholdern	49
7.1.1	Onboard Equipment	50
7.1.2	Roadside Equipment	52
7.1.3	Central ITS Resources	54
7.1.4	Mobile Network Equipment	56
7.2	Verwendete Datenbasis, Annahmen und Inputgrößen der Berechnung	57
7.3	Fallstudie Berlin: Quantifizierung potenzieller Infrastrukturbedarfe	60
7.4	Ergebnisse der Kostenanalyse	61
7.4.1	Szenario A	61
7.4.2	Szenario B	63
7.4.3	Szenario C	65
7.5	Gesamtbeurteilung und Abwägung mit den IVS-Nutzenpotenzialen	66
8	Betreibermodelle	72
8.1	Grundlegende Einordnung der Untersuchung von Betreibermodellen	72
8.2	Traditionelle Trägermodelle für (Verkehrs-)Infrastrukturen	73
8.3	Potenzielle Betreibermodelle für straßenseitige Kommunikationsinfrastruktur	77
8.3.1	Generelle Eignung und Besonderheiten des Roadside Equipment	77
8.3.2	Hauptvarianten von Betreibermodellen für das Roadside Equipment	78
8.3.2.1	Variante 1: Integrierter öffentlicher Träger	78
8.3.2.2	Variante 2: Private Betreibergesellschaft für die IKT-seitige Infrastruktur	79
8.3.2.3	Variante 3: Strategische Kooperation zwischen öffentlicher und privater Seite	80
8.3.3	Neuartige Wege der Infrastrukturfinanzierung	81
8.4	Vergleichende Gegenüberstellung und szenariospezifische Auswertung	83
9	Zusammenfassung und Strategieentwicklung	87
9.1	Methodischer Ansatz zur Strategiebestimmung einer Stadt bzw. Kommune	87
9.2	Strategieentwicklung und Handlungsempfehlungen	89
	Glossar	95
	Abkürzungsverzeichnis	97
	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	100

Literaturverzeichnis		103
A	Hintergrundinformationen zu verwendeten Methodischen Ansätzen	111
B	Vergleich der technischen Parameter von WLAN-V2X, Cellular-V2X und Backend V2X	115
C	Festlegung der Gewichtungsfaktoren in der Technologiebewertung	116
D	Detaillierte Ergebnisdarstellung der Technologiebewertung	117
E	Deskriptoren für die Einführungsszenarien	119
F	Inputwerte für die Beispielkalkulationen der Fallstudie	120

1 Hintergrund und Zielsetzung

In der Mitteilung der Europäischen Kommission [EC2016a] wird die EU-Strategie für eine Einführung von Kooperativen Intelligenten Verkehrssystemen (C-ITS) dargelegt. Die Anwendungen, welche C-ITS ermöglichen, erhöhen die Verkehrssicherheit und erlauben eine effektivere Nutzung der Infrastruktur und die Reduzierung von Emissionen. Die vorgestellte Strategie der EU-Kommission ist das Ergebnis intensiver Arbeit auf Expertenebene und von der EU geförderter Erprobungen. Dabei wird eine Reihe von Anwendungen für die konzertierte Einführung in der EU für das Jahr 2019 definiert. Die kommunikationsseitigen Umsetzungsvorschläge sind prinzipiell technologie-neutral formuliert, aber es wird die Kombination von direkter WLAN-Kommunikation und zellulärem Mobilfunk angenommen. Alternative Varianten der V2X (Vehicle-to-Everything)-Kommunikation sowie die Frage der Finanzierung der straßenseitigen Infrastruktur wurden nicht thematisiert. Das vorliegende Konzept berücksichtigt beide Fragestellungen und ist als interessensunabhängige Entscheidungshilfe für Städte und Kommunen gedacht, welche sich mit der Einführung von C-ITS befassen. Es dient der Unterstützung der Entscheidungsfindung aber gibt keine definitive Empfehlung für eine spezielle Technologie ab.

Dieses Konzept stellt die drei grundsätzlich infrage kommenden Kommunikationstechnologien – WLAN-V2X, Cellular-V2X und Backend-V2X – mit einer qualitativen multikriteriellen technischen Analyse und Bewertung einander gegenüber und wendet einen eigenen methodischen Ansatz für die Analyse der drei Technologievarianten in verschiedenen Einführungsszenarien an, welcher auch eine systematische Kostenanalyse beinhaltet. Das **Ziel des Konzeptes** ist es, kommunalen Aufgabenträgern und Entscheidern ein handhabbares Instrumentarium zur fundierten Entscheidungsfindung an die Hand zu geben. Es zielt dabei auf die folgenden **Leitfragen** ab:

- Welche Anforderungen werden künftig relevante Anwendungsklassen an die Kommunikationstechnologien stellen und in welchen Kriterien weisen einzelne Technologien Stärken und Schwächen bezüglich dieser Anforderungen auf?
- Wodurch wird die weitere Entwicklung bzw. die Durchsetzung bestimmter Technologien vorangetrieben und wie sehen plausible Einführungsszenarien aus?
- Welcher Nutzen und welche Kosten sind mit der Errichtung einer straßenseitigen Kommunikationsinfrastruktur in den Szenarien verbunden?
- Welche Betreibermodelle sind für solche Infrastrukturen in den denkbaren Szenarien sinnvoll und welche Vor- und Nachteile besitzen diese für die Kommune?
- Auf welche Weise können Städte bzw. Kommunen fundierte Strategien und Handlungsempfehlungen für die lokale Einführung von C-ITS Entwicklung ableiten?

Fahrzeug-Kommunikationsnetze mit direkter WLAN-Kommunikation, basierend auf den Standards ETSI ITS G5 und IEEE 802.11p (in diesem Konzept kurz **WLAN-V2X**), haben eine lange Historie in der Forschung und der Agenda der Europäischen Kommission. Parallel dazu arbeitet die 3GPP auf dem Weg zu 5G an entsprechenden LTE-Erweiterungen für direkte Kommunikation (hier kurz **Cellular-V2X**), um Mobilitätsanwendungen mit hohen Anforderungen an Zuverlässigkeit und kurze Latenz zu unterstützen. Mit 3GPP Release 14 [3GPP2016] wurde das Feature Set LTE-V2X veröffentlicht, welches auf die Kommunikation zwischen Fahrzeugen abzielt und für die Einführung sowohl in den Fahrzeugen als auch in der Straßeninfrastruktur in Kürze zur Verfügung stehen wird. WLAN-V2X und Cellular-V2X werden allgemein als konkurrierende Technologien angesehen, welche aufgrund unterschiedlicher Strukturen in der physikalischen Schicht grundsätzlich nicht kompatibel sind. Möglichkeiten einer Koexistenz beider Technologien

können aus heutiger Sicht jedoch nicht ausgeschlossen werden. Eine Vernetzung von Fahrzeugen mit dem Internet und entsprechenden Backends der Fahrzeughersteller erfolgt bereits seit einigen Jahren über klassische Konsumentenschnittstellen des Mobilfunks (hier kurz **Backend-V2X**). Darüber hinaus kann Backend-V2X auch für die Realisierung von fahrzeugherstellerübergreifenden C-ITS-Anwendungen genutzt werden.

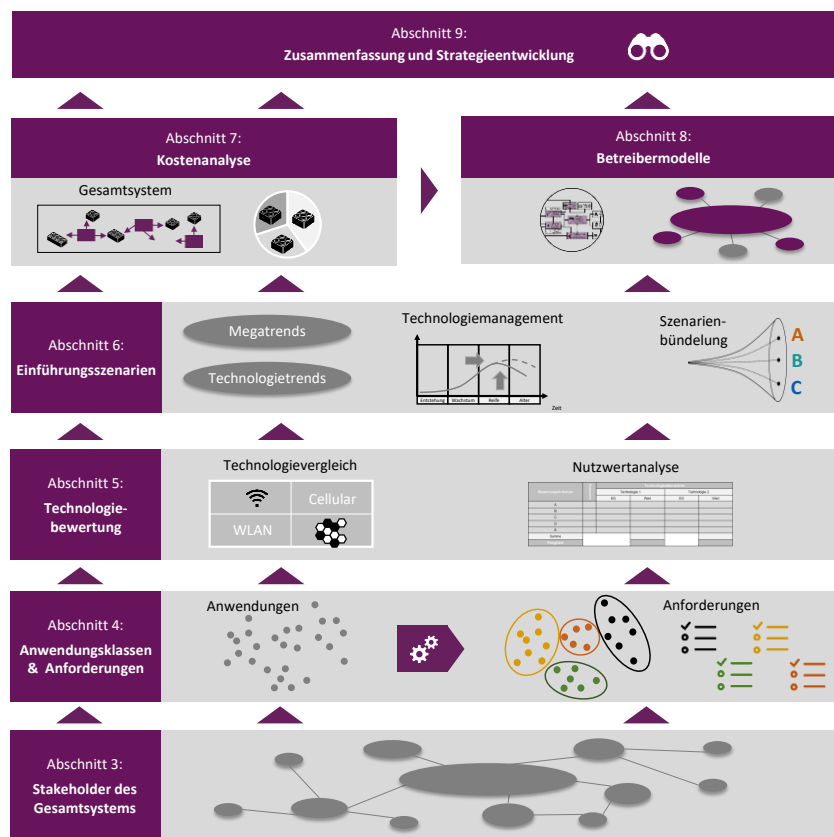
Die Einführung einer der benannten Kommunikationstechnologien für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und der Straßeninfrastruktur ist eine Aufgabe mit globalen Konsequenzen und Abhängigkeiten. Aus Perspektive einer einzelnen Stadt ist letztlich nicht beeinflussbar, welche Technologien sich bis wann in den Fahrzeugflotten bestimmter Wirtschaftsräume (USA, Europa, China) durchsetzen werden. Deswegen ist es wichtig, die primären Treiber und die einzelnen Vor- und Nachteile schon möglichst gut im Voraus abschätzen zu können. Sobald eine breite Infrastruktur für eine bestimmte V2X-Technologie geschaffen wurde, wird es schwierig und teuer, eine neue bzw. zusätzliche Technologie für weitere sicherheits- und effizienzbezogene Anwendungsfälle zu etablieren.

2 Konzeption und Methodik

2.1 Gesamtkonzeption

Die Ausarbeitung von Strategien für eine bestmögliche Ausschöpfung von V2X-Potenzialen am Beispiel einer Stadt bzw. Kommune – das Hauptziel dieses Konzepts – bedarf einer umfassenden, systematischen und nachvollziehbaren Analyse. Dazu ist das Gesamtkonzept in sieben inhaltliche Abschnitte unterteilt, die aufeinander aufbauen und schlussendlich eine systematische Ableitung von sinnvollen Handlungsoptionen erlauben. Abbildung 1 veranschaulicht die Gesamtkonzeption und wird nachfolgend kurz erläutert.

Abbildung 1 Gesamtkonzeption der Untersuchung



Abschnitt 3 stellt zunächst die Stakeholder des Gesamtsystems vor. Davon ausgehend werden in späteren Abschnitten primär an den Technologieanforderungen ausgerichtete Klassifizierungen der Anwendungen vorgenommen (Abschnitt 4), sowie mögliche Betreibermodelle diskutiert (Abschnitt 8).

In **Abschnitt 4** werden existierende und zukünftige Anwendungen für V2X-Kommunikation im Kontext des Untersuchungsgegenstandes kategorisiert und deren Anforderungen an die Kommunikationstechnologien dargestellt.

In **Abschnitt 5** werden die relevanten V2X-Kommunikationstechnologien – WLAN-V2X und Cellular-V2X bzw. Backend-V2X hinsichtlich relevanter Kriterien beurteilt. Die Bewertungskriterien werden von den leistungsbezogenen und funktionalen

Anforderungen sowie von Rahmenbedingungen der Technologie- und Umfeldentwicklung abgeleitet. Die Technologiebewertung basiert auf der Nutzwertanalyse, einer klassischen Methode des Technologiemanagements, die typischerweise in der Phase der Technologieplanung eingesetzt wird und es erlaubt, komplexe Zielsysteme und Wirkungszusammenhänge auf entscheidbare Strukturen zu reduzieren.

Basierend auf der Anwendungsklassifizierung und der Anforderungsanalyse sowie der Technologiebewertung werden im **Abschnitt 6** Szenarien für die Einführung von V2X-Kommunikationstechnologien definiert. Konkret werden mit Hilfe des Technologielebenszyklusmodells und des technologischen S-Kurven-Konzepts zwei weitverbreitete Werkzeuge aus dem Bereich des Technologie- und Innovationsmanagements angewendet, um plausible Einführungsszenarien der Technologieoptionen WLAN-V2X und Cellular-V2X sowie deren Wechselwirkungen zu untersuchen.

In **Abschnitt 7** wird eine Kostenanalyse für die drei entwickelten Einführungsszenarien vorgenommen. Die Analyse basiert auf einem vereinfachten Kostenmodell, welches das komplexe Wirkungsgefüge von Intelligenten Verkehrssystemen (IVS) handhabbar abbildet. Hierfür werden die primär relevanten Subsysteme und -komponenten des V2X-Gesamtsystems definiert, ihre wesentlichen Kostenblöcke bzw. -bestandteile identifiziert und den Stakeholdern zugeordnet. Basierend auf dem so bestimmten Kostenmodell werden primäre Kostenbestandteile szenariospezifisch mit Hilfe von Lebenszyklusrechnungen quantifiziert und es wird eine Fallstudie für die Stadt Berlin durchgeführt.

In **Abschnitt 8** werden Betreibermodelle in Hinblick auf die drei Einführungsszenarien vorgestellt und diskutiert. Diese Betreibermodelle basieren auf der vorherigen Stakeholder-Analyse, wobei der Fokus auf den primären IVS-Stakeholdern und auf dem Betrieb benötigter straßenseitiger Kommunikationsinfrastrukturen liegt.

Abschnitt 9 stellt, auf Basis der vorangegangenen Analysen, ein mögliches Ziel-Portfolio aus der Perspektive einer Stadt bzw. Kommune vor. Die dahinterstehende Methodik erlaubt den Anwendern (Entscheidungsträgern) die Ableitung von Strategien und Handlungsempfehlungen für die Einführung von V2X-Kommunikationstechnologien und für die Ausschöpfung von V2X-Nutzenpotentialen vor dem Hintergrund individueller Zielsetzungsschwerpunkte und Präferenzen.

2.2 Abgrenzung des Untersuchungsbereiches

Das vorliegende Konzept betrachtet kooperative Intelligente Transportsysteme (C-ITS), also solche die auf einem Informationsaustausch über V2X-Kommunikation basieren. Es beschränkt sich dabei auf den Verkehrsträger Straße. Der Fokus liegt zudem auf urbanen Verkehrsräumen wie Berlin und der zeitliche Betrachtungshorizont erstreckt sich auf den ungefähren Bereich der nächsten 20 Jahre.

Nicht zuletzt aufgrund der unterschiedlichen Reifegrade der verfügbaren Technologien verzichtet dieses Konzept auf eine quantitative technische Leistungsbewertung der einzelnen Kommunikationstechnologien. Erfahrungen aus vergangenen nationalen und internationalen Projekten wie sim^{TD} oder DRIVE C2X machen deutlich, dass eine derartige Bewertung allein für eine einzelne Technologie wie WLAN-V2X langwierig und aufwendig ist und den Zeitrahmen und Umfang dieser Arbeit bei weitem sprengen würde. Fundierte Untersuchungen in gleichwertiger Tiefe sind noch nicht für alle Kommunikationstechnologien gleichermaßen verfügbar, weshalb in dieser Arbeit auf die qualitative Bewertung durch Experten zurückgegriffen wird.

Dementsprechend sei an dieser Stelle noch einmal betont, dass die Nutzwertanalyse zwar eine mögliche Priorisierung der einzelnen Technologieoptionen ergibt – diese sind allerdings – wie später detaillierter ausgeführt – von der jeweiligen Gewichtung der Kriterien abhängig. Die Gewichtungen – und damit die Gesamtbewertungen – im vorliegenden Konzept sind entsprechend aus kommunaler Sicht begründet und können für andere Stakeholder durchaus anders ausfallen.

Des Weiteren weist die Arbeit im ökonomischen Teil erstmalig wesentliche Kostenblöcke und Betreibermodelle für die einzelnen Kommunikationstechnologien aus kommunaler Sicht aus, verzichtet aber im Folgenden auf eine weitere finanzielle Bewertung sowie eine Quantifizierung des etwaigen finanziellen bzw. nicht-finanziellen Gesamtnutzens der Anwendungen und Kommunikationstechnologien. Dies wären mögliche Folgeuntersuchungen, die in enger Zusammenarbeit mit den entsprechenden Verantwortlichen angegangen werden könnten.

2.3 Methodik des Konzepts

Im vorliegenden Konzept werden unterschiedliche methodische Ansätze verwendet, welche an dieser Stelle in verkürzter Form (und detaillierter in Anhang A) vorgestellt werden.

Die Erarbeitung der Anforderungsanalyse von V2X-basierten Anwendungen ist zum großen Teil auf einer umfangreichen Literaturrecherche der Veröffentlichungen der primär involvierten Stakeholder des Systems begründet. Deshalb werden diese zuerst identifiziert und systematisiert. Die gefundenen Anwendungen werden in einem Katalog gesammelt und nach Anforderungskriterien klassifiziert. Die Anforderungskriterien orientieren sich stark an den Kriterien, die auch die Stakeholder in ihren Veröffentlichungen verwenden.

Zur ganzheitlichen Technologiebewertung von V2X-Kommunikationstechnologien wird in diesem Konzept die Nutzwertanalyse angewendet, welche entsprechend der in Abbildung 2 dargestellten Tabelle umgesetzt wurde. Zu den ausgewählten Bewertungskriterien wird jeweils ein Erfüllungsgrad (EG) bestimmt, der festlegt, in welchem Maß die Technologiealternative das Bewertungskriterium erfüllt. In diesem Konzept (vgl. Abschnitt 5) sowie in dem in Abbildung 2 betrachteten Beispiel wird dabei eine Skala von fünf Bewertungsstufen verwendet. Um die unterschiedliche Relevanz der Bewertungskriterien zu berücksichtigen, wird der EG mit einem Gewichtungsfaktor multipliziert, so dass sich ein gewichteter Teilnutzenwert einer Technologiealternative für ein bestimmtes Bewertungskriterium ergibt. Der Gesamtnutzenwert entsteht aus der Summe der gewichteten Teilnutzenwerte. Daraus wird schlussendlich eine Rangliste der Technologievarianten abgeleitet. Es ist wichtig, dass die Kriterien weitestgehend unabhängig voneinander gewählt werden, um Mehrfachbewertungen zu vermeiden.

Abbildung 2 Beispiel der Anwendung der Nutzwertanalyse

Bewertungskriterium	Gewichtung	Technologiealternativen			
		Technologie 1		Technologie 2	
		EG	Wert	EG	Wert
A	30	1	30	5	150
B	30	5	150	1	30
C	20	3	60	3	60
D	20	3	60	3	60
E	10	5	50	3	30
Summe			350		330
Rangliste			1.		2.

Bewertungsstufen					
Erfüllungsgrad	--	-	0	+	++
Punktzahl	1	2	3	4	5

3 Stakeholder des Gesamtsystems

Dieser Abschnitt stellt die involvierten Stakeholder des Systems vor. Die Stakeholder sind zum einen maßgeblich an der Ausgestaltung der Anwendungen beteiligt und haben bereits eigene Anwendungsfelder definiert. Sie werden daher im nachfolgenden Abschnitt 4 der Anwendungsanalyse referenziert. Zum anderen sind sie für die Betrachtung der Betreibermodelle relevant.

3.1 Überblick

Bei Anwendungen für Verkehrssysteme stehen zunächst die **Verkehrsteilnehmer** selbst im Mittelpunkt. Diese verwenden Fahrzeuge von **Fahrzeugherstellern** und befahren Straßen, welche von **Straßenbetreibern** bewirtschaftet werden. Durch vernetzte und intelligente Mobilität kommen weitere Beteiligte hinzu, welche Kommunikationspfade unter den Verkehrsteilnehmern sowie zwischen Verkehrssystemelementen, also insgesamt verschiedenen Endknoten, ermöglichen. Dementsprechend gehören zu den relevanten Stakeholdern zunächst **Mobilfunknetzbetreiber**, da sie bereits über eigene Kommunikationsinfrastrukturen mit Zugangs- und Backend-Netzen entsprechend der Standards der 3GPP, also UMTS und LTE, verfügen. Weil die grundsätzliche Frage, welche Technologieoption für V2X-Kommunikation vorteilhafter ist, noch nicht entschieden ist, kommen aber auch andere bzw. neue Akteure für diese Aufgabe in Frage. Deswegen wird in diesem Konzept die Stakeholder-Rolle der **Betreiber von Roadside Equipment** eingeführt, welche zunächst unabhängig von den Mobilfunknetzbetreibern ist und auch von anderen Beteiligten ausgefüllt werden kann. Es verhält sich generell so, dass verschiedene Rollen entweder von rollenspezifischen Akteuren oder von ein und derselben privatwirtschaftlichen oder öffentlichen Institution wahrgenommen werden können. Beispielsweise können Fahrzeughersteller ebenfalls als institutionelle Verkehrsteilnehmer auftreten. Insgesamt wird in dieser Arbeit eine Dreiteilung der Vielzahl an Stakeholder-Gruppen – in die gerade erwähnten primären sowie die sekundären und sonstigen Stakeholder – vorgenommen.

Abbildung 4 Übersicht der primären und sekundären Stakeholder des V2X-Systems

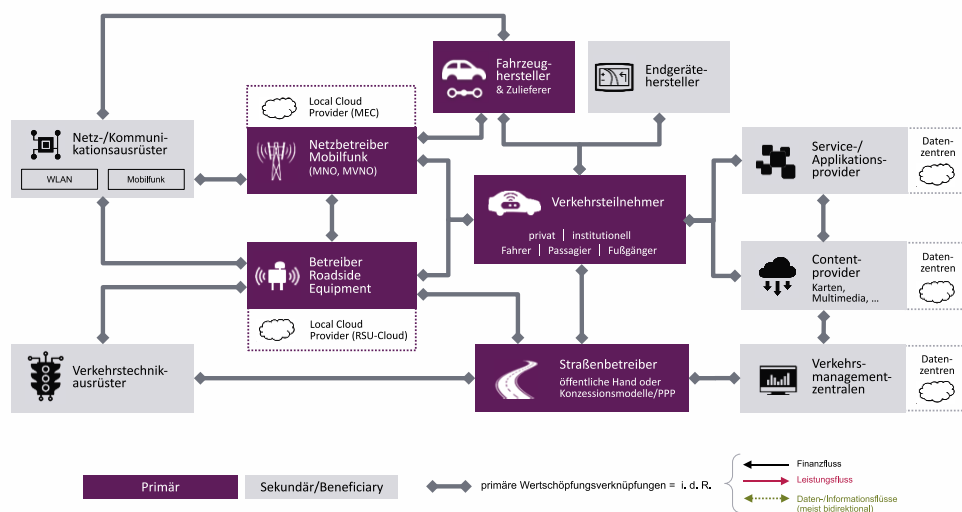


Abbildung 4 stellt die primären und sekundären Stakeholder und ihre gegenseitigen Beziehungen dar. Das komplexe Beziehungsgeflecht der Stakeholder weist in der Realität eine sehr netzartige Struktur auf. In der reduzierten Darstellung sind daher nur die primären Wertschöpfungsverknüpfungen zwischen den einzelnen Gruppen skizziert, welche in der Regel mit spezifischen Leistungsflüssen, reziproken Finanzflüssen sowie mit beiderseitigen Daten- bzw. Informationsflüssen verbunden sind. Im nachfolgenden Abschnitt werden die Stakeholder, ihre Bedeutung für das V2X-System sowie ihre Interessen näher vorgestellt.

3.2 Primäre Stakeholder

Mit dem Blick auf die Einführung Intelligenter Verkehrssysteme haben fünf Stakeholder-Gruppen eine besondere Bedeutung. Auf diese wird im Folgenden genauer eingegangen.

Verkehrsteilnehmer

Verkehrsteilnehmer im Sinne von Intelligenen Verkehrssystemen sind zunächst Fahrer und Passagiere von privat genutzten Fahrzeugen. Hinzu kommen institutionelle Verkehrsteilnehmer wie Logistik- und Lieferdienste sowie diverse Beförderungsdienstleister (mit Taxis und Bussen aber auch Carsharing Anbieter). Eine weitere große Gruppe bzw. personell gesehen sogar die größte Gruppe stellen die nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer, wie Fußgänger und Radfahrer, die sich die Straße ebenfalls teilen.

Die Verkehrsteilnehmer sind die Hauptnutzer der Vorteile des V2X-Systems. Entsprechend zählen Komfort- und Effizienzverbesserungen sowie Sicherheitsgewinne zu ihren Hauptinteressen. Je nach betrachteter Untergruppe ist kostengünstige Mobilität ebenfalls ein sehr wichtiger Aspekt. Für die geplanten Anwendungen könnte das bedeuten, dass speziell Sicherheitsanwendungen aufgrund ihres latenten Nutzens bei bestimmten Kosten weniger stark nachgefragt werden und sich somit marktorientiert weniger durchsetzen, zumal wenn bestimmte Mindestverbreitungsgrade erforderlich sind, damit die Anwendungen ihre Vorteile zeigen. In diesem Fall müssten andere, ggf. regulatorische Maßnahmen für die erfolgreiche Markteinführung ergriffen werden.

Fahrzeughersteller

Fahrzeughersteller setzen sich hier aus den OEMs sowie ihren Zulieferern entlang der Wertschöpfungskette zusammen. Sie stehen hauptsächlich für die Entwicklung und die Herstellung von Personenkraftwagen, aber auch von Lastkraftwagen und Bussen. Diese Stakeholder-Gruppe hat bisher die umfangreichsten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zum Thema betrieben. Dementsprechend beinhaltet der Großteil der existierenden Literatur zu V2X-Anwendungen auch die Standpunkte von dieser Seite (siehe Abschnitt 4). Fahrzeughersteller sind in verschiedenen Verbänden und Konsortien sowie auch in Forschungsprojekten involviert. Zu nennen wären hier VDA, ACEA oder mit speziellem Fokus auf Kommunikation das Car-2-Car Communication Consortium (C2C-CC). Die Arbeiten und Ergebnisse des C2C-CC fließen z. B. in die Standardisierung der ETSI ITS ein.

Die Hauptinteressen der Fahrzeughersteller liegen generell im Verkauf von Fahrzeugen und damit im Speziellen in der Differenzierung zu anderen OEMs, auch wenn für das Funktionieren vieler V2X-Anwendungen die Interoperabilität und Kommunikation zwischen Fahrzeugen unterschiedlicher Hersteller eine wichtige Grundlage darstellt. Weiterhin kann der Vertrieb eigener oder zugelieferter Applikationen für den Kontext

Mobilität ein wichtiges Interesse sein. Fahrzeughersteller die sich im Geschäftsfeld von Vermietung und Carsharing engagieren, nehmen in diesem Konzept zusätzlich die Rolle eines Verkehrsteilnehmers ein.

Straßenbetreiber

Straßenbetreiber bewirtschaften als private Unternehmen, in PPP-Modellen oder in direkter Verantwortung der öffentlichen Hand die Straßeninfrastruktur. Im Kontext der Stadt Berlin liegt die Oberhoheit über den Straßenbetrieb bei der Senatsverwaltung SenUVK und den Tiefbauämtern der Bezirke. Einzelne Dienstleistungen sind jedoch an private Unternehmen ausgelagert, wie der Betrieb von Lichtsignalanlagen (LSA) an die Alliander Stadtlicht GmbH¹ oder der Verkehrsinformationszentrale an die VMZ Berlin Betreibergesellschaft mbH. Straßenbetreiber sind international in Netzwerken wie CEDR (Straßendirektion), ASECAP (Maut-Betreiber) und POLIS (lokaler Verkehr) organisiert und kooperieren z. B. in der Amsterdam Group eng mit dem C2C-CC. Somit decken sich von ihnen geplante Anwendungen von V2X-Systemen auch in großen Teilen mit denen der Fahrzeughersteller.

Auch in der Rolle als Straßenbetreibers ist es ein Hauptinteresse einer Stadt wie Berlin eine attraktive und erfolgreiche Smart City zu sein, d. h. ökonomische Wohlfahrt bei sinkenden Ressourcenverbräuchen zu ermöglichen. Insgesamt decken sich die Interessen der Stadt mit den aggregierten Einzelinteressen der Verkehrsteilnehmer. Dementsprechend gehören die Ziele eines sicheren und reibungslosen Straßenverkehrs, aber auch seiner Nachhaltigkeit dazu. Damit sind vor allem Sicherheitsanwendungen und Effizianzanwendungen (welche durchaus auch ökologische Probleme adressieren) sind für diese Rolle von besonderer Bedeutung.

Netzbetreiber Mobilfunk

Im Vergleich zu traditionellen Stakeholdern des Mobilitätssystems, wie den Fahrzeugherstellern, sind Mobilfunkbetreiber scheinbar erst später zu den an Mobilitätsanwendungen Beteiligten hinzugekommen. Jedoch ist zu beachten, dass alle mobilen Anwendungen die bereits heute während der Fortbewegung über längere Distanzen möglich sind, über ein Mobilfunknetz mit Backend-Anbindung kommunizieren. Dazu gehören sowohl personenbezogene Anwendungen wie E-Mail und Web-Browsing, aber auch tatsächlich mobilitätsbezogene Anwendungen wie die Live-Traffic-Dienste moderner Navigationslösungen. Solche Anwendungen haben aktuell noch schmalbandige Anforderungen. Auf dem Weg zu neuen Mobilfunkgenerationen mit höheren Leistungsvermögen (5G und darüber hinaus) sollen aber auch zukünftige V2X-Anwendungen möglich werden. Entsprechend hat die NGMN Alliance als Vertreter von Netzbetreibern das Feld von hochmobilen und niedriglatenten Anwendungen in ihrer Zielsetzung mit definiert. Eine weitere Organisation von Netzbetreibern und -ausrüstern ist die 5G-PPP-Initiative, welche ebenfalls wichtige Arbeiten zu V2X-Anwendungen publiziert hat.

Als Ziele werden Mobilfunkanbieter weiterhin einen Vertrieb von Diensten der Datenkommunikation gegen Entgelt anstreben und im Mobilitätssektor neue Geschäftsfelder erschließen wollen. Ein Hauptinteresse ist die Nachverdichtung der Netze, welche auch für andere Geschäftsfelder der 5G-Roadmap eine wichtige Rolle spielt.

¹ Eine detailliertere Betrachtung des Berliner Modells zum Straßenbetrieb wird in Abschnitt 8 vorgenommen.

Betreiber Roadside-Equipment

Betreiber von Roadside-Equipment werden als neue, aber besonders wichtig erscheinende Rolle eingeführt. Da V2X-Technologien für zukünftige Anwendungen nur eingeschränkt verfügbar sind, gibt es aktuell noch nicht viele konkrete Vertreter dieser Aufgabe – aber viele Möglichkeiten. Diese werden in Abschnitt 8.3 im Detail besprochen. Entsprechend ihrer Interessen bieten sich die Mobilfunknetzbetreiber an. Denkbar wäre aber auch, dass z. B. Straßenbetreiber diese Rolle mit übernehmen, wie es bei Autobahn- und Mautbetreibern schon teilweise der Fall ist. Im Rahmen einer (Groß-)Stadt mit dedizierten Spezialisten für LSA-Management, könnten diese Dienstleister auch dort angebrachtes Roadside Equipment betreuen. Weiterhin wäre es möglich, dass Ausrüster von Verkehrstechnik oder Kommunikationstechnik diese Aufgabe übernehmen.

Grundsätzlich agieren Betreiber von Roadside Equipment mit ihrer Dienstleistung als wichtige Schnittstelle zwischen verschiedenen Beteiligten. Zusätzlich wären weitere Interessen wie der Vertrieb von Zusatzdiensten (z. B. Vermarktung von POI-Infos) denkbar.

3.3 Sekundäre Stakeholder

Neben den primären Stakeholdern gibt es noch sekundär Beteiligte, die ebenfalls für die Realisierung von Bedeutung sind und von der Einführung von V2X-Anwendungen profitieren werden.

Netz- und Kommunikationsausrüster

Diese Ausrüster stellen die tatsächliche Kommunikationstechnik her. Entsprechend der betrachteten Technologieoption WLAN-V2X handelt es sich um ETSI ITS G5 kompatible Endgeräte, bei Cellular-V2X um 3GPP-standardisierte Modems mit LTE-V Funktionalität und bei Backend-V2X vor allem um Mobilfunk-Infrastruktur (LTE, 5G).

Verkehrstechnikausrüster

Diese Ausrüster bieten Produkte und Dienste auf und an Verkehrswegen an, wie LSAs oder Verkehrsinformations- und Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Im Rahmen eines V2X-Systems sind diese Lösungen und deren Standorte besonders geeignet für eine Ausstattung mit RSUs (der ein oder anderen Technologie). Große Ausrüster haben entsprechend bereits komplette Pakete, z. B. für die LSA-Anbindung auf Basis von WLAN-V2X, im Angebot.

Endgerätehersteller

Endgerätehersteller ermöglichen, neben den Fahrzeugherstellern selbst, die Ausstattung der Fahrzeuge mit kommunizierenden Devices wie Navigationsgeräte sowie Smartphones und Tablets und haben somit einen Einfluss auf die Einführungsszenarien für die jeweiligen Technologien.

Service- / Applikationsprovider, Content Provider, Verkehrsmanagementzentralen

Die letzte Gruppe der sekundären Stakeholder hat, auch bei einer geringeren Bedeutung für die Einführung spezieller V2X-Kommunikationstechnologien, einen besonderen Stellenwert für die Realisierung der anvisierten V2X-Anwendungen. Gerade diese Partner generieren für viele Anwendungen aus kommunizierten Fahrzeuginformationen, LSA-

Phasen und sonstigen Daten erst den relevanten Content, welcher dann wieder über das V2X-System zu den Fahrzeugen übertragen wird. Die Art und Weise wie diese Partner Anwendungen realisieren (mit zentraler oder dezentraler Datenhaltung und Kommunikation) steht in engem Zusammenhang mit den V2X-Technologien.

3.4 Sonstige Stakeholder

Im gesamten Kosmos der Beteiligten von intelligenter und vernetzter Mobilität gibt es noch viele weitere Stakeholder. Diese sollen im weiteren Konzept jedoch nicht weiter betrachtet und hier nur der Vollständigkeit halber stichpunktartig aufgelistet werden.

- Gesetzgeber/Ministerien
- Verkehrsbehörden
- Regulierungsbehörden
- Standardisierungsgremien
- Industriekonsortien
- Forschungseinrichtungen
- Automobilclubs
- Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS)
- Zahlungs-/Abrechnungs-Dienstleister
- Applikationsentwickler
- IT-Security-Provider
- Daten Analysten
- Mautsystembetreiber
- Infrastrukturdienstleister
- Versicherungen

Zusammenfassung

Dieser Abschnitt galt der Vorstellung der im V2X-System involvierten Stakeholder, welche durchaus sehr zahlreich sind. Deswegen wurde eine Einteilung in primäre, sekundäre und sonstige Stakeholder vorgenommen.

Zu den primären Stakeholdern zählen zuerst vor allem die Verkehrsteilnehmer, weiterhin die Fahrzeughersteller und Straßenbetreiber. Durch den Einbezug von Kommunikationsmöglichkeiten sind ebenso Mobilfunkbetreiber und Betreiber von Roadside Equipment beteiligt. Speziell die letzten beiden Stakeholder und mögliche Kooperationsmodelle können für eine Stadt oder Kommune von Interesse sein. Im nachfolgenden Konzept wird speziell auf diese primären Stakeholder eingegangen.

4 Anwendungsklassen und deren Anforderungen

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die aktuell verfügbaren und in naher Zukunft anvisierten V2X-Anwendungen, mit dem Ziel der Analyse der grundsätzlichen Anforderungen an die zugrundeliegenden V2X-Kommunikationstechnologien. Da es aktuell bereits eine Vielzahl an praktisch umgesetzten und theoretisch diskutierten Anwendungen gibt, werden diese entsprechend ihrer Anforderungen klassifiziert.

4.1 Existierende und anvisierte V2X-Anwendungen

Unter intelligenten Verkehrssystemen werden verschiedene Ausprägungen des vernetzten und automatisierten Fahrens verstanden. Somit spannen die vorausgedachten Anwendungen auch ein breites Spektrum auf.

Entsprechend des Verständnisses der BAST und des VDA [VDA2015] werden vor allem automatisierte Fahr- und Parkfunktionen in 5 Stufen (0: Nur-Fahrer, 1: Assistiert, 2: Teilautomatisiert, 3: Hochautomatisiert, 4: Vollautomatisiert) unterschieden. Heute, im Jahr 2018, befinden wir uns beim Übergang von Stufe 2 zu Stufe 3, bei dem der Fahrer das Fahrzeug nicht mehr dauerhaft überwachen muss und das System sowohl Längs- als auch Querverführung übernimmt, jedoch nur in bestimmten beherrschbaren Situationen. D. h. Fahrautomatisierung existiert bereits auf einem gewissen Level. Die heutigen Funktionen können durch reine Onboard-Sensorik, d. h. auch komplett ohne V2X-Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern oder zentralen Servern realisiert werden. Hoch- und vollautomatisierte Fahrfunktionen benötigt jedoch unbedingt Kommunikation und Kooperation, womit hochgradige Fahrautomatisierung ein wichtiger V2X-Anwendungsbereich sein wird.

Neben Automatisierungsfunktionen gibt es eine Reihe an Anwendungen und Assistenzsystemen, die bereits von Beginn an auf Kommunikation ausgelegt sind, um zu informieren und zu warnen. Diese V2X-Anwendungen, mittlerweile auch bekannt als Day 1, Day 1,5 oder Day 2-Anwendungen werden stark geprägt von den Arbeiten der ETSI ITS [ETSI2009] sowie dem C2C-CC [C2CCC2007] oder Forschungsprojekten wie Pre-DRIVE C2X. Von hier kommt auch die weiterhin häufig verwendete Einteilung in:

- Sicherheit
- Verkehrseffizienz
- Komfort / Entertainment

Im Folgenden sollen vornehmlich die (sehr verschiedenen) Anforderungen der kommunizierenden Anwendungen vorgestellt werden.

4.1.1 Bereits heute verfügbare Anwendungen

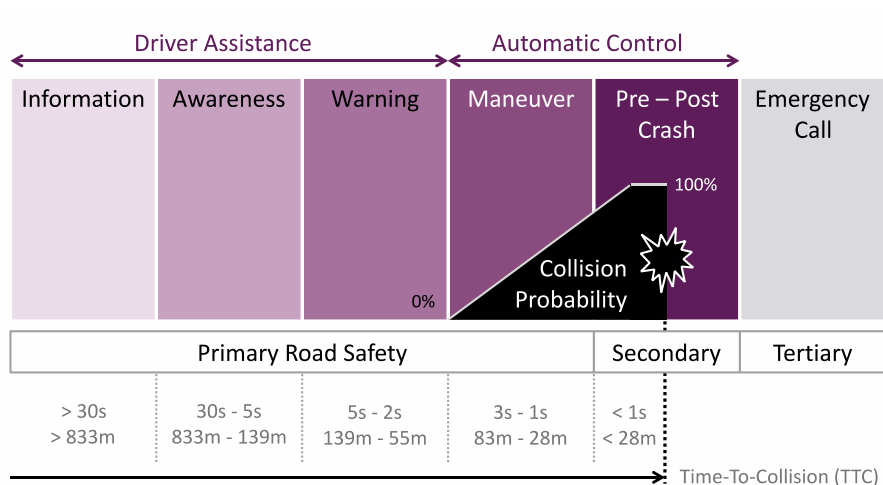
In heutigen Fahrzeugen ist, entweder direkt integriert, über Nachrüstlösungen oder über Consumer Endgeräte realisiert, eine gewisse Anzahl an V2X-Anwendungen verfügbar. Zu nennen sind z. B. Navigationslösungen mit Informationsaustausch zum Verkehrsaufkommen von Anbietern wie GoogleMaps, TomTom oder Here. Weiterhin bieten viele Fahrzeughersteller eigene Services (MercedesMe, BMW ConnectedDrive, Volkswagen Car-Net) für Navigation und Komfort, inklusive z. B. personenbezogene Dienste oder Dienste zur Fernsteuerung des Fahrzeugs, an. Darüber hinaus werden ab März 2018 alle Neufahrzeuge verpflichtend mit dem automatisches Notrufsystem eCall ausgestattet, um bei

Verkehrsunfällen eine schnellere Meldung und Rettung zu ermöglichen. Somit sind in gewisser Weise bereits Anwendungen aus allen Bereichen – Komfort, Effizienz und Sicherheit – verfügbar.

Alle bisher verbreiteten Lösungen haben gemein, dass individuelle Endgeräte mit einem zentralen Server-Backend kommunizieren und heutige Mobilfunknetze nutzen. Das bedeutet, es gibt keine direkte Kommunikation zwischen einzelnen Fahrzeugen. Weiterhin kann festgestellt werden, dass ihre Anforderungen an Leistung und Funktion bereits durch Backend-V2X Technologie erfüllt werden können.

4.1.2 ETSI ITS RoadSafety Application Modell

Abbildung 5 RoadSafety Application Modell der ETSI ITS (basierend auf [ETSI2013])



Die vorliegende Abbildung 5 zeigt das RoadSafety Application Modell aus dem ETSI TR 101 539-3 [ETSI2013], welches eine Klassifizierung nach zeitlicher und geographischer Relevanz der kommunizierten Informationen einführt. Auch wenn die konkreten Zahlen der Time-to-Collision (TTC) mit Vorsicht zu behandeln sind, dient dieses Modell mit den verschiedenen Zonen in Abhängigkeit zur TTC sehr gut zur Darstellung des Übergangs der unterschiedlichen Informationshorizonte von Effizienz- bis Sicherheitsanwendungen und entsprechend wann informiert, wann gewarnt oder direkt automatisiert eingegriffen werden muss. Anwendungen in den hochkritischen Zonen um eine TTC=1 s erfordern einen Informationsaustausch mit den geringsten Latenzen, benötigen aber auch die geringsten Reichweiten. Auf der anderen Seite sind (Effizienz-)Anwendungen in den Zonen Information und Awareness tolerant gegenüber gewissen Latenzen, benötigen aber größere Reichweiten.

Entsprechend eignen sich Sicherheitsanwendungen besonders für direkte Kommunikation zwischen den Fahrzeugen, wobei jedes Fahrzeug periodisch seine Statusinformationen und Position an alle umgebenden Nachbarn im Umkreis von einigen hundert Metern broadcastet und die Nachrichten der Nachbarn empfängt, um ein Bild der Umgebung zu erstellen. Effizienzanwendungen (mit höheren Anforderungen an die Reichweite um rechtzeitig zu informieren) werden unterstützt durch Aggregation und erneutes Aussenden (Store-Carry-Forward) oder im Falle von stationären Informationen auch durch die Informationsverbreitung über Roadside Units (RSUs). Tatsächlich wäre die Realisierung über eine zentrale Backend-Lösung ebenfalls möglich, wenn dessen Anbindung die

entsprechenden Anforderungen der Anwendungen an entsprechende Latenzen erlaubt. Der Vorteil hier wäre, dass notwendige Reichweiten über ein Backend definitiv ermöglicht werden. Diese Klassifizierung bleibt zunächst ergebnisoffen für dieses Detail.

Zusammenfassend stellt diese Klassifizierung die verschiedenen Anforderungen von Anwendungen anhand von **Latenz** und Reichweite (also **geographischer Relevanz**) sowie die gegenseitige Abhängigkeit dieser beiden Parameter dar. Hohe Anforderungen an kurze Latenz gehen mit geringen Anforderungen an die Reichweite einher, sowie umgekehrt.

4.1.3 C2C-CC Kommunikationsanwendungen

Abbildung 6 Roadmap von V2X-Kommunikationsanwendungen entsprechend des C2C-CC ([CODECS2016])

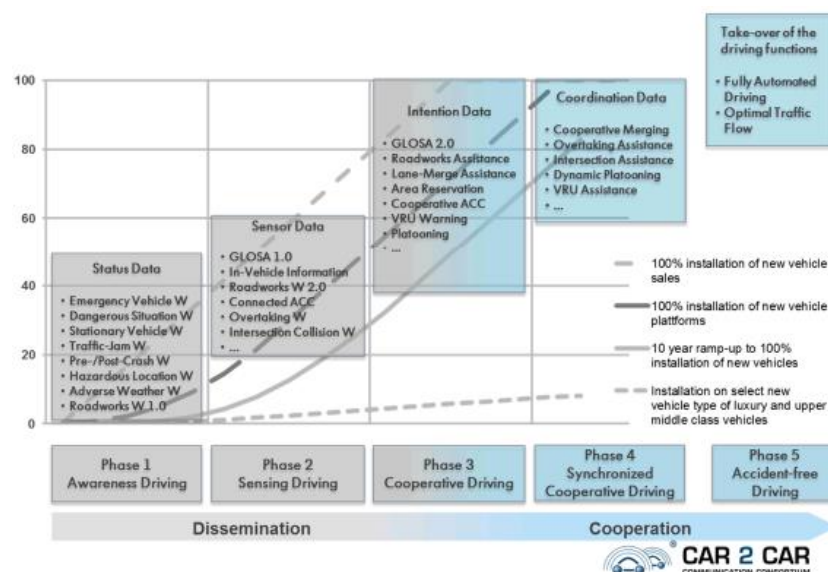


Abbildung 6 zeigt die Roadmap der V2X-Kommunikationsanwendungen, ausgearbeitet von Partnern des C2C-CC im Codecs Projekt [CODECS2016]. Diese Roadmap verbindet in gewisser Hinsicht die ETSI Day-1-Anwendungen mit den bereits erwähnten Automatisierungsstufen der BAST und des VDA. Viele Sicherheitsanwendungen der ETSI sind in den Phasen 1 und 2 dieser Roadmap wiederzufinden. In diesen Phasen senden Fahrzeuge regelmäßig Statusinformationen (Phase 1) oder erweitert ebenfalls spezielle Sensordaten (Phase 2) an die anderen Verkehrsteilnehmer und Straßeninfrastruktur in der Umgebung und empfangen deren Informationen. Somit wird ein möglichst genaues Abbild der Umgebungssituation auf jedem Fahrzeug gewährleistet, welches umso präziser und umfanglicher wird, je detaillierter die kommunizierten Daten sind. Phase 3, 4 und 5 gehen darüber hinaus und ermöglichen mit Austauschprotokollen die Kooperation und Koordination bei Fahrmanövern mit jeweils steigendem Grad der Automatisierung bis hin zu Phase 5 (Vollautomatisiertes Fahren).

Diese Klassifikation veranschaulicht die unterschiedlichen **Arten von Daten**, die bei V2X-Anwendungen auftreten. Für die V2X-Kommunikationssysteme ist hier entsprechend die Größe der Daten relevant – also ob es sich um schmalbandiges Broadcasting von Paketen (Dissemination), erweiterte gegenseitige Protokolle (Cooperation) oder breitbandige Streams für hochauflösende Sensordaten handelt.

4.1.4 5G-PPP Vernetzungsanforderungen im ITS Bereich

Abbildung 7 Vernetzungsanforderungen der Automotive Vision 5G-PPP ([5GPPP2015])

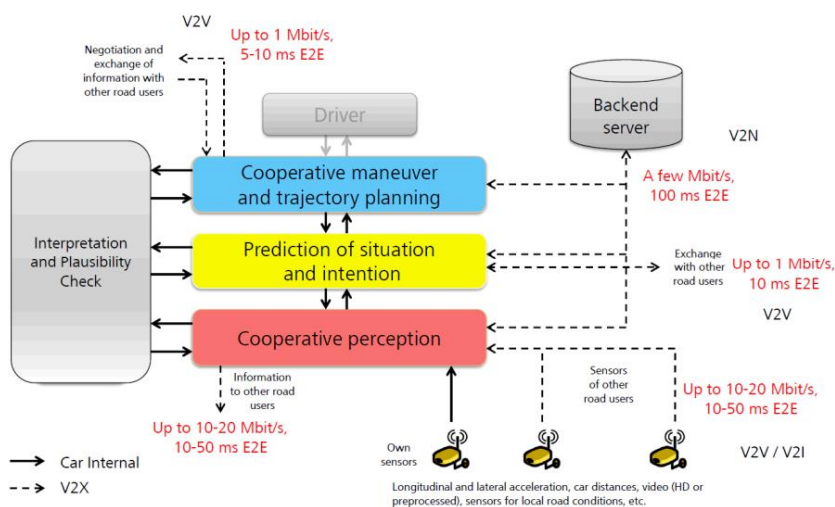


Abbildung 7 ist eine Übersicht vom 5G-PPP [5GPPP2015] und stellt die Vernetzungsanforderungen der Anwendungen aus Phase 2 – 4 aus Abbildung 6 in einer anderen Art dar. Diese Übersicht enthält neben Leistungsanforderungen der Latenz (inkl. Reichweite) und der nötigen Datenrate ebenfalls **Endknoten** möglicher Architekturen, also andere Fahrzeuge (V2V), Server (V2N) oder die Verkehrsinfrastruktur (V2I). Die Anwendungsklasse Cooperative perception entspricht dabei den Anwendungen für Sensordaten aus Phase 2. Hier werden jedoch sehr hochauflösende Daten angenommen, womit die höchsten Anforderungen bezüglich Datenrate entstehen. Anwendungen für Prediction of situation and intention (ähnlich Intentionsdaten – Phase 3 aus Abbildung 6) haben, ebenso wie für Cooperative maneuver and trajectory (Koordinationsdaten – Phase 4, Abbildung 6) im Vergleich höhere Anforderungen an die maximale Latenz bei geringeren Datenraten. Interessant bei dieser Klassifizierung ist, dass im Gegensatz zu den vorher vorgestellten Modellen, hier von einer Backend-Anbindung für alle Anwendungsbereiche ausgegangen wird. Wie besprochen, ist dieses Konzept durchaus vorteilhaft für bestimmte Anwendungen.

4.2 Eigene Klassifikation

Die eigene Klassifikation greift die vorgestellten Arbeiten der Stakeholder in weiten Teilen auf, wobei sie diese zu einem größeren Gesamtbild zusammenstellt. Der Fokus dieser Klassifikation liegt auf den Anforderungen an die dahinter liegenden V2X-Kommunikationstechnologien. Während Sicherheits- und Effizienzanwendungen für eine Stadt sicher zu den wichtigeren Anwendungsbereichen zählen, könnte aber auch die Verbreitung von Komfortanwendungen den Ausbau und die Weiterentwicklung einer bestimmten Kommunikationstechnologie fördern. Das wiederum hätte Implikationen auf die Implementierung und Realisierung der anderen Anwendungsbereiche.

4.2.1 Anforderungen der Anwendungen

Aus den vorgestellten Arbeiten wurden folgende Anforderungsmetriken als besonders wichtig erkannt. Diese sind, wenn auch nicht exakt deckungsgleich, in der nachfolgenden Nutzwertanalyse wieder zu finden (Unterschiede in den Metriken ergeben sich aus den verschiedenen Zielsetzungen – einer Anwendungskategorisierung hier und der Bewertung der Technologieoptionen im nächsten Abschnitt).

Latenzanforderung beschreibt die Anforderung an die maximale Zeit zwischen Versand und Empfang der kommunizierten Daten. Sie ergibt sich aus der notwendigen Reaktions- bzw. Echtzeitfähigkeit einer Anwendung bezüglich der Informationsaktualisierung. Die Latenzanforderung ist eine charakteristische Metrik für einige V2X-Anwendungen, speziell für jene im Nahbereich, da unmittelbare Reaktionen erforderlich sein können. Entsprechend ist sie auch in bisherigen Klassifizierungen berücksichtigt, z. B. in den vorgestellten Arbeiten zum ETSI Road Safety Modell (Abbildung 5) sowie in den 5G-PPP Vernetzungsanforderungen (Abbildung 7).

Geographische Relevanz definiert das Umfeld und entsprechend die Reichweite über welche die Kommunikation erfolgreich stattfinden muss. Im ETSI Road Safety Modell wurde die direkte Abhängigkeit von Latenzanforderung und geographischer Relevanz vorgestellt.

Involvierte Endpunkte kennzeichnet die einzelnen Entitäten, die neben den Fahrzeugen noch für die Realisierung einer V2X-Anwendung mit einander kommunizieren müssen (also V2V, V2I, V2N oder V2P – Fahrzeuge zu Personen oder Radfahrern als nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer). Aus den involvierten Endpunkten leiten sich mögliche und geeignete Verbindungsarten für die Übertragung ab, wie eine direkte Broadcast-Verbindung bei V2V oder Unicast von einem Fahrzeug zu einem Server bei V2N.

Datenart charakterisiert die Form und Größe der zu übertragenden Informationseinheiten und kann zwischen kleinen Paketen (für Kontrolldaten) bis zu großen Daten-Streams (für Video oder Sensordaten) liegen. Bei einigen Anwendungen kann es entsprechend der involvierten Endpunkte unterschiedliche Datenarten in die verschiedenen Richtungen geben (z. B. Streams im Uplink von einem Fahrzeug zu einem Server und Kontrollpakete im Downlink vom Server zum Fahrzeug bei einer V2N-Anwendung). Verbunden mit der Sendefrequenz der Übertragungsversuche ergibt sich die notwendige Datenrate.

Nutzungszeit verbindet die Dauer und Häufigkeit der Kommunikation für eine Anwendung. Sie wurde in den bisherigen Anwendungsklassifizierungen nicht verwendet. Sie hat jedoch, in Verbindung mit Endpunkten und Datenart, Auswirkungen auf die Kommunikation, speziell darauf, wie eine V2X-Technologie für Maximallast ausgelegt sein muss. Für die nachfolgende Klassifizierung wird die Nutzungszeit nicht in Minuten oder Stunden angegeben, sondern in vier Abstufungen – Anwendungen können fortlaufend kommunizieren sobald das Fahrzeug betrieben wird („Immer an“), „Häufig“, „Gelegentlich“ oder nur „Selten“.

4.2.2 Vorwiegend mobilitätsbezogene Anwendungen

AK1 - Verkehrskritische Nahbereichswahrnehmung

Diese Anwendungen dienen zur Erhöhung der Sicherheit und zum Schutz der Verkehrsteilnehmer, indem Gefahrensituationen durch regelmäßigen Informationsaustausch von

Statusdaten zwischen den Fahrzeugen frühzeitig erkannt werden und bei relevanten Ereignissen zusätzlich kommuniziert wird. Dazu zählen Gefahrenwarnungen vor bestimmten Straßen- und Wetterbedingungen, Einsatzfahrzeugen oder Brems- und Spurwechselmanövern. Weiterhin sind Koordinationsanwendungen basierend auf Austauschprotokollen von Trajektorien für mittlere Stufen des automatisierten Fahrens eingeschlossen. Als Randfall ist ebenfalls Kommunikation mit Personen (V2P) mit inbegriffen. D. h. aus den vorgestellten Klassifikationen sind alle sicherheitsrelevanten Anwendungen und bestimmte Automatisierungsanwendungen beinhaltet.

Für die Kommunikation ist im Speziellen die Berücksichtigung jedes individuellen Senders und Empfängers notwendig, welche hochmobil sein können. Das bedeutet Informationen können nicht aggregiert werden und müssen regelmäßig aktualisiert werden. Dementsprechend sind die Anforderungen an die Latenz besonders hoch (bis 10 ms), bei naher geographischer Relevanz (wenige 100 m). Deswegen ist bei diesen Anwendungen die direkte Kommunikation V2V besonders von Vorteil. Als Daten werden hauptsächlich Kontrolldaten ausgetauscht. Auch wenn diese Anwendungen immer kommunizieren müssen, ergeben sich entsprechend für das Datenaufkommen eher geringe Anforderungen.

Tabelle 1

Kommunikationsanforderungen AK1 - Verkehrskritische Nahbereichswahrnehmung

Endpunkte	Latenzanforderung	Geo-Relevanz	Datenart	Nutzungszeit
V2V, (V2P)	Sehr hoch (10 ms)	Nah (<300 m)	Datenpakete	Immer an

AK2 - Verkehrsbegleitender Informationsaustausch im relevanten Umfeld

Hierbei handelt es sich um Mobilitätsdienste mit dem Fokus auf Effizienz und Nachhaltigkeit. Kommunizierte Informationen ermöglichen die Schätzung des Verkehrsflusses in Echtzeit sowie kurzzeitige Prognosen. Somit werden erweiterte Navigationsfunktionen ermöglicht, die auch zur Verflüssigung des Verkehrs und dadurch zu Ressourcen- und Emissionsreduktion führen. Durch zusätzliche Sensorik der Infrastruktur (Zählraten, aber auch LSA-Phasen) können diese Funktionen weiter verbessert werden. Ebenso wird durch RSUs die Informationsreichweite deutlich erhöht. Im Vergleich zu Anwendungen aus AK1 können frühe Nutzer bei diesen Anwendungen direkt profitieren, sobald die Infrastruktur mit entsprechendem Equipment ausgestattet wird. Für eine Markteinführung sind diese Lösungen, inkl. Ausbau von RSUs also von besonderem Interesse (siehe auch Abschnitt 8).

Diese Klasse hat bei den mobilitätsbezogenen Anwendungen tatsächlich die moderatsten Anforderungen an die Kommunikation. Aufgrund höherer Informationshorizonte für längerfristige Koordination sind auch die Latenzanforderungen geringer. Es werden hauptsächlich Kontrolldaten übertragen. Die Aggregation der Informationen individueller Nachrichten ist möglich. Somit bleibt das Datenaufkommen nahezu gleichmäßig gering wie in Anwendungsklasse 1, trotz weiterer geographischer Relevanz und entsprechend höherer Anzahl an beteiligten Verkehrsteilnehmern.

Tabelle 2

Kommunikationsanforderungen AK2 - Verkehrsbegleitender Informationsaustausch im relevanten Umfeld

Endpunkte	Latenzanforderung	Geo-Relevanz	Datenart	Nutzungszeit
V2V, V2I	Moderat (1 s)	Weit (>1 km)	Datenpakete	Immer an

AK3 - Sensordatenaustausch des lokalen Verkehrsgeschehens

Diese Klasse enthält Applikationstrends für hoch- und vollautomatisiertes Fahren, speziell auch für den Austausch von Sensordaten wie Radar und LiDAR. Aus der Verknüpfung dieser Daten lassen sich hochauflösende Karten erstellen, welche kooperative Perzeption der automatisierten Fahrzeuge ermöglicht. Konzeptuell eignet sich die Datenverarbeitung für solche Anwendungen besonders auch in neuartigen verteilten Systemen wie Edge-Clouds, welche über Backend-Kommunikation angebunden sind.

Jene Applikationen haben hohe Latenzanforderungen bei naher geographischer Relevanz – ganz ähnlich zu AK 1. Die Datenaktualität in den dynamischen Objektkarten (Live bzw. Local Dynamic Maps) wird hier ebenso durch regelmäßigen Informationsaustausch permanent auf den neusten Stand gehalten, d. h. Kommunikation findet immer statt. Durch die Übertragung von Streams ergibt sich jedoch ein viel höheres Datenaufkommen.

Tabelle 3

Kommunikationsanforderungen AK₃ - Sensordatenaustausch des lokalen Verkehrsgeschehens

Endpunkte	Latenzanforderung	Geo-Relevanz	Datenart	Nutzungszeit
V2V, V2I, V2N	Hoch (10-100 ms)	Nah (<300 m)	Breitbandige Streams	Immer an

AK₄ - Teleoperiertes Fahren

Teleoperiertes Fahren ist eine Anwendung die eine eigene Klasse bildet. Sie gehört auch zu den Applikationstrends für automatisiertes Fahren, wobei es eher eine Vorstufe und wichtige Brückenanwendung zum vollautomatisierten Fahren ist bzw. in speziellen Umgebungen und Zeiten eingesetzt wird. Bei dieser Anwendung wird ein Fahrzeug durch ein Control Center gesteuert und muss dafür Status- und Sensordaten aber auch Kamera-Streams dorthin senden. Denkbare Realisierungen sehen hier eine menschliche Aufsichtsperson², einen automatisierten zentralen Trajektorienplaner oder Mischformen mit lokaler Kontrolle vor. Somit können fahrerlose Fahrten z. B. für Parkhäuser oder zum Umsetzen von Car-Sharing Fahrzeugen bereits sehr frühzeitig realisiert werden, auch wenn die Automatisierungssysteme im Fahrzeug dies noch nicht durchgehend ermöglichen. Weiterhin können automatisierte Fahrzeuge bei Sondersituationen im Feld gesteuert werden, wo ihre Systeme an die Grenzen kommen. Teleoperiertes Fahren wird auf eine geringe Anzahl gleichzeitiger Fahrzeuge eingeschränkt sein.

Auch wenn Teleoperiertes Fahren nicht den höchsten Automatisierungsnutzen der Fahrzeuge ermöglicht, hat es tatsächlich die höchsten Kommunikationsanforderungen pro Fahrzeug, noch höher als die Anwendungen aus AK₃. Dies gilt speziell im Uplink, wo Streams zu geographisch weit entfernten Datenzentren im Backend übertragen und nicht aggregiert werden können. Insgesamt betrachtet liegen die Anforderungen an das zugrunde liegende Kommunikationssystem aufgrund der wenigen gleichzeitigen Nutzer jedoch niedriger als bei AK₃ Sensoraustausch des lokalen Verkehrsgeschehens.

Tabelle 4

Kommunikationsanforderungen AK₄ - Teleoperiertes Fahren

Endpunkte	Latenzanforderung	Geo-Relevanz	Datenart	Nutzungszeit
V2N	Sehr hoch (10 ms)	-	Breitbandige Streams (UL) Datenpakete (DL)	Selten

² Ein anschaulicher Demonstrator für diese Anwendung wurde bei den Vodafone Innovation Days 2017 vorgestellt, <https://www.vodafone.de/featured/digital-life/vodafone-innovation-days-2017-die-ernetzte-zukunft-beginnt-schon-heute/>

4.2.3 Vorwiegend personenbezogene Anwendungen

AK5 - Internetbasierte Streaming- und Cloud-Dienste

Diese Anwendungen des digitalen Alltags und Komforts betreffen breitbandige Multimedia-Dienste wie Web- oder Videokonferenzen, Spiele oder zukünftig auch Virtual-Reality-Anwendungen. Heute werden diese Anwendungen vorwiegend stationär genutzt – also am Arbeitsplatz oder zu Hause. Mit der Einführung und Zunahme von automatisierten Fahrzeugen, wenn also Fahrer zu Passagieren werden, werde solche Anwendungen auch verstärkt von unterwegs aus in Anspruch genommen. In dieser Klasse wird es auch Mischformen zu Effizienzbereichen geben z. B., wenn Infotainment-Dienste in Verbindung mit dem Standort realisiert werden.

Generell setzen Anwendungen dieser Klasse eine Backend-Verbindung voraus und eignen sich nur eingeschränkt für direkte Kommunikation zwischen Fahrzeugen. Aufgrund der internetbasierten Kommunikation, ist die geographische Relevanz zu vernachlässigen, sofern gute Netzabdeckung vorhanden ist. Für bestimmte Anwendungen können smarte Algorithmen wie Pre-Fetching unvollständige Netzabdeckung überbrücken [PMR2014]. Trotzdem ist für diese Anwendungen eine hohe und verlässliche Quality of Service vorteilhaft bis notwendig. Insgesamt beinhaltet diese Klasse die personenbezogene Anwendung mit den höchsten Anforderungen an Übertragungslatenz und hohen Datenaufkommen, auch wenn keine permanente Kommunikation notwendig ist.

Tabelle 5

Kommunikationsanforderungen AK5 - Internetbasierte Streaming- und Cloud-Dienste

Endpunkte	Latenzanforderung	Geo-Relevanz	Datenart	Nutzungszeit
V2N	Moderat (1 s) bis Hoch (50 ms)	-	Streams	Häufig

AK6 - Umfangreiche Downloads, Updates und Upgrades

Diese Klasse beinhaltet Anwendungen, welche große Mengen an Daten zu Fahrzeugen übertragen. Diese Daten können dann verschiedenen Zwecken dienen. Konkrete Beispiele sind Fahrzeugsoftware- und Sicherheitsupdates oder auch Kartenaktualisierungen.

Verglichen mit der vorigen Klasse AK5 beinhaltet diese Klasse ebenso internetbasierte Anwendungen, welche jedoch ein noch höheres Datenaufkommen verursachen, um große Software-Pakete zu übertragen. Dies gilt vor allem für den Downlink, während im Uplink eher kleinere Kontrolldaten übertragen werden müssen. Auf der anderen Seite sind die Latenzanforderungen von Anwendungen in dieser Klasse sowie ihre Nutzungszeit geringer. D. h. diese Anwendungen haben auch geringere Anforderungen an QoS und können mit regulären Best Effort Lösungen realisiert werden.

Tabelle 6

Kommunikationsanforderungen AK6 - Umfangreiche Downloads, Updates und Upgrades

Endpunkte	Latenzanforderung	Geo-Relevanz	Datenart	Nutzungszeit
V2N	Gering (> 1 s) bis Moderat (1 s)	-	Datenpakete (UL) Breitbandige Bulk Daten (DL)	Gelegentlich

AK7 - Schmalbandige Internetdienste

Zuletzt gibt es die Komfort- und Effizienz Anwendungen, die bereits jetzt existieren bzw. bald realisiert werden können und auf schmalbandiger Internetkommunikation basieren. Einige Beispiele wurden bereits in Abschnitt 4.1.1 genannt, wie Telematik-Anwendungen, Messaging, Fernsteuerung des Fahrzeugs aber auch anderer Elemente im Internet-of-Things oder ein Informationsaustausch über Datenplattformen wie den MDM.

Diese Anwendungen zeichnen sich durch die geringsten Kommunikationsanforderungen aus, sowohl betreffend für Datenaufkommen (Kontrollpakete), aber auch Latenzen. Die geographische Relevanz ist aufgrund Internetanbindung nicht spezifiziert. Je nach Realisierung können Anwendungen in dieser Klasse auch Alternativen zu Effizienz Anwendungen aus AK2 darstellen. In AK2 liegt der Fokus stark auf Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur, wobei in AK7 eine reine Backend-Kommunikation zum Einsatz kommt.

Tabelle 7 Kommunikationsanforderungen AK7 - Schmalbandige Internetdienste

Endpunkte	Latenzanforderung	Geo-Relevanz	Datenart	Nutzungszeit
V2N	Gering (>1s)	-	Datenpakete	Häufig

4.2.4 Einordnung der Klassen

Abbildung 8 Einordnung der Anwendungsklassen nach Endknoten und Anwendungseinschränkung bei Kommunikationseinschränkung

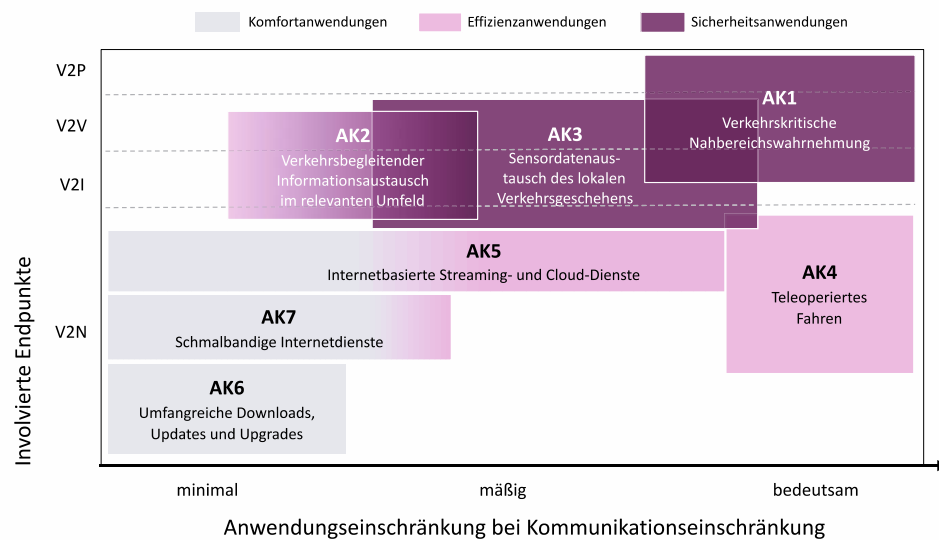


Abbildung 8 veranschaulicht die Einordnung der Anwendungsklassen im vorliegenden Konzept. Die jeweiligen Farben repräsentieren den Hauptnutzen der Anwendungen. Durch die Positionierung sind die kommunizierenden Endpunkte, sowie die Abhängigkeit der Anwendungen von fehlerfreier Kommunikation dargestellt. Der Grad der Anwendungseinschränkung verläuft von minimal zu mäßig zu bedeutsam. Die hier gemeinten Kommunikationseinschränkungen beinhalten mehrere Aspekte eines realen Kommunikationskanals – also das Nicht-Einhalten von Anforderungen an z. B. Latenz, geographische Relevanz oder Kapazitäten für die erforderliche Datenmenge (Datenart +

Häufigkeit). So kann es geschehen, dass eine Konferenzanwendung aus AK₅ aufgrund unzureichender Kommunikationsbedingungen überhaupt nicht zustande kommt. Bei den mobilitätsbezogenen Anwendungen können Effizienzanwendungen in AK₂ noch eher Unterbrechungen tolerieren, als Anwendungen in AK₃ (wo Informationen ebenfalls aggregiert werden) und vor allem solche in AK₁. Generell sind Assistenzsysteme immer so ausgelegt, dass auch ohne Kommunikation keine Sicherheitsrisiken entstehen. Jedoch wäre der Zusatznutzen stark eingeschränkt. Das zeigt AK₄, das Teleoperierte Fahren, wo gerade die Limitierungen der Automatisierungssysteme durch Kommunikation kompensiert werden sollen.

Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden die wichtigsten aktuell verfügbaren und zukünftig geplanten V2X-basierten Anwendungen vorgestellt und klassifiziert. Die Klassifikationskriterien umfassen dabei die V2X-Endknoten (V2V, V2I, V2N, V2P), die Kommunikationslatenz, die Geo-Relevanz der kommunizierten Informationen, sowie die Datenart (also die Größe) und die Häufigkeit der Nutzung – welche insgesamt die notwendige Kapazität des Kommunikationskanals ergeben.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass in allen Bereichen von Latenzanforderungen (bis 500 ms) wertvolle Anwendungen existieren. Sicherheitskritische Anwendungen, welche geringe Latenz erfordern (<< 100 ms), sind kurz- und mittelfristig nur V2V-Anwendungen (z. B. Electronic Emergency Brake Light). Sicherheitskritische Anwendungen mit Unterstützung der RSU (d. h. V2I) sind grundsätzlich möglich, aber bedürfen der Ausstattung mit direkter Kommunikationstechnologie (WLAN-V2X oder Cellular-V2X – siehe auch die Technologiebewertung im nachfolgenden Abschnitt). Für andere V2I und V2N-Anwendungen ist eine garantierte Ende-zu-Ende Latenz von 300-500 ms ausreichend. Damit lassen sich diese Anwendungen grundsätzlich mittels Backend-V2X-Kommunikation umsetzen und gleichzeitig auch für V2P-Verbindungen (zu Radfahrern, Fußgängern) nutzbar machen, welche nicht über WLAN-V2X oder Cellular-V2X realisiert werden.

5 Technologiebewertung

Dieser Abschnitt verwendet die vorgestellte Nutzwertanalyse zur Bewertung der drei V2X-Technologievarianten WLAN-V2X, Cellular-V2X und Backend-V2X. Es wird zunächst ein Überblick über die Technologien gegeben. Anschließend werden die ausgewählten Kriterien vorgestellt und schließlich die konkrete Bewertung diskutiert.

5.1 Übersicht der Technologievarianten

Die in diesem Konzept betrachteten Kommunikationstechnologien zur Fahrzeugvernetzung sind **WLAN-V2X**, **Cellular-V2X** sowie **Backend-V2X**, wobei diese Begriffe auch mögliche künftige Technologiegenerationen einschließen. Die ersten beiden Varianten wurden speziell für die Fahrzeugkommunikation und deren Anwendungen konzipiert und von existierenden Kommunikationstechnologien, und zwar WLAN IEEE 802.11 bzw. 3GPP LTE, abgeleitet. Die dritte Variante, Backend-V2X, soll den konventionellen Mobilfunk verschiedener Generationen, 4G LTE, 3G HSDPA, und 2G GSM repräsentieren. Im Folgenden wird eine Übersicht über die Technologievarianten gegeben. Eine vergleichende Zusammenfassung relevanter Leistungsparameter findet sich in Tabelle 17 im Anhang B.

5.1.1 WLAN-V2X

WLAN-V2X (WLAN = Wireless Local Area Network) gehört zu der auf dem IEEE 802.11-Standard basierenden Familie von Kommunikationstechnologien und wurde speziell für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander und mit der Verkehrsinfrastruktur definiert. Es stellt eine Erweiterung einer existierenden IEEE 802.11-Variante, und zwar „11a“ dar, die wie die Fahrzeugkommunikation auch im 5 GHz-Frequenzband arbeitet. Zu den wesentlichen Erweiterungen gehört ein neuer WLAN Kommunikationsmodus – Outside the Context of a BSS (OCB) –, mit dem Fahrzeuge direkt miteinander kommunizieren können, ohne vorher Steuerungsinformationen austauschen zu müssen. Vom IEEE-802.11a-Standard wurde das Übertragungsverfahren OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) und Vorwärtsfehlerkorrekturverfahren (Convolutional Coding) übernommen: OFDM ist ein weit verbreitetes, gegenüber Interferenzen und Fading robustes Mehrträger-Übertragungsverfahren. Durch Anpassungen der OFDM-Parameter im Vergleich zu IEEE 802.11a wird die Datenübertragung robuster gegen die potentiell stärkeren Signalbeeinträchtigungen, die aus der Geschwindigkeit der Fahrzeuge und dem Doppler-Effekt resultieren. Als Medienzugriffsverfahren nutzt der OCB-Modus die verbreitete EDCA-Variante des IEEE 802.11-Standards mit dem CSMA/CA-Medienzugriffsverfahren und mehreren Zugangskategorien zur Priorisierung von Datenverkehr.

Die Techniken und Parameter für die Datenübertragung auf der Bitübertragungs- und der Sicherungsschicht (PHY und Data Link Layer) der in Europa auch ITS-G5 genannten Technologie sind im Standard ETSI EN 302 663 definiert: Zu den wichtigen Eigenschaften gehören die Nutzung des 5,9-GHz-Frequenzbereiches bzw. mehrerer Kanäle von 10 MHz Bandbreite sowie ein Set von Modulations- und Fehlerkorrekturverfahren³ (von BPSK bis 64QAM). Das WLAN-V2X-Basissystem, das voraussichtlich 2019 eingeführt [VW2017]

³ Modulation and Coding Scheme (MCS)

werden soll, verfügt dabei nur über einen Transceiver, der ausschließlich auf dem Steuerungskanal 4 des 5,9-GHz-Frequenzbands mit 6 Mbit/s arbeitet. Erst in zukünftigen Ausbaustufen des Systems sollen mehrere Kanäle mit mehreren Transceivern genutzt werden.

Das verteilte Medienzugriffsverfahren von WLAN-V2X und die damit verbundene Degradierung des Datendurchsatzes bei hoher Last erfordert eine Überlaststeuerung⁵, wobei Fahrzeuge die aktuelle Kanallast messen und mit steigender Last die Rate ihrer periodischen Nachrichten reduzieren. Auf den höheren Protokollschichten definiert WLAN-V2X ein Ad-hoc-Routingprotokoll (GeoNetworking), das unter Ausnutzung geografischer Positionen eine geo-basierte Adressierung und das effiziente Verteilen von Information in geografischen Gebieten ermöglicht. Neben einem verbindungslosen Transportprotokoll sind Messaging-Protokolle für periodische und ereignisgesteuerte Nachrichten für Verkehrssicherheit sowie eine Reihe von Infrastrukturnachrichten, wie statische und dynamische Informationen von Straßentopologien und Kreuzungen definiert. Die Lösung für IT-Sicherheit basiert auf digitalen Signaturen und Zertifikaten mit intrinsischer Unterstützung von Anonymität durch kurzlebige und wechselnde Pseudonyme. Diese Lösung erfordert den Aufbau einer dedizierten Public-Key-Infrastruktur (PKI).

WLAN-V2X wurde über einen Zeitraum von mehr als zehn Jahren entwickelt, standardisiert und erprobt. In einigen Ländern werden erste Anwendungen eingeführt (z. B. Baustellenwarnung und Verkehrslageerfassung im Cooperative ITS Corridor Rotterdam – Frankfurt/M. – Wien [HARR2015], [LEIT2017]). Während die geplante Systemeinführung eine stabile Technologie erfordert, existieren Initiativen, WLAN-V2X weiterzuentwickeln (IEEE 802.11px⁶, siehe [C2CCC2017] Appendix 7.1 „Evolution towards IEEE 802.11px“ und [IEEEV2XSG2017]).

5.1.2 Backend-V2X⁷

Backend-V2X soll im Rahmen des vorliegenden Konzepts die „konventionellen“ öffentlichen Mobilfunksysteme und die zugrundeliegenden Technologien bezeichnen, wobei es eine Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und einem sich meist im Internet befindlichen Backend realisiert⁸. Tatsächlich handelt es sich dabei um eine Familie von Technologien aus verschiedenen Entwicklungsphasen („Generationen“), die wegen des schrittweisen Ausbaus der jeweils neuen Generation in langen Migrationsphasen koexistieren. Ein Netz wird typischerweise von einem Mobile Network Operator (MNO) betrieben, der kostenpflichtige Datenübertragungsdienste, wie Sprachtelefonie und

⁴ Control Channel (CCH)

⁵ Decentralized Congestion Control (DCC)

⁶ Die Bezeichnung „IEEE 802.11px“ leitet sich von „IEEE 802.11p“ ab; letzteres bezeichnet eine Erweiterung („Amendment“) des IEEE 802.11 Standards für Fahrzeugkommunikation, die heute zwar formell inkorrekt aber auch heute noch gebräuchlich ist.

⁷ Die Reihenfolge der Technologien ist hier vertauscht, da es einfacher ist, Cellular-V2X basierend auf Backend-V2X darzustellen.

⁸ Grundsätzlich wäre eine Backendanbindung auch über konventionelles WLAN möglich. Diese Variante wird aber aufgrund der nur sehr begrenzt vorhandenen WLAN-Hotspot-Infrastruktur in Verkehrsräumen und der spezifischen Anforderungen der Anwendungsklassen in diesem Konzept nicht weiter betrachtet.

Multimediastreaming für menschliche Nutzer, aber auch für Geräte⁹ anbietet. Mobilfunknetze arbeiten meist in reservierten Frequenzbereichen¹⁰, die verschiedenen Mobilfunk Providern zugeordnet sind. Die Zuteilung der begrenzten natürlichen Ressource Funk spektrum erfolgt durch die Bundesnetzagentur im Rahmen von Frequenzauktionen. In Deutschland bieten Mobilfunknetze eine nahezu vollständige Abdeckung, wobei Kompromisse bei Konnektivität und Datenrate in ländlichen Gebieten gemacht werden müssen.¹¹

Die aktuelle, vierte Mobilfunkgeneration ist LTE¹² und erreicht Spitzendatenraten von mehr als 100 Mbps¹³ im Downlink und 50 Mbps im Uplink. Dazu nutzt LTE als Übertragungsverfahren OFDM mit verschiedenen Modulationsverfahren (bis zu 256QAM) sowie Turbo Coding zur Fehlerkorrektur. Die Latenz der Datenübertragung zwischen dem Endgerät und dem Zugangsnetzwerk beträgt mehrere 10 ms (Latenz in der User Plane zur Datenübertragung, unter Einbeziehung der Control Plane mit dem Austausch von Steuerungsinformationen typischerweise 100 ms). LTE-A steigert die Leistungsparameter durch zusätzliche Techniken, wie Inter-Cell Interference Coordination (ICIC), Bandbreiten skalierung, erweiterte MIMO-Übertragung, flexible Spektrumsnutzung und Kanalbündelung¹⁴ zur Nutzung eines fragmentierten Spektrums.

Im Prinzip erfolgt die Kommunikation in Mobilfunknetzen vom Endgerät über das Zugangsnetzwerk mit der Basisstation und das Kernnetzwerk¹⁵ zum anderen Kommunikationsendpunkt (z. B. zu einem Backend-Server im Internet). Dabei werden die Ressourcen der drahtlosen Übertragung (also Zeitslots und Unterträgerfrequenzen) von einer Basisstation im Uplink und Downlink verwaltet („Scheduled Transmission“), so dass Kollisionen beim Medienzugriff und Interferenzen auf dem drahtlosen Kanal minimiert werden. Somit können den Anwendungen Kommunikationsressourcen nach ihren spezifischen Anforderungen und ihrer Priorität zur Verfügung gestellt und Dienstqualitäten garantiert werden. Die Zuweisung von Übertragungsressourcen im Zeit- und Frequenzbereich mit OFDM wird als OFDMA bezeichnet, wobei unterschiedliche Varianten im Downlink und Uplink¹⁶ angewendet werden.

Für die effiziente Verteilung von Daten zu einer großen Anzahl von Endgeräten per Multicast oder Broadcast über Mobilfunknetze bietet sich Multimedia Broadcast Multicast Services (MBMS) an. MBMS wurde ursprünglich für die Verteilung von Multimediainhalten über Mobilfunk entwickelt, eignet sich aber grundsätzlich auch für die Verteilung von Verkehrsdaten. Es ist kritisch anzumerken, dass MBMS bisher sehr wenig von Mobilfunk Providern und Endgeräten unterstützt wird [GSA2017].

Während des laufenden Ausbaus von LTE in Deutschland und weltweit, wird die Entwicklung von 5G vorangetrieben. Im Vergleich zu den vorhergehenden Generationen

⁹ „Machine-Type Communication“, MTC, im Gegensatz zu „Human-Type Communication“

¹⁰ Es ist auch möglich, Mobilfunknetze in unlicenzierten Frequenzbändern zu betreiben, beispielsweise mit License Assisted Access (LAA).

¹¹ URL: <http://www.breitbandatlas.de>

¹² Genau genommen UMTS Long Term Evolution (LTE) und LTE Advanced (LTE-A) als Weiterentwicklung der 3. Mobilfunkgeneration Universal Mobile Telecommunications System (UMTS).

¹³ In aktuellen LTE Mobilfunknetzen kann mit Hilfe von Carrier Aggregation aktuell 225 Mbps Spitzendatenrate im Downlink erreicht werden.

¹⁴ Carrier Aggregation

¹⁵ In der LTE Architektur (System Architecture Evolution, SAE): User Equipment (UE) über das Access Network mit dem Evolved NodeB (eNB) und dem Evolved Packet Core (EPC).

¹⁶ Im Uplink kommt das energieeffizientere SC-FDMA zum Einsatz.

steht nicht mehr nur die Unterstützung von Multimediadaten im Fokus der F&E-Aktivitäten. Stattdessen werden drei grundlegende Anwendungsfelder betrachtet: 1. eMBB - enhanced Mobile Broadband – mit Steigerung der Datenrate und Systemkapazität, 2. mMTC – massive Machine Type Communications adressiert das Internet of Things (IoT) für eine sehr hohe Anzahl von vernetzten Endgeräten mit geringen Energie- und Verarbeitungskapazitäten, und 3. URLLC – Ultra-Reliable and Low Latency Communications – für sehr zuverlässige Kommunikation mit sehr geringer Latenz. Nach der geplanten 5G-Einführung in den Jahren 2021/22 ist bei einem flächendeckenden Ausbau zu erwarten, dass sich 5G zu der dominanten Technologie einer infrastrukturellen breitbandigen Basisvernetzung entwickeln wird. Insbesondere das 5G-Anwendungsfeld URLLC hat das Potential, die hohen Anforderungen von Fahrzeugsicherheitsanwendungen zu erfüllen. Insgesamt erfolgt die Steigerung der Leistungsparameter durch eine Vielzahl von technischen Verbesserungen der drahtlosen Übertragung („5G New Radio“), die von neuen Frequenzbereichen, über optimierte Modulationsverfahren bis zu Massive MIMO reichen. Mit der Einführung von Konzepten des Software-Defined Networking (SDN) wird 5G auch wesentlich flexibler, um zukünftig hochdynamische und heute noch nicht absehbare Anwendungen zu unterstützen. Neben den zu erwartenden Leistungsverbesserungen der zukünftigen Mobilfunkgeneration ist hervorzuheben, dass bereits heute eine Reihe von Anwendungen mit der aktuellen Mobilfunkgeneration realisiert werden können.

5.1.3 Cellular-V2X

Cellular-V2X kann als Erweiterung des Mobilfunks um Funktionen für Fahrzeugsicherheit angesehen werden. Die wichtigste Erweiterung stellt die Kommunikation über einen „Sidelink“, d. h. die direkte Kommunikation zwischen Endgeräten (Fahrzeuge oder RSUs), dar, die Fahrzeuge zusätzlich zu der Up-/Downlink-Kommunikation nutzen können. Dazu wurde eine neue Schnittstelle in die LTE-Architektur, und zwar das „PC5 Interface“, eingeführt. Bei der Sidelink-Kommunikation werden zwei Modi unterschieden: 1. In der Funkabdeckung einer Basisstation („In Coverage“) werden die Übertragungsressourcen zentral von der Basisstation verwaltet und zugewiesen („Mode-3“), wobei der Datenaustausch dann direkt zwischen den Endgeräten erfolgt. 2. Wenn sich ein Fahrzeug außerhalb der Funkabdeckung befindet („Out-of-Coverage“), erfolgt die Ressourcenallokation verteilt („Mode-4“). „Mode-4“ ist somit prinzipiell vergleichbar mit der Ad-hoc-Kommunikation von WLAN-V2X.

In beiden Modi von Cellular-V2X können die Übertragungsressourcen für eine wiederholende Übertragung aus einem Ressourcenfenster („Selection window“) allokiert werden („semi-persistent Scheduling“), was die Menge der notwendigen Steuerungsinformationen bzw. die Kollisionswahrscheinlichkeit verringert. Im Mode-3 gibt es Mechanismen für eine verteilte Überlastkontrolle, bei denen der aktuelle Kanalzustand gemessen und ggf. die Rate des Senders verringert wird.

Cellular-V2X arbeitet im 5,9-GHz-Frequenzband oder im lizenzierten Mobilfunkspektrum, das auch WLAN-V2X nutzt, und ist für 10- und 20-MHz-Kanäle spezifiziert. Festlegungen zur Koexistenz von Cellular-V2X und WLAN-V2X im gleichen Frequenzbereich werden noch erarbeitet [5GAA2017, CEPT2017, EC2017b]. Zur drahtlosen Übertragung nutzt Cellular-V2X das Übertragungsverfahren SC-FDM mit den Modulationsverfahren QPSK und 16QAM sowie Turbo-Coding für die Datenübertragung, womit es eine Datenrate von 15,8 Mbit/s über 10 MHz-Kanäle erreicht.

Höhere Protokollschichten, und zwar Protokolle der Netzwerk- und Transportschicht und der Nachrichtenformate sind bisher nicht abschließend definiert. Aktuelle Standardisierungsarbeiten gehen davon aus, dass in Europa der ETSI-Protokollstack übernommen und für Cellular-V2X angepasst wird. Dies gilt voraussichtlich auch für die zu verwendenden Techniken für IT-Sicherheit [5GAA2018].

Die direkte Kommunikation zwischen Endgeräten bei Cellular-V2X dient nicht nur der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation, sondern kann auch für die Konnektivität von RSUs eingesetzt werden. Die RSU kann dabei mit der Basisstation des Zugangsnetzwerks kolloziert sein (BS-type RSU) oder als Endgerät fungieren (UE-type RSU).

Eine Stärke von Cellular-V2X ergibt sich aus der Wiederverwendung der existierenden Mobilfunkinfrastruktur, die potentiell Installations- und Betriebskosten einer dedizierten Infrastruktur verringert (siehe Abschnitt 7) und dabei gleichzeitig IT-Sicherheitsfunktionen (Authentifizierung und Autorisierung sowie ggf. auch Accounting) übernehmen kann. Darüber hinaus integriert Cellular-V2X die zentrale Ressourcenvergabe und Ad-hoc-Kommunikation (Mode-3 und -4), wobei sich im ersteren Fall Leistungsvorteile ergeben. Weitere vorteilhafte Eigenschaften bestehen darin, dass der Up-/Downlink als Backup des Sidelinks zur Verbesserung der Zuverlässigkeit genutzt sowie andere Verkehrsteilnehmer, wie Fußgänger und Fahrradfahrer, unmittelbar in die Kommunikation einbezogen werden können. Die Wiederverwendung der Mobilfunkinfrastruktur bedeutet aber auch, dass benachbarte Fahrzeuge, die in Netzen unterschiedlicher Mobilfunkbetreiber registriert sind, basisstationsgesteuerte Sidelink-Kommunikation nicht ohne weiteres nutzen können und Roaming-Funktionen benötigt werden, die die Komplexität des Systems erhöhen.

5.2 Kriterien der Technologiebewertung

In diesem Abschnitt werden die zur Bewertung der drei Technologievarianten genutzten Kriterien diskutiert, deren Auswahl den ersten Schritt der in Abschnitt 2 vorgestellten Nutzwertanalyse darstellt. In diesem Konzept wurden dabei drei Klassen von Kriterien identifiziert. Die ersten beiden Klassen beschreiben technologiebedingte Aspekte und gliedern sich in Leistungskriterien und funktionale Kriterien. Erstere sind quantifizierbare Größen, welche innerhalb des Kommunikationssystems prinzipiell messbar sind. Grundlage für die Ermittlung relevanter Parameter sind u. a. [ETSI2017] und [ITU-R2015]. Demgegenüber bezeichnen funktionale Kriterien nichtquantifizierbare technische Eigenschaften des Kommunikationssystems und adressieren dabei vielmehr den Grad der Unterstützung einer konkreten Funktionalität, z. B. IT-Sicherheit. Die dritte Klasse umfasst Entwicklungskriterien, welche zur Beurteilung der Rahmenbedingungen bzgl. Standardisierung, Regulierung und Markt dienen.

5.2.1 Bewertungskriterien

Die ausgewählten Kriterien sind klassenspezifisch in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 8 Auswahl der Bewertungskriterien

L. Leistungskriterien	F. Funktionale Kriterien	E. Entwicklungskriterien
L.1 Reichweite	F.1 IT-Sicherheit	E.1 Standardisierungsreife
L.2 Zuverlässigkeit	F.2 Anbindung an Verkehrsinfrastruktur	E.2 Standardisierungsdynamik

L. Leistungskriterien	F. Funktionale Kriterien	E. Entwicklungskriterien
L.3 Verbindungsdichte	F.3 Anbindung an zentrales Cloudsystem	E.3 Weiterentwicklungspotential
L.4 Latenz	F.4 Systemoffenheit	E.4 Verfügbarkeit
L.5 Abdeckung		E.5 Reife der Geschäftsmodelle
L.6 Spektrale Effizienz		E.6 Reife des Rechts-/Regulierungsrahmens
L.7 Mobilität (High-Speed-Unterstützung)		E.7 Bisherige Verbreitung
		E.8 Zugriff auf Spektrum

Die Kriterienauswahl wurde unabhängig von dem betrachteten Stakeholder getroffen. Die stakeholder-spezifische Sicht spiegelt sich vielmehr in der Gewichtung der Kriterien wider, welche in Abschnitt 5.2.2 diskutiert wird.

5.2.1.1

Leistungskriterien

Mehr als die anderen Kriterienklassen sind die Leistungskriterien von gegenseitigen Abhängigkeiten geprägt. Bei der Auswahl der Leistungskriterien wurde darauf geachtet, diese Abhängigkeiten gering zu halten und sie ggf. zu erläutern. Für die beiden broadcastbasierten Technologien Cellular-V2X und WLAN-V2X existieren Abhängigkeiten insbesondere bei der Reichweite, der Zuverlässigkeit und der Verbindungsdichte: Die **Reichweite** gibt die maximale Entfernung zwischen dem Sender einer Nachricht und dessen Empfänger an. Diese Entfernung ist bei Broadcast-Kommunikation generell in Kombination mit einer Anforderung an die **Zuverlässigkeit** zu bewerten. So kann eine Nachricht in einem bestimmten Abstand vom Sender mit einer spezifischen Zuverlässigkeit dekodiert werden. Zuverlässigkeit adressiert hierbei allein die Wahrscheinlichkeit ein empfangenes Paket auch dekodieren zu können. Der Aspekt von Versorgungslücken oder -lücken des Kommunikationsnetzes bei Backend-V2X wird dagegen im Kriterium Abdeckung aufgegriffen. Für Cellular- und WLAN-V2X sind Reichweite und Zuverlässigkeit außerdem von der **Verbindungsdichte** abhängig, welche die gewährleisteten Verbindungen pro Fläche angibt und mit dem Nutzeraufkommen korrespondiert.

Potentielle Kollisionen von Datenpaketen hängen dabei von der Entfernung konkurrierender Nutzer ab, welche die gleichen Zeit-Frequenz-Ressourcen verwenden. Für Cellular-V2X Mode-3 kann diese Entfernung über die zentrale Ressourcenvergabe des Schedulers beeinflusst werden, während Cellular-V2X Mode-4 sowie WLAN-V2X aufgrund des Random-Access-Zugriffs dezentrale Kollisionsvermeidungsstrategien nutzen. Die Reichweite für Backend-V2X-Verbindungen ist durch kanalangepasste Funkkommunikation und zellübergreifendes Routing über das Backbone-Netz hingegen nicht direkt vom Nutzeraufkommen abhängig. Die Zuverlässigkeit der Kommunikationsverbindung für Teilnehmer am Zellrand ist zwar aufgrund höherer Interferenzen geringer, kann aber über MCS sowie Hybrid-ARQ-Mechanismen angepasst werden. Für Cellular- und WLAN-V2X sind diese Mechanismen jedoch aufgrund des fehlenden Rückkanals nicht anwendbar. Zuverlässigkeit und Reichweite können dennoch über die Wahl des MCS generell verändert werden.

Da Backend- und Cellular-V2X auf lizenziertes Spektrum zurückgreifen können, ist durch die Erweiterung der zur Verfügung stehenden Ressourcen eine Vergrößerung der

Verbindungsichte möglich, was für WLAN-V2X nicht der Fall ist. Darüber hinaus ist die Verbindungsichte abhängig vom Medienzugriffsverfahren und darin implementierten Strategien zur Kollisionsvermeidung. Das Kriterium **Abdeckung** adressiert das Zustandekommen eines Verbindungsaufbaus. Durch den Ad-hoc-Modus von Cellular- und WLAN-V2X ist eine Kommunikationsfähigkeit immer gegeben. Im Gegensatz dazu ist Backend-V2X von der Erreichbarkeit der Basisstation und der von ihr vergebenen Ressourcen abhängig. Dabei können Versorgungsengpässe bzw. -lücken entstehen, welche die Kommunikationsfähigkeit verschlechtern bzw. gänzlich unterbinden.

Das Kriterium **Latenz** beschreibt die Zeitverzögerung zwischen dem Senden und Empfangen einer Nachricht. Hierbei werden Verzögerungen durch die Luftschnittstelle sowie durch das Routing einbezogen. Das Informationsalter aufgrund des Zugriffs auf eine zuvor dekodierte Nachricht (im Fall eines Nachrichtenverlusts) wird ausgeklammert, da er bereits im Kriterium Zuverlässigkeit aufgefasst wurde. Das bei Vergleichen häufig anzufindende Kriterium der unterstützten Datenrate wird hier durch das Kriterium spektrale Effizienz ersetzt, welches in diesem Zusammenhang als wesentlich relevanter angesehen wird, da es auch Datenratenerhöhungen durch eine Hinzunahme von Spektrum berücksichtigt. Die **spektrale Effizienz** bewertet dabei die Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Funkressourcen, also des nutzbaren Spektrums. Hierbei ist zu beachten, dass durch eine zentrale Ressourcenvergabe das verfügbare Spektrum sehr effizient ausgenutzt werden kann, während bei verteilten Medienzugriffsverfahren mit Random Access auf eine dezentrale Überlastkontrolle (DCC) zurückgegriffen wird. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass Cellular- und WLAN-V2X die Beschaffenheit von V2X-Informationen bzw. IVS-Nachrichten durch Broadcast-Kommunikation optimal ausnutzen, während für Backend-V2X die Verteilung der Informationen mittels paralleler Unicast-Verbindungen umgesetzt wird. Prinzipiell kann im Downlink eMBMS (evolved Multimedia Broadcast Multicast Service) zur Verteilung von Informationen auf eine Gruppe von Nutzern erfolgen, ein tatsächlicher Einsatz von eMBMS erfährt derzeit jedoch wenig Aufmerksamkeit. Das Kriterium Mobilität zielt auf die Gewährleistung von Verbindungen für mobile Nutzer. Da Geschwindigkeiten unter 100 km/h prinzipiell durch alle Technologien gewährleistet werden, bildet dieses Kriterium die **High-Speed Unterstützung** ab.

5.2.1.2

Funktionale Kriterien

Das Kriterium **IT-Sicherheit** bewertet primär die Gewährleistung von Authentizität, Integrität und Datenschutz. Authentizität stellt sicher, dass der Sender der Nachricht eindeutig identifiziert werden kann, ein Angreifer also nicht die Identität eines anderen Nutzers annehmen kann. In Backend-V2X ist dies über LTE-Sicherheitsfunktionen gewährleistet, die auf SIM-Karten¹⁷ im Endgerät und einer komplexen Sicherheitsarchitektur zum Schutz der Kommunikation zwischen Endgerät und Kernnetz¹⁸ sowie innerhalb des Kernnetzes basiert. Über die Sicherheitsmechanismen wird Authentizität, Integrität und Vertraulichkeit der Kommunikation innerhalb des Mobilfunknetzes gewährleistet; darüber hinaus müssen anwendungsspezifische Sicherheitsmechanismen zum Einsatz kommen. Für WLAN-V2X wird Authentizität und Integrität (und optional Vertraulichkeit) über digitale Signaturen und Zertifikate, sowie die dazugehörige Public-Key-Infrastruktur gewährleistet. Anonymität wird über Pseudonyme realisiert, die eine begrenzte Lebenszeit haben und regelmäßig gewechselt werden. Die pseudonymbasierte

¹⁷ Subscriber Identity Module (SIM)

¹⁸ Authentication and Key Exchange (AKA)

Anonymität impliziert, dass der Nutzer über eine so genannte Long-Term ID identifiziert wird, von der die Pseudonyme abgeleitet werden. Das Sicherheitskonzept von Cellular-V2X wird voraussichtlich auf Backend-V2X basieren (Mode-3) und das von WLAN-V2X übernehmen (Mode-4).

Die **Anbindung an die Verkehrsinfrastruktur** beurteilt den Aufwand um z. B. Lichtsignalanlagen und Verkehrsmanagementsysteme mit dem IVS-Kommunikationssystem zu koppeln. Bereits heute stellen Verkehrstechnik-Hersteller Lichtsignalanlagen mit WLAN-V2X-basierten RSUs aus. Eine Kommunikationsfähigkeit mit der Verkehrsinfrastruktur ist somit bereits gegeben¹⁹. Die Anbindung von Cellular-V2X bzw. Backend-V2X an Lichtsignalanlagen bedarf dagegen Absprachen (und darauf aufbauende Entwicklungen) zwischen MNOs und den Betreibern der Verkehrsinfrastruktur bzgl. Schnittstellen und Zugriffsrechten. Auf der anderen Seite wird eine **Anbindung an ein zentrales Cloud-system** welches zur Erfassung, Verarbeitung und Verknüpfung von Verkehrsdaten (basierend auf u. a. IVS-Nachrichten) von der bereits existierenden Kommunikationsinfrastruktur der Mobilfunknetze (Cellular-V2X und Backend-V2X) profitieren. WLAN-V2X kann diese Infrastruktur zwar ebenfalls nutzen, für eine Anbindung ist jedoch weitere Entwicklungsarbeit notwendig. Damit in Verbindung steht die **Offenheit des V2X-Systems** gegenüber Entwicklungen von Dritten. Dies betrifft Softwareentwicklungen mit offenen APIs (Application Programming Interfaces) zwischen bzw. innerhalb der Subsysteme und die Interoperabilität zwischen Implementierungen verschiedener Hersteller. MNOs zeigen seit einiger Zeit insbesondere für den Bereich Mobile Edge Computing solche Aktivitäten. Hierbei sind einheitliche Schnittstellen (eventuell MNO-übergreifend) eher zu erwarten als bei WLAN-V2X-basierten Cloud-Lösungen, bei welchen APIs voraussichtlich betreiber-spezifisch angeboten werden.

5.2.1.3

Entwicklungskriterien

Entwicklungskriterien beurteilen Rahmenbedingungen hinsichtlich der **Standardisierung**, der Regulierung und des Marktes. Ersteres bewertet den momentanen Entwicklungsstand des Standardisierungsprozesses (**Reife**), während die **Dynamik** dessen Tempo beurteilt. Das noch verbleibende **Entwicklungspotential** gibt eine Grenze für die Leistungsfähigkeit der Technologie an. Eine grundlegende Systemveränderung, die in einer neuen Technologie münden würde, ist hierbei nicht inbegriffen. Es ist zu bemerken, dass Backend-V2X und WLAN-V2X mit einer höheren Standardisierungsreife bewertet werden können, während für Cellular-V2X durch die Integration von zentraler Ressourcenvergabe und Random Access ein höheres Entwicklungspotential angenommen werden kann.

Das Kriterium **Verfügbarkeit** bezieht sich auf das Vorhandensein von Hardware/Software-Lösungen und kann dabei sowohl vom Standardisierungsprozess als auch von Marktentwicklungen abhängen. Ein weiteres marktbezogenes Kriterium stellt die **Reife der Geschäftsmodelle** dar, welches auf den Entwicklungsstand von Strategien zur marktwirtschaftlichen Einbindung der Technologien in Unternehmensprozesse fokussiert. Ebenso ist die Entwicklung von Rahmenbedingungen hinsichtlich **Recht und Regulierung** zu bewerten, welche für die Technologienutzung von Bedeutung ist. Beide Aspekte können Einflussfaktor für die **Verbreitung** der Technologie im Markt sein. Ein notwendiges Kriterium für sie ist die Verfügbarkeit, während die alleinige Verfügbarkeit noch keine Aussage über dessen tatsächliche Verbreitung zulässt. Das abschließende Kriterium ist der

¹⁹ Ein kritischer Aspekt ist die Kompatibilität proprietärer Systeme von Verkehrstechnik-Herstellern.

Zugriff auf das Frequenzspektrum. Es bezieht sich auf die zur Verfügung stehenden Funkressourcen. WLAN-V2X kann dabei im lizenzfreien 5,9 GHz Band betrieben werden, während die Integration von Cellular-V2X in diesen Frequenzbereich noch diskutiert wird. In jedem Fall kann Spektrum welches für Backend-V2X genutzt wird vom MNO auch für Cellular-V2X bereitgestellt werden. Für Backend-V2X selbst kann wiederum ausschließlich lizenziertes Spektrum genutzt werden.

5.2.2 Gewichtung der Bewertungskriterien

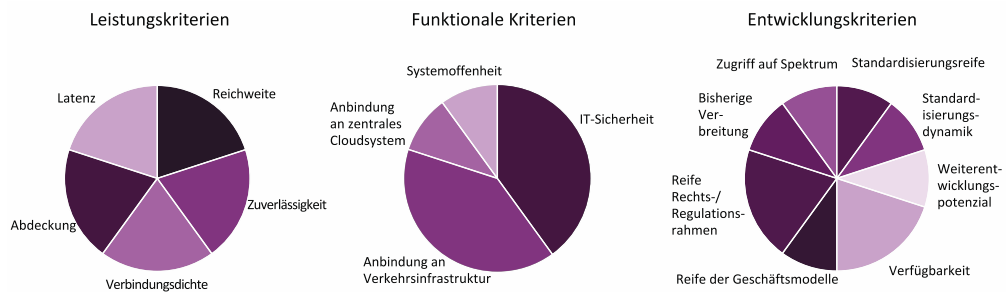
Die Gewichtung der Kriterienklassen sowie der Kriterien selbst ist abhängig vom Stakeholder. Die vorliegende Arbeit nimmt die Sicht einer Stadt bzw. Kommune ein, wodurch einige Kriterien eine hohe Gewichtung erhalten und andere Kriterien aus der Bewertung herausfallen. Die Festlegung der Gewichtung basiert neben der Einschätzung der Autoren diesem Konzept auf der Befragung von Experten aus verschiedenen Bereichen. Die resultierenden Gewichtungsfaktoren sind in Abbildung 9 dargestellt.

Bei der Gewichtung der Kriterienklassen werden **funktionale (F)** und **Entwicklungsfaktoren (E)** gegenüber **Leistungskriterien (L)** hervorgehoben, da eine Stadt mit Investitionen in V2X-Systeme besonders langfristige Ziele verfolgt und eine hohe Priorität auf die tatsächliche Nutzbarkeit legt. Grundanforderungen an die Leistungsfähigkeit sollten erfüllt sein, darüberhinausgehende Leistungsparameter sind von untergeordneter Bedeutung. Dementsprechend werden die Faktoren mit 0,2 für Leistungskriterien und jeweils 0,4 für funktionale und Entwicklungskriterien festgelegt. Die einzelnen Leistungskriterien werden gleich gewichtet, mit Ausnahme von spektraler Effizienz (L.6) und Mobilität (High-Speed-Unterstützung) (L.7). Die spektrale Effizienz liegt insbesondere im Interesse des MNOs, da dieser aus marktwirtschaftlichen Gründen lizenziertes Spektrum optimal ausnutzen will. Für die Stadt/Kommune ist die Gewährleistung einer bestimmten flächendeckenden Verbindungsdichte in Kombination mit Reichweiten-, Zuverlässigkeits- und Latenzanforderungen ausreichend. Die High-Speed-Unterstützung ist für die Stadt/Kommune von geringer Bedeutung, da hohe Fahrzeuggeschwindigkeiten im Innenstadtbereich abgesehen von Stadtautobahnen typischerweise nicht relevant sind. Beide Kriterien sind dennoch in die Nutzwertanalyse aufgenommen, da andere Stakeholder, z. B. Kommunen im ländlichen Raum eine alternative Gewichtung vornehmen könnten. Hinsichtlich der spektralen Effizienz gilt auch das Argument, dass zumindest für WLAN-V2X und Cellular-V2X Mode-4 das verfügbare Spektrum im 5,9-GHz-Frequenzband bei den erwarteten Verbreitungsgraden als ausreichend angesehen wird [MAT2009] [SIMTD2013b].

Bei den funktionalen Kriterien werden insbesondere die IT-Sicherheit und die Anbindung an die Verkehrsinfrastruktur höher priorisiert (jeweils 0,4), während Systemoffenheit und die Anbindung an ein zentrales Cloudsystem eher als vermarktungsrelevant angesehen werden können und aus der Sicht des Stakeholders Stadt bzw. Kommune als weniger ausschlaggebend eingeschätzt werden (jeweils 0,1).

Die Entwicklungskriterien wurden zunächst gleich gewichtet (0,1), wobei zwei Kriterien mit einer höheren Relevanz eingeschätzt werden: Sowohl die Verfügbarkeit als auch die Reife des Rechts- und Regulierungsrahmens sind entscheidende Punkte für die Bewertung aus der Perspektive der Stadt bzw. Kommune (jeweils 0,2).

Abbildung 9 Festlegung der Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Kriterien für Leistungs- (L), funktionale (F) und Entwicklungskriterien (E)²⁰



5.2.3 Ergebnisse der Nutzwertanalyse für V2X-Kommunikationstechnologien

Vor der Darstellung und Diskussion der Ergebnisse der Nutzwertanalyse sollen zunächst zwei Aspekte herausgestellt werden:

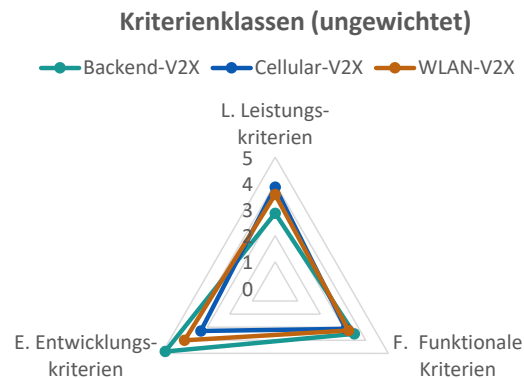
- 1 Die Bewertung der Technologievarianten ist stark von der spezifischen Gewichtung aus einer Stadt-/Kommunenperspektive geprägt. Eine andere Stakeholderperspektive kann das Ergebnis zugunsten einer anderen Technologie beeinflussen, beispielsweise kann die Mobile-Network-Operator-Perspektive zu einem grundsätzlich anderen Ergebnis kommen. Aber auch bei der Stadt-/Kommunenperspektive gilt es zu differenzieren: Neben dem bereits erwähnten Beispiel einer Kommune im ländlichen Raum kann eine Stadt ausschließlich als Straßenbetreiber agieren, zusätzlich aber auch als Betreiber einer Verkehrsmanagementzentrale agieren oder sogar die Rolle eines Serviceproviders übernehmen (siehe auch die Betreibermodelle im Abschnitt 8).
- 2 Die Bewertung der Leistungskriterien orientiert sich an den Anforderungen der hauptsächlich V2V-basierten Anwendungsklasse AK1 „Verkehrskritische Nahbereichswahrnehmung“ (siehe Abschnitt 4.2.4), da diese Klasse als besonders wichtig für eine Systemeinführung in den nächsten Jahren angesehen wird. Im Vergleich dazu wird die Systemeinführung der Anwendungsklasse AK3 „Sensordatenaustausch des lokalen Verkehrsgeschehens“ erst zu einem späteren Zeitpunkt (> 5 Jahre) erwartet, so dass sie für die Technologiebewertung im Kontext des Konzepts weniger relevant ist. Darüber hinaus hat die Anwendungsklasse AK1 „Verkehrskritische Nahbereichswahrnehmung“ höhere Leistungsanforderungen als die ebenso wichtige AK2 „Verkehrsbegleitender Informationsaustausch im relevanten Umfeld“, so dass sich die Erfüllungsgrade nach der Klasse mit den höheren Anforderungen richtet. Somit entsteht durch die Fokussierung auf eine Anwendungsklasse eine zusätzliche implizite Gewichtung in der Nutzwertanalyse.

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Nutzwertanalyse mit der in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten Gewichtungen sowie einer Bewertung aus der Stadt- bzw. Kommunenperspektive mit einem Fokus auf die Anwendungsklasse „Verkehrskritische Nahbereichswahrnehmung“ dargestellt. Repräsentative Variationen der Gewichtung und Bewertung werden im Abschnitt 5.2.4 diskutiert.

²⁰ Die Kriterienklassen, d. h. die aggregierten Einzelkriterien der jeweiligen Klasse sind ebenso gewichtet, und zwar mit L=0,2; F=0,4 und E=0,4. Eine tabellarische Übersicht findet sich in der Tabelle 18 im Anhang C.

Abbildung 10

Ergebnis der Nutzwertanalyse für die definierten Kriterienklassen (Leistungskriterien, funktionale Kriterien und Entwicklungskriterien) (Erfüllungsgrade ohne Gewichtung)



Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Nutzwertanalyse für die Kriterienklassen und für die individuellen Leistungs-, funktionalen und Entwicklungskriterien dargestellt. Zum besseren Vergleich der V2X-Kommunikationstechnologien sind dabei zunächst die ungewichteten Erfüllungsgrade zugrunde gelegt (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11). Eine Übersicht der Gesamtergebnisse der Nutzwertanalyse basierend auf der gewichteten Bewertung und der resultierenden Rangliste der Technologien wird am Ende des Abschnitts gegeben. Die numerischen Details sind in Tabelle 20 im Anhang D zu finden.

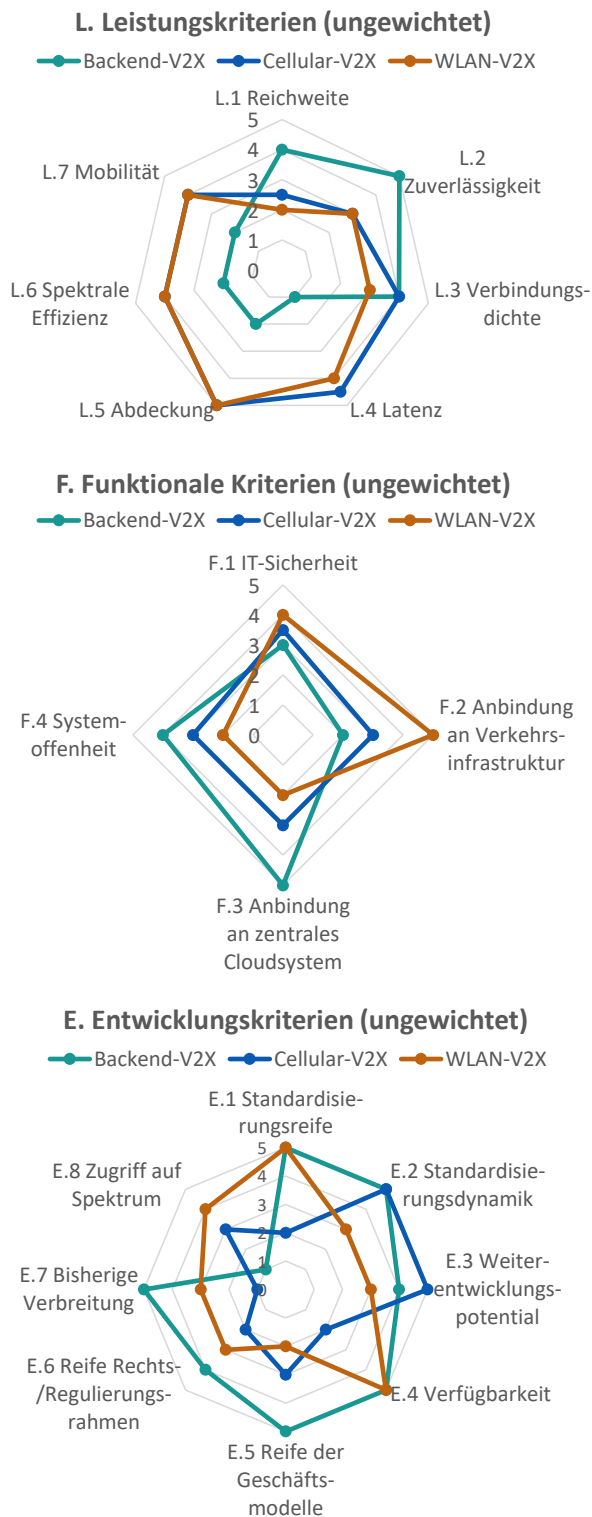
Bei den **Leistungskriterien** bietet Cellular-V2X die besten Bewertungen. In Abbildung 11 (oben) ist zu erkennen, dass Cellular-V2X in jedem Leistungskriterium mindestens den gleichen Erfüllungsgrad wie WLAN-V2X erreicht, in einigen Kriterien sogar eine höhere Bewertung erzielt. Beispielsweise ergibt sich bei der Verbindungsdichte ein besseres Ergebnis gegenüber WLAN-V2X, da durch die zentrale Ressourcenvergabe in Cellular-V2X Mode-3 ein hohes Nutzeraufkommen über die Regulierung von Reichweite und Zuverlässigkeit abgedeckt werden kann. Backend-V2X schneidet bei den Leistungskriterien am schlechtesten ab. Insbesondere werden Latenz, Abdeckung, spektrale Effizienz bei Broadcast-Kommunikation sowie Mobilität als Schwachpunkte angesehen²¹, während Vorteile bei Reichweite und Zuverlässigkeit bestehen.

Bei Cellular-V2X ist zu berücksichtigen ist, dass Mode-3 und Mode-4 in der Bewertung gleichgewichtet zusammengefasst wird. Begründet wird dies damit, dass Mode-3 („In Coverage“) zwar aufgrund einer hohen Abdeckung häufiger auftritt, Mode-4 („Out of Coverage“) jedoch als sicherheitskritischer angesehen wird. Wenn Mode-3 und Mode-4 nicht in Kombination, sondern als separate Technologien betrachtet werden würden, ist der Vorsprung von Cellular-V2X Mode-3 noch stärker ausgeprägt, da sich hier die Vorteile der zentralen Ressourcenvergabe stärker auswirken. Mode-4 als autarke Technologie hat in den Leistungskriterien Zuverlässigkeit und spektraler Effizienz eine etwas schlechtere Bewertung als Cellular-V2X (Kombination beider Modi), da zum jetzigen Zeitpunkt der Entwicklung kein Mechanismus zur Überlastkontrolle für Cellular-V2X definiert wurde. Im Weiteren wird unter Cellular-V2X ausschließlich die Kombination beider Modi betrachtet.

²¹ Allerdings werden spektrale Effizienz und Mobilität in der Gesamtanalyse mit einer Gewichtung von 0 gesetzt.

Abbildung 11

Ergebnis der Nutzwertanalyse für Leistungskriterien (oben), funktionale Kriterien (Mitte) und Entwicklungskriterien (unten): Erfüllungsgrade ohne Gewichtung



Bei den **funktionalen Kriterien** zeigen sich Unterschiede in der Anbindung der Verkehrsinfrastruktur und des zentralen Cloudsystems, wobei WLAN-V2X Vorteile im ersten und Backend-V2X im zweiten Fall hat. Mobilfunk weist auch einen höheren Erfüllungsgrad bei der Systemoffenheit auf. Ein wesentlicher Unterschied entsteht im weiteren Schritt durch die spezielle Wichtung einzelner Entwicklungskriterien aus der Stakeholderperspektive Stadt bzw. Kommune. Da hier der Anbindung an die Verkehrsinfrastruktur bzw. der IT-Sicherheit eine höhere Gewichtung zukommt, schneidet WLAN-V2X in dieser Kriterienklasse letztendlich besser ab als die anderen beiden Technologievarianten.

Bei den **Entwicklungskriterien** erhält Backend-V2X die höchste Bewertung. Wie auch für WLAN-V2X wird die Standardisierungsreife als hoch eingeschätzt, während sie für Cellular-V2X noch auf einem niedrigen Niveau ist. Letztere besticht jedoch durch ein größeres Entwicklungspotential. Insbesondere bei der Verfügbarkeit, der bisherigen Verbreitung und des verfügbaren Rechts- und Regulierungsrahmens kann sich Backend-V2X gegenüber den anderen Technologien durchsetzen, während Cellular-V2X bei Standardisierungsreife, Verfügbarkeit und bisherige Verbreitung abfällt.

Tabelle 9

Zusammengefasste Ergebnisse der Nutzwertanalyse

	Backend-V2X	Cellular-V2X	WLAN-V2X
L. Leistungskriterien	3,2	3,8	3,4
F. Funktionale Kriterien	2,9	3,2	4,0
E. Entwicklungskriterien	4,3	2,7	3,6
Gesamt	3,5	3,1	3,7

Unter Einbeziehung der Gewichte (siehe Abschnitt 5.2.2) ergeben sich die **resultierenden Nutzwerte**, die in der Tabelle 9 zusammengefasst sind.²² Dabei erreicht WLAN-V2X (3,7) die beste Bewertung vor Backend-V2X (3,5) und Cellular-V2X (3,1). Diese Werte entsprechen einer Verbesserung von 19 % von WLAN-V2X und 13 % von Backend-V2X bezogen auf die Bewertung von Cellular-V2X. Im Vergleich der Kriterienklassen ist Backend-V2X besonders stark bei Entwicklungskriterien, hat aber eine wesentlich schlechtere Bewertung bei den Leistungskriterien. Cellular-V2X zeigt klare Vorteilen bei Leistungskriterien, fällt aber bei den anderen beiden Kriterienklassen (funktionale und Entwicklungskriterien) ab. Dabei wirkt sich auch aus, dass die Klasse der Leistungskriterien eine geringere Gewichtung als die anderen Klassen hat. WLAN-V2X zeigt eine ausgewogene Bewertung bei allen Kriterienklassen, die letztendlich zu der stärksten Gesamtbewertung im Vergleich der Technologien führt.

Obwohl die Nutzwertunterschiede mit 19 % als relevant angesehen werden können, muss gleichzeitig betont werden, dass die Unterschiede letztendlich nicht groß genug und signifikant sind, um eine klare Dominanz einer Technologie zu begründen. Bei einer langfristigen (> 10 Jahre) und differenzierten Betrachtung von Anwendungsklassen und Verbreitungsgrad ist zu berücksichtigen, dass für die Anwendungsklasse 1 „Verkehrskritische Nahbereichswahrnehmung“ mit sehr hohen Leistungsanforderungen sowie für Szenarien mit sehr hoher Fahrzeugdichte/Verbreitungsgrad noch keine abschließende Bewertung der Technologien vorgenommen werden kann. Die Ergebnisse der Technologiebewertung zeigen also, dass alle drei Technologievarianten durchaus denkbar und

²² Die numerischen Details der Nutzwertanalyse sind in Tabelle 20 im Anhang D aufgelistet.

plausibel sind. Deshalb werden im folgenden Abschnitt 6 alle drei Technologien in den Einführungsszenarien berücksichtigt.

5.2.4 Alternative Gewichtung und Bewertung der Nutzwertanalyse für V2X-Kommunikationstechnologien

Um den Einfluss alternativer Gewichtungs- oder Erfüllungsgrad-Werte zu analysieren, werden im folgenden Abschnitt Ergebnisse einer Sensitivitäts- bzw. „Was-wäre-wenn“-Analyse präsentiert. Hierfür wurden vier verschiedene Varianten definiert:

- 1 **Variante 1 – Gleichgewichtete Kriterienklassen und Einzelkriterien:** Während in der Basisvariante die Gewichtungen aus Abschnitt 5.2.2 genutzt werden, sollen in dieser Variante alle Klassen und Einzelkriterien gleich gewichtet werden. Damit erhält die Klasse Leistungskriterien zu Lasten der anderen Klassen eine höhere Gewichtung, einzelne Leistungskriterien (Spektrale Effizienz und Mobilität) werden überhaupt einbezogen und funktionale Kriterien (IT-Sicherheit und Anbindung an Verkehrsinfrastruktur) verlieren an Gewichtung.
- 2 **Variante 2 – Hohe Gewichtung der Leistungskriterien:** In der Basisvariante ist die Klasse mit den funktionalen und den Entwicklungskriterien höher gewichtet ($F=E=0,4$) als die Leistungskriterienklasse ($L=0,2$). In dieser Variante soll die Alternative mit einer hohen Gewichtung der Leistungskriterien untersucht werden ($L=0,6$ sowie $F=E=0,2$).
- 3 **Variante 3 – Geringe Gewichtung von ausgewählten Entwicklungskriterien:** In dieser Variante spielen Entwicklungskriterien mit Bezug auf Technologieverfügbarkeit – E.1 Standardisierungsreife, E.4 Produktreife, E.7 Bisherige Verbreitung – keine Rolle, d. h. sie erhalten eine Gewichtung von 0, wobei die anderen Entwicklungskriterien als gleichverteilt angenommen werden. Bei dieser Variante hätte also ein zeitlicher „Vorsprung“ einer Technologie (im Rahmen der Arbeit trifft das auf WLAN-V2X im Vergleich zu Cellular-V2X zu) für den betrachteten Stakeholder keine Bedeutung.
- 4 **Variante 4 – Fokus auf die Anwendungsklasse AK2 „Verkehrsbegleitender Informationsaustausch im relevanten Umfeld“:** Während bei der Basisvariante der Erfüllungsgrad der Technologien stark von den Anforderungen der hauptsächlich auf V2V-Kommunikation basierten Anwendungsklasse AK3 „Verkehrskritische Nahbereichswahrnehmung“ abgeleitet wird, soll hier der Fokus auf der V2I-Kommunikation-basierten Anwendungsklasse AK2 „Verkehrsbegleitender Informationsaustausch im relevanten Umfeld“ liegen und somit berücksichtigt werden, dass Backend-V2X bereits heute eine Reihe von Anwendungen in ausreichendem Maß erfüllt. Dabei ist zu erwarten, dass Backend-V2X die Anforderungen besser erfüllen wird als für die „Verkehrskritische Nahbereichswahrnehmung“.

Tabelle 10 Sensitivitätsanalyse mit vier Varianten

Variante	Änderungen im Vergleich zur Basisvariante	Neue Verteilung der Technologievarianten
1 Gleichgewichtete Kriterienklassen und Einzelkriterien	Backend-V2X verbessert sich in allen Kriterienklassen, so dass es den höchsten Nutzwert erzielt, wenngleich die Unterschiede gering sind.	1. Backend-V2X (3,5) 2. WLAN-V2X (3,4) 3. Cellular-V2X (3,2)
2 Hohe Gewichtung der Leistungskriterien	Cellular-V2X verbessert sich stark in den Leistungskriterien und hat den gleichen Nutzwert wie Backend-V2X. Der Vorsprung von WLAN-V2X ist als gering anzusehen.	1. WLAN-V2X (3,6) 2. Backend-V2X (3,4) 2. Cellular-V2X (3,4)

Variante	Änderungen im Vergleich zur Basisvariante	Neue Verteilung der Technologievarianten
3	Geringe Gewichtung von ausgewählten Entwicklungskriterien	1. Cellular-V2X (3,5) 1. WLAN-V2X (3,5) 3. Backend-V2X (3,3)
4	Fokus auf der Anwendungs-kategorie AK ₂ „Verkehrsbegleitender Informationsaustausch im relevanten Umfeld“	1. Backend-V2X (3,8) 2. WLAN-V2X (3,4) 3. Cellular-V2X (2,9)

Die Sensitivitätsanalyse bestätigt, dass die Technologiebewertung stark von der Gewichtung sowie der fokussierten Anwendungsklasse abhängt. Bei den betrachteten Varianten ist zu erkennen, dass sich die Unterschiede zwischen den Technologievarianten meist verringern bzw. bei dem Fokus auf eine die Anwendungsklasse „Verkehrsbegleitender Informationsaustausch im relevanten Umfeld“ zum Vorteil von Backend-V2X verschieben.

Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden die drei Technologievarianten WLAN-V2X, Cellular-V2X und Backend-V2X zur möglichen Realisierung von C-ITS Anwendungen vorgestellt und mittels der Nutzwertanalyse bewertet. Diese Bewertung beinhaltet die Einschätzungen der Autoren des Konzepts sowie zusätzlicher Experten der primären Stakeholder des Systems. Es werden dabei die drei Bereiche Leistungskriterien, funktionale Kriterien und Entwicklungskriterien verwendet, welche unterschiedlich gewichtet werden können.

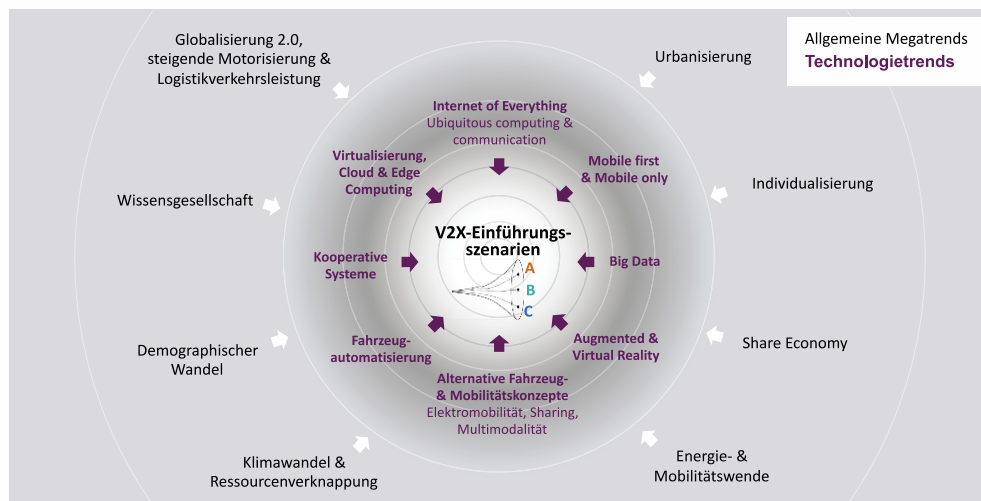
Die Technologiebewertung ergibt, dass WLAN-V2X und Cellular-V2X in der Gesamtheit der Kriterien keine signifikanten Unterschiede aufweisen, so dass keine der Technologie ausgeschlossen werden kann. Cellular-V2X ist bei hohen Fahrzeugdichten durch die zentrale Ressourcenvergabe im Mode-3 (Netzunterstützung) leicht im Vorteil, wobei derzeit nicht klar ist, ob dieser Modus tatsächlich umgesetzt werden wird. Backend-V2X zeigt besondere Vorteile bei den Entwicklungskriterien, dagegen stellen Latenz, Abdeckung sowie die Anbindung an die Verkehrsinfrastruktur hier eine größere Herausforderung dar. Bei einer weiteren langfristigen Differenzierung nach Anwendungsklassen und Verbreitungsgrad ist einschränkend festzuhalten, dass für Anwendungsklassen mit sehr hohen Leistungsanforderungen sowie für Szenarien mit sehr hoher Fahrzeugdichte (bei hohem Verbreitungsgrad) noch keine abschließende Bewertung der Technologien WLAN-V2X, Cellular-V2X und Backend-V2X vorgenommen werden kann.

6 Einführungsszenarien

6.1 Allgemeine Megatrends und Technologietrends

Die Entwicklungen im Mobilitätssektor und im Bereich der V2X-Kommunikationssysteme werden von grundlegenden Einflussfaktoren vorangetrieben, die bei der Analyse der möglichen Einführungsszenarien von V2X-Kommunikationstechnologien berücksichtigt werden müssen. Allgemeine und „allgegenwärtige“ Entwicklungen mit grundsätzlich globaler Geltung und einer hohen Robustheit gegenüber vorübergehenden Rückschlägen – sogenannte Megatrends – prägen tiefgreifende und nachhaltige Veränderungen in allen Bereichen von Gesellschaft und Wirtschaft über die nächsten 20 bis 30 Jahre. Diese Megatrends treiben auch Veränderungen im Mobilitätssystem voran; sie initiieren oder beschleunigen wiederum die Entwicklung und den Einsatz neuer Technologien. Abbildung 12 zeigt wesentliche Mega- und Technologietrends für die vorliegende Betrachtung.

Abbildung 12 Generelle Einflussfaktoren für V2X-Einführungsszenarien: Megatrends (außen), Technologietrends (innen)



Zu den wesentlichen Megatrends zählt die weitere Intensivierung der internationalen Wirtschaftsverflechtungen, insbesondere die zunehmenden Veränderungen der Wertschöpfungsketten auch bei mittelständischen Unternehmen und im Bereich der hochqualifizierten Arbeit sowie die Bedeutungszunahme asiatischer Länder bei Produktion, Nachfrage und Innovation („Globalisierung 2.0“). Einher mit der nächsten Stufe der Globalisierung gehen kontinuierliche Steigerungen der Motorisierung und der Logistikverkehrsleistungen. Weitere gesellschaftliche Megatrends betreffen die wachsende Bedeutung von technologischem Wissen und Handlungskompetenz in allen Lebensbereichen (Wissensgesellschaft), die Veränderungen in der regionalen Bevölkerungsentwicklung und der Altersstruktur (demografischer Wandel) mit den damit verbundenen Anpassungsherausforderungen, die rasant voranschreitende Ausbreitung städtischer Lebensformen (Urbanisierung) und die sich wandelnden Mobilitäts- und Kommunikationsbedarfe infolge des Strebens nach persönlicher Selbstverwirklichung und Weiterentwicklung (Individualisierung). Begleitet werden diese Trends von einer zunehmenden Neigung zur geteilten Nutzung bzw. gemeinschaftlichen Verwertung vorhandener Ressourcen und der Entstehung darauf aufbauender Communities, Plattformen und Geschäftsmodelle (Share Economy) sowie von globalen ökologischen Herausforderungen (Klimawandel und Ressourcenverknappung), welche umfassende

Transformationsprozesse in volkswirtschaftlichen Basissektoren erforderlich machen (Energie- und Mobilitätswende).

Von all diesen Megatrends sind im Besonderen Verkehrs- und digitale Infrastrukturen als politisch-rechtliche Aktionsräume und soziotechnische Wirkungssysteme betroffen. Ihre Weiterentwicklung hin zu Intelligenten Verkehrssystemen durch die umfassende Verwirklichung von V2X-Kommunikation wird von einigen einschlägigen Technologietrends ermöglicht und vorangetrieben.

Zu diesen gehören die Trends zur allgegenwärtigen Datenverarbeitung und Vernetzung von Menschen, Maschinen und Dingen in allen Sphären des täglichen Lebens (Internet of Everything), zur Teilung von Speicher- und Rechenressourcen mithilfe von zusätzlichen Hardwareabstraktionsschichten (Virtualisierung) und zu einer Aufgabenverlagerung in zentrale bzw. dezentral anwendernahe Netzknoten (Cloud bzw. Edge Computing) sowie die Tendenz Webapplikationen zuerst oder ausschließlich für den mobilen Einsatz zu entwickeln und zu optimieren (Mobile first & Mobile only). Eine zentrale Rolle spielen ferner Technologien für das wirtschaftliche Sammeln und Auswerten von Massendaten mit einer hohen Vielgestaltigkeit und Veränderungsdynamik (Big Data) sowie solcher für das Zusammenwirken eigenständig handelnder Software-Agenten bei der Lösung komplexer Probleme (Kooperative Systeme). Speziell auf den Mobilitätssektor bezogene Technologietrends betreffen die verschiedenen Entwicklungsstufen der Fahrzeugautomatisierung sowie alternative Fahrzeug- und Mobilitätskonzepte. In beiden Fällen können Anwendungen signifikant von V2X-Kommunikation profitieren. Zuletzt seien Technologien zur Erweiterung der Realitätswahrnehmung bzw. zur Nachbildung einer physikalisch existierenden Wirklichkeit in einer simulierten und interaktiven Umgebung genannt (Augmented bzw. Virtual Reality). Diese können z. B. Fahrzeugführer unterstützen oder Passagieren für Zwecke der Information und Unterhaltung dienen.

Die soeben skizzierten Megatrends und Technologietrends zeichnen die grundlegende Stoßrichtung wahrscheinlicher Zukunftsszenarien vor. Im Folgenden werden geeignete Deskriptoren für eine Unterscheidung plausibler Einführungsszenarien vorgestellt.

6.2 Kritische Deskriptoren für die Szenarien-Unterscheidung

Für die Unterscheidung der Einführungsszenarien für V2X-Kommunikationstechnologien wurden ausgehend von den beschriebenen Mega- und Technologietrends zwei kritische Deskriptoren identifiziert:

- 1 Wer sind die bei der Einführung von V2X **primär vorantreibenden Stakeholder**?
In diesem Konzept wird eine binäre Unterscheidung zwischen „Public Lead“ und „Market Lead“ vorgenommen. Public Lead umfasst öffentliche Körperschaften bzw. Institutionen, welche, z. B. durch Mandate bzgl. Fahrzeugausstattung, nicht-monetäre bzw. monetäre Investitionsanreize und Impulse setzen oder eigene Infrastrukturinvestitionen tätigen, die sich entscheidend auf die Technologieeinführung auswirken. Market Lead bezeichnet hingegen eine primär anbieter- bzw. nachfragegetriebene Technologieeinführung.
- 2 Was sind die bei der Einführung von V2X bzw. IVS **primär vorantreibenden Anwendungsfelder**?
Hier wird eine Unterscheidung in Komfort-, Effizienz- und Sicherheitsanwendungen vorgenommen (siehe Abschnitt 4).

6.3 Wechselwirkungen zwischen Technologievarianten bei der Systemeinführung

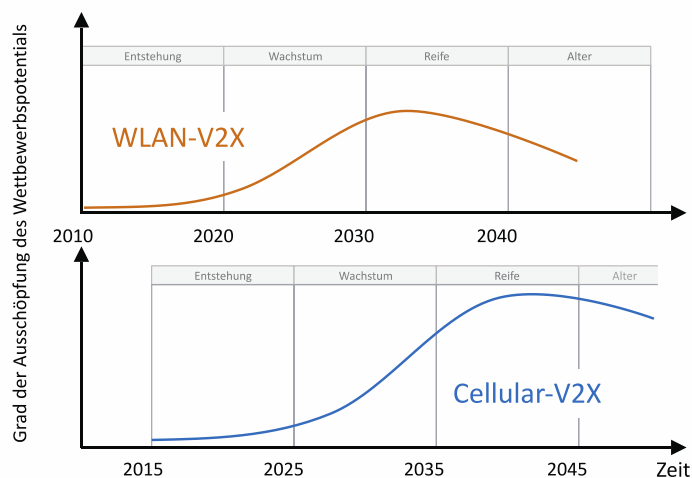
Die zukünftige Entwicklung der V2X-Kommunikationstechnologien kann mit Hilfe von Modellen abgeschätzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden Modelle des strategischen Technologiemanagements, und zwar **Technologielebenszyklen** und **Technologische S-Kurven** auf den Untersuchungsgegenstand der V2X-Kommunikationstechnologien angewandt (siehe Abschnitt 5).

6.3.1 Technologielebenszyklen

Hinsichtlich der Einordnung der V2X-Technologieoptionen in die Phasen der Technologielebenszyklen kann festgestellt werden, dass sich derzeit sowohl WLAN-V2X als auch Cellular-V2X in der Entstehungsphase befinden (Abbildung 13), wobei es für WLAN-V2X erste Anzeichen für einen Übergang in die Wachstumsphase gibt [HARR2015, EC2016c, EC2017, CROA2017b, SJO2017, VW2017]. Durch den späteren Beginn der Technologieentwicklung bei Cellular-V2X ist zu erwarten, dass dieser Phasenübergang bei dieser Technologieoption, auch bei einem intensivierten F&E-Prozess, erst zu einem späteren Zeitpunkt auftreten wird. Andererseits ist bei Cellular-V2X ein insgesamt höherer Grad der Ausschöpfung des Wettbewerbspotentials zu erwarten, was durch die potentiell enge Verbindung von Automobil- und Mobilfunkindustrie und der damit verbundenen hohen Anzahl von Wettbewerbsteilnehmern und Produkten verursacht wird. Der Technologielebenszyklus von Backend-V2X (nicht in Abbildung 13 dargestellt) richtet sich nach dem Zyklus der Mobilfunkgenerationen, nach dem etwa alle 10 Jahren eine neue Entwicklungsstufe der Netze und Endgeräte eingeführt wird. Derzeit befindet sich die 4. Mobilfunkgeneration in der Reifephase und wird von zahlreichen V2X-Anwendungen genutzt. Das sich in der Entstehungsphase befindliche 5G wird voraussichtlich etwa 2021/22 eingeführt und in den folgenden Jahren LTE als 4G-Technologie substituieren.

Da WLAN-V2X und Cellular-V2X ähnliche Anwendungsfelder adressieren und vergleichbare Leistungsparameter aufweisen (siehe Abschnitte 4 und 5), treten in den Technologielebenszyklen gegenseitige Wechselwirkungen auf, die den zeitlichen Ablauf der Phasen und die Höhe der Ausschöpfung des Wettbewerbspotentials zugunsten der einen und zulasten der anderen Technologie beeinflussen.

Abbildung 13 Technologielebenszyklen von WLAN-V2X und Cellular-V2X ohne Betrachtung ihrer Wechselwirkung



Die drei wesentlichen Wechselwirkungseffekte sind:

- Lock-in Effekt,
- Verdrängungseffekt,
- Integrationseffekt.

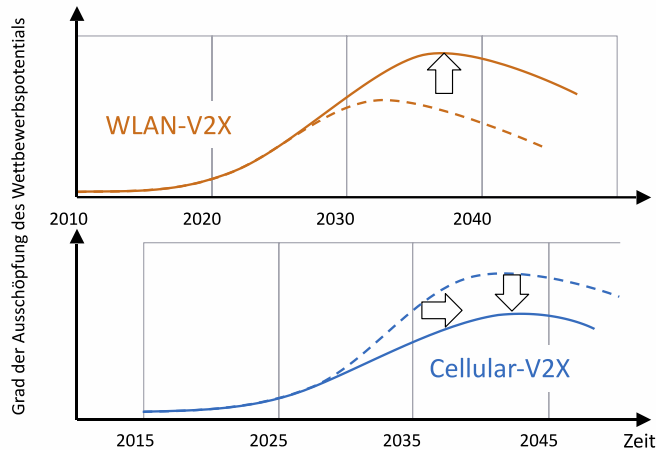
Der **Lock-in Effekt** ist schematisch in Abbildung 14 dargestellt²³. Durch eine breite Einführung von WLAN-V2X in der Wachstums- und Reifephase, aufgrund der starken Position der Anbieter und der engen Bindung der Stakeholder an die Technologie könnte das Wachstum von Cellular-V2X als zeitlich nachgelagerte Technologie gebremst und ein Wechsel von WLAN-V2X zu Cellular-V2X erschwert werden. Hierbei kommen Wechselkosten und sonstige Wechselbarrieren im Zusammenhang mit der Aufgabe einer bereits etablierten Technologie zum Tragen, welche die zeitliche Bindung an diese Vorgängertechnologie verlängern. Während WLAN-V2X das Wettbewerbspotential optimal ausschöpfen kann, führt dies bei Cellular-V2X zu einer verzögerten Reifephase und einer geringeren Ausschöpfung des Wettbewerbspotentials. Im Gegensatz zum Lock-in Effekt erreicht WLAN-V2X durch den **Verdrängungseffekt** nicht den erwarteten Verbreitungsgrad bei Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur, während Cellular-V2X nach der Systemeinführung bereits eine frühe und hohe Marktdurchdringung erzielt. Hier erlangt die vermutete technologische Überlegenheit einer sich in Entwicklung befindlichen Alternativ- bzw. Nachfolgerechnologie Bedeutung, welche die Stakeholder dazu bewegt hinsichtlich der Einführung von WLAN-V2X zurückhaltend zu bleiben. Der **Integrationseffekt** letztlich beschreibt die spätere mögliche Integration der zeitlich vorgelagerten WLAN-V2X-Technologie in die Mobilfunktechnologie, wobei WLAN-V2X zunehmend durch Cellular-V2X substituiert wird.

Bei der Analyse der Wechselwirkung zwischen den V2X-Kommunikationstechnologien wird angenommen, dass die beiden Kommunikationstechnologien (mit einem zeitlichen Versatz) koexistieren, aber unterschiedlich ausgestattete Fahrzeuge bzw. RSUs wegen der Inkompatibilität der drahtlosen Übertragungsverfahren nicht miteinander kommunizieren können. Aus technischer Sicht kann eine Interoperabilität mit verschiedenen Graden der **Integration** ermöglicht werden, und zwar auf der Anwendungsebene, der Spektrumsebene und der Systemebene. Bei der Integration auf **Anwendungsebene** sind die Kommunikationsnetzwerke technisch getrennt, mit unterschiedlichen Technologien ausgestattete Fahrzeuge bzw. RSUs können aber auf Anwendungsebene (z. B. über Verkehrsmanagementzentralen, Verkehrsrechner) Informationen austauschen. Bei der Integration auf **Spektrumsebene** werden die Übertragungskanäle des 5,9 GHz-Frequenzbandes zwischen den beiden Kommunikationssystemen aufgeteilt und Daten werden mit Hilfe von Gateways/ Protokollumsetzern immer über beide Kommunikationstechnologien übertragen. Bei der **Systemebene** sind die V2X-Kommunikationstechnologien technisch miteinander integriert, vergleichbar der Integration von LTE und WLAN Systemen.²⁴ Während die Nutzung heterogener iV2X-Kommunikationstechnologien die Wirksamkeit der Systeme und damit deren Nutzen für Verkehrssicherheit und -effizienz wesentlich einschränken kann, können die Auswirkungen durch die Integration abgemildert werden.

²³ Auf die schematische Darstellung des Verdrängungs- und des Integrationseffekts wird hier verzichtet; diese Effekte können aber so wie in Abbildung 14 dargestellt werden.

²⁴ Zur LTE-WLAN-Integration existieren verschiedene Varianten wie LTE WLAN Aggregation (LWA), License Assisted Access in LTE (LAA-LTE) und Unlicensed LTE (U-LTE), die primär auf das Offloading von Daten vom Mobilfunknetz in ein WLAN-System zielen [5GAM2015] [SIR2016].

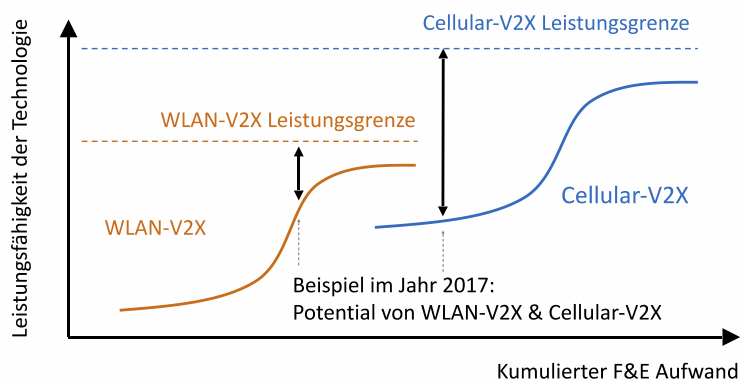
Abbildung 14 Auswirkung des Lock-in Effekts auf die Technologielebenszyklen von WLAN-V2X und Cellular-V2X



6.3.2 Technologische S-Kurven

Die zeitliche Leistungsentwicklung der V2X-Kommunikationstechnologie und technologische Sprünge können auch mit dem technologischen S-Kurven-Konzept modelliert werden (siehe Abschnitt 5). In Abbildung 15 ist die technologische Leistungsfähigkeit von WLAN-V2X und Cellular-V2X über dem kumulierten F&E Aufwand schematisch dargestellt. Dabei wird angenommen, dass Cellular-V2X eine höhere Leistungsgrenze als WLAN-V2X besitzt. Während beide Technologien ihre Leistungsfähigkeit in ihrer initialen Phase bei weitem nicht ausschöpfen, nimmt der Ausschöpfungsgrad kontinuierlich zu. Mit fortschreitender Entwicklung verfügt Cellular-V2X über eine höhere Leistungsfähigkeit als WLAN-V2X und kann WLAN-V2X zunehmend substituieren. Durch die unterschiedliche Antizipation der Stakeholder hinsichtlich der verbleibenden Leistungspotentiale können Technologiesprünge früher oder später erfolgen.

Abbildung 15 Technologisches S-Kurvenmodell für WLAN-V2X und Cellular-V2X



Bei der Betrachtung eines hybriden Systems, bei dem sowohl WLAN-V2X und Cellular-V2X eingeführt werden, bewirken die Effekte, dass sich die Technologien unterschiedlich stark ausbreiten. Diese Effekte werden bei der folgenden Herleitung der Einführungsszenarien berücksichtigt.

6.4 Beschreibung der Einführungsszenarien

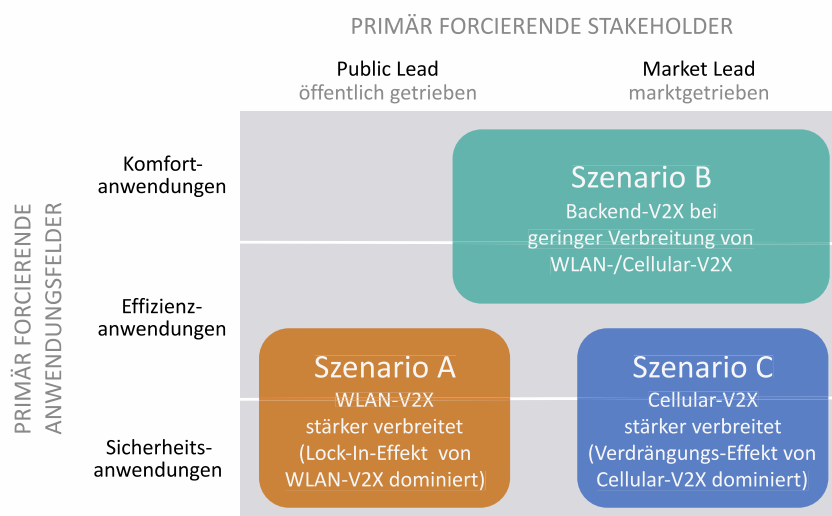
6.4.1 Herleitung und Gesamtüberblick

Ausgehend von den Trends des Makroumfeldes werden mit Hilfe der kritischen Deskriptoren für die Szenarienunterscheidung sowie der modellbasierten zeitlichen Abschätzung der Technologieentwicklung drei Szenarien abgeleitet. Diese voneinander abweichenden Entwicklungen werden nicht als Extremszenarien verstanden, bei denen ausschließlich eine der Technologien vorhanden ist. Stattdessen wird in diesem Konzept grundsätzlich ein hybrides System angenommen, wobei in den jeweiligen Szenarien die Technologievarianten unterschiedlich stark ausgeprägt sind.

Hinsichtlich der primär forcierenden Stakeholder – dem ersten kritischen Deskriptor – wird die Einführung von WLAN-V2X stark vom Staat und den Verkehrsinfrastrukturbetreibern sowie von Teilen der Automobilindustrie vorangetrieben (eher Public lead = öffentlich getrieben). Die Entwicklung von Cellular-V2X wird primär durch die Mobilfunkindustrie und Teile der Automobilindustrie forciert (eher Market lead = marktgetrieben). Typische Institutionen sind das Car-2-Car Communication Consortium (C2C-CC) und die 5G Automobile Association (5GAA) jeweils für WLAN-V2X und Cellular-V2X. Bei Backend-V2X liegt der Haupttreiber in der Mobilfunkindustrie, die sich für V2X Anwendungen neue Einsatzgebiete und Erlösquellen erschließen kann; dennoch ist auch hier ein öffentliches Interesse zu erkennen, den Standard-Mobilfunk für Verkehrsanwendungen zu nutzen und insbesondere die 5G Mobilfunktechnologie als Schlüsseltechnologie für die zukünftige Breitbandvernetzung aller Lebensbereiche zu positionieren.

Die primär forcierenden Anwendungsfelder stellen den anderen kritischen Deskriptor für die Herleitung der Einführungsszenarien dar. Die Einführung von WLAN-V2X als auch Cellular-V2X wird klar von Sicherheits- und Effizienz- anwendungen getrieben, wobei Komfortanwendungen eine untergeordnete Rolle spielen. Komfort- und Effizienz- anwendungen sind wiederum die primär forcierenden Anwendungsfelder für Backend-V2X.

Abbildung 16 Einordnung der Einführungsszenarien für V2X Kommunikationstechnologien



Die resultierenden Einführungsszenarien werden in der vorliegenden Arbeit pragmatisch als A, B und C bezeichnet. Abbildung 16 stellt sie im Gesamtzusammenhang mit den kritischen Deskriptoren dar. In den folgenden Abschnitten werden die Szenarien A, B und C detaillierter beschrieben. Eine tabellarische Übersicht findet sich in Tabelle 21 im Anhang E.

6.4.2 Szenario A – WLAN-V2X stärker verbreitet

Ein zentraler Treiber für die weite Verbreitung von WLAN-V2X in Szenario A ist ein öffentliches Mandat. Dabei werden Fahrzeughersteller für die Zulassung spezieller Dienste zur Integration von WLAN-V2X Kommunikationstechnologie verpflichtet. Ein solches Mandat wird aktuell in den U.S.A. diskutiert und es ist davon auszugehen, dass eine entsprechende Entscheidung auch Auswirkungen auf die Regulierung in Europa hat. Dementsprechend sind die dominanten Stakeholder in einem solchen Einführungsszenario zum einen der Staat bzw. die öffentliche Hand in regulatorischer Hinsicht. Zum anderen sind Kommunen und Betreiber der Verkehrsinfrastruktur sowie die Automobilhersteller die treibenden Vertreter für den Ausbau und die Integration der Kommunikationssysteme. Der Grund für die Festlegung einer Mandatierung auf die Technologie WLAN-V2X ist durch dessen Verfügbarkeit und weitreichende Testung zu begründen. Durch den in Abschnitt 6.3 beschriebenen Lock-In Effekt vermindert die starke Verbreitung von WLAN-V2X im Weiteren das Wachstum der später in den Markt kommenden Cellular-V2X Technologie und kann sich somit als relevante Technologieoption für die V2X-Kommunikation durchsetzen.

Neben einer Mandatierung wird die starke Verbreitung von WLAN-V2X insbesondere durch eine hohe Relevanz von Anwendungen der Verkehrssicherheit fokussiert. Die Anforderungen von Applikationen in diesem Bereich können von dem bereits existierenden Backend-V2X System nicht in ausreichendem Maße gewährleistet werden. Dafür relevante Anforderungen zielen vorrangig auf Latenz und Abdeckung, wobei sich letzteres auf potentielle Kommunikationseinschränkungen bezieht. In dem hier betrachteten Szenario sind die Fahrzeuge überwiegend mit WLAN-V2X Kommunikationstechnologie ausgestattet und können darüber insbesondere sicherheitsrelevante Informationen austauschen. Zusätzlich wird WLAN-V2X auch überwiegend für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur verwendet. Dabei werden neben Sicherheitsaspekten auch Anwendungen für Verkehrseffizienz adressiert. Da die in diesem Konzept betrachteten Szenarien immer eine hybride Nutzung von mehreren Technologien voraussetzen, werden Sicherheitsanwendungen in Szenario A zwar auch mit Cellular-V2X umgesetzt, diese haben aber eine geringere Bedeutung. Das bereits vorhandene Backend-V2X System wird dabei mehrheitlich für Komfortanwendungen genutzt, kann aber zum Teil auch für Applikationen im Bereich Verkehrseffizienz relevant sein.

Die Kommunikationstechnologien koexistieren in Szenario A vorwiegend auf Anwendungsebene. Darüber hinaus können sich WLAN-V2X und Cellular-V2X gemeinsame spektrale Ressourcen, wie z. B. den für IVS-Anwendungen reservierten 5,9-GHz-Frequenzbereich teilen. Entsprechend der Anwendungen verhalten sich die primären Ausprägungen der Cloud-Technologien. Sicherheitsanwendungen werden dabei überwiegend auf der verkehrsinfrastrukturnahen RSU-Cloud ausgeführt. Da die RSUs typischerweise an die Lichtsignalanlagen gekoppelt sind, ist der Betrieb von Verkehrseffizienzapplikationen in der RSU-Cloud ebenfalls sinnvoll. Komfortanwendungen werden wie in allen drei Einführungsszenarien mit einer zentralen Cloud umgesetzt.

6.4.3 Szenario B – Backend-V2X bei geringer Verbreitung von WLAN-V2X und Cellular-V2X

Dieses Szenario beschreibt den Fall, dass das bereits existierende Backend-V2X System für die überwiegenden Teile der auf Fahrzeugkommunikation basierenden Anwendungen eingesetzt wird. Dabei erfährt weder WLAN-V2X noch Cellular-V2X eine weitreichende Verbreitung als Kommunikationstechnologie in Fahrzeugen bzw. in der Verkehrsinfrastruktur.

Wird ein Mandat durch den Regulierer eingeführt ist die Verbreitung von WLAN-V2X, wie im obigen Abschnitt beschrieben wahrscheinlich. Dennoch kann auch durch eine Mandatierung nicht ausgeschlossen werden, dass sich Backend-V2X als primäre Kommunikationstechnologie durchsetzt, insbesondere dann, wenn Sicherheitsanwendungen zunächst eine geringe Bedeutung zukommen. Die primär agierenden Stakeholder werden in diesem Szenario um die Mobilfunkindustrie erweitert, welche insbesondere aufgrund der hohen Marktpotentiale von Anwendungen einer Mobile Edge Cloud (MEC) als starker Treiber für Backend-V2X-Lösungen auftritt.

Des Weiteren ist davon auszugehen, dass Applikationen, welche Bereiche der Verkehrssicherheit adressieren keine zentrale Bedeutung spielen und gegebenenfalls auch über Backend-V2X umgesetzt werden. Die im Abschnitt 4.2.1 angesprochenen Anforderungen erfahren in Szenario B eine geringere Relevanz und können zukünftig durch neue Mobilfunkgenerationen wie 5G-NR sowie dessen flächendeckenden Ausbau gewährleistet werden. Neben zentralen Cloudumsetzungen, welche auch in diesem Szenario für Komfortanwendungen genutzt werden, kommt der Mobile Edge Cloud eine größere Bedeutung zu. Insbesondere Sicherheitsapplikationen profitieren von den geringeren Verzögerungszeiten, welche durch die direkte Kopplung der Cloud mit der Basisstation gewährleistet werden können.

6.4.4 Szenario C – Cellular-V2X stärker verbreitet

Ähnlich wie das Szenario A, wird Szenario C auch durch Sicherheitsanwendungen getrieben, wobei allerdings Cellular-V2X eine starke Verbreitung findet und dabei Backend-V2X für Komfort und Effizienzanwendungen ergänzt. In diesem Einführungsszenario wird der Fahrzeug-Ausstattungsgrad mit Cellular-V2X schnell ansteigen und die Mobilfunkinfrastruktur für Cellular-V2X zügig durch die Mobilfunkbetreiber erweitert. Cellular- und WLAN-V2X koexistieren in Szenario C zunächst auf Spektrumsebene, wobei nicht auszuschließen ist, dass WLAN-V2X längerfristig in das Mobilfunksystem integriert oder durch Cellular-V2X substituiert wird. In diesem Szenario wird auch ein starker Ausbau von Mobile-Edge-Cloud-Lösungen erwartet, die als Teil der Mobilfunkinfrastruktur sicherheitskritische Verkehrsanwendungen ausführen und die (zentralen) Clouds ergänzen.

Die Einführung von Cellular-V2X erfolgt hauptsächlich marktgetrieben, wobei neue datengetriebene Geschäftsmodelle für Verkehrsanwendungen den Einsatz der Technologie befördern. Dabei sind Mobilfunkbetreiber und Systemtechnikhersteller im Verbund mit der Automobilindustrie die dominanten Stakeholder, die in diesem Szenario nicht auf eine Mandatierung der Technologie setzen. Eine zügige Verbreitung von Cellular-V2X kann insbesondere damit erklärt werden, dass Anwendungen mit Hilfe der Mobilfunkinfrastruktur bereits ab einem sehr geringen Fahrzeug-Ausstattungsgrad arbeiten.

Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden drei mögliche Einführungsszenarien hinsichtlich des Verbreitungsgrades der Technologien WLAN-V2X, Cellular-V2X und Backend-V2X vorgestellt. Es wurde dabei angenommen, dass Backend-V2X in allen Szenarien zu bestimmten Anteilen enthalten ist. Die drei Einführungsszenarien wurden mit Hinblick auf die primär forcierten Anwendungsfelder sowie die primär treibenden Stakeholder eingeordnet. Sollten Komfortanwendungen im Vordergrund stehen, welche bereits kurzfristig mit Backend-V2X umgesetzt werden können, besteht ein geringerer Anreiz, die leistungsfähigeren Technologien WLAN-V2X und Cellular-V2X einzuführen. Im Gegenzug können regulatorische Maßnahmen, wie der Erlass eines Mandats, die Einführung von WLAN-V2X forcieren, welche als einzige derzeit verfügbare Technologie für Sicherheitsanwendungen angesehen werden kann. Cellular-V2X würde insbesondere im Fall einer rein marktgetriebenen hohen Nachfrage bzgl. Sicherheitsanwendungen eine größere Verbreitung erfahren können. Als Vorteile gegenüber WLAN-V2X können hierbei die höhere Leistungsfähigkeit bei hohen Verkehrsdichten sowie die mögliche Integration von Cellular-V2X in Backend-V2X Module, welche ohnehin in Neufahrzeuge eingebaut werden.

7 Kostenanalyse

Die mit der V2X-Systemeinführung unter Rückgriff auf die in Abschnitt 5 dargestellten Technologievarianten zu schaffenden und zu betreibenden Elemente sollen nun einer Kostenanalyse unterzogen werden. Dabei wird der in Abschnitt 2 vorgestellten Methodik gefolgt. Nach einer Darstellung grundlegender Systemkostenbestandteile und ihrer groben Zuordnung zu den Stakeholdern wird für ausgewählte Teilsysteme, für die eine ausreichend valide Datenbasis vorhanden ist, eine Abschätzung der Kostenhöhe gewagt und für die drei in Abschnitt 6.4 vorgestellten Einführungsszenarien anhand des Fallbeispiels der Stadt Berlin eine Quantifizierung zu erwartender Kosten vorgenommen. Diese Werte sind als fundierte Ersteinschätzungen, nicht aber als Vorhersagen mit hoher Prognosegüte zu verstehen und aus heutiger Sicht mit einer sehr hohen Unsicherheit behaftet. Abschließend werden die Ergebnisse unter Abwägung der szenariospezifischen Nutzenpotenziale einer qualitativen Gesamtbeurteilung unterzogen.

7.1 Bestandteile der Gesamtsystemkosten und Zuordnung zu Stakeholdern

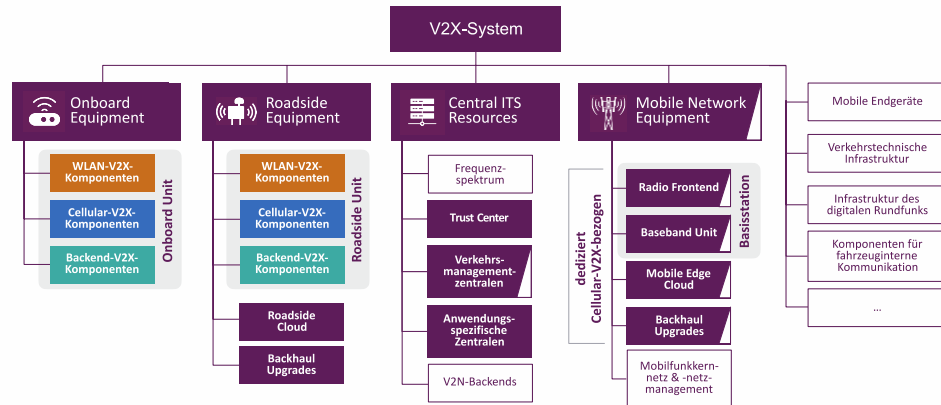
Das V2X-System stellt ein komplexes Gesamtgefüge dar und reicht weit in alle Facetten Intelligenter Verkehrssysteme hinein, da die Kommunikation von und mit Fahrzeugen für einen Großteil der IVS-Anwendungen Voraussetzung ist. In einem ersten Schritt ist eine Abgrenzung der für eine Kostenanalyse primär relevanten Subsysteme bzw. Komponenten erforderlich. Dabei ist bereits hier – wie auch auf der nachgeordneten Ebene von Kostenblöcken – darauf zu achten, nur entscheidungsrelevante Bestandteile – d. h. solche, deren Kosten sich beim Vergleich der Szenarien signifikant unterscheiden – zu berücksichtigen und vernachlässigbare Elemente – solche, deren Kosten bei allen Varianten ähnlich groß ausfallen werden – außen vor zu lassen. Ein nicht unbeträchtlicher Teil der künftig im Zusammenhang mit V2X-Kommunikation stehenden Kosten wird als sog. „sunk costs“ bereits angefallen bzw. irreversibel determiniert sein oder im Sinne von sog. „Eh-da-Kosten“ unabhängig vom Eintreten bzw. Forcieren bestimmter Einführungsszenarien ohnehin existieren – getrieben von unstrittigen Gegebenheiten und absehbaren Entwicklungen. Zu den aus diesen Gründen hier im Folgenden nicht weiter betrachteten Elementen des V2X-Systems sollen u. a. die folgenden Subsysteme zählen:

- der Bestand an mobilen Endgeräten der Nutzer (Navigationsgeräte, Smartphones, Tablets, Wearables etc.), welche auch V2X-Anwendungen dienen werden,
- die in modernen Fahrzeugen ohnedies vorhandenen Komponenten für fahrzeuginterne (und damit nicht-V2X-bezogene) Kommunikation (Bordnetz, Fahrzeugsensorik, Steuergeräte und Benutzerschnittstellen (HMIs) etc.),
- die weitgehend vorhandene verkehrstechnische Infrastruktur (Lichtsignal- und Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Verkehrsleitzentralen, stationäre Sensorik etc.),
- die V2N-Server und Kernnetze für die Backend-V2X-Kommunikation sowie
- die auch für Cellular-V2X nutzbaren Teile der nahezu flächendeckend vorhandenen Mobilfunk-Zugangsnetze.

Ebenso außerhalb der vorliegenden Betrachtung liegen die je nach Ausgestaltung der Geschäftsmodelle von Content- und Service Providern anfallenden anwendungsspezifischen Kosten für deren Leistungen. Diese werden in der Regel von den Verkehrsteilnehmern als den Nutzern, z. B. im Rahmen von Abomodellen, finanziert. Im Ergebnis der durchgeführten Literaturliteraturanalysen und der Verifizierung durch die einbezogenen Experten aus wichtigen Stakeholdergruppen wurden **vier primäre Subsysteme** mit ihren relevanten Teilkomponenten für die Kostenanalyse identifiziert (in Abbildung 17 farblich hervorgehoben). Sie stellen die Grundlage eines vereinfachten Kostenmodells dar, welches

das komplexe Wirkungsgefüge der Realität für die vorliegende Untersuchung in ausreichendem Maße abbildet, und werden im Folgenden kurz beschrieben.

Abbildung 17 V2X-Subsysteme und deren Hauptkomponenten



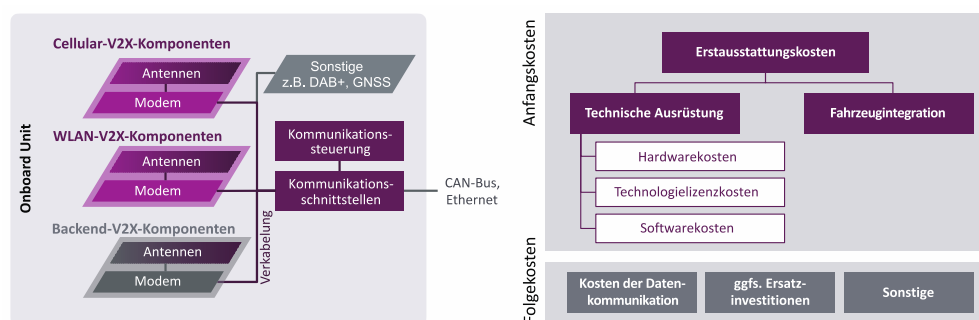
Die einzelnen Komponenten können als komplexe soziotechnische (Teil-)Systeme und Investitionsgüter aufgefasst werden, die als solche idealtypischerweise einen Systemlebenszyklus von der Initiierung und Planung über die Realisierung und den Betrieb bis hin zu ihrer Stilllegung durchlaufen [WUEB1984]. Das heißt, dass für Analysen bezüglich der Systemkosten und darauf aufbauende Entscheidungen alle Systementwicklungsphasen zu berücksichtigen sind. Für die vorliegende Betrachtung und die folgenden Übersichten soll allerdings eine einfache und pragmatische Unterscheidung zwischen den (einmaligen) **Anfangs-** und (fortlaufenden) **Folgekosten** ausreichend sein. Die Kosten der frühen Phasen – wie z. B. solche im Zusammenhang mit der Systemauslegung, der Komponenten- bzw. Softwareentwicklung und der Herstellung eines betriebsfähigen Zustands inklusive der Hardwareproduktion – werden demgemäß in den Anfangskosten und die des laufenden Betriebes während der Nutzungsphase in den Folgekosten zusammengefasst.

7.1.1 Onboard Equipment

Das Onboard Equipment umfasst die in den Fahrzeugflotten integrierten Kommunikationsmodule (Onboard Units; OBUs), welche die V2X-Kommunikation mit fahrzeugexternen Kommunikationspartnern ermöglichen. In der vorliegenden Betrachtung sollen Aftermarket-Lösungen für Fahrzeugnchrüstungen nicht gesondert von Erstausrüstungen betrachtet werden. Obwohl die Kosten einzelner OBUs im Vergleich zu anderen Systembestandteilen vergleichsweise gering ausfallen werden, wird das Onboard Equipment in Summe aufgrund der sehr hohen Anzahl der als mobilen Kommunikationsknoten agierenden Fahrzeuge (im Vergleich zu den stationären Systembestandteilen) einen wesentlich bestimmenden Anteil der Gesamtsystemkosten ausmachen.

Abbildung 18

Bestandteile des Onboard Equipment (links) und primäre Kostenblöcke (rechts)



OBU können grundsätzlich mit unterschiedlichen Technologievarianten ausgestattet sein (vgl. Abbildung 18). Da davon ausgegangen werden kann, dass unabhängig von den hier betrachteten Einführungsszenarien bereits in naher Zukunft nahezu alle Neufahrzeuge mit **Backend-V2X**-Technologien ausgestattet sind²⁵, welche gewisse Grundanwendungen (vor allem aus dem Bereich Komfort, aber auch Effizienz) über das Mobilfunknetz ermöglichen, sollen deren Kosten nicht weiter betrachtet werden. Entscheidend sind vielmehr die **WLAN-** bzw. **Cellular-V2X**-Komponenten (Modems, Antennen), die auch miteinander sowie gemeinsam mit weiteren Kommunikationstechnologie-Modulen (z. B. DAB+) in hybriden OBU kombiniert sein können. Hinzu kommen die technologiespezifischen Schnittstellen und technologieübergreifende Bestandteile wie die Kommunikationssteuerung, die Verkabelung oder ggf. Kombiantennen.²⁶ Es ist davon auszugehen, dass bei sehr vielen Fahrzeugherstellern die OBU in einer Anfangsphase sowohl WLAN-V2X als auch Cellular-V2X unterstützen werden, bis sich die Durchsetzung eines der in Abschnitt 6.4 vorgestellten Einführungsszenarien klarer abzeichnet.

Zu den einmaligen Anfangskosten der OBU zählen neben den Hard- und Softwarekosten²⁷ (und ggf. anfallenden Technologielizenzkosten²⁸) der **technischen Ausrüstung** auch die Kosten ihrer **Integration** in die Fahrzeuge. Folgekosten ergeben sich aus den Energieverbräuchen sowie aus der Hard- und Softwarewartung (Reparaturen, Tests und Updates etc.). Sollte die Nutzungsdauer des Fahrzeugs diejenige der OBU überschreiten, fallen zudem Kosten für **Ersatzinvestitionen** an. Die Automobilindustrie geht heute aber davon aus, dass dies eher der Ausnahmefall sein wird. Des Weiteren fallen bei Backend-V2X und evtl. auch im Mode-3 bei Cellular-V2X für die Nutzer **Datenkommunikationskosten** an, die es bei der WLAN-V2X-Variante und im Mode-4 bei Cellular-V2X nicht geben wird.

Ob im Mode-3 tatsächlich direkte Datenkommunikationskosten anfallen werden, hängt von der künftigen Ausgestaltung der Frequenzregulierung und -nutzung ab. Sollte die gesamte Cellular-V2X-Kommunikation im dedizierten 5,9-GHz-Frequenzband für

²⁵ Es ist dabei sowohl denkbar, dass die Backend-V2X-Komponenten – wie am Anfang zu erwarten – ein separates Kommunikationsmodul im Fahrzeug darstellen werden als auch, dass sie zukünftig in einer hybriden OBU integriert sein werden, was Kostenvorteile nach sich zieht.

²⁶ WLAN- und Cellular-V2X erfordern Antennen, die für das 5,9-GHz-Frequenzband geeignet sind und sich von solchen für Backend-V2X unterscheiden.

²⁷ Die Hardwarekosten setzen sich aus den Material-, Fertigungs- und Vertriebskosten sowie der Herstellermarge bzw. Handelsspanne zusammen. Softwarekosten sind Kosten für eigene Entwicklungsarbeiten oder Softwarelizenzen sowie für die Softwareinstallation und -konfiguration.

²⁸ z. B. für Chipsätze oder Chipsatzarchitekturen

Intelligente Verkehrssysteme (und nicht zumindest teilweise auch im lizenzierten Spektrum eines Mobilfunknetzbetreibers) stattfinden, so wäre es möglich, dass weder den Fahrzeughaltern bzw. -nutzern noch den OEMs Kommunikationskosten in Rechnung gestellt werden. Entsprechende Regelungen würden vorsehen, dass dieses Band technologieneutral für im Allgemeininteresse liegende (und als solche wohldefinierte) Sicherheits- und Effizienz Anwendungen des Verkehrs reserviert ist und dass die Mode-3-Leistungen der Netzbetreiber – das effiziente Ressourcenmanagement für solche Anwendungen – über alternative Vergütungsformen durch die Gesellschaft als Ganzes entgolten werden²⁹.

Die Stakeholder, welche abgesehen von diesem speziellen Kostenbestandteil grundsätzlich für die OBU-Kosten aufkommen werden, sind die verschiedenen privaten und institutionellen Verkehrsteilnehmer, welche Fahrzeuge halten oder Fahrzeugflotten betreiben. Zudem ist denkbar und plausibel, dass in einer Anfangsphase, in welcher der Fahrzeugbestand noch nicht einen für spürbare Nutzen auf Seiten der Anwender nötigen Mindestausstattungsgrad erreicht hat, die Erstausstattungskosten von den Fahrzeugherstellern ohne (vollständige) Weitergabe der Kosten an die Fahrzeugkäufer getragen werden.

7.1.2 Roadside Equipment

Das Roadside Equipment umfasst im Kern die im öffentlichen Verkehrsraum als stationäre oder quasi-stationäre Kommunikationsknoten integrierten Roadside Units (RSUs), die als infrastrukturseitiges Pendant zu den OBUs für die V2I-Kommunikation dienen³⁰. RSUs können grundsätzlich, wie die OBUs, mit unterschiedlichen Technologievarianten – **WLAN-V2X, Cellular-V2X, Backend-V2X** oder Kombinationen von diesen – ausgestattet sein. Des Weiteren können sie, wie bereits in Abschnitt 5 ausgeführt wurde, als Teilnehmerendgeräte in das Mobilfunknetz eingebunden werden (UE-type RSU) oder Bestandteil des Mobile Network Equipment (BS-type RSU) sein. Die potentiellen Standorte von RSUs im Verkehrssystem sind prinzipiell nicht auf spezifische Umgebungen begrenzt – sie können als Relayknoten überall die Aufgabe der Weiterleitung von V2X-Nachrichten an weiter entfernte Kommunikationspartner übernehmen. Es macht jedoch Sinn, RSUs vor allem dort einzusetzen, wo ein Informationsaustausch und Interaktionen mit verkehrstechnischen Einrichtungen, wie Lichtsignal- und Verkehrsbeeinflussungsanlagen, realisiert werden können bzw. generell an wichtigen Strecken und Knoten des Straßenverkehrsnetzes mit sehr hohen Verkehrsflüssen und Konfliktpotentialen. Hierbei sollte im Sinne der Kosteneffizienz darauf geachtet werden, dass diese mit der Verkehrstechnik verbundenen RSUs auch Relayfunktionen erfüllen und demgemäß zur Verbreitung zusätzlicher V2X-Nachrichten beitragen. Eine Sonderform stellen portable RSUs dar, die vor allem für Baustellensituationen sinnvoll sind und dort in die Engstellensignalisierer bzw. Stauwarntafeln integriert werden können. Sie können nur drahtlos mit einem Backend kommunizieren und benötigen eine netzunabhängige Energieversorgung.

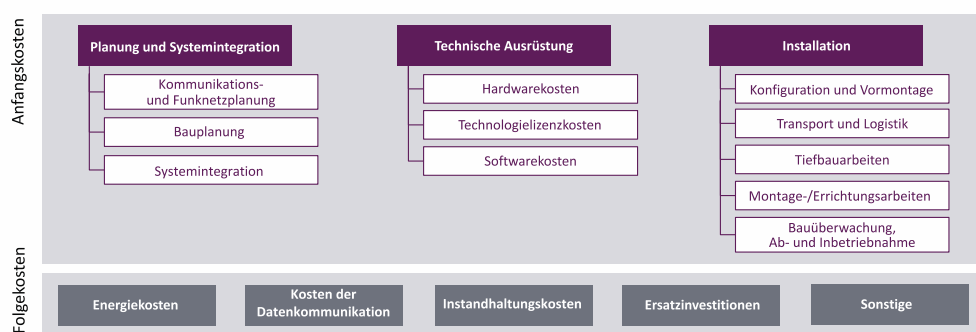
²⁹ Dies könnten z. B. öffentlich finanzierte Entgelte für das Ressourcenmanagement in diesem Frequenzband oder vergünstigte Frequenzuteilungen für mobile Breitbandnetze gekoppelt an Versorgungsaufgaben bzgl. der Cellular-V2X-Infrastruktur sein.

³⁰ In einer sehr weiten Begriffsabgrenzung kann aufgrund ihrer funktionalen Nähe auch die klassische verkehrstechnische Infrastruktur, wie Lichtsignalanlagen, Kameras und Induktionsschleifen, zum Roadside Equipment gezählt werden. Ebenso wären zusätzliche und optionale Hilfseinrichtungen, wie z. B. GNSS-Referenzstationen darunter zu zählen. Von deren Betrachtung wird hier aber abgesehen.

Die RSU-Bestandteile bestehen (analog zur OBU) aus technologiespezifischen Kommunikationsmodulen und -schnittstellen und einer übergeordneten Steuerung. Während OBUs an fahrzeuginterne Kommunikationsnetze (z. B. CAN-Bus, Ethernet) angebunden sind, benötigen RSUs eine für ihre Einsatzzwecke ausreichende **Backhaul-Anbindung** (z. B. über Glasfaser oder vorgeschaltete Richt- oder Mobilfunkverbindungen³¹), damit zumindest das Verkehrsmanagement von den RSUs profitieren kann, sowie im Falle der Verknüpfung mit verkehrstechnischen Anlagen geeignete Schnittstellen(module) zu deren Steuereinheiten (z. B. OCIT für Lichtsignalanlagen). Oft werden auch Upgrades der bestehenden Backhaul-Anbindung (z. B. der Glasfasernetze) selbst erforderlich sein. Auch wenn die RSU-Anbindung entsprechende Ausbaubedarfe auslöst, sind diese nicht vollständig den Kosten des Roadside Equipment zuzurechnen, da es sich meist um universell nutzbare Basisinfrastrukturen handelt, von denen auch viele andere (nicht-V2X-bezogene) Anwendungen profitieren. Optionaler Bestandteil von „smarten“ RSUs könnten zudem weitere Netzwerk-, Rechen- und Speicherkomponenten sowie die zugehörige Software sein, um Edge-Computing-Funktionalitäten zu ermöglichen und latenzkritische V2X-Applikationen in einer **Roadside Cloud** laufen zu lassen. Es ist heute aber noch nicht absehbar, ob und in welchem Umfang derart ausgestattete RSUs Bedeutung erlangen werden.

Abbildung 19

Primäre Kostenblöcke des Roadside Equipments



Die Einbindungsaktivitäten von RSUs in das Gesamtsystem sind deutlich komplexer als die Fahrzeugintegration von OBUs. Daher setzen sich ihre Anfangskosten neben dem Bereich der technischen Ausrüstung, welcher vergleichbare Kostenbestandteile wie bei den OBUs umfasst, aus zwei weiteren größeren Kostenblöcken zusammen (siehe Abbildung 19). Diese resultieren zum einen aus Planungs- und Systemintegrationsaktivitäten. Dazu gehören:

- die Kommunikations- und Funknetzplanung für den konkreten Standort bzw. den Systemverbund mit benachbarten RSUs (inklusive der ggf. erforderlichen Geodaterhebung, Simulationen und Messungen),
- die Bauplanung (inklusive der Genehmigungs- und Ausführungsplanung sowie ggf. Vergabeprozesse und Vorkehrungen für die Verkehrsregelung während der Bauzeit) sofern größere bauliche Maßnahmen erforderlich sind und
- Aktivitäten für die logische Einbindung der RSU in ihr Backend bzw. in die Verkehrssteuerung (Netzwerkeinrichtung etc.).

Zum anderen sind die physischen Installationsaktivitäten von großer Bedeutung. Sie variieren in Art und Umfang sehr stark, je nach den standortspezifisch bereits vorhandenen

³¹ Es ist damit zu rechnen, dass Backend-V2X oft die praktikabelste Lösung für die Backhaul-Anbindung von RSUs sein wird, wenn noch kein ausreichender Zugang zu leitungsgebundenen Netzen existiert.

Möglichkeiten der Infrastrukturanbindung (z. B. bezüglich Strom- und Glasfasernetz oder den vorhandenen Schnittstellen zu zentralen Verkehrsrechnern) und umfassen:

- die Konfiguration und Vormontage von RSU-Komponenten,
- Transport- und Logistikprozesse zum Bestimmungsort,
- ggf. erforderliche Tiefbauarbeiten, welche als besonders kostenintensive Tätigkeiten die Anfangskosten sehr stark in die Höhe treiben können,
- Montage- bzw. Errichtungsarbeiten am Bestimmungsort sowie
- die Bauüberwachung und die abschließende Ab- und Inbetriebnahme der RSU.

Bei portablen RSUs fallen bei jeder Neupositionierung einzelne Bestandteile dieser Arbeiten im laufenden Betrieb erneut an. Ansonsten setzen sich die Folgekosten von RSUs typischerweise aus Energiekosten, Instandhaltungskosten (für die Inspektion, Wartung und kleine Instandsetzungen), Ersatzinvestitionen nach dem Erreichen ihrer Nutzungsdauer, Kosten der Datenkommunikation (sofern entsprechende Mobilfunkdienste im kostenpflichtigen Spektrum genutzt werden) und sonstigen Betriebskosten³² zusammen.

Beim Subsystem des Roadside Equipments herrscht heute die größte Unsicherheit darüber, welche Stakeholder für die Finanzierung der anfallenden Kosten aufkommen können und werden. Für eine Wahrnehmung durch öffentliche Aufgabenträger sprechen vor allem sein Infrastrukturcharakter bzw. die funktionelle Nähe zu schon existierenden Verkehrstelematikanlagen und der gesamtgesellschaftliche Nutzen in den Bereichen der Verkehrssicherheit und -effizienz. Andererseits ist die öffentliche Finanzierung derartiger Infrastrukturen noch weitgehend ungeklärt und es entstehen auch auf individueller Seite (Kraftstoffersparnis, Zeit- und Komfortgewinne) und ggf. für private Kommunikationsnetzbetreiber (im Sinne neuer Geschäftsfelder) Vorteile, die ein Nachdenken über Möglichkeiten ihrer Beteiligung an der RSU-Infrastrukturfinanzierung sinnvoll erscheinen lassen. Abschnitt 8 wird sich ausführlicher diesen Fragestellungen widmen.

7.1.3 Central ITS³³ Resources

Neben der Vielzahl von mobilen, portablen und stationären V2X-Kommunikationsknoten, die dezentral verteilt im Verkehrsraum miteinander kommunizieren, werden auch zentrale Ressourcen benötigt, um Intelligente Verkehrssysteme zu verwirklichen. Als zentrale und zugleich begrenzte Ressource kann z. B. auch das **Frequenzspektrum** angesehen werden. Falls es sich hier um kostenpflichtiges lizenziertes Spektrum handelt, sind die entsprechenden Lizenzkosten jedoch bereits in den Datenkommunikationskosten genutzter Mobilfunkdienste enthalten (vgl. 7.1.1 und 7.1.2).

Potentielle **V2N-Backends** können je nach Anwendungsklasse sehr vielgestaltig sein und existieren bereits in einem beträchtlichen Umfang für die heute schon genutzten Applikationen, die auf Backend-V2X-Kommunikation zurückgreifen (z. B. bei Kartendiensten, Automobilherstellern, Mobilitätsplattformen und sonstigen Content- und Service-Providern). Diese können zu einem großen Anteil auch für neuartige Anwendungen weitergenutzt werden. Auch wenn die zunehmende Verbreitung neuer V2X-Dienste sicher sehr umfangreiche Investitionsbedarfe für den weiteren Ausbau dieser zentralen V2N-Backends bei den jeweils relevanten privaten Stakeholdern nach sich ziehen wird, so sollen diese außerhalb der vorliegenden Betrachtung bleiben.

³² Z. B. Software-Updates, Standortmieten und Backhaul-Pacht.

³³ Intelligent Transport System, international gebräuchlicher Begriff für Intelligentes Verkehrssystem (IVS).

Als wesentliche zentrale Teilsysteme sollen hier stattdessen vor allem **Verkehrsmanagementzentralen, Trust Center** und **anwendungsspezifische Zentralen** für neuartige Spezialapplikationen angesehen werden. Ein Beispiel für letztere könnten die Zentralen vollautomatisierter oder teleoperierter Bus- und Taxiflotten sein. Für solche heute noch nicht existierenden zentral gesteuerten bzw. unterstützten Dienste wird nur sehr bedingt auf schon bestehende Backend-Infrastrukturen zurückgegriffen werden können. Daher ist hier mit beträchtlichen Anfangskosten für die Systemrealisierung zu rechnen.

Verkehrsmanagementzentralen verfügen zwar bereits über umfangreiche Ressourcen, die auch für neuartige Verkehrssteuerungs- und Verkehrsbeeinflussungsmöglichkeiten mit RSUs und V2X-Technologien weiter genutzt werden können. Dennoch ist hier mit teilweise beachtlichen Neuinvestitionen und auch höheren Folgekosten zu rechnen. Insbesondere die Administration, Zuordnung und laufende Aktualisierung physischer und digitaler Komponenten der Verkehrstechnik und des Roadside Equipments wird nicht zu unterschätzende Aufwände verursachen. Sofern für bestimmte lokale Verkehrsräume noch keine Verkehrsmanagementzentralen existieren, könnten stattdessen auch separate RSU-Backends eingerichtet werden oder eine Einbindung in die Zentralen benachbarter Räume erfolgen.

Zudem sind für die Gewährleistung von Security- und Privacy-Anforderungen in der V2X-Kommunikation Vertrauensmodelle für gesendete bzw. empfangene Nachrichten und zugehörige Zertifizierungsinfrastrukturen erforderlich. Die damit verbundenen Aufgaben werden typischerweise in einem hierarchischen Vertrauensmodell von zentralisierten Trust Centern³⁴ wahrgenommen. Die Europäische Kommission hat hierzu im Rahmen von Phase 2 ihrer C-ITS-Plattform im Juni 2017 eine gemeinsame Zertifikatspolitik veröffentlicht, die technische, rechtliche und organisatorische Anforderungen definiert und in ihrer Konzeption auf einer aktiv verwalteten Public-Key-Infrastruktur (PKI) mit wechselnden Pseudonymen basiert [EC2017c]. Die wesentliche Rolle in diesem System nehmen auf der oberen Hierarchieebene mehrere verteilte Stammzertifizierungsstellen ein, die von öffentlichen oder privaten Institutionen auf Ebene der EU oder ihrer Mitgliedstaaten gebildet werden können und die in einem vom sog. Trust List Manager gepflegten europäischen Verzeichnis vertrauenswürdiger Stellen erfasst sind. Die Rolle des Trust List Managers und des sog. Central Point of Contact, der für eine staatenübergreifende und sichere Kommunikation mit den Stammzertifizierungsstellen sorgt, soll zunächst von der Europäischen Kommission als neutrale und unabhängige Instanz wahrgenommen werden. Daneben wird von ihr auch die Schaffung einer EU-weiten Stammzertifizierungsstelle als Initial- bzw. Rückfalllösung angestoßen. Entsprechende Infrastrukturen sollen bis 2019 vom Joint Research Centre der Kommission aufgebaut und mindestens bis 2021 finanziert und betrieben werden [EC2017a, EC2017c, EC2017d]. In Deutschland hat das BMVI das BSI³⁵ mit der Schaffung einer Pilot-PKI auf Basis des Sicherheitskonzeptes des C2C-CC beauftragt, die anschließend von der BAST³⁶ betrieben werden soll. Aus Skalierungsgründen wird es sinnvoll sein, die geographische Abdeckung von Stammzertifizierungsstellen mindestens national auszugestalten, wobei auch Clusterlösungen benachbarter

³⁴ Alternative Bezeichnungen für diese zentralen Entitäten sind auch Zertifizierungsstelle, „Trusted Third Party“, „Cooperative ITS Credentials Management System“ (CCMS) oder „Security Credential Management System“ (SCMS), wobei letztere Begriffe verdeutlichen, dass hierbei im Sinne einer Rollenverteilung auch mehrere (aber dennoch zentralisierte) Entitäten mitwirken.

³⁵ Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik

³⁶ Bundesanstalt für Straßenwesen

Länder oder eine gesamteuropäische Lösung langfristig realistische Optionen darstellen können.

Die kostenverursachenden Ressourcen und Prozesse der zentralen Einrichtungen sind sehr spezifisch. Auf einer abstrakten Ebene können jedoch übergreifende Kostenblöcke identifiziert werden, die bei allen von primärer Relevanz sind. Die Anfangskosten werden einerseits von Investitionen in neue Softwarelösungen und andererseits in benötigte zentrale Hardwareressourcen und Infrastrukturen geprägt sein. Folgekosten fallen demzufolge für die Softwarewartung und als Betriebskosten der Hardware und Infrastruktur (z. B. Energie- und Instandhaltungskosten, Ersatzinvestitionen, Mieten, Versicherungen, Kosten der Datenkommunikation) an. Ein beträchtlicher Anteil der Folgekosten wird jedoch auch von administrativen Kosten für die aktive Überwachung, Steuerung und Verwaltung der jeweiligen Basisdienste bzw. der darauf aufbauenden Anwendungen verursacht und bildet sich in entsprechenden Personalkosten ab.

Für die Finanzierung der entstehenden Mehrkosten von Verkehrsmanagementzentren werden weiterhin die bisherigen öffentlichen Baulastträger der Verkehrsinfrastruktur (i. d. R. die Städte, teilweise auch gebündelt auf Landesebene) verantwortlich sein. Die Sicherstellung von Security- und Privacy-Anforderungen bei der V2X-Kommunikation über ein Trust Center liegt ebenfalls im öffentlichen Interesse, sollte jedoch auf mindestens nationalstaatlicher Ebene erfolgen und europäisch harmonisiert stattfinden. Auch eine Beteiligung der Fahrzeughersteller an der Zertifizierungsinfrastruktur ist im Gespräch. Anwendungsspezifische Zentralen und sonstige V2N-Backends werden auch zukünftig hauptsächlich von privatwirtschaftlichen Stakeholdern (Content- und Service-Betreiber, Automobilhersteller etc.) betrieben und letztlich über Nutzungsgebühren von den Verkehrsteilnehmern oder über die wirtschaftliche Verwertung anfallender Daten refinanziert.

7.1.4 Mobile Network Equipment

Das Mobile Network Equipment stellt die technisch-infrastrukturelle Basis des öffentlichen zellularen Mobilfunks und damit auch die Grundlage für die Backend-V2X-Kommunikation und die Cellular-V2X-Kommunikation im Mode-3 dar. Je nach Netzbetreiber und betrachteter Mobilfunkgeneration ist heute deutschlandweit eine Netzabdeckung zwischen 80 und knapp 100 Prozent gegeben. Die dafür sorgende Ausrüstung in den Kern- und Zugangsnetzen kann vielfach für entsprechende V2X-Anwendungen weiter genutzt werden. Hinsichtlich der Anzahl an Basisstationen und deren **Backhaul-Anbindung** ist im Zuge der sich vollziehenden und weiter erwarteten Netzverdichtung zu immer kleinzelligeren Strukturen mit einem sehr großen Ausbaubedarf für die aktuelle und zukünftige Mobilfunkgenerationen zu rechnen. Dieser besteht aber grundsätzlich unabhängig von der V2X-Thematik, welche nur eines von unzähligen Anwendungsfeldern repräsentiert. Als relevant im Rahmen der vorliegenden Analyse erscheinen daher primär solche Basisstationen, welche die Funktion von mit verkehrstechnischen Anlagen interagierenden RSUs übernehmen, da solche Standorte bisher im Realbetrieb bisher nicht existieren und auch nicht ohne Eintreten eines entsprechenden Einführungsszenarios (C) realisiert werden. Ein wichtiger Faktor ist zudem die mit dem 5G-Architekturkonzept der Network Function Virtualization (NFV) einhergehende „Softwarisierung“, die es ermöglicht auch in den Basisstationen weitgehend auf Standardhardware zurückzugreifen und neue Funktionalitäten, wie die Sidelink-Kommunikation bei Cellular-V2X, allein über Remote-Updates in die Fläche zu bringen.

In modernen Zugangsnetzen sind die Funktionen der Basisstation (als wichtigstes Teilsystem des Mobile Network Equipments) entsprechend der C-RAN-Architektur in die **Baseband Unit** und mehrere **Radio Frontends** aufgeteilt. Diese Einheiten beinhalten jeweils infrastrukturelle³⁷ und systemtechnische³⁸ Komponenten. Das Radio Frontend ist zudem direkt mit der Antennentechnik verbunden. Insgesamt weisen die Basisstationen eine sehr hohe funktionelle aber auch strukturelle Ähnlichkeit mit den RSUs auf.³⁹ Dies führt dazu, dass ihre Anfangs- und Folgekosten in prinzipiell die gleichen Kostenblöcke (technische Ausrüstung, Planung und Systemintegration, Installation, Energie- und Instandhaltungskosten, Ersatzinvestitionen etc.) strukturiert werden können.

Zusatzbestandteil ausgewählter Basisstationen in 5G-Netzen werden ferner **Mobile Edge Clouds** sein, deren Netzwerk-, Rechen- und Speicherkomponenten es mit entsprechender Software ermöglichen, geeignete Anwendungen über Edge-Computing in einer nutzernahen Cloud auszuführen. Latenzkritische V2X-Applikationen wären hier eine sinnvolle Anwendungsklasse unter vielen. Welcher Anteil an Basisstationen künftig über Edge-Cloud-Funktionen verfügen wird, ist heute noch nicht seriös abschätzbar.

Die Bestandteile des Mobile Network Equipments und damit seine Finanzierung fallen typischerweise in den Aufgabenbereich der Mobilfunknetzbetreiber. Sollten RSU-Funktionalitäten für in öffentlichem Interesse stehende V2X-Applikationen (vor allem im Bereich der Verkehrssicherheit) künftig auch durch das Mobile Network Equipment wahrgenommen werden, so sind möglicherweise auch innovative Betreiber- und Finanzierungsmodelle in Betracht zu ziehen. Diese Frage wird in Abschnitt 8 aufgegriffen.

7.2 Verwendete Datenbasis, Annahmen und Inputgrößen der Berechnung

Aufgrund des langen Zeithorizonts wird für die Berechnungen auf die Kapitalwertmethode als allgemein anerkannte Methode dynamischer Investitionsrechnungen zurückgegriffen. Das bedeutet, dass im Folgenden unter dem Begriff „Kosten“ tatsächlich zahlungswirksame Größen (also eigentlich Auszahlungen) verstanden werden sollen und nicht der ergebnisbezogene Begriff der Kostenrechnung, bei welchem die Anschaffungskosten höherwertiger Güter über die Zeit verrechnet und als Abschreibungen berücksichtigt werden. Die Umsetzung der Kalkulationen erfolgte in einem für diese Untersuchung entwickelten Excel-Tool, welches auch im Nachgang des vorliegenden Konzepts genutzt und weiterentwickelt bzw. an veränderte Erwartungen bezüglich der getroffenen Annahmen angepasst werden kann.

In die nachfolgenden Beispielrechnungen sind Kostenannahmen aus einer Vielzahl einschlägiger Quellen eingeflossen (insbesondere [EC2016b], [FHWA2014] und [NHTS2017])⁴⁰, welche anschließend von den Projektpartnern und unter Einbeziehung externer Expertise verifiziert und an die Kostensystematik von 6.1 angepasst wurden. Obwohl quellenübergreifende Tendenzen dahingehend erkennbar sind, in welchen Bereichen sich die Niveaus einzelner Kostenbestandteile voraussichtlich bewegen werden, sind viele Größen mit einer sehr hohen Unsicherheit behaftet, weshalb die annahmenbasierten Ergebnisse in Abschnitt 7.4 mit Vorsicht zu interpretieren sind.

³⁷ Z. B. Tragwerke, Masten, Container, Elektroinstallationen, Kabelwege, Klimatechnik, Sicherheitstechnik.

³⁸ Z. B. Transceiver, Verstärker, Wandler, Splitter.

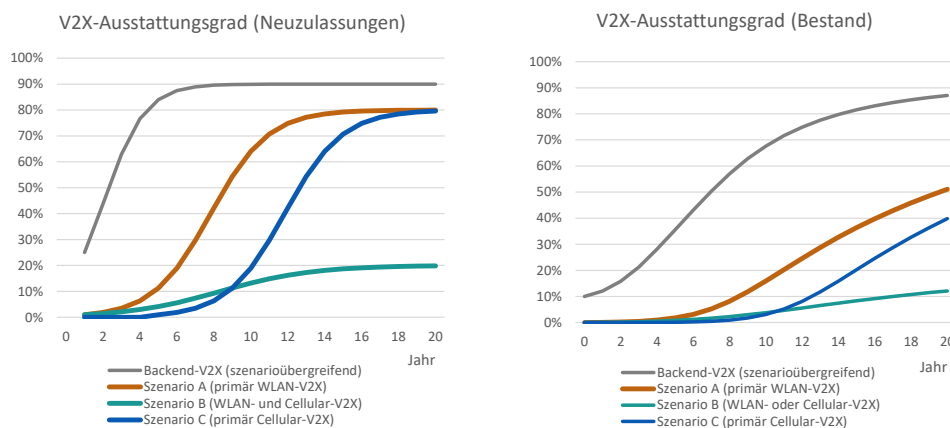
³⁹ Dabei ist die funktionelle Nähe besonders hoch zu den BS-type RSUs.

⁴⁰ Weitere zum Abgleich herangezogene Quellen sind [CTR2017], [FHWA2016], [GAO2015], [NHTS2014], [NIEB2014], [COBR2013], [RITA2012], [CVIS2010], [RITA2008] und [COD12008].

Die folgenden Beispielrechnungen werden für ausgewählte Subsysteme, die primär relevant sind und für die zum heutigen Zeitpunkt auch eine hinreichende Datenbasis zur Kostenseite verfügbar ist, für einen einheitlichen Betrachtungshorizont von 20 Jahren anhand des Fallbeispiels der Stadt Berlin vorgenommen. Dabei handelt es sich um das Onboard und das Roadside Equipment. Eine Teilmenge der getroffenen Annahmen (z. B. hinsichtlich Art und Umfang der Fahrzeug- und Infrastrukturausstattungen) wird dabei in Übereinstimmung mit den Hauptaussagen der drei betrachteten Einführungsszenarien szenariospezifisch unterschieden. Das Mobile Network Equipment ist, wie bereits dargestellt, nur bedingt relevant für die vorliegende Untersuchung. Die in Szenario C als V2X-Infrastruktur errichteten RSUs können jedoch als spezielle Netzknoten des Mobile Network Equipments aufgefasst werden. Zentrale ITS-Ressourcen, wie Trust Center für eine sichere und pseudonymisierte Kommunikation und die Ausbaubedarfe in Verkehrsmanagementzentralen stellen hinsichtlich der von Experten erwarteten Kostenumfänge in Relation zum Onboard und Roadside Equipment ebenfalls wichtige Systembestandteile dar. Eine valide Quantifizierung dieser Kosten erscheint zum jetzigen Zeitpunkt jedoch zumindest für die Zertifizierungsinfrastruktur kaum möglich, da u. a. auch die Größe der von einem Trust Center abgedeckten Verkehrsräume aus heutiger Sicht noch völlig offen ist (nationale, länderübergreifende oder europäische Lösung) und nicht auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden kann.⁴¹ Die Ausbaubedarfe in Verkehrsmanagementzentralen sind stark abhängig von den bereits vorhandenen Systemen und Technologien im betrachteten Verkehrsraum. Daher wird hierfür eine separate Untersuchung empfohlen. Allgemeine Untersuchungen lassen jedoch vermuten, dass diese Kosten in urbanen Räumen deutlich unterhalb derer für das Roadside Equipment liegen werden [EC2016b].

Generell ausgeklammert aus der nachfolgenden Kalkulation bleiben auch Datenkommunikationskosten, die für Komfortanwendungen im Auto (z. B. Mediendownloads und internetbasierte Streaming- und Cloud-Dienste) anfallen. Diese Anwendungen werden sich voraussichtlich in allen 3 Einführungsszenarien weit verbreiten und über Backend-V2X-Technologien und die dahinterstehenden (Mobilfunk-) Infrastrukturen abgewickelt. Sie können auch als Teil der allgemeinen mobilen Datenkommunikation aufgefasst werden, die sonst über Smartphones, Tablets usw. stattfindet.

Abbildung 20 Fahrzeugausstattungsgrade in den Einführungsszenarien



⁴¹ Ein Versuch der Quantifizierung der Kosten einer Zertifizierungsinfrastruktur für den US-amerikanischen Raum ist in [NHTS2017] zu finden.

Abbildung 20 veranschaulicht zunächst die getroffenen Annahmen hinsichtlich der Fahrzeugausstattungen in den verschiedenen Einführungszenarien⁴². Szenarioübergreifend wird davon ausgegangen, dass bereits innerhalb der nächsten 5 Jahre nahezu alle Neufahrzeuge kommunikationsfähig für Backend-V2X sein werden.⁴³ In Szenario A bzw. C werden zusätzlich jeweils primär WLAN-V2X- bzw. Cellular-V2X-Ausrüstungen entsprechend der braunen bzw. blauen Ausstattungskurve vorhanden sein. Weil Cellular-V2X noch nicht den Reifegrad von WLAN-V2X erreicht hat ist die blaue Kurve gegenüber der braunen nach rechts verschoben. Da Szenario B ein Zukunftsbild beschreibt, welches vor allem durch Backend-V2X-Kommunikation geprägt ist und in dem sich Technologievarianten der Direktkommunikation aufgrund ihrer Wechselwirkungen nur sehr eingeschränkt durchsetzen, bleibt die entsprechende Fahrzeugausstattung in diesem Szenario niedrig. Mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung werden sich die Neuausstattungen auch im Fahrzeugbestand widerspiegeln (siehe rechter Teil von Abbildung 20)⁴⁴. Die zentralen Annahmen für die Kalkulation der OBU-Kosten entsprechend der Fahrzeugausstattungsgrade im Zeitverlauf sind in Tabelle 11 ersichtlich.

Tabelle 11

Annahmen zu den Anfangs- und Folgekosten für OBUs

Fahrzeuge	
Pkw-Bestand Berlin	1.195.149
Neuzulassungen p. a.	8,00 %
Stilllegungen p. a.	7,00 %
jährliches Bestandswachstum	1,00 %
Onboard-Units für WLAN- und Cellular-V2X	
Anschaffungskosten (Erstausstattung)	200 €
durchschn. OBU-Datenvolumen pro Stunde Fahrzeit	20 MB
jährliches Datenvolumen OBU	6 GB
sonstige Betriebskosten OBU p. a.	15 €
Nutzungsdauer OBU	12 Jahre ⁴⁵

Die RSU-Kosten können ausstattungs- und vor allem standortspezifisch sehr stark variieren. Dies ist auch den sehr unterschiedlichen Voraussetzungen hinsichtlich vorhandener Anbindungsmöglichkeiten geschuldet. Daher wurden in der Kostenbetrachtung für die RSUs neben einem Basiswert, welcher einem Durchschnittswert entspricht, auch obere und untere Werte für teurere und günstigere Varianten der einzelnen Kostenpositionen berücksichtigt (vgl. Tabelle 12).

⁴² Die einzelnen Hochlaufkurven wurden mit Hilfe logistischer Wachstumsfunktionen mit unterschiedlichen Startzeitpunkten, Sättigungsgrenzen und Proportionalitätskonstanten modelliert.

⁴³ Die eCall-Pflicht für Neuwagen ab dem 1. April 2018 wird ein weiterer treibender Impuls für diese Entwicklung sein. Viele Hersteller werden dabei gleich Technologien der aktuellen Mobilfunkgenerationen einsetzen. Zudem wurden in einem gewissen Umfang Nachrüstungen für Backend-V2X angenommen, was sich in einem schneller steigenden Ausstattungsgrad des Bestandes widerspiegelt.

⁴⁴ Für die Backend-V2X-Ausstattung im Fahrzeugbestand wurden zusätzlich Nachrüstungen berücksichtigt, die mit dem Zeitverlauf auf bis zu 25 % der noch nicht ausgestatteten Fahrzeuge ansteigen, da davon ausgegangen wird, dass entsprechende Aftermarket-Lösungen einfach umsetzbar sind und von sich etablierenden Schlüsselanwendungen getrieben werden.

⁴⁵ Entspricht der Fahrzeugnutzungsdauer.

Tabelle 12 Annahmen zu den Anfangs- und Folgekosten für RSUs

WLAN- bzw. Cellular-V2X- Infrastrukturkosten	unterer Wert (günstige Variante)	Basiswert	oberer Wert (teure Variante)
Technische Ausrüstung	3.000 €	4.500 €	6.000 €
Installation	1.000 €	3.000 €	5.000 €
Netzplanung und Systemintegration	1.000 €	1.500 €	2.000 €
Anfangskosten	5.000 €	9.000 €	13.000 €
Instandhaltungskosten in % der Ausstattungskosten	5,00 %	7,50 %	10,00 %
regelmäßige Instandhaltungskosten inkl. (Softwarewartung)	150,00 €	337,50 €	600,00 €
Energieverbrauch	20 W	40 W	60 W
Energiekosten	26,28 €	52,56 €	78,84 €
sonstige Betriebskosten (IT-Sicherheit, Firmware-Updates, Pacht etc.)	150 €	250 €	350 €
Folgekosten	326,28 €	640,06 €	1028,84 €
Nutzungsdauer bis Ersatz	20 Jahre	15 Jahre	10 Jahre
Kostenabschlag Installation und Netzplanung bei Ersatzinvestition	20 %	20 %	20 %

Die auf diese Weise bestimmten Extremwerte der Gesamtkosten spannen letztlich einen Trichter auf, innerhalb dessen die tatsächlichen Kosten eines Referenzgebietes mit standortspezifisch unterschiedlichen Voraussetzungen einer mit hoher Wahrscheinlichkeit liegen werden. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 7.4 entsprechend hervorgehoben. Weitere Annahmen für die Berechnung sind direkt im Excel-Berechnungstool nachvollziehbar.

7.3 Fallstudie Berlin: Quantifizierung potenzieller Infrastrukturbedarfe

Bezüglich der Entscheidung einer Stadt vor dem Hintergrund verschiedener denkbarer Einführungsszenarien RSU-Infrastrukturen auszurollen, sind an dieser Stelle plausible Annahmen zu treffen. Die nachfolgenden Zahlen und Kalkulationen beziehen sich auf die Stadt Berlin als repräsentatives Beispiel eines hochurbanen Verkehrsraumes.

Die hierfür angenommenen Inputgrößen der Kalkulation sind in der Tabelle 13 überblicksmäßig dargestellt.

Tabelle 13 Annahmen zum Infrastruktur-Rollout in den Einführungsszenarien

Szenariospezifische Annahmen	Szenario A	Szenario B	Szenario C
Beginn Rollout in t=	0	0	5
Dauer Rollout	10 Jahre	10 Jahre	10 Jahre
Kostendegression technische Ausrüstung bis t=20	50 %	20 %	50 %
Anteil der RSU-Kommunikation im kostenpflichtigen Spektrum (Mobilfunk)	30 %	40 %	50 %

Szenariospezifische Annahmen	Szenario A	Szenario B	Szenario C
RSU-Anzahl			
Lichtsignalanlagen	2.200	200	2.200
Portable Baustellenanlagen (Engstellensignalisierer und Stauwarntafeln)	300	30	300
(Stadt-)Autobahnknotenpunkte	27	27	27
(Stadt-)Autobahnanschlusstellen	50	0	50
Verkehrsbeeinflussungsanlagen	5	9	5
große Kreisverkehre	10	0	10
sonstige (z. B. Lückenschließer/Repeater)	400	0	0
Summe RSU-Anzahl	2.992	266	2.592
entspricht einer Dichte von 1 RSU alle ...	1,80 km	20,30 km	2,08 km

In Szenario A, das auch als eine Art Maximallösung des Infrastruktur-Rollouts verstanden werden kann, werden annahmegemäß für die hier dominante WLAN-V2X-Technologie extensive Roadside-Infrastrukturen errichtet. Dies umfasst neben allen Lichtsignalanlagen und portablen Baustellenanlagen im Stadtgebiet auch sonstige potentielle RSU-Standorte von Relevanz und eine gewisse Anzahl von „Lückenschließern“, um eine ausreichende Verbreitung von sicherheitsrelevanten WLAN-V2X-Nachrichten in der Stadt sicherzustellen. Die daraus resultierende Dichte von 1 RSU alle 1,8 km entspricht noch in etwa in der Literatur für den Infrastrukturbedarf angesetzten Werten⁴⁶, wobei hier oftmals auch sehr viel höhere RSU-Dichten angenommen werden, welche die Bearbeiter der vorliegenden Analyse sowie die befragten Experten aber für unrealistisch und nicht umsetzbar halten. Im Szenario C werden keine zusätzlichen RSUs als „Lückenschließer“ benötigt, da zu diesem Zweck, die bereits existierenden Mobilfunkbasisstationen genutzt werden können.⁴⁷ In Szenario B erfolgt ein RSU-Rollout im Einklang mit der Szenariobeschreibung nur an wenigen ausgewählten Verkehrsschwerpunkten.

Über die tatsächlich in Frage kommenden RSU-Standorte in Berlin und die vor Ort bestehenden Ausstattungsbedarfe und Anbindungsmöglichkeiten sollen im Rahmen dieser eher makroskopischen Erstanalyse keine Aussagen getroffen werden. Hierzu können später in Abstimmung mit der Entwicklung einer Gesamtstrategie für die V2X-Positionierung der Stadt (vgl. dazu auch Abschnitt 9) Detailuntersuchungen angestellt werden, welche die verkehrlichen Notwendigkeiten und die infrastrukturellen Gegebenheiten auf der mikroskopischen Ebene genauer erfassen und bewerten.

7.4 Ergebnisse der Kostenanalyse

7.4.1 Szenario A

In der Beispielkalkulation für Szenario A wird im Stadtgebiet mit den am Markt verfügbaren Technologien, beginnend ab $t=0$ und über zehn Jahre hinweg, eine umfangreiche

⁴⁶ Vgl. [FHWA2016], [EC2016b]. Der errechnete Wert basiert auf einer Länge des Berliner Straßennetzes in Höhe von 5.400 km.

⁴⁷ Zumindest im urbanen Umfeld mit sehr hohen Netzdichten kann von dieser Grundannahme ausgegangen werden. Anders kann es im ländlichen Straßennetz in dünn besiedelten Gebieten aussehen.

WLAN-V2X-Infrastruktur errichtet. Diese Infrastruktur wird entsprechend der Markthochlaufkurve von WLAN-V2X-Ausstattungen in zunehmendem Maße von entsprechend ausgerüsteten Fahrzeugen genutzt.

Abbildung 21 jährliche OBU- und RSU-Gesamtkosten in Szenario A

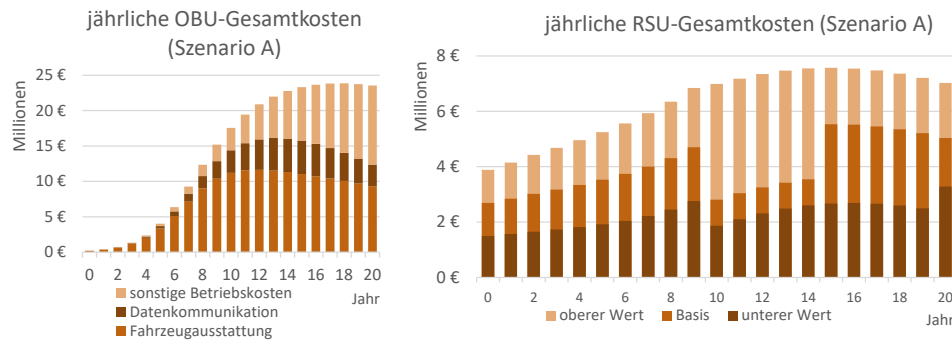


Abbildung 21 stellt die dabei für die beiden in der Kalkulation berücksichtigten Subsysteme anfallenden jährlichen Systemkosten im Zeitverlauf dar. Diskontiert und kumuliert über den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren resultiert daraus auf Seiten des **Onboard Equipment** ein Kostenbarwert von ca. 240 Mio. € für die bis dahin knapp 750.000 mit WLAN-V2X ausgestatteten Fahrzeuge im Stadtgebiet. Während in den Anfangsjahren die Kosten der Erstausstattungen dominieren, fallen in den Folgejahren zunehmend die laufenden Betriebskosten der OBUs des bereits ausgestatteten Fahrzeugbestandes ins Gewicht.

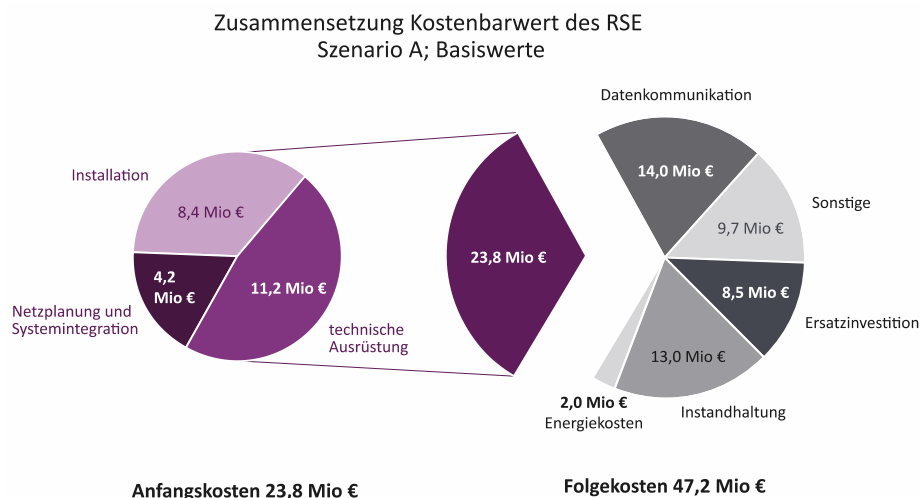
Auf der rechten Seite von Abbildung 21 ist das mit den in Abschnitt 7.2 beschriebenen Extremwerten⁴⁸ aufgespannte Spektrum der jährlichen Kosten des **Roadside Equipment** zu erkennen. Die mittleren Säulenwerte im Diagramm („Basis“) entsprechen dabei den jährlichen Kosten – basierend auf den jeweiligen Durchschnitten zwischen dem oberen und dem unteren Wert der betroffenen Inputgrößen.⁴⁹ Die diskontierten jährlichen Werte summieren sich über 20 Jahre auf einen Kostenbarwert von ca. 40 Mio. € (unterer Wert) bzw. 71 Mio. € (Basiswert) bzw. 113 Mio. € (oberer Wert). In diesem doch sehr breiten Wertebereich werden die voraussichtlichen Gesamtkosten für die hier angenommene Infrastruktur, bestehend aus knapp 3.000 RSUs voraussichtlich liegen, sofern die heue verfügbaren Kostenschätzungen zutreffen. Da in den beiden Extremvarianten die jeweils besten bzw. schlechtesten Werte mehrerer Inputgrößen kombiniert wurden, sind diese weniger wahrscheinlich als die dazwischenliegende Basisvariante.

Die strukturelle Zusammensetzung des Kostenbarwerts des Roadside Equipment ist für die Basisvariante in Abbildung 22 visualisiert.

⁴⁸ Vgl. dazu nochmals die Spalten „unterer Wert“ und „oberer Wert“ in Tabelle 12

⁴⁹ Zu beachten ist, dass es sich beim rechten Teil von Abbildung 21 um eine gruppierte (und nicht wie im linken Teil um eine gestapelte) Säulendarstellung handelt. Beispiel: In t=20 beträgt der untere Wert ca. 3,3 Mio. €, der Basiswert ca. 5 Mio. € und der obere Wert ca. 7 Mio. €.

Abbildung 22 Zusammensetzung des RSU-Kostenbarwerts in Szenario A



Die Folgekosten machen ca. zwei Drittel der Gesamtkosten des Roadside Equipment über 20 Jahre aus und werden im Wesentlichen (und in etwa in gleichen Größenordnungen) von Datenkommunikations-, Instandhaltungs-, Ersatzinvestitions- und sonstigen Betriebskosten bestimmt. Bei den ca. ein Drittel der Gesamtkosten ausmachenden Anfangskosten dominieren zu fast der Hälfte die Kosten der technischen Ausrüstung, gefolgt von den Installations- und schließlich den Planungs- und Integrationskosten. Datenkommunikationskosten fallen für das Roadside Equipment auch im WLAN-V2X-Szenario an, da davon ausgegangen wurde, dass aufgrund unzureichender sonstiger Anbindungsmöglichkeiten an das RSU-Backend vielfach auf Backend-V2X-Lösungen zurückgegriffen werden muss.⁵⁰

7.4.2 Szenario B

In der Beispielkalkulation für Einführungsszenario B werden, passend zur Technologieverbreitung in diesem Szenario, lediglich an ausgewählten Verkehrsschwerpunkten im Stadtgebiet RSUs errichtet, die langfristig auch einen wesentlich geringeren mit WLAN- bzw. Cellular-V2X ausgestatteten Fahrzeugbestand erreichen können (vgl. Abbildung 20). Der Infrastrukturaufbau erfolgt annahmegemäß wieder schrittweise über 10 Jahre und zunächst ausschließlich mit der heute bereits verfügbaren Technologie (WLAN-V2X).

⁵⁰ Vgl. dazu nochmals die Annahmen in Tabelle 13.

Abbildung 23 jährliche OBU- und RSU-Gesamtkosten in Szenario B

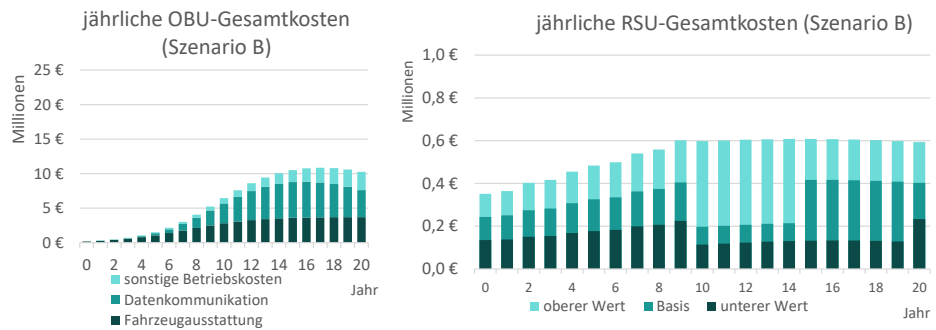
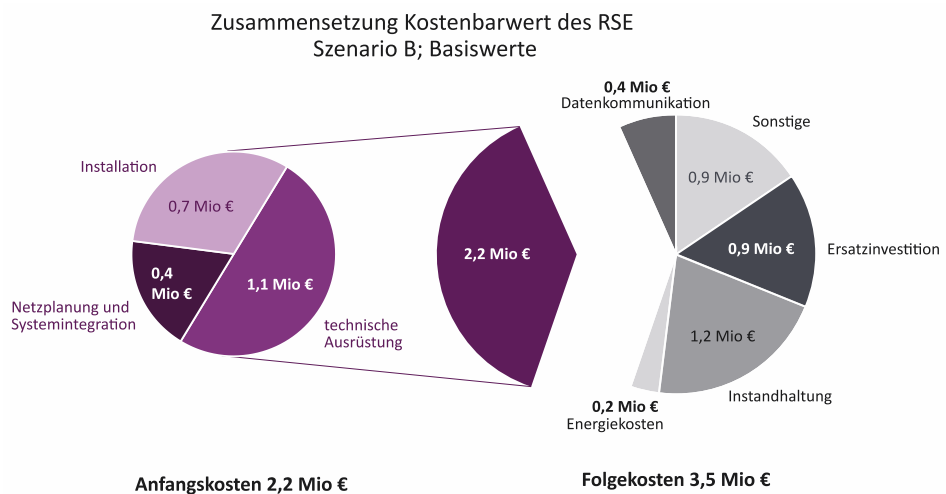


Abbildung 23 stellt wieder die anfallenden jährlichen Systemkosten im Zeitverlauf für die beiden betrachteten Subsysteme dar. Für das Onboard Equipment ergibt sich auf Basis der diskontierten jährlichen Werte über 20 Jahre ein kumulierter Kostenbarwert von ca. 100 Mio. €. Am Ende des Betrachtungszeitraumes sind ca. 175.000 Fahrzeuge im Stadtgebiet mit WLAN-V2X oder Cellular-V2X ausgestattet. Hinzu kommen gut 1 Mio. Fahrzeuge, die bis dahin lediglich über Backend-V2X-Konnektivität verfügen. Mit der langfristigen Weiterentwicklung von Backend-V2X in Szenario B nutzen diese Fahrzeuge die Technologie auch zunehmend für die in der Kalkulation betrachteten Verkehrssicherheits- und Verkehrseffizienz- anwendungen. Da bei dieser Technologie generell Datenkommunikationskosten anfallen, ist deren Anteil an den gesamten OBU-Kosten auch höher als bei Szenario A (siehe linker Teil von Abbildung 23)

Die jährlichen Kosten des Roadside Equipment sind – in dem von den unteren und oberen Inputwerten der RSU-Kosten aufgespannten Spektrum – auf der rechten Seite von Abbildung 23 zu erkennen. Die diskontierten jährlichen Werte summieren sich über 20 Jahre auf einen Kostenbarwert von ca. 2,8 Mio. € (unterer Wert) bzw. 5,7 Mio. € (Basiswert) bzw. 9,6 Mio. € (oberer Wert). Damit bleiben die RSU-Kosten entsprechend der geringen Infrastrukturausstattung (266 RSUs) sehr moderat. Die strukturelle Zusammensetzung des Kostenbarwerts des Roadside Equipment ist für die Basisvariante in Abbildung 24 visualisiert.

Abbildung 24 Zusammensetzung des RSU-Kostenbarwerts in Szenario B



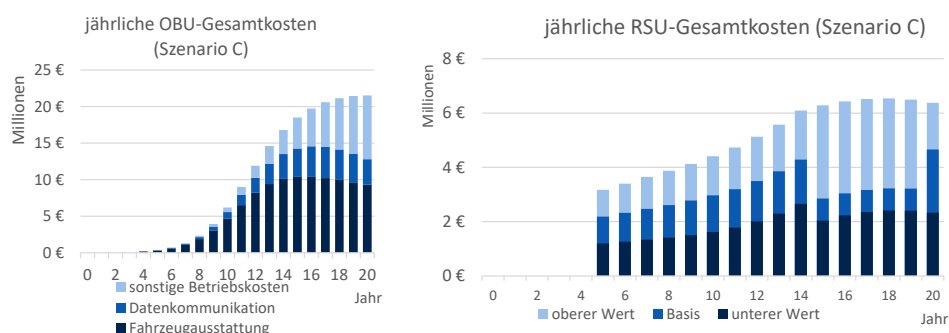
Die Folgekosten machen knapp zwei Drittel der Gesamtkosten des Roadside Equipment über 20 Jahre aus und werden im Wesentlichen (und in etwa in gleichen Größenordnungen) von Instandhaltungs-, Ersatzinvestitions- und sonstigen Betriebskosten bestimmt. Die Datenkommunikationskosten der RSUs (für deren teilweise über Backend-V2X-Lösungen realisierte Anbindung an das Backend) bleiben in Szenario B vergleichsweise niedrig, da deutlich weniger Fahrzeuge mit den RSUs kommunizieren können und damit auch der Datenkommunikationsbedarf zum Backend insgesamt geringer ausfällt. Bei den gut ein Drittel der Gesamtkosten ausmachenden Anfangskosten dominieren mit etwa 50 Prozent die Kosten der technischen Ausrüstung, gefolgt von den Installations- und schließlich den Planungs- und Integrationskosten.

7.4.3 Szenario C

In der Beispielkalkulation für Szenario C wurde der Aufbau einer ähnlich umfangreichen RSU-Infrastruktur wie bei Szenario A angenommen (vgl. Tabelle 13), die alle wesentlichen Verkehrsknotenpunkte abdeckt. Da in diesem Szenario auf Cellular-V2X-Technologien abgestellt wird, sind jedoch im Gegensatz zu Szenario A keine zusätzlichen RSUs als „Lückenschließer“ erforderlich. Diese Funktion übernehmen die bereits existierenden Mobilfunkbasisstationen. Ein weiterer Unterschied zu den vorangegangenen Szenarien besteht zudem darin, dass aufgrund der heute noch fehlenden Technologieverfügbarkeit von Cellular-V2X erst mit einem zeitlichen Verzug von ca. 5 Jahren mit dem Aufbau des Roadside Equipment begonnen werden kann. Dieser erfolgt dann annahmegemäß wieder über eine Rollout-Periode von 10 Jahren.

Diese Infrastruktur wird entsprechend der Markthochlaufkurve von WLAN-V2X-Ausstattungen in zunehmendem Maße von entsprechend ausgerüsteten Fahrzeugen genutzt.

Abbildung 25 jährliche OBU- und RSU-Gesamtkosten in Szenario C



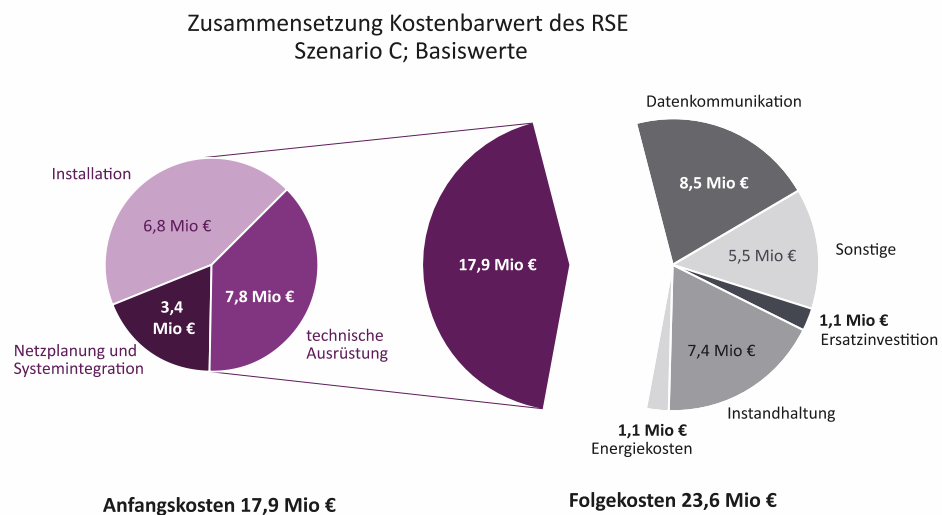
In Abbildung 25 sind die jährlichen Gesamtkosten im Zeitverlauf für das OBU- bzw. das RSU-Subsystem ersichtlich. Diskontiert und kumuliert über den Betrachtungszeitraum ergibt sich daraus für das Onboard Equipment ein Kostenbarwert von ca. 150 Mio. € für die bis dahin knapp 600.000 mit Cellular-V2X ausgestatteten Fahrzeuge im Stadtgebiet. Während in den Anfangsjahren die Kosten der Erstausrüstungen dominieren, fallen in den Folgejahren zunehmend die laufenden Betriebskosten der OBUs des bereits ausgestatteten Fahrzeugbestandes ins Gewicht.

Auf rechten Seite von Abbildung 25 sind wieder die jährlichen Kosten des Roadside Equipment in den drei aufgespannten Varianten zu erkennen. Ihre diskontierten jährlichen

Werte summieren sich über den Betrachtungszeitraum auf einen Kostenbarwert von ca. 25 Mio. € (unterer Wert) bzw. 41 Mio. € (Basiswert) bzw. 68 Mio. € (oberer Wert). Die Barwertdifferenzen zu Szenario A sind hauptsächlich auf den späteren Beginn der Infrastrukturerrichtung (und die Vernachlässigung der Kosten, die nach Ende des fixen Betrachtungszeitraumes anfallen) sowie auf die etwas geringere Anzahl an RSUs in Szenario C zurückzuführen. Die strukturelle Zusammensetzung des Kostenbarwerts des Roadside Equipment ist für die Basisvariante in Abbildung 26 visualisiert.

Die Folgekosten machen gut die Hälfte der Gesamtkosten des Roadside Equipment über den Betrachtungszeitraum aus. Sie werden im Wesentlichen von den Datenkommunikations-, den Instandhaltungs- und den sonstigen Betriebskosten bestimmt. Die Datenkommunikationskosten nehmen annahmegemäß einen etwas größeren Umfang als bei WLAN-V2x-basierten RSUs ein (vgl. dazu die Diskussion in Abschnitt 7.1.1 zu Mode-3 und die Annahmen in Tabelle 13). Die Ersatzinvestitionen fallen gering aus, da sie aufgrund des späteren Infrastruktur-Rollouts weitgehend außerhalb des Betrachtungszeitraumes liegen. Bei den knapp die Hälfte der Gesamtkosten ausmachenden Anfangskosten dominieren mit etwa 40 % die Kosten der technischen Ausrüstung, gefolgt von den Installations- und schließlich den Planungs- und Integrationskosten.

Abbildung 26 Zusammensetzung des RSU-Kostenbarwerts in Szenario C

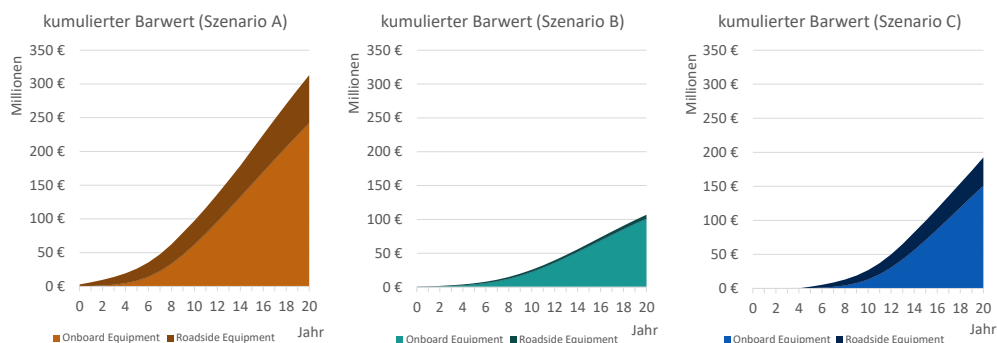


7.5 Gesamtbeurteilung und Abwägung mit den IVS-Nutzenpotenzialen

An dieser Stelle sollen die grundlegenden Erkenntnisse und die Berechnungsergebnisse der Kostenanalyse im Gesamtkontext beurteilt und vor dem Hintergrund der betrachteten Einführungsszenarien und der IVS-Nutzenpotenziale abgewogen werden. Eine hinreichend valide Datenbasis lag für die OBUs und die RSUs vor. Abbildung 27 stellt die kalkulierten Kostenbarwerte in den drei Szenarien noch einmal in einem gestapelten Flächendiagramm vergleichend gegenüber. Dabei wurde für das Roadside Equipment nur der Basiswert dargestellt.

Abbildung 27

Szenarienvergleich der OBU- und RSU-Kosten



Die Systemkosten des Onboard Equipment, die letztlich von den Fahrzeugnutzern zu tragen sind (vgl. Abschnitt 7.1.1), übersteigen in allen drei Einführungsszenarien deutlich die Systemkosten des Roadside Equipment, dessen Finanzierung zumindest teilweise in den öffentlichen Verantwortungsbereich fällt (vgl. Abschnitte 7.1.2 und 8). In den Szenarien A und C machen die OBU-Kosten etwas mehr als drei Viertel der hier kalkulierten Gesamtkosten und in Szenario B sogar ca. 95 % aus. Es ist jedoch zu beachten, dass zum Bereich der aus öffentlichen Mitteln (mit) zu finanzierenden V2X-Subsysteme auch die erforderlichen Anfangs- und Folgekosten zentraler ITS-Ressourcen – wie Trust Center oder Erweiterungen in Verkehrsmanagementzentralen – zählen, die in der vorliegenden Untersuchung aufgrund einer unzureichenden Datenbasis nicht quantifiziert werden konnten. Experteneinschätzungen zufolge können die Kosten für Zertifizierungsinfrastrukturen nicht zu unterschätzende und womöglich ähnliche Größenordnungen wie die für das Roadside Equipment erreichen. Trust Center werden voraussichtlich bei beiden Technologievarianten WLAN-V2X und Cellular-V2X in sehr ähnlicher Weise umgesetzt und daher vergleichbare Kostenumfänge verursachen. Die Zertifizierungsinfrastrukturen liegen eher in nationalen Verantwortungsbereichen und werden evtl. von den sie nutzenden privaten Stakeholdern (z. B. den Fahrzeugherstellern) mitfinanziert (vgl. 7.1.3). Die voraussichtlichen Ausbaubedarfe in Verkehrsmanagementzentralen lassen demgegenüber sehr viel geringere Kostenumfänge erwarten. Sie liegen je nach Ausgestaltungsvariante im Aufgabenbereich der einzelnen Kommunen oder Länder.

Die Kosten weiterer V2X-Systembestandteile sind vor allem aus der Perspektive der nicht im Vordergrund dieser Untersuchung stehenden Stakeholder von Relevanz. So werden z. B. die V2N-Backends von Automobilherstellern, Automobilclubs, Versicherungen und diversen Content- und Service-Providern umfangreiche Zusatzkosten verursachen, die durch darauf aufbauende, funktionsfähige und gewinnbringende Geschäftsmodelle gerechtfertigt werden müssen.

Im direkten Vergleich der Szenarien weist Szenario A die höchsten (gut 300 Mio. €), Szenario C mittlere (knapp 200 Mio. €) und Szenario B die niedrigsten Systemkosten (gut 100 Mio. €) über den Betrachtungszeitraum der nächsten 20 Jahre auf. Dabei sind die Unterschiede zwischen Szenario A und C hauptsächlich auf die zeitliche Verzögerung der Technologieverfügbarkeit von Cellular-V2X-Kommunikationsmodulen für OBUs bzw. RSUs (im Vergleich zu WLAN-V2X) zurückzuführen. Würde in beiden Szenarien der Hochlauf bei den Fahrzeug- und Infrastrukturausstattungen zum gleichen Zeitpunkt starten, so würden die resultierenden Gesamtkosten der beiden Subsysteme in ähnlichen Größenordnungen liegen. Dieser Umstand resultiert auch daraus, dass nach Einschätzung der Autoren dieser Untersuchung auf Grundlage der durchgeführten Expertenbefragungen sowie der heute verfügbaren Technologie- und Marktinformationen noch keine eindeutigen Aussagen über signifikante Nettokostenvorteile von WLAN-V2X- oder Cellular-V2X-Modulen im Vergleich

zueinander ableitbar sind und solche daher auch nicht in der Beispielkalkulation berücksichtigt werden konnten.⁵¹ Zum Beispiel stehen eventuell höheren Technologie-lizenzkosten bei Cellular-V2X-Lösungen mögliche Kostenvorteile einer integrierten Mobilfunklösung ohne WLAN gegenüber. Die Gesamtwirkung solcher gegenläufigen Effekte kann zum heutigen Zeitpunkt nicht seriös abgeschätzt werden und hersteller-spezifisch sehr unterschiedlich ausfallen. Sobald mehr über die künftigen Preise erster Cellular-V2X-Module bzw. Chipsätze und damit über eventuelle Kostendifferenzen zu WLAN-V2X-Lösungen bekannt wird, sollten die Vergleichsrechnungen mit den neuen Informationen erneut vorgenommen werden.

Ein grundlegender Vorteil von Szenario C besteht aber, wie bereits ausgeführt, darin, dass abgesehen von RSUs, die direkt mit Verkehrstechnikanlagen interagieren, keine weiteren neuen RSUs benötigt werden, die lediglich Relayfunktionen erfüllen. Hierfür können die bereits existierenden Basisstationen des Mobile Network Equipment genutzt werden. Deren technologische Aufrüstung für Cellular-V2x-Funktionalitäten wird fast ausschließlich Softwarekosten und Technologielizenzkosten von Seiten der Netz-/Kommunikations-ausrüster verursachen und in der Regel ohne zusätzlichen Hardwareinvestitionen oder Standortbegehungen durch Servicetechniker auskommen.

Von maßgeblicher Bedeutung für die vergleichende Betrachtung der drei Szenarien sind die mit ihnen verbundenen IVS-Nutzenpotenziale, welche nicht identisch sind. WLAN-V2X- und Cellular-V2X-basierte Szenarien ermöglichen aufgrund der doch recht hohen Ähnlichkeit bezüglich der Leistungskriterien-Bewertungen (vgl. Abschnitt 5.2.3) aus heutiger Sicht grundsätzlich die gleichen Anwendungskategorien und die gleiche Vielfalt an Anwendungen – auch solche mit sehr anspruchsvollen Leistungsanforderungen. Daraus resultiert, dass sich langfristig auch die Nutzenpotenziale beider Technologien kaum unterscheiden würden. Wichtig für den Szenarienvergleich ist jedoch auch die unterschiedliche Technologie- bzw. Marktreife. Der spätere Kostenanfall in Szenario C geht auch mit einer zeitlichen Verzögerung der Realisierung von Verbesserungen der Verkehrssicherheit und -effizienz im Vergleich zu Szenario A einher. Mit Backend-V2X-Technologien wird in der kurzen und mittleren Frist nur ein eingeschränktes Set der denkbaren V2X-Anwendungen mit vergleichsweise moderaten Leistungsanforderungen realisierbar sein. Das heißt die Nutzenpotenziale des (kostengünstigen) Szenarios B liegen innerhalb des Betrachtungszeitraumes deutlich unter denen der Szenarien A und C. In der langen Frist ist jedoch vorstellbar, dass mit der übernächsten Mobilfunkgeneration auch Backend-V2X-Lösungen die vergleichsweise anspruchsvolleren V2X-Anwendungen ermöglichen werden (vgl. auch Abschnitt 5).

Aus städtischer Perspektive kann das Eintreten eines bestimmten Szenarios nicht forciert werden. Ist das sich am Ende durchsetzende Einführungsszenario jedoch schon bekannt oder mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit absehbar, so wird das Hinausschieben von Investitionen mit dem Verzicht auf zwischenzeitlich mögliche, aber noch nicht wahrgenommene, Nutzenpotenziale erkaufte.

⁵¹ Grundsätzlich kann heute nur mit Bestimmtheit gesagt werden, dass eine Automotive-zertifizierte Hard- und Software für Cellular-V2X und WLAN-V2x zunächst teurer sein wird als heutige Backend-V2X-Komponenten, wobei für beide mit zunehmender Verbreitung mit stark sinkenden Kosten zu rechnen ist. Zumindest für die RSUs geht auch die für die 5GAA erstellte Studie [REBB2017] von identischen Anfangs- und Folgekosten für WLAN- und Cellular-V2X aus.

Hinsichtlich der tatsächlichen Quantifizierung des gesellschaftlichen Nutzens von V2X-Systemen bleibt an dieser Stelle festzuhalten, dass sie nur schwierig und nur näherungsweise zu bemessen sind, insbesondere wenn es um den Anteil einzelner V2X-Anwendungen oder Subsysteme, wie dem des Roadside Equipment, an den Gesamterfolgen geht.

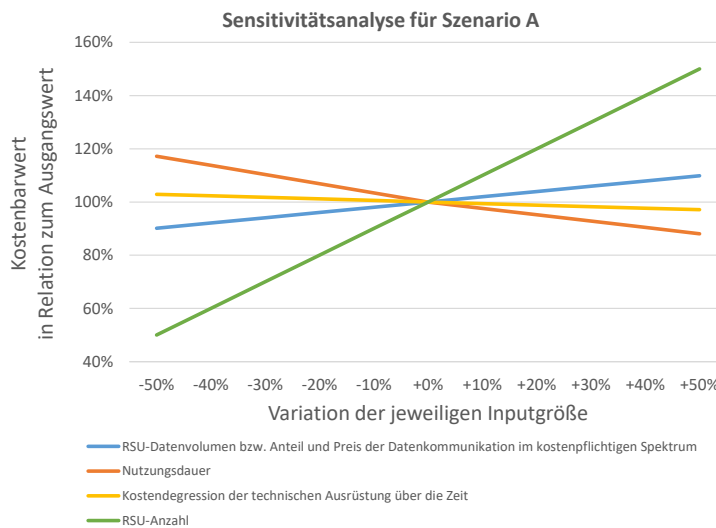
Einzubeziehende Kennzahlen für die Bemessung des gesellschaftlichen Nutzens sind vor allem (vgl. z. B. [EC2016c] [COBR2013] [CVIS2010] [CODI2008], [EDW2017], [NIEB2014]):

- für Verbesserung der Verkehrssicherheit (Unfallvermeidung):
 - die Anzahl bzw. der Wert vermiedener Sachschäden
 - die Anzahl vermiedener Personenschäden mit Todesfolge
 - die Anzahl vermiedener Personenschäden ohne Todesfolge
- für Verbesserung der Verkehrseffizienz:
 - die Erhöhung der Verkehrsdurchflüsse bzw. der eingesparte Ausbau bestehender Straßeninfrastruktur
 - die Verringerung von Fahrzeiten und Stau- und Standzeiten (z. B. an Ampeln)
 - Kraftstoffersparnisse der Fahrzeuge
- für damit im Zusammenhang stehende Verbesserungen der ökologischen Nachhaltigkeit:
 - die Verminderung von Treibhausgasen (CO₂, Stickoxide etc.)
 - die Verminderung von Feinstaubemissionen
 - die Verminderung von Lärmemissionen

Die Mehrzahl dieser Kennzahlen kann nur über diverse Hilfsgrößen – z. B. der Wert freigelegener Arbeits- oder Lebenszeit, der Wert eines statistischen Menschenlebens und Umrechnungsfaktoren diverser ökologischer Schadwirkungen – in monetäre Äquivalente überführt und so den Kosten des V2X-Systems direkt gegenübergestellt werden. Es ist aber grundsätzlich sinnvoll und anzuraten, vor dem tatsächlichen Aufbau von V2X-Infrastrukturen in einer Stadt entsprechende Kosten-Nutzen-Analysen zur Bestimmung von Nutzen-Kosten-Verhältnissen oder zumindest Kosten-Wirksamkeits-Analysen (ohne eine Monetarisierung der Nutzen) durchzuführen, um die Umsetzungsaktivitäten zielgenau in die richtige Richtung zu lenken. Dafür sollte zuvor eine Bestandsaufnahme problembehafteter Verkehrsknoten bzw. -strecken, eine konkrete Zielvorstellung über die angestrebten Nutzenverbesserungen und eine Roadmap für bis zu bestimmten Zeitpunkten zu ermöglichende V2X-Anwendungen im Verkehrsnetz vorliegen. Abschließend sei noch einmal auf die Unsicherheit der Eingangsdaten der Fallstudien-Berechnung eingegangen. Wie bereits angeführt sind die Ergebnisse der Beispielskalkulationen aus Abschnitt 7.4 mit Vorsicht zu interpretieren. Die große Unsicherheit über die tatsächliche künftige Kostenhöhe wurde für das Roadside Equipment explizit über die Betrachtung einer Basis- und zweier Extremvarianten abgebildet (vgl. nochmals Tabelle 12). Dadurch wurde für jedes Einführungsszenario ein recht breites Spektrum aufgespreizt, innerhalb dessen die tatsächlichen Kosten für entsprechende Infrastrukturen voraussichtlich liegen werden. Wird die relative Bedeutung einzelner Einflussgrößen auf die Gesamtkosten untersucht, so können zunächst die Anteile der einzelnen Kostenblöcke (vgl. Abbildung 22, Abbildung 24, Abbildung 26) herangezogen werden. Die Prognosegüte für einen Kostenbestandteil ist umso wichtiger, je höher sein Anteil an den Gesamtkosten ist, da für solche Kostenblöcke fehlerhafte Annahmen schnell zu sehr starken Ergebnisabweichungen führen. Daran sollte sich auch der eingesetzte Recherche- und Prognoseaufwand für die einzelnen Kostenbestandteile orientieren. Für weniger wichtige Bestandteile – wie in der vorliegenden Kostenanalyse die Energiekosten – reichen dagegen einfachere Annahmen bzw. Schätzungen.

Im Rahmen einer tiefergehenden Sensitivitätsanalyse ist es schließlich möglich, die Empfindlichkeit der Berechnungsergebnisse bezüglich kleiner Inputwertänderungen auf detailliertere Kosteneinflussfaktoren herunter zu brechen. Die durchgeführte Kostenkalkulation hat die Systemkosten auf einem vergleichsweise hohen Abstraktionslevel modelliert. Beispielsweise wurden die Kosten der Planung und Integration, der Installation sowie der technischen Ausrüstung nicht weiter in ihre Bestandteile zerlegt. Dennoch wurden zur Veranschaulichung entsprechender Sensitivitätsanalysen in Abbildung 28 – beispielhaft für das Roadside Equipment in Szenario A – die Auswirkungen einer systematischen Variation weiterer verwendeter Eingangsparameter auf den Kostenbarwert dargestellt. An diese Erstanalyse anknüpfende Untersuchungen könnten später versuchen, den Einfluss erwartungsgemäß bedeutsam erscheinender Kostenbestandteile – wie Technologielizenz- oder Tiefbaukosten – und den ihrer Bestimmungsfaktoren⁵² genauer zu ermitteln.

Abbildung 28 Sensitivitätsanalyse für Roadside Equipment in Szenario A



Aus der Abbildung 28 ist erkenntlich, dass sich eine x-prozentige Erhöhung bzw. Verringerung der RSU-Anzahl direkt in einer gleichwertigen Veränderung des Kostenbarwerts niederschlägt (grüne Linie). Weitere wichtige Faktoren sind die Nutzungsdauer der RSUs bis zum Ersatzzeitpunkt (orange Linie) sowie die anfallenden RSU-Datenvolumen, der Anteil der Datenkommunikation im kostenpflichtigen Spektrum und der zugehörige Preis. Eine Veränderung dieser Inputgrößen um ca. 50 Prozent verringert bzw. steigert den Kostenbarwert um jeweils ca. 10 Prozent (blaue Linie). Eine Variation der im Modell angenommenen Kostendegression für die technische Ausstattung der RSUs über die Zeit beeinflusst das Ergebnis demgegenüber kaum (gelbe Linie). Bei den anderen Szenarien ergeben sich ähnliche Diagramme.

⁵² Bei Tiefbauarbeiten können entsprechende Bestimmungsfaktoren z. B. Aushubmengen, Bodenklassen, eingesetzte Geräte und Stundenlohnsätze sein. Technologielizenzkosten werden unter anderem maßgeblich von der Lizenzart, der Marktstruktur und Wettbewerbssituation der Lizenzgeber, Hardwarehersteller und -nachfrager sowie von der Komplexität und der Lebenszyklusphase der lizenzierten Architekturen bestimmt.

Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden die entstehenden Kosten für die unterschiedlichen Einführungsszenarien A, B und C genauer analysiert. Die Szenarien A und C verursachen insgesamt (und bezüglich der straßenseitigen Kommunikationsinfrastruktur) Systemkosten in vergleichbaren Größenordnungen (mit einem leichten Kostenvorteil in Szenario C). Das von Backend-V2X-Kommunikation dominierte Szenario B verursacht die mit Abstand geringsten Systemkosten.

Bei einem Kostenvergleich ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Szenarien A und C prinzipiell gleiche Anwendungen und Anwendungskategorien ermöglichen, wobei sie in C erst etwas später realisiert werden können. Mit Szenario B wird demgegenüber vorerst nur eingeschränktes Set denkbarer Anwendungen ermöglicht, welches aber die zunächst wichtigsten Anwendungen enthält.

Auf der Ebene einzelner Kommunikationsmodule können derzeit keine eindeutigen Aussagen über signifikante Nettokostenvorteile der WLAN-V2X- oder der Cellular-V2X-Technologie getroffen werden. Die Unterschiede zwischen den Szenarien A und C basieren hauptsächlich auf der zeitlichen Verzögerung der Technologieverfügbarkeit. Der prinzipielle Vorteil von Szenario C besteht in der Weiterverwendungsmöglichkeit existierender Basisstationen für Relayfunktionen. Zentrale ITS-Ressourcen (Trust Center, VMZ-Erweiterungen, V2N-Backends) verursachen unabhängig von der Zugangstechnologie weitere – hier nicht quantifizierte – Zusatzkosten, die bei den strategischen Überlegungen und Planungen der Stakeholder zu berücksichtigen sind.

Vor einem möglichen Infrastruktur-Rollout sind eine tiefergehende Sensitivitätsanalyse (d. h. genauere Untersuchung primärer Kosteneinflussfaktoren), wiederholte Vergleichsrechnungen bei Verfügbarkeit einer aktualisierten Datenbasis sowie die Quantifizierung des konkreten Nutzens in der betroffenen Stadt bzw. Kommune (Bestimmung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses) zu empfehlen.

8 Betreibermodelle

Die Kostenanalyse im vorangegangenen Abschnitt hat gezeigt, dass das Roadside Equipment beachtliche Investitions- und Finanzierungsbedarfe mit einer sehr langen Kapitalbildung verursachen wird, die potentiell in den öffentlichen Aufgabenbereich fallen. Deshalb sollen im Folgenden nach einer kurzen Einordnung der Betreibermodellbetrachtung die grundsätzlich möglichen Formen der Infrastrukturbereitstellung im Allgemeinen bzw. von (Straßen-)Verkehrsinfrastrukturen im Besonderen vorgestellt werden. Unter Rückgriff auf die Stakeholderanalyse von Abschnitt 3.1 werden sodann potentiell mögliche Finanzierungs- und Betreiberkonzepte für straßenseitige Kommunikationsinfrastrukturen abgeleitet und vorgestellt, bevor sie abschließend vergleichend analysiert und szenariospezifisch ausgewertet werden.

8.1 Grundlegende Einordnung der Untersuchung von Betreibermodellen

Da die vorliegende Untersuchung primär die Perspektive der Städte und Kommunen einnimmt und zudem festgestellt werden konnte, dass vorrangig beim Roadside Equipment die größte Unsicherheit darüber herrscht, wer für die Finanzierung der anfallenden Kosten in welcher Form aufkommen wird, widmet sich dieser Teil ausschließlich der straßenseitigen Kommunikationsinfrastruktur. Hinsichtlich der anderen V2X-Subsysteme erfolgte im vorangegangenen Abschnitt 7.1 bereits eine grobe Zuordnung der jeweils für die Finanzierung und den Betrieb der Komponenten zuständigen bzw. infrage kommenden Stakeholder. Für einen Großteil dieser Gesamtsystembestandteile werden sich privatwirtschaftliche Geschäftsmodelle durchsetzen, die teilweise an anderer Stelle bereits hinreichend diskutiert wurden (vgl. [EC2009], [CVIS2010], [COBR2013], [SIMTD2013b], [SCHULZ2016]). Diese unterscheiden sich inhaltlich recht stark voneinander – in Abhängigkeit von den beteiligten Stakeholdern und der schier unendlichen Vielfalt an konkreten V2X-Anwendungen. Gemeinsam ist jedoch vielen, dass sie im Kern letztlich auf die Verwertung von Mobilitätsdaten abzielen und daher zum Teil bewährte Funktionsmuster aus der Digitalwirtschaft⁵³ übernehmen. Des Weiteren bündeln sie oft komplementäre Teilleistungen in digitalen Ökosystemen und sind meist auf stakeholderübergreifende Kooperationen angewiesen. So werden sich beispielsweise Fahrzeughersteller und Verkehrsdienstleister zunehmend zu Anbietern zugehöriger Contents und digitaler Services auf Basis von V2X-Kommunikation weiterentwickeln und dafür mit entsprechenden Spezialisten zusammenarbeiten.

Das Subsystem des Roadside Equipment weist, wie andere verkehrstechnische Anlagen, ausgeprägte Eigenschaften einer öffentlichen Infrastruktur auf.⁵⁴ Es bildet die Grundlage für eine Vielzahl unterschiedlichster Anwendungen in diversen Einsatzfeldern, die das heute existierende Verkehrssystem „intelligenter“ machen sollen und die zu einem großen Teil – vor allem in den Bereichen der Verkehrssicherheit und -effizienz – im Interesse der Allgemeinheit liegen (vgl. Abschnitt 3). Etablieren sich V2I-Dienste langfristig, so wird künftig die kommunikationstechnische Erweiterung und Fortentwicklung der

⁵³ Z. B. die Geschäftsmodell-Muster „Multi-sided Platforms“, „Hidden Revenue“ und „Crowdsourcing“.

⁵⁴ Auch das Mobile Network Equipment sowie einige zentrale Elemente des V2X-Gesamtsystems (Trust Center und Verkehrsmanagementzentralen) besitzen einen nicht zu verkennenden Infrastrukturcharakter. Da hier jedoch bereits (mit Ausnahme der Trust Center) sehr umfangreiche Infrastrukturen existieren, die mit etablierten Organisationsformen betrieben werden, soll der Fokus der nachfolgenden Betrachtungen auf dem Roadside Equipment liegen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind aber grundsätzlich auch auf andere infrastrukturelle V2X-Bestandteile übertragbar.

Verkehrsinfrastruktur eine unentbehrliche Voraussetzung für das reibungslose Funktionieren hochentwickelter Gesellschaften und ein wichtiger Faktor für den Standortwettbewerb sein. Umso wichtiger ist es, insbesondere für kommunale Aufgabenträger, heute bereits Überlegungen zur Sicherstellung einer angemessenen Versorgung mit solchen Infrastrukturen – und folglich über adäquate Wege ihrer Errichtung und ihres späteren Betriebs – anzustellen.

In den Industriestaaten wird die Bereitstellung von Verkehrsinfrastruktur traditionell als Teil des staatlichen Aufgabenbereichs angesehen. Demzufolge erfolgt die Zurverfügungstellung von Straßen und zugehöriger Verkehrstechnik zum überwiegenden Teil durch öffentliche Träger, wobei in einzelnen Stufen der Wertschöpfungskette auch privatwirtschaftliche Unternehmen als Auftragnehmer eingebunden werden. Einige Eigenarten und besondere Herausforderungen des Roadside Equipments (vgl. Abschnitt 8.3.1) lassen aber auch das Inbetrachtziehen weniger verbreiteter oder gar neuer Bereitstellungsformen sinnvoll erscheinen. Ziel der nachfolgenden Ausführungen ist daher eine systematische Analyse mögliche Betreibermodelle und eine Herausarbeitung ihrer Vor- bzw. Nachteile im Kontext der hergeleiteten Einführungsszenarien. Sie sollen aber nicht als generelles Plädoyer für mehr private Beteiligung an der Bereitstellung von Verkehrsinfrastruktur missverstanden werden.

8.2 Traditionelle Trägermodelle für (Verkehrs-)Infrastrukturen

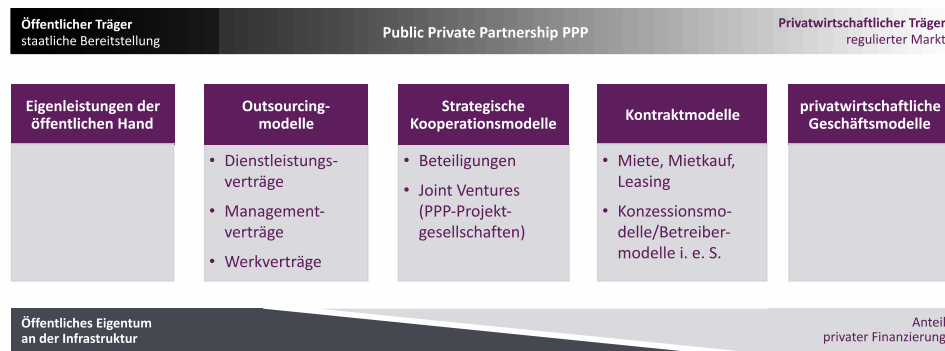
Infrastrukturen, die aufgrund ihres Existenzsicherungs- bzw. Grundversorgungscharakters in den hoheitlichen Verantwortungsbereich fallen, müssen nicht zwangsläufig von staatlichen Körperschaften und Anstalten bzw. deren Organen bereitgestellt werden. Sehr oft werden entsprechende Angebote auch von privatrechtlich organisierten öffentlichen Unternehmen (formale Privatisierung) oder von gänzlich bzw. mehrheitlich in Händen der Privatwirtschaft befindlichen Unternehmen zur Verfügung gestellt. Bei privater Bereitstellung kann die Verantwortung für den Umfang und die Qualität der Aufgabenerfüllung bei der öffentlichen Hand verbleiben (funktionale Privatisierung) oder weitestgehend dem Markt überlassen werden (materielle Privatisierung). Als ein Musterbeispiel für die Liberalisierung und Privatisierung öffentlicher Infrastrukturen können die Telekommunikationsnetze angesehen werden. Im Falle einer weitgehend privatwirtschaftlichen Infrastrukturbereitstellung beschränken sich die Aufgaben des Staates auf die Regulierung der Märkte sowie die Koordinierung, Steuerung, (Mit-)Planung und ggf. punktuelle Förderung von Ausbaubedarfen.

Im Bereich der klassischen Verkehrsinfrastruktur überwiegt im Gegensatz zum Telekommunikationssektor noch heute die öffentliche Finanzierung und Bereitstellung. In Deutschland sind in Abhängigkeit von der Straßenkategorie Bund, Länder, Kreise oder die Städte bzw. Gemeinden als Baulastträger für Planung, Errichtung, Betrieb und Unterhalt öffentlicher Straßen zuständig.⁵⁵ In der Regel sind aber auch hier privatwirtschaftliche Partner ganz maßgeblich an der Leistungserbringung beteiligt – insbesondere bei der Errichtung, in zunehmenden Maße auch bei (Teil-)Aufgaben des Betriebes.

⁵⁵ Art. 90 des Grundgesetzes schreibt z. B. vor, dass der Bund Eigentümer der Fernverkehrsstraßen bleibt und diese nur von einer im öffentlichen Eigentum befindlichen Gesellschaft verwaltet werden dürfen. Private Infrastrukturbeteiligungen sind ausgeschlossen, sofern sie das ganze Streckennetz in einem Land oder wesentliche Teile davon umfassen.

Je nach Art und Umfang ihres Mitwirkens können verschiedene Trägermodelle öffentlicher Infrastrukturen (und Unterarten solcher) unterschieden werden (vgl. Abbildung 29). Diese legen die Eigentumsverhältnisse sowie die Entscheidungskompetenzen und Zuständigkeiten für die Errichtung, den späteren Betrieb und die Finanzierung der Infrastruktur über ihren Lebenszyklus hinweg fest. In engem Zusammenhang damit steht zudem die Frage nach der Übernahme wirtschaftlicher und sonstiger projektbezogener Risiken.

Abbildung 29 Trägermodelle öffentlicher Infrastrukturen (Quelle: eigene Darstellung basierend auf [GIRM2017], S. 458 ff.)



Sieht man von einer ausschließlichen Leistungserbringung entweder durch öffentlich-rechtliche Einrichtungen (z. B. kommunale Bauhöfe und Servicebetriebe) oder durch den Markt über privatwirtschaftliche Geschäftsmodelle ab, so öffnet sich das weite Feld der Zusammenarbeit in **Public Private Partnerships (PPPs)**. Darunter sind im Allgemeinen vertraglich geregelte partnerschaftliche Interaktionen zwischen **öffentlicher Hand** und **Privatwirtschaft** zum beiderseitigen Vorteil⁵⁶ zu verstehen. Hierbei können drei Grundformen – **Outsourcing**-, **Kontrakt**- und **Strategische Kooperationsmodelle** – unterschieden werden [GIRM2017].

In Outsourcingmodellen beauftragt der öffentliche Träger und Eigentümer einer Infrastruktur innerhalb eines vertraglich festgelegten Zeitraumes (meist deutlich unter 10 Jahren) private Unternehmen mit der Bereitstellung klar abgrenzbarer Teilleistungen, die in der Regel nicht zur Kernaufgabe des Infrastrukturbetriebs gehören. Rechtlich kann es sich dabei um **Dienstleistungs**-, **Management**- oder **Werkverträge** handeln. Ein typisches Outsourcing-Beispiel ist die Ausführung von Bau- und Erhaltungsarbeiten für Infrastrukturen. Es können auch mehrere in engem Zusammenhang stehende Arbeiten, wie dies typischerweise bei Planungs- und Bauleistungen oder bei Aufgaben ihrer betrieblichen Unterhaltung (z. B. Straßenreinigung, Grünpflege und Winterdienst) der Fall ist, gebündelt von einem privaten Dienstleister erbracht werden. Outsourcingmodelle beruhen letztlich auf einfachen austauschvertraglichen Auftraggeber-Auftragnehmer-Beziehungen ohne formale Institutionalisierung der PPP und ohne gemeinsame strategische Ziele bzw. gegenseitige Abhängigkeiten in der langen Frist. Sie weisen daher den niedrigsten Kooperationsgrad auf.

⁵⁶ Mit PPPs verspricht sich der Staat eine Entlastung öffentlicher Haushalte, schnellere Infrastrukturmodernisierungen und Effizienzsteigerungen bei seiner Aufgabenerfüllung durch die Aktivierung privaten Kapitals und Know-hows, während die Privatwirtschaft eine Gewinnerzielungsabsicht verfolgt und mit öffentlichen Aufträgen langfristige Unternehmenserfolge sichern möchte.

Bei Strategischen Kooperationsmodellen werden öffentliche Aufgaben einem gemischt-wirtschaftlichen (also von öffentlichen und privatwirtschaftlichen Gesellschaftern getragenen) Unternehmen als Eigentümer der Infrastruktur übertragen. Hierfür kann eine gemeinsame Projektgesellschaft als **Joint Venture** gegründet werden oder es erfolgen entsprechende finanzielle **Beteiligungen**. Die eigentliche Betriebsführung kann wieder an eine separate (private oder gemischtwirtschaftliche) **Betreiber**gesellschaft ausgelagert sein. Kooperationsmodelle stellen die engste Form der Zusammenarbeit in PPPs dar, da hier letztlich eine gemeinschaftliche Leistungsbereitstellung von öffentlicher und privater Seite erfolgt.

Kontraktmodelle sind gegenüber den Outsourcingmodellen auf eine deutlich längere Laufzeit (Lebenszyklusorientiert; ca. 10 bis 30 Jahre) und eine engere Kooperationsbeziehung ausgelegt. Hierbei errichten private Partner im öffentlichen Auftrag die Gesamtinfrastruktur, welche zunächst auch ihnen gehört. Bei den Varianten **Miete**, **Mietkauf** und **Leasing** wird eine (bis zu einem möglichen Eigentumsübergang⁵⁷) im privaten Eigentum befindliche Infrastruktur gegen entsprechende Nutzungsentgelte von der öffentlichen Hand selbst betrieben. **Konzessions- bzw. Betreibermodelle im engeren Sinn**⁵⁸ sehen dagegen vor, dass ein privates Unternehmen (oder ein Konsortium) durch Konzessionsvergabe nahezu vollständig die Erfüllung einer öffentlichen Aufgabe übertragen bekommt. Demgemäß handelt es sich um Vereinbarungen über die Finanzierung, die Planung, den Bau und insbesondere auch den längerfristigen Betrieb (einschließlich Instandhaltung) einer Infrastruktur durch private Konzessionsnehmer, die hierfür in der Regel eigens eine private **Betreiber**gesellschaft gründen. Für die Konzessions- und Betreibermodelle, welche nach dem Outsourcing einzelner Dienste die am häufigsten praktizierten Formen von PPPs darstellen, existiert in der Praxis neben dem prototypischen BOT-Modell (Build-Operate-Transfer) eine ausgesprochen große Vielfalt an Umsetzungsvarianten⁵⁹. Diese weisen jeweils spezifische Vor- und Nachteile auf und sind daher im Einzelfall auf ihre Sinnhaftigkeit, Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu prüfen⁶⁰.

Für den öffentlichen Teil der Refinanzierung von Anfangs- und Folgekosten kommen grundsätzlich zweckungebundene Steuereinnahmen und die Erhebung von Infrastrukturabgaben (z. B. in Form einer City-Maut) in Frage. Infrastrukturabgaben können prinzipiell nutzungsabhängig (z. B. zeit- oder streckenbezogen bei Verkehrswegen) oder nutzungsunabhängig für die bloße Nutzungsmöglichkeit erhoben werden. Der Steuerhaushalt kann sich auch aus indirekt mit der Infrastrukturnutzung in Zusammenhang stehenden Steuern (z. B. Mineralölsteuer und Straßeninfrastruktur) speisen. Die Vergütung privater Partner für deren Leistungen in PPPs kann von staatlicher Seite aus diesen öffentlichen Einnahmen gezahlt werden. Je nach Ausgestaltung der PPP-Modelle können dies regelmäßige Zahlungen und/oder anteilige Anschubfinanzierungen für die Baukosten sein. Auch eine

⁵⁷ Während bei der Miete ein Eigentumsübergang am Ende der Vertragslaufzeit *nicht* und beim Mietkauf *fest* vorgesehen ist, bleibt dieser beim Leasing *optional*. In Konzessionsmodellen kann das Eigentum auch schon zu Beginn an den Konzessionsgeber übertragen werden.

⁵⁸ Im weiteren Sinn wird der Begriff *Betreibermodell* für alle Trägermodelle verwendet. Dieser Begriffsverwendung wurde bisher auch in der vorliegenden Untersuchung gefolgt. In der Literatur werden *Betreibermodelle* häufig nochmals von *Konzessionsmodellen* dahingehend abgegrenzt, dass der Betreiber bei ersteren nur Vergütungen vom Konzessionsgeber erhält und bei letzteren auch zur Erhebung von Nutzungsentgelten befugt ist.

⁵⁹ International gebräuchlich sind hier aus dem englischen Sprachraum stammende Variantenbezeichnungen wie Build-Transfer-Operate (BTO), Build-Own-Operate (BOO), Build-Own-Operate-Transfer (BOOT), Design-Build-Finance-Operate (DBFO) oder Build-Lease-Operate-Transfer (BLOT). Eine detaillierte Darstellung der Variantenvielfalt ist an dieser Stelle weder möglich noch zielführend.

⁶⁰ Hierfür sollten frühzeitig Risikoabwägungen und Lebenszyklusrechnungen zu den in Frage kommenden Modellalternativen angestellt und ggf. Prämissen und Randbedingungen angepasst werden.

direkte Beteiligung privater Partner an den Infrastrukturabgaben oder deren Erhebung und vollständige Vereinnahmung durch die private Seite (für eine bestimmte Zeit) sind möglich. Ein gänzlich auf privatwirtschaftlichen Geschäftsmodellen fußender Infrastrukturbetrieb, wie im Bereich des Mobilfunks, wird aus (zum Teil regulierten) Entgelten gegenüber den Infrastrukturnutzern bzw. den sich der Infrastruktur bedienenden Drittanbietern finanziert. In der Regel spielt (insbesondere bei privater Beteiligung) auch die Fremdfinanzierung von Investitionen über Finanzinstitute eine große Rolle.

Die Verbreitung alternativer Formen der Bereitstellung von Verkehrsinfrastruktur ist in Europa und weltweit sehr unterschiedlich. Außerhalb Deutschlands sind vor allem für die Fernstraßennetze öffentliche (z. B. ASFiNAG in Österreich) oder private (z. B. Atlantia S.p.A. in Italien) Betreibergesellschaften, die sich aus der Erhebung von Mautgebühren finanzieren, weit verbreitet. In wenigen Städten gibt es zudem eine City-Maut (z. B. London, Mailand, Stockholm). Betreibergesellschaften, die Nutzungsgebühren erheben können, fallen Investitionen in neue Technologiekomponenten, wie RSUs, typischerweise leichter. Urbane Verkehrsräume weisen aber einige Besonderheiten auf, die eine einfache Übertragung existierender Konzepte nicht ohne weiteres zulassen. Städtische Straßennetze sind um ein Vielfaches dichter und weisen neuralgische Verkehrsknoten, und damit potentielle RSU-Standorte, in einer wesentlich höheren Anzahl auf als Autobahnen. Dies führt dazu, dass bezogen auf die Streckenkilometer deutlich größere Investitionen in ein Roadside Equipment erforderlich sind. Auch besitzen größere Städte bzw. Stadtteile viel mehr Zufahrtswege, als es auf Fernstraßen Anschlussstellen gibt. Überlegungen zu einer City-Maut sind in Deutschland sehr unpopulär, da eine solche auch schwerwiegende wirtschafts- und sozialpolitische Folgen für die Bewohner und das Gewerbe nach sich ziehen können. Die vorhandenen Infrastrukturanbindungen und -ausstattungen (z. B. bezüglich Glasfasernetz, verkehrabhängige LSA-Steuerungen, Verkehrsmanagementzentralen) in städtischen Verkehrsnetzen sind individuell sehr unterschiedlich und es erscheint im Gegensatz zu Fernstraßennetzen, die einen einzigen Baulastträger besitzen, sehr unwahrscheinlich, dass sich bei Städten eine national einheitliche Lösung für den Infrastrukturbetrieb durchsetzen wird.

Das Land Berlin hat seit 2006 (in einer in dieser Form noch eher seltenen Konstellation⁶¹) das Management seiner städtischen Lichtsignalanlagen über ein Betreibermodell einem spezialisierten Dienstleister übertragen – mittlerweile bereits im zweiten 10-Jahres-Ausführungszeitraum die Alliander Stadtlicht GmbH. Die Vereinbarung umfasst Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Lichtsignalanlagen und der Verkehrsrechner. Die rechtliche Hoheit über die Steuerung der Anlagen bleibt bei der Stadt Berlin. Auch die heutige Verkehrsinformationszentrale Berlin (VIZ) wird seit ihrer Errichtung von einer privaten Betreibergesellschaft (VMZ Berlin, Tochtergesellschaft der Siemens AG) im öffentlichen Auftrag betrieben. In der Regel betreiben die zuständigen öffentlichen Baulastträger des Straßennetzes die Lichtsignalanlagen, Verkehrsinformations- und -beeinflussungsanlagen sowie Verkehrsmanagementzentralen über ihre Straßen- und Tiefbauämter jedoch noch selbst – unter Zuhilfenahme von Dienstleistungen öffentlicher Betriebe (z. B. der Stadtwerke) oder privater Unternehmen (z. B. der Verkehrstechnik-ausrüster), also über Eigenleistungen und Outsourcingmodelle.

⁶¹ Ein ähnliches Betreibermodell wie in Berlin existiert in Braunschweig, wo die Bellis GmbH, ein Gemeinschaftsunternehmen von Siemens und BS Energy, Lichtsignalanlagen betreibt und Aufgaben des Verkehrs- und Parkraummanagements übernimmt.

Für die Auswahl und Beauftragung privater Partner in den verschiedenen PPP-Modellen kommen grundsätzlich unterschiedliche Verfahren infrage, wobei Vorgaben des subnationalen, nationalen und europäischen Vergaberechts zu beachten sind. Nachfolgend soll analysiert werden, welche Möglichkeiten für die Finanzierung und den Betrieb straßenseitiger Kommunikationsinfrastruktur grundsätzlich geeignet erscheinen und welche Stakeholder daran jeweils beteiligt sein könnten.

8.3 Potenzielle Betreibermodelle für straßenseitige Kommunikationsinfrastruktur

8.3.1 Generelle Eignung und Besonderheiten des Roadside Equipment

Wie bereits ausgeführt kann das Roadside Equipment als künftig bedeutsamer – möglicherweise sogar als nicht mehr hinwegzudenkender – Bestandteil der öffentlichen Verkehrsinfrastruktur aufgefasst werden. Als solchem kommen für seinen Bau und Betrieb sowie deren Finanzierung grundsätzlich alle der in Abschnitt 8.2 vorgestellten Modelle in Betracht. Dass dabei die ganze Variantenpalette von Relevanz ist, wird dadurch unterstrichen, dass sich das Roadside Equipment genau an der Schnittstelle zwischen der klassischen Verkehrsinfrastruktur, die traditionell eher von staatlicher Seite bereitgestellt wird, und der Kommunikationsinfrastruktur, welche nach der in den 1980er-Jahren begonnenen Liberalisierung heute weitgehend von regulierten Märkten dargeboten wird, befindet (linke bzw. rechte Seite des Spektrums von Abbildung 29). Darüber hinaus weist das Roadside Equipment folgende zu beachtende Besonderheiten auf:

- Es werden neue Stakeholder-Rollen und Stakeholder-Akteure relevant.
- In sehr vielen Fällen bildet das Roadside Equipment mit der verkehrstechnischen Infrastruktur eine funktionelle Einheit (z. B. RSUs an Lichtsignal-, Verkehrsbeeinflussungs- und portablen Baustellenanlagen), weshalb es sich anbietet, für diese Infrastrukturbestandteile gemeinsame Trägermodelle umzusetzen.
- Die infrage kommenden Technologievarianten besitzen eine vergleichsweise sehr hohe Entwicklungsdynamik (in unterschiedlicher Ausprägung, vgl. Abschnitt 5.2.1.3) oder befinden sich, wie Cellular-V2X, sogar noch im Entstehungsprozess. Zudem fehlen oft etablierte Standards und Leitfäden für eine Implementierung. Dies erschwert auch Entscheidungen über Organisations- und Finanzierungsformen.
- Resultierend aus den zuvor genannten Punkten ergibt sich oft ein Bedarf, sehr unterschiedliche Technologien in bzw. mit RSUs zu integrieren, was die Komplexität erhöht und eine adäquate Einbeziehung von Spezialistenwissen für den Systembetrieb erforderlich macht (z. B. von Verkehrstechnikern, Mobilfunknetzbetreibern).
- Aufgrund des bisher fast gänzlich fehlenden Infrastrukturbestandes ist mit sehr hohen Erstausrüstungskosten umzugehen.
- Der tatsächliche gesellschaftliche Nutzen des Roadside Equipments ist nur sehr schwer quantifizierbar (vgl. Abschnitt 7.5), da auch ohne RSUs die V2V-Kommunikation, die Fahrzeugautomatisierung und klassische Telematiksysteme zu Sicherheits- und Effizienzverbesserungen führen werden. Dies erschwert die Erfolgsbemessung von Betreibermodellen.
- Darüber hinaus könnten RSUs bei entsprechender Ausstattung prinzipiell auch als Kommunikationsknoten für nicht im öffentlichen Interesse liegende Komfortanwendungen mitgenutzt werden, z. B. die Funktion normaler Basisstationen übernehmen, was möglicherweise innovative Betreiberkonzepte mit den Mobilfunknetzbetreibern ermöglicht.
- Grundsätzlich werden je nach Einführungsszenario (vgl. Abschnitt 6) unterschiedliche Kompetenzen und Stakeholder eine höhere oder niedrigere Relevanz besitzen.

Im Folgenden werden aus der großen Bandbreite denkbarer Betreibermodelle für die straßenseitige Kommunikationsinfrastruktur drei grundlegende Hauptvarianten vorgestellt, die vor dem Hintergrund dieser Besonderheiten und in Anbetracht der in Abschnitt 3.1 diskutierten Stakeholderinteressen besonders relevant erscheinen. Sie lassen sich ansatzweise in ähnlicher Form teilweise auch in anderen Studien bzw.

Projektveröffentlichungen mit V2X-Themenbezug finden (z. B. [COBR2013]). Dies sind:

- Variante 1: **Integrierter öffentlicher Träger**
- Variante 2: **Private Betreibergesellschaft für die IKT-seitige Infrastruktur**
- Variante 3: **Strategische Kooperation zwischen öffentlicher und privater Seite**

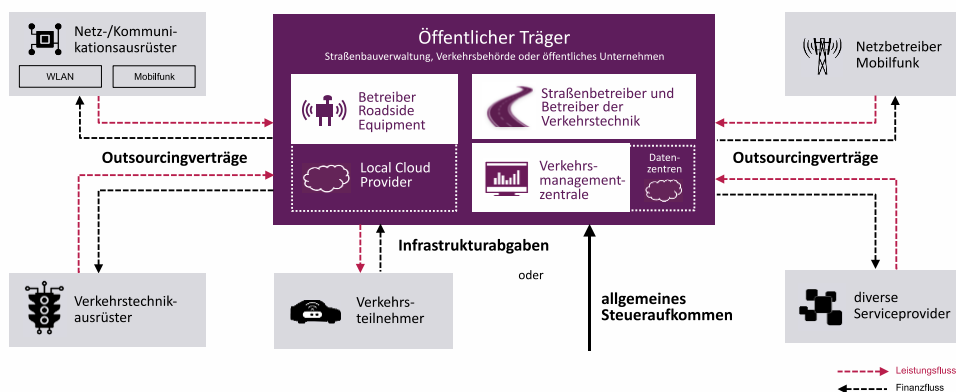
Nach der Vorstellung werden diese Betreibervarianten in Abschnitt 8.4 hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile einander gegenübergestellt.

8.3.2 Hauptvarianten von Betreibermodellen für das Roadside Equipment

8.3.2.1 Variante 1: Integrierter öffentlicher Träger

Eine erste Variante ist die gesamthafte Bereitstellung und Finanzierung aller (auch erst zukünftig) im Zusammenhang mit der Straßenverkehrsinfrastruktur stehender Komponenten und Dienste durch einen integrierten öffentlichen Träger (Abbildung 30).

Abbildung 30 Integrierter öffentlicher Träger als Betreiber des Roadside Equipment (Betreibervariante 1)



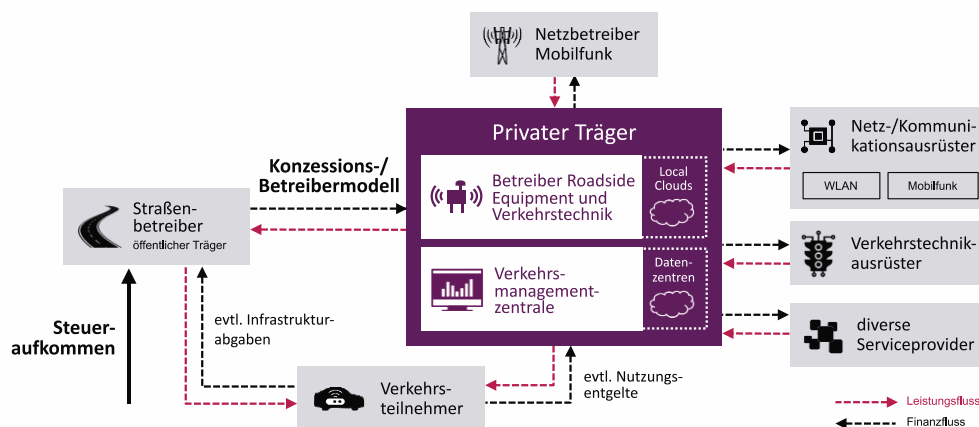
Das Roadside Equipment und ggf. darin eingebundene RSU-Clouds werden in diesem Modell wie die Verkehrswege selbst, die sonstige Verkehrstechnik und die Verkehrsmanagementzentrale in öffentlicher Eigenregie betrieben und organisatorisch weitgehend zusammengefasst. Dies kann unmittelbar innerhalb der zuständigen Verwaltungseinheit oder mittelbar in ausgegliederten juristischen Personen (z. B. öffentlichen Unternehmen) geschehen. Es ist aber prinzipiell auch eine organisatorische Trennung einzelner Aufgabenbereiche denkbar. Zu seiner Aufgabenerfüllung wird sich der öffentliche Träger auch in diesem Modell nicht allein auf Eigenleistungen stützen können. Die trifft insbesondere auf die Beschaffung der technischen Ausrüstungen und ihre Installation im Verkehrsraum zu. Daher bedient er sich der Expertise und der Dienstleistungen diverser privatwirtschaftlicher Partner über entsprechende Vertragsbeziehungen, die den entgeltlichen Bezug ihrer jeweiligen Leistung regeln. Je nach den zum Einsatz kommenden Technologien und Applikationen sind hier neben den Kommunikations- und Verkehrstechnik-ausrüstern auch Mobilfunknetzbetreiber und diverse weitere Serviceprovider (z. B.

Softwareentwickler, Cloud- und IT-Dienstleister) von primärer Relevanz. Die zur Infrastrukturbereitstellung (inklusive extern bezogener Leistungen) erforderlichen Finanzmittel werden in diesem Modell aus dem Steueraufkommen bestritten. Alternativ oder zusätzlich können auch Infrastrukturabgaben von den Verkehrsteilnehmern erhoben werden, die direkt für den Ausbau, Erhalt und Betrieb der Infrastruktur eingesetzt werden. Möglicherweise sind weitere (in Abbildung 30 nicht dargestellte) kreative Wege umsetzbar, um neben den Verkehrsteilnehmern zielgenauer auch andere Nutznießer des Vorhandenseins des Roadside Equipments für eine partielle Mitfinanzierung seiner Lebenszykluskosten heranzuziehen (vgl. Abschnitt 8.3.3).

8.3.2.2 Variante 2: Private Betreibergesellschaft für die IKT-seitige Infrastruktur

In einer zweiten Variante wird das Roadside Equipment von einem privaten Träger im öffentlichen Auftrag (und ggf. öffentlich bezuschusst) vorfinanziert, geplant, errichtet und über einen längeren Zeitraum betrieben (vgl. Abbildung 31). Dies entspricht einem Betreibermodell im engeren Sinn bzw. Konzessionsmodell. Grundsätzlich kann sich dies allein auf die RSUs (und ggf. integrierte lokale Cloudlösungen) beschränken. Es ist aber davon auszugehen, dass aufgrund von Synergieeffekten ein gemeinsamer Betrieb mit der sonstigen Verkehrstechnik und dem zentralen Verkehrsmanagement sinnvoller ist. Der Betrieb aller nicht-kommunikationstechnischen Komponenten der Verkehrsinfrastruktur (Bauwerke und Trassen) bleibt weiterhin in der unmittelbaren Verantwortung des öffentlichen Straßenbetreibers. Bei dem privaten Träger der IKT-seitigen Infrastruktur kann es sich um ein Einzelunternehmen oder ein Unternehmenskonsortium mit einschlägigen Kompetenzen im Betrieb von Kommunikationsnetzen handeln. Dies können u. a. Betreiber von Mobilfunk- und sonstigen Breitbandnetzen, Betreiber von Broadcast-Sendeanlagen, spezialisierte Full-Service- oder Instandhaltungsdienstleister im Bereich Telekommunikation, Verkehrstechnikausrüster und Mautbetreiber, aber auch Unternehmen aus naheliegenden Infrastrukturbereichen (z. B. Energieversorgung und Industriekommunikation) sein.

Abbildung 31 Private Betreibergesellschaft für die IKT-seitige Infrastruktur (Betreibervariante 2)



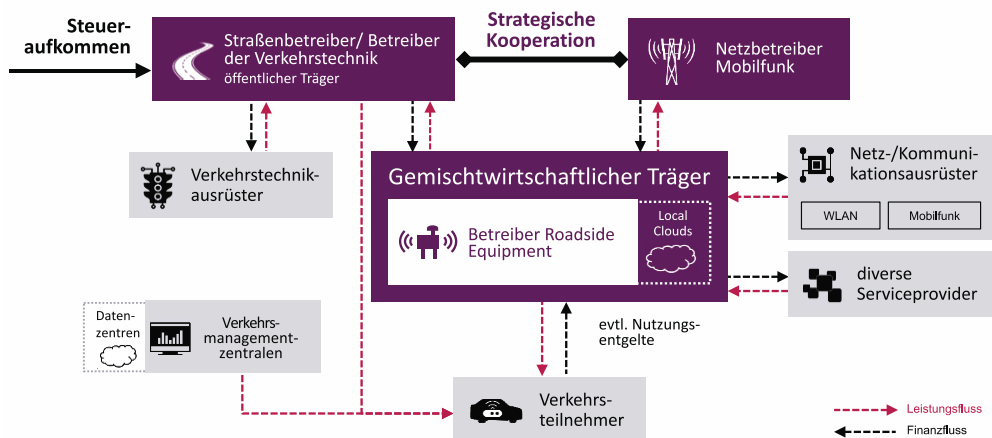
In Abhängigkeit von den eigenen Kernkompetenzen wird auch der private Betreiber auf Fremdleistungen zurückgreifen und deshalb in austauschvertraglichen Beziehungen mit weiteren privaten Partnern stehen. Von langfristigerer und engerer Natur ist aber seine Kooperationsbeziehung mit dem Straßenbetreiber als öffentlicher Auftraggeber. Wie bereits erwähnt sind unzählige Untervarianten von Betreiber- bzw. Konzessionsmodellen denkbar, die sich u. a. im Umfang der zu erbringenden Leistungen, in der Art der

öffentlichen Bezuschussung, im Zeitpunkt des Eigentumsübergangs auf den Auftraggeber und in der Möglichkeit, Entgelte von den Infrastrukturnutzern zu erheben, unterscheiden. Zur Vorteilhaftigkeit dieser Detailvarianten können an dieser Stelle keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden. Vielmehr sollten hierzu weitergehende Untersuchungen vor dem Hintergrund der konkreten Ausgangssituation und Rahmenbedingungen der betreffenden Stadt bzw. Kommune angestellt werden, sofern Betreiber- bzw. Konzessionsmodelle im Rahmen einer organisatorischen Vorentscheidung tatsächlich in die engere Auswahl für die Finanzierung und Bereitstellung des Roadside Equipments gezogen werden.

8.3.2.3 Variante 3: Strategische Kooperation zwischen öffentlicher und privater Seite

Die dritte Variante, die hier vorgestellt werden soll, folgt einem strategischen Kooperationsmodell, d. h. es wird eine gemeinsame Infrastrukturbereitstellung durch die öffentliche und die private Seite, institutionalisiert in einem gemischtwirtschaftlichen Unternehmen, realisiert (vgl. Abbildung 32). Grundsätzlich kommen unterschiedliche V2X-Stakeholder als private Partner in einer solchen engen PPP-Konstellation in Frage. Basierend auf den vorangegangenen Überlegungen zur funktionellen Nähe von RSUs und Mobilfunkbasisstationen sowie dem in Abschnitt 3.2 diskutierten primären Interesse der Mobilfunknetzbetreiber an einer Netzverdichtung für die aktuelle und kommende Mobilfunkgenerationen, werden hier aber vor allem in einer strategischen Zusammenarbeit zwischen Straßenbetreibern und Mobilfunknetzbetreibern Potentiale gesehen. Ein besonders hohes Interesse der Netzbetreiber wäre zu erwarten, würde es sich um BS-type RSUs handeln, die nicht nur für im öffentlichen Interesse liegende Verkehrssicherheits- und Verkehrseffizienz Anwendungen, sondern auch für diverse Komfortanwendungen mitgenutzt werden können. Aber auch der Betrieb von reinen UE-type RSUs mit Cellular-V2X wäre in einer solchen Konstellation denkbar. Ausschließlich auf WLAN-V2X basierende Realisierungskonzepte erscheinen für diese Betreibervariante weniger relevant, da es an einem strategischen Interesse großer privater Stakeholder hierfür fehlt.

Abbildung 32 Strategische Kooperation zwischen Straßen- und Mobilfunknetzbetreibern (Betreibervariante 3)



RSUs, die auch als Netzknoten⁶² für die Backend-V2X-Kommunikation bzw. für die generelle mobile Datenkommunikation ohne Verkehrsbezug (mithin als „normale“ Basisstationen) fungieren, wären ein Anreiz für Mobilfunknetzbetreiber, sich finanziell am Ausbau des Roadside Equipment zu beteiligen, da sie zur Verdichtung ihrer Zugangsnetze und damit zur Verbesserung ihrer am Markt verwertbaren Datenkommunikationsdienste beitragen. Ein geeignetes Vehikel für die Beteiligung könnten gemeinsame Joint Ventures sein. Mit dieser Betreibervariante sind aber einige kritische Punkte verbunden, die ihre tatsächliche Umsetzbarkeit erschweren könnten. Zum einen vermischen sich hier unterschiedliche öffentliche und privatwirtschaftliche Interessen in einem Träger für einen durchaus kritischen Infrastrukturbestandteil, was aus Sicht einer hoheitlichen Aufgabenwahrnehmung bedenklich sein kann. Zum anderen können auch nicht zu unterschätzende wettbewerbliche Bedenken dieser Betreibervariante entgegenstehen. Dies betrifft die nur schwer trennbare Doppelfunktion von RSUs in dieser Variante und damit die Gefahr einer unzulässigen Subventionierung des Netzausbaus im Mobilfunk. Außerdem wäre es evtl. fragwürdig, wenn Städte und Kommunen in ihrem Verantwortungsbereich mit einem bestimmten Netzbetreiber entsprechende strategische Vereinbarungen schließen und ihn damit gegenüber seinen Wettbewerbern bevorteilen. Zumindest diese Bedenken könnten mit einer gemeinsamen Beteiligung aller Netzbetreiber am gemischtwirtschaftlichen Träger ausgeräumt werden. Technisch (und ökonomisch) setzt eine RSU-Anbindung durch einzelne MNOs zugleich das Vorhandensein von Mechanismen zur anbieterübergreifenden Netznutzung (z. B. Roaming, vgl. Abschnitt 5.1.3) voraus.

Auch in einem Modell der strategischen Kooperation wird wieder der Bezug von Fremdleistungen weiterer privater Partner über entsprechende Austauschverträge erforderlich sein. Nutzungsentgelte können ggf. die Steuerfinanzierung (öffentlicher Teil) und die Querfinanzierung durch die entgeltlichen Datenkommunikationsdienste der Netzbetreiber (privater Teil) ergänzen. In Abwandlungen dieser Betreibervariante könnte auch die Betriebsverantwortung für die Verkehrsmanagementzentrale und die sonstige Verkehrstechnik an den gemischtwirtschaftlichen Träger ausgelagert werden. Ggf. sind dann zusätzliche privatwirtschaftliche Gesellschafter, z. B. die Verkehrstechnikausrüster, einzubeziehen.

8.3.3 Neuartige Wege der Infrastrukturfinanzierung

Die drei soeben dargestellten Grundvarianten stellen nur eine einleuchtende Auswahl der vielfältigen Möglichkeiten dar, die auf bekannten und erprobten PPP-Modellen basiert. Denkbar, aber aufgrund des Neulandcharakters und fehlender Erfahrungen mit großer Unsicherheit bezüglich Realisierbarkeit und Vorteilhaftigkeit behaftet, sind auch völlig neue Wege der Kooperation und Infrastrukturfinanzierung.

So ist es z. B. vorstellbar, dass beim Aufbau und Betrieb des Roadside Equipments ganz auf eine Marktlösung des Mobilfunksektors gesetzt wird. In diesem Fall obläge es der Bundesnetzagentur (und ggf. weiteren Regulierungsbehörden) im Rahmen der Netzregulierung dafür Sorge zu tragen, dass hoheitlichen und wettbewerblichen Belangen ausreichend Genüge getan wird. Grundsätzlich kommt neben monetären Leistungsvergütungen an private Partner für deren Beitrag zur öffentlichen Aufgabenwahrnehmung auch die freie oder vergünstigte Gewährung bzw. Zuerkennung von öffentlichen Ressourcen in Frage.

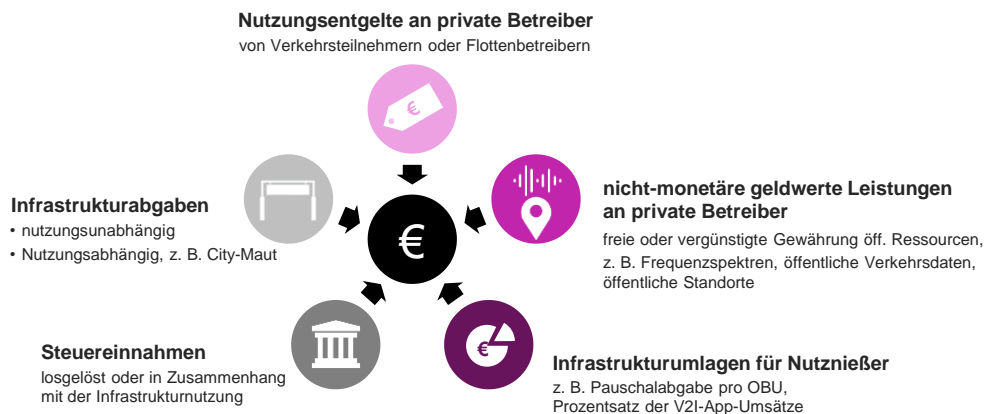
⁶² In Small-Cell-Architekturen ist hier die Unterscheidung zwischen der Baseband Unit und ihren Radio Frontends von Relevanz.

Dabei kann es sich beispielsweise um öffentliche (Verkehrs-)Daten, Teile des Frequenzspektrums oder um Standorte für Basisstationen handeln, die im öffentlichen Eigentum stehen.

In einem anderen Denkansatz könnte versucht werden, die indirekten Nutznießer von Effizienz- und Komfortverbesserungen an der Finanzierung des Roadside Equipment zu beteiligen, indem ein Teil der möglicherweise latent vorhandenen Zahlungsbereitschaft abgeschöpft wird. Eine solche ist insbesondere bei Automobilherstellern oder Applikations Providern zu vermuten, die mit V2I-Diensten (z. B. Interaktionen mit Lichtsignalanlagen) neue Geschäftsfelder erschließen und Zusatzgewinne erzielen. Insbesondere bei institutionellen Verkehrsteilnehmern, also z. B. Betreibern größerer Fahrzeugflotten, werden Kraftstoff- und Zeiteinsparungen unmittelbar in das wirtschaftliche Kalkül einbezogen. Zahlen sie für die Nutzung von V2I-Anwendungen Entgelte an private Anbieter, so könnte letztlich der Betreiber des Roadside Equipments einen Teil davon wieder als Infrastrukturumlage von den Anbietern einfordern, sofern die Anwendungen auf die Existenz der Infrastruktur angewiesen sind (vgl. [COBR2013]). Hier wären die Betreiber – in welcher Trägervariante auch immer – selbst gefordert, kreative Geschäftsmodelle zu entwickeln.

Die nachfolgende Abbildung 33 stellt in einer Übersicht noch einmal die in diesem Abschnitt sowie zuvor in 8.2 angesprochenen und grundsätzlich denkbaren Finanzierungsquellen für RSU-Infrastrukturen dar.

Abbildung 33 Finanzierungquellen für das Roadside Equipment



Dabei kann für die tatsächliche Finanzierung eines Infrastrukturbetreibers auch auf einen Mix aus verschiedenen Quellen zurückgegriffen werden (z. B. private Nutzungsentgelte der Verkehrsteilnehmer und Investitions- bzw. Betriebszuschüsse aus Steuergeldern). Zudem können Steuern und Abgaben zunächst in IVS-bezogene öffentliche Förderinstrumente (z. B. des BMVI oder der EU) fließen, die dann von Kommunen für entsprechende Infrastrukturmaßnahmen abgerufen werden können. Ein zunehmend wichtiges Prinzip für die nachhaltige Finanzierung von RSU-Infrastrukturen (bzw. allgemeiner: von IVS-Infrastrukturen) könnte künftig die Zweckbindung von bestimmten Steuereinnahmen bzw. Abgaben sein. Sofern es nur um die Finanzierung von kleinen Testfeldern geht, ist auch ein Sponsoring durch IKT-Unternehmen möglich.

Abschließend soll nun ein Vergleich der vorgestellten Grundvarianten für RSU-Betreibermodelle und ein Abgleich mit den Einführungsszenarien von Abschnitt 6.4 angestellt werden.

8.4 Vergleichende Gegenüberstellung und szenariospezifische Auswertung

Die im vorangegangenen Abschnitt 8.3 vorgestellten Betreibervarianten, weisen wie auch die ihnen zugrundeliegenden Trägermodelle öffentlicher Infrastrukturen spezifische Vor- und Nachteile für die öffentliche Hand auf. Ein vergleichender Überblick dazu ist Tabelle 14 zu entnehmen.

Tabelle 14 Vergleich ausgewählter Betreibervarianten

Betreibervariante	Vorteile	Nachteile
(1) Integrierter öffentlicher Träger	<ul style="list-style-type: none"> – Kaum Abhängigkeiten von externen Partnern (Erhalt der vollständigen Systemkontrolle) – Aufbau bzw. Erhalt und Erweiterung eigener System- und Technologiekompetenzen – keine langfristigen Vertragsbindungen – Synergien/Effizienzvorteile im Betrieb (alle Infrastrukturkomponenten unter einem Dach) 	<ul style="list-style-type: none"> – Überforderung öffentlicher Haushalte mit der Investitionsfinanzierung, und damit verbunden: verlangsamer Infrastrukturaufbau – Wirtschaftliches Risiko von Fehlentscheidungen bleibt beim öffentlichen Träger – Unzureichende Ausschöpfung von verfügbarem Spezialistenwissen (insb. beim Erstaufbau der Infrastruktur)
(2) Private Betreibergesellschaft für die IKT-seitige Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> – Schnellerer Infrastrukturaufbau durch die Aktivierung privaten Kapitals – Weitgehende Abwälzung des wirtschaftlichen Risikos auf private Partner – Langfristige Planungs- und Kalkulationssicherheit – Ausnutzung der Expertise spezialisierter Marktakteure – Planung, Errichtung und Betrieb in einer Hand (Effizienzvorteile) 	<ul style="list-style-type: none"> – Prinzipal-Agenten-Problem und damit verbundener Kontrollaufwand – Hoher Nachverhandlungs- und Anpassungsbedarf aufgrund der langfristigen Natur der Verträge und sich ändernder Anforderungen bzw. Randbedingungen (Konfliktpotentiale) – Hohe finanzielle und organisatorische Lasten im Falle der Insolvenz des privaten Betreibers (Rückfall der Aufgabenverantwortung auf öffentlichen Träger)
(3) Strategische Kooperation zwischen Straßen- und Mobilfunknetzbetreibern	<ul style="list-style-type: none"> – Sehr hohe intrinsische Motivation der Mobilfunknetzbetreiber für eine zügige Netzverdichtung → schneller Rollout – Aufteilung finanzieller Lasten und des wirtschaftlichen Risikos zwischen öffentlicher und privater Seite – Bester Zugang zur Expertise spezialisierter Marktakteure durch enge Kooperation, auch für eigenen Kompetenzausbau – Bessere Kontrollmöglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> – Langwieriger Planungs- und Vorbereitungsaufwand bezüglich der Gründung einer gemeinsamen PPP-Projektgesellschaft – Sehr hoher laufender Koordinationsaufwand – Fragliche Umsetzbarkeit (insb. wettbewerbliche Bedenken) – Nur in Einführungsszenario C sinnvoll

Zur ökonomischen Vorteilhaftigkeit der einzelnen Betreibervarianten können keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden, da in den einzelnen Modellen sowohl kostensenkende als auch kostensteigernde Effekte auftreten können. Hierzu wären separate Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen basierend auf den konkreten Kooperationsmodalitäten und Randbedingungen vor Ort erforderlich. Von herausragender Bedeutung ist eine lebenszyklusorientierte Betrachtung der Systemkosten, um nicht niedrigere Anfangs- durch deutlich höhere Folgekosten zu erkaufen. Grundsätzlich ist eine Lebenszyklusorientierung aber in allen drei Betreibervarianten umsetzbar.

Ein wesentlicher Vorteil der Variante 1 ist die Sicherstellung der nahezu vollständigen Kontrolle des öffentlichen Aufgabenträgers über alle Aspekte der Infrastrukturbereitstellung. Bei einer weitgehenden Auslagerung der operativen Aufgabenerfüllung an einen privaten Betreiber wie in Variante 2 tritt am stärksten das sog. Prinzipal-Agenten-Problem zutage. Der Agent – die Betreibergesellschaft – besitzt gegenüber ihrem Prinzipal – dem Konzessionsgeber – einen Wissensvorsprung aufgrund einer asymmetrischen Informationsverteilung, z. B. über seine eigenen Kompetenzen und die spezifischen Eigenschaften eingesetzter Technologien (hidden characteristics), über nicht beobachtbare bzw. tatsächlich angefallene Kosten (hidden information) und über bestehende Handlungsspielräume (hidden action). Diese Informationsasymmetrie kann der Agent unter Umständen zu seinem eigenen Vorteil und zu Ungunsten des Prinzipals ausnutzen. Variante 2 profitiert dafür von der Aktivierung und Nutzbarmachung privaten Kapitals und Know-hows, was einen schnelleren und effektiveren Infrastrukturaufbau ermöglichen kann. Variante 3 vereint zum Teil die Vor- und Nachteile der beiden anderen Betreibervarianten.

Werden die verschiedenen Einführungsszenarien aus Abschnitt 6.4 betrachtet, so lässt sich feststellen, dass jeweils unterschiedliche Betreibervarianten als besonders geeignet erscheinen.

Szenario A ist von einer sehr starken Verbreitung von WLAN-V2X und durch eine besonders hohe Relevanz von Verkehrssicherheits- und Verkehrseffizienzfunktionen geprägt. Auf Cellular-V2X basierende Systeme und Applikationen bleiben eher in der Nische. Die sich durchsetzenden V2X-Anwendungen können durch Backend-V2X-Systeme nicht in ausreichendem Maße umgesetzt werden und sind zum Teil auf das Vorhandensein einer extensiven RSU-Infrastruktur, zum Teil auch auf darin integrierte RSU-Clouds, angewiesen. Der Druck auf Städte, eine solche aufzubauen wird auch von der schon sehr hohen Verbreitung von WLAN-V2X-Ausstattungen im Fahrzeugbestand verschärft. Urbane Räume, die hier nicht mitziehen, drohen massiv an Standortattraktivität zu verlieren. Grundsätzlich könnte auch in diesem Zukunftsbild die Finanzierungs- und Betriebsverantwortung allein bei einem öffentlichen Träger liegen (Betreibervariante 1). Jedoch ist es sehr wahrscheinlich, dass die Mehrzahl der Städte bzw. Kommunen mit der Errichtung einer ausreichend dichten RSU-Infrastruktur in weiträumigen Einzugsgebieten überfordert sein werden – insbesondere, wenn dies in vergleichsweise kurzen Zeiträumen erfolgen soll, um mit der raschen Technologieverbreitung in den Fahrzeugbeständen mitzuhalten. In vielen Fällen wird daher in Szenario A die **Betreibervariante 2** die vorzuziehende Alternative sein. Für die konkrete Umsetzung von Betreibermodellen mit geeigneten privaten Partnern existieren viele verschiedene Ausgestaltungsmöglichkeiten, von denen sich voraussichtlich in den einzelnen Städten oder Stadtregionen auch unterschiedliche durchsetzen werden.

In **Szenario B** haben sich demgegenüber vor allem existierende Backend-V2X Systeme für den überwiegenden Teil der V2X-Anwendungen etabliert. Nur vergleichsweise wenige Fahrzeuge besitzen eine WLAN-V2X- oder Cellular-V2X-Ausstattung. Dementsprechend

niedrig ist auch der Druck, ein umfassendes Roadside Equipment im städtischen Verkehrsraum aufzubauen und zu betreiben. Die meisten der intensiv genutzten V2X-Anwendungen können mithilfe der Mobilfunknetze realisiert werden. Dabei kommen auch die zunehmende Verbreitung von Mobile Edge Clouds in ausgewählten Basisstationen und neue Funktionalitäten und Leistungsparameter mit der Migration zu 5G-NR dieser Lösungsvariante zugute. Von besonderer Bedeutung ist insbesondere in diesem Szenario, dass eine hinreichende Mobilfunkversorgung entlang der Verkehrswege auch für sehr hohe Nutzerzahlen sichergestellt wird. Daher bieten sich strategische Kooperationen von Städten mit Mobilfunknetzbetreibern (**Betreibervariante 3**) an, um auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht weniger attraktive (Kreuzungs-)Standorte mit Basisstationen bzw. Backend-V2X-Technologien auszustatten. Roadside Equipment für die V2I-Interaktion kommt in Szenario B nur punktuell an neuralgischen Punkten des Verkehrsnetzes (z. B. besonders gefährlichen oder staugefährdeten Streckenabschnitten und Verkehrsknoten) zum Einsatz. Die damit verbundenen Investitions- und Instandhaltungsaufwände halten sich aufgrund des eher geringen Umfangs in Grenzen. Obwohl dafür auch hier wieder ein sonstiger privater Betreiber für diese Infrastrukturanlagen in Betracht kommt (**Betreibervariante 2**), so spricht – sofern der Betrieb der existierenden Verkehrstechnik nicht bereits an einen solchen ausgelagert wurde – auch nichts dagegen, dass das Roadside Equipment zusätzlich zu den anderen Infrastrukturkomponenten des Verkehrssystems in öffentlicher Eigenregie finanziert und betrieben wird (**Betreibervariante 1**).

In **Szenario C** findet Cellular-V2X eine starke und rasche Verbreitung für Sicherheitsanwendungen im Verkehr. Es wird dabei durch Backend-V2X für Komfort- und Effizienz Anwendungen ergänzt, wohingegen sich WLAN-V2X langfristig nicht durchsetzen kann. In diesem Einführungsszenario treffen das öffentliche Interesse, V2X-basierte Anwendungen zur Vermeidung und Minderung von Personen- und Sachschäden voranzubringen, und das privatwirtschaftliche Interesse der Mobilfunknetzbetreiber, die Durchsetzung Cellular-V2X-basierter Technologien zu forcieren und die Netzverdichtung zu beschleunigen, aufeinander. Aufgrund der schnellen Verbreitung in den Fahrzeugbeständen ergibt sich ein starker Handlungsdruck für Städte und Kommunen, Roadside Equipment für V2I-Anwendungsszenarien aufzubauen. In einer solchen Konstellation erscheint die **Betreibervariante 3** als besonders vielversprechend. Eine enge Kooperation im Rahmen einer strategischen Partnerschaft könnte dafür sorgen, dass ein rasches Rollout in beiderseitigem Interesse gelingt. Alternative Umsetzungsmodelle für Szenario C könnten auch Betreibervariante 2 oder möglicherweise ein rein marktseitiger Ausbau durch die Mobilfunknetzbetreiber sein, wobei heute nicht absehbar ist, ob sich die öffentlichen Bedarfe mit dem Wirtschaftlichkeitskalkül und den funktionierenden Geschäftsmodellen der Privatwirtschaft ausreichend decken. Die Betreibervariante 1 macht in Szenario C weniger Sinn und überhaupt nur, insofern es sich um UE-type RSUs handelt. Ein in öffentlicher Trägerschaft befindliches Netz für die dann weitgehend hinfällige WLAN-V2X-Technologie wird nicht benötigt. Der Aufbau und Unterhalt einer öffentlichen Cellular-V2X-Infrastruktur erscheint nicht als zielführend.

Die nachfolgende Abbildung 34 fasst die szenariospezifische Eignung der diskutierten Betreibermodell-Varianten noch einmal visuell in Form einer Tabelle zusammen.

Abbildung 34

Szenariospezifische Eignung von Betreibermodellen für RSU-Infrastrukturen

Variante 1: Integrierter öffentlicher Träger	Variante 2: Private Betreibergesellschaft für IKT-seitige Infrastruktur	Variante 3: Strategische Kooperation mit Mobilfunknetzbetreibern
<p>Szenario A <small>Eingeschränkt: Bedarfe (Umfang/Tempo) überfordern Kommunen</small></p> <p>Szenario B</p> <p>Szenario C <small>Eingeschränkt: Bedarfe (Umfang/Tempo) überfordern Kommunen</small></p>	<p>Szenario A</p> <p>Szenario B</p> <p>Szenario C</p>	<p>Szenario B</p> <p>Szenario C</p>

Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden mögliche Betreibermodelle für die straßenseitige Infrastruktur eines V2X-Systems anhand von drei plausiblen Hauptvarianten diskutiert. Bei den Varianten handelt es sich um einen komplett integrierten öffentlichen Träger, eine private Betreibergesellschaft für die IKT-seitige Infrastruktur und um eine strategische Kooperation mit Mobilfunknetzbetreibern. Alle Varianten haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Weiterhin sind einige Varianten mit Einschränkungen bezüglich der möglichen Einführungsszenarien verbunden.

Die dritte Variante (eine Kooperation der Stadt bzw. Kommune mit MNOs erscheint vorteilhaft in den Szenarien B und C, vor allem wegen der notwendigen Mobilfunkabdeckung entlang der Verkehrswege und dem Interesse der Netzbetreiber an einem leichten Zugang zu guten Mobilfunkstandorten im Zuge der anstehenden Netzverdichtung. Dabei könnte eine solche Kooperation die Ausrüstung der aus Netzbetreibersicht attraktiven Kreuzungen mit einer Auflage zur Ausrüstung aller für Sicherheits- und Effizianzenwendungen sinnvollen (auch aus MNO-Sicht unattraktiven) Verkehrsknotenpunkte verbinden. Insgesamt ist die Ausgestaltung der Kooperation (Kostenverrechnung, konkretes PPP-Trägermodell u. ä.) vielgestaltig möglich und muss verschiedene Verfahrenselemente wie Baugenehmigungen, Möglichkeiten der Wege- und Leerrohrmitbenutzung berücksichtigen. Dazu sind Detailuntersuchungen notwendig, sobald die Grundsatzentscheidung für eine Betreibervariante getroffen ist.

9 Zusammenfassung und Strategieentwicklung

In den vorigen Abschnitten des vorliegenden Konzeptes wurden nach der Vorstellung der Methodik im technischen Teil die V2X-Anwendungsfelder identifiziert und deren Anforderungen bestimmt sowie eine Bewertung der V2X-Technologien vorgenommen. Anschließend wurden drei Einführungsszenarien für V2X-Technologien abgeleitet. Im ökonomischen Teil des Konzeptes erfolgte dann eine Kostenanalyse des Gesamtsystems und für die drei Einführungsszenarien eine Kostenabschätzung am Fallbeispiel der Stadt Berlin sowie eine Analyse möglicher Betreibermodelle.

In diesem Abschnitt wird in Grundzügen ein methodischer Ansatz beschrieben, mit dem Handlungsoptionen und Strategien zur Einführung von V2X-Technologien und zur bestmöglichen Ausschöpfung ihrer Potentiale aus der Perspektive einer Stadt bzw. Kommune entwickelt werden können. Mit Hilfe dieser Methodik werden schlussendlich Erfolgsfaktoren und für vier beispielhaft ausgewählte und plausible Strategien erläutert.

9.1 Methodischer Ansatz zur Strategiebestimmung einer Stadt bzw. Kommune

Die gewonnenen Erkenntnisse zu den technischen und ökonomischen Aspekten und Zusammenhängen der V2X-Kommunikationstechnologien können genutzt werden, um geeignete und zielführende Strategien zur Technologieeinführung zu entwickeln. Zur Unterstützung bei dieser Aufgabe soll an dieser Stelle eine Methode vorgeschlagen werden, die auf drei Schritten basiert (siehe Abbildung 35):

- 1 Bestimmen des Status Quo,
- 2 Definieren der Zielposition und
- 3 Ableiten von Handlungsempfehlungen zur Zielerreichung.

Abbildung 35 Methodischer Ansatz zur V2X-Positionierung einer Stadt/Kommune



Diese drei Schritte werden im Folgenden erläutert.

1. Bestimmung des Status Quo der Stadt bzw. Kommune („Wo sind wir jetzt?“):

In Anlehnung an Smart-City-Indizes, wie z. B. dem „Smart City Strategy Index“ [BERG2017] oder dem „IESE Cities in Motion Index“ [IESE2017] kann der aktuelle Ist-Zustand einer Stadt bzw. Kommune hinsichtlich ihres Verkehrssystems anhand von geeigneten Bemessungskriterien ermittelt werden. Typische und hier vorgeschlagene Kriterienklassen umfassen hauptsächlich:

- den **Problemdruck** des städtischen bzw. kommunalen Verkehrs (Personen- und Sachschäden durch Unfälle, Staus, Emissionsbelastungen etc.),
- die **technologische Ausstattung** der Stadt bzw. Kommune (Verkehrsinformations- und -beeinflussungssysteme, Breitbandanbindung der Verkehrswege und -anlagen, Art der Lichtsignalsteuerung, bereits verfügbare IVS-Anwendungen etc.) und
- die **relative Position** (bzgl. Problemdruck und technologischer Ausstattung) im Vergleich zu ähnlichen Benchmark-Städten

2. Definition der Zielposition („Wo wollen wir hin und bis wann?“):

Die Zieldefinition beinhaltet eine Roadmap zur Umsetzung von V2X-Anwendungsfeldern, idealerweise eine detaillierte Aufstellung von V2X-Anwendungen und dem Zeitpunkt zu dem sie verfügbar sein sollen. Die Definition der Zielposition impliziert auch die Selbstpositionierung der Stadt bzw. Kommune bei Grundsatzentscheidungen zur Technologieeinführung im Kontext von Technologielebenszyklen. Im Rahmen des vorliegenden Konzeptes unterscheiden wir zwischen drei strategischen Rollen bezüglich des Timings der V2X-Technologieeinführung (in zeitlich aufsteigender Reihenfolge):

- **„Vorangehender Profiteur“** (auch „Innovator“ oder „Early Adopter“): Durch die frühe V2X-Technologieeinführung kann bei der richtigen Technologieentscheidung der maximale Nutzen aus dem Intelligenten Verkehrssystem hinsichtlich Sicherheits-, Effizienz- und Komfortverbesserungen erzielt werden. Gleichzeitig ist die frühe Technologieentscheidung von einem hohen Risiko geprägt, da sich im weiteren Verlauf des Technologielebenszyklus eine andere Technologievariante durchsetzen kann als die, welche von der Stadt bzw. Kommune eingeführt wurde.
- **„Abwägender Umsetzer“** (auch „Early Majority“): Mit der Verzögerung der Technologieeinführung sinkt auf der einen Seite das Risiko von falschen Investitionsentscheidungen. Auf der anderen Seite können somit aber die Auswirkungen akuter Verkehrsprobleme nicht zeitnah durch den Einsatz von auf V2X-Technologien basierenden Anwendungen vermindert werden. Die Vorteile der Technologie können erst ab einem späteren Zeitpunkt ausgenutzt werden, ggf. nachdem vergleichbare Städte bzw. Kommunen sie bereits eingeführt haben.
- **„Besonnener Nachzügler“** („Late Majority“ bis hin zu „Laggards“): Bei der Abwägung zwischen Kosten und Nutzen wartet die Stadt bzw. Kommune die technologischen Entwicklungen ab und führt V2X-Technologien erst ein, wenn eine risikoarme Investitionsentscheidung für eine der Technologievarianten getroffen werden kann sowie Erfahrungswerte anderer Städte bzw. Kommunen vorliegen. Es ist klar, dass hier der Nutzensvorteil der V2X-Technologien erst mit einer langen zeitlichen Verzögerung zum Tragen kommen kann und dringende Verkehrsprobleme durch andere (konventionelle) Maßnahmen gelöst werden müssen, die ebenfalls mit spezifischen Kosten verbunden sind.

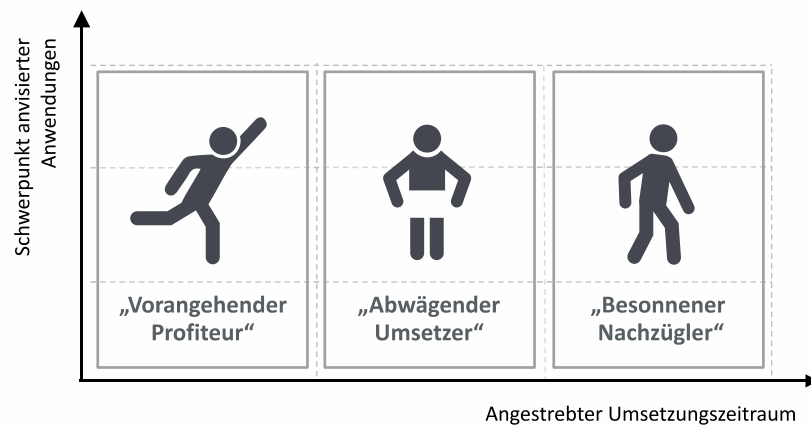
3. Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Zielerreichung („Was müssen wir dafür tun?“):

Handlungsempfehlungen umfassen eine Vielzahl von technischen und ökonomischen Aspekten und müssen im Kontext der gewählten strategischen Rollen entwickelt werden. Technische Aspekte umfassen hauptsächlich die grundlegende Entscheidung für eine (oder mehrere) Technologievariante(n) sowie die damit verbundenen Randbedingungen für die Umsetzung der anvisierten Anwendungsklassen. Ökonomische Aspekte betreffen insbesondere die identifizierten Kostenblöcke mit den zugeordneten Stakeholdern sowie die Wahl geeigneter Rollout-Strategien und Betreibermodelle für den Infrastrukturaufbau.

Zur Entscheidungsunterstützung wird in dem vorliegenden Konzept die „Portfolio“-Methode vorgeschlagen. Dabei handelt es sich um eine in der Praxis bewährte Methode des strategischen Managements, um markt-, ressourcen- oder wertorientiert Strategien abzuleiten, die in ihrer Gesamtheit die strategischen Ziele eines Unternehmens auf hohem Niveau erfüllen. Die abzuleitenden Strategien können sich dabei auf das Gesamtunternehmen, einzelne Funktionsbereiche oder übergreifende Gestaltungsprobleme beziehen. Portfolio-Strategien sind grundsätzlich auch für Städte und Kommunen geeignet.

Abbildung 36

Prinzip des V2X-Portfolios mit angestrebten Rollen der Stadt/Kommune



Die Positionierung einer Stadt oder Kommune bzgl. der Einführung von V2X-Technologien und -Anwendungen in ihrem lokalen Verkehrssystem stellt ein solches übergreifendes Gestaltungsproblem dar, auf welches die Portfolio-Methode hier adaptiert werden soll (siehe Abbildung 36). Das Portfolio illustriert die Schwerpunkte der insgesamt anvisierten Anwendungen in Relation zum angestrebten Umsetzungszeitraum. Die drei strategischen Rollen („Voranehender Profiteur“, „Abwägender Umsetzer“ und „Besonnener Nachzügler“) können dabei direkt dem anvisierten Umsetzungszeitraum zugeordnet werden. Darüber hinaus können in das Portfolio auch die zum jeweiligen Umsetzungszeitraum verfügbaren Technologien eingetragen werden. Ziel des Portfolios ist es, zur eigenen V2X-Positionierung passende und zielführende V2X-Einführungsstrategien zu bestimmen. Diese Bestimmung wird über der Definition von Aktionsfeldern erreicht – Portfoliobereichen, welche die Zielposition der Stadt bzw. Kommune repräsentieren.

9.2 Strategieentwicklung und Handlungsempfehlungen

Zur Ableitung der Strategie und konkreter Handlungsempfehlungen werden zunächst die Anwendungsfelder und -klassen sowie die verfügbaren V2X-Technologien zeitlich eingeordnet. Dabei wird im hier vorgeschlagenen Portfolio beim Schwerpunkt anvisierter Anwendungen zwischen den Anwendungsfeldern Sicherheit, Effizienz und Komfort und beim angestrebten Umsetzungszeitraum zwischen kurzfristig (1 – 3 Jahre), mittelfristig (3 – 7 Jahre) und langfristig (> 7 Jahre) unterschieden. Ein Portfolio könnte durchaus aber auch eine andere Aufteilung haben.

Abbildung 37 stellt die frühestmögliche Umsetzung der im Abschnitt 4.2 identifizierten Anwendungsklassen (AK1 – 7) dar. Dabei ist festzustellen, dass nicht alle Anwendungsklassen kurzfristig umgesetzt werden können, da sich AK3 („Sensordatenaustausch des lokalen Verkehrsgeschehens“) und AK4 („Teleoperiertes Fahren“) noch in der Entwicklung

befinden bzw. die dafür notwendigen technischen oder regulatorischen Nutzungsanforderungen noch nicht erfüllt sind. Die Abbildung impliziert auch, dass bei potentiellen Strategien mit einer späteren Umsetzung alle identifizierten Anwendungsklassen gleichzeitig umsetzbar wären.

Abbildung 37

V2X-Portfolio: Frühestmögliche Umsetzungszeitraum der identifizierten Anwendungsklassen

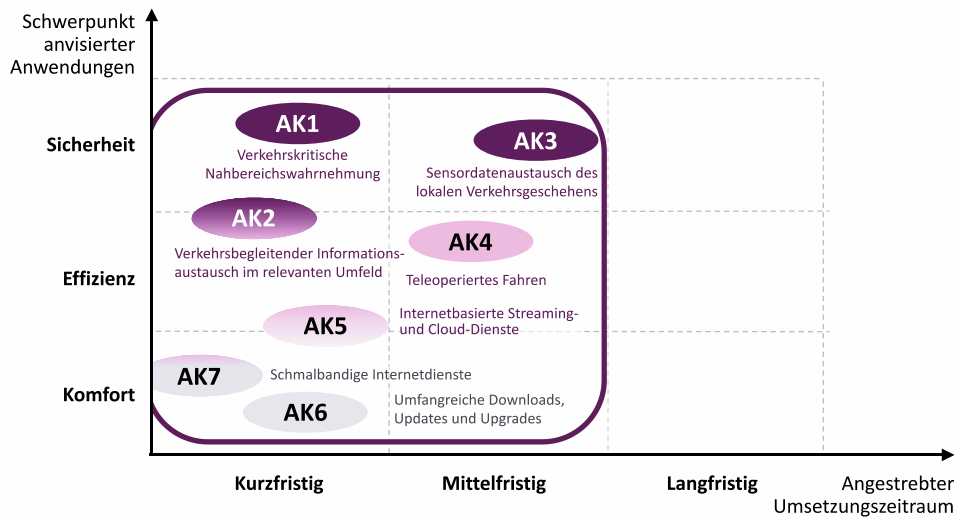


Abbildung 38 illustriert den möglichen Einsatzzeitraum der Technologievarianten und ordnet sie den Anwendungsfeldern zu: WLAN-V2X und Cellular-V2X decken die gleichen Anwendungsfelder ab, wobei der zeitliche Entwicklungsvorsprung von WLAN-V2X für eine kurzfristige Umsetzung genutzt werden kann. Backend-V2X wird bereits heute für eine Reihe von Komfort- und Effizienz Anwendungen eingesetzt, welche ähnlich zu den in AK7 („schmalbandige Internetdienste“) enthaltenen Anwendungen sind. Backend-V2X steht auch in späteren Umsetzungszeiträumen für diese Anwendungsfelder zur Verfügung. Auch wenn die Prognosegenauigkeit bei langfristigen Entwicklungen immer eher ungenau ist, kann sehr langen Frist davon ausgegangen werden, dass zukünftige Mobilfunkgenerationen dann zusätzlich die höheren Anforderungen von anspruchsvollen Sicherheitsanwendungen erfüllen werden.

Abbildung 38 V2X-Portfolio: Möglicher Einsatzzeitraum der Technologievarianten

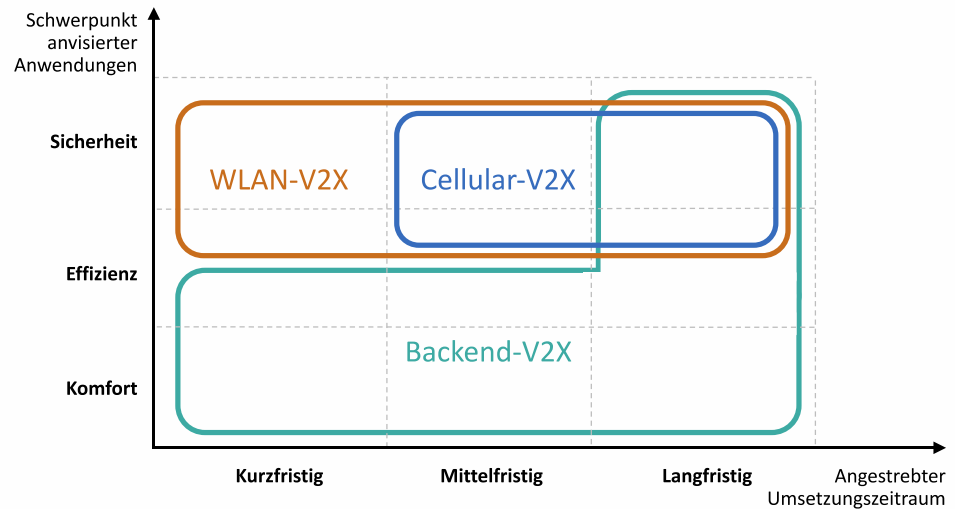
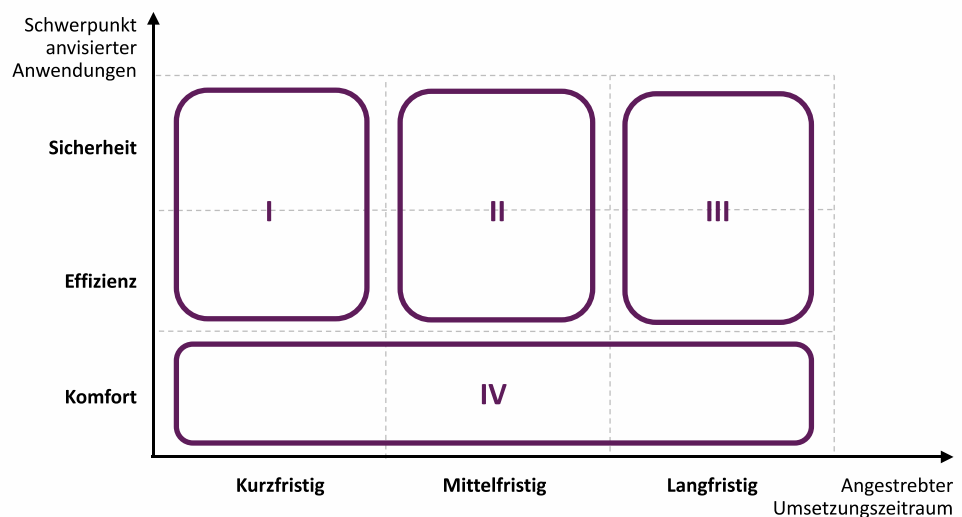


Abbildung 39 sowie die nachfolgenden Tabelle 15 und Tabelle 16 veranschaulichen die Ableitung geeigneter Handlungsempfehlungen anhand von vier beispielhaft definierten Aktionsfeldern. Grundsätzlich ist anzumerken, dass jede Kommune bzw. Stadt bei der Festlegung von Aktionsfeldern ihre eigene Einordnung und Priorisierung vornehmen sollte, so dass sich individuelle Aktionsfelder von den hier vorgestellten unterscheiden können.

Abbildung 39 V2X-Portfolio: Beispielhaft ausgewählte Aktionsfelder



In Abbildung 39 werden vier prototypische Aktionsfelder vorgeschlagen, welche die Möglichkeiten im Raster des Portfolios (Umsetzungszeitraum, Schwerpunkt der Anwendungen) bereits sinnvoll cluster bzw. zusammenfassen. Die **Aktionsfelder I, II und III** zielen auf eine Realisierung von Sicherheits- und Effizienzanwendungen, entsprechend unterschiedlicher Umsetzungszeiträume (kurzfristig, mittelfristig, langfristig), ab. In **Aktionsfeld IV** wird über alle Umsetzungszeiträume allein auf die Realisierung von Komfortanwendungen gesetzt.

Alle Aktionsfelder haben ihre Vor- und Nachteile. So ermöglicht die Umsetzung zeitnaher Aktionsfelder es, die individuellen und gesamtgesellschaftlichen Vorteile der Anwendungen auch schon frühzeitig zu realisieren und so die beschriebenen übergeordneten Ziele aus Perspektive der Stadt bzw. Kommune früh zu erreichen, also die Verkehrssicherheit zu erhöhen oder akute Probleme, wie zu hohe Emissionsbelastungen, durch eine verbesserte Verkehrslenkung zu reduzieren. Bei langfristigen Aktionsfeldern sind neben der späteren Nutzenrealisierung neuer V2X-Anwendungen auch mögliche Mehraufwände für den Weiterbetrieb von Systemen auf Basis veralteter Technologien als nachteilig anzusehen. Auf der anderen Seite profitiert eine Positionierung in langfristigen Aktionsfeldern von weiter stattfindenden Technologie-Fortentwicklungen und dem im Zeitverlauf klarer werdenden Ausgang des sich vollziehenden Wettbewerbs konkurrierender Technologien. Dementsprechend ergibt sich eine Reduzierung des Risikos auf unausgereifte oder sogar langfristig obsolete Technologien zu setzen sowie eine Reduzierung der generellen Kosten für die Umsetzung.

Dieses Spannungsfeld ist in Tabelle 15 aufgezeigt. Während frühzeitige Aktionsfelder nur mit bestimmten Technologien in bestimmten Szenarien realisierbar sind, ergeben sich für langfristige Felder alle Optionen.

Tabelle 15

Einordnung der ausgewählten Aktionsfelder mit möglichen Einschränkungen bezüglich Technologie und Einführungsszenario

Aktionsfeld	Angestrebte Positionierung	Mögliche Technologien	Funktioniert bei Einführungsszenario
I	„Vorangehender Profiteur“	Nur WLAN-V2X (tlw. Backend-V2X)	Nur A
II	„Abwägender Umsetzer“	WLAN-V2X oder Cellular-V2X (tlw. Backend-V2X)	A oder C
III	„Besonnener Nachzügler“	Alle	A, B oder C
IV	Alle	Nur Backend-V2X	Allen

Tabelle 16 fasst für die einzelnen Aktionsfelder die primären Erfolgsfaktoren, die eine Umsetzung begünstigen, sowie die schlussendlichen Handlungsempfehlungen zusammen.

Tabelle 16

Primäre Erfolgsfaktoren und Handlungsempfehlungen für die ausgewählten Aktionsfelder

Aktionsfeld	Primäre Erfolgsfaktoren	Handlungsempfehlungen
I	Gesicherte Finanzierung, WLAN-V2X Verbreitung	<ul style="list-style-type: none"> – Präzise V2X-Roadmap und RSU-Rolloutplanung entwickeln – Aktuelle Förderprogramme prüfen und nutzen – WLAN-V2X-Infrastrukturaufbau durchführen
II	Technologie-Wettbewerb	<ul style="list-style-type: none"> – Vorbereitend technologieneutrale Basisinfrastrukturen schaffen – szenariospezifische Betreibermodelle entwickeln – Langfristige Roadmap entwickeln
III	Zeitlicher Entwicklungs-vorteil	<ul style="list-style-type: none"> – Etablierung einer dominanten V2X-Technologie abwarten – Aktives Technologie-Monitoring betreiben – Ersterfahrungen anderer Kommunen auswerten
IV	Datengetriebene Geschäftsmodelle (z. B. von OEMs oder Mobilitätsdienstleistern)	<ul style="list-style-type: none"> – Koordinierende Rolle einnehmen – Datenmodelle entwickeln – Begleitenden Breitbandausbau sicherstellen

Für Aktionsfeld I gelten als wichtigen Erfolgsfaktoren eine **gesicherte Finanzierung** sowie die **Verbreitung von WLAN-V2X**, weil nur diese Technologie eine sofortige Umsetzung ermöglicht. Die WLAN-V2X Verbreitung könnte begünstigt werden durch ein klares Bekenntnis der Automobilindustrie und den selbstverstärkenden Effekt durch einen politisch forcierten bzw. EU-weit geförderten Infrastrukturausbau in Städten und Kommunen. Neben der freiwilligen Selbstverpflichtung sehen Experten eine „Mandatierung“, also die gesetzlich verpflichtende Einführung als Möglichkeit der Verbreitung. Je früher eine solche Mandatierung wirksam werden würde, umso eher ist mit einer letztendlichen Durchsetzung von Szenario A zu rechnen (vgl. [REBB2017]). Als Handlungsempfehlungen dieses Aktionsfeldes sind die zügige **Erarbeitung einer präzisen V2X-Roadmap** und die sich anschließende **RSU-Rolloutplanung** zu nennen. Zudem sind tragfähige Finanzierungsmodelle zu finden und umzusetzen. Hierzu verweisen u. a. auch die Experten auf **aktuelle Förderprogramme** (z. B. der EU oder auch des BMVI) für einen frühzeitigen Ausbau und die Umsetzung der Day-1-Anwendungen. Eine wichtige Applikation für die Stadt wäre dabei das „Green Light Optimal Speed Advisory“ zur Verflüssigung des Verkehrs. Hier betreffen konkrete Aufgaben die Ertüchtigung von LSAs zur Übertragung ihrer Restlaufzeiten, wie es bereits in den Projekten des Digitalen Testfelds Stadtverkehr erforscht und umgesetzt wird.

Aktionsfeld II profitiert vom Erfolgsfaktor des **Technologie-Wettbewerbs** zwischen WLAN-V2X und Cellular-V2X (bis hin zur möglichen kompletten Verdrängung einer Technologie). Entsprechend ist die Unsicherheit über die sich durchsetzende(n) Technologie(n) bereits gesunken und auch die Anschaffungspreise sind durch Skaleneffekte schon geringer als in Aktionsfeld I. Auch hier gibt es Empfehlungen für aktive Handlungen, die bereits jetzt begonnen werden können. Als wichtige **vorbereitende Tätigkeiten** sollte eine **technologieneutrale Basisinfrastruktur geschaffen** werden. Beispielsweise ist es vorteilhaft, wenn Verwaltungsprozesse geprüft und angepasst werden oder im Rahmen der regelmäßigen Instandhaltung und Erneuerung von Verkehrstechnik die Backend-Anbindung und -Infrastruktur (Kommunikation, Server) entsprechend des Masterplanprozesses Verkehrstelematik ausgebaut werden. Mit konkretem Bezug zum Digitalen Testfeld Stadtverkehr und Projekten wie Safari [SAFARI2017] ist die Schaffung von technologie- und herstellerunabhängigen Schnittstellen an LSAs eine nützliche Maßnahme.

In Aktionsfeld III wird sich der **zeitliche Entwicklungsvorteil** stark auf den Erfolg auswirken. Durch den langfristigen Horizont kann die Anzahl der Technologieoptionen verringert und das Risiko technologischer Fehlentscheidungen minimiert werden. Weiterhin können technologische Weiterentwicklungen berücksichtigt werden, die derzeit noch nicht abgeschätzt werden können. Das betrifft insbesondere die langfristige Weiterentwicklung des Mobilfunks („Beyond 5G“), der bei einer weiteren Leistungssteigerung im Vergleich zu 5G die Anforderungen für alle mobilitätsbezogenen Anwendungen erfüllen könnte. Andere technologische Weiterentwicklungen betreffen aber auch WLAN-11p („V2X Next Generation“) sowie alternative Kommunikationstechnologien (z. B. mmWave, Visible Light Communication VLC) für einen anwendungsspezifischen Einsatz. Dementsprechend ergibt sich neben der eher passiven Handlungsempfehlung des **Abwartens** auch die Empfehlung eines strukturierten und **aktiven Technologie-Monitorings** der technischen Entwicklung sowie der Entscheidungen in anderen Regionen zu WLAN-V2X und Cellular-V2X. Dies betrifft generell regulatorisch-rechtliche Entwicklungen, die Veränderung von Verfügbarkeiten, Marktpreisen und zurzeit erfüllbaren Technologieanforderungen sowie Anforderungen neuer Anwendungsgebiete wie die Kommunikationsunterstützung der Fahrzeugautomatisierung.

In Aktionsfeld IV werden aktuell umgesetzte bzw. weiterentwickelte **Geschäftsmodelle von Internet-basierten Mobilitätsservices (z. B. bei OEMs)** dem Erfolg bzgl. der Leistungsfähigkeit und Nachhaltigkeit des urbanen Verkehrssystems und der Zufriedenheit seiner Verkehrsteilnehmer dienen. Bereits heute werden viele Investitionen und Handlungsaufwände durch privatwirtschaftliche Unternehmen, wie die Fahrzeughersteller und -zulieferer, Mobilitäts-Startups aber auch bestehende Internetgiganten, getragen. Die rein privatwirtschaftliche Umsetzung ist jedoch kein Selbstläufer. Neben dem allgemein begrüßenswerten Breitbandausbau ist besonders die Entwicklung von **datengetriebenen Geschäftsmodellen** unter Beteiligung der Stadt bzw. Kommune hervorzuheben. Diese Geschäftsmodelle benötigen Konzepte, um erhobene Daten Dritten, d. h. Service Providern oder Nutzern, zur Verfügung stellen zu können und den Datengebern die Souveränität über ihre Mobilitätsdaten und Sicherheit entlang der Verarbeitungs- und Wertschöpfungskette zu garantieren. Städte und Kommunen sind dabei sowohl in der Rolle des Datengebers als auch des -nutzers. Sie nehmen eine **koordinierende Rolle** zwischen verschiedenen Stakeholdern ein, um vor allem auch die eigenen Anforderungen umzusetzen – beispielsweise mit Komfortanwendungen, die durch individualisierte (Routen-)Informationen die Verkehrswege- und Verkehrsmittelwahl einzelner Nutzer in der Masse entsprechend gesamtheitlicher Interessen der Stadt bzw. Kommune (Verkehrssituation in Wohngebieten, lokale Emissionen durch Verkehr) beeinflussen. Zu dieser Rolle gehört u. a. die Unterstützung der verbesserten Mobilfunkabdeckung (auch mit Small Cells) entlang der Verkehrswege.

Zusammenfassung

In diesem letzten Abschnitt wurden methodische Wege aufgezeigt, mit deren Hilfe Städte bzw. Kommunen für die nächsten Jahre geeignete Strategien und Maßnahmen bei einem Vorliegen unterschiedlicher Technologieeinführungsszenarien ableiten können. Kernelement ist das V2X-Portfolio, mit dem ausgehend vom Status Quo die individuell gewünschte Zielpositionierung hinsichtlich Kooperativer Intelligenter Verkehrssysteme (C-ITS) definiert werden kann.

Hinsichtlich des Timings der V2X-Technologieeinführung vor Ort wurden drei strategische Rollen („Vorangehender Profiteur“, „Abwägender Umsetzer“ und „Besonnener Nachzügler“) definiert, die eine Stadt bzw. Kommune einnehmen kann. Dabei sind aus der individuellen Perspektive der betreffenden Entscheidungsträger zunächst Präferenzen und Prioritäten festzulegen, an welchen sich dann die jeweils als relevant erachteten Aktionsfelder ausrichten. So ist es durchaus denkbar, dass für eine konkrete Stadt wie Berlin mehrere Handlungsempfehlungen aus verschiedenen der in diesem Konzept nur beispielhaft abgegrenzten Aktionsfeldern relevant werden.

Grundsätzlich ist empfehlenswert, zunächst Strategien zu identifizieren, die szenarioübergreifend sinnvoll sind. Sofern nicht das Risiko eingegangen werden soll, konsequent auf eines der Einführungsszenarien zu setzen (welches womöglich nie Realität wird), besteht die Möglichkeit Kompromissstrategien zu finden. Diese Kompromissstrategien versprechen in allen Szenarien zumindest befriedigende Ergebnisse. Alternativstrategien können auch „in der Schublade“ vorgehalten oder Teilentscheidungen zurückgestellt werden bis sich ein klareres Bild von der Zukunft abzeichnet.

Glossar

Anwendungsszenarien	Konkrete Anwendungsfälle (Use Cases), die im Zusammenhang mit der Mobilität von Personen und Gütern stehende Funktionalitäten eines technischen Systems beschreiben.
Backend-V2X	Konkrete technologische Realisierung einer infrastrukturbasierten Kommunikationsanbindung an Hochgeschwindigkeitsverkehrsnetze (z. B. Internet).
Betreibermodell	Beschreibung der Eigentumsverhältnisse, der Finanzierungsformen und der Zuständigkeiten für die Errichtung und den späteren Betrieb von V2X-Infrastrukturen.
BS-type RSU	Roadside Unit, die in Cellular-V2X mit der Basisstation des Mobilfunknetz kolloziert und damit in das Mobilfunknetzwerk eingebunden ist (im Gegensatz zur UE-type RSU)
Cellular-V2X	Technologiepfad, welcher konkrete Realisierungen von direkten Kommunikationstechnologien basierend auf den Mobilfunkstandards 3GPP LTE-V (Rel.14) und dessen Weiterentwicklungen umfasst
Cloud Computing	Verlagerung von Datenspeicherung und -verarbeitung in räumlich weit entfernte, zentrale Rechenzentren
Deskriptor	Beschreibungsfaktor, der zur inhaltlichen Charakterisierung eines Szenarios dient. Für kritische Deskriptoren werden alternative Ausprägungen als plausibel angesehen, während für unkritische Deskriptoren einwertige Prognosen abgegeben werden.
Edge Computing	Verlagerung von Datenspeicherung und -verarbeitung in räumlich nah zum Anwender liegende, dezentrale Knoten am „Rand“ des Kommunikationsnetzwerks (Edge)
Einführungsszenarien	Realistische Zukunftsbilder für die Einführung von V2X-Kommunikationstechnologien, die auf fundierter Basis das Spektrum möglicher Entwicklungen aufzeigen. Sie beschreiben die Relevanz unterschiedlicher Technologiepfade und die Geschwindigkeiten bei der Systemeinführung.
Entwicklungskriterium	Nicht-technisches Kriterium für eine Technologiebewertung mit Fokus auf marktbezogene und regulatorische Rahmenbedingungen
Funktionales Kriterium	Technisches, nur qualitativ bewertbares Kriterium für eine Technologieanalyse
Intelligente Transportsysteme	Siehe -> Intelligente Verkehrssysteme
Intelligente Verkehrssysteme	System zur Nutzung verkehrsbezogener Daten mit dem Ziel der Optimierung von Effizienz, Sicherheit, Komfort und Nachhaltigkeit des Straßenverkehrs
Kollaboratives Fahren	Höchste Entwicklungsstufe des kooperativen Fahrens, bei der aufeinander abgestimmte Fahrmanöver zwischen Verkehrsteilnehmern vorgeschlagen und verbindlich ausgehandelt werden
Kommunikationstechnologie	System zum Austausch von Daten zwischen einzelnen oder mehreren Endknoten. Enthält immer eine Zugangstechnologie (im Falle von V2X-Kommunikation einen Zugang zum drahtlosen Funkkanal)
Kooperatives Fahren	Zusammenspiel von Verkehrsteilnehmern auf der Grundlage von expliziter Kommunikation oder implizit geteilten Informationen
Lebenszykluskosten (auch Total Cost of Ownership)	Gesamtheit aller über den Zeitraum des Bestehens eines technischen Systems anfallenden Kosten
Leistungskriterium	Technisches, quantifizierbares Kriterium zur Bewertung von Technologien
Nutzwertanalyse	Methodik des Technologiemanagements zur Reduktion komplexer Zielsysteme und Wirkzusammenhänge auf entscheidbare Strukturen
Privacy	Schutz personenbezogener Daten vor Missbrauch bei ihrer Speicherung, Übermittlung, Verarbeitung

Security/IT-Security	Schutz vor Angriffen auf IT-Systeme sowie deren Erkennung und Abwehr.
Streaming	Kontinuierliche Übertragung von Daten
Teleoperiertes Fahren	Übernahme der Fahraufgabe durch einen externen (sich außerhalb des Fahrzeugs befindlichen) Operator.
UE-type RSU	Roadside Unit, die in Cellular-V2X als Endgerät mit dem Mobilfunknetz verbunden ist (im Gegensatz zur BS-type RSU)
V2X-Stakeholder	Beteiligte und betroffene Akteursgruppen der Einführung und des Betriebs von V2X-Systemen
V2X-System (Vehicle-to-Everything)	Umfangreiches System zur Realisierung von Intelligenten Transport Systemen basierend auf der Kommunikation von Fahrzeugen mit Netzknotten unterschiedlicher Art. (Fahrzeuge: Vehicle-to-Vehicle [V2V], verkehrstechnische Infrastrukturkomponenten: Vehicle-to-Infrastructure [V2I], Backend-Server: Vehicle-to-Network [V2N], Fußgänger: Vehicle-to-Pedestrian [V2P]). Enthält Applikationen, Datenhaltung, IT-Security-Konzepte, Kommunikationstechnologien u. v. m.
WLAN-V2X	Technologiepfad, welcher konkrete Realisierungen von direkten Kommunikationstechnologien basierend auf den Standards ETSI ITS G5 und IEEE 802.11p (IEEE 1609) umfasst

Abkürzungsverzeichnis

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G	5. Generation
5G-AA	5G Automobile Association
5G-NR	5G New Radio
5G-PPP	5G Public Private Partnership
AAA	Authentifizierung, Autorisierung und Accounting
AK	Anwendungsklasse
ASECAP	European Association of Operators of Toll Road Infrastructures
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
BSS	Basic Service Set
BTP	Basic Transport Protocol
CAM	Cooperative Awareness Message
CAN	Controller Area Network
C2C-CC	Car-2-Car Communication Consortium
CAPEX	Capital Expenditure
CCH	Control Channel
CCMS	Cooperative ITS Credentials Management System
CEDR	Conference of European Directors of Roads
C-ITS	Cooperative ITS
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
DCC	Decentralized Congestion Control
DENM	Decentralized Environmental Notification
DL	Downlink
E	Entwicklungskriterien
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
EN	European Norm
EG	Erfüllungsgrad
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
F	Funktionale Kriterien
FDD	Frequency Division Duplex
FEC	Forward Error Correction
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
IP	Internet Protocol

IT	Informationstechnologie
ITS	Intelligent Transport Systems
IVS	Intelligente Verkehrssysteme
L	Leistungskriterien
LDM	Live bzw. Local Dynamic Map
LIDAR	Light Detection and Ranging
LSA	Lichtsignalanlage
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE-Advanced
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
MCS	Modulation and Coding Scheme
MEC	Mobile Edge Cloud
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMTC	Massive Machine Type Communications
MNO	Mobile Network Operator (Mobilfunknetzbetreiber)
NFV	Network Function Virtualization
NGNM	Next Generation Mobile Networks
OBU	On Board Unit
OCB	Outside the Context of a BSS
OCIT	Open Communication Interfaces for Road Traffic Control Systems
OEM	Original Equipment Manufacturer
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operating Expenses
PHY	Physical Layer
PPP	Public Private Partnership
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QoS	Quality of Service
RADAR	Radio Detection and Ranging
RSE	Roadside Equipment
RSU	Roadside Unit
SCH	Service Channel
SC-FDM	Single Carrier Frequency Division Multiplex
SCMS	Security Credential Management System
SDN	Software Defined Networking
SenUVK	Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz
SenWEB	Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe
SIM	Subscriber Identity Module
SPS	Semi-Persistent Scheduling
TDD	Time Division Duplex
TR	Technical Report

TS	Technical Specification
UE	User Equipment
URLLC	Ultra-Reliable and Low Latency Communications
UL	Uplink
WLAN	Wireless Local Area Network
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2N	Vehicle-to-Network
V2P	Vehicle-to-Pedestrian
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-Everything
VDA	Verband der Automobilindustrie
VMZ	Verkehrsmanagementzentrale

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1	Gesamtkonzeption der Untersuchung.....	6
Abbildung 2	Beispiel der Anwendung der Nutzwertanalyse	8
Abbildung 3	Methodik der Kostenbewertung.....	9
Abbildung 4	Übersicht der primären und sekundären Stakeholder des V2X-Systems	10
Abbildung 5	Roadsafety Application Modell der ETSI ITS (basierend auf [ETSI2013])	16
Abbildung 6	Roadmap von V2X-Kommunikationsanwendungen entsprechend des C2C-CC ([CODECS2016])	17
Abbildung 7	Vernetzungsanforderungen der Automotive Vision 5G-PPP ([5GPPP2015]).....	18
Abbildung 8	Einordnung der Anwendungsklassen nach Endknoten und Anwendungseinschränkung bei Kommunikationseinschränkung.....	23
Abbildung 9	Festlegung der Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Kriterien für Leistungs- (L), funktionale (F) und Entwicklungskriterien (E)	34
Abbildung 10	Ergebnis der Nutzwertanalyse für die definierten Kriterienklassen (Leistungskriterien, funktionale Kriterien und Entwicklungskriterien) (Erfüllungsgrade ohne Gewichtung)	35
Abbildung 11	Ergebnis der Nutzwertanalyse für Leistungskriterien (oben), funktionale Kriterien (Mitte) und Entwicklungskriterien (unten): Erfüllungsgrade ohne Gewichtung	36
Abbildung 12	Generelle Einflussfaktoren für V2X-Einführungsszenarien: Megatrends (außen), Technologietrends (innen).....	40
Abbildung 13	Technologielebenszyklen von WLAN-V2X und Cellular-V2X ohne Betrachtung ihrer Wechselwirkung.....	42
Abbildung 14	Auswirkung des Lock-in Effekts auf die Technologielebenszyklen von WLAN-V2X und Cellular-V2X	44
Abbildung 15	Technologisches S-Kurvenmodell für WLAN-V2X und Cellular-V2X.....	44
Abbildung 16	Einordnung der Einführungsszenarien für V2X Kommunikationstechnologien	45
Abbildung 17	V2X-Subsysteme und deren Hauptkomponenten	50
Abbildung 18	Bestandteile des Onboard Equipment (links) und primäre Kostenblöcke (rechts)	51
Abbildung 19	Primäre Kostenblöcke des Roadside Equipments	53
Abbildung 20	Fahrzeugausstattungsgrade in den Einführungsszenarien.....	58
Abbildung 21	jährliche OBU- und RSU-Gesamtkosten in Szenario A.....	62
Abbildung 22	Zusammensetzung des RSU-Kostenbarwerts in Szenario A	63
Abbildung 23	jährliche OBU- und RSU-Gesamtkosten in Szenario B	64
Abbildung 24	Zusammensetzung des RSU-Kostenbarwerts in Szenario B	64
Abbildung 25	jährliche OBU- und RSU-Gesamtkosten in Szenario C.....	65
Abbildung 26	Zusammensetzung des RSU-Kostenbarwerts in Szenario C	66
Abbildung 27	Szenarienvergleich der OBU- und RSU-Kosten	67
Abbildung 28	Sensitivitätsanalyse für Roadside Equipment in Szenario A.....	70
Abbildung 29	Trägermodelle öffentlicher Infrastrukturen (Quelle: eigene Darstellung basierend auf [GIRM2017], S. 458 ff.).....	74

Abbildung 30	Integrierter öffentlicher Träger als Betreiber des Roadside Equipment (Betreibervariante 1)	78
Abbildung 31	Private Betreibergesellschaft für die IKT-seitige Infrastruktur (Betreibervariante 2)	79
Abbildung 32	Strategische Kooperation zwischen Straßen- und Mobilfunknetzbetreibern (Betreibervariante 3)	80
Abbildung 33	Finanzierungsquellen für das Roadside Equipment.....	82
Abbildung 34	Szenariospezifische Eignung von Betreibermodellen für RSU-Infrastrukturen	86
Abbildung 35	Methodischer Ansatz zur V2X-Positionierung einer Stadt/Kommune.....	87
Abbildung 36	Prinzip des V2X-Portfolios mit angestrebten Rollen der Stadt/Kommune.....	89
Abbildung 37	V2X-Portfolio: Frühestmögliche Umsetzungszeitraum der identifizierten Anwendungsklassen.....	90
Abbildung 38	V2X-Portfolio: Möglicher Einsatzzeitraum der Technologievarianten	91
Abbildung 39	V2X-Portfolio: Beispielhaft ausgewählte Aktionsfelder	91
Abbildung 40	Lebenszyklusrechnungen	114
Tabelle 1	Kommunikationsanforderungen AK1 - Verkehrskritische Nahbereichswahrnehmung	20
Tabelle 2	Kommunikationsanforderungen AK2 - Verkehrsbegleitender Informationsaustausch im relevanten Umfeld	20
Tabelle 3	Kommunikationsanforderungen AK3 - Sensordatenaustausch des lokalen Verkehrsgeschehens	21
Tabelle 4	Kommunikationsanforderungen AK4 - Teleoperiertes Fahren	21
Tabelle 5	Kommunikationsanforderungen AK5 - Internetbasierte Streaming- und Cloud-Dienste	22
Tabelle 6	Kommunikationsanforderungen AK6 - Umfangreiche Downloads, Updates und Upgrades	22
Tabelle 7	Kommunikationsanforderungen AK7 - Schmalbandige Internetdienste	23
Tabelle 8	Auswahl der Bewertungskriterien	29
Tabelle 9	Zusammengefasste Ergebnisse der Nutzwertanalyse	37
Tabelle 10	Sensitivitätsanalyse mit vier Varianten	38
Tabelle 11	Annahmen zu den Anfangs- und Folgekosten für OBUs	59
Tabelle 12	Annahmen zu den Anfangs- und Folgekosten für RSUs	60
Tabelle 13	Annahmen zum Infrastruktur-Rollout in den Einführungsszenarien	60
Tabelle 14	Vergleich ausgewählter Betreibervarianten	83
Tabelle 15	Einordnung der ausgewählten Aktionsfelder mit möglichen Einschränkungen bezüglich Technologie und Einführungsszenario	92
Tabelle 16	Primäre Erfolgsfaktoren und Handlungsempfehlungen für die ausgewählten Aktionsfelder	92
Tabelle 17	Vergleich der technischen Parameter von WLAN-V2X, Cellular-V2X und Backend V2X	115
Tabelle 18	Gewichtungsfaktoren der Kriterien in der Technologiebewertung	116
Tabelle 19	Erfüllungsgrade der V2X-Kommunikationstechnologien hinsichtlich der definierten Bewertungskriterien	117

Tabelle 20	Gesamtbewertung der V2X-Kommunikationstechnologien durch die Nutzwertanalyse	118
Tabelle 21	Übersicht über die Deskriptoren für die Einführungsszenarien	119
Tabelle 22	Inputgrößen der Berechnung und deren angenommene Werte für die Kostenanalyse	120

Literaturverzeichnis

- [3GPP2016] 3rd Generation Partnership Project (2017). „Initial Cellular V2X Standard Completed“. Elektronisch verfügbar unter: http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1798-v2X_r14
- [3GPP2017] 3rd Generation Partnership Project (2017). „3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Study on enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services (Release 15)“. 3GPP TR 22.886 V15.1.0 (2017-03)
- [5GAA2016] 5G Automotive Association (5GAA) (2016). „The Case for Cellular V2X for Safety and Cooperative Driving“. Elektronisch verfügbar unter: <http://5gaa.org/pdfs/5GAA-whitepaper-23-Nov-2016.pdf>
- [5GAA2017] 5G Automotive Association (5GAA) (2017). „Coexistence of C-V2X and 802.11p at 5.9 GHz“. Elektronisch verfügbar unter: http://5gaa.org/pdfs/5GAA_News_neu.pdf
- [5GAA2018] 5G Automotive Association (5GAA) (2018). „Roadmap of monetisable features and business models for LTE V2X – timeline for introduction of LTE V2X (V2V)“. Draft Version Januar 2018
- [5GAM2015] 5G Americas (2016). „LTE Aggregation & Unlicensed Spectrum“. November 2015. Elektronisch verfügbar unter: http://www.4gamericas.org/files/1214/4648/2397/4G_Americas_LTE_Aggregation__Unlicensed_Spectrum_White_Paper_-_November_2015.pdf
- [5GAM2016] 5G Americas (2016). „V2X Cellular Solutions“. Elektronisch verfügbar unter: http://www.5gamericas.org/files/2914/7769/1296/5GA_V2X_Report_FINAL_for_upload.pdf
- [5GPPP2015] Members of the 5G Infrastructure Association (2015). „5GPPP: 5G Automotive Vision“. Elektronisch verfügbar unter: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2014/02/5G-PPP-White-Paper-on-Automotive-Vertical-Sectors.pdf>
- [ABBO2016] K. Abboud, H. A. Omar and W. Zhuang (2016). „Interworking of DSRC and Cellular Network Technologies for V2X Communications: A Survey“. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 65, No. 12, Seiten 9457-9470. Elektronisch verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7513432>
- [ABD2015] E. Abd-Elrahman, A. M. Said, T. Toukabri, H. Afifi and M. Marot (2015). „A Hybrid Model to Extend Vehicular Intercommunication V2V through D2D Architecture“. ICNC '2015, Garden Grove, CA, USA, Seiten 754-759. Elektronisch verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7069441>
- [ACEA2016] European Automobile Manufacturers' Association (ACEA) (2016). „ACEA Position Paper: Frequency bands for V2X“. Elektronisch verfügbar unter: http://www.acea.be/uploads/publications/ACEA_Position_Paper_Frequency_bands_for_V2X.pdf
- [APOS2017] A. Papathanassiou and A. Khoryaev [2017]. „Cellular V2X as the Essential Enabler of Superior Global Connected Transportation Services“, IEEE 5G Tech Focus: Band 1, Nummer 2, Juni 2017. Elektronisch verfügbar unter: <https://5g.ieee.org/tech-focus/june-2017/cellular-v2x>
- [ARAN2013] G. Araniti, C. Campolo, M. Condoluci, A. Iera, A. Molinaro (2013). „LTE for Vehicular Networking: A Survey“. IEEE Communications Magazine, Volume 51, Issue 5, Seiten 148-157. Elektronisch verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6515060>
- [ASECAP2017] ASECAP (2017). „ASECAP Position Regarding LTE-V2X in the 5GHz Band“. Elektronisch verfügbar unter: <http://www.asecap.com/images/News/PDF/ASECAPpositionpaperLTEV2X.pdf>

- [BAZ2017] A. Bazzi, B. M. Masini, A. Zanella and I. Thibault (2017). „On the Performance of IEEE 802.11p and LTE-V2V for the Cooperative Awareness of Connected Vehicles". IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. PP, No. 99. Elektronisch verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8031051>
- [BDTN2017] BMW Group, Deutsche Telekom AG, Intel Corporation, Nokia Corporation (2017). „Car2x-Communication – Technological Neutrality in the 5.9 GHz Band is an Innovation Driver“, Positionspapier, August 2017
- [BER2018] Berliner Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (2018). „Ergebnisse des 2. Berliner Mobilitätsgesprächs des Regierenden Bürgermeisters über ein kurzfristiges Maßnahmenpaket zur Verbesserung der Luftreinheit und Vermeidung von Fahrverboten“, Januar 2018. Elektronisch verfügbar unter: https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/presse/verkehr/2018-01-18-ergebnispapier-zweites-mobilitaetsgespraech_final_final.pdf
- [BERG2017] Roland Berger (2017). „Smart city, smart strategy: Cities Around the World are Embracing the Digital Revolution. But how well are they Really Doing?“. März 2017. Elektronisch verfügbar unter: <https://www.rolandberger.com/de/press/Smart-City-Index-Wien-international-auf-Platz-Eins-für-den-ganzheitlichen-Ans.html>
- [BERT2017] B. Bertenyi (2017). „5G in 3GPP: The Reality Behind the Hype“. Vortrag beim 5G Summit Dresden, September 2017
- [BITKOM2017] Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und Neue Medien e.V. (BITKOM) (2017). „Car2x-Kommunikation Technologieneutralität im 5.9 GHz Band“, Positionspapier, März 2017
- [BLAS2016] R Blasco, H Do, S Shalmashi, S Sorrentino, Y Zang (2016). „3GPP LTE Enhancements for V2V and Comparison to IEEE 802.11p“. ITS European Congress, Glasgow, GB, Juni 2016
- [BMVI2010] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2010). „Status und Rahmenbedingungen für Intelligente Verkehrssysteme (IVS) in Deutschland“, Bericht gemäß Artikel 17 (1) der Richtlinie 2010/40/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Juli 2010 zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr. Elektronisch verfügbar unter: https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/its/road/action_plan/doc/2011_its_initial_report_germany.pdf
- [BMVI2012] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2010). „Straße im 21. Jahrhundert – Innovativer Strassenbau in Deutschland“. Elektronisch verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/strasse-im-21-jahrhundert.pdf>
- [BMVI2016] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2016). „Netzinfrastrukturen für die Gigabitgesellschaft“, Elektronisch verfügbar unter: <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/gigabit-studie.pdf>
- [BOBAN2017] M. Boban et al. (2017). „Use Cases, Requirements, and Design Considerations for 5G V2X“. IEEE Vehicular Technology Magazine (Preprint). Elektronisch verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/1712.01754.pdf>
- [BUND2017] Die Bundesregierung (2017). „5G-Strategie für Deutschland – Eine Offensive für die Entwicklung Deutschlands zum Leitmarkt für 5G-Netze und -Anwendungen“. Elektronisch verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/098-dobrindt-5g-strategie.pdf>
- [C2CCC2007] CAR 2 CAR Communication Consortium. C2C-CC Manifesto – Overview of the C2C-CC System. version 1.1, 8 2007
Elektronisch verfügbar unter: <https://www.car-2-car.org/index.php?id=31>
- [C2CCC2017] CAR 2 CAR Communication Consortium (2017). „NPRM Commenting“. Elektronisch verfügbar unter: <https://www.regulations.gov/contentStreamer?documentId=NHTSA-2016-0126-0462&attachmentNumber=1&contentType=pdf>
- [CEPT2017] CEPT ECC (2017). „Mandate to CEPT to Study the Extension of the Intelligent Transport Systems (ITS) Safety-Related Band at 5.9 GHz - Elektronisch verfügbar unter: Short Action Plan and Proposal for Liaison to ETSI“. Doc. ECC(17)114.

- https://cept.org/Documents/ecc/39425/ecc-17-114_its-background-short-action-plan-and-proposed-its-to-etsi
- [CHEN2017] S. Chen (2017). „Vehicle-to-Everything (v2x) Services Supported by LTE-Based Systems and 5G“. IEEE Communications Standards Magazine. Vol. 11, Issue 2, Seiten 70-76. Elektronisch verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7992934>
- [COBR2013] COBRA Projekt, Cooperative Benefits for Road Authorities (2013). „Deliverable 2: Methodology Framework, Update“. Elektronisch verfügbar unter: http://www.cedr.eu/download/other_public_files/research_programme/eragnet_road/call_2011/mobility/cobra/02_cobra-d2-methodology-framework-v1-4-v3.pdf
- [CODECS2016] Codecs Consortium, Deliverable 2.2 State of the Art Analysis of C-ITS Deployment, Report, 11 2016
Elektronisch verfügbar unter: http://www.codecs-project.eu/fileadmin/user_upload/Library/D2_2_CODECS_State-of-the-Art_Analysis_of_C-ITS_Deployment_.pdf
- [CODI2008] CODIA Projekt, Co-Operative Systems Deployment Impact Assessment (2008). „CODIA Deliverable 5: Final study report“. Elektronisch verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/273030520_Co-Operative_systems_Deployment_Impact_Assessment_CODIA_-_Deliverable_5_Final_Study_Report
- [CROA2017] C-ROADS Projekt (2017). „Radio Frequencies Designated for Enhanced Road Safety in Europe - C-Roads Position on the Usage of the 5.9 GHz Band“. Elektronisch verfügbar unter: https://www.c-roads.eu/fileadmin/user_upload/media/Dokumente/C-Roads_Position_paper_on_59GHz.pdf
- [CROA2017b] C-ROADS Projekt (2017). „Enlargement of the C-ROADS Platform to 16 European States“, Elektronisch verfügbar unter: <https://www.c-roads.eu/platform/about/news/News/entry/show/enlargement-of-the-c-roads-platform-to-16-european-states.html>
- [CTR2017] University of Texas at Austin, Center for Transportation Research (CTR) (2017). „Guidelines on CV Networking Information Flow Optimization for Texas“. Technical Report o-6845-1. Elektronisch verfügbar unter: <https://library.ctr.utexas.edu/ctr-publications/o-6845-1.pdf>
- [CVIS2010] CVIS Projekt, Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems (2010). Deliverable „D.DEPN 5.1: Costs, Benefits and Business Models“. Elektronisch verfügbar unter: <http://publicaties.minienm.nl/documenten/costs-benefits-and-business-models>
- [EC2009] Europäische Kommission (2009). „SAFESpot Integrated Project – Cooperative systems for road safety: Service and Business Model Definition“. Deliverable D6.6.1. Elektronisch verfügbar unter: http://www.safespot-eu.org/documents/SF_D6.6.1_DefinitionAlternativeServiceBusinessModels_v11.pdf
- [EC2016a] Europäische Kommission (2016). „A European Strategy on Cooperative Intelligent Transport Systems, a Milestone Towards Cooperative, Connected and Automated Mobility“. COM (2016) 766, November 2016
- [EC2016b] Europäische Kommission (2016). „C-ITS Platform“. Final Report Phase I. Elektronisch verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/its/doc/c-its-platform-final-report-january-2016.pdf>
- [EC2016c] Europäische Kommission (2016). „Study on the Deployment of C-ITS in Europe: Final Report“ (Phase 1). MOVE/C.3/No. 2014-795. Elektronisch verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2016-c-its-deployment-study-final-report.pdf>
- [EC2017a] Europäische Kommission (2017). „C-ITS Platform Phase II – Cooperative Intelligent Transport Systems Towards Cooperative, Connected and Automated Mobility“. Elektronisch verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2017-09-c-its-platform-final-report.pdf>
- [EC2017b] Europäische Kommission (2017). „RADIO SPECTRUM COMMITTEE Working Document: Mandate to CEPT to Study the Extension of the Intelligent Transport Systems (ITS) Safety-Related Band at 5.9 GHz“, RSCOM17-26 rev.3, Oktober 2017.

- Elektronisch verfügbar unter:
http://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?doc_id=48026
- [EC2017c] Europäische Kommission (2017). „Certificate Policy for Deployment and Operation of European Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS)“, Release 1, Juni 2017. Elektronisch verfügbar unter: https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/c-its_certificate_policy_release_1.pdf
- [EC2017d] Europäische Kommission (2017). „Security Policy & Governance Framework for Deployment and Operation of European Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS)“, Release 1, Dezember 2017. Elektronisch verfügbar unter: https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/c-its_security_policy_release_1.pdf
- [EDW2017] S. Edwards, G. Hill, P. Goodman, P. Blythe, P. Mitchell und Y. Huebner (2017). „Quantifying the Impact of a Real World Cooperative-ITS Deployment Across Multiple Cities“. Transportation Research Part A (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2017.10.001>. Elektronisch verfügbar unter:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856416301859>
- [ETSI2009] European Telecommunications Standards Institute (2009). „Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions“. ETSI TR 102 638 V1.1.1 (2009-06). Elektronisch verfügbar unter:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102600_102699/102638/01.01.01_60/tr_102638v010101p.pdf
- [ETSI2013] ETSI. ETSI TR 101 539-3: „Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 3: Longitudinal Collision Risk Warning (LCRW) application requirements specification“. Technical Specification V1.1.1, European Telecommunications Standards Institute, 11 2013. Elektronisch verfügbar unter:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/101500_101599/10153903/01.01.01_60/ts_10153903v010101p.pdf
- [ETSI2017] ETSI (2017). ETSI TS 122 186: LTE; Service requirements for V2X services (3GPP TS 22.185 version 14.3.0 Release 14)“, V14.3.0. Elektronisch verfügbar unter:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/122100_122199/122185/14.03.00_60/ts_122185v140300p.pdf
- [FHWA2014] U.S. Department of Transportation (DoT), Federal Highway Administration (FHWA) (2014). „National Connected Vehicle Field Infrastructure Footprint Analysis“. Final Report FHWA-JPO-14-125. Elektronisch verfügbar unter:
https://ntl.bts.gov/lib/52000/52600/52602/FHWA-JPO-14-125_v2.pdf
- [FHWA2016] U.S. Department of Transportation (DoT), Federal Highway Administration (FHWA) (2016). „Benefit Cost Analysis of Road Weather Connected Vehicle Applications“. FHWA-HOP-16-092. Elektronisch verfügbar unter:
<https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop16092/fhwahop16092.pdf>
- [FIL2017] A. Filippi, K. Moerman, V. Martinez und A. Turley (2017). „IEEE802.11p Ahead of LTE-V2V for Safety Applications“. White Paper. Elektronisch verfügbar unter:
<https://www.nxp.com/docs/en/white-paper/ROADLINK-TECH-WP.pdf>
- [GAO2015] U. S. Government Accountability Office (GAO) (2015). „Intelligent Transportation Systems: Vehicle-to-Infrastructure Technologies Expected to Offer Benefits, but Deployment Challenges Exist“. GAO-15-775. Elektronisch verfügbar unter: <http://www.gao.gov/assets/680/672548.pdf>
- [GIRM2017] G. Girmscheid (2014). „Bauunternehmensmanagement – prozessorientiert Band 1: Strategische Managementprozesse“. 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [GSMA2017A] GSMA (2017). „LTE Broadcast (eMBMS) Market Update“. Elektronisch verfügbar unter:
<https://gsacom.com/download.php?id=5588>
- [GSMA2017B] GSMA (2017). „Smarter and Safer Driving: The Rollout of Cellular V2X Services in Europe“. Elektronisch verfügbar unter: https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2017/09/GSMA-position-on-C-V2X-in-Europe_Final.pdf

- [HAAG2011] C. Haag, G. Schuh, J. Kreysa und K. Schmelter (2011). „Technologiebewertung“. Buchkapitel in G. Schuh, S. Klappert (Hrsg.), „Technologiemanagement“, DOI 10.1007/978-3-642-12530-0_11, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [HALL2002] K. Hall (2002). „Ganzheitliche Technologiebewertung: ein Modell zur Bewertung unterschiedlicher Produktionstechnologien“. DOI 10.1007/978-3-663-08516-4, Deutscher Universitätsverlag
- [HARR2015] M. Harrer et al. (2015). „Deployment of Cooperative Systems on the C-ITS Corridor in Europe“, AQR's Routes & Transports Magazine, Vol. 44, Nr. 4, 2015. Elektronisch verfügbar unter:
http://c-its-korridor.de/data/download/Revue%20RT-Decembre_2015_p.50.pdf
- [HU2017] J. Hu, S. Chen, L. Zhao, Y. Li, J. Fang, B. Li, Y. Shi (2017). „Link Level Performance Comparison Between LTE V2X and DSRC“. Journal of Communications and Information Networks, Vol. 2, No. 2, Juni 2017. Elektronisch verfügbar unter:
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs41650-017-0022-x.pdf>
- [IEEEV2XSG2017] IEEE P802.11 – Next Generation Study Group. März 2017. Elektronisch verfügbar unter:
http://www.ieee802.org/11/Reports/ngvsg_update.htm
- [IESE2017] IESE Cities in Motion Strategies (2017). „IESE Cities in Motion Index 2017“. Elektronisch verfügbar unter: <http://www.iese.edu/research/pdfs/ST-0442-E.pdf>
- [ITU-R2015] ITU-R (2015). IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond“, Recommendation M-2083-0, März 2015. Elektronisch verfügbar unter: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-l%21%21PDF-E.pdf
- [KEN2015] J. B. Kenney (1016). „Spectrum Sharing in the 5.9 GHz DSRC Band“. 22. ITS World Congress, Bordeaux, Frankreich, Oktober 2015
- [LEIT2017] C. Leitzke (2017). „Cooperative ITS Corridor a Joint Deployment – Time plan and status in Germany“. ETSI Dokument ITS(17)026022r1. April 2017. Elektronisch verfügbar unter:
[https://docbox.etsi.org/ITS/ITS/05-CONTRIBUTIONS/2017//ITS\(17\)026022r1_Cooperative_ITC_Corridor_a_Joint_Deployment_-_Time_plan_and_.pptx](https://docbox.etsi.org/ITS/ITS/05-CONTRIBUTIONS/2017//ITS(17)026022r1_Cooperative_ITC_Corridor_a_Joint_Deployment_-_Time_plan_and_.pptx)
- [LIN2016] S.-Y. Lien et al. (2017). „Enhanced LTE Device-to-Device Proximity Services“. IEEE Communications Magazine, Volume 54, Issue 12, Dezember 2016. Elektronisch verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7731597>
- [LIN2017] S.-Y. Lien et al. (2016). „3GPP Device-to-Device Communications for Beyond 4G Cellular Networks“. IEEE Communications Magazine, Volume 54, Issue 3, Seiten 29-35, März 2016 Elektronisch verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7432168/>
- [MAR2016] D. Martín-Sacristán, C. Herranz und J. F. Monserrat (2017). „Traffic Safety in the METIS-II 5G Connected Cars Use Case: Technology Enablers and Baseline Evaluation“. European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Oulu, Finnland, Juni 2017
- [MASE2017] R. Molina-Masegosa und J. Gozalvez (2017). „LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications“. IEEE Vehicular Technology Magazine, Vol. 12, No. 4, Seiten 30 – 39, Dezember 2017. DOI: 10.1109/MVT.2017.2752798
- [MAT2009] K. Matheus, R. Morich, A. Lübke (2009). „Economic Background of Car-to-Car Communication“. 2. Braunschweiger Symposium Informationssysteme für Mobile Anwendungen (IMA 2004), Braunschweig, Oktober 2004
- [MCN2010] J. McNew (2010). „5.9 GHz DSRC and LTE Comparison for ITS Applications“. Elektronisch verfügbar unter: http://www.cvt-project.ir/Admin/Files/eventAttachments/Kapsch%20DSRC<E%20-%20McNew_365.pdf
- [MIN2017] W. Min, M. Winbjörk, Z. Zhang, R. Blasco, H. Do, S. Sorrentino, M. Belleschi, Y. Zang (2016). „Comparison of LTE and DSRC-Based Connectivity for Intelligent Transportation Systems“. IEEE VTC Spring 2017. Sydney, Australien, Juni 2017
- [NGNM17] NGMN Alliance V2X Task-Force (2017). „Liaison Statement on Technology Evaluation of LTE-V2X and DSRC“. Elektronisch verfügbar unter:
https://www.ngmn.org/uploads/media/171011_NGMN_LS_on_Technology_Evaluation_of_LTE-V2X_and_DSRC_to_5GAA.pdf

- Mit zusätzlichen Dokumenten:
 „Simulation Assumptions and Simulation Results of LLS and SLS“
https://www.ngmn.org/uploads/media/171011_NGMN_LS_on_Technology_Evaluation_of_LTE-V2X_and_DSRC_to_5GAA_Simulation_Assumptions.pdf
 „Charts for LS to 5GAA Regarding NGMN V2X Technology Evaluation Outcome“
https://www.ngmn.org/uploads/media/171011_NGMN_LS_on_Technology_Evaluation_of_LTE-V2X_and_DSRC_to_5GAA_Summary_Charts.pdf
- [NHTS2014] U.S. Department of Transportation (DoT), National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) (2014). „Vehicle-to-vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application.“ Report No. DOT HS 812 014. Elektronisch verfügbar unter: <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/readiness-of-v2v-technology-for-application-812014.pdf>
- [NHTS2017] U.S. Department of Transportation (DoT), National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) (2017). „Federal Motor Vehicle Safety Standards; V2V Communications“. Docket No. NHTSA-2016-0126. Elektronisch verfügbar unter: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2017-01-12/pdf/2016-31059.pdf>
- [NIEB2014] W. Niebel (2014). „Ex-ante Kosten-Nutzen-Untersuchungen kooperativer Verkehrstelematik“, Tagungsband 24. Verkehrswissenschaftliche Tage der Technischen Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften am 20./21.03. 2014. Elektronisch verfügbar unter: http://elib.dlr.de/88839/1/_129.247.218.151_tsall_Proceedings_Year-2014_VWT%20Dresden_modules_kategorie-4_07-ex-ante-kosten-nutzen-untersuchungen-kooperativer-verkehrstelematik%20-niebel-lang.pdf
- [NITG2016] Nationaler IT-Gipfel Plattform Digitale Netze und Mobilität (2016). „Konvergente Netze als Infrastruktur für die Gigabit-Gesellschaft“. Elektronisch verfügbar unter: http://plattform-digitale-netze.de/app/uploads/2016/11/PF1_Gigabit_Konvergente_Netze_web_20161111.pdf
- [NOLL2017a] B. Noll (2017). „Verkehr der Zukunft Stressfrei durch den Straßenverkehr“, Kolloquium Kommunales Verkehrswesen des Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV), Münster, März 2017
- [NOLL2017b] B. Noll (2017). „Verkehr der Zukunft (Stressfrei durch den Straßenverkehr)“. Vortrag beim Kolloquium Kommunales Verkehrswesen des Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV), Münster, März 2017
- [NOLL2017c] B. Noll (2017). „Sachstand der kooperativen Verkehrssteuerung in Kassel“. Vortrag, OCA e.V., Hamburg, November 2017
- [NXP2017a] NXP Semiconductors Germany GmbH (2017). „Vergleich von 802.11p und LTE/5G für V2X Teil 1“. Elektronisch verfügbar unter: <https://www.hanser-automotive.de/zeitschrift/archiv/artikel/vergleich-von-802-11p-und-lte5g-fuer-v2x-teil-1-1718880.html>
- [NXP2017b] NXP Semiconductors Germany GmbH (2017). „Vergleich von 802.11p und LTE/5G für V2X Teil 2“. Elektronisch verfügbar unter: <https://www.hanser-automotive.de/zeitschrift/archiv/artikel/vergleich-von-802-11p-und-lte5g-fuer-v2x-teil-2-3851553.html>
- [PMR14] Robert Protzmann, Kay Massow, and Ilja Radusch. „An evaluation environment and methodology for automotive media streaming applications“. In Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS), 2014 Eighth International Conference on, pages 297–304. IEEE, 2014.
- [QUAL2016] Qualcomm (2016). „Leading the World to 5G: Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) Technologies“. Elektronisch verfügbar unter: <http://www.ieeevtc.org/conf-admin/vtc2016fall/21.pdf>
- [QUAL2017A] Qualcomm (2017). „The Path to 5G: Cellular Vehicle-to-Everything (CV2X)“. Elektronisch verfügbar unter: <https://www.qualcomm.com/documents/path-5g-cellular-vehicle-everything-c-v2x>
- [QUAL2017B] Qualcomm (2017). „Cellular-V2X Technical Myth Busters“. ETSI Dokument ITS(17)028024. Elektronisch verfügbar unter:

- [https://docbox.etsi.org/ITS/ITS/05-CONTRIBUTIONS/2017/ITS\(17\)028024_Cellular-V2X_Technical_Myth_Busters_.zip](https://docbox.etsi.org/ITS/ITS/05-CONTRIBUTIONS/2017/ITS(17)028024_Cellular-V2X_Technical_Myth_Busters_.zip)
- [REBB2017] Rebbeck, Tom et al. (2017). „Socio-economic Benefits of Cellular V2X“. Final Report for 5GAA by Analysis Mason and SBD Automotive. Elektronisch verfügbar unter: http://5gaa.org/wp-content/uploads/2017/12/Final-report-for-5GAA-on-cellular-V2X-socio-economic-benefits-051217_FINAL.pdf
- [RITA2008] U.S. Department of Transportation (DoT), ITS Joint Program Office, Research and Innovative Technology Administration (RITA) (2008). „Vehicle-Infrastructure Integration (VII) Initiative: Benefit-Cost Analysis Version 2.3“, Elektronisch verfügbar unter: https://www.pcb.its.dot.gov/connected_vehicle/508/Library/Library-RRs-Institutional/VII%20BCA%20Report%20Ver2-3.htm
- [RITA2012] U.S. Department of Transportation (DoT), ITS Joint Program Office, Research and Innovative Technology Administration (RITA) (2012). „Communications Data Delivery System Analysis, Task 2 Report: High-Level Options for Secure Communications Data Delivery Systems“. Elektronisch verfügbar unter: http://ntl.bts.gov/lib/45000/45600/45615/FHWA-JPO-12-061_CDDS_Task_2_Rpt_FINAL.pdf
- [SAFARI2017] Projekt Safari „Automatisiertes und vernetztes Fahren auf digitalen Testfeldern in Deutschland“, Elektronisch verfügbar unter: <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/safari.html?nn=370366>
- [SAW2015] O. Sawade und I. Radosch (2015). „Survey and Classification of Cooperative Automated Driver Assistance Systems“, VTC2015-Fall, Boston, MA, USA. Elektronisch verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7391161>
- [SCHULZ2016] W. H. Schulz, H. Wieker (2016). „Co-operative Intelligent Transport Systems: Neue Marktchancen durch den Systemverbund aus Automobil- und Telekommunikationsindustrie“. Detecon Consulting (Hrsg.): Future Telco III – Powerplay für Telekommunikations-unternehmen, Köln, Detecon International GmbH, 2016, Seiten 138 – 151. Elektronisch verfügbar unter: https://www.detecon.com/sites/default/files/13_detecon_buch_future_telco_iii_interview_prof_schulz_d_07_2016.pdf
- [SHIM2016] T. Shimizu, H. Lu, J. Kenney (2016). „Preliminary Comparison of Suitability of DSRC and LTE-V2X for V2V Safety Applications“. ITS World Congress 2016, Melbourne, Australien, Oktober 2016
- [SIMTD2013a] simTD Projekt (2013). „simTD – Deliverable D5.5 – TP5-Abschlussbericht – Teil B-1B Volkswirtschaftliche Bewertung: Wirkungen von simTD auf die Verkehrssicherheit und die Verkehrseffizienz“, Juni 2013, Elektronisch verfügbar unter: http://www.simtd.de/index.dhtml/object.media/deDE/8136/CS-/backup_publications/Projektergebnisse/simTD-TP5-Abschlussbericht_Teil_B1-B.pdf
- [SIMTD2013b] simTD Projekt (2013). „simTD – Deliverable D5.5 – TP5-Abschlussbericht – Teil B-4 Ökonomische Analyse“. September 2013, Elektronisch verfügbar unter: http://www.simtd.de/index.dhtml/object.media/deDE/8109/CS-/backup_publications/Projektergebnisse/simTD-TP5-Abschlussbericht_Teil_B-4_Oekonomische_Analyse_V10.pdf
- [SIR2016] S. Sirotkin (2016), „LTE-WLAN Aggregation (LWA): Benefits and Deployment Considerations“. INTEL White Paper, 2016, Elektronisch verfügbar unter: <https://www.intel.com/content/www/us/en/wireless-network/lte-wlan-aggregation-deployment-white-paper.html>
- [SJO2017] K. Sjöberg, P. Andres, T. Buburuzan, A. Brakemeier (2017). „C-ITS Deployment in Europe – Current Status and Outlook“. IEEE Vehicular Technology Magazine, Vol. 12, No. 2, Seiten 89-97, Juni 2017 Elektronisch verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7911287>
- [SLOV2017] M. Slovick (2017). „DSRC vs. C-V2X: Looking to Impress the Regulators“. Electronic Design, Oktober 2017, Elektronisch verfügbar unter: <http://www.electronicdesign.com/automotive/dsrc-vs-c-v2x-looking-impress-regulators>
- [STRAT2017] Strategy Analytics (2017). „Qualcomm Announces First Cellular V2X Solution“. Elektronisch verfügbar unter:

- [VDA2015] <https://www.strategyanalytics.com/access-services/automotive/autonomous-vehicles/reports/report-detail/qualcomm-announces-cellular-v2x-solution>
VDA. Automatisierung - Von Fahrerassistenzsystemen zum Automatisierten Fahren. VDA-Magazin, Verband der Automobilindustrie, 2015.
Elektronisch verfügbar unter:
<https://www.vda.de/dam/vda/publications/2015/automatisierung.pdf>
- [VDE2015] Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE) (2015). „Studie Mobilität 2025: Koexistenz oder Konvergenz von IKT für Automotive?“. Elektronisch verfügbar unter: http://dialoginstitut.de/wp-content/uploads/2016/01/IKT-EM-II_Studie-Mobilität-2025.pdf
- [VINEL2012] A. Vinel „3GPP LTE Versus IEEE 802.11p/WAVE: Which Technology is Able to Support Cooperative Vehicular Safety Applications?“
IEEE Wireless Communications Letters, Volume 1, Issue 2, April 2012
Elektronisch verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6155707>
- [VW2017] Volkswagen (2017). „Mit dem Ziel, die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen, lässt Volkswagen Fahrzeuge ab 2019 miteinander kommunizieren“. Elektronisch verfügbar unter: <http://goo.gl/oX6Yxn>
- [WUEB1984] K. L. Wübbenhorst. „Konzept der Lebenszykluskosten. Grundlagen, Problemstellungen und technologische Zusammenhänge“, Darmstadt 1984.
- [YOSH2014] J. Yoshida (2014). „NXP Beats Qualcomm, Gets First V2V Design Win“. EETimes.
Elektronisch verfügbar unter: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1324052

A Hintergrundinformationen zu verwendeten Methodischen Ansätzen

Anforderungsanalyse der Anwendungen

Die Einführung leistungsfähiger V2X-Systeme ermöglicht ein sehr breites Spektrum neuer Anwendungsfälle. Für die nachfolgende Bewertung der alternativen Technologieoptionen sind speziell die Anforderungen der Anwendungen an die Kommunikationstechnologien von Interesse. Deswegen steht die Anforderungsanalyse der Anwendungen an erster Stelle. Grundsätzlich sind hierbei zwei Aspekte zu beachten. Zum einen unterscheiden sich die gewünschten und vorgedachten Anwendungen je nach Gruppe der Beteiligten und ihren jeweiligen Interessen. Zum anderen – das hat die Einführung neuer Kommunikationstechnologien in der Vergangenheit gezeigt – können konkrete Applikationen andere Systemrealisierungen und damit auch andere Anforderungen an das Kommunikationssystem entwickeln als ursprünglich vorhergesehen. Gleichwohl kann angenommen werden, dass es Anwendungen mit sehr ähnlichen bis gleichen Anforderungen geben wird. Diese Anwendungen können dann in unterschiedliche Klassen eingeordnet werden, um eine Technologiebewertung auf Basis von Klassenanforderungen durchzuführen und diese somit handhabbarer und übersichtlicher zu gestalten und generalisierte (anwendungsübergreifende) Aussagen zu ermöglichen. Ebenso erlaubt eine gelungene Klassifizierung die spätere Einordnung heute noch nicht absehbarer Anwendungen, da zum Zeitpunkt des Konzepts, zumindest was einzelne zukünftige Anwendungen betrifft, kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden kann.

Die Anforderungsanalyse sieht folgende grundlegende Methodik vor. Sie startet mit einer Analyse der verschiedenen Stakeholder des V2X-Systems. Das Ergebnis der Analyse ist ein Gesamtverzeichnis sowie eine engere Auswahl an primär relevanten Stakeholdern. Auf letztere konzentrieren sich im vorliegenden Konzept die weiteren Betrachtungen. Die Stakeholder-Liste kommt an späterer Stelle bei der Kostenanalyse und der Bestimmung von Betreibermodellen noch einmal zur Anwendung. Bei der Anwendungs- und Anforderungsanalyse und der dazugehörigen Literatursichtung wird insbesondere auf die Referenzen der primären Stakeholder eingegangen. Diese publizieren durchaus eigene Literatur zum Thema, welche natürlich hauptsächlich ihre speziellen Sichten und Interessen widerspiegelt.

Die recherchierten Anwendungen werden in einen Anwendungskatalog eingebracht, der die Grundlage für die weitere Klassifizierung ist. Bei der Zusammenstellung werden aktuelle Forschungstrends ebenfalls mit einbezogen. Häufig verwenden die Stakeholder zur Handhabung der Vielzahl an Anwendungen bereits ihre eigenen Klassifizierungen, welche sich jedoch deutlich unterscheiden können. Oftmals sind die Ziele der Klassifizierungen auch unterschiedlich. Beispielsweise teilt eine weitverbreitete Klassifizierung die Anwendungen nach ihrem Nutzungsfeld ein – also Verkehrssicherheit und Effizienz als mobilitätsbezogene Klassen und Komfort als personenbezogene Klasse. Dies alleine ist der nachfolgenden Technologiebewertung jedoch nicht dienlich. Im Konzept wird deshalb eine neue eigene Klassifizierung mit dem Fokus auf Anforderungen an die V2X-Kommunikationstechnologien eingeführt. Insbesondere wird die neue Anwendungsklassifizierung verschiedene Anforderungsmetriken abdecken.

Technologiebewertung

Ziel der Technologiebewertung ist es, V2X-Kommunikationstechnologien hinsichtlich verschiedener, relevanter Kriterien zu beurteilen und eine ganzheitliche Bewertung von Technologieoptionen vorzunehmen. Kostenaspekte werden dabei aufgrund ihrer herausragenden Bedeutung einer separaten Untersuchung unterzogen.

Die Technologiebewertung kann als Teil eines Technologiemanagementprozesses angesehen werden; somit sind auch die damit verbundenen Methoden grundsätzlich anwendbar [HAAG2011]. Im Technologiemanagement stellt die Technologiebewertung die Informationsgrundlage für strategische Entscheidungen dar. Diese Entscheidungen beziehen sich meist auf einzelne Phasen des Technologiemanagements – die Technologiefrüherkennung, -planung, -entwicklung, oder -verwertung. Dabei geht es darum, den Erfüllungsgrad einer oder mehrerer Technologien zu vorgegebenen Zielstellungen oder -zuständen zu ermitteln und zu beurteilen.

Die verwendete Methode der Nutzwertanalyse (auch Punktbewertungsmodell oder Scoring-Modell) erlaubt es, qualitative Kriterien durch subjektive Einschätzung von Experten zu quantifizieren und zu vergleichen. Das Ergebnis der Nutzwertanalyse ist eine Rangliste von Technologieoptionen. Die Anwendung der Methode erfolgt in vier Schritten: 1. Festlegung der Bewertungskriterien, 2. Gewichtung der Kriterien, 3. Bewertung durch subjektive Experteneinschätzung und 4. Berechnung der Nutzwerte.

Im Vergleich zu anderen Methoden der Technologiebewertung (z. B. Argumentenbilanz, Checklisten) eignet sich die Nutzwertanalyse insbesondere zur Bewertung der V2X-Kommunikationstechnologien. Zu V2X-Kommunikationstechnologien liegen bereits heute umfangreiche Informationen vor, die mit Hilfe der Nutzwertanalyse auf entscheidbare Strukturen reduziert werden können. Die Auswahl der Kriterien und deren Gewichtung erlaubt es außerdem, die Interessen ausgewählter Stakeholder (hier städtische Kommunen) zu berücksichtigen.

Die Bewertungskriterien in der Nutzwertanalyse korrespondieren zum Teil mit den Anforderungen der V2X-basierten Anwendungen und werden in leistungsbezogene und funktionale Kriterien sowie darüberhinausgehend in Kriterien bzgl. der Rahmenbedingungen für die Entwicklung klassifiziert. Wie bei der Anwendungsanalyse sind auch bei der Technologiebewertung – trotz der vorliegenden Informationsvielfalt – nicht alle zukünftigen Entwicklungen abzusehen. Insbesondere weist Cellular-V2X mit den geplanten Weiterentwicklungen zur nächsten Mobilfunkgeneration, 5G, eine sehr hohe Dynamik auf. Daraus ergibt sich eine Unsicherheit bei der Technologiebewertung, die einen detaillierten Vergleich erschwert. Darüber hinaus muss festgestellt werden, dass manche Veröffentlichungen vergleichende Leistungsbewertungen nicht technologie-neutral darstellen. Für die Anwendung der Nutzwertanalyse für V2X-Kommunikationstechnologien ist es daher wichtig, die Technologiealternativen ausgewogen und ganzheitlich zu bewerten. Das bedeutet auch, dass das vorliegende Konzept auf technische Analysen mit einem sehr hohen Detailgrad (z. B. Latenzvergleiche von Cellular-V2X und WLAN-V2X im ms-Bereich) verzichtet, da die genaue Quantifizierung der Leistungsparameter nur geringen Einfluss auf die Handlungsempfehlungen haben.

Einführungsszenarien

Basierend auf den aktuellen Veröffentlichungen, Regulierungen und Standards werden drei alternative Einführungsszenarien bestimmt. Um zukünftige Entwicklungen der V2X-Kommunikationstechnologien abschätzen zu können, werden Modelle des strategischen

Technologiemanagements (Technologielebenszyklen, Technologische S-Kurven) zugrunde gelegt und auf V2X Kommunikationstechnologien adaptiert. Im Technologielebenszyklus-Modell wird der zeitliche Verlauf der Entwicklung des Leistungspotenzials einer Technologie mit den vier Phasen Entstehung, Wachstum, Reife und Alterung dargestellt. Eine bestimmte Technologie wird typischerweise mit dem allmählichen Erreichen ihres maximalen Leistungspotenzials durch eine neue abgelöst. Dies kann in der Alterungsphase geschehen, aber auch in einem früheren Stadium – wenn die alte Technologie überschätzt oder die neue Technologie offensichtlich leistungsfähiger ist. Das Technologische S-Kurven-Konzept kann diesen Ablöseprozess ebenfalls beschreiben, indem es die Leistungsentwicklung einer Technologie in Abhängigkeit zum Entwicklungsaufwand modelliert. Speziell mit diesem Modell ist es möglich technologische Sprünge darzustellen, bei denen die Substitutionstechnologie am Anfang noch ein geringeres Leistungspotenzial besitzt als die alte.

Mit Hilfe dieser Modelle können die Wechselwirkungen der Technologien bei Ihrer Einführung analysiert werden. Alle im Konzept weiter betrachteten Einföhrungsszenarien basieren auf hybriden Systemen, bei denen sowohl WLAN-V2X als auch Cellular-V2X eingeföhrt wird, wenngleich sich die Technologien in den Szenarien unterschiedlich stark und in anderen Ausprägungen verbreiten.

Kostenanalyse

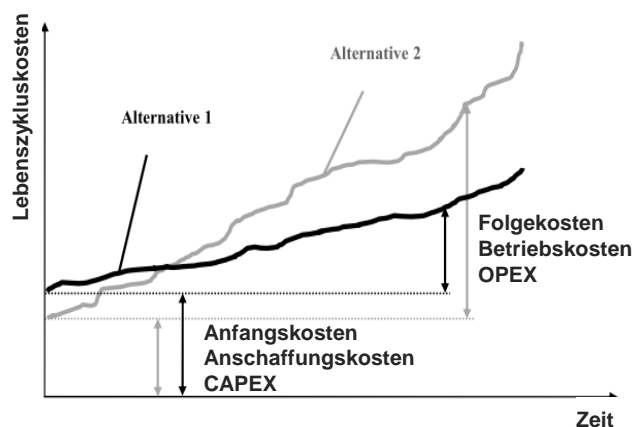
Neben leistungsbezogenen und funktionalen Kriterien der Technologiebewertung nimmt im Konzept die Kostenanalyse von V2X Kommunikationstechnologien eine besonders wichtige Rolle ein. Dabei sind V2X-Kommunikationstechnologien als Teil der IVS anzusehen. Die Kosten der Technologien sind nicht ausschließlich auf die Herstellung oder Anschaffung von Komponenten beschränkt, sondern hängen von einer Vielzahl von Aspekten, angefangen bei der Systemauslegung, den Ausstattungsgraden der Fahrzeuge und der Infrastruktur über die realisierten Geschäfts- und Betreibermodelle bis hin zur Gesetzgebung und Regulierung, ab. In der Realität handelt es sich also um ein komplexes Wirkungsgefüge, aus dem sich die Gesamtkosten ergeben.

Ausgehend von diesem IVS-Wirkungsgefüge wird im vorliegenden Konzept ein Kostenmodell als stark vereinfachtes Abbild der komplexen Realität erstellt (Abbildung 3). Dieses Kostenmodell definiert Subsysteme und -komponenten des V2X-Gesamtsystems und identifiziert wesentliche Kostenblöcke bzw. -bestandteile. Diese werden dann den Stakeholdern des Systems zugeordnet. Durch die Vereinfachungen bei der Definition des Kostenmodells werden nur die jeweils primären Subsysteme, Kostenblöcke und Stakeholder in die Analyse einbezogen.

Basierend auf dem Kostenmodell können die primären Kostenbestandteile näherungsweise quantifiziert werden. Methodische Basis der Quantifizierung sind Lebenszyklusrechnungen (auch Life Cycle Costing bzw. Total Cost of Ownership genannt, vgl. Abbildung 40) als klassisches Instrument des Kostenmanagements, welche alle während des Bestehens eines technischen Systems anfallenden Kosten berücksichtigen, wobei auch hier vereinfachende Annahmen getroffen werden. Als Fallbeispiel wird eine Kostenanalyse für die Stadt Berlin als Beispiel einer städtischen Kommune durchgeführt.

Abbildung 40

Lebenszyklusrechnungen



Wegen der enormen Vielfalt an V2X-Anwendungen bzw. deren Verschiedenartigkeit wird keine eigene Quantifizierung des Nutzens (z. B. Zeit- und Kraftstoffersparnisse, Unfallvermeidung oder Emissionsminderungen) vorgenommen. Stattdessen werden Unterschiede in den Nutzenpotenzialen von verschiedenen V2X-Einführungsszenarien auf Basis existierender Kosten-Nutzen-Analysen (u. a. [COBR2013], [CODI2008], [NIEB2014], [SCHULZ2016]) herausgearbeitet. Darüber hinaus kann zum jetzigen Zeitpunkt keine seriöse Quantifizierung von Erlösmodellen vorgelegt werden; das Konzept fokussiert sich daher auf qualitative Analysen geeigneter Finanzierungs- und Betreibermodelle für Infrastrukturkomponenten.

B Vergleich der technischen Parameter von WLAN-V2X, Cellular-V2X und Backend V2X

Tabelle 17 Vergleich der technischen Parameter von WLAN-V2X, Cellular-V2X und Backend V2X

Parameter	WLAN-V2X	Cellular-V2X	Backend-V2X
Frequenzbereich	5,9 GHz	5,9 GHz und lizenziertes Frequenzbereich wie Backend-V2X	Regional unterschiedlich, in Deutschland 0,8, 1,8 und 2,6 GHz Bereich, fragmentiert nach FDD/TDD, Mobilfunkbetreiber und Ort
Kanalbandbreite	10 MHz	10 oder 20 MHz	Skalierbar von 1,4 bis 20 MHz mit der Möglichkeit der Kanalbündelung (Carrier Aggregation)
Modulationsverfahren	BPSK OFDM, QPSK OFDM, 16QAM OFDM, 64QAM OFDM	QPSK SC-FDM 16QAM SC-FDM	Bis zu 256QAM OFDM
Vorwärtsfehlerkorrektur (FEC)	Convolutional Coding	Turbo Coding für Datenübertragung (Convolutional Coding für Steuerungsinformationen)	Turbo Coding
Datenrate	3 bis 27 Mbit/s (6 Mbit/s auf dem Steuerungskanal)	Bis zu 15,8 Mbit/s (10 MHz), Bis zu 31,7 Mbit/s (20 MHz), (Rate kann mit feiner Auflösung variiert werden)	Über 100 Mbit/s Downlink und bis zu 50 Mbit/s Uplink (20 MHz), (Rate kann mit feiner Auflösung variiert werden)
Medienzugriffsteuerung	CSMA/CA	OFDMA mit zwei Modi: - Mode-3 mit zentraler Ressourcenallokation („In Coverage“) - Mode-4 mit verteilter Ressourcenallokation („Out-of-Coverage“) mit „Semi-persistent Scheduling“ und Sensing im Frequenzbereich	OFDMA (Downlink) SC-FDMA (Uplink)
Link-Typ	V2V und V2I („ad-hoc“)	V2V und V2I („Device-to-Device“ oder „Sidelink“)	V2N / Internet
Duplexmethode	TDD	TDD	FDD und TDD
Netzwerk- und Transportprotokoll	Ad-hoc (ETSI GeoNetworking und BTP)	Ad-hoc (Voraussichtlich ETSI GeoNetworking und BTP, Alternativ: IP Protokolle)	IP Protokolle
Facilities Messages	ETSI Message Sets (CAM, DENM, etc.)	ETSI Message Sets	ETSI Message Sets. TPEG, Fahrzeug-zu-Cloud Protokolle (z. B. Sensoris ⁶³)
Überlastkontrolle	Dezentralisiert	Mode-3: Scheduling durch Basisstation Mode-4: Dezentralisiert	Scheduling durch Basisstation
IT-Sicherheit	Digitale Signaturen und Zertifikate mit Public Key Infrastruktur	Derzeit unklar	Teil von AAA (Authentifizierung, Autorisierung, Accounting), SIM
Anonymität	Wechselnde Pseudonyme mit begrenzter Lebenszeit	Derzeit unklar	Keine

⁶³ <https://company.here.com/automotive/new-innovations/sensor-ingestion>

C Festlegung der Gewichtungsfaktoren in der Technologiebewertung

Die folgende Tabelle 18 stellt die Gewichtungsfaktoren und deren Werte dar, und zwar für die Technologieklassen (Leistungs-, funktionale und Entwicklungskriterien), als auch für die jeweiligen Einzelkriterien innerhalb der Kriterienklassen. Diese Gewichtungsfaktoren gehen in die Gesamtdarstellung der Nutzwertanalyse (Tabelle 20) ein.

Tabelle 18

Gewichtungsfaktoren der Kriterien in der Technologiebewertung

Kriterium / Klasse	Gewichtung
L. Leistungskriterien	0,2
L.1 Reichweite	0,2
L.2 Zuverlässigkeit	0,2
L.3 Verbindungsdichte	0,2
L.4 Latenz	0,2
L.5 Abdeckung	0,2
L.6 Spektrale Effizienz	0,0
L.7 Mobilität (High-Speed Unterstützung)	0,0
F. Funktionale Kriterien	0,4
F.1 IT-Sicherheit	0,4
F.2 Anbindung an Verkehrsinfrastruktur	0,4
F.3 Anbindung an zentrales Cloudsystem	0,1
F.4 Systemoffenheit	0,1
E. Entwicklungskriterien	0,4
E.1 Standardisierungsreife	0,1
E.2 Standardisierungsdynamik	0,1
E.3 Weiterentwicklungspotential	0,1
E.4 Verfügbarkeit	0,2
E.5 Reife der Geschäftsmodelle	0,1
E.6 Reife des Rechts-/Regulierungsrahmens	0,2
E.7 Bisherige Verbreitung	0,1
E.8 Zugriff auf Spektrum	0,1

D Detaillierte Ergebnisdarstellung der Technologiebewertung

Tabelle 19 beinhaltet die detaillierte Bewertung der V2X Kommunikationstechnologien hinsichtlich der definierten Einzelkriterien. Diese Werte gehen zusammen mit den Gewichtungsfaktoren aus Tabelle 18 in die Gesamtbewertung der Nutzwertanalyse (siehe Tabelle 20 auf der folgenden Seite) ein.

Tabelle 19

Erfüllungsgrade der V2X-Kommunikationstechnologien hinsichtlich der definierten Bewertungskriterien

Klasse / Kriterium	Backend-V2X	Cellular-V2X		WLAN-V2X	
		Mode-3	Mode-4		
L: Leistungskriterien	L.1 Reichweite	+	0	-	-
	L.2 Zuverlässigkeit	++	+	-	0
	L.3 Verbindungsdichte	+	++	0	0
	L.4 Latenz	--	++	+	+
	L.5 Abdeckung	-		++	++
	L.6 Spektrale Effizienz	-	++	0	+
	L.7 Mobilität	-	+	+	+
F: Funktionale Kriterien	F.1 IT-Sicherheit	0	0	+	+
	F.2 Anbindung an Verkehrsinfrastruktur	-		0	++
	F.3 Anbindung an zentrales Cloudsystem	++		0	-
	F.4 Systemoffenheit	+		0	-
E: Entwicklungskriterien	E.1 Standardisierungsreife	++		-	++
	E.2 Standardisierungsdynamik	++		++	0
	E.3 Weiterentwicklungspotential	+		++	0
	E.4 Verfügbarkeit	++		-	++
	E.5 Reife der Geschäftsmodelle	++		0	-
	E.6 Reife des Rechts-/Regulierungsrahmens	+		-	0
	E.7 Bisherige Verbreitung	++		--	0
	E.8 Zugriff auf Spektrum	--		0	+

Tabelle 20

Gesamtbewertung der V2X-Kommunikationstechnologien durch die Nutzwertanalyse

Kriterien	Gewichtung		Backend-V2X Wert	Cellular-V2X				WLAN-V2X	
	EG	EG		Mode-3 EG	Mode-4 EG	Gesamt EG	Wert	EG	Wert
L. Leistungskriterien	0,2			0,5	0,5				
L.1 Reichweite	0,2	4	0,8	3	2	2,5	0,5	2	0,4
L.2 Zuverlässigkeit	0,2	5	1,0	4	2	3,0	0,5	3	0,6
L.3 Verbindungsdichte	0,2	5	0,8	5	3	4,0	0,8	3	0,6
L.4 Latenz	0,2	1	0,2	5	4	4,5	0,9	4	0,8
L.5 Abdeckung	0,2	2	0,4	5	5	5,0	1,0	5	1,0
L.6 Spektrale Effizienz	0,0	2	0,0	5	3	4,0	0,0	4	0,9
L.7 Mobilität	0,0	2	0,0	4	4	4,0	0,0	4	0,0
		2,9	3,2			3,9	3,8	3,6	3,4
F. Funktionale Kriterien	0,4								
F.1 IT-Sicherheit	0,4	3	1,2	3	4	3,5	1,4	4	1,6
F.2 Anbindung an Verkehrsinfrastruktur	0,4	2	0,8	3		3,0	1,2	5	2,0
F.3 Anbindung an zentrales Cloudsystem	0,1	5	0,5	3		3,0	0,3	2	0,2
F.4 Systemoffenheit	0,1	4	0,4	3		3,0	0,3	2	0,2
		3,5	2,9			3,1	3,2	3,3	4,0
E. Entwicklungskriterien	0,4								
E.1 Standardisierungsreife	0,1	5	0,5	2		2,0	0,2	5	0,5
E.2 Standardisierungsdynamik	0,1	5	0,5	5		5,0	0,5	3	0,3
E.3 Weiterentwicklungspotential	0,1	4	0,5	5		5,0	0,5	3	0,3
E.4 Verfügbarkeit	0,2	5	1,0	2		2,0	0,4	5	1,0
E.5 Reife der Geschäftsmodelle	0,1	5	0,5	3		3,0	0,3	2	0,2
E.6 Reife d. Rechts-/Regulierungsrahmens	0,2	4	0,8	2		2,0	0,4	3	0,6
E.7 Bisherige Verbreitung	0,1	5	0,5	1		1,0	0,1	3	0,3
E.8 Zugriff auf Spektrum	0,1	1	0,1	3		3,0	0,3	4	0,4
		4,9	4,3			3,3	2,7	4,0	3,6
Gesamt			3,5				3,1		3,7

E Deskriptoren für die Einführungsszenarien

Tabelle 21 Übersicht über die Deskriptoren für die Einführungsszenarien

Deskriptor	Szenario A	Szenario B	Szenario C
WLAN-V2X	Für Sicherheit & Effizienz	(Für Sicherheit) ⁶⁴	(Für Sicherheit)
Backend-V2X	Für Komfort	Für Komfort & Effizienz, (Sicherheit)	Für Komfort
Cellular-V2X	(Für Sicherheit)	(Für Sicherheit)	Für Sicherheit & Effizienz
Ausstattungsgrad straßenseitige Infrastruktur	WLAN-V2X umfassend vorhanden	Kaum vorhanden	Cellular-V2X umfassend vorhanden
Fahrzeug-Ausstattungsgrad	Steigt schnell für WLAN-V2X bei Mandatierung	Hoch für Backend-V2X, gering für WLAN-/Cellular-V2X	Steigt langsamer für WLAN-V2X; stark für Cellular-V2X
Technologie-Integrationsgrad	Level 1 (Anwendung) Level 2 (Spektrum)	NA	Level 1 (Anwendung) Level 2 (Spektrum) Level 3 (System) oder langfristig Substitution von WLAN-V2X
Forcierende Stakeholder	Staat, Verkehrsinfrastrukturbetreiber, Automobilindustrie	Diverse Stakeholder	Mobilfunkindustrie Automobilindustrie
Technologieeinführung	Lock-in	NA	Verdrängung
Primäre Cloud-Ausprägungen	RSU-Clouds für Sicherheit & Effizienz, Zentrale Cloud für Komfort	Mobile (Edge) Clouds für Komfort, Effizienz (und Sicherheit)	Mobile Edge Clouds für Sicherheit & Effizienz, Zentrale Cloud für Komfort

⁶⁴ Wenn die Technologie kaum vorhanden ist bzw. genutzt wird, werden hier die jeweiligen Anwendungsfelder in Klammern gesetzt.

F Inputwerte für die Beispielkalkulationen der Fallstudie

Tabelle 22 Inputgrößen der Berechnung und deren angenommene Werte für die Kostenanalyse

Inputgröße	Wert			
	Szenario A	Szenario B	Szenario C	
OBU-Technologien	primär WLAN-V2X neben Backend-V2X	primär nur Backend-V2X	primär Cellular-V2X neben Backend-V2X	
Ausstattungsgrad des Bestands in $t=0$	0 % für WLAN-V2X; 10 % für Backend-V2X	0 % für WLAN-/Cellular-V2X; 10 % für Backend-V2X	0 % für Cellular-V2X; 10 % für Backend-V2X	
Beginn des Markthochlaufs in $t=...$ Jahre	1	1	5	
Ausstattungsgrad der Neuzulassungen zu Beginn des Markthochlaufs	1 % für WLAN-V2X; 25 % für Backend-V2X	1 % für WLAN-/Cellular-V2X; 25 % für Backend-V2X	1 % für Cellular-V2X; 25 % für Backend-V2X	
Unterstellter Wachstumsprozess des Neuzulassungsanteils	Logistisches Wachstum			
Sättigungsgrenze/obere Schranke des Neuzulassungsanteils	80 % für WLAN-V2X; 90 % für Backend-V2X	20 % für WLAN-/Cellular-V2X; 90 % für Backend-V2X	80 % für Cellular-V2X; 90 % für Backend-V2X	
Proportionalitätskonstante der logistischen Wachstumsfunktion	0,8 für WLAN-V2X; 1,0 für Backend-V2X	2,0 für WLAN-/Cellular-V2X; 1,0 für Backend-V2X	0,8 für Cellular-V2X; 1,0 für Backend-V2X	
Zeitliche Degression der OBU-Anschaffungskosten bis $t=20$	Linear auf 50 % des Wertes von $t=0$	Linear auf 80 % des Wertes von $t=0$	Linear auf 50 % des Wertes von $t=0$	
Anteil der Kommunikation im kostenpflichtigen Spektrum	30 % für WLAN-V2X-ausgestattete; 100 % für Nur-Backend-V2X-ausgestattete Fzg.	40 % für WLAN-/Cellular-V2X-ausgestattete; 100 % für Nur-Backend-V2X-ausgestattete Fzg.	50 % für Cellular-V2X-ausgestattete; 100 % für Nur-Backend-V2X-ausgestattete Fzg.	
Sättigungsgrenze von Aftermarket-Nachrüstungen für Backend-V2X	25 % der noch nicht ausgestatteten Fahrzeuge			
Proportionalitätskonstante der log. Wachstumsfunktion für Backend-V2X-Nachrüstungen	2,0			
Pkw-Bestand in $t=0$ (Berlin)	1.195.149			
Fahrzeugneuzulassungen p. a.	8 %			
Fahrzeugstillegungen p. a.	7 %			
Anfangskosten OBU	200 €			
Durchschnittliches OBU-Datenvolumen pro Stunde Fahrzeit	20 MB			
Durchschnittliche Fahrzeit pro Tag	0,85 Stunden			
Folgekosten OBU p. a. (ohne Datenkommunikationskosten)	15 €			
Nutzungsdauer OBU	entspricht der Fahrzeugnutzungsdauer (ca. 12 Jahre)			
Für das Roadside Equipment	Gesamtanzahl der RSUs im Rollout	2.992	266	2.592
	Beginn des Rollouts in $t=...$	0	0	5
	Dauer des Rollout	10 Jahre	10 Jahre	10 Jahre
	Zeitliche Degression der technischen Ausrüstungskosten bis $t=20$	Linear auf 50 % des Wertes von $t=0$	Linear auf 80 % des Wertes von $t=0$	Linear auf 50 % des Wertes von $t=0$

Für das Roadside Equipment	Anteil der RSU-Kommunikation im kostenpflichtigen Spektrum		30 %	40 %	50 %
	Anfangskosten technische Ausrüstung	Unterer Wert	3.000 €		
		Basiswert	4.500 €		
		Oberer Wert	6.000 €		
	Anfangskosten Installation	Unterer Wert	1.000 €		
		Basiswert	3.000 €		
		Oberer Wert	5.000 €		
	Anfangskosten Netzplanung / Integration	Unterer Wert	1.000 €		
		Basiswert	1.500 €		
		Oberer Wert	2.000 €		
	Instandhaltungskosten p. a.	Unterer Wert	5 % der Anfangskosten technische Ausrüstung		
		Basiswert	7,5 % der Anfangskosten technische Ausrüstung		
		Oberer Wert	10 % der Anfangskosten technische Ausrüstung		
	Energieverbrauch der RSU	Unterer Wert	20 W		
		Basiswert	40 W		
		Oberer Wert	60 W		
	Strompreis (Industriekunden)		0,15 € / kWh		
	sonstige Betriebskosten p. a.	Unterer Wert	150 €		
		Basiswert	250 €		
		Oberer Wert	350 €		
	Nutzungsdauer RSU	Unterer Wert	20 Jahre		
		Basiswert	15 Jahre		
		Oberer Wert	10 Jahre		
Kostenabschlag für Installation und Netzplanung bei Ersatzinvestitionen		20 % der Werte von t=0			
Durchschnittliches RSU-Datenvolumen pro Stunde bei 100 % Fahrzeugausstattung		300 MB			
Entwicklung des RSU-Datenvolumens		Proportional steigend zur Fahrzeugausstattung mit WLAN-/Cellular-V2X			
Länge des Straßennetzes (Berlin)		ca. 5400 km			
Datenkommunikationskosten (Mobilfunk)		Abhängig vom Datenvolumen und linear fallend über die Zeit			
Datenkommunikationskosten in t=0		5 € / GB			
Datenkommunikationskosten in t=20		1 € / GB			
Kalkulationszinssatz		1,50 %			