Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

IKT FÜR ELEKTROMOBILITÄT

Studie Mobilität 2025:
Koexistenz oder Konvergenz von IKT für Automotive?

Anforderungen der vernetzten Mobilität von morgen an Fahrzeuge, Verkehrs- und Mobilfunkinfrastruktur

im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II:
Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic

Stand: Januar 2016

VDE · TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN · DEUTSCHES DIALOG INSTITUT · ifak

Studie Mobilität 2025:
Koexistenz oder Konvergenz von IKT für Automotive?

Anforderungen der vernetzten Mobilität von morgen an Fahrzeuge, Verkehrs- und Mobilfunkinfrastruktur

im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic

Stand: Januar 2016

Verzeichnisse

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnisse I

Abbildungsverzeichnis III
Tabellenverzeichnis IV
Abkürzungsverzeichnis V

Kurzfassung 1

1. Einleitung 4

1.1 Hintergrund und Zielsetzung 5
1.2 Abgrenzung des Untersuchungsbereiches 6
1.3 Methodik und Aufbau der Studie 6

2. Mobilitätsszenarien 2025+ 10

2.1 Trends und Treiber des Makroumfeldes 11
2.2 Relevante Deskriptoren der Mobilitätsszenarien 12
2.3 Szenarioübergreifende Entwicklungen 14
2.4 Szenario „Koexistenz“ 17
2.5 Szenario „Konvergenz“ 20
2.6 Vergleich der Mobilitätsszenarien 2025+ 23

3. Analyse zukünftiger Anwendungen 26

3.1 Überblick und Kategorisierung 27
3.2 Priorisierung und Auswahl 28
3.3 Use Cases 29
3.3.1 Use Case: Kartierung und hochgenaue Lokalisierung 30
3.3.2 Use Case: Gefahrenbewältigung/Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen 33
3.3.3 Use Case: Smart Traffic-Anwendungen 37
3.3.4 Use Case: Cloud-Zugang und Cloud-Anwendungen 40
3.4 Abgeleitete Anforderungen und Folgerungen 43

4. Anforderungen an die Sicherheit und Verfügbarkeit der Netze 44

4.1 IT-Sicherheit im Kontext von IVS 45
4.1.1 Beispiele aus der Mobilität 45
4.1.2 Konzepte der IT- Sicherheit 48
4.1.3 IT-Sicherheitsverfahren 49
4.1.4 Sicherheitsinfrastrukturen von Mobilitätsanwendungen 51
4.2 Verfügbarkeit von Daten und Kommunikationsinfrastruktur 53
4.2.1 Einordnung und Begriffe 53
4.2.2 Verfügbarkeit im Kontext mobiler Kommunikationsnetze 53
4.2.3 Anforderungen an die Funktechnologien und Netzabdeckung 54
4.2.4 Zeitliche Anforderungen 54
4.2.5 Anforderungen nach Sicherheitsrelevanz der Daten 55
4.3 Technologielücken und Entwicklungspotentiale 56

5. Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen 58

5.1 Stand der Technik 59
5.1.1 Überblick 59
5.1.2 WLAN 60
5.1.3 Mobilfunk 61
5.1.4 Broadcast 64
5.1.5 Vergleich der primären Kommunikationstechnologien für Mobilitäts-anwendungen 65
5.1.6 Weitere Kommunikationstechnologien 66
5.1.7 Analyse existierender Netzstrukturen 67
5.2 Neue Anforderungen an Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen 69
5.3 Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen 2025+ 72
5.3.1 WLAN 72
5.3.2 Mobilfunk 73
5.3.3 Broadcast 75
5.3.4 Technologieszenarien 76
5.4 Technologielücken und Entwicklungspotentiale 79

6. Implikationen für die Standardisierung 82

6.1 Relevanz von Standards 83
6.2 Standardisierungsgremien, Industriekonsortien und andere Organisationen 83
6.3 Überblick aktueller Standards und Standardisierungstrends 86
6.4 Standardisierungsbedarf für Mobilitätsszenarien 2025+ und zukünftige Anwendungen 87

7. Hemmnisse und Handlungsfelder 92

7.1 Überblick 93
7.2 Gesellschaft und Recht 95
7.3 Wertschöpfung und Innovation 97
7.4 Sicherheit und Verfügbarkeit 100
7.5 Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen 103
7.6 Standardisierung 104

8. Fazit und Ausblick 106

Anhang A01

A Danksagung A01
B Use Cases A02
C Abschätzung des Datenvolumens zukünftiger Fahrzeugkommunikation A10
D Glossar A13
E Literatur A17
Impressum A26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 01: Untersuchungsdesign der Studie 9
Abbildung 02: Trends und Treiber des Makroumfeldes 11
Abbildung 03: Einflussbereiche und Deskriptoren der Mobilitätsszenarien 2025+ 13
Abbildung 04: Technologievarianten für Use Cases 27
Abbildung 05: Use Case Kartierung und hochgenaue Lokalisierung 30
Abbildung 06: Use Case Kartierung und hochgenaue Lokalisierung im Szenario „Koexistenz“ 31
Abbildung 07: Use Case Kartierung und hochgenaue Lokalisierung im Szenario „Konvergenz“ 32
Abbildung 08: Use Case Gefahrenbewältigung/Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen 33
Abbildung 09: Use Case Gefahrenbewältigung / Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen im Szenario „Koexistenz“ 34
Abbildung 10: Use Case Gefahrenbewältigung / Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen im Szenario „Konvergenz“ 35
Abbildung 11: Use Case Smart Traffic-Anwendungen 37
Abbildung 12: Use Case Smart Traffic-Anwendungen im Szenario „Koexistenz“ 38
Abbildung 13: Use Case Smart Traffic-Anwendungen im Szenario „Konvergenz“ 39
Abbildung 14: Use Case Cloud-Zugang und Cloud-Anwendungen 40
Abbildung 15: Use Case Cloud-Zugang und Cloud-Anwendungen im Szenario „Koexistenz“ 41
Abbildung 16: Use Case Cloud-Zugang, Cloud-Anwendungen im Szenario „Konvergenz“ 42
Abbildung 17: Konzepte der IT-Sicherheit 48
Abbildung 18: Public Key Infrastruktur für Car-to-X-Kommunikation 52
Abbildung 19: Übersicht drahtloser Kommunikationstechnologien für Mobilitätsanwendungen 60
Abbildung 20: Höherer Durchsatz als Hauptziel bisheriger Mobilfunkgenerationen 62
Abbildung 21: Höherer Durchsatz als Hauptziel bisheriger Mobilfunkgenerationen 68
Abbildung 22: Technologietrend „Virtualisierung“ und „Cloud-Computing“ 69
Abbildung 23: Technologietrend „Big Data“ 70
Abbildung 24: Technologietrend „Fahrzeugautomatisierung“ 71
Abbildung 25: KPI für 5G Mobilfunk – Vergleich von IMT Advanced (4G) und IMT-2020 (5G) 74
Abbildung 26: Erweiterung des Mobilfunkspektrums für 5G 75
Abbildung 27: Entwicklung von Kommunikationstechnologien in den Mobilitätsszenarien 2025+ 78
Abbildung 28: Relevante Standardisierungsgremien, Industriekonsortien und andere Organisationen im aktuellen IVS Standardisierungsprozess 84
Abbildung 29: IVS Referenzmodell 86
Abbildung 30: Standardisierung im Szenario „Konvergenz“: Mehr Player führen zu komplexeren Standardisierungsprozessen 88
Abbildung 31: Übergeordnete Bereiche für Hemmnisse und Handlungsfelder 93
Abbildung 32: Umgang mit der Existenz alternativer Zukunftsbilder 94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 01: Einflussbereiche und Deskriptoren der Mobilitätsszenarien 2025+ 16

Tabelle 02: Basisvergleich der Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ 25

Tabelle 03: Annahmen für Umsetzungsvarianten „Koexistenz“ vs. „Konvergenz“ 30

Tabelle 04: Abgeleitete High Level-Anforderungen für den Use Case Kartierung und hochgenaue Lokalisierung 33

Tabelle 05: Abgeleitete High Level-Anforderungen für Use Case Gefahrenbewältigung/Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen 36

Tabelle 06: Abgeleitete High Level-Anforderungen für Use Case Smart Traffic-Anwendungen 39

Tabelle 07: Abgeleitete High Level-Anforderungen für Use Case Cloud-Zugang und Cloud-Anwendungen 42

Tabelle 08: High Level-Anforderungen der funktionalen technischen Aspekte der Kommunikationstechnologien im Mobilitätssektor 43

Tabelle 09: Vergleich der primären existierenden Kommunikationstechnologien 66

Tabelle 10: Vergleich der Technologieszenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ 76

Tabelle 11: Relevante aktuelle Standardisierungsgremien (Stand 2016) 85

Tabelle 12: Relevante Industriekonsortien und andere Organisationen (Stand 2016) 85

Tabelle 13: Standardisierungsimplikationen in den Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ 88

Tabelle 14: Hemmnisse und Handlungsfelder im Bereich Gesellschaft und Recht 97

Tabelle 15: Hemmnisse und Handlungsfelder im Bereich Wertschöpfung und Innovation 100

Tabelle 16: Hemmnisse und Handlungsfelder im Bereich Sicherheit 102

Tabelle 17: Hemmnisse und Handlungsfelder im Bereich Verfügbarkeit 102

Tabelle 18: Hemmnisse und Handlungsfelder im Bereich Technologien und Netze 104

Tabelle 19: Hemmnisse und Handlungsfelder im Bereich Standardisierung 105

Tabelle 20: Szenarien für die Analyse des Datenvolumens A11

Tabelle 21: Typische Datenraten für ausgewählte Sensoren A12

Abkürzungsverzeichnis

3G	3. Generation Mobilfunksysteme
3GPP	Third Generation Partnership Program
4G	4. Generation Mobilfunksysteme
5G	5. Generation Mobilfunksysteme
5GPPP	5G Infrastructure Public Private Partnership
ADAS	Advanced Driver Assistance System
BSA	Basic Set of Applications
BSS	Basic Service Set
BWS	Broadcast Web Sites
CA	Certification Authority
CEN	Comité Européen de Normalisation
C-ITS	Cooperative ITS
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
D2D	Device-to-Device Communication
DAB	Digital Audio Broadcasting
DCC	Decentralized Congestion Control
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMB	Digital Multimedia Broadcasting
DSRC	Dedicated Short Range Communication
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
eMBMS	Enhanced Multimedia Broadcast Multicast Services
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
EWS	Emergency Warning System
FCD	Floating Car Data
FIG	Fast Information Group
HSPA+ (E-HSPA)	Evolved High-Speed Packet Access
HTC	Human Type Communication
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
IETF	Internet Engineering Task Force
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMT	International Mobile Telecommunications
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPv4	Internet Protocol Version 4

IPv6	Internet Protocol Version 6
ISM	Industrial, Scientific, Medical
IT	Informationstechnologie
ITS	Intelligent Transport Systems
ITS-G5	Intelligent Transport Systems im 5GHz Frequenzbereich
ITU	International Telecommunication Union
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KPI	Key Performance Indicator
LIDAR	Light detection and ranging
LPWA	Low Power Wide Area
LTCA	Long-Term Certificate Authority
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution- Advanced
LTE-V	Long Term Evolution- Vehicular
M2M	Machine-to-Machine
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Services
MDM	Mobilitätsdatenmarktplatz
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MIV	Motorisierter Individualverkehr
mmWave	Millimeter Wave
MOT	Multimedia Object Transfer
MTC	Machine Type Communication
NFC	Near Field Communication
NFV	Network Function Virtualization
NGNM	Next Generation Mobile Networks
NoSQL	Not only SQL (Structured Query Language)
OCA	Open Traffic Systems City Association
OCB	Outside the Context of a BSS
OCIT	Open Communication Interface for Traffic Control Systems
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OTS	Open Traffic Systems
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
P2MP	Point-to-Multipoint
P2P	Point-to-Point
PCA	Pseudonym Certificate Authority
PGP	Pretty Good Privacy
PLMN	Public Land Mobile Network

PKI	Parking Information
PKI	Public Key Infrastructure
POI	Point of Interest
ProSe	Proximity Services
PTI	Public Transport Information
Radar	Radio Detection and Ranging
RDS	Radio Data System
RFID	Radio Frequency Identification
RSU	Road Side Units
RTM	Road Traffic Message
SAE	Society of Automotive Engineers
SDN	Software-Defined Networking
SPAT	Signal Phase and Timing
SPCA	Service Provider Certificate Authority
TAP	TPEG Automotive Profile
TCP	Transmission Control Protocol
TDS	Transparent Data Channel
TFP	Traffic Flow and Prediction
TISA	Traveller Information Services Association
TMC	Traffic Message Channel
TPEG	Transport Protocol Experts Group
UKW	Ultra-Kurzwelle
UMTS	Universal Mobile Telecommunication Systems
WG	Working Group
WoT	Web of Trust
V2X	Vehicle-to-X
VLC	Visible Light Communication
VMZ	Verkehrsmanagementzentrale
VRU	Vulnerable Road User

Kurzfassung

Die Fortbewegung ist ein menschliches Grundbedürfnis und der Transport das Rückgrat unserer Wirtschaft. Das Automobil stellt den Inbegriff der Mobilität von heute dar. Dabei sind die Bedürfnisse an die Mobilität und die Anforderungen an den Transport ständigem Wandel unterworfen. Einflüsse aus Ökonomie, Technologie, Politik und Recht, Gesellschaft und Ökologie werden die Mobilität der Zukunft tiefgreifend verändern. Insbesondere Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) werden die Leistungsfähigkeit und die Effizienz der Verkehrssysteme nachhaltig verbessern. Die hochgradige Vernetzung in Intelligenten Verkehrssystemen (IVS) ist die Basis für eine Vielzahl von Anwendungen im Bereich Sicherheit, Nachhaltigkeit und Komfort. Dabei werden IKT selbst zum Innovationstreiber in IVS: Sie unterstützen die zunehmende Automatisierung des Verkehrs und erlauben neuartige datengetriebene Dienste und Geschäftsmodelle.

Die Grundlage für den breiten Einsatz von IKT für Mobilität sind Kommunikationstechnologien und -netze, die auch in den nächsten Jahren eine dynamische Entwicklung nehmen werden. Welche Anforderungen werden zukünftige IVS an IKT stellen? In welchen Use Cases wird IKT relevant sein? Die vorliegende Studie untersucht Technologieanforderungen einer steigenden Fahrzeugvernetzung, leitet wesentliche Hemmnisse für den Einsatz von IKT für Mobilität ab und identifiziert die prioritären Handlungsfelder für die „Vernetzte Mobilität von morgen“.

Die Komplexität, Dynamik und Unsicherheit bei der zukünftigen Entwicklung von IVS lässt eine einfache, einwertige Prognose nicht zu. Aus einer Analyse von heute beobachtbaren Trends und Treibern des Makroumfeldes werden deshalb zwei alternative Zukunftsbilder hinsichtlich des Einsatzes von IKT für Mobilität mit einem Zeithorizont von 10 bis 15 Jahren (2025+) entwickelt. Die beiden Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ stellen divergierende und durchaus realistische Entwicklungen dar, wobei beide Szenarien einen deutlichen Innovationsprung gegenüber heute aufweisen.

Das erste Szenario „Koexistenz“ ist von der Koexistenz mehrerer Informations- und Kommunikationstechnologien für Mobilitätsanwendungen gekennzeichnet, die in parallelen Strukturen nebeneinander existieren und einen geringen Integrations- und Interoperabilitätsgrad aufweisen, aber anwendungsspezifisch ihre jeweiligen Vorteile ausspielen. Im zweiten Szenario „Konvergenz“ konvergieren die Technologien in Richtung hochgradig integrierter Netze, die zuvor vorhandene und sich in Entwicklung befindliche Systeme, Komponenten, Verfahren, Protokolle und Standards zusammenführen oder substituieren.

Ausgangspunkt der Studie ist eine Szenarioanalyse, die relevante Einflussfaktoren und Deskriptoren bestimmt und in den beiden Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ bündelt. Einer systemorientierten Herangehensweise folgend werden für die grundlegenden Anwendungsfelder von IKT für Mobilität – Sicherheit, Nachhaltigkeit und Komfort – jeweilige Use Cases kategorisiert und grundlegende Anforderungen an die IKT vor dem Hintergrund der beiden Szenarien anhand von repräsentativen Uses Cases herausgearbeitet. Darauf aufbauend werden Aspekte der Sicherheit und Verfügbarkeit der Kommunikationsnetze analysiert, Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen bewertet sowie Technologiepfade skizziert. Weiterhin werden Implikationen für Standards und Standardisierungsprozesse hinsichtlich der IKT für Mobilität diskutiert. Aus den Analysen werden jeweils Hemmnisse für das Erreichen der skizzierten Szenarien abgeleitet und zugehörige Handlungsfelder identifiziert. Neben den technologiegetriebenen Themenfeldern Sicherheit und Verfügbarkeit, Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen sowie Standardisierung werden zusätzlich die grundlegend wirkenden Bereiche „Gesellschaft und Recht“ sowie „Wertschöpfung und Innovation“ thematisiert.

Die wichtigsten Handlungsfelder umfassen:

Im Bereich Gesellschaft und Recht:

- Die gemeinsame Bewältigung komplexer, disziplin- und branchenübergreifender Herausforderungen durch einen strategischen Dialog aller Stakeholder.
- Die Erarbeitung einer klaren politischen Gesamtstrategie für IVS mit einem Zielsystem, Prioritäten und Umsetzungs-Roadmaps.
- Die Anpassung und Harmonisierung rechtlicher Bestimmungen im Verkehrsrecht.
- Die Schaffung von Klarheit im Umgang mit Mobilitätsdaten durch Anpassungen und Harmonisierungen im Datenschutzrecht sowie
- Der öffentliche Dialog über die Vor- und Nachteile von IVS, um einer möglichen Technologieskepsis zu begegnen.

Im Bereich Wertschöpfung und Innovation:

- Die gemeinschaftliche Erarbeitung funktionsfähiger Geschäftsmodelle durch privatwirtschaftliche Akteure und die öffentliche Hand.
- Volkswirtschaftliche Analysen der Wirkungen des Wandels der Mobilitätswelt auf die Wertschöpfung und Beschäftigung sowie industriepolitische Frühaufklärung.
- Die Koordination der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten von Wirtschaft, Forschungseinrichtungen und Hochschulen sowie die Bündelung in Spitzenforschungsclustern.
- Die Verbesserung der Gründungsbedingungen für Mobilitäts-Start-ups und eine stärkere Fokussierung der Innovationsförderung auf KMUs sowie
- Die Unterstützung des Sprungs von Inventionen zu Innovationen durch eine humanwissenschaftliche, rechtswissenschaftliche und wirtschaftswissenschaftliche Begleitung von Projekten in Innovationstestfeldern.

Im Bereich Sicherheit und Verfügbarkeit:

- Technologie- und netzübergreifende Sicherheitskonzepte.
- Leistungsfähige PKI (Public Key Infrastructure)-Systeme mit Berücksichtigung der spezifischen IVS-Anforderungen.
- Effektive Nutzung redundanter Kommunikationssysteme.
- Anonymität in der Kommunikation bzw. Verschlüsselung vertraulicher Informationen und
- Schutz kritischer Kommunikationsinfrastruktur.

Im Bereich Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen:

- Im Szenario „Koexistenz“ eine komplementäre Nutzung von Kommunikationstechnologien (Ausbau von WLAN für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen, mit Infrastrukturelementen und anderen Verkehrsteilnehmern; Ausbau von Mobilfunk für die infrastrukturelle breitbandige Basisvernetzung und für digitalen Broadcast zur effektiven Verteilung von Verkehrsdaten).
- Im Szenario „Konvergenz“ Ausbau von 5G als flexibles, integriertes Kommunikationssystem mit sehr niedriger Latenz sowie sehr hoher Datenrate und Zuverlässigkeit.
- Schaffen eines skalierbaren, flexiblen und betreiberunabhängigen Systemverbunds mit offenen Schnittstellen.
- Konsistente, technologieübergreifende Datenspeicherung und -haltung, Nutzung offener, standardisierter und technologieunabhängiger Schnittstellen, Daten- und Nachrichtenformate sowie
- Berücksichtigung relevanter Technologietrends wie Virtualisierung der Verkehrsinfrastruktur, cloudbasierte Anwendungen, Big Data und Fahrzeugautomatisierung.

Und im Bereich Standardisierung:

- Kontinuierliche (Weiter-)Entwicklung von existierenden Standards für IVS basierend auf existierenden Standard Releases unter Berücksichtigung von Aspekten der Vorwärts- und Rückwärtskompatibilität.
- Technologieübergreifende Standardisierung für IVS, insbesondere die Spezifikation von Nachrichtenformaten unabhängig von der Kommunikationstechnologie, sowie Harmonisierung der Standards aus verschiedenen Domänen und Technologiebereichen.
- Vorwettbewerbliche Entwicklung von Spezifikationen bzw. deren Anforderungen durch Beteiligung aller Interessengruppen; aktive Mitgestaltung des Standardisierungsprozesses und Koordinierung sowie
- Standardisierung als Rahmen für innovative Produkte und Dienste.

Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Studie können die Politik und die Stakeholder der Mobilitätswelt von morgen erste Migrationsschritte sowie konkrete Handlungsempfehlungen ableiten, die der Erreichung eines gewünschten Zielszenarios dienen. Dieses Zielszenario muss nicht notwendigerweise mit einem der beiden hier als denkbar beschriebenen Mobilitätsszenarien übereinstimmen, sondern kann auch dazwischen liegen.

1. Einleitung

1.1 Hintergrund und Zielsetzung

IKT für Mobilität – die Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) für den Transport von Menschen und Gütern – ist ein extrem weites und komplexes Themenfeld. Es berührt zahllose Technologiebereiche, Verkehrssegmente, Verkehrsträger, Mobilitätsanbieter, Use Cases und Produkte [A4]. Die Gesamtheit bildet für die Telekommunikationsanbieter einen neuen Markt für Mobilität, der noch am Anfang seiner Entwicklung steht und dem große Zuwächse vorhergesagt werden. Richten wir den Blick auf den Inbegriff der Mobilität in quasi allen Industriestaaten – das Automobil – so ist derzeit eine klare Entwicklungsrichtung zu erkennen: Die Fahrzeugvernetzung schreitet immer weiter voran. Immer mehr Informationen werden von Fahrzeugsensoren erfasst und verarbeitet und immer mehr von diesen Informationen werden zukünftig nach außen kommuniziert. Die anfallenden Datenmengen können je nach Zahl und Art der verwendeten Sensoren schnell bis in den dreistelligen Megabyte-Bereich pro Sekunde reichen ([S23], Anhang D). Im Gegenzug werden Fahrzeuge auch immer größere Datenvolumen aus dem wachsenden verfügbaren Datenpool von außen abrufen – sei es für Zwecke der Sicherheit, der Nachhaltigkeit oder des Komforts. Die dahinter liegenden Nutzungsmöglichkeiten und Anwendungen sind vielfältig und in ihrer Gänze heute noch nicht absehbar.

Mögliche Anwendungsfelder reichen von der Bereitstellung eines Internet-Zugangs für die Passagiere von Fahrzeugen – zur Nutzung diverser Webinhalte und (Streaming-)Dienste – über die Verbesserung der Fahrerassistenz und die gezielte Verkehrsbeeinflussung bis hin zur maßgeblichen Unterstützung hochautomatisierten und autonomen Fahrens. Die Einbeziehung extern verfügbarer (Echtzeit-)Informationen über die Verkehrslage, Hindernisse und Gefahren etc. ermöglicht ein präziseres und vorausschauenderes Bild von der Fahrzeugumgebung als das alleinige Stützen auf die selbst erzeugten Daten der im Fahrzeug verbauten Sensoren mit beschränkter Reichweite (wie z. B. Kameras, Radar- und Lidar-Systeme). Prozesse der Datenaggregation und -veredelung können mit Hilfe von Kommunikation auch vom Fahrzeug in die Infrastruktur oder in eine weit entfernte Cloud verlagert werden.

Für die drahtlose Kommunikation von Fahrzeugen mit einer Daten- und Dienste-Cloud, mit Infrastrukturanlagen sowie mit anderen Fahrzeugen und Verkehrsteilnehmern existiert heute eine Vielzahl von verschiedenen Technologien (IEEE 802.11 OCB / ETSI ITS-G5, UMTS, LTE, DAB, DVB-T etc.). Im Wesentlichen lassen sich die Technologien für drahtlose Kommunikation in die Kategorien WLAN, Mobilfunk und Broadcast einteilen. Durch die große Anzahl der zukünftig zu integrierenden Fahrzeuge, den enormen Umfang der zu verarbeitenden Daten und vor allem aufgrund der hohen Anforderungen an Latenzzeiten und die Zuverlässigkeit der Kommunikation stoßen die bestehenden Technologien jedoch schnell an ihre Grenzen. Anforderungen, die sich aus zukünftig erwarteten Mobilitätsanwendungen ergeben, fließen daher in die Entwicklungs- und Standardisierungsprozesse neuer Technologien, wie z. B. der fünften Mobilfunkgeneration (5G), ein. Dabei ist heute aber noch nicht eindeutig absehbar, welche Funktionsumfänge zukünftige Technologien erlauben und wie sich verschiedene Technologien gegenseitig ergänzen oder substituieren werden.

Antworten auf einige grundlegende Fragen, die diese Studie adressiert, werden den tatsächlichen Entwicklungspfad maßgeblich bestimmen. Dazu zählen:

- Wie entwickeln sich allgemeine Bestimmungsfaktoren (wie Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftswachstum, Ölpreis etc.) und Rahmenbedingungen (wie Technologieakzeptanz, Verkehrspolitik etc.) der Mobilität in Deutschland und in anderen Märkten?
- Wie viele Fahrzeuge werden in Zukunft vernetzt und automatisiert sein?
- Welche Anwendungsszenarien werden relevant sein?

- Wieviel und welche Daten fallen an? Welche davon werden auf welche Weise kommuniziert? Und wo werden sie verarbeitet?

Ziel der Studie ist es, die Technologieanforderungen einer steigenden Fahrzeugvernetzung (an die Fahrzeuge, die Verkehrs- und Kommunikationsinfrastruktur und deren Zusammenwirken) unter Berücksichtigung von verschiedenen Zukunfts- und Anwendungsszenarien zu untersuchen. Daraus sind die wesentlichen Hemmnisse für eine zunehmende Verbreitung von IKT-Anwendungen und die prioritären Handlungsfelder für die „Vernetzte Mobilität von morgen“ zu identifizieren. Auf dieser Grundlage können dann Entscheidungsträger erste Migrationsschritte auf dem Weg in die Zukunft ableiten.

1.2 Abgrenzung des Untersuchungsbereiches

Die Bedeutung von IKT für die Erfüllung von Mobilitätsbedürfnissen ist bereits heute enorm und wird in den kommenden Jahren noch beträchtlich zunehmen. Es ist daher nötig, im Rahmen dieser Studie eine Eingrenzung und Schwerpunktsetzung für die betrachteten Facetten der Mobilitätswelt vorzunehmen. Die Fokussierung der Studie liegt auf dem privaten Personen-/motorisierten Individualverkehr auf dem Verkehrsträger Straße (Fokus: Auto). Andere Verkehrsmodi (Wirtschaftsverkehr, Güterverkehr, Öffentlicher Verkehr) werden nur insoweit betrachtet, wie sie für die weitere Entwicklung der IKT wichtige Impulse und Anwendungsbereiche hervorbringen, die spezifische Technologieanforderungen stellen.

Der räumliche Betrachtungsbereich der Studie umfasst hinsichtlich neuer Technologien und Trends die weltweiten Entwicklungen sowie die internationale, europäische und nationale Rechtsetzung. In Bezug auf die analysierten Verkehrsräume und Mobilitätsmärkte liegt eine gewisse Fokussierung auf Deutschland vor.

Der zeitliche Zielhorizont der zu entwickelnden Zukunftsbilder erstreckt sich auf den ungefähren Bereich der nächsten 10 bis 15 Jahre (**Mobilitätsszenarien 2025+**). Hierbei sollen insbesondere die sich für diesen Zeitraum schon heute abzeichnenden Entwicklungslinien Fahrzeugvernetzung, Automatisiertes Fahren, Kooperative Systeme und Verkehrsmanagement (Smart Traffic) eine nähere Betrachtung erfahren. Die Trends zu alternativen Fahrzeugantrieben (insbesondere Elektromobilität) und zu neuen Nutzungsformen und Mobilitätsdienstleistungen, die ebenfalls eigene Anforderungen an die IKT stellen, werden nur am Rande thematisiert.

Um die große Anzahl von verschiedenen Kommunikationstechnologien einzuschränken, fokussiert sich die Studie auf die drei primären Technologiefamilien **WLAN, Mobilfunk und Broadcast**, die voraussichtlich eine starke Verbreitung in zukünftigen Intelligenten Verkehrssystemen (IVS) finden werden. Andere Kommunikationstechnologien werden als sekundär betrachtet und genannt, aber nicht weiter analysiert. Von den Eigenschaften der primären Kommunikationstechnologien werden grundlegende Aussagen zu Netzstrukturen und deren Nutzung für Mobilitätsanwendungen abgeleitet.

1.3 Methodik und Aufbau der Studie

Die heute existierende mobile Datenkommunikationswelt war in der vorliegenden Form vor 15 Jahren kaum absehbar. Auch die Vernetzte Mobilität von morgen ist für einen vergleichbaren Zeitraum am heutigen Tag nicht präzise vorhersehbar. Dafür weisen die maßgebenden Faktoren für die weitere Entwicklung von Technologien, Verkehrssystemen und Mobilitätsmärkten eine zu

hohe Komplexität, Dynamik und Unsicherheit auf. In diesem Sinne erscheint es nicht zielführend, entsprechende Technologie- und Anforderungsanalysen auf einwertige Prognosen zu stützen.

Um später eine Bandbreite möglicher Entwicklungen berücksichtigen und damit verbundene Unterschiede aufzeigen zu können, wurde daher eine Szenarioanalyse an den Anfang der vorliegenden Untersuchung gestellt. In **Abschnitt 2** werden ausgehend von heute beobachtbaren Trends und Treibern des Makroumfeldes zwei alternative Zukunftsbilder entwickelt, auf die in den nachfolgenden Abschnitten der Studie immer wieder in Form szenariospezifischer Aussagen und Wirkungsanalysen Bezug genommen wird. Um zu diesen Szenarien zu gelangen, wurden die sich momentan vollziehenden Marktentwicklungen und eine Vielzahl existierender Mobilitätsstudien ([S8] [S9] [S14] [S19] [S28] [S22] [S21] [S24] [S29] u. a.) analysiert und anschließend auf den vorliegenden Untersuchungsgegenstand „IKT für Mobilität“ adaptiert. Das bedeutet, es wurden relevante Einflussbereiche und Deskriptoren festgelegt, die geeignet erscheinen, entsprechende Zukunftsbilder zu charakterisieren. Anschließend wurden mehrwertige Prognosen für die einzelnen Deskriptorausprägungen bestimmt und zueinander passende Entwicklungen zu stimmigen Gesamtbildern gebündelt. Die letztlich vorgenommene Auswahl von zwei sich gegenüber stehenden Szenarien erhebt den Anspruch, zwei in sich konsistente, ausreichend voneinander zu unterscheidende und hinsichtlich ihres Eintreffens durchaus denkbare Zukunftsbilder aufzuzeigen. Es werden jedoch bewusst keine Aussagen über die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens getroffen. Neben den sie kennzeichnenden divergierenden Entwicklungen, die an den Ausprägungen der sog. kritischen Deskriptoren sichtbar werden, weisen beide Szenarien auch etliche gemeinsame Entwicklungen auf (vgl. Abschnitt 2.2). Die Erarbeitung der Szenarien wurde in zwei Workshops durch die Beiräte dieser Studie unterstützt.

In **Abschnitt 3** werden zunächst einer systemorientierten Herangehensweise folgend und literaturgestützt die grundlegenden Anwendungsfelder und zugehörige Use Cases für den Einsatz von IKT im Kontext des Untersuchungsbereiches kategorisiert. Die Systematisierung erfolgt anhand der verfolgten Hauptzwecke von Mobilitätsanwendungen sowie möglicher Technologievarianten. Anschließend werden repräsentative Use Cases ausgewählt und vor dem Hintergrund der beiden Szenarien analysiert, um die grundlegenden Anforderungen an die IKT herauszuarbeiten. Die identifizierten Anforderungen werden in den nachfolgenden Abschnitten der Studie vertieft. Die Kategorisierung und Auswahl von Use Cases erfolgte in Abstimmung mit den Beiräten dieser Studie und wurde durch eine Online-Befragung unterstützt.

Abschnitt 4 widmet sich umfassend dem hochrelevanten und brisanten Thema der Sicherheit und Verfügbarkeit von Kommunikationsnetzen für Mobilitätsanwendungen. Dabei wird auf die einzelnen Aspekte der Sicherheit (Safety, Security etc.), auf die auftretenden Gefahren sowie auf verfügbare Methoden und Verfahren für den Umgang mit diesen Risiken eingegangen. Anforderungen an Sicherheit und Verfügbarkeit werden szenariospezifisch konkretisiert und entsprechende Handlungsbedarfe aufgezeigt.

In **Abschnitt 5** werden die in Frage kommenden Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen für Mobilitätsanwendungen einer tiefergehenden Analyse unterzogen und bewertet. Dabei spielen insbesondere die technologische Leistungsfähigkeit und die zu erwartenden (Weiter-)Entwicklungspotentiale eine große Rolle. Für die beiden Szenarien werden, ausgehend von sich abzeichnenden Technologietrends für den Betrachtungshorizont der Studie, zwei unterschiedliche Technologiepfade mit zugehörigen Handlungsfeldern skizziert.

Abschnitt 6 stellt mit einer gesonderten Analyse die wichtige Rolle von Standards, Standardsetzern und Standardisierungsprozessen heraus. Herausforderungen, Entwicklungen und Implikationen für die Standardisierung der IKT im Zusammenhang mit Mobilitätsanwendungen werden herausgearbeitet und szenariospezifisch konkretisiert.

Aus den vorangegangenen Analysen werden in **Abschnitt 7** Schlussfolgerungen abgeleitet und die wesentlichen Hemmnisse und die prioritären Handlungsfelder für die Vernetzte Mobilität von morgen zusammengefasst. Neben den drei technologischen Themenfeldern, zu denen entsprechende Grundaussagen und Schwerpunkte bereits in den vorangegangenen Abschnitten abgeleitet wurden, werden hier auch Hemmnisse und Handlungsfelder aus den Bereichen „Gesellschaft und Recht“ sowie „Wertschöpfung und Innovation“ thematisiert.

Die Arbeiten der Abschnitte 4 bis 7 basieren methodisch auf Literaturanalysen und Bestandsaufnahmen aktueller Forschungs- und Entwicklungsprojekte ([P1] – [P23]), Aktivitäten von Standardisierungsgremien, Industriekonsortien und anderer Organisation ([O1] – [O17]) sowie politischer Strategien und Roadmaps ([S1] – [S31]). Dabei wurden nationale, europäische und internationale Forschungsberichte, Tagungs- und Kongressliteratur sowie Standardisierungsdokumente berücksichtigt. Neben den Einschätzungen der Beiräte sind auch Erkenntnisse aus ergänzenden Gesprächen mit weiteren Experten eingeflossen.

Das Untersuchungsdesign der Studie wird in der folgenden Abbildung visualisiert:

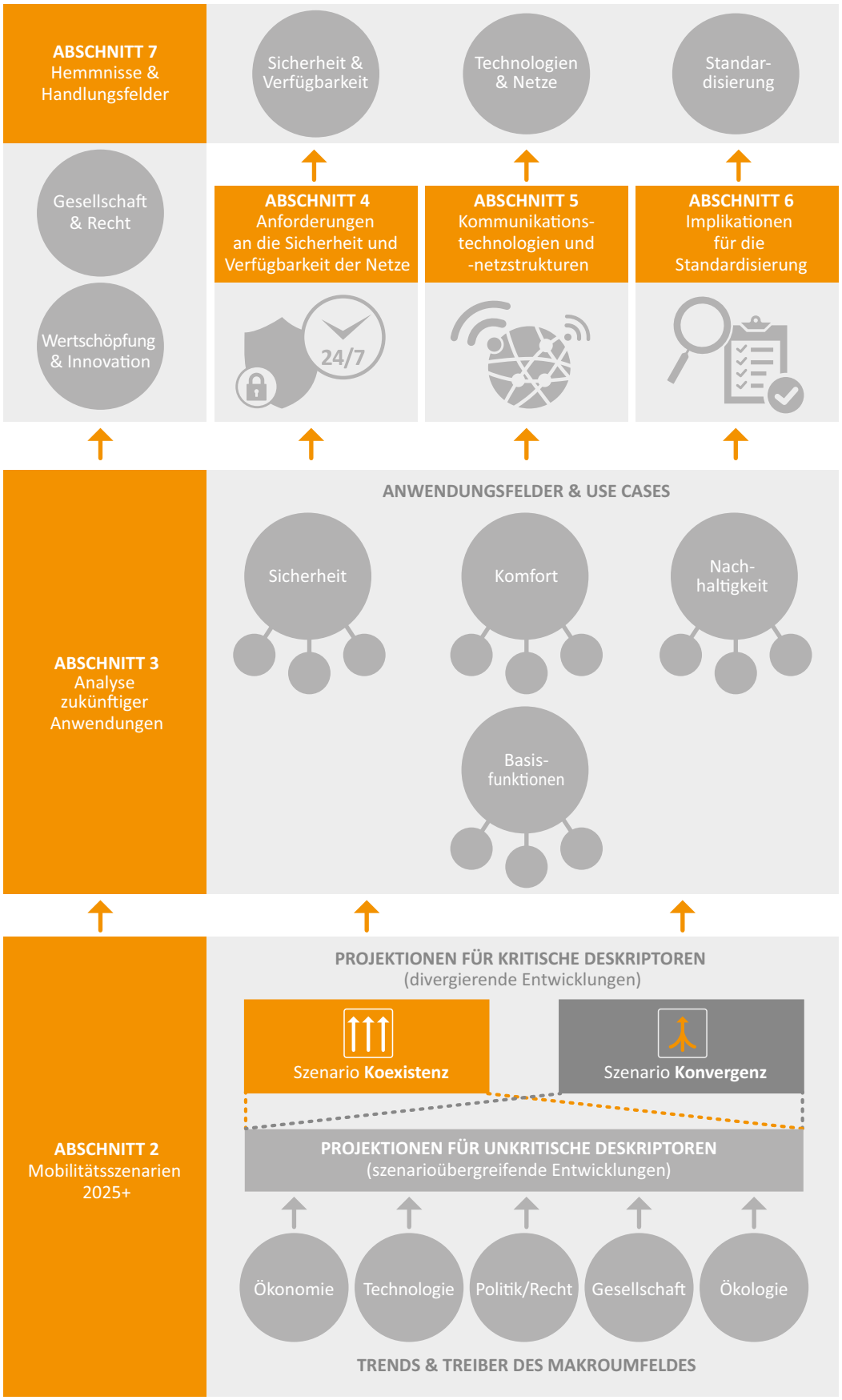


Abbildung 01: Untersuchungsdesign der Studie

2. Mobilitätsszenarien 2025+

2.1 Trends und Treiber des Makroumfeldes

Die Entwicklungen auf dem Feld der Mobilität in der kommenden Dekade und darüber hinaus werden von einigen grundlegenden Trends und Einflussfaktoren vorangetrieben, die es bei der Erstellung von Mobilitätsszenarien zu berücksichtigen gilt. Dabei ist zunächst festzustellen, dass es sich sowohl bei der räumlichen Mobilität als auch bei der Kommunikation um elementare Grundbedürfnisse des Menschen handelt, welche seine zivilisatorische Entfaltung bis hin zur Gegenwart prägten und auch zukünftig weiter bestimmen werden. Sie ermöglichen wirtschaftliche Transaktionen und soziale Interaktionen, dienen der Wissensgenerierung und der Selbstverwirklichung. Nie zuvor war der Mensch so mobil wie heute. Nie zuvor wurde so viel kommuniziert. Und diese Tendenz wird sich mit einer neuen Qualität fortsetzen: Mobilität und Kommunikation finden zunehmend integriert statt.

Sogenannte Megatrends, also solche mit globaler Geltung und einer hohen Robustheit gegenüber diametralen Entwicklungen, erzeugen einen hohen Innovationsdruck, der den zunehmenden Einsatz von IKT für Mobilität vorantreibt. In Abbildung 02 sind wesentliche Faktoren dargestellt.

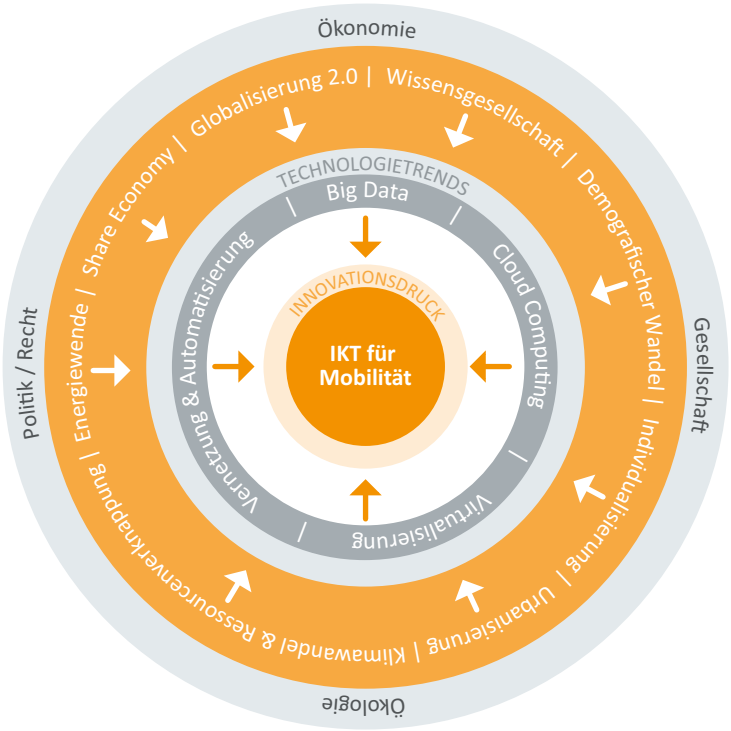


Abbildung 02: Trends und Treiber des Makroumfeldes

Der Grad der internationalen Wirtschaftsverflechtungen hat eine neue Dimension erreicht. Im Zuge der **Globalisierung 2.0** gehen nach der klassischen Großindustrie nunmehr auch verstärkt mittelständische Unternehmen und solche der Dienstleistungswirtschaft, insbesondere in der Informationstechnologie (IT)-Branche, den Weg der Internationalisierung. Gleichzeitig befinden sich asiatische Schwellenländer wie China in einem Wandel vom Fertigungsstandort billiger Massenprodukte und vom attraktiven Absatzmarkt für westliche Unternehmen hin zur Heimat weltweit erfolgreicher Technologieunternehmen (wie das Beispiel der Telekommunikationsausrüster Huawei und ZTE zeigt). Auf diese Weise entstehen neue wirtschaftliche Machtzentren, die zunehmend als globale Investoren und Innovationstreiber auftreten.

Individuelle und kollektive Kenntnisse und Fähigkeiten werden in der **Wissensgesellschaft** immer mehr zur entscheidenden Ressource von Volkswirtschaften, was exponentiell wachsende Kommunikationsbedarfe nach sich zieht. Unterdessen zeichnet sich unter der Bezeichnung **Share Economy** ein verstärkter Trend zu einer gemeinschaftlichen Nutzung vorhandener Ressourcen ab („Nutzen statt Besitzen"). Dies umfasst auch das freie Teilen und die kollaborative Verwertung von Wissen und Informationen, um den Wohlstand aller zu erhöhen.

Die zunehmende **Individualisierung** als weltweites Phänomen lässt das Streben nach Selbstverwirklichung (und damit nach Mobilität und Kommunikation) weiter hochschnellen. Durch sie werden neue Freiräume geschaffen, bestehende Konventionen verlieren an Bedeutung und kleinteilige, nutzergetriebene Mikromärkte entstehen. Der **demografische Wandel** – sowohl hinsichtlich der Altersstruktur als auch der regionalen Bevölkerungsentwicklung – und die rasant voranschreitende **Urbanisierung** stellen die Infrastrukturversorgung generell (und Verkehrsinfrastrukturen im Besonderen) vor große Herausforderungen. Während der klassische motorisierte Individualverkehr in urbanen Zentren immer größere Probleme verursacht, haben schrumpfende ländliche Räume mit Anpassungsschwierigkeiten und der mangelnden wirtschaftlichen Tragfähigkeit verkehrlicher und digitaler Infrastrukturen zu kämpfen.

Der **Klimawandel** und die **Verknappung natürlicher Ressourcen** sind globale Herausforderungen, für die das Feld der Mobilität einen wesentlichen Ursachenkomplex und damit auch einen zentralen Aktionsraum für Politik, Recht und Gesellschaft darstellt. Im engen Zusammenhang damit steht die politisch vorangetriebene **Energiewende**, die sich im Verkehrssektor konsequenterweise als komplementär wirkende Mobilitätswende fortsetzt. Neben neuartigen Verkehrs-, Fahrzeug- und Antriebskonzepten sowie veränderten Einstellungen und Verhaltensmustern bei den Mobilitätsnutzern verspricht hier vor allem der Einsatz von IKT enorme Potentiale, die Mobilität energieeffizienter und ökologisch nachhaltiger zu gestalten.

Die genannten Treiber aus den Bereichen Ökonomie, Ökologie, Gesellschaft, Politik und Recht finden ihren Niederschlag auch in den maßgeblichen **Technologietrends**. Im Übergang zum digitalen Zeitalter wächst die Bedeutung der elektronischen Speicherung und Verarbeitung von Informationen und ihres Austausches – jederzeit und überall – für die Prozesse der Wertschöpfung gewaltig. Auch Mobilitätsdaten (Verkehrsdaten, Fahrzeugdaten, Nutzerdaten) werden immer mehr zur Grundlage und Ressource für neuartige Geschäftsmodelle. Dabei handelt es sich um große Datenvolumen mit einer hohen Vielgestaltigkeit und Veränderungsdynamik. Deshalb gewinnen Technologien, die das wirtschaftliche Sammeln und Auswerten solcher Massendaten (Big Data) bezwecken, einen enormen Stellenwert. Konzepte der Virtualisierung und die Delokalisierung von Daten und ihrer Verarbeitung in entfernte Rechenzentren (Cloud-Computing) sind wichtige Lösungsvarianten für den Umgang mit Big Data. Ein wesentlicher Treiber der Vernetzung im Verkehrssystem ist außerdem die Fahrzeugautomatisierung. Auch wenn heute bereits existierende Systeme beweisen, dass Kommunikation nach außen für die Vision vom selbstfahrenden Auto nicht zwingend erforderlich ist, so besitzt eine umfassende Vernetzung mit anderen Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur doch das Potential, diese technische Herausforderung wesentlich zu erleichtern [S31] [SO10].

2.2 Relevante Deskriptoren der Mobilitätsszenarien

Ausgehend von den soeben beschriebenen Trends und Treibern des Makroumfeldes wurden von den Autoren der Studie – unter Berücksichtigung der typischerweise in Mobilitätsprognosen und Mobilitätsszenarien einbezogenen Faktoren ([S8][S28][S29]) und in Abstimmung mit den Experten des Beirats der Studie – Einflussbereiche und Deskriptoren für die Charak-

terisierung der Szenarien 2025+ bestimmt. Dabei kam es insbesondere darauf an, neben den zentralen Einflussgrößen für das Ausmaß und das Wesen der künftigen Mobilität genau solche Faktoren einzubeziehen, die Rückschlüsse auf den zukünftigen Einsatz von IKT und die damit verbundenen Anforderungen zulassen.

Das Ergebnis der vorgenommenen Strukturierung und Auswahl – insgesamt 28 Deskriptoren in sieben Einflussbereichen – ist in Abbildung 03 dargestellt.

Abbildung 03: Einflussbereiche und Deskriptoren der Mobilitätsszenarien 2025+ (Deskriptoren mit unterschiedlichen Ausprägungen in beiden Szenarien sind fett markiert.)

Kollektive und individuelle Einstellungen sowie Verhaltensweisen besitzen einen entscheidenden Einfluss darauf, wie die Mobilität von morgen aussehen und welche Rolle darin IKT spielen wird. Auch die demografischen und wirtschaftlichen Entwicklungen, die politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen und die zu bewältigenden Verkehrsleistungen beeinflussen die Richtung und Dynamik von Innovationsprozessen sowie die Adoption und Diffusion neuer Technologien wesentlich. Welche Technologielösungen sich durchsetzen können und werden, hängt nicht zuletzt auch

maßgeblich von den zukünftig existierenden Wertschöpfungsgefügen und Geschäftsmodellen ab. Entsprechende Deskriptoren decken die hierbei relevanten Einflussgrößen ab.

Im Bereich der IKT selbst wurden der Schwerpunkt der Fahrzeugkommunikation, die Kooperation im Verkehrssystem und der Ort der Entscheidungsfindung automatisierter Systeme als entscheidende Deskriptoren identifiziert. Auch innerhalb der Fahrzeuge finden für den IKT-Einsatz bedeutsame technologische Entwicklungen letztlich ihren Ausdruck. Dabei ist zum einen an die Ausstattung mit Konnektivitätsfunktionen und automatisierten Fahrfunktionen zu denken. Zum anderen spielt auch die Verbreitung von Elektrofahrzeugen (und deren Anbindungsmöglichkeiten an Smart Grids) eine gewisse Rolle, da Fahrzeugvernetzung und Elektromobilität komplementäre Technologietrends darstellen, die gegenseitig als Inkubatoren wirken können [A5][S14][S19].

Für etwa zwei Drittel der festgelegten Deskriptoren wurden alternative Entwicklungen bis 2025 als plausibel erachtet und dementsprechend mehrere Projektionen für die jeweiligen Deskriptorausprägungen gebildet. Diese wurden dann unter Berücksichtigung der gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den Deskriptoren zu zwei in sich stimmigen und widerspruchsfreien Projektionsbündeln zusammengefügt. Die Alternativenbündelung und die Konsistenzbewertungen erfolgten dabei logisch-intuitiv in Diskussionen und mit klarem Fokus auf dem Untersuchungsgegenstand „IKT für Mobilität“.

Die beiden im Ergebnis entstandenen Szenarien weisen 14 gemeinsame und 14 divergierende Entwicklungen auf. Die kritischen Deskriptoren mit unterschiedlichen Ausprägungen in den beiden Szenarien sind in Abbildung 03 **fett** markiert. Bevor in den Abschnitten 2.4 bis 2.6 eine ausführliche Beschreibung und Gegenüberstellung der beiden Mobilitätsszenarien anhand ihrer Unterschiede erfolgt, werden nachfolgend zunächst die gemeinsamen Entwicklungen in beiden Zukunftsbildern skizziert.

2.3 Szenarioübergreifende Entwicklungen

Die Mobilitätswelt 2025+ ist geprägt von der kontinuierlichen Fortsetzung der sich bereits im Jahr 2016 deutlich abgezeichneten Trends über eine Dekade hinweg. Am deutlichsten wird dies am graduell erfolgten Wandel in den Köpfen der einzelnen Nutzer und der Gesellschaft als Ganzes. Auch wenn hier keine radikalen Veränderungen gegenüber den 2010er-Jahren zu verzeichnen sind, so spielen nun bestimmte Einstellungs- und Verhaltensaspekte eine signifikant stärkere Rolle als zuvor. Die Umweltverträglichkeit des eigenen Mobilitätsverhaltens und das konkurrierender Mobilitätsangebote ist für viele Menschen ein wichtiger Maßstab beim Treffen von Entscheidungen geworden. Zudem hat der private Besitz eines Autos in den Großstädten – vor allem für jüngere Leute – spürbar an Bedeutung verloren. Bedingt durch die allmähliche Verschiebung von Werteprioritäten und Normen sowie deren Einfluss auf den Lebens- und Arbeitsstil des 21. Jahrhunderts ist auch das Mobilitätsverhalten (noch) flexibler, spontaner und situativer als zuvor. Die Digitalisierung des Arbeitsalltags führte nicht zu einem schlagartigen Boom von Home Office und einer signifikanten Reduzierung des Pendlerverkehrs, sondern zum vermehrten Arbeiten von unterwegs („Mobile Working“), auch in Fahrzeugen. Viele Ältere sind länger körperlich agil und bleiben bis ins hohe Lebensalter mobil – sowohl mit als auch ohne eigenen Pkw. Der Nutzerkreis von Carsharing und Mitfahrgelegenheiten ist gewachsen, so dass diese modernen Dienstleistungen mittlerweile einen bedeutsamen Anteil am Mobilitätsmarkt ausmachen. Sie stellen zudem – neben anderen klassischen und innovativen Diensten von Mobilitätsunternehmen – elementare Angebote innerhalb von multimodalen und intermodalen Systemen dar. Die situative Variation und die flexible Auswahl zwischen verfügbaren Verkehrsmitteln sowie die Verkettung verschiedener Verkehrsmittel für einzelne Wegstrecken haben einen Bedeutungszuwachs erfahren.

Die demografischen und wirtschaftlichen Entwicklungen verliefen ohne schwerwiegende Verwerfungen oder gravierende Trendbrüche und sind hinsichtlich sozialökonomischer Aspekte alles in allem als recht positiv anzusehen. Die Alterung der Bevölkerung, die Verkleinerung der Haushaltsgrößen und die Migration in urbane Zentren haben sich weiter fortgesetzt. Vor allem die asiatischen Schwellenländer und in abgeschwächter Form auch die USA besitzen nach wie vor größere Wachstumsraten (hinsichtlich Bevölkerung und Wirtschaft) als Europa und Deutschland. Viele der neuen Einsatzfelder von IKT für Mobilität, z. B. die Verkehrssteuerung zur Verbesserung von Verkehrsflüssen, wurden zunächst in den großen Megacities der Welt dringlich und haben dort deshalb ihre erste Verbreitung gefunden. Die Öl- und Kraftstoffpreise unterlagen (ebenso wie das Wirtschaftswachstum) zwar größeren temporären Schwankungen, sind aufgrund eines signifikanten Nachfrageanstiegs (v. a. aus den Schwellenländern) letztendlich jedoch spürbar gestiegen [S30]. Dies hat dazu beigetragen, dass die Mobilitätskosten sowohl im MIV (Motorisierter Individualverkehr) als auch im ÖPNV überdurchschnittlich gestiegen sind, ist jedoch nicht die alleinige Ursache dafür. Öffentliche Verkehrsangebote wurden in den urbanen Wachstumszentren ausgeweitet und verbessert und in den schrumpfenden ländlichen Regionen ausgedünnt. Dort wo die Rationalisierung der festen Linienbedienung an ihre Grenzen gestoßen ist, mussten die anfallenden Kosten auf weniger Köpfe verteilt oder andere Auswege (wie die Flexibilisierung der Angebote) gesucht werden. All das führte dazu, dass Mobilität teurer wurde. Auch wenn sich die Fahrzeugausstattungen in den beiden entwickelten Szenarien unterscheiden, so bleibt als übergreifende Entwicklung festzuhalten, dass die Fahrzeugvernetzung generell stark zugenommen hat. Vor allem umfassende Infotainment- und Konnektivitätsfunktionen gehören mittlerweile zum Standard in allen Pkws, ebenso wie Systeme der Echtzeit-Fahrgastinformation im ÖPNV. Der Übergang vom assistierten Fahren zu höheren Stufen der Fahrzeugautomatisierung ist erfolgt und entsprechende Fahrfunktionen sind zum Massenphänomen geworden. Der verstärkte IKT-Einsatz trug ebenfalls zu den Kostensteigerungen im Bereich Mobilität bei, war aber auch mit einem deutlichen Zugewinn an Komfort und weiteren Mehrwerten für die Nutzer verbunden.

Die Verkehrspolitik richtete ein verstärktes Augenmerk auf die Nachhaltigkeit der Mobilität. Dies zielte einerseits auf die Erreichung umwelt- und klimapolitischer Ziele und andererseits auf die Erhöhung der Verkehrssicherheit, um Verkehrstote und Schwerverletzte nach Möglichkeit ganz zu verhindern (Vision Zero). Folgen dieser Ausrichtung waren die weitere Verschärfung und konsequente Durchsetzung von Umweltauflagen, neue Sicherheitsvorschriften für Fahrzeuge sowie die staatliche Unterstützung multi- und intermodaler Verkehrskonzepte. IKT kam bei diesen Maßnahmen eine Schlüsselrolle zu. Deshalb wurden nach der EU-weiten Einführung des automatischen Notrufsystems eCall im Jahr 2018 auch weitere Schritte in Richtung verbindlicher Vorgaben für die Ausstattung von Fahrzeugen mit IKT gemacht.

Gemessen an der Verkehrsleistung hat der Güterverkehr in Deutschland und weltweit 2025 sehr stark zugenommen – nicht zuletzt wegen der immer weiter voranschreitenden internationalen Arbeitsteilung und des nicht abebbenden Booms des Online-Versandhandels. Das verschärfte bereits zuvor bestehende Probleme an den Knotenpunkten und Hauptachsen des Verkehrs weiter und machte innovative Lösungen für eine effiziente und nachhaltige Mobilität erforderlich, bei denen IKT eine entscheidende Rolle spielt. Auch die Personenverkehrsleistung ist weltweit gestiegen. In Deutschland stagniert sie jedoch, was vor allem an demografiebedingten Effekten liegt. Auch der Pkw-Absatz in Deutschland stagnierte (nach zunächst noch kleinen Zuwächsen in den ersten Jahren nach 2016) und ist mittlerweile sogar marginal rückläufig. Weltweit gesehen ist der Pkw-Absatz stark gestiegen, auch wenn die Dynamik der großen Wachstumsmärkte (wie die BRIC-Staaten) nicht mehr das Niveau vergangener Blütejahre erreicht.

Der sich vollziehende und in den 2010er-Jahren begonnene Umbruch auf den Mobilitätsmärkten ist noch längst nicht abgeschlossen. Er äußert sich aber bereits unmissverständlich in verschobenen Wertschöpfungsanteilen. Ein Großteil der Wertschöpfung im Verkehrssektor – sowohl die

Fahrzeuge als auch die Infrastruktur betreffend – steckt mittlerweile in Elektronik und IKT. Neu ist darüber hinaus vor allem die herausragende Bedeutung, die Mobilitätsdaten für Wertschöpfungsprozesse gewonnen haben. Gewinner dieser Entwicklungen sind Unternehmen mit ausgeprägten Integrations- und Systemführungskompetenzen. Dazu zählen z. B. die Systemlieferanten der Automobilindustrie.

In Tabelle 01 werden die szenarioübergreifenden Entwicklungen noch einmal zusammengefasst dargestellt.

Deskriptor	Projektion für 2025+
Einstellungen zur Ökologie und zum Pkw-Besitz	weiter zunehmendes Umweltbewusstsein im Verkehr; sinkende Bedeutung des Pkw-Besitzes in Großstädten
Mobilitätsverhalten	Verhalten wird Lifestyle-bedingt flexibler, spontaner & situativer; steigende Mobilität im Alter; Zunahme von „Mobile Working“
Verkehrsmittelwahl	Zunahme der Multi- und Intermodalität; vermehrte Nutzung von Carsharing und Mitfahrgelegenheiten
Gesamtbevölkerung	Deutschland: → (ca. 81 Mio.), EU-28: → (ca. 515 Mio.), USA: ↗ (ca. 350 Mio.), Asien: ↗ (ca. 4,8 Mrd.)
Bevölkerungsstruktur	alternde Bevölkerung; durchschnittliche Haushaltgröße sinkt; Migration vom Land in die Agglomerationen
reales BIP-Wachstum	Deutschland/EU-28: Ø 1,2 % p. a., USA: Ø 2,0 % p. a., Asien: Ø 4,0 % p. a.
Öl- und Kraftstoffpreise	langfristiger Preisanstieg (Öl: ca. 100 USD/bbl, Benzin: ca. 1,65 EUR/l), aber temporäre Schwankungen
Mobilitätskosten	steigen im MIV und im ÖPNV stärker als der Verbraucherpreisindex – energiepreisbedingt sowie wegen Verbesserungen der Angebote (bzw. zu deren Erhalt)
Nachhaltigkeit und Modal Split	weitere Verschärfung von Umwelt- und Sicherheitsvorschriften für Fahrzeuge; staatliche Förderung multi- und intermodaler Verkehrskonzepte
ÖPNV-Angebot	Ausdünnung auf dem Land, Verbesserung in den Metropolen, Flexibilisierung der Angebote
Personenverkehrsleistung	Deutschland → , USA/Asien ↗
Güterverkehrsleistung	Deutschland ↗ , USA/Asien ↗
Pkw-Absatz	Deutschland → , USA/Asien ↗
Verschiebung von Wertschöpfungsanteilen	Verschiebung in Richtung IKT und Fahrzeugelektronik; Mobilitätsdaten entwickeln sich zu einer wichtigen Ressource; Bedeutungszuwachs von Systemlieferanten

Tabelle 01: Einflussbereiche und Deskriptoren der Mobilitätsszenarien 2025+

In den beiden nachfolgenden Abschnitten werden die beiden entwickelten und ausgearbeiteten Mobilitätsszenarien anhand der Deskriptoren mit sich voneinander unterscheidenden Ausprägungen beschrieben. Die voneinander abweichenden Entwicklungen sollen dabei als klare Tendenzaussagen verstanden werden, nicht aber als Extremszenarien, wie beispielsweise eines in [A13] dargestellt wird. Das heißt, auch die im jeweils anderen Zukunftsbild beschriebenen Charakteristika können in gewissem Umfang eine Rolle spielen, rücken in der Wahrnehmung und Bedeutung aber klar in den Hintergrund. In den folgenden Teilen der Studie wird immer wieder auf diese Szenarien zurückgegriffen, wenn IKT-bezogene Aussagen und Schlussfolgerungen davon abhängen, welches der beiden skizzierten Zukunftsbilder der Realität bis zum Zeithorizont 2025+ am nächsten kommt. Zunächst werden die beiden Szenarien jeweils zusammenhängend beschrieben, bevor sie am Ende noch einmal kurz und knapp gegenübergestellt werden.

2.4 Szenario „Koexistenz“

Das erste Bild der Mobilitätswelt 2025+ ist von der Koexistenz mehrerer Informations- und Kommunikationstechnologien für Mobilitätsanwendungen gekennzeichnet, die in parallelen Strukturen nebeneinander existieren und keinen oder nur einen sehr geringen Grad der Integration und Interoperabilität aufweisen. Die Technologien können anwendungsspezifisch ihre jeweiligen Vorteile ausspielen.

Der Pfad, der zu diesem Zustand geführt hat, liegt im kausalen Zusammenwirken verschiedener Faktoren begründet, die an dieser Stelle in Grundzügen umrissen und deren Implikationen in den nachfolgenden Abschnitten der Studie genauer dargelegt werden.

Geprägt von den Enthüllungen der globalen Überwachungs- und Spionageaffäre, einer ganzen Reihe von Hackerangriffen auf Daten-Clouds und dem zunehmenden Interesse von Staaten an personenbezogenen Informationen seit Beginn des 21. Jahrhunderts hat sich in den Köpfen vieler Menschen eine gewisse Grundskepsis gegen die informationstechnische Vernetzung von Objekten, die Rückschlüsse auf persönliche Eigenarten und Verhaltensweisen zulassen, festgesetzt. Obgleich die Vernetzung in vielen Lebensbereichen nicht mehr aufzuhalten war, wird das Auto von vielen Konsumenten und Datenschützern weiterhin als eine letzte Bastion der Privatsphäre angesehen und verteidigt. Das Thema Datenschutz („Privacy“) bestimmt die öffentliche Diskussion über IKT im Bereich der Mobilität. Die Menschen sind grundsätzlich zurückhaltender im Umgang mit ihren Mobilitätsdaten und die Angst vorm gläsernen Fahrer bzw. Fahrgast ist keine Randerscheinung. Dennoch werden zumindest für Sicherheitsanwendungen überall Mobilitätsdaten geteilt und es gibt selbstredend auch Anwendergruppen, die darüber hinaus eigene Daten zur Nutzung diverser Dienste zur Verfügung stellen. Die Skepsis ist außerdem auch gegenüber der Fahrzeugautomatisierung noch recht groß. Viele Menschen lehnen generell autonome Fahrzeuge ab, weil sie der neuen Technik nicht vertrauen, weil sie das Risiko der Manipulation von außen als zu hoch ansehen oder sie gar grundsätzliche ethische Bedenken haben. Die (auch teilweise) Abgabe von Verantwortung an das Fahrzeug wird von sehr vielen als Kontrollverlust wahrgenommen.

Im Bereich von Verkehrspolitik und Verkehrsrecht haben sich inkrementelle Weiterentwicklungen vollzogen. Mittlerweile sind auch hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge zulassungsfähig und dürfen nach Novellierungen des internationalen Verkehrsrechts (und entsprechenden Umsetzungen in nationales Recht) zumindest in Teilen des öffentlichen Straßennetzes bzw. bei Einhaltung gewisser Randbedingungen (wie Straßenkategorie, Maximalgeschwindigkeit, Wetterverhältnisse etc.) fahren. Die Wiener Straßenverkehrskonvention [S17] sieht aber weiterhin zwingend einen menschlichen Fahrer für jedes Straßenfahrzeug vor, so dass in den Vertragsstaaten vollkommen

autonome Systeme noch nicht zulässig sind. Was die Straßeninfrastruktur anbelangt, wurden an besonders prädestinierten Stellen und Abschnitten des Verkehrsnetzes zunehmend telematische Anlagen und Systeme verbaut. Bezogen auf das gesamte Straßennetz ist der Einsatz von Verkehrstelematik jedoch nur als punktuell anzusehen und der deutliche Schwerpunkt der Politik liegt weiterhin im klassischen Infrastrukturausbau und -erhalt.

Auch im Bereich der Wertschöpfung waren die Veränderungen eher kontinuierlich. Neue Marktrollen und Player haben sich in bestehende Wertschöpfungsstrukturen eingefügt. Die klassische Hierarchie der Wertschöpfungspyramide der Fahrzeugproduktion blieb aber weitgehend erhalten. Die Beziehung zwischen der Automobilindustrie und der IT-Branche ist nach wie vor von einem Kooperationswettbewerb **(Coopetition)** bestimmt. Das bedeutet, einerseits kooperiert man, um aus der IT-Branche stammende Produkte und Dienstleistungen ins Fahrzeug zu integrieren und so den Kundennutzen zu erhöhen, andererseits steht man jedoch auch in Konkurrenz zueinander, wenn es um den Zugang zum Endkunden für diverse Mehrwertdienste und dessen Bindung an das eigene Unternehmen geht [SO11]. Deshalb entwickeln die meisten Automobilhersteller auch weiterhin proprietäre IT-Systeme für das Fahrzeug und gewähren den großen Playern aus der IT-Branche keinen umfassenden Zugang zum Auto. Ein weiterer Grund für dieses Verhalten ist in den geforderten hohen Sicherheitsstandards für die in Fahrzeugen verbauten elektronischen Komponenten zu suchen, was die Integration von Drittsystemen oder die Implementierung moderner, aus dem Consumer-Bereich bekannter und dadurch auch erwarteter Nutzeranwendungen erschwert. In diesem Sinne herrschen auch eine Koexistenz der Branchen und ein Nebeneinander von verschiedenen (herstellerspezifischen) IT-Architekturen vor. Für Konnektivitätsfunktionen und automatisierte Fahrfunktionen dominieren klassische produktbasierte Erlösmodelle. Das bedeutet, die dafür notwendige Hard- und Software wird überwiegend in entsprechenden Paketen als aufpreispflichtige Sonderausstattung verkauft. Die Verknüpfung verschiedener Verkehrsträger durch Multi- und Intermodalität hat stark zugenommen, bleibt jedoch hinter ihren Möglichkeiten zurück. Eine Vielzahl von „Mobilitätskarten“ ermöglicht die Nutzung ausgewählter Mobilitätsangebote beteiligter Unternehmen. Meist beschränken sich die Auswahlmöglichkeiten je Verkehrsträger jedoch auf einen oder wenige Partner. Vor allem intermodale Dienste sind noch immer ein Nischenmarkt. Das liegt vor allem an weiterhin bestehenden Schnittstellenproblemen, die die Etablierung profitabler Geschäftsmodelle erschweren.

Im Bereich des IKT-Einsatzes für Mobilitätszwecke liegt der Schwerpunkt der Fahrzeugkommunikation in der Ermöglichung webbasierter Anwendungen und des Konsums digitaler Güter (**Internet der Dienste**). Der mobile Zugang zu Daten-Clouds (Car-to-Cloud Communication) wird umfänglich genutzt, um auf Web- und Medieninhalte zuzugreifen (Filehosting und Streaming-Dienste), um aktuelle Verkehrs- und Standortinformationen zu erhalten sowie für Updates von Systemsoftware und Kartendaten. Darüber hinaus findet im Bereich ausgewählter Anwendungen auch Kommunikation zwischen Fahrzeugen und mit der Verkehrsinfrastruktur (Car-to-Car & Car-to-Infrastructure Communication) statt. Diese Nahbereichskommunikation spielt jedoch gemessen am Nutzerkreis und dem Datenvolumen nur eine untergeordnete Rolle. Für die sich mittlerweile herausgebildeten und am Markt erhältlichen automatisierten Fahrfunktionen ist eine Kommunikation des Fahrzeugs nach außen im Prinzip nicht erforderlich. Die Fahrzeugautomatisierung setzt vor allem auf die Erfassung und Verarbeitung von Sensordaten. Kommunikation mit der Fahrzeugumwelt wird zwar genutzt, um entsprechende Funktionalitäten z. B. beim Einordnen in Verkehrsströme oder an Ampelkreuzungen zu unterstützen, doch die Fahrzeugsysteme kommen bei der Erfüllung ihrer Grundfunktionen auch gänzlich ohne Kommunikation aus. Das bedeutet auch, dass es sich bei diesen Systemen um extrem hochentwickelte Gefüge aus anspruchsvoller Sensorik, Aktorik, leistungsfähigen Softwarealgorithmen und modernster Rechentechnik handelt. Daher sind sie auch noch recht teuer. Interaktion und Kooperation zwischen technischen Agenten im Verkehrssystem finden im Szenario „Koexistenz“ nur auf niedrigeren Entwicklungsstufen statt. Vor allem die kollektive Erhebung von aktuellen Karten- und Verkehrsdaten und deren Einspeisung in zentrale

Datenpools sind hier von großer Relevanz. Die Informationsverarbeitung ist jedoch ganz überwiegend nicht-kooperativ und geschieht durch autonome Agenten. Die Entscheidungsfindung für automatisierte Fahraufgaben findet z. B. allein im Fahrzeug statt.

Hinsichtlich der Ausstattungsgrade von Neufahrzeugen mit IKT und Automatisierungstechnik sind gegenüber dem Jahr 2016 große Schritte gelungen. Die deutlich überwiegende Mehrzahl der neu zugelassenen Fahrzeuge besitzt nicht nur schnelle Internetverbindungen (über Mobilfunk) und WLAN-Hotspots für die Fahrzeuginsassen, sondern ist darüber hinaus auch in der Lage, mit anderen Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur zu kommunizieren. So wie ausgewählte Assistenzsysteme (wie z. B. Einparkhilfen und Tempomaten) eine Dekade zuvor fast schon zur Standardausstattung gehörten, gibt es mittlerweile kaum noch neue Fahrzeuge, die ohne teilautomatisierte Fahrfunktionen verkauft werden. Auch wenn diese Ausstattungen aufgrund der weit verbreiteten Skepsis gegenüber automatisierten Fahrzeugen noch immer unter der Bezeichnung „Assistent“ vermarktet werden, werden sie doch von der breiten Masse der Konsumenten akzeptiert und auch genutzt. Damit ist schon ein wichtiger Schritt auf dem Weg zum fahrerlosen Fahrzeug gegangen. Hochautomatisierte Fahrfunktionen besitzen aufgrund der angesprochenen Faktoren zwar nur einen sehr geringen Marktanteil, doch auch sie sind als Sonderausstattungen am Markt erhältlich und erfreuen sich einer großen Beliebtheit bei einer noch kleinen Gruppe enthusiastischer Early Adopter. Vollautomatisierte und fahrerlose Systeme hingegen spielen auf dem Automobilmarkt noch gar keine Rolle. In abgegrenzten Umgebungen und im Rahmen von Forschungs- und Pilotprojekten sind zwar überall autonome Testfahrzeuge unterwegs, ein Einsatz auf öffentlichen Straßen im Normalbetrieb bleibt ihnen aufgrund von Problemen mit der gesellschaftlichen Akzeptanz, der rechtlichen Zulässigkeit und der Bezahlbarkeit solcher Fahrzeuge noch verwehrt. Die genannten Fahrzeugausstattungen bezogen sich auf Neufahrzeuge. Bis ähnliche Ausstattungsgrade auch im Fahrzeugbestand angekommen sind, werden noch viele Jahre vergehen. Es ist daher noch sehr lang mit Mischverkehren aus hochgradig vernetzten und automatisierten Fahrzeugen einerseits und „taubstummen“, ganz vom Fahrer abhängigen Autos andererseits zu rechnen, was es sowohl bei der Verkehrsinfrastruktur als auch bei neuen Mobilitätskonzepten zu berücksichtigen gilt.

Im Bereich der Antriebstechnologien ist der Elektromobilität nach anfänglich sehr großen Schwierigkeiten nun doch ein erster Durchbruch gelungen. Das Ziel der Bundesregierung, bis 2020 eine Million Elektroautos auf Deutschlands Straßen zu bringen, wurde zwar erst ein paar Jahre später erreicht, batterieelektrische Fahrzeuge und Plug-In-Hybride stellen inzwischen aber eine wichtige und tendenziell stark wachsende Kategorie im Antriebsmix der Neuzulassungen dar. Dies ist insofern relevant, da zwischen der Elektromobilität und der Fahrzeugvernetzung gewisse Synergie- und Konvergenzpotentiale bestehen. Nicht ohne Grund sind Elektroautos häufig schon serienmäßig mit den modernsten Assistenz- und Infotainmentsystemen ausgestattet. Diese erlauben es – auch durch die Einbettung in multi- und intermodale Systeme und in Verbindung mit informationstechnisch vernetzten und flexibel steuerbaren Elektroenergienetzen (Smart Grids) –, die noch im Zusammenhang mit Elektrofahrzeugen bestehenden Nachteile (Reichweitenangst, Ladedauer etc.) zu adressieren. In diesem Sinne kann die Fahrzeugvernetzung zum Wegbereiter der Elektromobilität werden und umgekehrt.

2.5 Szenario „Konvergenz“

Der zweite Entwurf einer möglichen Mobilitätswelt von morgen steht ganz im Zeichen des Begriffes „Konvergenz“. Die Informations- und Kommunikationstechnologien für Mobilitätsanwendungen konvergieren in Richtung hochgradig integrierter Netze, die zuvor vorhandene und sich in Entwicklung befindliche Systeme, Komponenten, Verfahren, Protokolle und Standards zusammenführen.

Auf dem Weg, der zu diesem Zukunftsbild geführt hat, wirkte eine Vielzahl von verschiedenen Faktoren, die in komplexen Ursache-Wirkungs-Beziehungen miteinander verbunden sind, zusammen. Im Folgenden werden diese Entwicklungen im Grundsatz skizziert und in den nachfolgenden Abschnitten der Studie hinsichtlich ihrer Konsequenzen für die IKT genauer analysiert.

Trotz der immer wieder zutage tretenden Überwachungsskandale, Hackerangriffe und IT-Sicherheitslücken ist die Mehrheit der Menschen sehr aufgeschlossen gegenüber der Vernetzung von Fahrzeugen und Verkehrsteilnehmern in der Mobilitätswelt von morgen. Es werden in der Abwägung mit den Risiken vor allem die Vorteile für die Gefahrenvermeidung, den Komfort beim Reisen und die Nachhaltigkeit der Mobilität gesehen. Dies gilt auch für die Entwicklung hin zur zunehmenden Fahrzeugautomatisierung. Das Thema Verkehrssicherheit („Safety“) bestimmt die öffentliche Diskussion über IKT im Bereich der Mobilität. Der Enthusiasmus der sog. Digital Natives färbte nach und nach auch auf ältere Generationen ab. Die große Mehrzahl der Menschen will nicht mehr darauf verzichten, auch im Fahrzeug ständig „online“ zu sein und viele technologieaffine Kunden können es kaum erwarten, eines Tages in einem völlig autonomen Fahrzeug zu reisen. Die Abgabe von Verantwortung an das Fahrzeug wird von ihnen als Gewinn an Freiheit und Lebenszeit – und nicht als Kontrollverlust – angesehen. Der Umgang mit den eigenen Mobilitätsdaten ist bei den meisten Leuten sehr freizügig und unbedarft, wie in den Jahren zuvor schon die Offenheit vieler Nutzer mit ihren privaten Informationen in sozialen Netzwerken zeigte. Eigene Mobilitätsdaten werden für eine breite Vielfalt an neuen Dienstleistungen preisgegeben. Nichtdestotrotz gibt es auch eine nicht zu vernachlässigende Minderheit von Skeptikern, die weiterhin vor allem Gefahren sowohl in einer umfassenden Vernetzung als auch in der Automatisierung sehen.

Im Bereich von Verkehrspolitik und Verkehrsrecht haben sich einige disruptive Veränderungen vollzogen. Weitere Novellierungen des Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr [S17] sowie des nationalen Verkehrsrechts und des Zulassungsrechts erlauben nun grundsätzlich sogar fahrerlose Systeme auf öffentlichen Straßen, auch wenn es hinsichtlich der Randbedingungen noch einige Einschränkungen dafür gibt. Diese nach zähem Ringen durchgesetzte rechtliche Zulässigkeit ist ein enormer Schritt in eine völlig neue Ära der Mobilität, wenngleich fahrerlose Systeme in der praktischen Umsetzung noch eine seltene Ausnahmeerscheinung sind und von der enormen Tragweite dieser Entscheidung bisher noch kaum etwas zu erahnen ist. Nicht minder weittragend war eine Verschiebung der Prioritäten in der Straßeninfrastrukturpolitik. Der Ausbau und Erhalt klassischer Infrastruktur (Asphalt und Beton) rückte immer mehr in den Hintergrund. Integraler Bestandteil der Verkehrsinfrastruktur und darauf gerichteter staatlicher Strategien und Maßnahmen ist nun die Telekommunikationsinfrastruktur. Die Ertüchtigung der bereits vorhandenen Verkehrswege zu „intelligenten“ Infrastrukturen stand im Mittelpunkt der Infrastrukturpolitik der vergangenen Jahre. Begonnen wurde damit im Fernstraßennetz und den großen Ballungszentren. Die damit verbundene effizientere Nutzung der bestehenden Infrastruktur ermöglichte Kostenersparnisse im Vergleich zum Ausbau einzelner Straßen bzw. der Erweiterung des Straßennetzes um neue Strecken. Der Einsatz von Verkehrstelematik ist bereits weit vorangeschritten und erreicht nach und nach auch das niederrangige Straßennetz. Zudem ist bereits ein Trend zur Virtualisierung von Verkehrsinfrastruktur (in Gestalt virtueller Verkehrszeichen zum Zwecke der Verkehrsbeeinflussung) zu verzeichnen, der jedoch noch am Anfang seiner Entwicklung steht.

Der Bereich der Wertschöpfung ist von einem Aufbrechen lange Zeit bestehender Strukturen gekennzeichnet. Das Konstrukt der klassischen Wertschöpfungspyramide in der Automobilindustrie bildet nach dem Hinzukommen vieler neuer Marktrollen und Player und dem Aufkommen völlig neuer Geschäftsmodelle die tatsächlichen Verhältnisse und Beziehungen zwischen den Wertschöpfungspartnern immer unzutreffender ab. Vielmehr bilden sich an vielen Stellen tendenziell eher heterarchische Unternehmensnetzwerke heraus, innerhalb derer die Koordination deutlich gleichberechtigter vonstattengeht und nicht mehr ein einzelner Partner allein eine herausragende Dominanz besitzt. Die Beziehung zwischen der Automobilindustrie und der IT-Branche steht ebenso wie die Kommunikationstechnologien im Zeichen einer Konvergenz, welche die Grenzen zwischen beiden Branchen zunehmend verschwimmen lässt. Diese Annäherung zeigt sich auf zwei Wegen. Auf der einen Seite entstanden aus dem in den vergangenen Jahren vorherrschenden Kooperationswettbewerb zwischen den Branchen mittlerweile echte Kooperationen mit einer starken und umfassenden Öffnung gegenüber der jeweils andere Seite **(Cooperation)**. Es herrschen klare Zuständigkeiten und Verantwortungsbereiche zwischen den Partnern, etwa hinsichtlich des Zugangs zum Endkunden. Auf der anderen Seite sind durch einen anstrengungsreichen Aufbau neuer eigener Kompetenzen sowie durch branchenübergreifende Fusionen und Übernahmen integrierte Technologiekonzerne entstanden, die sowohl der Automobil- als auch IT-Branche zugerechnet werden können **(Consolidation)**.

Für Konnektivitätsfunktionen und automatisierte Fahrfunktionen haben sich neue dienstleistungsbasierte Erlösmodelle, die ursprünglich aus der IT- und Kommunikationswelt stammen, durchgesetzt. Ausdruck dieser Entwicklung sind gegen Entgelt (Abo oder Nutzungsgebühr) freischaltbare Softwareupdates und Fahrzeugfunktionen, die aus der im Fahrzeug verbauten Hardware nutzerindividuelle Leistungen ganz nach den Wünschen der Kunden konfigurieren. Die Verknüpfung verschiedener Verkehrsträger durch multi- und intermodale Konzepte und Plattformen hat einen enormen Bedeutungszuwachs erfahren. „Mobility as a Service“ ist zum Massenphänomen geworden und nicht nur auf die großen urbanen Zentren beschränkt. Auch Wechsel der Verkehrsmodi (z. B. vom Fahrrad zur Bahn und dann zum Elektroauto) und damit verbundene Unterbrechungen auf einzelnen Wegstrecken werden zunehmend in Kauf genommen, wenn dadurch z. B. die Mobilitätskosten signifikant gesenkt werden können. Regionale und überregionale Mobilitäts-Apps ermöglichen eine hochflexible, preislich attraktive und völlig unkomplizierte Nutzung von Verkehrs- und Mobilitätsleistungen aus umfangreichen Angebotspools, in denen die Leistungen einer großen Anzahl von (auch konkurrierenden) Unternehmen zu finden sind. Dahinter stehende Mobilitätsplattformen und -vermittler konnten profitable Geschäftsmodelle etablieren. Die starke Verknüpfung und enge Kooperation zwischen den Verkehrsträgern hat neue funktionierende Wertschöpfungsnetze entstehen lassen.

Hinsichtlich des Einsatzes von IKT für Mobilitätszwecke liegt der Schwerpunkt der Fahrzeugkommunikation im Informationsaustausch zwischen technischen Systemen untereinander **(Internet der Dinge).** Fahrzeuge und Infrastrukturelemente wie Lichtsignalanlagen kommunizieren in ihrem nahen Umfeld in sehr großem Umfang Sensordaten und bereits verarbeitete Daten, um eine breite Vielfalt neuer Anwendungen zu ermöglichen. Der Nutzerkreis und das kommunizierte Datenvolumen für diese Anwendungen sind bereits sehr groß, auch wenn letzteres aufgrund der typischen Umfänge von Nachrichtenformaten von Car-to-X-Kommunikation nicht notwendigerweise das Datenvolumen des mobilen Internets der Menschen (z. B. für Audio- und Video-Streaming) übertrifft. Neben der Car-to-Car und Car-to-Infrastructure (Car-to-X) Communication im Nahbereich tauschen sich Fahrzeuge und Verkehrsinfrastrukturelemente auch mit entfernten Daten-Clouds aus. Ein wichtiger Treiber dieser Entwicklungen war die Richtung, in die sich die Fahrzeugautomatisierung bewegte. Die Automatisierung von Fahrfunktionen setzte nämlich verstärkt auf die Vernetzung des Fahrzeugs mit der Infrastruktur und seiner Umwelt. Auch wenn sich jedes Fahrzeug immer noch selbst in einen risikominimalen Zustand überführen können muss, sobald Kommunikation nach außen nicht mehr möglich ist, so sind doch viele Funktionalitäten automa-

tisierter Fahrzeuge darauf ausgelegt, dass eine Kommunikation mit der Umwelt stattfindet. Ist diese nicht möglich oder gestört, ist mit erheblichen Funktionseinschränkungen zu rechnen.

Systeme der Fahrzeugautomatisierung können aufgrund der umfangreichen Vernetzung mit anderen technischen Systemen etwas einfacher gestaltet werden als wenn sie all ihre Funktionsumfänge mit der alleinigen Verarbeitung selbst erfasster Daten erreichen müssten. Auf der anderen Seite finden im Szenario „Konvergenz“ Interaktion und Kooperation zwischen technischen Agenten im Verkehrssystem bereits auf sehr hohen Entwicklungsstufen statt. Nicht nur die Datenerhebung geschieht kollektiv durch eine Vielzahl von Fahrzeugen, sondern auch die Informationsverarbeitung erfolgt in Zusammenarbeit vernetzter Agenten. Das reicht bis hin zum Aushandeln von Fahrmanövern zwischen sich begegnenden Fahrzeugen und dem Koordinieren großer Fahrzeugpulks. Insofern findet auch eine verteilte Entscheidungsfindung für automatisierte Fahraufgaben (auch außerhalb des Fahrzeugs) statt.

Hinsichtlich der Ausstattungsgrade von Neufahrzeugen mit IKT und Automatisierungstechnik sind gegenüber dem Jahr 2016 gewaltige Schritte gelungen. Nahezu jedes neu zugelassene Fahrzeug ist in der Lage, mit anderen Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur zu kommunizieren. Auch die tatsächliche Nutzung dieser Fähigkeiten ist keine Randerscheinung mehr. Für Fahrzeuge, die nicht zumindest teilautomatisierte Fahrfunktionen besitzen, existiert in Deutschland und den USA nur noch ein sehr kleiner Nischenmarkt von „Billigautos“. Für die meisten Menschen ist die Teilautomatisierung ihrer Fahrzeuge zur Selbstverständlichkeit geworden. Aufgrund der enthusiastischen Einstellung der Mehrheit der Fahrzeugnutzer ist es zudem nicht mehr erforderlich, solche Systeme unter der Bezeichnung „Assistent“ zu vermarkten. Auch Fahrzeuge mit hochautomatisierten Fahrfunktionen besitzen bereits einen beträchtlichen und weiterhin stark wachsenden Marktanteil. Der Rückgriff auf die umfassende Vernetzung mit anderen Fahrzeugen und Infrastrukturelementen erlaubte es, auch höhere Automatisierungsstufen mit vergleichsweise vertretbaren technischen Aufwänden und Kosten zu erreichen. Auch die frühe und die späte Mehrheit der Konsumenten (und nicht nur die Early Adopter) zeigen großes Interesse an hoch- und vollautomatisierten Systemen. Letztere spielen zwar auf dem Automobilmarkt noch eine fast zu vernachlässigende Rolle, da sie immer noch nur in sehr beschränkten Einsatzbereichen wirklich sinnvoll sind. Eine Trendwende zum Massenphänomen zeichnet sich aber schon ab und scheint unmittelbar bevorzustehen. Damit wären letztlich auch vollumfänglich autonome und fahrerlose Systeme im normalen Straßenverkehr (auf dem gesamten Straßennetz und bei allen Geschwindigkeitsbereichen und Umfeldbedingungen) keine völlig ferne Utopie mehr, sondern stünden in greifbarer Nähe. Da die genannten Fahrzeugausstattungen auf Neufahrzeuge bezogen sind, ist noch für eine lange Zeit mit Mischverkehren aus Fahrzeugen mit sehr unterschiedlicher „Intelligenz“, d. h. sehr unterschiedlichen Graden an Vernetzung und Automatisierung, zu rechnen. Dies gilt es bei der Planung und Realisierung von Infrastrukturvorhaben und Mobilitätskonzepten sowie bei der Anpassung des Verkehrsrechts zu berücksichtigen. Beispielsweise liegt es im Bereich des Denkbaren, Fahrzeugen ohne Fähigkeit zur Car-to-X Kommunikation die Teilnahme am öffentlichen Straßenverkehr zukünftig zu verwehren.

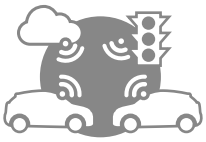
Im Bereich der Antriebstechnologien ist der Elektromobilität mittlerweile der Durchbruch gelungen. Etwa jedes vierte Auto, das neu zugelassen wird, ist bereits ein batterieelektrisches Fahrzeug oder ein Plug-In-Hybrid. Die Mehrheit dieser Fahrzeuge besitzt auch eine Anbindung an das Smart Grid. Diese Entwicklungen im Bereich der Energieversorgung für Mobilitätszwecke haben die schnelle und umfassende Verbreitung von IKT im Fahrzeug ganz wesentlich mitbefeuert. Dadurch dass viele der Vernetzungsfunktionen speziell für Elektroautos entwickelt wurden und viele zuerst (serienmäßig) in Elektrofahrzeugen verfügbar waren, hat der erfolgreiche Aufstieg der Elektromobilität auch dafür gesorgt, dass eine weitreichende Vernetzung auch bei klassisch angetriebenen Fahrzeugen von den Kunden erwartet wird und zum Standard gehört.

2.6 Vergleich der Mobilitätsszenarien 2025+

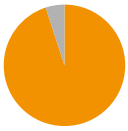
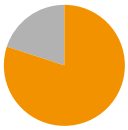
Tabelle 02 stellt die beiden Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ vergleichend anhand ihrer wesentlichen Unterschiede in den Deskriptorenausprägungen gegenüber. Die im unteren Teil der Tabelle orange markierten Segmente sollen die anteilmäßige Verbreitung der Ausstattungen bzw. der Antriebstechnologien im jeweiligen Szenario visualisieren. Dabei handelt es sich – wie auch bei den anderen Angaben zu den Deskriptorenausprägungen – um Tendenzaussagen und nicht um quantitative Prognosewerte für konkrete Marktanteile. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es sich beim Szenario „Koexistenz“ eher um ein an der Fortschreibung der Gegenwart in die Folgezeit orientiertes Zukunftsbild handelt und beim Szenario „Konvergenz“ um eines, das disruptive Entwicklungen aufweist. Im Szenario „Konvergenz“ spielt Kommunikation für die Mobilitätswelt eine noch größere Rolle als im Szenario „Koexistenz“. Diese Erkenntnis lässt jedoch keinen objektiven Schluss derart zu, dass eines der beiden Szenarien fortschrittlicher oder wünschenswerter ist. Auch wenn die Verbreitungsgrade hochautomatisierter Systeme im Szenario „Konvergenz“ – aufgrund der Vorteile, die eine umfassende Fahrzeugvernetzung mit sich bringt – höher sind, so sind die vergleichbaren Systeme im Szenario „Koexistenz“ doch technologisch leistungsfähiger und höher entwickelt, denn sie vermeiden (möglicherweise gefährliche) Abhängigkeiten von Kommunikationsinfrastrukturen.

Deskriptor	Koexistenz	Konvergenz
Einstellung zur Vernetzung und Automatisierung	Skepsis weit verbreitet	Enthusiasmus überwiegt
Umgang mit eigenen Mobilitätsdaten	eher zurückhaltend	eher freizügig
Straßeninfrastrukturpolitik	Schwerpunkt im klassischen Infrastrukturausbau und -erhalt; nur punktueller Einsatz von Verkehrstelematik	Aufrüstung zu „intelligenten“ Infrastrukturen im Fernstraßennetz und in Ballungsräumen
Verhaltens- und Zulassungsrecht (Straße)	… erlauben autonome (fahrerlose) Systeme nicht	… erlauben autonome (fahrerlose) Systeme

→

Deskriptor	Koexistenz	Konvergenz
Wertschöpfungsstruktur in der Fahrzeugproduktion	hierarchische Wertschöpfungsstrukturen bleiben weitgehend erhalten	Aufbrechen der Wertschöpfungspyramide, gleichberechtigte Koordination in heterarchischen Netzwerken
Wertschöpfungsbeziehung zwischen Automobil- und IT-Branche	Coopetition	Consolidation & Cooperation
Geschäftsmodelle für Konnektivität und Automatisierung	klassische produktbasierte Erlösmodelle dominieren	dienstleistungsbasierte Erlösmodelle dominieren
Inter- und Multimodalität des Verkehrs	moderate Verknüpfung und Kooperation zwischen den Verkehrsträgern; intermodale Dienste bleiben in der Nische (ungelöste Schnittstellenprobleme)	starke Verknüpfung und enge Kooperation zwischen den Verkehrsträgern; Konzepte und Plattformen für „Mobility as a Service“ als Massenphänomen
Schwerpunkt der Fahrzeugkommunikation	Internet der Dienste (Kommunikation für webbasierte Nutzeranwendungen und digitale Güter)	 Internet der Dinge (Kommunikation zwischen technischen Systemen untereinander); auch für Fahrzeugautomatisierung
Kooperation im Verkehrssystem	kollektive Datenerfassung; Informationsverarbeitung durch autonome Agenten	kooperative Informationsverarbeitung durch vernetzte Agenten
Ort der Entscheidungsfindung	nur im Fahrzeug	auch verteilte Entscheidungsfindung

→

Deskriptor	Koexistenz	Konvergenz
Ausstattungsgrade von Neufahrzeugen		
Car-to-X-Konnektivität		
teilautomatisierte Fahrfunktionen		
hochautomatisierte Fahrfunktionen		
vollautomatisierte Fahrfunktionen		
Anteile von Elektrofahrzeugen (BEV und PHEV)* an den Neuzulassungen		
Anbindung an das Smart Grid		

*BEV – Battery Electric Vehicle; PHEV – Plug-In Hybrid Electric Vehicle
Orange: anteilmäßige Verbreitung der Ausstattungen bzw. der Antriebstechnologien im jeweiligen Szenario

Tabelle 02: Basisvergleich der Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“

3. Analyse zukünftiger Anwendungen

Als Basis für die Schlussfolgerungen der folgenden Abschnitte der Studie werden zunächst denkbare **Anwendungsfelder und zugehörige Anwendungsfälle (Use Cases)** für den Einsatz von IKT im Bereich der Mobilität identifiziert. Die resultierende Auflistung von Anwendungen erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Ihr vorrangiges Ziel ist vielmehr die Ermittlung und Analyse einschlägiger und für die Mobilität 2025+ voraussichtlich hochrelevanter Use Cases in verschiedenen Bereichen und hinsichtlich verschiedener Anforderungskriterien. Durch die Analyse repräsentativer Use Cases aus verschiedenen Anwendungsfeldern können grundsätzliche Anforderungen an die Sicherheit und Verfügbarkeit, an Kommunikationstechnologien und -netze sowie an die Standardisierung identifiziert werden. In den weiteren Abschnitten der Studie werden diese Anforderungen aufgegriffen und mit dem Ziel der Ermittlung immanenter und aktuell bestehender Technologielücken und Handlungsfelder weiter vertieft.

Die Analyse der Anwendungen stützte sich auf eine literaturbasierte Recherche und orientierte sich an einer darauf aufbauenden Kategorisierung. Die auf diese Weise ermittelten Anwendungsfälle wurden mit Hilfe einer Online-Befragung und einer begleitenden Diskussion mit dem Beirat der Studie priorisiert. Anschließend wurden die priorisierten Anwendungsfälle genauer analysiert, wobei in Verbindung mit den Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ unterschiedliche Umsetzungsvarianten auf einem hohen Abstraktionslevel betrachtet wurden.

3.1 Überblick und Kategorisierung

Ausgehend von einer umfassenden Recherche aktueller Studien, Forschungsprojekte, Standardisierungsaktivitäten und -dokumente sowie allgemeiner Forschungsaktivitäten zur Thematik der Vernetzten Mobilität wurden zunächst relevante und zukunftsorientierte Use Cases zusammengetragen. Dabei stehen viele Use Cases in engem Zusammenhang mit der **Automatisierung** von Fahrfunktionen. Hierfür wurden bereits Automatisierungsgrade definiert (beispielsweise [S17]). In der vorliegenden Studie soll eine einfache Unterscheidung zwischen lediglich warnenden und informierenden Systemen einerseits und tatsächlich steuernden bzw. eingreifenden Systemen andererseits ausreichen. Die Use Cases beider Ausprägungsformen können auch mit unterschiedlichen Stufen der **Kooperation** realisiert werden. Hier genügt eine einfache Unterscheidung zwischen nicht-kooperativen Systemen, also solchen bei denen fahrzeugexterne Kommunikation zur Erreichung der gewünschten Funktionen obsolet ist, und kooperativen Systemen, bei denen Kommunikation zur Erreichung der gewünschten Funktionen erforderlich ist. Analog zu den Automatisierungsgraden wären auch Abstufungen von Kooperationsgraden denkbar, z. B. hinsichtlich der Art der kommunizierten Daten oder des Umfangs der Kooperation (Datenerfassung und/oder -verarbeitung). In Abbildung 04 werden die beschriebenen Technologievarianten für die Use Case-Analyse dargestellt (siehe auch Ausführungen im Anhang B.3). In die weitere Analyse wurden entsprechend der Zielrichtung der Studie nur kooperative Use Cases einbezogen.

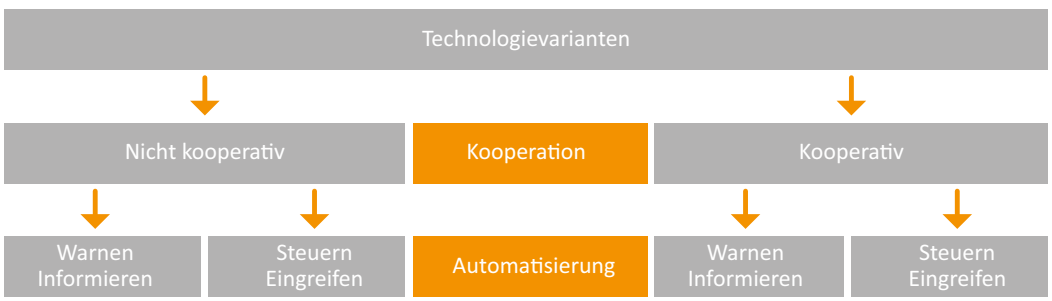


Abbildung 04: Technologievarianten für Use Cases

Zur weiteren Kategorisierung der Use Cases wurden grobe Anwendungsfelder herangezogen, die sich hinsichtlich der primären Zielsetzungen unterscheiden.

Dabei handelt es sich um folgende Anwendungsfelder:

- **Basisfunktionen** umfassen allgemeine Funktionen, die als Grundlage für eine Vielzahl konkreter Mobilitätsanwendungen mit unterschiedlichen Zielsetzungen dienen.
- **Sicherheit** beschreibt Anwendungen, die primär der Erhöhung der Verkehrssicherheit, also der Vermeidung von Unfällen und der Milderung ihrer Folgen, dienen.
- **Nachhaltigkeit** besteht aus Anwendungen, die Verkehrsflüsse effizienter, wirtschaftlicher und umweltverträglicher machen.
- **Komfort** beinhaltet Anwendungen, welche die Bequemlichkeit beim Reisen erhöhen oder Zusatznutzen mit sich bringen.

Die vollständige Auflistung und Einordung der ermittelten Use Cases in die soeben skizzierte Kategorisierung ist im Anhang C zu finden. Dabei ist zu beachten, dass eine eindeutige und trennscharfe Zuordnung von Use Cases zu exakt einem der Anwendungsfelder nur selten möglich ist, da die meisten Anwendungen mehrere Ziele adressieren bzw. Wechselwirkungen zwischen den Zielen bestehen. Beispielsweise werden durch die Unfallvermeidung auch Verkehrsflüsse verbessert sowie Kraftstoff- und CO_2-Einsparungen ermöglicht.

3.2 Priorisierung und Auswahl

Die Priorisierung der Use Cases mit dem Ziel der Auswahl exemplarischer Anwendungen für die Ermittlung der zukünftigen IKT-Anforderungen erfolgte auf Basis einer Online-Befragung (siehe auch Anhang C.2) und einer ausgiebigen Diskussion mit den Experten des Studienbeirats. Insbesondere wurde dabei die Frage beantwortet, bei welchen Use Cases Informations- und Kommunikationstechnologien im Zeithorizont 2025+ voraussichtlich eine bedeutende Rolle einnehmen werden.

Es stellte sich heraus, dass sehr viele der zuvor ermittelten und zur Diskussion gestellten Use Cases für die Zwecke der Studie relevant und wichtig waren, d. h. dass wesentliche Bedarfe nach Kommunikation zur Erfüllung der jeweiligen Funktionen gesehen werden. Die zentralen Ergebnisse der Online-Befragung sind ebenfalls im Anhang C.2 zu finden. Unter der Erkenntnis, dass letztendlich fast alle Use Cases geeignet sind, die relevanten Anforderungen an die IKT anhand entsprechender Kriterien aufzuzeigen, wurde letztendlich ein repräsentativer Use Case aus jedem der vier Anwendungsfelder ausgewählt.

Im Einzelnen handelt es sich um die Use Cases

- Kartierung und hochgenaue Lokalisierung (Basisfunktionen),
- Gefahrenbewältigung/Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen (Sicherheit),
- Smart Traffic-Anwendungen (Nachhaltigkeit) und
- Cloud-Zugang und Cloud-Anwendungen (Komfort),

die für die Anforderungsanalyse verwendet werden sollen.

3.3 Use Cases

Die ausgewählten Use Cases werden nach einer kurzen inhaltlichen Beschreibung einer Analyse hinsichtlich der beiden Mobilitätsszenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ unterzogen. Ziel dieser Analyse ist die Identifizierung exemplarischer Anforderungen an die IKT für zukünftige Mobilitätsanwendungen. Dabei werden grundlegende Annahmen bezüglich möglicher, sich aus den Mobilitätsszenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ ergebender, Umsetzungsvarianten auf hohem Abstraktionsgrad („High Level“) getroffen und auch nachfolgend beschrieben. Aus diesen abstrahierten und teilweise bewusst gegensätzlich zugespitzten Umsetzungsvarianten lassen sich Anforderungen an die IKT in der Mobilitätswelt 2025+ hinsichtlich eines breiten Spektrums an Kriterien erkennen.

Umsetzungsvarianten im Szenario „Koexistenz“

In den Umsetzungsvarianten des Szenarios „Koexistenz“ wird prinzipiell davon ausgegangen, dass die Entscheidungen für das Agieren der jeweiligen Anwendung lokal (in den Fahrzeugen bzw. den Infrastrukturanlagen) getroffen werden. Die gesamte Datenverarbeitung und Anwendungslogik wird mit lokaler Informationstechnik realisiert. Diese muss eine hohe Leistungsfähigkeit aufweisen, was aber auch eine hohe Systemkomplexität und damit verbundene Folgewirkungen wie z. B. erhöhte Energieverbräuche und höhere Anschaffungskosten nach sich zieht. Für die Entscheidungsfindung relevante Daten werden in erster Linie mit lokalen Sensoren erzeugt, wobei externe Informationen (Verkehrsstörungen, Stauenden, allgemeine Verkehrssituationen, Wetter etc.) aus Kommunikation und Kooperation zusätzlich einbezogen werden können, insbesondere wenn sie den lokalen Horizont erweitern (siehe Abschnitt 2.4).

Der Verkehrsteilnehmer/technische Agent agiert weitgehend autonom. Kommunikation und Kooperation mit der Umwelt können aber seine Entscheidungen verbessern, weshalb er Interesse an diesen Aspekten hat.

Umsetzungsvarianten im Szenario „Konvergenz“

Im Szenario „Konvergenz“ wird prinzipiell davon ausgegangen, dass die Entscheidungen für das Agieren der jeweiligen Anwendung auch verteilt, d. h. lokal wie auch extern getroffen werden. Ein cloudbasierter Dienst, der auf leistungsfähigere Ressourcen zurückgreifen kann, trifft Entscheidungen für das Agieren spezifischer Anwendungen und kommuniziert diese an die Verkehrsteilnehmer.

Der einzelne Verkehrsteilnehmer agiert weitgehend kooperativ, nur letzte sicherheitsrelevante Entscheidungen werden lokal getroffen. Die Funktionsfähigkeit seiner Anwendungen hängen ganz entscheidend von der Kommunikation und Kooperation mit der Umwelt ab (siehe Abschnitt 2.5).

Vergleich der Umsetzungsvarianten „Koexistenz“ vs. „Konvergenz“

Für alle betrachteten Use Cases gibt es prinzipiell die soeben beschriebenen, recht diametralen Umsetzungsvarianten „Koexistenz“ und „Konvergenz“. Dabei werden explizit keine Aussagen zu den damit verbundenen konkreten Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodellen getätigt. In der Tabelle 03 sind die beschriebenen Annahmen zu den Umsetzungsvarianten „Koexistenz“ und „Konvergenz“ zusammengefasst.

	Koexistenz	Konvergenz
Ort der Entscheidungsfindung	lokal	verteilt
Komplexität lokaler Informationstechnik	hoch	moderat
Anbindung an Kommunikationssysteme	gelegentlich	permanent

Tabelle 03: Annahmen für Umsetzungsvarianten „Koexistenz“ vs. „Konvergenz“

3.3.1 Use Case: Kartierung und hochgenaue Lokalisierung

Abbildung 05: Use Case Kartierung und hochgenaue Lokalisierung (Kartengrafik designed by Freepik.com, bearbeitet)

Ziel

Ziele des Use Cases Kartierung und hochgenaue Lokalisierung sind einerseits das Bereitstellen von hochauflösenden und hochaktuellen Karten, möglichst in einem standardisierten Format und andererseits die schnelle und hochgenaue Lokalisierung der jeweiligen Verkehrsteilnehmer auf einer hochauflösenden Karte. Dabei sind mehrere Teilfunktionen zu berücksichtigen:

- Ermittlung und Bereitstellung hochauflösender Kartendaten,
- Berücksichtigung von zusätzlichen Straßen-, Radweg-, Fußweg- und weiteren Umfeldinformationen (u. a. Fahrbahnzustand, Hindernisse, Baustellen, Umleitungen etc.),
- Aktualisierungsvorgänge und -prozesse der Kartendaten und
- Hochgenaue Lokalisierung des Verkehrsteilnehmers auf hochauflösender Karte (u. a. unter Berücksichtigung harter Echtzeitanforderungen).

Der Use Case Kartierung und hochgenaue Lokalisierung ist eine Basisfunktion für darauf aufbauende Anwendungen (u. a. Navigation, Manöverplanungen, Kooperative Anwendungen wie z. B. das Einordnen in Verkehrsströme, Automatisiertes Fahren etc.).

Szenario „Koexistenz“

In der Umsetzungsvariante des Szenarios „Koexistenz“ werden die Anwendungsfunktionen lokal realisiert. Die hochauflösende digitale Karte liegt lokal beim Verkehrsteilnehmer (Fahrzeug) vor und wird bei Bedarf über einen Kommunikationszugang aktualisiert (Kartenupdates). Lokale Sensoren liefern Daten über das Umfeld und für die hochgenaue Lokalisierung des Verkehrsteilnehmers. Die lokale, hochauflösende Karte kann mit diesen Daten angereichert und über einen Kommunikationskanal an eine zentrale Stelle zur weiteren Bearbeitung kommuniziert werden.

Abbildung 06: Use Case Kartierung und hochgenaue Lokalisierung im Szenario „Koexistenz“ (Kartengrafik designed by Freepik.com, bearbeitet)

In diesem Szenario ist keine permanente Kommunikationsverbindung für den Verkehrsteilnehmer erforderlich. Er agiert weitgehend autonom, lediglich zum Aktualisieren der Datenlage ist eine Kommunikation mit der Umwelt erforderlich. Daraus ergeben sich geringere Anforderungen an die Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme. Es existieren auch keine hohen qualitativen Anforderungen an die Eigenschaften der Kommunikationstechnologien und -netze, was Echtzeitbedingungen, Latenzen und/oder Datenraten betrifft. Allerdings wird die Korrektheit der Daten für die hochauflösenden Karten erwartet, wodurch hohe Anforderungen an die IT-Sicherheit gestellt werden. Darüber hinaus bestehen bei Verwendung von externen, unabhängigen Kartenanbietern hohe Anforderungen an die Standardisierung des Kartenmaterials.

Szenario „Konvergenz“

In der Umsetzungsvariante des Szenarios „Konvergenz“ wird davon ausgegangen, dass sowohl hochauflösende Karten, als auch Algorithmen zur hochgenauen Lokalisierung von Verkehrsteil-

nehmern durch einen externen, cloudbasierten Dienst angeboten werden. Der Verkehrsteilnehmer überträgt in diesem Szenario permanent seine Sensordaten (wie z. B. GPS-Position, Kamera-Daten, Radar-Daten etc.) in die Cloud. Diese werden dort für die Aktualisierung der vorliegenden hochauflösenden, digitalen Karten verwendet. Dafür stehen leistungsfähige Algorithmen bereit, die auf die hohe Performance der Cloud zugreifen können. Außerdem können in der Cloud Sensordaten von mehreren Verkehrsteilnehmern miteinander verschmolzen werden, wodurch die Qualität der Daten zunimmt und die Karten automatisiert aktualisiert werden können. Daneben kann die Cloud einen Dienst auf Basis der Datenlage anbieten, der schnell und leistungsfähig den jeweiligen Verkehrsteilnehmer hochgenau lokalisieren kann. Die jeweiligen Lokalisierungsdaten werden über das Kommunikationssystem auf Anfrage oder permanent an den verbundenen Verkehrsteilnehmer gesendet, der auf dieser Basis seine darauf aufbauenden Anwendungen mit den entsprechenden Informationen versorgen kann.

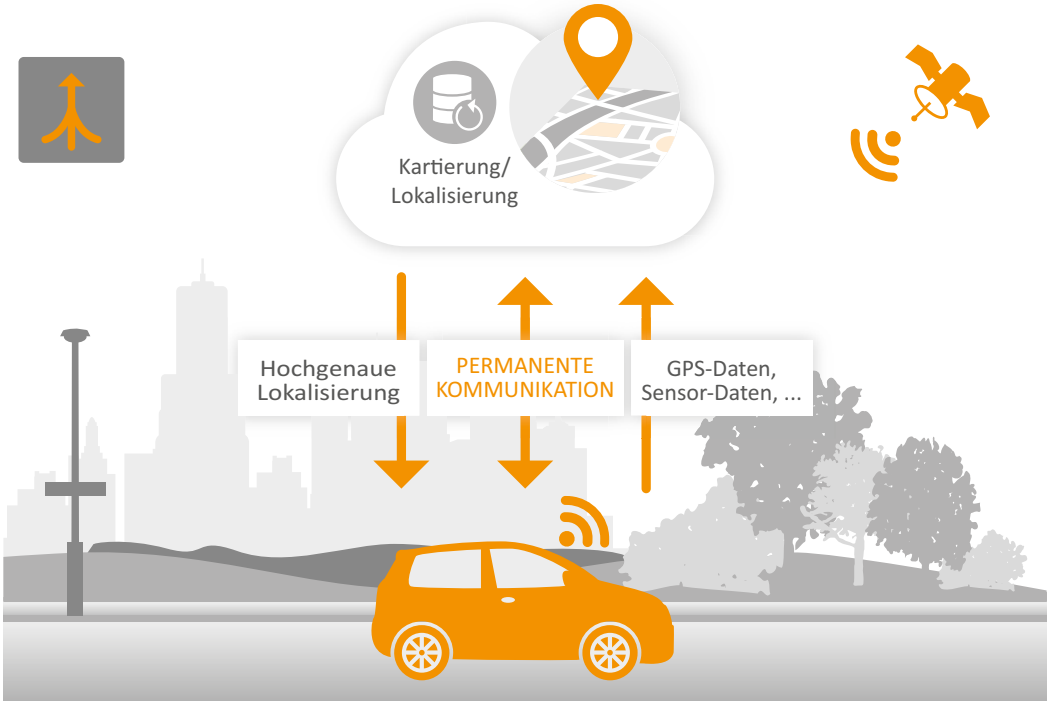


Abbildung 07: Use Case Kartierung und hochgenaue Lokalisierung im Szenario „Konvergenz“ (Kartengrafik designed by Freepik.com, bearbeitet)

Für die Funktionsweise im Szenario „Konvergenz“ braucht der Verkehrsteilnehmer eine permanente Kommunikationsverbindung zu den cloudbasierten Kartierungs- und Lokalisierungsdiensten. Weitere Anwendungen können von dieser Basisfunktion abhängen. Daraus ergeben sich sehr hohe Anforderungen an die IT-Sicherheit der Kommunikationsverbindung. Manipulierte Daten können schwerwiegende Folgen haben, insbesondere wenn sicherheitsrelevante Anwendungen (wie z. B. autonomes Fahren, Manöverplanungen etc.) mit Hilfe dieser Grundfunktionen realisiert werden. Durch die geforderte permanente Verbindung ergeben sich ebenfalls sehr hohe Anforderungen an die räumliche und zeitliche Verfügbarkeit der Kommunikationsverbindung. Diese muss auch unter schwierigen Bedingungen (Tunnel, enge Straßen, signaldämpfende Hindernisse/Gebäude etc.) garantiert werden können, damit weitergehende Anwendungen auf diesen Daten ihre jeweilige Funktion aufbauen können. Neben der Verfügbarkeit müssen Kommunikationssysteme in diesem Szenario auch harte Echtzeitbedingungen erfüllen, insbesondere wenn sicherheitskritische Anwendungen auf eine schnelle, hochgenaue Lokalisierung angewiesen sind. Falls externe cloudbasierte Dienste zur Kartierung und hochgenauen Lokalisierung verwendet werden, besteht darüber hinaus noch ein hoher Bedarf nach geeigneten Standards für Lokalisierung und Georeferenzierung.

Schlussfolgerungen

Aus den beiden Realisierungsoptionen für die Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ dieses Use Cases ergeben sich auch szenariobedingt differierende Anforderungen an die IT-Sicherheit, die Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme, die Kommunikationstechnologien und -netze und die Standardisierung. In Tabelle 04 werden diese für die beiden Mobilitätsszenarien auf einem hohen Abstraktionslevel zusammengefasst.

	Koexistenz	Konvergenz
IT-Sicherheit: Datensicherheit, Manipulierbarkeit, Datenintegrität etc.	hoch	sehr hoch
Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme: Ausfallsicherheit, Redundanz, Fehlertoleranz	moderat	sehr hoch
Kommunikationstechnologien und -netze: Datenrate, Latenz, Echtzeit	moderat	sehr hoch
Standardisierung: Datenformate, Kommunikationsprotokolle, Datenplattformen	moderat	moderat (hoch bei zentralisierten Diensten/Portalen)

Tabelle 04: Abgeleitete High Level-Anforderungen für den Use Case Kartierung und hochgenaue Lokalisierung

3.3.2 Use Case: Gefahrenbewältigung/Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen

Abbildung 08: Use Case Gefahrenbewältigung/Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen

Ziel

Ziel des Use Cases ist in erster Linie der Schutz der Verkehrsteilnehmer vor Gefahren bezüglich Leib und Leben. Dazu sollen Gefahren frühzeitig erkannt und entsprechende Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen oder zur Abmilderung von Unfallfolgen bei nicht mehr vermeidbaren Kollisionen getätigt werden. Typische Gefahrensituationen sind dabei u. a. Hindernisse, Glätte, Stauenden, Einsatzfahrzeuge, Unfälle/Pannen und plötzliche Bremsvorgänge. Mögliche Maßnahmen zur Unfallvermeidung könnten dabei autonome Bremsvorgänge, Ausweichmanöver, Einfädelmanöver etc. sein. Eine rechtzeitige Identifizierung möglicher Gefahrensituationen ist eine wichtige Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Realisierung dieses Use Cases.

Szenario „Koexistenz“

Im Szenario „Koexistenz“ agiert das Fahrzeug weitgehend autonom von seiner Umwelt. Die Sensoren des Fahrzeugs erfassen die Situationen in der unmittelbaren Umgebung. Komplexe Algorithmen verbunden mit leistungsfähigen Ressourcen interpretieren die Sensordaten und erkennen Gefahrensituationen. Für die Verbesserung der Datenlage und zur Erweiterung des Horizonts werden auch Daten aus der Kommunikation mit umgebenden Fahrzeugen, mit der Verkehrsinfrastruktur (LSA, intelligente Verkehrszeichen), ggf. mit Fußgängern (Vulnerable Road User) und mit der Cloud-Infrastruktur (Verkehrslage, Stauenden, etc.) für die Algorithmen verwendet. Allerdings dienen diese Daten in erster Linie zur Plausibilisierung und zur Qualitätsverbesserung. Die Entscheidungen über entsprechende Maßnahmen zur Gefahrenabwehr (Bremsvorgänge, Ausweichmanöver, etc.) werden ausschließlich lokal getroffen.

Im Szenario „Koexistenz“ werden hohe Anforderungen an die IT-Sicherheit der verwendeten Kommunikationssysteme gestellt. Nur wenn den Daten aus der Kommunikation vertraut werden kann und Manipulationen u. ä. ausgeschlossen sind, können diese Daten in die Entscheidungsfindung im Fahrzeug einbezogen werden. Daneben ergeben sich moderate Anforderungen an die

Abbildung 09: Use Case Gefahrenbewältigung / Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen im Szenario „Koexistenz“

Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme. Es ist nicht entscheidend für die Funktionsweise des Dienstes zur Gefahrenabwehr, dass Kommunikation mit der Umwelt verfügbar ist. Allerdings kann durch Informationen und Daten aus der Vernetzung die Qualität verbessert werden, so dass ein Interesse an einer stabilen Kommunikation mit der Umwelt des Fahrzeugs besteht. Falls aber eine Kommunikation mit anderen Fahrzeugen in der Umgebung zur Verbesserung der Gefahrenabwehr etabliert ist, bestehen hohe Anforderungen an die Kommunikationstechnologien und -netze. Harte Echtzeitanforderungen verbunden mit hohen Datenraten und niedrigen Latenzen sind wesentliche zu garantierende Parameter, um zukünftige, sicherheitsrelevante Anwendungen auf diesen Grundlagen realisieren zu können. Daneben gibt es hohe Anforderungen an die Existenz von geeigneten standardisierten Datenformaten und Protokollen, um eine Kommunikation mit vielen verschiedenen Verkehrsteilnehmern, der Verkehrsinfrastruktur und zentralen cloudbasierten Diensten und Portalen zu ermöglichen und somit die Anwendungen für die Gefahrenabwehr deutlich zu verbessern.

Szenario „Konvergenz“

Im Szenario „Konvergenz“ agiert das Fahrzeug für diesen Use Case weitgehend kooperativ. Auch hier werden Sensordaten zur Umwelterfassung in die Entscheidung für das Auslösen von geeigneten Maßnahmen einbezogen. Allerdings werden Daten und Informationen aus der Kommunikation mit umgebenden Fahrzeugen, mit der Verkehrsinfrastruktur wie auch mit externen, cloudbasierten Diensten in der Entscheidungsfindung zusammen mit den Sensordaten verwendet. Die Entscheidungsfindung erfolgt auch extern in der Cloud-Infrastruktur. Hier laufen alle Daten und Informationen zusammen. Sehr leistungsfähige IT-Ressourcen ermitteln ein umfassendes Bild der aktuellen Situation und treffen optimale Entscheidungen für alle beteiligten Verkehrsteilnehmer. Die Entscheidungen/Steuerungsdaten werden über die vorhandenen, hochverfügbaren und sehr leistungsfähigen Kommunikationssysteme an die relevanten Verkehrsteilnehmer mit harten Echtzeitbedingungen übertragen. Diese agieren auf Basis dieser kommunizierten Informationen weitgehend autonom und ermöglichen global optimale Manöver mit dem Ziel der Gefahrenabwehr.

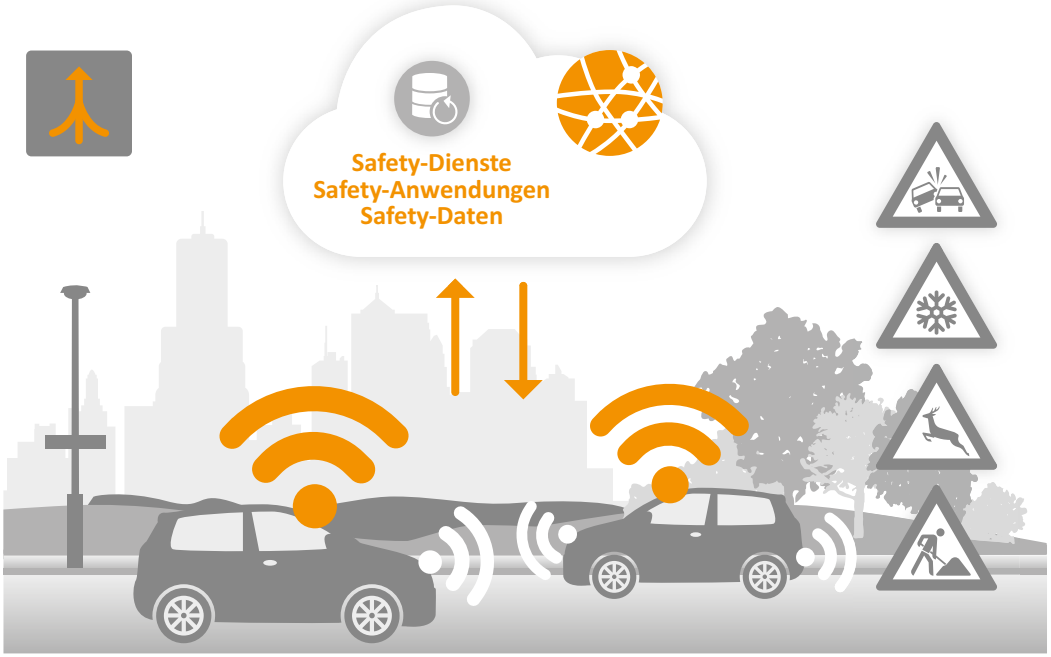


Abbildung 10: Use Case Gefahrenbewältigung / Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen im Szenario „Konvergenz“

Im Szenario „Konvergenz“ ergeben sich sehr hohe Anforderungen für die IT-Sicherheit, die Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme die Kommunikationstechnologien und -netze und für die Standardisierung. Sicherheitsrelevante Anwendungen hängen entscheidend von der Vernetzung mit der Umgebung und der Infrastruktur ab. Sensordaten werden kontinuierlich in die Cloud übertragen. Echtzeitfähige Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern entscheidet über sicherheitsrelevante kooperative Fahrmanöver. Diese Fakten implizieren sehr hohe Anforderungen an die IT-Sicherheit. Manipulierte Daten/Informationen können für diesen Use Case fatale Folgen haben, weshalb leistungsfähige Verfahren der IT-Sicherheit benötigt werden. Daneben müssen die Kommunikationssysteme eine sehr hohe Verfügbarkeit garantieren, um die dauerhafte Funktion der sicherheitsrelevanten Anwendungen zu ermöglichen. Kommunikationstechnologien und -netze müssen sehr hohe Anforderungen bezüglich Echtzeitfähigkeit, niedrigen Latenzen und hohen Datenraten erfüllen. Daneben wird eine dauerhafte Kommunikation mit heterogenen Verkehrsteilnehmern in der unmittelbaren Umgebung und der Infrastruktur benötigt. Hier ergeben sich hohe Anforderungen an international standardisierte Datenformate und Protokolle, um die heterogene, komplexe Systemlandschaft mit vertretbarem Aufwand beherrschen zu können.

Schlussfolgerungen

Aus den Erklärungen in den verschiedenen Realisierungen bezüglich der beiden Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ ergeben sich auch hier unterschiedliche Anforderungen. In der Tabelle 05 werden diese für die beiden Mobilitätsszenarien zusammengefasst.

	Koexistenz	Konvergenz
IT-Sicherheit: Datensicherheit, Manipulierbarkeit, Datenintegrität etc.	hoch	sehr hoch
Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme: Ausfallsicherheit, Redundanz, Fehlertoleranz	moderat	sehr hoch
Kommunikationstechnologien und -netze: Datenrate, Latenz, Echtzeit	hoch	sehr hoch
Standardisierung: Datenformate, Kommunikationsprotokolle, Datenplattformen	hoch	hoch

Tabelle 05: Abgeleitete High Level-Anforderungen für Use Case Gefahrenbewältigung/Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen

3.3.3 Use Case: Smart Traffic-Anwendungen

Abbildung 11: Use Case Smart Traffic-Anwendungen

Ziel

Im Use Case Smart Traffic-Anwendungen werden Anwendungen adressiert, die eine verkehrsoptimale, intermodale und energieeffiziente Mobilität ermöglichen. Big Data-Technologien erlauben Voraussagen über zukünftige Verkehrsentwicklungen auf der Grundlage von aktuellen und historischen Daten. Aktuelle, multimodale Mobilitätsdaten werden über zentrale Datenplattformen bereitgestellt und können standardisiert von den Verkehrsteilnehmern abgerufen werden. Durch die Vernetzung der Verkehrsteilnehmer untereinander, mit der Verkehrsinfrastruktur und durch Bereitstellung cloudbasierter Dienste wird eine möglichst optimale Mobilität hinsichtlich Fahrtzeit, Kosten und Energieeffizienz des privaten und gewerblichen Verkehrs ermöglicht.

Szenario „Koexistenz“

Im Szenario „Koexistenz“ für den Use Case Smart Traffic-Anwendungen agieren die Verkehrsteilnehmer weitgehend autonom auf Grundlage lokaler Algorithmen und informationstechnischer Ressourcen. Zentralisierte Datenplattformen stellen aktuelle Daten standardisiert zur Verfügung. Big Data-Technologien ermöglichen leistungsfähige cloudbasierte Dienste, die den dezentral agierenden Verkehrsteilnehmern lokal optimierte Entscheidungen (z. B. dynamische Navigation, intermodale Reiseplanung etc.) ermöglichen. Smart Traffic-Anwendungen sind in diesem Szenario prinzipiell nicht auf eine dauerhafte Kommunikationsanbindung angewiesen, allerdings werden diese durch die Verwendung aktueller Daten und Dienste wesentlich verbessert.

Es bestehen hohe Anforderungen an die IT-Sicherheit. Manipulierte Daten führen zu fehlerhaften Entscheidungen. Außerdem werden Anforderungen an Anonymisierung der kommunizierten Daten gestellt, um ein Tracking der Verkehrsteilnehmer zu vermeiden und den Anspruch nach Privatheit zu gewährleisten. Daneben bestehen allerdings keine hohen Anforderungen an die Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme. Die Verkehrsteilnehmer können auf Basis der lokal vorhandenen Ressourcen eigene Entscheidungen treffen und sind nicht auf eine permanente

Kommunikationsanbindung angewiesen. Daraus folgend werden auch keine hohen Anforderungen an die Kommunikationstechnologien und -netze gestellt. Parameter wie Echtzeitgarantie, niedrige Latenz spielen eine eher untergeordnete Rolle, da Entscheidungen nicht davon abhängen. Allerdings gibt es einen Wunsch nach hohen Datenraten, um komfortable Verkehrsanwendungen mit hohen Datenaufkommen auch mobil zu ermöglichen. In diesem Szenario werden auch hohe Anforderungen an die Standardisierung gestellt. Nur standardisierte Zugänge zu aktuellen Daten und Diensten ermöglichen die Realisierung passender, komfortabler und intermodaler Mobilitätsanwendungen.

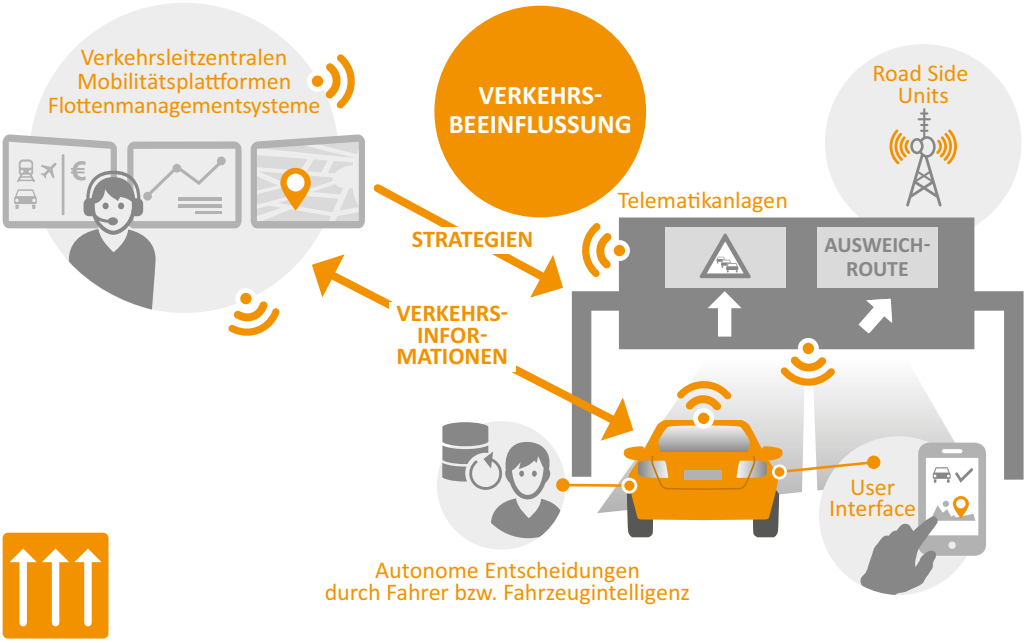


Abbildung 12: Use Case Smart Traffic-Anwendungen im Szenario „Koexistenz“

Szenario „Konvergenz“

Im Szenario „Konvergenz“ ermöglichen Big Data-Technologien und passende cloudbasierte Dienste für die Verkehrsteilnehmer optimale Mobilitätsanwendungen, die nahe an global optimale Lösungen heranreichen. Die Verkehrsteilnehmer agieren nicht dezentral und autonom sondern auf Basis der Entscheidungen und Anweisungen cloudbasierter Dienste. Dafür werden permanente Kommunikationsanbindungen an diese Systeme für alle Verkehrsteilnehmer benötigt. Lokale Sensordaten werden permanent in die Cloud kommuniziert und dort mit vorhanden Detektor-, FCD- und anderen erhobenen Verkehrsdaten fusioniert, so dass ein einheitliches Bild der aktuellen Verkehrslage mit hohem Qualitätsanspruch entsteht. Navigationsanweisungen, Vorgaben von Geschwindigkeiten, intermodale Routingempfehlungen, reservierte Parkplätze etc. werden an die Verkehrsteilnehmer kommuniziert. In diesem Szenario werden neben Verkehrsströmen auch Parameter wie Energieeffizienz und Umweltbelastung der gesamten Mobilität hochgradig optimiert.

Abbildung 13: Use Case Smart Traffic-Anwendungen im Szenario „Konvergenz“

Es bestehen sehr hohe Anforderungen an die IT-Sicherheit, an die Verfügbarkeit und an die technischen Metriken wie Echtzeitgarantie, niedrige Latenz und hohe Datenrate für die Kommunikationstechnologien und -netze. Daneben werden hohe Anforderungen an die Standardisierung gestellt, um die Anwendungen in einer heterogenen Systemlandschaft realisieren zu können.

Schlussfolgerungen

Aus den Erklärungen in den verschiedenen Realisierungen bezüglich der beiden Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ ergeben sich auch hier unterschiedliche Anforderungen. In der Tabelle 06 werden diese für die beiden Mobilitätsszenarien auf dem beschriebenen Abstraktionslevel zusammengefasst.

	Koexistenz	Konvergenz
IT-Sicherheit: Datensicherheit, Manipulierbarkeit, Datenintegrität etc.	hoch	sehr hoch
Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme: Ausfallsicherheit, Redundanz, Fehlertoleranz	moderat	sehr hoch
Kommunikationstechnologien und -netze: Datenrate, Latenz, Echtzeit	moderat	sehr hoch
Standardisierung: Datenformate, Kommunikationsprotokolle, Datenplattformen	hoch	hoch

Tabelle 06: Abgeleitete High Level-Anforderungen für Use Case Smart Traffic-Anwendungen

3.3.4 Use Case: Cloud-Zugang und Cloud-Anwendungen

Abbildung 14: Use Case Cloud-Zugang und Cloud-Anwendungen

Ziel

Ziel des Use Cases ist ein zuverlässiger, niedriglatenter und mit hohen Datenraten versehener Kommunikationszugang zu einer Cloud-Infrastruktur. Mit diesem Kommunikationszugang wird die Basis für darauf aufbauende Anwendungen gelegt. Schwerpunkt der Betrachtungen innerhalb dieses Use Cases sind Anwendungen des Alltags und Komforts wie z. B. Büroanwendungen, Videos, Spiele, Infotainment, Standortdienste etc., die benutzerfreundlich ausführbar sein sollen. Dabei werden in erster Linie die Fahrzeugpassagiere adressiert. In Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad des Fahrzeugs rückt aber auch zunehmend der Fahrer selbst als Nutzer dieser Dienste in den Fokus.

Szenario „Koexistenz“

Im Szenario „Koexistenz“ werden die Anwendungen in erster Linie lokal auf entsprechend leistungsfähiger, vorhandener Rechentechnik laufen. Die Anwendungen funktionieren auch ohne Kommunikationsverbindung zu einer Cloud-Infrastruktur. Allerdings werden teilweise für die Anwendungen wichtige Daten in der Cloud verwaltet, weshalb diese möglichst häufig synchronisiert werden müssen. Dieses wird bei bestehendem Kommunikationszugang zur Cloud-Infrastruktur realisiert, weshalb eine möglichst lange Kommunikationsverbindung in diesem Szenario von Vorteil, aber nicht zwingend notwendig ist.

Im Szenario „Koexistenz“ stellt dieser Use Case vergleichsweise geringe Anforderungen an die Kommunikationsinfrastruktur hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit (Ausfallsicherheit, Redundanz, Fehlertoleranz etc.). Es ist kein permanenter Zugang zur Cloud-Infrastruktur notwendig, weshalb auch räumliche und zeitliche Kommunikationslücken verkraftbar sind. Entsprechend sind auch die qualitativen Anforderungen an die Kommunikationstechnologien und -netze eher moderat, was Metriken wie Echtzeitbedingungen, Latenz, Datenraten etc. betrifft. Auch die Anforderungen an die Standardisierung fallen in diesem Szenario eher moderat aus und werden nur bei Verwendung von zentralisierten (Daten-)Portalen relevant. Dagegen werden hohe Anforderungen an die IT-Sicherheit durch die Synchronisierung wichtiger Anwendungsdaten mit der cloudbasierten Datenhaltung gestellt.

Abbildung 15: Use Case Cloud-Zugang und Cloud-Anwendungen im Szenario „Koexistenz“

Szenario „Konvergenz“

Im Szenario „Konvergenz“ werden die Anwendungen in der Cloud-Infrastruktur ausgeführt. Die lokale Rechentechnik des Fahrzeugs bzw. des Verkehrsteilnehmers ist eher weniger leistungsfähig und mehr auf die Darstellung und Interaktion mit den cloudbasierten Anwendungen optimiert. Alle Steuerdaten werden über die Kommunikationsanbindung übertragen. Videos, Spiele etc. laufen ebenfalls in der externen Cloud und werden mit Hilfe der leistungsfähigen Kommunikationsinfrastruktur an die Endgeräte zur Darstellung und Interaktion übertragen, typischerweise als „Stream“ von Multimediadaten.

Für die Verwendung der Anwendungen ist zwingend eine Kommunikationsverbindung zur Cloud-Infrastruktur notwendig. Allerdings sind die Anwendungen aus den Bereichen Büro, Video, Spiele keine sicherheitsrelevanten Anwendungen, weshalb hier temporäre Ausfälle der Kommunikation mit der Cloud-Infrastruktur von den Anwendungen und Nutzern toleriert werden können. Es werden hohe Anforderungen an die IT-Sicherheit gestellt, da nur bei Verwendung von korrekten Daten und manipulationsfreier Kommunikationsverbindung eine sichere Funktion der Anwendungen gewährleistet werden kann. Daneben sind auch die Anforderungen an die Verfügbarkeit der Kommunikationsinfrastruktur als hoch einzustufen, da sie zwingend Voraussetzung für die Funktion der Anwendungen sind. Allerdings können temporäre Unterbrechungen aufgrund des nicht sicherheitsrelevanten Charakters der Anwendungen toleriert werden, weshalb hier keine sehr hohen Anforderungen an die Verfügbarkeit der Kommunikationsverbindungen gestellt werden. Ebenfalls hohe Anforderungen werden an die Kommunikationstechnologien und -netze gestellt. Anwendungen zum Video- und Gamestreaming brauchen dauerhaft hohe Datenraten und eine niedrige Latenz, damit Darstellung und Interaktion zufriedenstellend realisiert werden können. Wie im Szenario „Koexistenz“ werden eher moderate Anforderungen an die Standardisierung gestellt, da diese für diesen Use Case nur bei Verwendung zentraler Ressourcen (z. B. MDM als Datenplattform) relevant werden könnte.

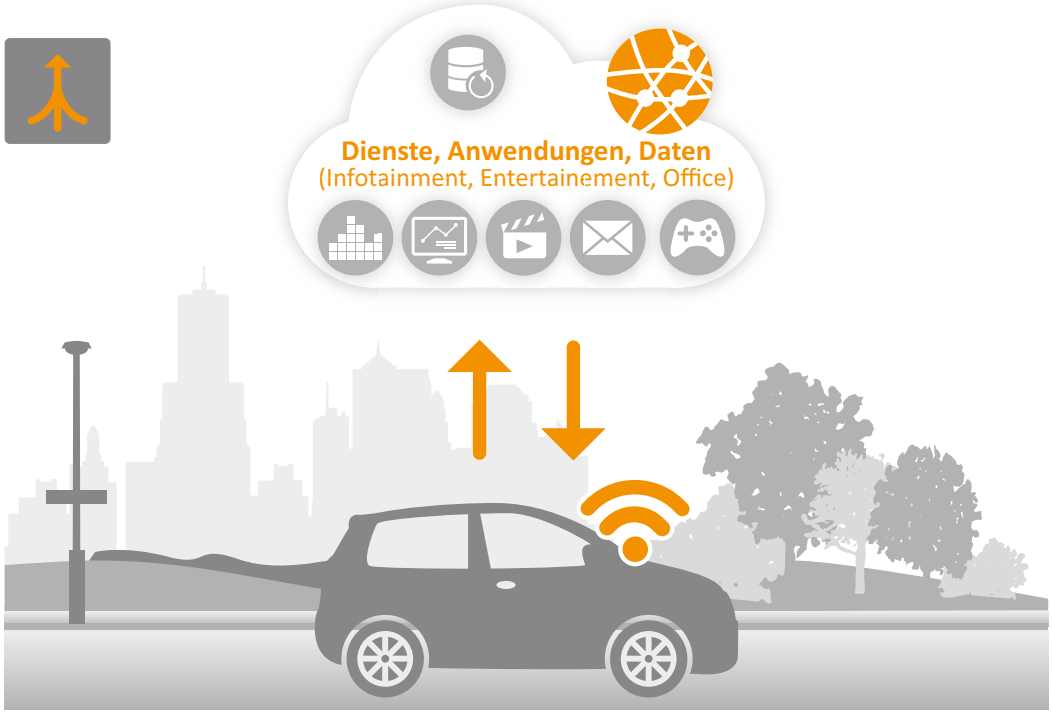


Abbildung 16: Use Case Cloud-Zugang, Cloud-Anwendungen im Szenario „Konvergenz“

Schlussfolgerungen

Aus den Erklärungen in den verschiedenen Realisierungen bezüglich der beiden Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ ergeben sich auch hier unterschiedliche Anforderungen. In Tabelle 07 werden diese für die beiden Mobilitätsszenarien auf dem beschriebenen Abstraktionslevel zusammengefasst.

	Koexistenz	Konvergenz
IT-Sicherheit: Datensicherheit, Manipulierbarkeit, Datenintegrität etc.	hoch	hoch
Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme: Ausfallsicherheit, Redundanz, Fehlertoleranz	moderat	hoch
Kommunikationstechnologien und -netze: Datenrate, Latenz, Echtzeit	moderat	hoch
Standardisierung: Datenformate, Kommunikationsprotokolle, Datenplattformen	moderat	moderat (hoch bei zentralisierten Diensten/Portalen)

Tabelle 07: Abgeleitete High Level-Anforderungen für Use Case Cloud-Zugang und Cloud-Anwendungen

3.4 Abgeleitete Anforderungen und Folgerungen

Aus der Use Case-Analyse lassen sich allgemeine Anforderungen an die Aspekte IT-Sicherheit, Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme, Kommunikationstechnologien und -netze und Standardisierung bezüglich der Mobilitätsszenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ ableiten.

Es stellte sich heraus, dass es bei den Kriterien der Verfügbarkeit von Kommunikationssystemen und den Kommunikationstechnologien und -netzen erhebliche Unterschiede in den Anforderungen zwischen den Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ gibt. Diese Unterschiede ergeben sich in erster Linie aus der Art des Agierens der Verkehrsteilnehmer. Im Szenario „Koexistenz“ agieren die Verkehrsteilnehmer als technische Agenten weitgehend autonom und nutzen Kooperation durch Kommunikation mit der Umwelt in erster Linie dafür, ihre lokale Daten- und Informationslage zu verbessern und zu besseren lokalen Entscheidungen zu gelangen. Dagegen agieren die Verkehrsteilnehmer im Szenario „Konvergenz“ im höchsten Maße kooperativ. Die Entscheidungen werden hier verteilt getroffen und sind in hohem Maße von einer hoch verfügbaren, qualitativ hochwertigen Kommunikation abhängig. Entsprechend ergeben sich die eher moderaten Anforderungen für das Szenario „Koexistenz“ im Vergleich zu den sehr hohen Anforderungen im Szenario „Konvergenz“ für die Aspekte Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme, -technologien und -netze (siehe Tabelle 08).

Für die Aspekte IT-Sicherheit und Standardisierung ergeben sich in beiden Szenarien hohe bis sehr hohe Anforderungen. In beiden Szenarien wird eine Kooperation durch Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern und Infrastruktur, wenn auch auf unterschiedlichem Level angestrebt. Sobald sich ein technisches System durch extern zugängliche Schnittstellen öffnet, ergeben sich zwangsläufig hohe Anforderungen an die IT-Sicherheit. Die Gefahr, dass durch manipulierte und/oder fehlerhafte Kommunikation die Funktionsweise erheblich gestört werden kann, ist hier deutlich höher als bei nicht kommunizierenden Systemen. Entsprechend müssen leistungsfähige Konzepte und Verfahren der IT-Sicherheit verwendet werden, um diesen Gefahren zu begegnen. Dieses gilt in besonderem Maße, wenn sicherheitsrelevante Anwendungen von einer fehlerfreien Kommunikation abhängen. Darüber hinaus ergeben sich auch hohe Anforderungen an die Standardisierung für beide Szenarien. Grundsätzlich liegt eine sehr heterogene Systemlandschaft mit einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten und technischen Systemen vor. Für solche Systeme kann die resultierende Komplexität nur durch eine Standardisierung der Architektur und der Kommunikationsschnittstellen beherrschbar gestaltet werden.

Die ermittelten Anforderungen sind getrennt für die Mobilitätsszenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ in Tabelle 08 zusammengefasst dargestellt. In den folgenden Abschnitten werden diese vertieft und analysiert, um daraus Technologielücken und Handlungsempfehlungen für die IKT der Mobilität 2025+ abzuleiten.

	Koexistenz	Konvergenz
IT-Sicherheit: Datensicherheit, Manipulierbarkeit, Datenintegrität etc.	hoch	sehr hoch
Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme: Ausfallsicherheit, Redundanz, Fehlertoleranz	moderat	sehr hoch
Kommunikationstechnologien und -netze: Datenrate, Latenz, Echtzeit	moderat – hoch	sehr hoch
Standardisierung: Datenformate, Kommunikationsprotokolle, Datenplattformen	moderat – hoch	hoch

Tabelle 08: High Level-Anforderungen der funktionalen technischen Aspekte der Kommunikationstechnologien im Mobilitätssektor

4. Anforderungen an die Sicherheit und Verfügbarkeit der Netze

Die Voraussetzungen für eine fehlerfreie Funktion sowie den sicheren und stabilen Betrieb komplexer, vernetzter Systeme sind neben Maßnahmen, die das Thema IT-Sicherheit adressieren auch eine hohe Verfügbarkeit der Kommunikationsinfrastruktur sowie der benötigten Daten und Dienste. Zu den Aspekten, die in diesem Zusammenhang gerade in Systemen mit sicherheitskritischem Charakter, wie IVS unbedingt Beachtung finden sollten, zählen bezüglich der IT-Sicherheit Forderungen nach

- Vertraulichkeit,
- Integrität,
- Schutz der Privatsphäre und
- Betriebssicherheit

sowie bezüglich der Verfügbarkeit Forderungen nach

- Ausfallsicherheit,
- Fehlertoleranz,
- Redundanz und
- Echtzeitfähigkeit.

Lenkt man den Blick auf die Situation von IVS, wie sie sich in 10 bis 15 Jahren darstellen wird, so kann man davon ausgehen, dass für deren Betrieb im Vergleich zu heute eine wesentlich größere Abhängigkeit von der informationstechnischen Vernetzung von Systemen und Anwendungen vorhanden sein wird. Nicht zuletzt durch den zunehmenden Einsatz von Virtualisierungstechniken werden Kommunikationsnetze für IVS zur kritischen Infrastruktur, von deren Zuverlässigkeit die Prozesse in Wirtschaft und Gesellschaft in hohem Maße abhängen.

Im Vergleich zu Systemen mit einer festen Kommunikationsinfrastruktur sind bei IVS in Bezug auf Sicherheit und Verfügbarkeit die zu beachtenden Randbedingungen komplexer und mitunter weitaus schwieriger beherrschbar, woraus sich wiederum besondere Maßnahmen für die Bewältigung dieser spezifischen Probleme ergeben.

4.1 IT-Sicherheit im Kontext von IVS

4.1.1 Beispiele aus der Mobilität

Angriffe, die auf Anwendungen im Rahmen von IVS zielen, unterliegen aufgrund möglicher Gefährdungen für die Gesundheit und das Leben von beteiligten Verkehrsteilnehmern besonderer Brisanz und sind infolgedessen durch den Einsatz entsprechender Sicherheitsvorkehrungen weitestgehend zu verhindern. Die im Folgenden skizzierten Angriffsszenarien und Beispiele sollen die Komplexität der Sicherung technischer Systeme sowie die nicht selten vergleichsweise simplen Angriffsmöglichkeiten im Rahmen von IVS verdeutlichen.

Je nach Anwendungsfall kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz um die Sicherheit zu gewährleisten. Erfolgt die Kommunikation beispielsweise bei der Online-Bearbeitung von Dokumenten mit einem dedizierten Kommunikationspartner (einem Server oder einem Endpunkt in der Cloud) kann sie verschlüsselt werden. Die Kommunikation mit anderen in der Regel unbekannten

Verkehrsteilnehmern Car-to-Car erfolgt hingegen aufgrund der allgemeinen Zugänglichkeit zu den übermittelten Informationen unverschlüsselt. Hier kommen Verfahren (Authentifizierung, Pseudonymisierung) zum Einsatz, die sicherstellen, dass der Absender vertrauenswürdig ist und im Regelfall anonym bleibt, jedoch im Konfliktfall ermittelt werden kann.

Sicherheitsrisiko: Angriff auf IT-Infrastruktur

Bei diesem Sicherheitsszenario dringt ein Angreifer direkt in die IT-Infrastruktur, die für die Bereitstellung von Daten verantwortlich ist, ein und manipuliert diese [P19][S7]. Ein Beispiel für ein solches Angriffsszenario ist die Manipulation hochgenauer Kartendaten auf einem Server, die für das automatisierte Fahren benötigt werden. Die Auswirkungen dieser Manipulation reichen je nach Grad der Automatisierung von fehlerhafter Navigation bis hin zu Unfällen autonom fahrender Fahrzeuge, deren Orientierung auf hochgenauen Karten basiert.

Sicherheitsrisiko: Manipulation der Kommunikation eines Fahrzeuges (Car-to-X)

Sicherheitsszenarien dieser Art zielen auf die Manipulation der Kommunikation eines Fahrzeuges mit der Car-to-X-Infrastruktur oder mehrerer Fahrzeuge untereinander. Manipulationen dieser Art können beispielsweise dazu genutzt werden, Fahrzeugen auf sich kreuzenden Spuren eines Knotenpunktes gleichzeitig mitzuteilen, dass für ihre Spur die Fahrt freigegeben ist [P19]. Weitere Beispiele von Angriffszielen wären die Provokation von Unfällen durch das Senden von Falschmeldungen an andere Fahrzeuge oder das Vortäuschen des (Nicht-)Vorhandenseins (Ein-/Ausblenden) anderer Fahrzeuge [P19][S7][A2].

Angriff auf ein Keyless Entry-System

Bei diesem konkreten Angriff wurde die Tatsache genutzt, dass sich das Auto öffnen und starten lässt, wenn sich der Autoschlüssel in der Nähe befindet und per Nahfeldkommunikation geortet werden kann. Diebe nutzen eine vergleichsweise einfache Elektronik um die Informationen der Nahfeldkommunikation zwischen Schlüssel und Fahrzeug über eine größere Strecke weiterzuleiten und so die Elektronik des Autos dahingehend zu täuschen, dass diese reagiert als wäre der Schlüssel in Reichweite. So kann das Auto unbemerkt entwendet und außerhalb des Zugriffs des Besitzers von den Dieben weiter bearbeitet werden [SO7].

Sicherheitsrisiko: Manipulation von Signallaufzeiten

Neben dem direkten Angriff auf die Kommunikation eines Fahrzeuges genügt es, für bestimmte Angriffe nur die Signallaufzeiten der Kommunikation zu manipulieren. Ziel dieses Angriffs ist es, eine künstliche Erhöhung der Latenz bei der Datenübertragung zu forcieren.

Dieses Sicherheitsrisiko ist für alle Use Cases relevant, in denen die Übertragung von Daten mit sehr geringer Latenz (beispielsweise zur Echtzeitpositionsbestimmung oder Echtzeitreaktion, Zeitsynchronisation oder Videostreaming) notwendig ist. Die Gefahren, die von solchen Angriffsszenarien ausgehen, sollen anhand der Applikation am Anwendungsfall „Share My View/See-through" verdeutlicht werden, in dem mittels Videoübertragung die Sicht des Vorrausfahrenden auf ein Display im nachfolgenden Fahrzeug übertragen wird, wobei hier definierte Latenzzeiten zwingende Voraussetzung sind. Werden diese Latenzzeiten mithilfe entsprechender Angriffsmetho-

den signifikant verlängert und verlässt sich der Fahrer aufgrund mangelnder Sicht auf diese Information, gerät er mit seinem Fahrzeug ggf. beim Überholen in den Gegenverkehr, der aufgrund der hohen Latenz im Display noch nicht zu sehen war [P19] [A2].

Fernsteuerung eines Jeep Cherokee

Bei diesem Angriffsszenario wurde über ein Notebook Zugriff auf die Funktionen des Fahrzeug-Systems eines Jeep Cherokee erlangt, wobei man hierbei die Kontrolle auch über wichtige Steuerungsfunktionen des Fahrzeugs übernahm. Die Demonstration während einer Fahrt zeigt nicht nur die Fernsteuerung von Funktionen wie die Veränderung der Lautstärke oder das An- und Abschalten der Scheibenwischer sondern auch die Übernahme von Funktionen der Fahrzeugführung wie Lenkradstellung, Bremsen oder des Schaltgetriebes. Der Zugriff auf die fahrzeuginternen Funktionen erfolgte hierbei über das Infotainment-System des Fahrzeugs, wobei die Fernsteuerung über das Internet erfolgte ohne dass das Fahrzeug sich in Sichtweite befinden musste [SO8].

Sicherheitsrisiko: Abhören/Ausspionieren von Informationen

In diesem Szenario könnten über gesicherte Kommunikationsverbindungen übertragende Daten ausspioniert werden, ohne dass dafür ein Angriff auf die entsprechenden Server (in der Cloud) notwendig ist. Dabei ließen sich beispielsweise fahrzeugbezogene Standortinformationen von Dieben nutzen, um Fahrzeuge zu entwenden oder in Abwesenheit des Besitzers für Hauseinbrüche zu begehen. [P19][S11] [A16].

Sicherheitsrisiko: Ausfall von (Teil-)Systemen

Der unkompensierte Ausfall sicherheitsrelevanter (Teil-)Systeme stellt ein Sicherheitsrisiko dar. In diesem Zusammenhang wird jedoch nur der Ausfall von Systemen (Kommunikationssystem, Sensorik) berücksichtigt, die über die manuelle Steuerung eines Fahrzeuges hinaus eingesetzt werden. Beispiele für solch ein Szenario wären der Ausfall von Sensoren beispielsweise für die Abstandsmessung oder der Ausfall entsprechender Kommunikationssysteme, was unter bestimmten Umständen (z. B. schlechte Sichtverhältnisse) zu einem Ausfall des Fahrassistenzsystems und damit zu einem erhöhten Unfallrisiko führen kann.

Sicherheitsrisiko: Falsche Reaktionen technischer Systeme

Technische Systeme sind meist komplex und entstehen in der Regel unter Beteiligung einer Vielzahl von Entwicklern. Dabei können Design- und Implementierungsfehler entstehen, die sich u. U. erst nach langer Zeit bemerkbar machen. Die Bandbreite falscher Entscheidungen/Reaktionen ist wie die der Design- und Implementierungsfehler schwer überschaubar. So können Situationen bzw. Konstellationen von Ereignissen entstehen, in denen ein System eine fehlerhafte Entscheidung trifft, die insbesondere beim autonomen Fahren zu einem Unfall führen kann.

4.1.2 Konzepte der IT- Sicherheit

In der IT-Sicherheit wird zwischen den Begriffen Safety und Security unterschieden. Während unter dem Begriff Security alle Maßnahmen zum Schutz des technischen Systems vor äußeren Angriffen zusammengefasst werden, verbergen sich hinter dem Begriff Safety Maßnahmen, die zur Betriebssicherheit (Schutz der Systemumwelt vor Systemfehlern) beitragen.

So gehört beispielsweise der Schutz vor absichtlicher Manipulation von Car-to-X-Nachrichten in den Bereich Security, der Schutz vor unbeabsichtigter Fehlbedienung oder vor Gefahren durch technische Störungen wie beispielsweise dem Ausfall eines Car-to-X-Kommunikationssystems hingegen in den Bereich Safety.

Diese Konzepte lassen sich wie in Abbildung 17 dargestellt weiter unterteilen.

Abbildung 17: Konzepte der IT-Sicherheit

Mit den dargestellten Konzepten lassen sich verschiedene Sicherheitsverletzungen behandeln:

Safety

- Ausfall von technischen Komponenten (beispielsweise Car-to-X-Kommunikation): Sicherungssysteme (Fall-Back-Systeme/Safe-State)/Fehlermanagement

- Fehlerzustände durch Fehlbedienung (beispielsweise Konfigurationseingaben): Fehlermanagement/Tests (Prüfen der korrekten Funktionsweise/Fehlerbehandlung)
- Sicherung gefährlicher Bereiche (beispielsweise Schutz vor stromführenden Bauteilen)
- Sicherungssysteme (physische/technische Barrieren)

Security

- Datenschutz (Verschlüsselung/Pseudonomisierung): Schutz vor unbefugtem Zugriff auf Daten (beispielsweise Schutz vor dem Ausspionieren von Fahrern zum Zweck des Diebstahls/Einbruchs/Erpressung); Unbefugtes Mitlesen geheimer Informationen (beispielsweise Passwörter für Kontenzugriffe bei Bezahlvorgängen für Car-to-X-Premiumangebote)
- Zugangskontrolle (Authentifizierung/Zugriffsmanagement): Schutz vor unbefugtem Zugriff (hacken) auf Systeme (beispielsweise Eindringen in Cloud-Server zum Zweck des Diebstahls/der Manipulation von Daten)
- Manipulationssicherheit (Zertifizierung/Nichtabstreitbarkeit)
- Manipulation von Daten mit dem Zweck andere Personen zu täuschen (beispielsweise gefälschte Car-to-X-Nachrichten oder Tarnung von Spam „Achtung: in 500 Meter finden Sie Schnäppchen zum Hammerpreis!“)

4.1.3 IT-Sicherheitsverfahren

Die nachfolgend beschriebenen Verfahren gehören zum Stand der Technik bei der Sicherung von IT-Systemen gegen Fehler oder Angriffe. Daher ist davon auszugehen, dass diese Verfahren zukünftig auch zur Absicherung von Car-to-X-Systemen sowie der Car-to-X-Kommunikation eingesetzt werden.

Um die Sicherheit zu gewährleisten werden verschiedene Maßnahmen angewendet. Im Bereich **Safety** zählen dazu:

- Betriebssichere Konzepte,
- Prüfung von Eingaben,
- Definition und Behandlung von Fehlerzuständen (Fehlermanagement) und
- Protokollierung von Fehlern und Ursachen.

Durch die **betriebssichere Konzeption** von Systemen können bereits frühzeitig Sicherheitsprobleme aufgezeigt und in die Konzeption einbezogen werden. So muss beispielsweise bei Car-to-X-basierten Bremsassistenten berücksichtigt werden, dass eine Vollbremsung in einer Kurve je nach Beschaffenheit des Untergrundes ggf. zum Verlust der Bodenhaftung und damit zu seitlichem Abdriften des Fahrzeugs führen kann.

Durch die **Prüfung von Eingaben** können Fehlbedienungen erkannt werden, bevor sie zu kritischen Fehlern führen. Dies geschieht üblicherweise durch Typprüfungen und Plausibilitätstests. So müssen beispielsweise Konfigurationsänderungen, die in einer Werkstatt vorgenommen werden können, zur Vermeidung von Fehlkonfigurationen geprüft werden. Dies gilt auch für die Prüfung der Länge und Stärke eines vom Nutzer eingegebenen Passwortes, über das ein Fahrzeug mit einem Account in der Cloud verbunden wird.

Da bei technischen Systemen im Laufe ihres Lebenszyklus Defekte eintreten können und auch die Fehlerfreiheit von Hard- und Software nicht garantiert werden kann, wird ein **Fehlermanagement** benötigt. Mögliche Fehler werden damit zwar nicht verhindert, ihre Folgen können jedoch abgemildert werden. So muss beispielsweise ein teleoperiertes Fahrzeug bei Ausfall der Kommunikation kontrolliert zum Stillstand gebracht werden. Um die Wahrscheinlichkeit von unkontrolliertem bzw. fehlerhaftem Verhalten zu reduzieren, kommen Testsysteme und Fehlergeneratoren zum Einsatz. Mit ihrer Hilfe lassen sich Systeme auf mögliche Fehler sowie auf die korrekte Umsetzung der Behandlung von Fehlerzuständen prüfen.

Um eine spätere Rückverfolgung der Ursache eines Fehlers zu ermöglichen werden Log-Protokolle geführt **(Protokollierung).** Darin kann beispielsweise erfasst werden, wer eine fehlerhafte Car-to-X-Nachricht gesendet hat, zu welchem Zeitpunkt das Senden erfolgte und wie darauf reagiert wurde, wenn es z. B. infolgedessen zu einem Unfall kam.

Im Bereich **„Security“** kommen folgende Verfahren zur Abwehr und Vereitelung von Angriffen zum Einsatz:

- Verschlüsselung,
- Authentifizierungsmechanismen,
- Zugriffsmanagement,
- Zertifizierung,
- Sicherheitsprüfung und
- Protokollierung.

Die **Verschlüsselung**, also die verschlüsselte Übertragung und Speicherung von Daten dient dem Datenschutz. Damit wird der unberechtigte Zugriff auf geheime bzw. vertrauliche Informationen verhindert. Da eine allumfassende Sicherheit nicht garantiert werden kann, gilt der Grundsatz, dass der Angriff auf einen Verschlüsselungsalgorithmus bei Verwendung eines ausreichend langen Schlüssels länger dauern muss, als die verschlüsselte Information vor Zugriff geschützt werden muss. So ist die Standortinformation eines Fahrzeuges für einen Dieb nur so lange interessant, wie sich das Fahrzeug noch an diesem Standort befindet. Benötigt der Angriff somit mehrere Jahre, so verliert die verschlüsselte Information für den Dieb, der beispielsweise das Auto entwenden möchte, ihren Wert.

Authentifizierungsmechanismen und Zugriffsmanagement dienen dem Schutz von sensiblen Systemen vor unberechtigten Zugriffen. Während sich ein Nutzer bzw. ein anderes System durch die Eingabe oder Übertragung eines Passwortes authentifiziert und somit als zugriffsberechtigt ausweist, werden seinem Account über das Zugriffsmanagement Berechtigungen zugewiesen. So wird zukünftig voraussichtlich jedes Car-to-X-fähige Fahrzeug mit einer Lichtsignalanlage (LSA) kommunizieren können, um die Zeit bis zur nächsten Grünphase zu erfragen. Die Anmeldung an verkehrsabhängige Steuerungen für eine Grünphase im nächsten Umlauf wird hingegen bereits eine Authentifizierung und den Zugriff auf unterster Ebene des Zugriffsmanagements erforderlich machen. Spezialfahrzeuge von Rettungskräften oder öffentliche Verkehrsmittel, die eine weitreichendere Kontrolle über die LSA benötigen, müssen hingegen aufgrund des zur Authentifizierung verwendeten Accounts höhere Berechtigungen vom Zugriffsmanagement zugewiesen bekommen.

Die **Zertifizierung** von Nachrichten dient der Absicherung gegen Manipulationen durch Dritte bei ihrer Übertragung vom Sender zum Empfänger. Dabei wird nicht die eigentliche Nachricht sondern ein aus der Nachricht gebildeter Hashwert mit Hilfe des privaten (oder geheimen) Schlüssels („Private Key“) eines asymmetrischen Verschlüsselungsverfahrens verschlüsselt und zusammen

mit der Nachricht als Signatur versandt. Dies sichert die Integrität der Nachricht und sorgt dafür, dass der Urheber den Versand der Nachricht bei nicht kompromittiertem Private Key nicht bestreiten kann. Jeder, der den öffentlichen Schlüssel („Public Key“) des Absenders kennt, kann so prüfen, ob die Nachricht noch unverändert ist. Denn der korrekte Hashwert lässt sich nur aus der originalen Nachricht neu erzeugen und mit dem durch den Public Key aus der Signatur entschlüsselbaren Hashwert vergleichen. Da ein Angreifer den Private Key des Absenders nicht kennt, kann er den Hashwert nicht zusammen mit der Nachricht manipulieren und neu verschlüsseln. In der Car-to-X-Kommunikation nimmt die Zertifizierung einen sehr hohen Stellenwert ein, da die Nachrichten selbst für alle Verkehrsteilnehmer sichtbar sein sollen, der Urheber aber vertrauenswürdig sein muss.

Trotz aller Bemühungen Zugriffe und Manipulationen zu verhindern, kann oft aufgrund menschlichen Fehlverhaltens (beispielsweise ungeschützte Terminals, ungesicherte Aufbewahrung von Zugangsdaten oder Insider Attacks) ein unberechtigtes Eindringen in Systeme nicht immer verhindert werden. So kann beispielsweise menschliches Versagen trotz bestmöglicher technischer Vorkehrungen einen Angriff mit Hilfe von Viren oder sonstiger Schadsoftware ermöglichen. Hier kommen Virenscanner und Firewalls und andere Werkzeuge zur **Sicherheitsprüfung** zum Einsatz, die Schadsoftware mit Hilfe von Virensignaturen oder Heuristiken erkennen und entfernen bzw. protokollieren. So steigt beispielsweise in Car-to-X-fähigen Fahrzeugen durch den zunehmenden Grad an integrierten Softwarekomponenten bis hin zu vollständigen Betriebssystemen auch die Gefahr, dass Schadsoftware in das Fahrzeug gelangt.

Neben dem Aufspüren von Schadsoftware, der Abwehr unberechtigter Zugriffe oder dem Erkennen von Manipulationen spielt auch die Protokollierung von Ereignissen eine maßgebliche Rolle für die Sicherheit. Durch die Protokollierung wird die Rückverfolgbarkeit von Sicherheitsverletzungen ermöglicht. Dies gilt sowohl für Angriffe im Sinne von Security- als auch für Fehlbedienungen im Sinne von Safety-Aspekten. So können die Ursachen von Sicherheitsverletzungen gefunden und beseitigt werden. Je nach Umfang der protokollierten Ereignisse können so auch Sicherheitsverletzungen aufgespürt werden, die bisher keine Berücksichtigung fanden und dem System daher unbekannt sind.

Bei Car-to-X-Kommunikation kann es – beispielsweise zur Klärung der Unfallursache für die Versicherungen – relevant sein, welche Car-to-X-Nachrichten ausgetauscht wurden und ob die Reaktion, die zum Unfall führte, durch eine fehlerhafte oder manipulierte Nachricht verursacht wurde. Um dem Datenschutz zu entsprechen, der einer **Protokollierung** entgegensteht, kann die Protokollierung unter Verwendung von Pseudonymen bei der Kommunikation auf mehrere Instanzen aufgeteilt werden, von denen mindestens eine das Vertrauen aller Teilnehmer genießt. In diesem Fall protokollieren die einzelnen Teilnehmer ihre Kommunikation nur unter Verwendung von Pseudonymen, die erst durch die vertrauenswürdige Instanz in nutzerbezogene Daten überführt werden können.

Dies bedeutet beispielsweise, dass in der Kommunikation zwischen Fahrzeugen empfangene Nachrichten für einen gewissen Zeitraum zusammen mit dem Pseudonym des Absenders gespeichert werden, die Verwendung der Pseudonyme jedoch von einer vertrauenswürdigen zentralen Instanz protokolliert wird. Kommt es zu einem Unfall, können die Protokolle der Unfallbeteiligten ausgewertet und mit den Informationen der zentralen Instanz abgeglichen werden und so die Pseudonyme in Teilnehmerdaten überführt werden.

4.1.4 Sicherheitsinfrastrukturen von Mobilitätsanwendungen

Klassische Sicherheitsinfrastrukturen wie Public Key Infrastrukturen (PKI) oder das Web of Trust (WoT) verwenden einige der im Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Verfahren um die Sicherheit innerhalb von Netzwerken mit unbekannten Teilnehmern zu gewährleisten. Während die PKI auf zentrale

Zertifizierungsinstanzen (Certification Authorities, CA) setzt, die für die Vertrauenswürdigkeit eines Teilnehmers bürgt, verzichtet das WoT auf eine zentrale Zertifizierungsinstanz. Stattdessen zertifizieren andere Teilnehmer, denen bereits vertraut wird, die öffentlichen Schlüssel neuer Teilnehmer, denen sie vertrauen und garantieren damit gegenüber Dritten die Vertrauenswürdigkeit der neuen Teilnehmer. Dieses Verfahren ist beispielsweise in der PGP-Software [SO13] implementiert.

Klassische Sicherheitsinfrastrukturen sind für vergleichsweise beständige Netzwerkstrukturen konzipiert. So kommen in großen Netzwerken im Vergleich zur Anzahl der vorhandenen Teilnehmer nur innerhalb eines bestimmten Zeitraumes wenige Teilnehmer hinzu oder verlassen das Netzwerk. Darüber hinaus ändert sich die Position der Teilnehmer im Netzwerk nur sehr selten.

Im Vergleich dazu stellt Car-to-X-Kommunikation neue Anforderungen an Public Key Infrastrukturen. So handelt es sich bei der Car-to-X-Kommunikation um ein Netzwerk mit hochdynamischer Topologie das sich immer wieder in neue Teilnetze unterteilt und in dem nicht zwischen allen Teilnehmern von Beginn an eine Vertrauensbeziehung besteht. Dies spielt sowohl für die Verteilung der Zertifikate/Public Keys als auch für den Schutz der Privatsphäre der Nutzer eine wesentliche Rolle.

So müssen zwischen ständig wechselnden Kommunikationspartnern Vertrauensbeziehungen etabliert werden, wofür immer wieder auf andere Zertifikate zurückgegriffen werden muss. Des Weiteren soll verhindert werden, dass anhand der Car-to-X-Kommunikation Bewegungsprofile des Fahrers erstellt und damit dessen Privatsphäre verletzt werden kann. Darüber hinaus muss trotz möglicher Verbindungsabbrüche der Zertifizierungsinstanz auch das Sperren von Zertifikaten innerhalb kurzer Zeiträume möglich sein. All dies stellt nicht zuletzt auch hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Public Key Infrastruktur. (vgl. [A17][A18])

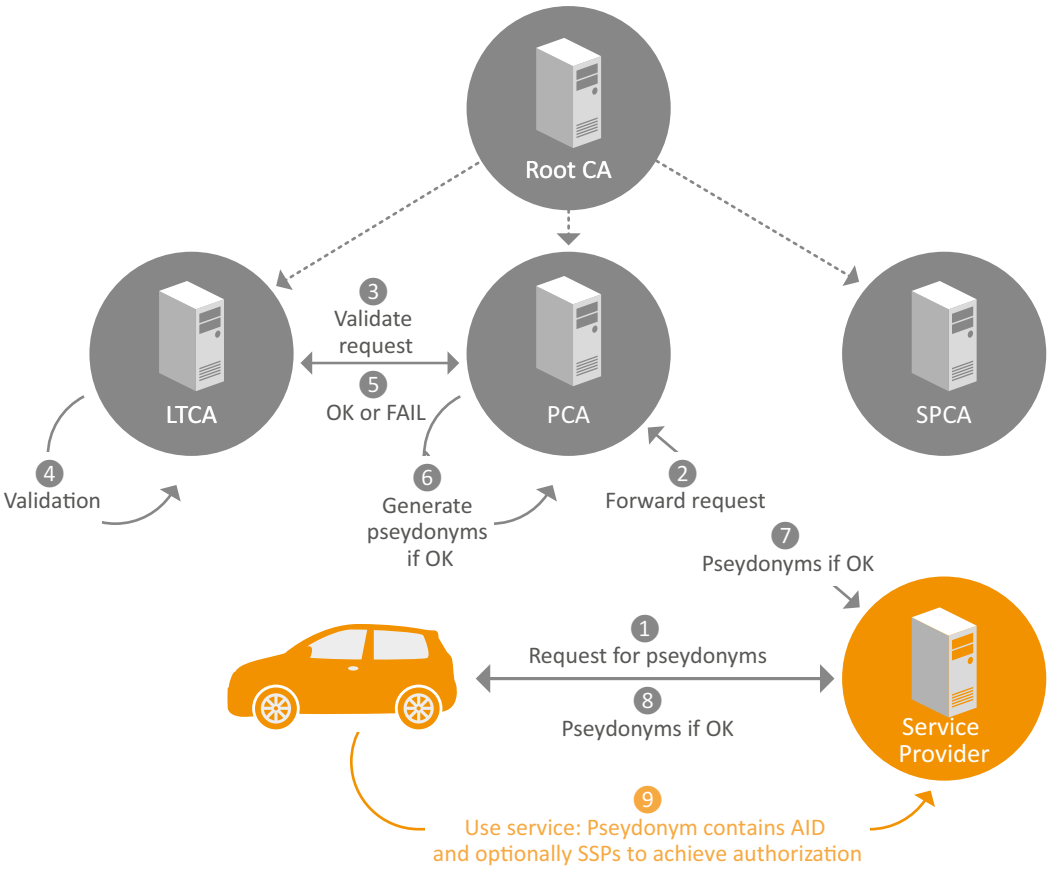


Abbildung 18: Public Key Infrastruktur für Car-to-X-Kommunikation [P6]

So verwenden Public Key Infrastrukturen wie die des Projektes CONVERGE [P6] (vgl. Abbildung 18) neben Long-Term-Zertifikaten (der LTCA) auch Pseudonyme mit eigenen kurzzeitig gültigen Zertifikaten (der PCA). In den Adressen des Protokollstacks und im Zertifikat wird ausschließlich das Pseudonym genutzt. Dies stellt sicher, dass bei der Car-to-X-Kommunikation während der Fahrt das Pseudonym und damit die Identität des Fahrzeuges als Kommunikationspartner geändert werden kann und somit eine digitale Verfolgung des Fahrzeuges durch andere Verkehrsteilnehmer verhindert wird. Die Zertifikate der untergeordneten Zertifizierungsinstanzen (Certification Authorities, CA) werden hier wiederum von der Root CA zertifiziert, was eine beispielsweise räumliche Aufteilung der Zuständigkeiten der Zertifizierungsinstanzen und damit eine Lastverteilung ermöglicht.

Aktuell werden Tests für PKI-Systeme durchgeführt, u. a. in der Pilot-PKI des C2C-CC [O3], bei denen die besonderen Aspekte der Car-to-X-Kommunikation berücksichtigt werden, u. a. aus den CONVERGE [P6], PRESERVE [P17] und simTD [P19] Projekten. In den USA befand sich bereits 2014 im Auftrag der US-Bundesbehörde für Straßen- und Fahrzeugsicherheit ein erweitertes PKI-System in der Entwicklung. Eine Kompatibilität der einzelnen Systeme ist nicht zuletzt aufgrund des internationalen Vertriebs zukünftiger Car-to-X-fähiger Fahrzeuge anzustreben.

4.2 Verfügbarkeit von Daten und Kommunikationsinfrastruktur

4.2.1 Einordnung und Begriffe

Dienste und Anwendungen, deren Grundlage die hochgradige Vernetzung von Systemen bilden, wie sie bei der Vernetzung von Fahrzeugen untereinander sowie mit der sie umgebenden Infrastruktur entstehen, sind in besonderem Maße abhängig von einer hohen Verfügbarkeit sowohl hinsichtlich der zu verarbeitenden Daten als auch in Bezug auf die für den Datenaustausch notwendige Kommunikationsinfrastruktur. Das Thema Verfügbarkeit ist eng mit den Themen Safety und Security verbunden und somit im Gesamtkontext von Sicherheit und Verfügbarkeit zu betrachten (vgl. Abschnitt 4.1). So können beispielsweise fehlende Sicherheitsstandards oder -maßnahmen beim Datenaustausch in vernetzten Systemen durchaus Auswirkungen auf die Stabilität und somit die Verfügbarkeit nicht nur von Einzelsystemen sondern auch von Teilen oder der Gesamtheit der Kommunikationsinfrastruktur haben. In diesem Abschnitt sollen jedoch weniger die Betrachtungen sicherheitsrelevanter Aspekte und deren Auswirkungen auf die Verfügbarkeit im Vordergrund stehen, sondern vielmehr grundsätzliche Anforderungen an die Verfügbarkeit und die sich daraus ergebenden Handlungsfelder aus denen dann Technologielücken identifiziert und die im Abschnitt 7 folgenden Handlungsempfehlungen abgeleitet werden sollen.

4.2.2 Verfügbarkeit im Kontext mobiler Kommunikationsnetze

Mechanismen und Strategien zur Erreichung einer möglichst hohen Verfügbarkeit und der damit verbundenen Zuverlässigkeit sind selbst bei kabelgebundenen Kommunikationsnetzen mitunter sehr komplex wobei in der Regel eine Vielzahl unterschiedlicher Maßnahmen zur Erreichung einer vorgeschriebenen Verfügbarkeitsklasse zum Einsatz kommen. Hochverfügbare Systeme wie sie beispielsweise von Anbietern von Webdiensten beworben werden, garantieren einen reibungslosen Betrieb mit einer sehr geringen Ausfallwahrscheinlichkeit innerhalb eines bestimmten Zeitraumes, beispielsweise über ein Jahr. Zu den möglichen Beeinträchtigungen, die zu einer Verringerung der Verfügbarkeit führen, müssen bei der Verwendung von drahtlosen Kommunikationstechnologien jedoch zusätzlich noch die allen Funktechnologien immanenten Unsicherheiten

bei der Datenübertragung mit berücksichtigt werden. Gründe, die zu einer teilweise wesentlich geringeren Verfügbarkeitswahrscheinlichkeit von drahtlosen Kommunikationsnetzen im Vergleich zu kabelgebundenen Netzwerken führen, sind die praktisch kaum erreichbare hundertprozentige Netzabdeckung, Verfälschungen von Funksignalen durch räumliche und bauliche Gegebenheiten oder Störungen des Übertragungskanals durch konkurrierende Sender oder breitbandige Störer.

4.2.3 Anforderungen an die Funktechnologien und Netzabdeckung

Mobilfunknetze der Generationen 2G, 3G und 4G stehen praktisch deutschlandweit flächendeckend zur Verfügung, wobei es noch kleinteilig fragmentierte Flächen ohne 3G (UMTS) und 4G (LTE bzw. LTE-A) Netzabdeckung gibt. Im Zusammenhang mit der Straßeninfrastruktur respektive den Straßenklassen lässt sich feststellen, dass in Gebieten mit einem Straßennetz niedriger Klassifizierung, wie beispielsweise Gemeindeverbindungsstraßen die Netzabdeckung – zumindest für die Netze der Mobilfunkgenerationen 3G und 3.5G – teilweise sehr lückenhaft ist, wohingegen ein vergleichsweiser guter Ausbau der Mobilfunknetze der Generationen bis 3.5G in großen Städten und entlang der Bundesautobahnen zu verzeichnen ist.

Neben dem flächenhaften Ausbau von Mobilfunknetzen zur Erhöhung der Verfügbarkeit sind weiterhin Mechanismen zu nennen, welche die Verfügbarkeit von drahtlosen Netzen erhöhen und die Datenübertragung robuster und zuverlässiger machen sollen. Ein typischer Mechanismus ist die MIMO-Technologie, wo mithilfe mehrerer Sende- und Empfangsantennen und entsprechender Kodierungsverfahren die Qualität von Datenübertragung deutlich erhöht werden kann. In bereits seit einiger Zeit erforschten Ansätzen, wie beispielsweise Cognitive Radio wird versucht, durch dynamische Konfiguration der Übertragungsparameter (dynamisches Spektrum Management) das vorhandene Frequenzspektrum bei der drahtlosen Kommunikation besser auszunutzen, indem freie Kapazitäten anderer lizenzierter Frequenzbänder für die Datenübertragung genutzt werden. Mit der Vergrößerung der verfügbaren Bandbreite wird damit letztlich auch die Verfügbarkeit des Netzes gerade bei der Kommunikation von mehreren konkurrierenden Teilnehmern innerhalb eines Frequenzspektrums erhöht.

4.2.4 Zeitliche Anforderungen

Wenn von Verfügbarkeit von Daten und Netzen die Rede ist, dann geht es häufig nicht nur um die grundsätzliche Bereitstellung von Daten, vielmehr sind hier auch zeitliche Aspekte ins Auge zu fassen. In diesem Zusammenhang ist das Thema der Echtzeitfähigkeit zu nennen, die gerade für sicherheitsrelevante Systeme eine herausragende Rolle spielt. Genaugenommen ist unter Echtzeitfähigkeit nicht die Übertragung von Daten in einer möglichst kurzen Zeit zu verstehen, vielmehr geht es hier um garantierte Antwortzeiten, die zuverlässige, vorhersehbare und berechenbare Datenkommunikation als Grundlage für Algorithmen, Dienste und Anwendungen ermöglichen. Drahtlose Kommunikationstechnologien für die Vernetzung von Fahrzeugen und ihrer Infrastruktur erfüllen heutzutage jedoch noch nicht die – zumindest bei sicherheitsrelevanten Anwendungen geforderten – Echtzeitforderungen im einstelligen Millisekunden-Bereich und können somit noch nicht im Bereich der sicherheitskritischen Systeme zur Anwendung kommen.

Relevanz erhalten die Anforderungen an die Echtzeitübertragung von Daten insbesondere auch dann, wenn im Zuge der Einführung von Virtualisierungstechnologien Daten und Dienste cloudbasiert zu Verfügung gestellt werden sollen um beispielsweise Entscheidungsalgorithmen für Sicherheitsanwendungen nicht mehr im Fahrzeug sondern zentral über cloudbasierte Dienste zur Verfügung zu stellen. Hierbei ist die Notwendigkeit einer absoluten Transparenz der zum Einsatz kommenden Dienste und Anwendungen festzustellen, unabhängig von der jeweils angewendeten

Übertragungstechnologie. Ideal ist es, wenn sich die Systemantwortzeit inklusive der Übertragungszeit der benötigten Daten bei Verwendung cloudbasierter Dienste gegenüber denen bei der fahrzeuginternen Kommunikation nicht unterscheidet. Es ist davon auszugehen, dass die aktuell eingesetzten Mobilfunkgenerationen – 3G (UMTS) und 4G (LTE und LTE-A), siehe Abschnitt 5.1.3 – keine Echtzeitkommunikation im Millisekunden-Bereich ermöglichen. Insbesondere spielt hierbei auch der längere Übertragungsweg vom Fahrzeug über die Cloud und wieder zurück zum Fahrzeug eine Rolle, der in der Summe die geforderten Übertragungs- und Antwortzeiten garantieren muss.

Kommunizieren hingegen Fahrzeuge direkt miteinander, entweder über ein Ad-hoc-Netz (Szenario „Koexistenz“) oder über 5G Mobilfunk (Szenario „Konvergenz“), spielen hinsichtlich Verfügbarkeit des Kommunikationssystems andere Aspekte eine Rolle. Im Szenario „Koexistenz“ sind der Übertragungsqualität durch die inhärenten Eigenschaften von mobilen, selbstorganisierenden und dezentralen Netzen Grenzen gesetzt. Im Szenario „Konvergenz“ ermöglicht das Management der Kommunikationsressourcen durch die Basisstation auch bei direkter Kommunikation zwischen Endgeräten eine zuverlässige und niedriglatente Datenübertragung.

4.2.5 Anforderungen nach Sicherheitsrelevanz der Daten

Vor dem Hintergrund der Anwendungsszenarien sind zunächst zwei unterschiedliche Anwendungsfelder für die Nutzung von Daten und damit einhergehend auch unterschiedliche Anforderungen an die Verfügbarkeit von Daten festzustellen: Es liegt auf der Hand, dass die Verfügbarkeit sicherheitskritischer Daten anderen Anforderungen genügen muss als die sicherheitsunkritischer Daten. Während erstere, zu denen beispielsweise Daten zu Gefahrenwarnungen, hochgenaue Kartendaten für das autonome bzw. automatisierte Fahren oder Positionsdaten gehören, ein hohes Maß an (vollständiger) Verfügbarkeit besitzen müssen, ist dies für Daten, welche nicht unmittelbar für die Sicherheit von Verkehrsteilnehmern relevant sind, wie beispielsweise Daten für das Infotainment, von untergeordneter Bedeutung.

Die Sicherstellung der vorrangigen Übertragung sicherheitskritischer Daten vor der Übertragung sicherheitsunkritischer Daten kann beispielsweise mithilfe entsprechender Priorisierungsmechanismen realisiert werden. Eine Möglichkeit bietet hier die Priorisierung von Datenpaketen mithilfe festgelegter Prioritätsklassen, wie es beispielsweise bei Voice-over-IP zur vorrangigen Übertragung von Sprachpaketen gegenüber anderen Daten angewendet wird. Voraussetzung dafür ist die Einigung auf gemeinsam verwendete Prioritätsklassen und die einheitliche Implementierung der entsprechenden Priorisierungsmechanismen über alle an der Kommunikation beteiligten Netze, Systeme und Provider hinweg. Die Priorisierung von sicherheitsrelevanten Daten ist darüber hinaus auch nur sinnvoll, wenn der Anteil dieser Datenklassen am Gesamtdatenaufkommen verhältnismäßig gering und die Bandbreite des Übertragungsnetzes ausreichend dimensioniert ist. Eine andere Möglichkeit der Priorisierung besteht in der getrennten Übertragung sicherheitskritischer und sicherheitsunkritischer Daten auf unterschiedlichen Übertragungswegen. Voraussetzung dafür ist jedoch die Bereitstellung getrennter, voneinander unabhängiger Übertragungskanäle und die konsequente Nutzung dieser Kanäle nur für die dafür vorgesehenen Datenklassen. Die Spezifikation des WLAN Standards IEEE 802.11 [N9] sieht für die Fahrzeugkommunikation beispielsweise mehrere Kanäle für die Übertragung sicherheitskritischer Daten im 5.9 GHz-Frequenzband vor und stellt Mechanismen zur Priorisierung von Daten zur Verfügung.

Eine weitere Unterteilung hinsichtlich der Verfügbarkeit sicherheitsrelevanter Daten kann in Bezug auf Verfügbarkeit im Sinne des „Vorhandenseins“, also der unbedingten Zugriffsmöglichkeit auf bestimmte Daten sowie auf Verfügbarkeit im Sinne einer fehlerfreien, stabilen Datenübertragung getroffen werden. Die Möglichkeit, beispielsweise jederzeit auf hochgenaue Kartendaten

zugreifen zu können, ist insbesondere bei der Verwendung des „Konvergenz“-Szenarios von großer Wichtigkeit. Bei der Verfügbarkeit von Daten zu Gefahrenmeldungen, beispielsweise bei einer plötzlichen Vollbremsung des Vorgängerfahrzeuges, wiederum spielt die fehlerfreie Datenübertragung zu allen betreffenden Fahrzeugen innerhalb eines geographischen Gebietes eine große Rolle.

Ein Ansatz, welcher die Vorteile eines zentralen, cloudbasierten Systems mit denen von dezentralen, eng gekoppelten Systemen miteinander verbindet, wird unter dem Begriff der Edge-Cloud zusammengefasst. Hierbei kommen mehrere, verteilte Cloud-Systeme zum Einsatz, wobei der Zugriff auf die entsprechenden Daten vom Fahrzeug aus auf die regional am nächsten befindliche Cloud erfolgt, was zu einer deutlichen Verkürzung von Übertragungs- und Antwortzeiten führen sollte. In Betracht gezogen muss hingegen jedoch die zusätzliche Synchronisierung der einzelnen Cloud-Systeme untereinander.

4.3 Technologielücken und Entwicklungspotentiale

Sowohl dem Problem der IT-Sicherheit als Antwort auf die Angriffsszenarien als auch den Anforderungen an Kommunikationsinfrastruktur und Daten hinsichtlich der Verfügbarkeit kann mithilfe der derzeit verwendeten bzw. zur Verfügung stehenden Technologien nicht vollumfänglich begegnet werden.

In Bezug auf die IT-Sicherheit werden insbesondere Technologielücken im Bereich Public Key-Infrastrukturen und Zertifikatsverwaltung gesehen. Hier sind die Randbedingungen im Bereich der Vernetzten Mobilität andere als in Netzen mit fester Struktur und bekannten Netzwerkteilnehmern. Insbesondere ist der Dynamik ständig wechselnder Kommunikationsteilnehmer, die zudem teilweise nur einmalig Daten miteinander austauschen, in Bezug auf die Zertifikatsverwaltung Rechnung zu tragen. Gegebenenfalls sind auch alternative Ansätze wie die des Web-of-Trust für den sicheren Datenaustausch in mobilen Netzen auf ihre Anwendbarkeit bzw. Adaptierbarkeit hin zu überprüfen.

Ein weiterer Punkt im Zusammenhang mit dem zertifikatsbasierten Datenaustausch betrifft die notwendige Pseudonymisierung zur Verhinderung der Zurückverfolgbarkeit aufgrund gesendeter Standortdaten bei der Car-to-X-Kommunikation. Die Ersetzung personengebundener Daten durch Pseudonyme verhindert zunächst zwar die Möglichkeit, von Daten auf real existierende Personen zu schließen, bietet jedoch keinen Schutz vor dem Aufzeichnen von Standortinformationen und der nachfolgenden Erzeugung von Streckenverläufen. Mit der nachträglichen Zuordnung von realen Fahrzeugen zu diesen Informationen wird jedoch eine Zurückverfolgbarkeit wieder möglich, was das Angriffspotential, beispielsweise für kriminelle Delikte, wie Fahrzeugdiebstahl deutlich erhöhen würde. Schutz gegen diese Angriffsszenarien bietet hier nur ein ständiger Pseudonymwechsel, welcher zumindest gegen das Aufzeichnen von Standortinformationen durch Abhören einen Schutz bietet. Auf der anderen Seite ist ein ständiger Wechsel von Pseudonymen auch mit dem Wechsel der damit verbundenen Zertifikate verbunden. Hier ist ein sinnvoller Kompromiss zwischen dem Wechselzeitintervall und dem anzustrebendem Grad an Anonymität zu finden. Es ist weiterhin zu bedenken, dass für bestimmte Anwendungen die Beibehaltung der Identität eines Kommunikationsteilnehmers über einen bestimmten Zeitraum sogar erforderlich ist. Für diesen Fall sind dann entsprechende Methoden und Verfahren zu implementieren, die beispielsweise für einen kurzen Zeitraum die Sperrung des Pseudonymwechsels erlauben.

Den Sicherheitsrisiken, die durch einen Ausfall von Sensoren oder die Manipulation von Sensordaten entstehen, sollte mit entsprechenden Plausibilitätschecks, beispielsweise mithilfe von Sensordatenfusion begegnet werden. Generell ist es erforderlich, für kritische Funktionen sichere

Zustände zu definieren, um insbesondere im „Konvergenz“-Szenario elementare sicherheitsrelevante Funktionen nicht vollständig von einem System oder einer Systemkomponente abhängig zu machen. Die Entstehung sogenannter Single Points of Failure ist somit zumindest für den Bereich Sicherheit unbedingt zu vermeiden.

Die Manipulation von Signallaufzeiten und -reichweiten mit dem Ziel, die Übertragungszeit oder Kommunikationsreichweite von Informationen bewusst zu verlängern, ist insofern schwer zu detektieren als dass der Informationsinhalt der übertragenen Daten nicht verändert wurde. Neben den bekannten Verfahren zur Abwehr solcher mittels Replay- bzw. Man-in-the-Middle-Attacken durchführbaren Angriffe sind weitere Verfahren zur Verifizierung von Zeitstempeln und Signallaufzeiten zu entwickeln und anzuwenden.

Ein weiteres Problem ist die Störung durch schmal- und breitbandige Störer, die unbeabsichtigt, beispielsweise durch elektromagnetische Strahlung emittierende Elektrogeräte, oder aber auch durch absichtliche Störer erfolgt. Während man schmalbandige Störungen noch durch dynamischen Wechsel des Übertragungskanals begegnen kann, ist dies bei breitbandigen Störern kaum möglich.

Aufgrund der zunehmenden Komplexität der Systeme durch die mobile Vernetzung und durch die daraus folgende Erhöhung der Abhängigkeiten und gegenseitigen Beeinflussung der beteiligten Systemkomponenten wird sich auch die Anzahl möglicher Fehlerquellen und -szenarien erhöhen. Um die für Sicherheit und Zuverlässigkeit notwendige fehlerfreie Funktionalität von Hard- und Softwarekomponenten sicherzustellen, werden systematische, automatisierte und modellgestützte Testverfahren unverzichtbar. Diese Tests sollten beginnend bei der Konzipierung neuer Anwendungen, während des gesamten Entwicklungszyklus, aber auch für bereits im Betrieb befindliche Systeme begleitend durchgeführt werden. Die Durchführung der Tests wird durch die frühzeitige Einplanung und Implementierung entsprechender Schnittstellen wesentlich erleichtert.

In Bezug auf die Verfügbarkeit von Kommunikationsnetzen und Daten im Kontext mobiler Netze spielt in erster Linie der flächendeckende Ausbau der Mobilfunknetze, insbesondere der Generationen 4G und 5G, eine Rolle. Bestehende Technologielücken sind hauptsächlich für den Anwendungsbereich Echtzeitdatenübertragung auszumachen. Während Car-to-X-Anwendungen mit Echtzeitforderungen mithilfe der WLAN-Technologie für Fahrzeugkommunikation (IEEE 802.11 OCB bzw. ITS-G5, siehe Abschnitt 5.1.2) bereits heute schon realisiert werden können, ist dies mit dem gegenwärtigen Mobilfunkstandard der 3. bzw. 4. Generation (3G und 4G) noch nicht möglich. Mobilfunksysteme, die den Anforderungen nach Echtzeitdatenübertragung im Millisekunden-Bereich genügen, werden erst in der Generation 5G zu finden sein.

Die Erhöhung der Zuverlässigkeit durch die Schaffung von Resilienz ist ein weiterer wichtiger Schritt hin zur Erreichung einer hohen Verfügbarkeit. Möglich wird dies durch die Verwendung mehrerer paralleler Kanäle gleicher oder unterschiedlicher Kommunikationstechnologien – je nach Verfügbarkeit – für die Übertragung von Daten ein und derselben Anwendung.

Der drastische Anstieg von Kommunikationsteilnehmern durch die zu erwartende zunehmende Vernetzung von Fahrzeugen sowie der Anstieg der zu übertragenden Datenvolumina führt weiterhin zu einer zunehmenden Auslastung von Bandbreiten konkreter drahtloser Kommunikationstechnologien. Cognitive Radio bietet hier eine Möglichkeit, die Situation zu entschärfen, indem verfügbare Bandbreite aus anderen Frequenzbändern für die Übertragung von Daten genutzt wird. In der Regel betrifft das lizenzierte Frequenzbänder von Diensten, die nicht ausreichend ausgelastet sind, und deren Ressourcen für sogenannte Sekundärnutzer zur Verfügung gestellt werden können. Abgesehen von der Klärung rechtlicher und organisatorischer Fragestellungen sind hier jedoch auch zuverlässige technische Lösungen hinsichtlich der Zugriffskontrolle und der Zuteilung verfügbarer Bandbreite für die Nutzung durch Sekundärnutzer zu schaffen.

5. Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen

Ziel dieses Abschnitts ist es, Aussagen über zukünftige Entwicklungen der Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen zu treffen. Dabei werden sowohl Aspekte berücksichtigt, die szenarioübergreifend als auch spezifisch für die beiden Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ sind. Ausgehend vom Stand der Technik wird die technologische Leistungsfähigkeit der wichtigsten Kommunikationstechnologien umfassend untersucht und es werden neue Anforderungen, die sich aus den Technologietrends Virtualisierung und Cloud-Computing, Big Data und Automatisierung ergeben, analysiert. Basierend darauf werden Hemmnisse und Handlungsfelder für Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen abgeleitet.

5.1 Stand der Technik

5.1.1 Überblick

Die Vielzahl von Use Cases im Mobilitätssektor stellt sehr unterschiedliche Anforderungen an die Kommunikationstechnologie. Sie umfassen sowohl **funktionale als auch qualitative Anforderungen** an die Datenübertragung. Typische funktionale Anforderungen betreffen die Richtung der Kommunikation (uni- oder bidirektional), die Verteilung von Informationen in geografischen Gebieten, die Möglichkeit der direkten Kommunikation, die Einbeziehung der Kommunikationsinfrastruktur (Basisstationen, Zugangsnetzwerke) und Datensicherheit. Wichtige qualitative Anforderungen sind Kommunikationsreichweite, Datenrate, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit sowie Latenz.

In Abschnitt 3 wurden die Use Cases neben den Basisfunktionen in drei Kategorien eingeteilt: Sicherheit, Nachhaltigkeit und Komfort. Viele Use Cases in der Kategorie Sicherheit erfordern eine lokale Kommunikation in ihrer unmittelbaren Umgebung bei sehr hoher Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit sowie geringe Kommunikationslatenz. Use Cases der Kategorie Nachhaltigkeit haben meist ähnliche Anforderungen wie in der Kategorie Sicherheit, benötigen aber auch Konnektivität zu Verkehrsmanagementzentralen (VMZs, z. B. für Smart Traffic-Anwendungen). Use Cases der Kategorie Komfort benötigen permanente Internet-Konnektivität, in manchen Use Cases mit sehr hohen Datenraten.

Während die Use Cases die Anforderungen an die Kommunikationstechnologien bestimmen, haben die Technologien inhärente, charakteristische Eigenschaften, die für manche Use Cases besonders günstig sind, andere Use Cases jedoch einschränken. Zur Zeit gibt es keine Kommunikationstechnologie, welche alle Anforderungen sämtlicher Use Cases gleichermaßen erfüllen kann. Aus diesem Grund sind derzeit im Mobilitätssektor **mehrere komplementäre Technologien vorgesehen, deren Eigenschaften sich ergänzen**. Bei einigen Use Cases ergeben sich mehrere Realisierungsoptionen, bei der die Funktionalität des Use Case mit unterschiedlichen Technologien realisiert werden kann.

Sofern Anwendungen an eine bestimmte Kommunikationstechnologie gebunden sind, ergeben sich daraus koexistierende Netze, bei denen Endgeräte bzw. Nutzer mit mehreren Technologien ausgestattet sein können. Solche koexistierenden Netze können unterschiedliche Integrationsgrade aufweisen – die Optionen reichen von isolierten Netzen, über Netzstrukturen, die mit Gateways miteinander verbunden sind, bis hin zu vollintegrierten Netzen mit heterogenen Kommunikationstechnologien. Die Heterogenität der Kommunikationstechnologien bietet dabei einerseits eine Redundanz zur Verbesserung der Zuverlässigkeit bei Ausfall einer Technologie, andererseits kann sie auch zu Ineffizienzen führen.

Die wichtigsten Kommunikationstechnologien im Mobilitätssektor sind WLAN, Mobilfunk und (digitaler) Broadcast, hier auch primäre Kommunikationstechnologien genannt. Diese werden im Folgenden näher dargestellt und verglichen sowie mit einer kurzen Übersicht der weiteren, sekundären **Kommunikationstechnologien** ergänzt (Abbildung 19).

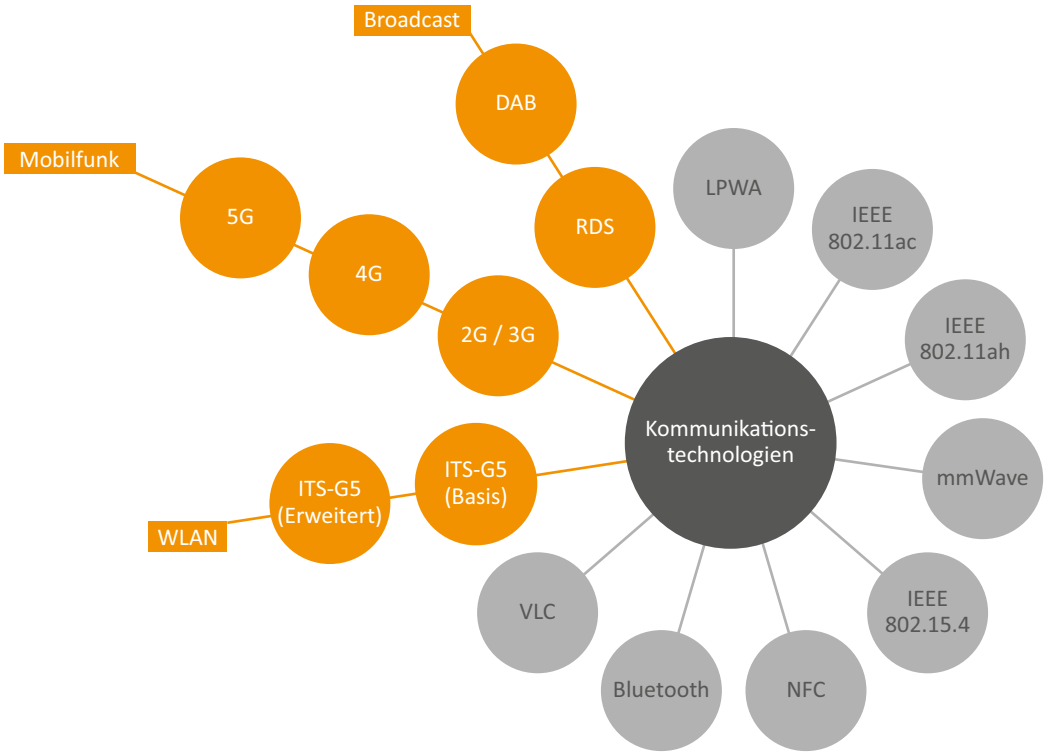


Abbildung 19: Übersicht drahtloser Kommunikationstechnologien für Mobilitätsanwendungen: Primäre (orange) und sekundäre (grau) Kommunikationstechnologien

5.1.2 WLAN

WLAN (Wireless Local Area Network) ist eine Familie von Kommunikationstechnologien basierend auf dem IEEE 802.11 Standard [N9], die eine physikalische Übertragung und das Medienzugriffsverfahren in unlizenzierten Frequenzbändern, unter anderem im ISM-Band, definiert. Seit der Veröffentlichung des initialen WLAN-Standards IEEE 802.11 im Jahr 1997 hat die Technologie eine starke Verbreitung gefunden und wurde um bessere Modulationsverfahren (IEEE 802.11g im 2,4 GHz-Frequenzband und IEEE 802.11a im 5 GHz-Frequenzband) sowie um Mehrantennentechniken (MIMO – Multiple Input Multiple Output) (IEEE 802.11n) erweitert. Weitere Steigerungen der Datenrate in den Gbps-Bereich werden durch Kanalbündelung und bessere Modulationsverfahren (IEEE 802.11ac) sowie durch Nutzung des 60 GHz-Frequenzbands (IEEE 802.11ad) erreicht.

Für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen wurde eine spezielle WLAN-Erweiterung geschaffen und eine erste Version des Standards im Jahr 2006 verabschiedet. Diese Erweiterung definiert einen neuen Kommunikationsmodus – Outside the Context of a BSS (OCB) –, mit dem Fahrzeuge **direkt** miteinander kommunizieren können, ohne vorherige Registrierungsprozeduren durchführen zu müssen. Vom IEEE 802.11a-Standard wurde das Übertragungsverfahren OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) übernommen, ein gegenüber Interferenzen und Fading

robustes Mehrträger-Übertragungsverfahren. Durch Änderung der Parametrisierung im Vergleich zu IEEE 802.11a kann das Übertragungsverfahren die potentiell stärkeren Interferenzen, die aus der Geschwindigkeit der Fahrzeuge und dem Doppler-Effekt resultieren, größtenteils kompensieren. Als Medienzugriffsverfahren nutzt der OCB-Modus die verbreitete EDCA-Variante des IEEE 802.11-Standards mit dem CSMA/CA-Medienzugriffsverfahren und mehrere Zugangskategorien zur Priorisierung von Datenverkehr.

Die spezielle WLAN-Variante für Fahrzeugkommunikation wurde zunächst als **Erweiterung des IEEE 802.11-Standards** definiert und ist unter der geläufigen Bezeichnung IEEE 802.11p bekannt. Inzwischen wurde die „p"-Erweiterung in den aktuellen IEEE 802.11-Standard, Version 2012, integriert und die europäische Variante ITS-G5 definiert (ETSI EN 302 663). Das physikalische Übertragungs- und Medienzugriffsverfahren dient als Basis eines Systems für Fahrzeugkommunikation, das den gesamten Protokollstack abdeckt. Die Entwicklungen in den USA und Europa haben dabei zu unterschiedlichen Protokollstacks geführt, und zwar zu Dedicated Short Range Communications (DSRC) in den USA [A6] und Cooperative ITS (C-ITS) in Europa [A3].

IEEE 802.11 OCB hat eine Reihe vorteilhafter Eigenschaften für die Fahrzeugkommunikation. Wegen der direkten Kommunikation kann es ohne die Abdeckung eines Infrastrukturnetzwerks als **vollständig verteiltes Kommunikationssystem** arbeiten. Im Gegensatz zu den anderen WLAN-Standards, die erst ein Netzwerk (BSS = Basic Service Set) etablieren müssen, kann eine Kommunikation sofort stattfinden, ohne vorherigen Austausch von Steuerungsinformationen. Road Side Units (RSUs) können genutzt werden, um die Kommunikationsreichweite zu vergrößern, insbesondere an Orten ohne direkte Sichtverbindung, wie zum Beispiel an urbanen Kreuzungen.

Eine der größten Herausforderungen bei der Nutzung der WLAN-Technologie für Fahrzeugkommunikation ist, dass durch die Nutzung von CSMA/CA **bei hoher Last der Datendurchsatz sinkt und die Latenz steigt**. Um eine hohe Last zu vermeiden und trotzdem einen fairen Zugriff von allen Nutzern zu ermöglichen, wird eine Überlastkontrolle (DCC = Decentralized Congestion Control) eingeführt, die aber wiederum die Kommunikationslatenz erhöht. Ein weiterer Aspekt betrifft den „Listen before talk"-Mechanismus, der eine Grundvoraussetzung von CSMA/CA ist: In manchen, sogenannten „Hidden node"-Szenarien können Stationen nicht erkennen, ob eine Übertragung bereits stattfindet. Schlussendlich werden relativ einfache Übertragungstechniken genutzt, die eine **Implementierung mit geringer Komplexität** ermöglichen; so wird beispielsweise keine linkspezifische Adaption der Datenrate durch Modulation, Kanalkodierung oder Sendeleistungsteuerung genutzt, wie sie u. a. im Mobilfunk angewendet wird.

5.1.3 Mobilfunk

Mobilfunk, oder genauer öffentlicher terrestrischer Mobilfunk (Public Land Mobile Network = PLMN), bezeichnet Kommunikationssysteme, die es Endgeräten – im Gegensatz zum Festnetz – ermöglichen mobil zu sein. Die erste und zweite Generation des Mobilfunks (1G und 2G), die heute als historisch anzusehen sind, wurden hauptsächlich für die verbindungsorientierte analoge bzw. digitale Sprachübertragung und für die Übertragung von Textnachrichten genutzt. Die dritte Generation (3G) führte den mobilen Internetzugang mit – zu diesem Zeitpunkt – hohen Datenraten ein und ermöglichte die Übertragung von Multimediadaten, wobei die vierte, heute aktuelle Mobilfunkgeneration (4G) die Datenrate für hochauflösende Multimediadaten nochmals erhöhte (Abbildung 20).

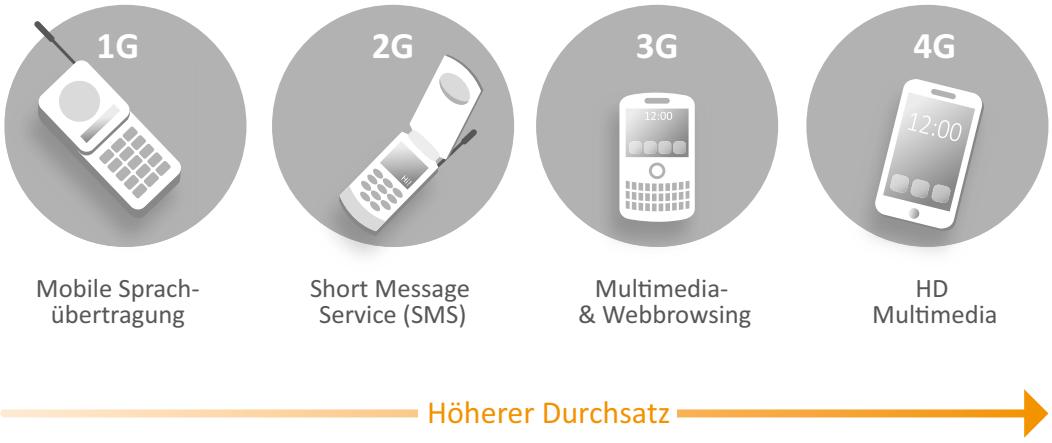


Abbildung 20: Höherer Durchsatz als Hauptziel bisheriger Mobilfunkgenerationen

Mobilfunksysteme werden von 3GPP [O2], einer Assoziation von verschiedenen Telekommunikationsorganisationen, im Rahmen von Anforderungen der ITU-T [O11] definiert und kontinuierlich weiterentwickelt. Die Einführung von UMTS als 3G-Mobilfunksystem vor über 10 Jahren stellte einen Meilenstein in der Entwicklung des Mobilfunks dar und ermöglicht in ihrer letzten Erweiterung (HSPA+) eine theoretische maximale Datenrate von bis zu 168 Mbps im Downlink und 22 Mbps im Uplink durch MIMO-Übertragung und bessere Modulationsverfahren; die in der Praxis erreichbaren Werte liegen meist darunter (beispielsweise 42 bzw. 5 Mbps).

Die Weiterentwicklung von UMTS zu 4G-Netzwerken wird als **UMTS Long Term Evolution (LTE) bzw. LTE Advanced (LTE-A)** bezeichnet. LTE erreicht Spitzendatenraten von mehr als 100 Mbps[1] im Downlink und 50 Mbps im Uplink bei einem 3- bis 4-fach höheren durchschnittlichen Nutzerdatendurchsatz im Vergleich zu UMTS. Die Latenz der Datenübertragung zwischen dem Endgerät und dem Zugangsnetzwerk beträgt mehrere 10 ms (Latenz in der User Plane, in der Control Plane typischerweise 100 ms). LTE-A steigert die Key Performance Indicators (KPI) durch zusätzliche Techniken, wie Inter-Cell Interference Coordination (ICIC), Bandbreitenskalierung, erweiterte MIMO-Übertragung, flexible Spektrumnutzung und Carrier-Aggregierung zur Nutzung eines fragmentierten Spektrums.

Die Verteilung von Multimediainhalten über Mobilfunk erfolgt meist über das IP Multimedia Subsystem (IMS) Framework. Zur Verteilung von Daten per Multicast oder Broadcast über Mobilfunknetze wurde Multimedia Broadcast Multicast Services (MBMS) und die erweiterte Version für LTE, enhanced MBMS (eMBMS), in die 3GPP-Spezifikationen integriert. Im Vergleich zur Punkt-zu-Punkt Übertragung per IP Unicast erlaubt MBMS Daten an eine Gruppe von Endgeräten zu übertragen [S18]. Dabei stellt die geringe Verbreitung von IPv6, das für skalierbare Systeme als notwendig angesehen wird, eine Einschränkung dar.

Einer der wesentlichen Vorteile von Mobilfunk im Vergleich zu WLAN ist die weite **räumliche** Abdeckung durch Basisstationen und die dazugehörigen Zugangs- und Kernnetze. Obwohl das physikalische Übertragungsverfahren hinsichtlich der Robustheit ähnlich zu WLAN IEEE 802.11 OCB/ITS-G5 ist – beide benutzen OFDM – funktionieren Mobilfunknetze grundsätzlich anders: Im Mobilfunk weist die **Basisstation den Endgeräten die Kommunikationsressourcen** zu („scheduled transmission"), so dass Paketkollisionen und Interferenzen auf dem drahtlosen Kanal minimiert

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

werden. Damit ist das Netzwerk in der Lage, unterschiedlichen Anwendungen Kommunikationsressourcen nach ihren Anforderungen und ihrer Priorität zur Verfügung zu stellen und somit Dienstqualitäten zu garantieren.

Das Design von Mobilfunknetzen impliziert eine Reihe von Eigenschaften, die ihre Nutzung für Mobilitätsanwendungen einschränken können:

- Ein Datenaustausch zwischen zwei Endgeräten erfolgt immer über die **Kommunikationsinfrastruktur.** Sogar wenn zwei Endgeräte in einer Zelle miteinander kommunizieren, wird das Datenpaket über das Zugangs- und Kernnetze übertragen. Im Vergleich zu direkter Datenübertragung zwischen Endgeräten, wie im IEEE 802.11 OCB Modus, werden so Kommunikationsressourcen ineffizient verwendet und die Latenz vergrößert. Darüber hinaus stellt die Basisstation eine Komponente dar, die zu einem Kommunikationsausfall führen kann („Single-point of failure“).

- Trotz der starken Verbreitung von Mobilfunknetzen und deren weiter räumlicher Abdeckung ist davon auszugehen, dass **eine 100 %ige Abdeckung nicht erreicht werden kann** und damit an sicherheitskritischen Orten (z. B. Tunneln) kein Datenaustausch möglich ist.

- Es ist erforderlich, dass ein Endgerät **immer im Mobilfunknetzwerk registriert** ist. Die initialen Registrierungsprozeduren sind aufwändig und umfassen den Austausch von mehreren Steuerungsnachrichten im Up- bzw. Downlink. Sie erfüllen somit nicht die Anforderungen an einen schnellen Datenaustausch ohne Verzögerung durch langwierige Signalisierungsprozeduren. Ein registriertes Endgerät muss seine Registrierung regelmäßig erneuern bzw. bei Zellwechsel Handover-Prozeduren ausführen. Weiterhin verursacht die Anforderung von Kommunikationsressourcen eine zusätzliche Verzögerung bei der Kommunikation.

- Da bisherige Mobilfunknetze für die Übertragung von hohen Datenraten („Mobile Broadband“) optimiert wurden, kann die **Übertragung von sehr wenigen Datenmengen ineffizient** sein. Insbesondere wenn Datenpakete geringer Größe selten übertragen werden, sind die existierenden Verfahren zur Kanalkodierung, die Granularität der Kommunikationsressourcen sowie die Aufwände für den Austausch von Steuerungsinformationen und Kanalschätzung suboptimal.

- Das I**MS-Framework** zur Übertragung von Multimedia-Daten ist nur eingeschränkt für die Verbreitung von Mobilitätsdaten geeignet. **MBMS/eMBMS** wurde primär für die Punkt-zu-Mehrpunkt Übertragung von Video und Digitalem Fernsehen („Mobile TV“) entwickelt, in LTE standardisiert und findet zunehmend Verbreitung in LTE-Netzen. Für die Verteilung von Mobilitätsdaten in einer geografischen Region muss die Skalierbarkeit und Latenz noch verbessert werden [A8].

- Zur Nutzung des Netzwerks von verschiedenen Mobilfunkbetreibern wird Roaming mit den dazugehörigen Prozeduren für Authentisierung, Autorisierung und Verrechnung eingesetzt. Im Kontext von Mobilitätsanwendungen, zum Beispiel bei der Kommunikation zwischen Fahrzeugen, kann es zu Situationen kommen, in denen die kommunizierenden Fahrzeuge in Netzen unterschiedlicher Betreiber registriert sind. Für Kommunikation zwischen Geräten (Machine-to-Machine Communication) sind **Roaming-Prozeduren hinderlich**.

Mobilfunk wird bereits für eine Vielzahl von Mobilitätsanwendungen eingesetzt, die alle Anwendungsfelder (Sicherheit, Nachhaltigkeit und Komfort) umfassen [S11].

5.1.4 Broadcast

Als Broadcast, eigentlich digitaler Broadcast, wird im Rahmen dieser Studie **Digital Audio Broadcasting (DAB)** verstanden. DAB ist eine Kommunikationstechnologie zur Übertragung von terrestrischen Hörfunkprogrammen in digitaler Form mit zusätzlichen Datendiensten. Im weiteren Sinne bezeichnet es eine Familie von DAB-Technologien, unter anderem DAB, DAB+, Digital Multimedia Broadcasting (DMB) und DAB-IP [A7].

Die Entwicklung und Verbreitung der DAB-Technologie wird vom World DMB Forum [O17], einer Assoziation von Rundfunkveranstaltern, Endgeräteherstellern und Netzbetreibern sowie nationalen Dachorganisationen koordiniert. DAB wurde Anfang der 80er Jahre entwickelt und Mitte der 90er Jahre eingeführt. Eine wichtige Erweiterung der DAB-Basistechnologie erfolgte im Jahr 2007: DAB+ ermöglicht eine Übertragung mit stärkerem Fehlerschutz und effizienterem Audio-Codec, der die gleiche Übertragungsqualität mit niedrigeren Bitraten garantiert.

Die digitale Übertragung von Verkehrsinformationen mit Broadcast-Systemen erfolgt typischerweise mit dem **TPEG-Protokoll**. TPEG (Transport Protocol Experts Group) wurde von der TISA (Traveller Information Services Association) [O16] spezifiziert und von der ISO standardisiert [N11] [N12]. Es definiert Nachrichtenformate für multimodale Verkehrs- und Reiseinformationen. Im Vergleich zum Nachrichtenformat der vorhergehenden Generation, basierend auf dem Traffic Message Channel (TMC) des Radio Data Systems (RDS) [A9] im UKW-Rundfunk, ist TPEG wesentlich umfangreicher, modular aufgebaut und umfasst Straßenverkehrsnachrichten, ÖPNV-Nachrichten, Parkinformationen, Informationen zu Points-of-Interest (POI), Verkehrsflüssen sowie Verkehrsvorhersagen. TPEG ist grundsätzlich unabhängig von der Kommunikationstechnologie und kann auch über IP-basierte Netze, beispielsweise über Mobilfunk übertragen werden. Für die Ausstrahlung von DAB wurden vier Frequenzbereiche (Modi) festgelegt. Landesweit erfolgt die Übertragung im Band III bzw. VHF (174 – 240 MHz), wobei lokale Angebote, beispielsweise im städtischen Bereich, auch gesondert übertragen werden können. In Deutschland wird erwartet, dass bis Ende 2016 92 % der Gesamtfläche und 98 % der Bundesautobahnen für den mobilen Empfang von DAB abgedeckt sein werden [SO3].

Bei der DAB-Übertragung werden mehrere Datenströme (Audiokanäle/Programme sowie Datendienste) zu einem sogenannten Ensemble mit hoher Datenrate zusammengeführt. Der entstehende **Datenmultiplex** wird mit dem OFDM-Verfahren übertragen, was Robustheit gegenüber Interferenzen und Fading garantiert. Bei Datendiensten ist im Kontext von Mobilitätsanwendungen das Transparent Data Channel (TDC)-Protokoll relevant, das die Übertragung von Verkehrsinformationen ermöglicht. Während die Zusammensetzung eines DAB-Multiplexes flexibel konfiguriert werden kann, ist die Übertragungsrate für Datendienste relativ gering; ein typischer Konfigurationswert ist 16 kbps. Im Vergleich zur Übertragung mit TMC ist diese Übertragungsrate eine starke Verbesserung, jedoch wesentlich geringer als bei WLAN und Mobilfunk. Eine wichtige Eigenschaft von DAB für die Datenkommunikation ist die Kommunikationsrichtung; im Gegensatz zu WLAN und Mobilfunk bietet DAB grundsätzlich **keinen Rückkanal**. Trotz dieser wesentlichen Einschränkungen hat Broadcast eine Reihe von Vorteilen:

- **Robustheit der Datenübertragung,** u. a. durch robuste physikalische Übertragung und exklusive Nutzung der Kommunikationsressourcen – im Gegensatz zu WLAN und Mobilfunk, bei denen die Ressourcen von potentiell vielen Nutzern geteilt werden.
- **Anzahl der Endgeräte bzw. Nutzer im Kommunikationssystem spielt keine Rolle** – Probleme der Skalierbarkeit (Mobilfunk) oder der Überlastkontrolle (WLAN) gibt es bei Broadcast nicht. Deshalb kann die DAB-Übertragung bei einer sehr großen Anzahl von Endgeräten effizienter und kostengünstiger als Mobilfunk sein.

- **Einheitliche Datenbasis** durch zentralisierte Datenhaltung; den Fahrzeugen stehen damit die gleichen Verkehrsnachrichten zur Verfügung.
- **Sehr große Abdeckung.**
- **Hohe Ausfallsicherheit**, insbesondere in Katastrophenszenarien.
- DAB ist **kostenlos** empfangbar; derzeit gilt dies auch für TPEG. Ob diese Datendienste in Zukunft verschlüsselt und damit kostenpflichtig werden, ist derzeit ungeklärt.

Endgeräte für den DAB-Empfang sind nicht notwendigerweise Radioempfänger. Beispielsweise sind manche Navigationsgeräte mit DAB-Empfängern ausgestattet, welche nicht die Rundfunkprogramme decodieren, sondern nur die Datendienste.

5.1.5 Vergleich der primären Kommunikationstechnologien für Mobilitätsanwendungen

Die relevanten Eigenschaften der drei primären Kommunikationstechnologien werden in Tabelle 09 dargestellt.

Die **spezifischen Anwendungsanforderungen und Technologieeigenschaften** führen dazu, dass WLAN bevorzugt für Sicherheit und Nachhaltigkeit (siehe Kategorien im Abschnitt 3 und Anhang C) eingesetzt wird. Bei Mobilfunk liegt der Schwerpunkt auf Nachhaltigkeit und Komfort, während Broadcast hauptsächlich Use Cases für Komfort unterstützt. Diese Zuordnung ist nicht exklusiv, stattdessen ergänzen sich Technologien im Rahmen ihrer funktionalen Möglichkeiten und Performanz.

Technologiebedingt kann die Effektivität der Nutzung eines Kommunikationssystems vom **Ausstattungsgrad** abhängen. Insbesondere bei WLAN erfordern die direkte Kommunikation und das Fehlen einer Kommunikationsinfrastruktur einen minimalen Prozentsatz von Fahrzeugen, die mit WLAN ausgerüstet sind; typischerweise wird hier von 10 % ausgegangen [A11]. Unter dieser Schwelle funktionieren Anwendungen nicht oder nur eingeschränkt. Teilweise kann diese Abhängigkeit durch den Einsatz von RSUs kompensiert werden, ein flächendeckender Ausbau einer WLAN-Infrastruktur gilt allerdings als unökonomisch. Eine solche Abhängigkeit vom Ausstattungsgrad gibt es bei Broadcast nicht, da hier die Informationen flächendeckend ausgestrahlt werden. Auch bei Mobilfunk ist die Abhängigkeit wegen der bereits existierenden Mobilfunkinfrastruktur gering.

Die wichtigsten **funktionalen Eigenschaften der Kommunikationstechnologien** betreffen die Informationsverteilung, und zwar die Kommunikationsrichtung, die Unterstützung von direkter bzw. indirekter Kommunikation sowie die Möglichkeit der Verteilung an eine Gruppe von Empfängern (Punkt-zu-Mehrpunkt-, P2MP-, im Gegensatz zu Punkt-zu-Punkt-, P2P-, Kommunikation): Grundsätzlich unterstützt Broadcast nur eine unidirektionale Kommunikation vom DAB-Content-Server zu den Empfängern (z. B. Fahrzeugen). Ein Rückkanal ist nicht vorgesehen, könnte aber ggf. über andere Kommunikationstechnologien erfolgen. WLAN und Mobilfunk unterstützen immer bidirektionale Kommunikation. Ein großer Vorteil von WLAN ist die direkte Kommunikation zwischen Endgeräten, z. B. Fahrzeugen, ggf. über Relays, die Daten weiterleiten, um die Kommunikationsreichweite zu vergrößern. So wird mit WLAN eine umweglose und somit schnelle Kommunikation ermöglicht. Datenübertragung im Mobilfunk erfolgt immer über das Mobilfunknetzwerk, auch für lokale Kommunikation benachbarter Endgeräte (Erweiterungen zu direkter Kommunikation werden in Abschnitt 5.3.2 vorgestellt und diskutiert). Punkt-zu-Mehrpunkt-Kommunikation (P2MP) als Basis der Informationsverteilung wird von Broadcast sehr effizient unterstützt, wobei hingegen WLAN Broadcast in einem kleineren geografischen Gebiet ermöglicht. Bei Mobilfunk eignen sich existierende Mechanismen (IMS, eMBMS) nur sehr eingeschränkt, weswegen P2MP derzeit bevorzugt als Overlay-Netzwerk realisiert wird, bei dem P2PM durch einen Baum von P2P-Verbindungen emuliert wird.

Im Vergleich der Kommunikationstechnologien hinsichtlich der **Übertragungsqualität** bietet WLAN eine sehr niedrige Kommunikationslatenz bei hoher Datenrate und moderater Zuverlässigkeit. Mobilfunk ist dazu komplementär mit einer sehr hohen Datenrate bei moderater Latenz und hoher Zuverlässigkeit, während Broadcast Verkehrsinformationen mit sehr hoher Zuverlässigkeit, allerdings geringer Datenrate und moderater Latenz verteilt. Die Übertragungsqualität kann somit als hoch für WLAN sowie moderat für Mobilfunk und Broadcast subsumiert werden. Dabei ist hervorzuheben, dass diese Einschätzungen hier nur relativ zu den Anforderungen aktueller Anwendungen getroffen wurden. Im Abschnitt 5.2 werden zukünftige Anforderungen diskutiert, so dass Entwicklungspotentiale der Kommunikationstechnologien eingeschätzt werden können.

	WLAN	Mobilfunk	Broadcast
Schwerpunkt der Anwendungen	Sicherheit, Nachhaltigkeit	Nachhaltigkeit, Komfort	Komfort
Abhängigkeit vomAusstattungsgrad	Hoch	Gering	Gering
Kommunikationsrichtung	Bidirektional	Bidirektional	Unidirektional
Direkte/indirekte Kommunikation	Direkt (ggf. über Relays)	Indirekt (über Infrastruktur)	N/A
Punkt-/Mehrpunkt-Kommunikation	P2P & P2MP	P2P	P2MP
Übertragungsqualität			
Latenz	Sehr niedrig	Niedrig	Moderat
Datenrate	Hoch	Sehr hoch	Niedrig
Zuverlässigkeit	Moderat	Hoch	Sehr hoch

Tabelle 09: Vergleich der primären existierenden Kommunikationstechnologien

5.1.6 Weitere Kommunikationstechnologien

Neben den bisher beschriebenen primären drahtlosen Kommunikationstechnologien WLAN (IEEE 802.11 OCB), Mobilfunk und Broadcast (DAB) existieren eine Reihe von weiteren Technologien, die auch in der Zukunft eine Rolle im Mobilitätssektor spielen könnten:

- **Bluetooth (IEEE 802.15.1)**: Drahtlose Kommunikationstechnologie mit geringer Datenrate und Reichweite sowie geringem Energieverbrauch, hauptsächlich zur kabellosen Kommunikation von Smartphones, Systemen der Hausautomatisierung und Infotainment-Systemen in Fahrzeugen.
- **WLAN für M2M (IEEE 802.11ah):** WLAN-Variante mit spezifischen Modifikationen für Anwendungen im Kontext des Internet-of-Things (IoT). Arbeitet im < 1 GHz-Frequenzband, geringerer Energieverbrauch als Standard IEEE 802.11.
- **ZigBee (IEEE 802.15.4):** Drahtlose Kommunikationstechnologie für Sensornetzwerke; vergleichbare Eigenschaften zu Bluetooth.
- **Millimeter-Wave (mmWave, IEEE 802.11ad):** WLAN-Variante, auch Wireless Gigabit – sehr hohe Datenrate mit großer Bandbreite im 60 GHz-Frequenzband. Zusätzlich zu IEEE 802.11ad wird mmWave zunehmend auch als Technologie für Kommunikation zwischen Fahrzeugen relevant, u. a. wegen der Frequenzallokierung für ITS im 63 GHz-Frequenzband,

der hohen erzielbaren Datenrate und deren möglichen Kombination mit 77 GHz-Radar-Systemen in Fahrzeugen.

- **RFID:** RFID kann durch die kompakte Bauweise und geringen Kosten der Transponder vielfältige Anwendung zur Lokalisation und Identifikation im Nahbereich (Millimeter bis zu 10 Meter) finden. Near Field Communication (NFC) ist eine auf RFID-basierende Technologie für kontaktlose Kommunikation, typischerweise über Distanzen im cm-Bereich und wird meist im Kontext von Micro-Payment für bargeldloses Bezahlen, u. a. für Mobilitätsdienste, eingesetzt.
- **Visible Light Communication (VLC):** Optische drahtlose Kommunikationstechnologie mit sehr hoher Datenrate bei geringer Reichweite und sehr geringem Energieverbrauch; interessant für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation auch wegen der möglichen Zweitbenutzung von im Fahrzeug existierenden LEDs oder Laser-Komponenten als VLC-Transmitter.

Die Autoren der Studie gehen davon aus, dass die sekundären Kommunikationstechnologien in der Zukunft in **speziellen Anwendungsbereichen** des Mobilitätssektors eine Bedeutung erlangen können, wenn auch mit geringerer Verbreitung als die primären Technologien. Beispiele sind Micro-Payment (NFC), straßenseitige Sensornetzwerke (ZigBee) oder ergänzende Kommunikationstechnologien zu WLAN (mmWave, VLC).

Neben den drahtlosen haben **kabelgebundene Kommunikationstechnologien** eine Bedeutung im Zugangs- und Kernnetz von Mobilfunknetzen, als Verteilnetz zwischen WLAN-Basisstationen in der straßenseitigen Infrastruktur, zur Anbindung existierender Infrastruktur (z. B. Straßeninduktionsschleifen und Überwachungskameras) sowie für generelle Internet-Konnektivität. Typischerweise basieren die kabelgebundenen Kommunikationstechnologien auf bekannten und meist weitverbreiteten Technologien, z. B. glasfaserbasiertes OTN (Open Transport Network), DSL etc. Deshalb wird im Rahmen dieser Studie nicht auf kabelgebundene Basistechnologien eingegangen. Es existieren aber Datenformate und Protokolle speziell für Mobilitätsdaten; relevante Spezifikationen sind:

- **OCIT (Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems):** Spezifiziert Schnittstellen, u. a. für die Steuerung und Datenerfassung von LSAs [N13] unterschiedlicher Anbieter.
- **DATEX-II:** Definiert Schnittstellen, Datenmodelle und Datenformate für den Austausch von Verkehrsinformationen zwischen Verkehrsmanagementzentralen, Verkehrsinformationszentren und Diensteanbietern [N1].
- **Open Traffic Systems (OTS):** Definiert ein Rahmenwerk für Verkehrssteuerung, Verkehrslenkung und Verkehrsmanagement [N15]. Es beinhaltet sowohl die Architektur, als auch Schnittstellen und Prozesse. OTS nutzt u. a. die OCIT Spezifikation.

5.1.7 Analyse existierender Netzstrukturen

Der Ausbau von Netzen mit den drei Kommunikationstechnologien führt zu drei wesentlichen Netzwerktypen (Abbildung 21): 1.) WLAN-basiertes Netzwerk für Car-to-X-Kommunikation, 2.) Mobilfunknetze für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und den Backend-Plattformen von Diensteanbietern (beispielsweise der Automobilhersteller), wobei Backendplattformen typischerweise mit dem Internet verbundene Serverplattformen sind, und 3.) Broadcast (DAB)-basierte Kommunikation von Verkehrsdatenprovidern, z. B. von VMZs zu Fahrzeugen.

Abbildung 21 stellt nur die grundlegenden Prinzipien der jeweiligen Netze dar. Tatsächlich verbergen sich dahinter **hochkomplexe Netzstrukturen**: WLAN-basierte Netzwerke beruhen auf Ad-

Hoc-Netzen, bei denen die Netzwerkknoten (Fahrzeuge, RSUs) miteinander kooperieren und Informationen austauschen. Zu den Netzstrukturen zählen dabei auch, im erweiterten Sinne, Infrastrukturen zur Verwaltung von Sicherheitsschlüsseln und Zertifikaten (siehe Abschnitt 4). Mobilfunknetze verfügen über eine komplexe Architektur mit Zugangs- und Kernnetzen, die neben der eigentlichen Datenübertragung auch eine Vielzahl von Unterstützungsdiensten, wie Registrierung und Authentifizierung, Mobilitätsverwaltung, Management der Übertragungsressourcen und Interferenzkoordinierung erfüllen. Die Komplexität der Broadcast-Netze entsteht durch die Bindung an die Rundfunknetze, so dass ein Broadcast-Netzwerk Unterstrukturen des Radio-, des Multiplex- und des eigentlichen Netzwerkbetreibers besitzt sowie zusätzliche Anbindungen zur Einspeisung von Verkehrsinformationen aufweist.

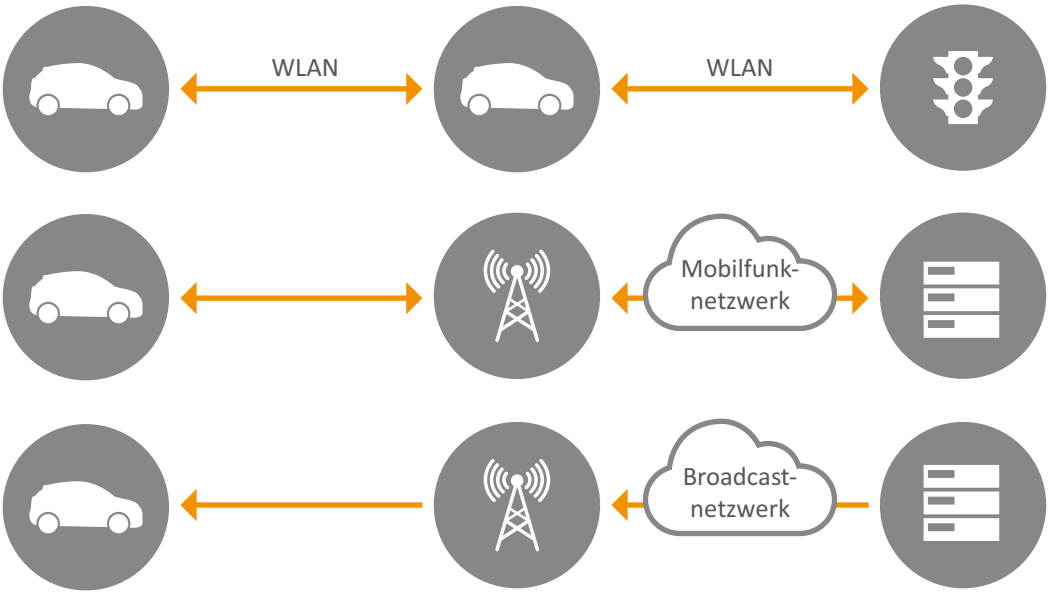


Abbildung 21: Netzstrukturen mit heterogenen Kommunikationstechnologien

Der Ausbau von Netzen mit komplementären Kommunikationstechnologien hat eine Reihe von Implikationen:

- Es erfolgt eine **separierte Datenhaltung**, die möglicherweise zu inkonsistenten Daten in Fahrzeugen, Backend-Servern und VMZ führt.
- Es entstehen **isolierte Netze,** bei denen es nicht möglich ist, Daten zwischen den Netzen, beispielsweise durch Gateways, auszutauschen.
- Es gibt **inkompatible Anwendungsformate**. Beispielsweise sind die Nachrichtenformate für WLAN-basierte Kommunikation (z. B. CAM, siehe Abschnitt 6.3) und TPEG zueinander inkompatibel, da sie auf unterschiedlichen Datenformaten basieren und somit keine Konvertierung von Daten von einem Format in das andere erlauben. Diese Inkompatibilität gilt auch für proprietäre Nachrichtenformate, die zur Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Backends der Automobilhersteller genutzt werden.
- Existierende Straßeninfrastruktur wird nicht in die neuen Netze eingebunden.

5.2 Neue Anforderungen an Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen

Bisherige Anwendungen im Mobilitätssektor erfordern die Übertragung von Informationen bzw. Mobilitätsdaten zwischen Quellen und Senken, beispielsweise Stauwarnungen oder Parkplatzinformationen. Typischerweise haben diese Anwendungen moderate Anforderungen und können von heute existierenden Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen grundsätzlich erfüllt werden.

Neue Anforderungen ergeben sich auch aus maßgeblichen Technologietrends, dazu zählen unter anderem die Virtualisierung und Cloud-Computing, die Nutzung von Big Data und die zunehmende Fahrzeugautomatisierung.

Virtualisierung und Cloud-Computing

Virtualisierung bezeichnet im technischen Sinne die Nachbildung der Eigenschaften spezifischer Hardware durch eine oberhalb der realen Hardware als Abstraktionsschicht eingefügte Software. Vorteile der Virtualisierung sind eine höhere Auslastung der Hardwareressourcen und Kostenminimierung. Bei dem auf Virtualisierung basierenden Cloud-Computing wird zwischen „Infrastructure as a Service“ (Iaas), „Platform as a Service“ (PaaS) und „Software as a Service“ (SaaS) unterschieden, bei denen der Diensteanbieter die Hardware und Netzanbindung (IaaS), zusätzlich die Software-Umgebung (PaaS) oder sogar die Anwendungen (SaaS) zur Verfügung stellt. Beim Cloud-Computing werden die Daten nicht lokal gespeichert und Anwendungen nicht lokal ausgeführt, sondern in einer entfernten IT-Infrastruktur. Die Kommunikation zwischen Endgeräten und der Cloud stellt **neue und hohe Anforderungen an Zuverlässigkeit, (bidirektionale) Latenz und permanente Verfügbarkeit der Kommunikationsnetze**, insbesondere dann, wenn der Zugang zur Cloud so erfolgen soll, als wären die Daten und Anwendungsprozesse lokal.

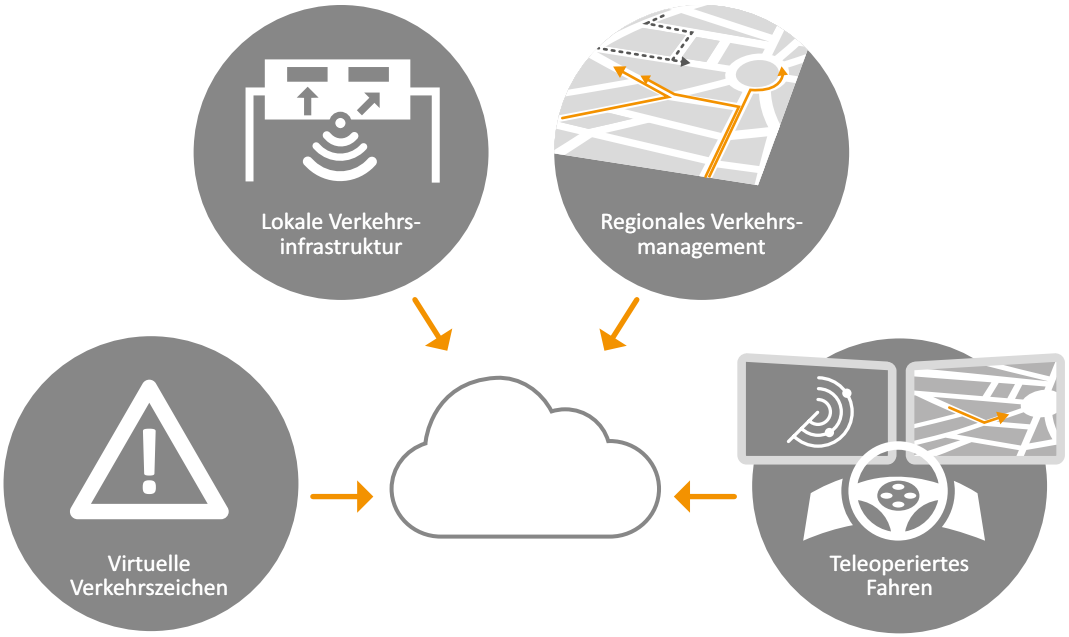


Abbildung 22: Technologietrend „Virtualisierung“ und „Cloud-Computing“ (Kartengrafik designed by Freepik.com, bearbeitet)

Virtualisierung und Cloud-Computing sind Treiber eines fundamentalen Wandels der IKT, der auch zunehmenden Einfluss auf den Mobilitätssektor hat. Repräsentative Beispiele für die Nutzung von Virtualisierung und Cloud-Computing (Abbildung 22) sind die Virtualisierung der Verkehrszeichen und der lokalen Verkehrsinfrastruktur (Ampelsteuerungen etc). Cloud-Computing hat auch das Potential grundlegend neue Mobilitätsdienste zu unterstützen, wie beispielsweise regionales Verkehrsmanagement oder teleoperiertes Fahren.

Big Data

Die Verfügbarkeit einer hochleistungsfähigen IKT führt auch zu einer neuen Form von intelligenten Produkten und Diensten, die große, vielfältige, sich ständig ändernde Datenmengen erzeugen. Diese Datenmengen können nicht mit traditionellen Datenbankenansätzen verarbeitet werden und erfordern neue Datenbanken (z. B. NoSQL-Datenbanken) zum Sammeln, Verarbeiten und Management von massiven historischen und Echtzeit-Daten. Darauf aufbauend werden Algorithmen zur Datenanalyse (Deskriptive Analytik, Data Mining, Datenmodellierung, Prädiktive Analytik) angewendet, um Muster, Korrelationen oder Anomalien zu erkennen. Anwendungen wiederum nutzen diese Algorithmen zur Datenanalyse, um **neuartige datengetriebene Dienste und Geschäftsmodelle** zu kreieren.

Eine generische „Big Data"-Umgebung am Beispiel der Mobilität ist in Abbildung 23 dargestellt, mit einer Big Data Cloud als zentralem Element, die mit der Verkehrsinfrastruktur und anderen Komponenten vernetzt ist. Verkehrsplanung und -steuerung wird als typisches Anwendungsfeld für Big Data angesehen, wobei verschiedene Datentypen miteinander verknüpft werden können, beispielsweise Informationen über Verkehrsflüsse mit Wetter- und Klimadaten. Darüber hinaus ermöglicht Big Data viele neue Anwendungen und Dienste im Bereich Car Sharing, Routenplanung und Online-Navigation oder umweltgerechtes Fahren. Das vollständige Potential von Big Data für Mobilitätsanwendungen ist heute noch nicht abzusehen.

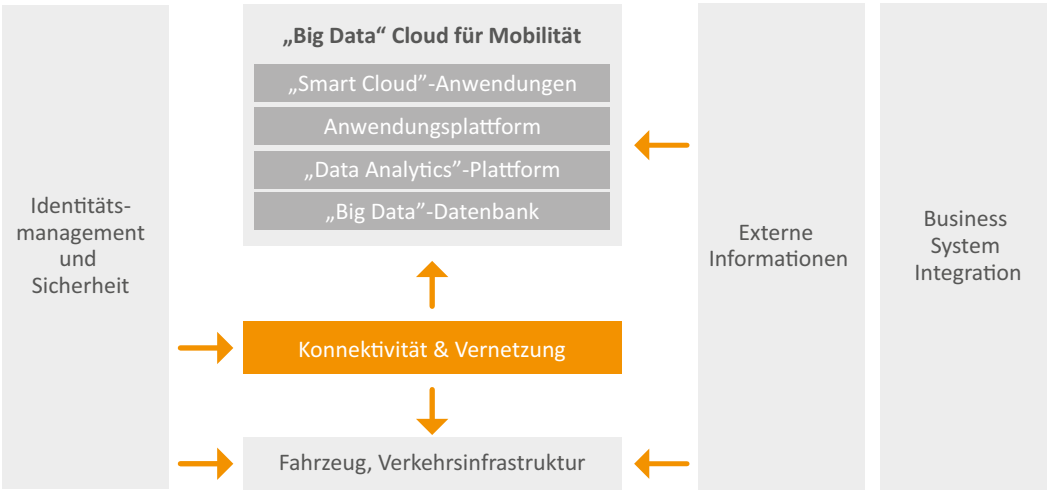


Abbildung 23: Technologietrend „Big Data" (Grafik basiert auf [A14])

Typischerweise stellt Big Data moderate Anforderungen hinsichtlich Latenz und Durchsatz an die Übertragung der Daten in die Big Data-Cloud. Die Vorteile von Big Data liegen eher im Bereich der „Datenveredelung" in der IT Infrastruktur. Neue Anforderungen an die Kommunikationstechnologien und -netze würden sich in der Zukunft ergeben, wenn die Menge der in die Cloud zu

übertragenden Daten so groß wird, dass die Netzkapazität nicht mehr ausreicht. Bisher gibt es keine aussagekräftigen Vorhersagen des Datenverkehrs, der zukünftig von Fahrzeugen in solchen Anwendungsszenarien generiert wird. Unter der Annahme, dass das Datenvolumen mehrere Mbyte/s pro Fahrzeug beträgt (Anhang D.2) und in die Cloud für Big Data-Anwendungen übertragen wird, kann das aggregierte Datenvolumen neue Herausforderungen für die Netze implizieren.

Fahrzeugautomatisierung

In modernen Fahrzeugen wird der Fahrer zunehmend von einer Vielzahl von Sensoren rund ums Fahrzeug unterstützt. Fahrassistenzsysteme helfen dem Fahrer in verschiedenen Fahrsituationen (z. B. Spurhalten) oder sind sogar in der Lage, ausgewählte Fahraufgaben ganz zu übernehmen (z. B. Einparken). Das assistierte Fahren wird als Vorstufe des automatisierten Fahrens angesehen. Mit der weiteren Entwicklung der Sensorik und Informationsverarbeitung kann der menschliche Fahrer von dynamischen Fahraufgaben abgelöst werden. Beim hochautomatisiertem Fahren übernimmt das System die Längs- und Querführung in spezifischen Anwendungsfällen. Dabei muss der Fahrer das System nicht mehr dauerhaft überwachen und wird stattdessen mit einer ausreichenden Zeitreserve aufgefordert, die Fahrzeugführung zu übernehmen. Beim vollautomatisierten (autonomen) Fahren ist kein Fahrer mehr erforderlich [N16][S25][S4].

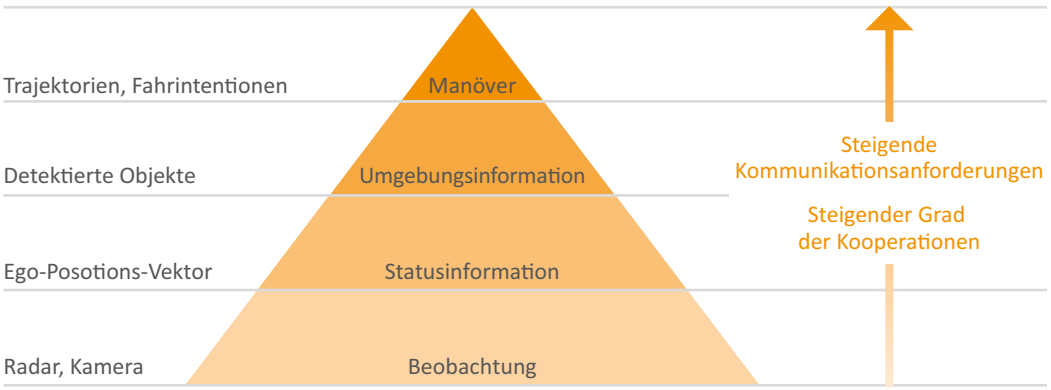


Abbildung 24: Technologietrend „Fahrzeugautomatisierung“

Es wird erwartet, dass durch Fahrzeugautomatisierung neben dem Komfort auch die Sicherheit und durch Verkehrsflussoptimierung die Effizienz gesteigert werden können. Mit der Automatisierung wird auch der Grad der Kooperation zunehmen (Abbildung 24): Während auf der untersten Ebene Fahrzeuge ihr Umfeld durch Sensorik beobachten, sind sie durch Kommunikationstechnologien in der Lage Statusinformationen wie Position, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung (den Ego-Positionsvektor) mit anderen Fahrzeugen auszutauschen. Dieser Austausch von Statusinformationen kann bereits mit den heutigen WLAN-Systemen (IEEE 802.11 OCB / ITS-G5) realisiert werden. Ein höherer Grad der Kooperation erfolgt über den Austausch von – typischerweise aggregierten – Umgebungsinformationen, beispielsweise von detektierten Objekten oder über die kontinuierliche Übertragung der Sensorinformationen. Letztendlich können Fahrmanöver zwischen Fahrzeugen koordiniert werden, was u. U. ein explizites Verhandeln über verschiedene Optionen der Trajektorienplanung erfordert.

Die Bedeutung der IKT für Fahrzeugautomatisierung geht über die Kooperation automatisierter Fahrzeuge untereinander hinaus und ermöglicht auch eine neue Stufe der Kooperation zwischen automatisierten Fahrzeugen mit allen anderen Verkehrsteilnehmern, wie Fußgängern, ÖPNV und

auch nicht-automatisierten Fahrzeugen sowie mit weiteren Teilnehmern und Objekten eines Internets der Dinge, z. B. aus der Energiewirtschaft.

Die drei Technologietrends – Virtualisierung und Cloud-Computing, Big Data, Fahrzeugautomatisierung – können zu **höheren Anforderungen an die Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen** führen. Insbesondere ist bereits heute abzusehen, dass einige Use Cases, die diese Technologien nutzen eine sehr hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit bei sehr niedriger Latenz benötigen, die nicht vollständig von den existierenden Kommunikationstechnologien erfüllt werden können.

5.3 Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen 2025+

Im Folgenden werden die Entwicklungspotentiale der primären Kommunikationstechnologien – WLAN, Mobilfunk und Broadcast – für den Mobilitätssektor aufgezeigt. Dabei werden auch aktuelle Technologietrends (Abschnitt 5.2) berücksichtigt. Der Schwerpunkt der Analyse liegt auf dem Mobilfunk, da in diesem Bereich derzeit ein Übergang von der 4. zur 5. Generation erfolgt, wobei spezifische Anforderungen für den Mobilitätssektor im Design von 5G berücksichtigt werden.

5.3.1 WLAN

Mit der Drahtlostechnologie IEEE 802.11 OCB / ITS-G5 wurde ein Kompromiss zwischen guter Verfügbarkeit der Technologie, geringer Komplexität und niedrigen Kosten einerseits und den technologische Möglichkeiten andererseits eingegangen. Die technologische Basis der WLAN OCB-Variante, IEEE 802.11a, wurde ursprünglich für stationäre Kommunikation innerhalb von Gebäuden entwickelt und durch marginale Modifikationen an die Anforderungen drahtloser Kommunikation in hochmobilen Szenarien angepasst. Aus diesem Grund sind diese **Übertragungsverfahren für Fahrzeugkommunikation nicht optimal** (siehe Abschnitt 5.1.2).

Aktuelle Weiterentwicklungen im WLAN-Bereich können grundsätzlich im Mobilitätssektor eingesetzt werden. Beispielsweise eignen sich IEEE 802.11ac und IEEE 802.11ad auch für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Internet-Hotspots für sehr hochratige Datenübertragung im 2.4 GHz- bzw. 60 GHz-Frequenzband. IEEE 802.11ah stellt eine gute Adaption des WLAN-Systems für generelle M2M-Anwendungen auch im Mobilitätssektor dar, eignet sich aber nur eingeschränkt für Fahrzeugkommunikation. Eine Weiterentwicklung der WLAN-Variante OCB im 5.9 GHz-Frequenzband, beispielsweise um ein Medienzugriffsverfahren mit Echtzeitgarantien, ist derzeit nicht erkennbar und wird auch nicht erwartet. Stattdessen ist eine grundlegende Annahme in der Entwicklung des WLAN-Systems für Fahrzeugkommunikation, dass die physikalische Übertragung und das Medienzugriffsverfahren auch in Zukunft **unverändert** bleiben und stattdessen ausschließlich höhere Protokollschichten modifiziert werden. Folgende Anpassungen und Erweiterungen im Vergleich zum Basissystem sind derzeit erkennbar:

- Systeme mit mehr als einem Transceiver (typischerweise **Dual-Transceiver**), die in der Lage sind, auf zwei Kanälen gleichzeitig zu arbeiten.
- Konzept mit Diensteanbietern und -nutzern, bei dem Dienste im Netzwerk mit Hilfe von speziellen Nachrichten (Service Announcement Messages) bekannt gemacht werden und Dienstenutzer die angebotenen **Dienste dynamisch auswählen** können. Ein Beispiel ist ein lokaler Dienst, der von einer RSU auf einem speziellen Kanal zur Verfügung gestellt wird, um die Kreuzungstopologie an Fahrzeuge in der Umgebung zu verteilen.

- **Dynamische Kanalumschaltung** zur effizienten Nutzung aller Kanäle im 5,9 GHz-Frequenzband.
- **Überlastkontrolle** zur effektiven Nutzung des Systems auch unter hoher Datenlast mit einer großen Anzahl von Fahrzeugen.

Neben diesen technischen Modifikationen kann erwartet werden, dass der Protokollstack für Fahrzeugkommunikation auch um Nachrichtenformate erweitert wird, um neue Anwendungen zu unterstützen. Dazu zählen im Wesentlichen zwei Gruppen von Anwendungen: 1.) S**chutz verletzlicher Straßennutzer** („Vulnerable Road User", VRU) und 2.) **Kommunikationsunterstützung für Fahrzeugautomatisierung**. Zum letzteren gehören u. a. der Austausch von Informationen zur Umfeldwahrnehmung, die Koordination von Fahrmanövern und das Fahren in Konvois bzw. Platoons.

5.3.2 Mobilfunk

Seit der Einführung der Datenkommunikation in den Mobilfunk war das primäre Ziel der jeweils nächsten Generation die Erhöhung der Datenrate. So unterstützt die aktuelle Mobilfunkgeneration 4G (LTE und LTE-A) die Übertragung von hochauflösenden Multimediadaten (Abbildung 20). Die derzeit in der Entwicklung befindliche 5. Generation der Mobilfunktechnologie wird als **Schlüsseltechnologie zur umfassenden Vernetzung** der Gesellschaft angesehen und wird alle Anwendungsbereiche, wie Produktion, Energie, Transport, Gesundheit etc. beeinflussen. Daher gehen die Anforderungen an 5G über eine infrastrukturelle breitbandige Basisvernetzung hinaus [S26]. Stattdessen können vier wichtige Szenarien unterschieden werden [A12]: Bitpipe, Taktiles Internet, Internet der Dinge und drahtlose regionale Netzwerke. Diese Szenarien sollen möglichst allgemeingültig sein, lassen sich aber auch gut auf die Anforderungen auf IVS übertragen.

- **Bitpipe** berücksichtigt den immer weiter steigenden Bedarf nach Datenrate. Dieser Bedarf kann durch Zuwachs im Frequenzspektrum, eine Verdichtung durch zusätzliche kleinere und kompakt angeordnete Zellen und strikte Interferenzkoordinierung zwischen den Zellen erreicht werden.
- **Taktiles Internet** umfasst Use Cases mit einer sehr geringen Kommunikationslatenz und definiert die Bedeutung des „schnellen mobilen Internet" neu [S12][S13]: Statt mit höheren Datenraten die reine Übertragungszeit, beispielsweise für den Download, zu verringern, wird die gesamte Übertragungskette des Kommunikationssystems optimiert, um die Ende-zu-Ende Latenz zu verringern. Gleichzeitig werden Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit stark erhöht. Bei der Kommunikation von Endgeräten mit der Cloud rückt die Cloud-Infrastruktur näher zum Endgerät und ermöglicht bei bidirektionaler Kommunikation mit Cloud-Prozessen eine Antwortzeit in der Größenordnung lokal ausgeführter Prozesse.
- **Internet der Dinge** zielt auf die Integration von Sensoren mit einem extrem geringen Energieverbrauch – Ziel ist ein Betrieb eines Sensors über zehn Jahre mit einer handelsüblichen Batterie – und sporadischen Datenverkehr bei großer Kommunikationsreichweite („low power wide area", LPWA). Um den Energieverbrauch der Kommunikation möglichst gering zu halten, senden Sensoren ohne präzise Zeitsynchronisation mit dem Netzwerk, vermeiden Datenwiederholung zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und haben lange, energiesparende Schlafphasen.
- **Drahtlose regionale Netzwerke** ermöglichen eine effiziente Kommunikation in Gebieten mit geringer Population, in denen ein Ausbau einer Infrastruktur nicht wirtschaftlich ist. Solche Szenarien können durch sehr große Zellen mit robusten Übertragungsverfahren zur Kompensation der Mehrwegeausbreitung sowie hoher spektraler Effizienz und flexibler Nutzung der Übertragungsressourcen realisiert werden.

Um alle Szenarien zu unterstützen, wird 5G die Leistungsfähigkeit im Vergleich zu 4G in einer Reihe von Metriken (Key Performance Indicators, KPIs) wesentlich steigern (Abbildung 25). Flexibilität ist eine weitere wichtige Eigenschaft, mit der 5G-Netzwerke ihre Konfiguration den jeweiligen Szenarien und Anforderungen anpassen können. Dabei kommen neue Konzepte wie Software-Defined Networking (SDN) und Network Function Virtualization (NFV) zum Einsatz, die eine **Abstraktion und Flexibilisierung des Mobilfunknetzes** für schnellere Innovationszyklen und geringere Investitions- und Betriebskosten realisieren.

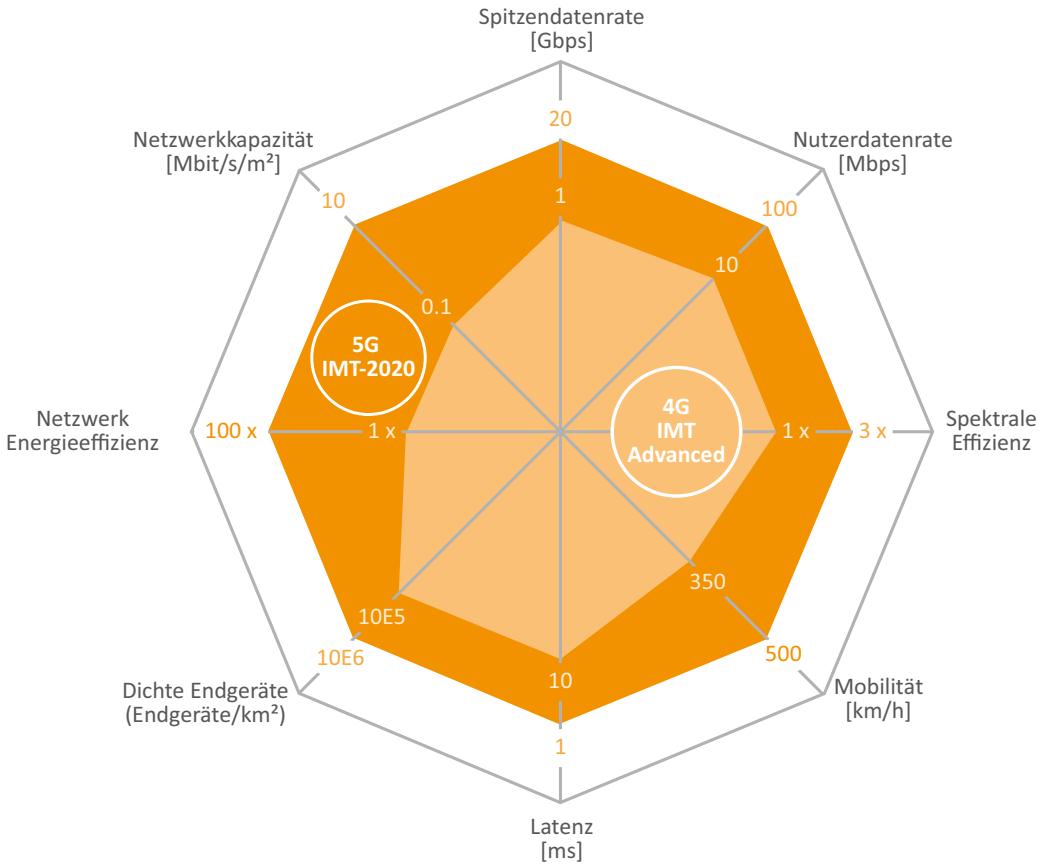


Abbildung 25: KPI für 5G Mobilfunk – Vergleich von IMT Advanced (4G) und IMT-2020 (5G) [S20]

In 5G wird eine **Vielzahl von innovativen Techniken** zur Leistungssteigerung eingeführt [S1]. Dazu zählen:

- Nicht-orthogonale, asynchrone Übertragungsverfahren ermöglichen, im Gegensatz zur orthogonalen, synchronen Übertragung mit OFDM, eine effiziente und skalierbare Kommunikation in verschiedenen Szenarien, u. a. mit wahlfreiem Medienzugriff („Random medium access“).
- Neue Frequenzbereiche, sowohl unter 6 GHz (cm-Wellen) als auch über 6 GHz (mm-Wellen) erweitern das verfügbare Spektrum erheblich (Abbildung 26). Zusätzlich wird das Spektrum durch flexible Techniken der Spektrumzuteilung, z. B. durch Spektrum Aggregation und Shared Spectrum Access, besser ausgenutzt.
- Durch MIMO mit einer sehr hohen Anzahl von Antennen (Massive MIMO) und Vorverarbeitung (Precoding) können viele Anwender gleichzeitig die gleichen Übertragungsressourcen nutzen, ohne sich gegenseitig zu stören.

- Zusätzlich zur konventionellen Kommunikation in Mobilfunknetzen mit der Trennung zwischen Up- und Downlink sowie in Steuerungs- und Datenkanäle können Endgeräte in 5G-Netzen direkt miteinander kommunizieren, wobei die konventionellen, netzwerkzentrischen Konzepte durch eine gerätezentrische Architektur ersetzt werden.

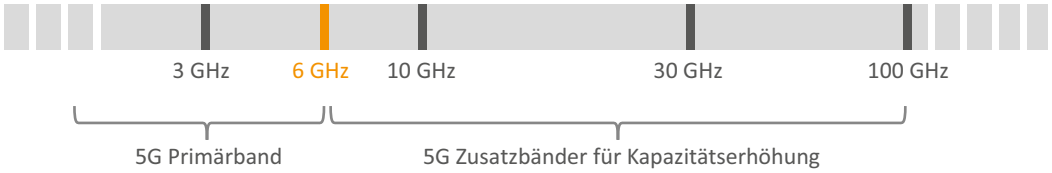


Abbildung 26: Erweiterung des Mobilfunkspektrums für 5G

Für Mobilitätsanwendungen, insbesondere für Fahrzeugkommunikation über 5G Netze, ist die direkte Kommunikation essentiell. Bereits in den existierenden LTE-Standards wurde die Möglichkeit der direkten Kommunikation, **Device-to-Device Kommunikation (D2D)** oder **Proximity Services (ProSe)**, geschaffen [A15]. Mit ProSe können Endgeräte in direkter Kommunikationsreichweite sich gegenseitig finden und Daten austauschen, ohne die Daten über die Basisstation zu senden. Dazu definiert ProSe eine „Sidelink" Kommunikation, im Gegensatz zum konventionellen Up- und Downlink zwischen Basisstation und Endgerät. Sidelink-Daten benutzen einen Teil der Uplink-Übertragungsressourcen. In Reichweite einer Basisstation werden Übertragungsressourcen von der Basisstation zugewiesen. Außerhalb der Reichweite sind die Endgeräte autonom und wählen die Ressourcen aus dem vorkonfigurierten Ressource-Pool. Ursprünglich wurde ProSe für Szenarien mit geringer Mobilität und Punkt-zu-Mehrpunkt Szenarien entwickelt, wobei Latenz und Zuverlässigkeit zunächst nicht berücksichtigt wurden. Dennoch kann ProSe als Basis für weitere Entwicklungen für D2D angesehen werden, wobei es sowohl im Funktionsumfang als auch der Performanz für Fahrzeugkommunikation angepasst werden muss [S2]. Erste Untersuchungen und technische Entwicklungen für Fahrzeugkommunikation in enger Bindung an Standardisierungsaktivitäten laufen bereits [SO15].

5.3.3 Broadcast

DAB kann, insbesondere durch die Erweiterungen in DAB+, als ausgereifte Technologie angesehen werden. Aktuelle DAB-Erweiterungen betreffen hauptsächlich die Übertragung von grafischen Zusatzinformationen. Das Multimedia Object Transfer (MOT)-Protokoll kann genutzt werden, um sogenannte Slideshows, d. h. Bilder mit geringer Auflösung oder HTML-Seiten mit interaktiven Elemente anzuzeigen. Eine weitere, bereits definierte Möglichkeit im DAB ist es, eine Vielzahl von Empfängern in einem **Notfall- oder Katastrophenszenario** mit dem Emergency Warning System (EWS) zu informieren.

Weitere Entwicklungen sind in den TPEG-Nachrichtenformaten zu erwarten. TPEG-Profile definieren Subsets der TPEG-Spezifikationen, zum Beispiel ist das TPEG Automotive Profile (TAP) speziell an die Anforderungen der Navigation in Fahrzeugen angepasst. Aktuell wird hier eine reduzierte und effizientere Variante von TPEG – TPEG Event Compact (TEC) – genutzt, die besonders für Navigationsanwendungen geeignet ist. Da TPEG unabhängig von der Übertragungstechnologie ist und so auch über Mobilfunk[2] (und theoretisch auch über WLAN) übertragen werden kann, besteht

2 „Connected TPEG" über IP

die Chance, dass TPEG in zukünftigen IKT-Systemen für Mobilität eine breite Verwendung findet. DAB steht in der Übertragung der Verkehrsinformationen allerdings in **Konkurrenz zum analogen Rundfunk** und hat deshalb in Deutschland bisher wenig Akzeptanz und Verbreitung gefunden.

5.3.4 Technologieszenarien

Die beiden Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ unterscheiden sich hinsichtlich der Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen. Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Im Szenario „Koexistenz“ werden die primären Kommunikationstechnologien (WLAN, Mobilfunk, Broadcast) für **jeweils unterschiedliche Anwendungszwecke** eingesetzt: WLAN (ITS-G5) wird für Sicherheits- und Nachhaltigkeitsanwendungen von Fahrzeugen im Nahbereich genutzt. Mobilfunk unterstützt hauptsächlich webbasierte Anwendungen, Internet-Dienste und Cloud-Zugang (Filehosting und Streaming-Dienste). Broadcast bietet eine große räumliche Abdeckung zur Verteilung von Verkehrsinformationen an viele Nutzer. Im Gegensatz dazu wird es im Szenario „Konvergenz“ zu einer Dominanz des 5G-Mobilfunks kommen, dessen Einführung im Jahr 2020 vorgesehen ist, wobei es – ähnlich wie bei der Einführung von LTE – auch zu Zwischenstufen kommen kann, die ausgewählte technische Erweiterungen bereits eher einführen. Als Beispiel seien hier LTE-V genannt [SO15][SO14], bei der Fahrzeuge mit 4G / LTE direkt, ggf. über eine Basisstation, miteinander kommunizieren. Obwohl das Szenario „Konvergenz“ von 5G dominiert wird, kann ITS-G5 bei einer erfolgreichen Einführung parallel genutzt werden: Dabei kann es grundsätzlich als eine der 5G-Radiotechnologien in das 5G-Netzwerk integriert werden, es ist aber in diesem Szenario eher davon auszugehen, dass ITS-G5 von 5G zunehmend substituiert wird.

Deskriptor	Koexistenz	Konvergenz
Kommunikationstechnologien	Heterogen	5G dominiert
Netzstrukturen	Weitgehend isoliert	Integriert
Anwendungsformate	Verschiedene	Teilweise konvergiert
Ausstattungsgrad Fahrzeuge	Technologieabhängig (Mobilfunk: Hoch, WLAN/DAB: Moderat)	Sehr hoch
Technologietrends		
Virtualisierung der Verkehrsinfrastruktur	Gering	Moderat
„Big Data“-Verbreitung	Gering	Stark
Vernetzung für Fahrzeugautomatisierung	Gering	Stark

Tabelle 10: Vergleich der Technologieszenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“

Im Szenario „Koexistenz“ führt die Existenz heterogener Kommunikationstechnologien nicht zu einer Integration der Netze; stattdessen existieren verschiedene, technologiespezifische Netzstrukturen nebeneinander und sind weitgehend voneinander isoliert. Neben den separierten IT-Strukturen bei der Datenhaltung (Fahrzeuge, Backend-Server, VMZ etc.) existieren insbesondere auch mehrere, zueinander inkompatible Nachrichtenformate. Im Mobilfunk werden über-

wiegend TPEG sowie proprietäre Formate für die Backend-Server verschiedener Diensteanbieter genutzt, während ITS-G5 die in C-ITS Release 1 [A3] definierten Datenformate verwendet (siehe Abschnitt 6.3). Diese Inkompatibilitäten erschweren technologieübergreifende Use Cases. Da der analoge Rundfunk im Szenario „Konvergenz“ noch nicht abgeschaltet ist, kommt es hier zu einer Konkurrenzsituation zwischen analogem und digitalem Broadcast. Im Szenario „Konvergenz“ integriert 5G verschiedene Kommunikationstechnologien, u. a. WLAN und mmWave, so dass in Geräten mit mehreren Kommunikationstechnologien die optimale Übertragungsvariante ausgewählt und auch ein Handover zwischen unterschiedlichen Technologien ausgeführt werden kann. Broadcast ergänzt Mobilfunk hinsichtlich der umfassenden räumlichen Abdeckung und bietet Redundanz bei einem möglichen Ausfall der Mobilfunkinfrastruktur. Darüber hinaus werden in Katastrophenszenarien Informationen sehr schnell an große Benutzergruppen übermittelt.

Der **Ausstattungsgrad mit Kommunikationstechnologien** im Szenario „Koexistenz“ ist unterschiedlich: Mobilfunk (4G und auch 5G) und WLAN werden durch den Einsatz in mobilen Endgeräten wie Smartphones sehr weit verbreitet sein und somit auch für Mobilitätsdienste genutzt. Mit der zunehmenden Anbindung von Smartphones an die Infotainment-Systeme in Fahrzeugen, wie Apple CarPlay oder Android Auto, wird Mobilfunk eine starke Nutzung erfahren, die Integration in die Fahrzeuge wird aber eher moderat sein. Daneben wird ITS-G5 eingeführt und findet eine wachsende Verbreitung, wobei es gleichzeitig durch die starke Rolle der sensorbasierten Fahrassistenzsysteme als ergänzende Technologie wahrgenommen wird und somit nur einen moderaten Ausstattungsgrad erreicht. Das gleiche gilt für DAB-Broadcast; der Weiterbetrieb des analogen Rundfunks mit RDS und TMC behindert die breite Akzeptanz der neuen Technologie. Im Szenario „Konvergenz“ führt die Akzeptanz von Mobilfunk zu einem sehr hohen Ausstattungsgrad. DAB-Broadcast hat RDS und TMC abgelöst, findet aber durch die Dominanz des Mobilfunks trotz der ergänzenden Eigenschaften nur eine moderate Verbreitung.

Während **Virtualisierung** und **Big Data** weite Anwendungsbereiche jenseits des Mobilitätssektors stark beeinflussen, spielen diese für IVS im Szenario „Koexistenz“ eine untergeordnete Rolle. Zwar wird Cloud-Computing eine große Akzeptanz gefunden haben, aber der Einsatz solcher Lösungen für spezifische Mobilitätsdienste bleibt begrenzt und die Verkehrsinfrastruktur basiert im Wesentlichen auf traditionellen IKT-Lösungen. Im Szenario „Konvergenz“ dagegen können, aufbauend auf leistungsfähigen Kommunikationstechnologien und ausgebauten Mobilfunknetzen, neuartige datengetriebene Mobilitätsdienste und Geschäftsmodelle realisiert werden.

Die Fahrzeugautomatisierung wird im Szenario „Koexistenz“ durch fahrzeugeigene Sensorik realisiert. Kommunikation zwischen Fahrzeugen oder mit der Straßeninfrastruktur mit WLAN / ITS-G5 wirkt **unterstützend,** wird jedoch wegen des nur moderaten Ausstattungsgrads anderer Fahrzeuge und der Infrastruktur sowie aufgrund der Einschränkungen hinsichtlich der Latenz und Zuverlässigkeit der Datenübertragung nur einschränkend genutzt. Im Szenario „Konvergenz“ können durch das hochleistungsfähige 5G-Netzwerk Umgebungsinformationen (teilweise aggregierte Sensordaten und detektierte Objekte) zwischen den Fahrzeugen und mit der Infrastruktur ausgetauscht werden.

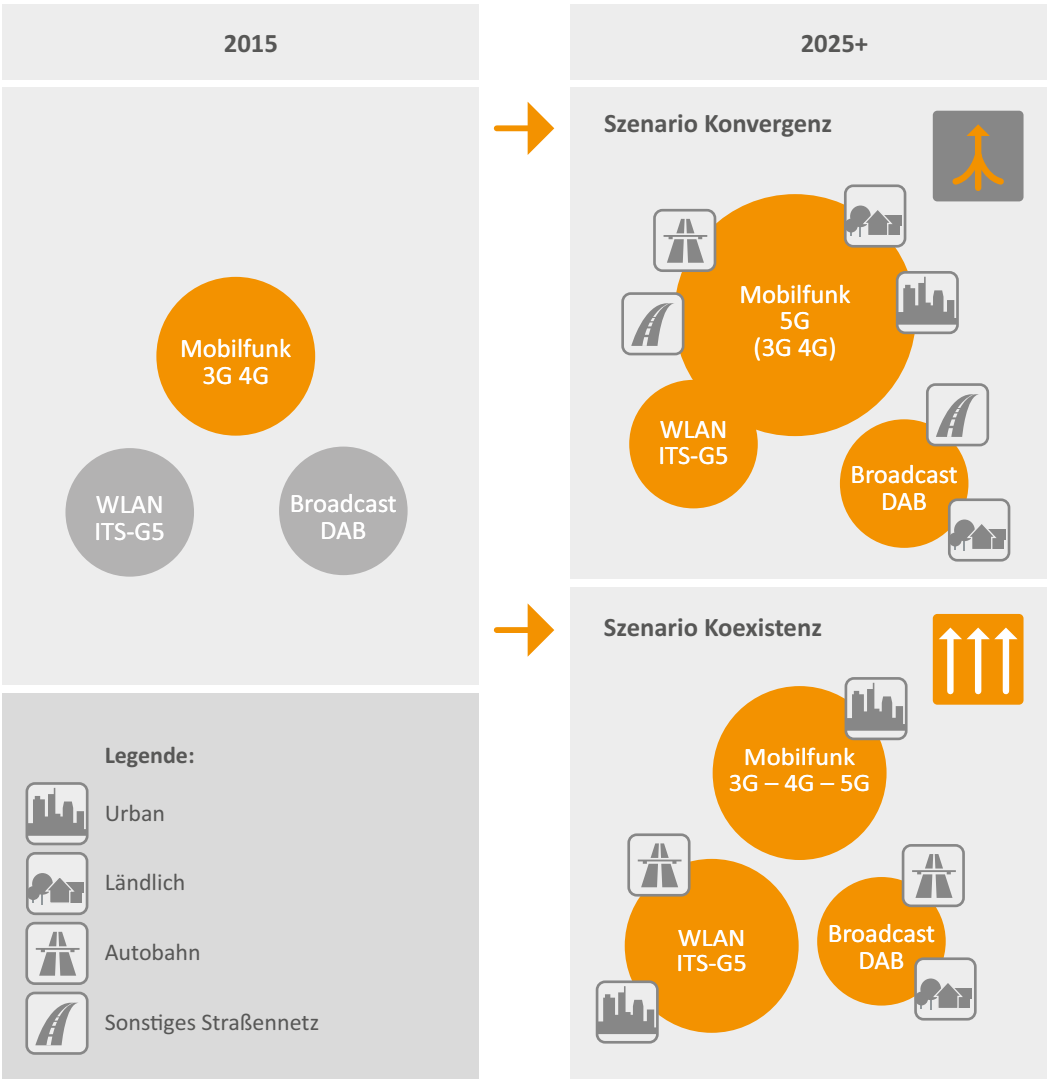


Abbildung 27: Entwicklung von Kommunikationstechnologien in den Mobilitätsszenarien 2025+

Die Nutzung der Kommunikationstechnologien heute (2016) und im Vergleich dazu die 10-Jahresprognose in den beiden Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ spiegelt sich in der Abbildung 27 wider: Heute werden für Mobilitätsdienste hauptsächlich Mobilfunknetze genutzt. WLAN ITS-G5 steht grundsätzlich zur Verfügung; mehrere Indikatoren deuten darauf hin, dass es in Europa noch vor 2020 eingeführt wird. Broadcast (DAB mit Verkehrsinformationen) wird bereits heute ausgestrahlt, hat aber wenig Verbreitung gefunden. Im Szenario „Koexistenz“ werden 3G-5G-Mobilfunk und WLAN ITS-G5 etwa den gleichen Anteil zum übertragenen Datenvolumen aufweisen, wobei Broadcast DAB wegen der Konkurrenz zum analogen Rundfunk mit RDS und TMC sowie der geringen Datenrate nur wenig zum übertragenen Datenvolumen beitragen wird. Im Szenario „Konvergenz“ dominiert 5G Mobilfunk alle anderen Kommunikationstechnologien. Dadurch hat es auch das Potential WLAN ITS-G5 zu integrieren, oder sogar Broadcast DAB und WLAN ITS-G5 zu substituieren. In beiden Szenarien ergibt sich eine bedeutende Rolle des Mobilfunks; ein wesentlicher Unterschied ist, dass es im Szenario „Koexistenz“ die infrastrukturelle breitbandige Basisvernetzung offeriert, während 5G im Szenario „Konvergenz“ zusätzlich in der Lage ist, die spezifischen Anforderungen nach sehr geringer Latenz und sehr hoher Zuverlässigkeit zu erfüllen und damit nahezu alle Mobilitätsdienste abdecken kann.

5.4 Technologielücken und Entwicklungspotentiale

Die Analyse der derzeit verfügbaren Kommunikationstechnologien hat klar gezeigt, dass keine der primären Technologien alle Anforderungen des Mobilitätssektors erfüllt. Andererseits sind die Technologien weitgehend komplementär zueinander, so dass mit dem gleichzeitigen Einsatz der drei heute verfügbaren primären Technologien ein sehr großer Teil der Use Cases für Sicherheit, Nachhaltigkeit und Komfort abgedeckt werden kann.

Der Einsatz von mehreren Kommunikationstechnologien hat zudem den Vorteil, dass Daten **redundant** übertragen werden können, so dass bei Ausfall einer Technologie eine andere zur Verfügung steht. Der Verbesserung von Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit sind dabei allerdings Grenzen gesetzt, da die Ersatztechnologie nicht alle funktionalen und qualitativen Anforderungen des jeweiligen Use Cases erfüllen kann. Netzstrukturen, die Redundanz in der Datenübertragung zulassen, haben auch eine höhere Komplexität, da sie heterogene Kommunikationstechnologien integrieren, die dynamische Auswahl der Netzwerkinterfaces in den Endgeräten unterstützen und Mechanismen zur Steuerung der Datenflüsse anbieten.

Die Nutzung der primären Kommunikationstechnologien in der heutigen Form impliziert grundlegend unterschiedliche Typen von Netzstrukturen – Ad-hoc-Netzwerke ohne eine steuernde Kommunikationsinfrastruktur mit IEEE 802.11 OCB / ITS-G5, Mobilfunknetze mit Zugangs- und Kernnetzen sowie Broadcast-Verteilnetze, die an die Verteilung von Rundfunk gekoppelt sind. Die Bindung der Kommunikationstechnologie an Use Cases führt dabei zu unabhängigen, voneinander isolierten Netzen. Durch das Fehlen einer ganzheitlichen Architektur stehen Kommunikationstechnologien in Konkurrenz zueinander, was die Markteinführung solcher Systeme erschwert. Darüber hinaus gibt es keine netzübergreifende Datenhaltung sowie Inkompatibilitäten in den Nachrichtenformaten, so dass der mögliche Vorteil einer redundanten Datenübertragung zu einem Nachteil mit ineffizienten Netzstrukturen und Dateninkonsistenzen führen kann.

Forschung, Entwicklung und Feldtests im Mobilitätsbereich sind stark auf Fahrzeuge fokussiert. Die Ausrichtung entspricht dem hohen Potential in der Verbesserung der Fahrzeugsicherheit und Effizienz des MIV. Die Nutzung von Kommunikationstechnologien **in anderen Bereichen**, etwa für bzw. durch Fußgänger und Fahrradfahrer, ist sekundär. Darüber hinaus werden **inter- und multimodaler Verkehr** noch nicht hinreichend in ein Gesamtkommunikationssystem für Mobilität einbezogen. Eine ganzheitliche Sicht auf den Mobilitätssektor und die Berücksichtigung aller Verkehrsteilnehmer können die Einführung der Kommunikationstechnologien und den Aufbau entsprechender Netzstrukturen befördern.

Es wird erwartet, dass neue **technologische Trends** wie Virtualisierung und Cloud-Computing, Big Data sowie Fahrzeugautomatisierung einen starken Einfluss auf den Mobilitätssektor haben werden. Diese Technologietrends führen zu neuen Anforderungen an die Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen. Es ist bereits abzusehen, dass die existierenden Technologien die hohen Anforderungen an sehr niedrige Latenz sowie sehr hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit nur eingeschränkt erfüllen können. Diese Unsicherheit hinsichtlich der Zukunftsfähigkeit stellt ein weiteres Hemmnis bei der Einführung der aktuellen Technologien dar.

Unabhängig von den Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ sollte das Ziel ein Systemverbund mit offenen Schnittstellen sein, der skalierbar, flexibel und sicher ist, betreiberunabhängig funktioniert sowie über ein technologieübergreifendes Sicherheitskonzept verfügt. Ein solcher Systemverbund ermöglicht eine konsistente Datenhaltung und -übertragung basierend auf kompatiblen Nachrichtenformaten. Erste Ansätze für eine gesamtheitliche Systemarchitektur existieren und wurden beispielsweise vom CONVERGE-Projekt [P6] untersucht.

Im Folgenden werden Handlungsfelder für die Entwicklung der Kommunikationstechnologien für die beiden Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ zusammengefasst:

Szenario „Koexistenz“

- Ausbau der existierenden primären Kommunikationstechnologien WLAN (IEEE 802.11 OCB/ ITS G5), Mobilfunk (3G, 4G und 5G) sowie Broadcast (DAB).
- IVS Referenzarchitektur mit heterogenen Kommunikationstechnologien zur Vernetzung von Fahrzeugen, Infrastruktur und Verkehrsmanagementzentralen sowie mit transparenter Nutzung komplementärer Kommunikationstechnologien.
- Schrittweise Erweiterung der WLAN-Technologie für neue Use Cases im Kontext des automatisierten Fahrens (Kooperative Wahrnehmung, Austausch von Manöverinformationen etc.), Ausbau der Infrastruktur und Einbeziehung anderer Verkehrsteilnehmer (z. B. Fußgänger und Fahrradfahrer).
- Breite Nutzung von Mobilfunk zur infrastrukturellen breitbandigen Basisvernetzung für Mobilitätsdienste, insbesondere für nicht-sicherheitskritische und flächendeckende Kommunikation wie Internet-Dienste und Cloud-Zugang.
- Ausbau des digitalen Broadcast zur flächendeckenden Verteilung von Verkehrsinformationen; konsequente Maßnahmen zur Verbesserung der Nutzerakzeptanz und Verbreitung von DAB-basierten Endgeräten für Verkehrsinformationen; Nutzung und Ausbau des DAB-Systems EWS für Katastrophenwarnungen.
- Integration existierender Netze und Protokolle der Legacy-Verkehrsinfrastruktur.

Szenario „Konvergenz“

- Ausbau von 5G als flexibles, integriertes Kommunikationssystem mit wesentlich höherer Übertragungsqualität als 4G hinsichtlich Latenz, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit; Abdeckung einer breiten Anzahl von Use Cases im Bereich Sicherheit, Verkehrseffizienz, Komfort; Integration existierender Kommunikationstechnologien wie WLAN ITS-G5.
- Berücksichtigung hoher funktionaler und qualitativer Anforderungen von aktuellen Mobilitätsanwendungen im Design des 5G-Systems hinsichtlich Spektrum, Übertragungsverfahren, neuen Kommunikationsformen wie D2D sowie Informationsverbreitung in geografischen Gebieten.
- Starke Einbeziehung von Technologietrends wie Virtualisierung und Cloud-Computing, Big Data und Fahrzeugautomatisierung und deren Nutzung für Mobilitätsanwendungen in die IVS-Kommunikationsinfrastruktur.
- Nutzung neuer Konzepte und Technologien wie SDN/NFV, Network Slicing und Edge Cloud.
- Konvergenz von existierenden Kommunikationstechnologien und Netzen zu 5G-Systemen bzw. schrittweise Substituierung der WLAN-Technologie ITS-G5 durch 5G.
- Bedarfs- und marktgerechte Frequenzausstattung von europaweit harmonisiertem Spektrum für den Mobilfunk.

6. Implikationen für die Standardisierung

Für eine breite und nachhaltige Anwendung von IKT für Mobilität ist Standardisierung notwendig und verspricht viele Vorteile gegenüber proprietären Systemen. Gleichzeitig sind der Standardisierungsprozess und die Nutzung der Standards von Herausforderungen gekennzeichnet. Dieser Abschnitt stellt die relevanten Standardisierungsgremien und Industriekonsortien im Mobilitätssektor vor und gibt einen Überblick über aktuelle Standards und Standardisierungstrends. Darauf aufbauend werden technische und nicht-technische Hemmnisse für die Standardisierung analysiert und Handlungsfelder im Bereich Standardisierung für die beiden Mobilitätsszenarien „Koexistenz “ und „Konvergenz“ abgeleitet.

6.1 Relevanz von Standards

Im Mobilitätssektor ist Standardisierung eine grundlegende Voraussetzung für die Nutzung von IKT, da sie die Interoperabilität zwischen den Komponenten, beispielsweise Fahrzeugen, des Gesamtsystems sowie die Kompatibilität zwischen Implementierungen verschiedener Hersteller gewährleistet. Darüber hinaus hat sie eine Reihe von Vorteilen, denn Standardisierung

- Schafft Vertrauen in Produkte und Dienste,
- Ermöglicht größere Märkte als proprietäre Lösungen,
- Verringert Kosten und vergrößert den Wettbewerb,
- Minimiert Mehrfachaufwände.

Gleichzeitig ist Standardisierung mit zahlreichen Herausforderungen verbunden, dazu zählen

- Die technische Komplexität der Standards,
- Die Vollständigkeit und Kompatibilität der Spezifikationen,
- Die Konsistenz eines oder mehrerer Standardsets und die Rechtzeitigkeit des Standardisierungsprozesses für die System- bzw. Produkteinführung sowie die Berücksichtigung des aktuellen Stands von Forschung und Entwicklung in den Standards,
- Die Heterogenität und Diversität von Standardisierungsgremien,
- Die Koordinierung von unabhängigen Standardisierungsgremien,
- Die Stimulation von Innovation durch den Standardisierungsprozess bzw. das Vermeiden, dass Standards Innovationen hemmen.

Vorteile und Nachteile sind auf viele technische Bereiche anwendbar, kommen aber im Mobilitätssektor stark zur Geltung.

6.2 Standardisierungsgremien, Industriekonsortien und andere Organisationen

Die Standardisierung im Bereich IVS erfolgt aktuell durch mehrere Organisationen (siehe Abbildung 28). Standardisierungsgremien wie CEN, ETSI und ISO sind offiziell als Standards entwickelnde Organisationen akzeptiert, deren Standards in einem formellen Prozess anerkannt werden. Beispielsweise wird eine Europäische Norm (EN), die von ETSI entwickelt wird, von

allen EU Mitgliedsstaaten kommentiert und abgestimmt sowie abschließend von den nationalen Standardisierungsgremium übernommen. Die hier relevanten Standardisierungsgremien verfügen über Technical Committees (TCs), die Belange von IVS adressieren. Sie haben unterschiedliche Ausrichtungen hinsichtlich der zu standardisierenden Technologien und der Region (beispielsweise erstellen CEN und ETSI, wenn auch nicht ausschließlich, Standards mit europäischer Relevanz).

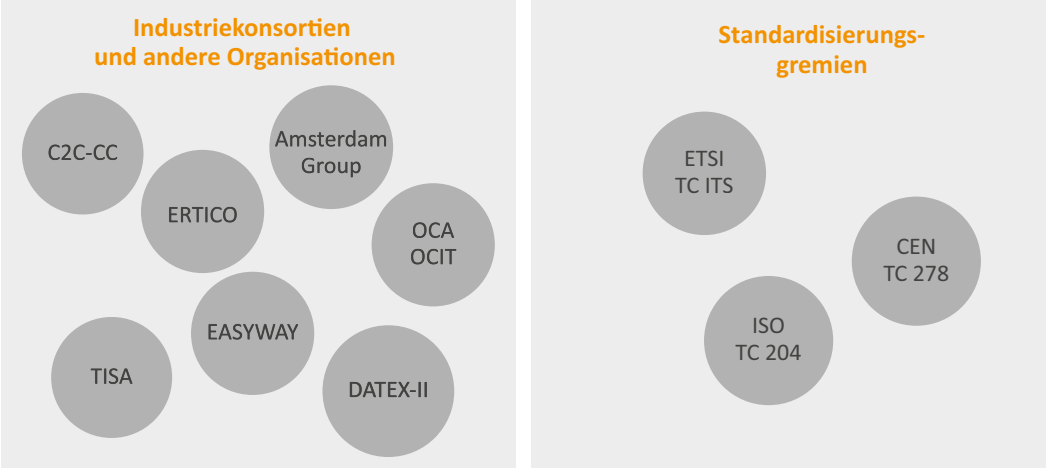


Abbildung 28: Relevante Standardisierungsgremien, Industriekonsortien und andere Organisationen im aktuellen IVS Standardisierungsprozess

Die Tätigkeit der Standardisierungsgremien wird von den handelnden Akteuren bestimmt. Somit ist der Standardisierungsprozess deren Interessen unterworfen und von deren technischen Beiträgen abhängig. Typischerweise haben Standardisierungsgremien einen technologischen Bereich, in dem Standards entwickelt werden; dieser Bereich wird aber kontinuierlich den technischen Entwicklungen angepasst. Daraus können sich Überlappungen in den technischen Bereichen sowie konkurrierende Standards ergeben, so wie es in der Vergangenheit im IVS-Bereich zwischen CEN TC 278 / ISO TC 204 WG18 und ETSI TC ITS der Fall war. Die Harmonisierung von Standards verschiedener Gremien ist langwierig, aufwändig und nicht notwendigerweise erfolgreich. Die Tabelle 11 gibt eine kurze Übersicht über die Tätigkeit der relevanten Standardisierungsgremien, die heute im Bereich IVS aktiv sind.

Standardisierungsgremien	Kurzbeschreibung
CEN TC 278 [O8]	Europäische Standardisierung für C-ITS (Working Group 18), Fokus auf Anwendungen für Straßeninfrastruktur, viele erfolgreiche Standards im Bereichen RDS und TMC und Maut
DIN [O5]	Nationale Standardisierung für IVS, z. B. OTIS, sowie Kommentierung und Übernahme internationaler Standards (z. B. ETSI und ISO)
ISO TC 204 [O12]	Standardisierung für verschiedene Aspekte von ITS, u. a. Mautsysteme, Reiseinformationssysteme, Kommunikation; Harmonisierung mit europäischer Standardisierung
ETSI TC ITS [O9]	Europäische Standardisierung für C-ITS, Fokus auf Kommunikationssysteme und-protokolle mit ITS-G5-basierter Funktechnologie sowie Datensicherheit

→

Standardisierungsgremien	Kurzbeschreibung
IEEE WG 802.11 und WG 1609 [O10]	IEEE Arbeitsgruppen für Standardisierung des WLAN Standards IEEE 802.11 und die Standard-Familie IEEE 1609 in USA; Harmonisierung mit europäischer Standardisierung
SAE [O15]	Standardisierung von Komponenten im Automobilbereich, u.a. Nachrichtenformate und Anforderungsspezifikationen für die US Standard-Familie IEEE 1609; Harmonisierung mit europäischer Standardisierung

Tabelle 11: Relevante aktuelle Standardisierungsgremien (Stand 2016)

Eine Reihe von Industriekonsortien ist eng mit der Standardisierung verbunden. Dabei unterstützen die Konsortien die Spezifikation in dem jeweiligen Standardisierungsgremium oder erstellen die Spezifikation selbst und lassen diese dann offiziell anerkennen. Tabelle 12 zeigt eine kurze Übersicht über die Tätigkeit der in Europa derzeit relevanten Standardisierungsgremien, die heute im Bereich IVS aktiv sind.

Industriekonsortien und andere Organisationen	Kurzbeschreibung
Amsterdam Group [O1]	Allianz von verschiedenen Organisationen zur Systemeinführung von C-ITS in Europa, u.a. Vertreter von Straßeninfrastrukturbetreibern, Automobilherstellen, Netzwerk von Städten etc.
Car-to-Car Communication Consortium (C2C-CC) [O3]	Europäisches Konsortium aus Automobilherstellern und-zulieferern sowie Forschungsorganisationen zur Entwicklung und Förderung der Fahrzeugkommunikation, insbesondere basierend auf WLAN ITS-G5. Entwickelt ein Profil vom Release 1 der C-ITS Standard-Set für die Systemeinführung in Europa
EASYWAY [O6]	Europäisches Projekt zur Entwicklung von Harmonisierung der Einführung von ITS, entwickelt in Kooperation mit CEN den DATEX-II Standard, ein Rahmenwerk zum Austausch von Verkehrsinformationen zwischen Straßenbetreibern und Diensteanbietern
ERTICO [O7]	Europäische Allianz (Public Private Partnership) zur Förderung von IVS
Open Communication Interface for Traffic (OCIT) [N13]	Initiative von deutschen bzw. europäischen LSA-Herstellern zur Spezifikation von offenen Schnittstellen von LSAs (zentralen Komponenten und Systemen, Zentralen und Feldgeräten sowie Steuergeräten und Signalgebern)
Open Traffic Systems City Association (OCA) [O14]	Initiative von Baulastträgern und Betreibern von Systemen für Verkehrssteuerung, Verkehrslenkung und Verkehrsmanagement aus Deutschland, Österreich und Schweiz; definiert eine Gesamtarchitektur mit offenen Schnittstellen für die Verkehrsinfrastruktur (OTS – Open Traffic System), die existierende Spezifikationen, z.B. OCIT [N13], übernimmt
Traveller Information Services Association (TISA) [O16]	Organisation zur Entwicklung von TPEG-Spezifikationen, einem Nachrichtenformat für die Verkehrs- und Reiseinformationen [N11][N12]

Tabelle 12: Relevante Industriekonsortien und andere Organisationen (Stand 2016)

Zwischen Standardisierungsgremien, standardisierungsnahen Organisationen und Industriekonsortien ergibt sich ein komplexes Geflecht von Beziehungen und Kooperationen. Ein besonderer Aspekt ist die Internationalisierung der Standardisierung. Während globale Standards für exportorientierte Industriestaaten wie Deutschland wichtig sind, ist es gleichzeitig eine Herausforderung in global agierenden Standardisierungsgremien den Prozess zu dominieren und Standards zu setzen. Regionale Standards, beispielsweise im europäischen Maßstab von CEN und ETSI, können den Vorteil haben, dass sie besser an die regionalen Bedingungen angepasst werden können.

6.3 Überblick aktueller Standards und Standardisierungstrends

Neben allgemeinen Standards für die Kommunikationstechnologien IEEE 802.11 und deren Erweiterungen, Mobilfunk LTE und LTE-A, Broadcast mit DAB, sowie weitere Kommunikationstechnologien (siehe Abschnitt 5.1.6), spielen für IVS insbesondere auch Datenmodelle, Nachrichtenformate und Schnittstellen für den Austausch von Verkehrsinformationen zwischen Teilsystemen bzw. Komponenten der Verkehrsinfrastruktur eine große Rolle. Darüber hinaus sind auch Standards für Georeferenzierung zu nennen, die es ermöglichen, Georeferenzen effizient in Nachrichtenformaten zu übertragen und Orte auf einer digitalen Karte eindeutig zu identifizieren.

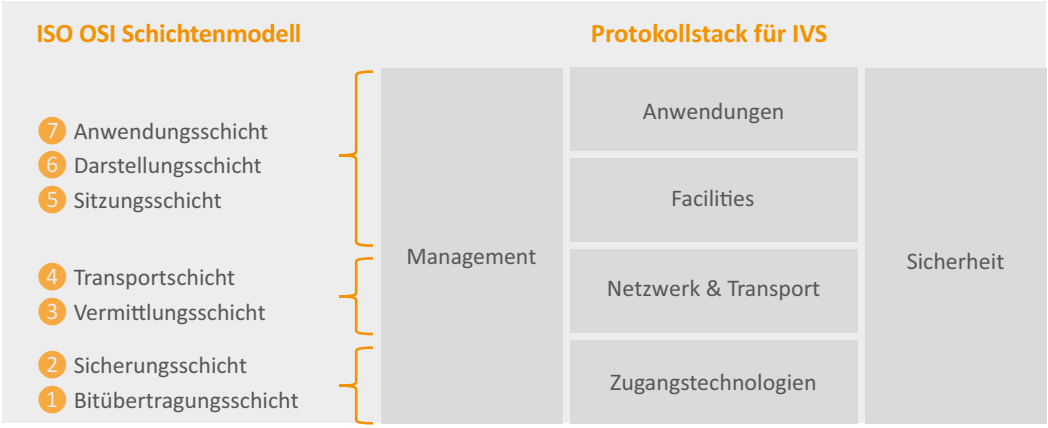


Abbildung 29: IVS Referenzmodell

Die Standards lassen sich anhand des Referenzmodells für IVS (Abbildung 29) kategorisieren. Im Folgenden werden Schlüsselstandards für IVS den verschiedenen Schichten des Referenzmodells zugeordnet und zusammengefasst.

Standards für die **Zugangstechnologien** auf der untersten Schicht umfassen die physikalische Übertragung sowie das Medienzugriffsverfahren. Im Fall von WLAN ist es IEEE 802.11-2012 [N9] bzw. die europäische Variante ITS-G5 in ETSI EN 302 663 [N5], bei DAB der Standard ETSI EN 300 401 [N2] sowie die Erweiterung für DAB+ ETSI TS 102 563 [N4] sowie entsprechende 3GPP-Standards für die Luftschnittstelle von LTE und LTE-A.

Standards für die **Netzwerk- und Transportschicht** sind neben den IETF-Spezifikationen für die TCP/IP-Protokolle auch Standards für das Ad-hoc-Routing mit ITS-G5. Hier ist das GeoNetworking Protokoll EN 302 636-4 und das Basic Transport Protokoll (BTP) ETSI EN 302 636-5 zu nennen, die eine Kommunikation über mehrere drahtlose ITS-G5-Links und eine Verteilung von Nachrichten in geografischen Gebieten für Ad-hoc-Netze spezifizieren.

Die **Facilities-Schicht** definiert Funktionen zur Unterstützung von Anwendungen und Kommunikation. Diese Funktionen wurden von Mobilitätsanwendungen – dem Basic Set of Applications (BSA) [N3] – abgeleitet, die für das initiale Release von Standards als relevant angesehen wurden. Die Kernstandards spezifizieren Nachrichtenformate und Protokolle; im Car-to-X-Protokollstack sind vor allem CAM, DENM, SPAT, MAP relevant:

- ETSI EN 302 637-2 [N6] Cooperative Awareness Message (CAM) als periodische Nachricht (1–10 Hz) , die von jedem Fahrzeug an die Nachbar-Fahrzeuge gesendet wird.
- ETSI EN 302 636-2 [N7] Distributed Environmental Notification Message (DENM) wird von einem Fahrzeug generiert, wenn es eine sicherheitskritische Situation entdeckt hat und an alle Fahrzeuge in einem – von der Anwendung definierten – geografischen Gebiet verteilt.
- ETSI TS 103 301 [N8] definiert mehrere Nachrichtenformate, die für Straßeninfrastrukturdienste benutzt werden, u. a. die Signal Phase and Timing (SPAT)- und die MAP-Nachrichten, die dynamische bzw. statische Kreuzungsinformationen verbreiten.

Zur Übertragung von Verkehrsinformationen über Broadcast oder IP, letzteres z. B. mit Mobilfunk, wurde das **TPEG-Protokoll** [N11][N12] von TISA [O16] standardisiert. Für die Übertragung von **Verkehrsinformationen im Backend** (siehe auch Abschnitt 5.1.6) wurden OCIT (Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems), **DATEX-II** sowie OTS-1 und **OTS-2** [N15] definiert. Existierende Spezifikationen für die Georeferenzierung sind **OpenLR** [N14] und **Agora-C** [N10], beide unterscheiden sich hinsichtlich der Referenzierungsmethode und des Lizenz-Modells.

Das initiale, konsistente Set von Standards für Car-to-X Kommunikation [A3] wurden im Rahmen eines Mandats der Europäischen Kommission [SO5] durch CEN TC 278 und ETSI TC ITS fertiggestellt. Dieser **Release 1** bildet die Basis für das Basic System Profile, das vom C2C-CC für die Einführung von Car-to-X definiert wird. Aktuelle Standardisierungsaktivitäten erweitern den Car-to-X Protokollstack um DCC und Mehrkanalunterstützung (siehe Abschnitt 5.3.1). Darüber hinaus wurden Studien zu zwei Themen initiiert (**Schutz verletzlicher Straßennutzer** und Kommunikationsunterstützung für **Fahrzeugautomatisierung in Konvois/Platoons**); beide Use Cases werden als Schlüsselthemen für das nächste Release von Car-to-X Standards angesehen.

Im Bereich Mobilfunk haben erste Standardisierungsaktivitäten in **3GPP** begonnen, die LTE für fahrzeugbasierte Kommunikation nutzen und erweitern. **LTE-V** [SO4][SO15] kann dabei als Vorstufe der 5G Standardisierung für Automobil-Szenarien angesehen werden.

6.4 Standardisierungsbedarf für Mobilitätsszenarien 2025+ und zukünftige Anwendungen

Im Vergleich der beiden Mobilitätsszenarien ist die Standardisierung im Szenario **„Koexistenz“** im Wesentlichen eine Fortführung von heute mit den gleichen Akteuren, während im Szenario **„Konvergenz“ neue Gremien und Konsortien hinzukommen** (Abbildung 30). Besonders hervorzuheben sind dabei die 5G-Standardisierung in 3GPP und mögliche neue Konsortien mit stärkerer Beteiligung von Herstellern und Betreibern aus dem Bereich Mobilfunk (beispielsweise NGNM Alliance [O13]) und IT. Das schließt auch Aktivitäten von IT-Riesen wie Apple, Google und Microsoft ein, die bereits heute Mobilitätsdienste auf ihren Plattformen (Android Auto, Apple Carplay, Windows Embedded Automotive) anbieten. Daraus folgt auch, dass im Szenario „Konvergenz“ neben den Kernthemen Verkehrssicherheit und Nachhaltigkeit, die Standardisierung von inter- und multimodalem Verkehr sowie IT-Themen wie Virtualisierung, Cloud-Computing und Big Data

an Bedeutung gewinnen werden, auch wenn diese typischerweise in anderen Standardisierungsdomänen sind. Dementsprechend wird der Standardisierungsprozess noch dynamischer werden, mit einer schnelleren Abfolge von Releases und einer starken Abhängigkeit zwischen den Standardsets. Die wichtigen Unterschiede sind in der Tabelle 13 zusammengefasst.

Deskriptor	Koexistenz	Konvergenz
Standardisierungsgremien	Wenige (Hauptsächlich CEN & ETSI)	Viele (3GPP, CEN, ETSI, IETF und andere)
Industriekonsortien u. a.	Existierende (C2C-CC, Amsterdam Group, ERTICO etc.)	Neue Konsortien (Automotive + Telecom und andere)
Themen	Verkehrssicherheit, Nachhaltigkeit, Automatisierung	Verkehrssicherheit, Nachhaltigkeit, inter- und multimodaler Verkehr, Virtualisierung und Cloud-Computing, Big Data, Automatisierung
Releases	Langsam	Dynamisch
Abhängigkeit zwischen Standard Sets	Gering	Hoch

Tabelle 13: Standardisierungsimplikationen in den Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“

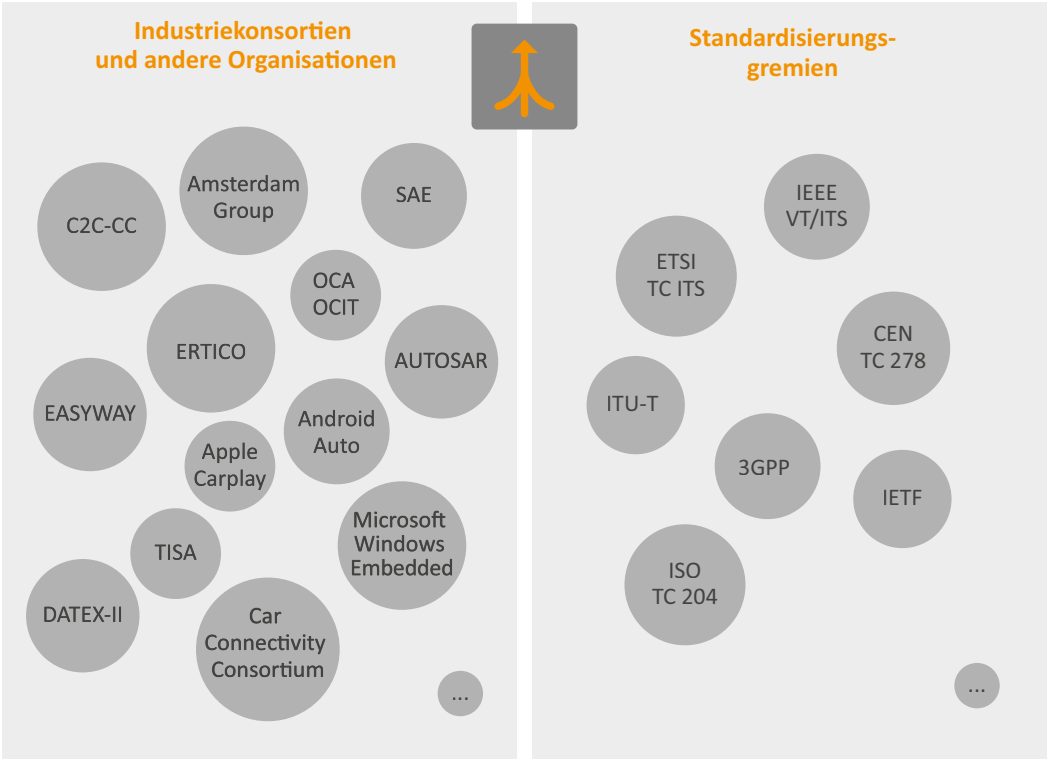


Abbildung 30: Standardisierung im Szenario „Konvergenz“: Mehr Player führen zu komplexeren Standardisierungsprozessen

Obwohl Standardisierung für IVS als sehr wichtig angesehen wird, zieht sich der Prozess der Standardisierung für IVS über mehrere Jahre. Gründe für die langwierigen Standardisierungsprozesse reichen von der hohen Komplexität bis zur Innovationsstimulation:

- **Komplexität:** IKT für Mobilität ist ein Querschnittsthema, das verschiedene Gebiete, u. a. drahtlose und kabelgebundene Kommunikationstechnologien, Nachrichtenformate, Sicherheit, Management und Architekturen für IVS umfasst. Daraus ergibt sich eine hohe Anzahl von Spezifikationen, mit einer Vielzahl von Varianten (u. a. durch optionale oder bedingt optionale technische Funktionen). Diese Komplexität der Standards erschwert den Standardisierungsprozess und die Nutzung der Standards. Darüber hinaus werden in der Zukunft Standards für neue, innovative Technologien (Virtualisierung und Cloud-Computing, Big Data und Fahrzeugautomatisierung) genutzt bzw. geschaffen, die wiederum in anderen Gremien standardisiert werden und die Komplexität weiter erhöhen.

- **Vollständigkeit und Kompatibilität:** Eine erfolgreiche System- und Produkteinführung von IVS, typischerweise basierend auf Sets von Spezifikationen mit einem definierten Set von Funktionen (Standard Release) erfordert eine vollständige Spezifikation, um die Interoperabilität der Teilsysteme und Komponenten zu gewährleisten. Ein Release umfasst Basis- und Testspezifikationen, manchmal mit ergänzenden Industriespezifikationen. Nachfolgende Standard Releases müssen zueinander kompatibel sein (abwärts- und / oder aufwärtskompatibel), um technische Erweiterungen der Spezifikationen vornehmen zu können.

- **Konsistenz und Rechtzeitigkeit:** Technische Sets von Standards müssen in sich konsistent, d. h. widerspruchsfrei sein, was insbesondere für Spezifikationen aus verschiedenen technischen Gebieten, z. B. Nachrichtenformaten und Datensicherheit für Car-to-X Kommunikation, zutrifft. Um den Zyklus von Forschung, Entwicklung und Standardisierung von Technologien zu verkürzen und die Markteinführung von IVS zu beschleunigen, muss der Standardisierungsprozess frühzeitig begonnen und rechtzeitig abgeschlossen sein. Dabei sollte der aktuelle Stand von Forschung und Entwicklung in den Standards berücksichtigt werden.

- **Heterogenität und Diversität:** Die an der Standardisierung beteiligten Gremien und assoziierten Industriekonsortien weisen einen hohen Grad der Spezialisierung auf, was zu einer heterogenen Standardisierungslandschaft mit einer Vielzahl von Organisationen und großer Vielfalt verschiedener Interessengruppen einhergeht. Alle Organisationen haben unterschiedliche Arbeitsweisen, beispielsweise hinsichtlich der Teilnahme an Standardisierungsprozessen (Mitgliedschaft oder nationaler Delegierter) und der Verabschiedung (basierend auf Konsens oder Abstimmung).

- **Koordinierung:** Der Standardisierungsprozess erfordert eine Koordinierung der beteiligten und typischerweise unabhängigen Organisationen auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene. Idealerweise erfolgt die Koordinierung in Verbindung mit Konsolidierungsprozessen in vorgelagerten Forschungs- und Entwicklungsprojekten sowie offiziellen Mandaten zur Schaffung von Standards, wie beispielsweise mit dem Mandat M/453 der EU [SO5], das zum Release 1 von C-ITS Standards [SO6][SO1] geführt hat.

- **Stimulation von Innovation:** Standardisierung kann potentiell technologische Innovationen hemmen. Idealerweise stellt Standardisierung nur den Rahmen und lässt neue standardkonforme Weiterentwicklungen zu, um innovative Anwendungen zu ermöglichen [A1].

Die erfolgreiche Verbreitung neuer IKT-Anwendungen für die Mobilität 2025+ benötigt vollständige, kompatible, konsistente und rechtzeitige Standards. Zum Erreichen diesen Ziels können folgende Handlungsfelder identifiziert werden:

- Eine nachhaltige Entwicklung von IVS erfordert die **kontinuierliche (Weiter-)Entwicklung** von Standards basierend auf existierenden Standard Releases unter Berücksichtigung von Aspekten der Vorwärts- und Rückwärtskompatibilität.
- Die **Offenheit des Standardisierungsprozesses und der Standards** ermöglicht es, neue Kommunikationstechnologien zu berücksichtigen. Das ist insbesondere für das Szenario „Konvergenz, das zum großen Teil auf Standards vom 5G-Mobilfunk beruht, relevant.
- **Nachrichtenformate** müssen **unabhängig von der Kommunikationstechnologie** spezifiziert werden, um eine Übertragung in Netzen mit heterogenen Kommunikationstechnologien zu gewährleisten. Ggf. können technologiespezifische Anpassungen spezifiziert werden, die aber die Technologieunabhängigkeit nicht ausschließen dürfen.
- **Kurze und effektive Entwicklungszyklen** und Genehmigungsprozesse für Standards sind für die Akzeptanz der Standards mitentscheidend. Spezifikationen sollten frühzeitig durch Referenzimplementierungen, Plugtests und Feldtests validiert werden. Vorteilhaft ist eine vorwettbewerbliche Entwicklung von Spezifikationen, beispielsweise in kooperativen Forschungs- und Entwicklungsprojekten.
- Die Entwicklung von Standards von unterschiedlichen Standardisierungsgremien, beispielsweise für verschiedene IVS Anwendungsfelder, können zu inkompatiblen oder inkonsistenten Standards führen. Eine **breite Teilnahme von Stakeholdern** am Standardisierungsprozess, die **aktive Gestaltung der Standards** sowie die **Koordinierung der Gremien und Organisationen** erlauben gremienübergreifende Standardsets.
- Der **Transfer von Forschungsergebnissen in Standards** stellt eine zusätzliche Methode der Ergebnisverwertung dar. Die Ausrichtung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten an Standardisierungsprozesse hilft neue technologische Trends in der Standardisierung zu berücksichtigen.
- Standards können sowohl Hemmnis als auch ein **Katalysator von Innovationen** sein. Um die positiven Effekte der Standards für innovative Produkte und Dienste zu nutzen, sollten Standards offen für neue Technologietrends sowie, mit oder trotz Patenten, implementierbar sein.

7. Hemmnisse und Handlungsfelder

In den vorangegangenen Abschnitten der Studie wurden analytisch bereits wichtige Technologielücken und Entwicklungspotentiale zu den Themen IT-Sicherheit und Verfügbarkeit sowie Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen abgeleitet. Darüber hinaus wurden Implikationen hinsichtlich der zukünftigen Standardisierung hergeleitet. Zum Abschluss der Untersuchung sollen an dieser Stelle zusammenfassende Schlussfolgerungen dahingehend gezogen werden, welche Bereiche und Themen die wesentlichen Hemmnisse und Handlungsfelder darstellen, die es in den kommenden Jahren vordringlich zu adressieren gilt.

Zunächst wird kurz aufgezeigt, wie die Hemmnisse und Handlungsfelder abgeleitet wurden und welche grundlegenden Strategien es für den Umgang mit – wie im vorliegenden Fall – alternativen Zukunftsszenarien gibt. Anschließend werden die identifizierten Hemmnisse und Handlungsfelder kompakt und übersichtlich dargestellt.

7.1 Überblick

Auf Grundlage diverser politischer Strategiepapiere und Roadmaps mit Bezug zur aktuellen IVS-Thematik [S3][S4][S5][S6][S10][S15][S16] und unter Einbeziehung der Einschätzungen der Beiräte der Studie sowie weiterer Experten wurden für die Hemmnisse und Handlungsfelder letztlich fünf relevante Bereiche identifiziert. Es zeigte sich, dass mit den Analysen und Folgerungen der Abschnitte 4 bis 6 bereits drei dieser prioritären Bereiche – nämlich (1) **Sicherheit und Verfügbarkeit**, (2) **Technologien und Netze** sowie (3) **Standardisierung** – erkannt wurden. Darüber hinaus beeinflussen aber auch viele nicht von der Technologie getriebene und eher „weiche“ Faktoren, in welchem Umfang und in welcher Weise die Mobilität von morgen von IKT durchdrungen sein wird. Diese Faktoren wurden den beiden Bereichen (4) **Gesellschaft und Recht** sowie (5) **Wertschöpfung und Innovation** zugeordnet.

In der Gesamtbetrachtung ergeben sich damit die in Abbildung 31 dargestellten übergeordneten Bereiche.

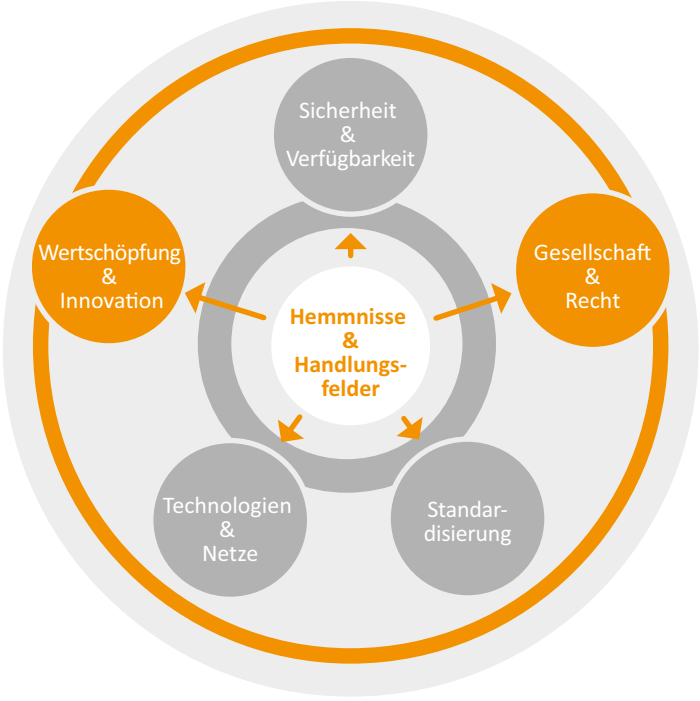


Abbildung 31: Übergeordnete Bereiche für Hemmnisse und Handlungsfelder

Aufgrund des allgemeineren Charakters der beiden Wirkungsbereiche Gesellschaft und Recht sowie Wertschöpfung und Innovation soll mit deren Darstellung begonnen werden. Da sie dem technologieorientierten Fokus dieser Studie folgend in den vorangegangenen Analysen bisher nur eine untergeordnete Rolle spielten, werden sie in diesem Abschnitt umfangreicher dargestellt. Hinsichtlich der anderen Bereiche kann zu großen Teilen auf die Aussagen und Ausführungen der vorhergehenden Abschnitte verwiesen werden, weshalb sich deren Präsentation hier auf eine zusammenfassende und übersichtliche Darstellung der wesentlichen Aspekte beschränkt.

Bei der Überführung der hier vorgestellten Handlungsfelder, in denen folgenreiche Entscheidungen zu treffen sind, in konkrete Strategien und Maßnahmen (in eine bestimmte Richtung) ist zu berücksichtigen, dass hier zwei alternative Szenarien entwickelt wurden. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da traditionelle Instrumente, wie auf Vergangenheitsdaten basierende Trendextrapolationen und einwertige Prognosen, die tatsächlich denkbaren Zukunftsentwicklungen nicht adäquat berücksichtigen können und häufig zu Fehlinterpretationen führen. Die Existenz unterschiedlicher Szenarien erschwert zunächst einmal die Ableitung eindeutiger Handlungsempfehlungen. Für den Umgang mit alternativen Zukunftsbildern existieren daher verschiedene Ansätze (Abbildung 32):

- Einige der Hemmnisse und Handlungsfelder sind **szenarioübergreifend**, d. h. in beiden Szenarien präsent und gleichartig ausgeprägt. Für diese können in einem ersten Schritt **unkritische Strategien** und Maßnahmen umgesetzt werden.
- Viele der Hemmnisse und Handlungsfelder sind szenariospezifisch. Eine gängige Vorgehensweise besteht dann in der Ableitung von robusten **Kompromissstrategien** und zugehörigen Maßnahmen, die beim Eintreffen beider Szenarien relativ Erfolg versprechend sind. In der Regel werden damit schlechtere Ergebnisse erreicht, als wenn man von Beginn an auf das später eingetretene Szenario gesetzt hätte (aber bessere, als wenn man auf das nicht eingetretene Szenario gesetzt hätte).
- Eine weitere Möglichkeit besteht darin, konsequent auf das Eintreffen **eines der Szenarien** zu setzen und für dieses **optimale Strategien** und Maßnahmen umzusetzen. Dabei kann es sich um das Szenario handeln, dessen Eintreten als am wahrscheinlichsten oder als am wünschenswertesten angesehen wird. Gegebenenfalls können auch Ausweichstrategien für den Fall, dass sich ein Nicht-Erreichen des gewählten Szenarios abzeichnet, vorgehalten werden.

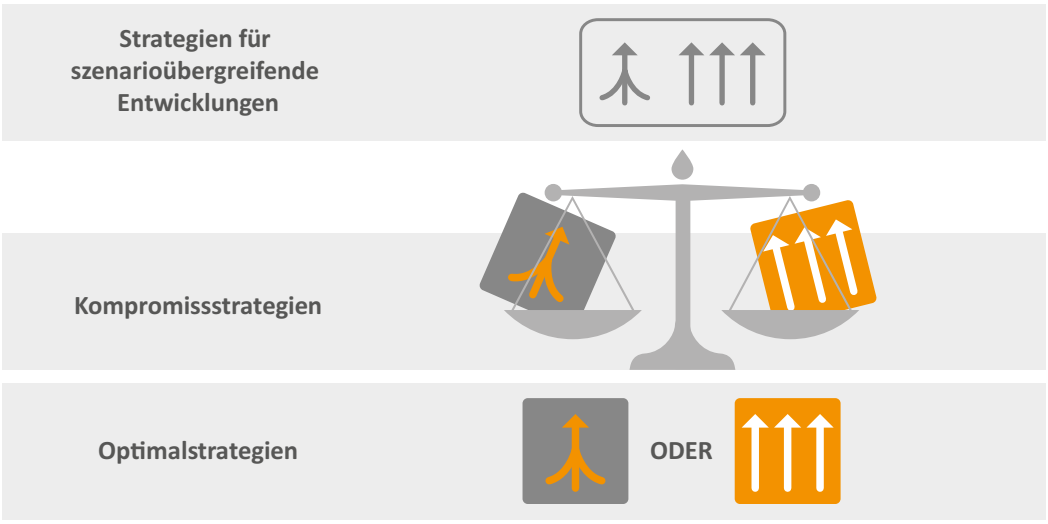


Abbildung 32: Umgang mit der Existenz alternativer Zukunftsbilder

Darüber hinaus ist es hilfreich, bereits bestehende Strategien und Konzepte für IVS- und IKT-Themen, wie die eingangs erwähnten Beispiele, auf ihre Erfolgsaussichten in den beiden Szenarien „Koexistenz“ und „Konvergenz“ hin zu überprüfen. Auch ein möglichst langes Aufrechterhalten von Flexibilität und Offenheit hinsichtlich alternativer Technologieoptionen kann unter gewissen Umständen sinnvoll sein, z. B. wenn wichtige Veränderungen maßgeblicher Faktoren erwartet werden aber noch nicht eingetreten sind. Strategien und Maßnahmen sind immer vor dem Hintergrund des vorherrschenden (politischen) Zielsystems und der darin gesetzten Prioritäten abzuleiten. Konkret spielen bei der Vernetzten Mobilität von morgen sowohl industriepolitische als auch verkehrs-, umwelt-, informationssicherheits- und gesellschaftspolitische Überlegungen eine Rolle.

7.2 Gesellschaft und Recht

Ein reibungsloser und ungestörter Übergang in eine der in den beiden Mobilitätsszenarien 2025+ beschriebenen Zukünfte kann nur gelingen, wenn die gesellschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen dies zulassen. Konfliktpotentiale bestehen einerseits, wenn die nationale, europäische und internationale Rechtsetzung mit den technischen Entwicklungen und mit dem gesellschaftlich mehrheitlich akzeptierten Veränderungsbedarf nicht Schritt halten kann. Andererseits kann sich auch aus der Gesellschaft heraus Widerstand gegen die hier im Mittelpunkt stehenden Innovationen formieren. Dafür können ganz unterschiedliche Gründe ausschlaggebend sein.

Skepsis gegenüber der Vernetzung und Automatisierung ist vor allem im Szenario „Koexistenz“ ein gravierendes Hemmnis, das dort auch 2025 noch technologische Neuerungen bremst. In Deutschland ist sie heute etwas stärker ausgeprägt als beispielsweise in den asiatischen Schwellenländern oder den USA [S32]. Eine solche Ablehnung kann in der Angst vor dem technischen Versagen hochkomplexer Systeme und vor deren Anfälligkeit für Manipulationen und Verletzungen der eigenen Privatsphäre begründet sein (siehe Abschnitt 4.1 und 7.4). Sie kann auch bis hin zu grundsätzlichen ethischen Bedenken reichen, z. B. wenn es darum geht, wer eigentlich nach welchen Regeln in hochgradig automatisierten bzw. kooperativen Systemen darüber entscheidet, wie bei unausweichlichen Kollisionen reagiert werden soll. Gesellschaftliche Widerstände schlagen sich auf individueller Ebene in einer fehlenden Kaufbereitschaft für innovative Produkte und Dienste (sowie ggf. über die Politik auch wieder in hinderlichen rechtlichen Vorschriften) nieder.

Den soeben beschriebenen Akzeptanzproblemen kann mit vertrauensbildender Öffentlichkeits- und Aufklärungsarbeit, welche die gesamtgesellschaftlichen Vorteile des intensiveren Einsatzes von IKT in zukünftigen Verkehrssystemen – vor allem für Zwecke der Sicherheit und Nachhaltigkeit im Straßenverkehr – aufzeigt, begegnet werden. Des Weiteren sind nach Möglichkeit alle betroffenen Stakeholder – Verbraucherorganisationen, Verkehrsbetriebe, Branchenverbände der IKT- und Automobilindustrie, Kommunen etc. – in die Gesetzgebungsprozesse zu IVS einzubeziehen.

Überhaupt sind, unabhängig vom Mobilitätsszenario, alle relevanten Stakeholder an einem Tisch zusammenzubringen, um die hochkomplexen, disziplin- und branchenübergreifenden Herausforderungen bei der Gestaltung der Zukunft der Mobilitätswelt gemeinsam zu bewältigen. Das heißt die Automobilhersteller und ihre Zulieferer, IT Player, die Mobilitätsdienstleister, die Telekommunikationsausrüster und Betreiber von Mobilfunknetzen, Kommunen, Bund und Länder sowie Hochschulen, Forschungseinrichtungen, Standardisierungsgremien sollten sich im Sinne eines strategischen Dialogs regelmäßig (und ggf. in einer geeigneten institutionalisierten Form) abstimmen und in enger Kooperation konsistente Gesamtstrategien entwickeln. Existierende Organisationsstrukturen, der jeweiligen Interessengruppen (5GPPP, C2C-CC, ERTICO, NGNM etc.) sind dabei hilfreich. Darüber hinaus finden aber insbesondere strategische Kooperationen mit branchenfremden Partnern bisher nur unzureichend statt.

Der Politik kommt hierbei eine Schlüsselrolle als Integrator und Wahrer der Interessen der Allgemeinheit zu. Eine klare und konsistente Gesamtstrategie, die aufzeigt, wann aus Sicht der Politik welche Ziele mit welcher Priorität erreicht werden sollen, ist für das Thema „IKT für Mobilität" bisher kaum zu erkennen. Vielmehr existieren Strategiepapiere und Aktionspläne verschiedener Ressorts und Ebenen (EU, Bund, Länder) zu Themen wie Digitalisierung, Automatisierung, Vernetzung und IVS nebeneinander. Hier besteht Handlungsbedarf, sich auf klare Ziele – etwa aus Perspektive der Verkehrspolitik, der Industriepolitik, der Umweltpolitik oder der Sozialpolitik – zu einigen und auch aufzuzeigen, welche davon primär verfolgt werden sollen. Gemeinsam mit den Stakeholdern sind anschließend konkrete Umsetzungs-Roadmaps für die Einführung neuer Technologien zu entwickeln und zu realisieren.

Hinsichtlich heute bestehender rechtlicher Hemmnisse sind zunächst Regelungen zu nennen, die dem hochautomatisierten, vollautomatisierten und autonomen Fahren bzw. hochentwickelten kooperativen Systemen mit einer verteilten Entscheidungsfindung entgegenstehen [A10] [S31]. Wie im Rahmen der Studie gezeigt wurde, stellen diese Themen wichtige Anwendungsfelder für den zukünftigen Einsatz von IKT dar. Hier sind Anpassungen in allen Bereichen des Verkehrsrechts – nämlich Verhaltensrecht (Wiener Straßenverkehrskonvention und nationale Verkehrsordnungen), Haftungsrecht, Zulassungsrecht und Fahrerlaubnisrecht – erforderlich. In einigen Bundesstaaten der USA sind entsprechende rechtliche Rahmenbedingungen schon sehr weitreichend geschaffen. Die Bundesregierung hat die hohe Relevanz dieses Handlungsfeldes bereits erkannt, wie in der „Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren" des Verkehrsministeriums von September 2015 [S4] ersichtlich ist.

Ein entscheidendes rechtliches Hemmnis und Handlungsfeld stellt auch das Thema Datenschutz und Verfügungsrechte an Mobilitätsdaten dar. Unklarheiten über die rechtliche Zulässigkeit der Verwertung von Mobilitätsdaten müssen beseitigt werden. Gleichzeitig muss für die Verkehrsteilnehmer eine hohe Transparenz über die tatsächliche Nutzung ihrer personenbezogenen Mobilitätsdaten herrschen. Die deutsche Automobilindustrie hat dafür im Jahr 2014 brancheneigene Datenschutzprinzipien erstellt [S31]. Auch wenn eine Nicht-Nachverfolgbarkeit von Bewegungsprofilen, Verhaltens- und Mobilitätsmustern einzelner Personen aus technischer Sicht nie hundertprozentig garantiert werden kann, so muss der Rechtsrahmen die Nutzbarkeit von nach dem jeweiligen Stand der Technik anonymisierten und pseudonymisierten Daten erlauben, um sinnvolle Echtzeit-Mobilitätsdienste zu ermöglichen. Bei allen rechtlichen Anpassungen ist zu beachten, dass national oder regional unterschiedliche Rechtsrahmen eine rasche Technologiediffusion sehr erschweren. Deshalb sind mindestens EU-weit einheitliche, besser noch international einheitliche Regelungen anzustreben.

Zuletzt ist noch zu bemerken, dass disruptive Veränderungen – wie sie tendenziell eher im Szenario „Konvergenz" stattfinden bzw. ihren Anfang nehmen – auch unbeabsichtigte und ungeahnte gesamtgesellschaftliche Risiken mit sich bringen können. Trends wie Big Data, Virtualisierung und Cloud Computing können in hochgradig vernetzten, kooperativen und automatisierten Verkehrssystemen zu neuen Abhängigkeiten und Angriffsflächen, zu Prozessen der Machtkonzentration und zu großen Verschiebungen auf Märkten und in der Lebens- und Arbeitswelt führen. Technologiefolgenabschätzungen können hier helfen, langfristige Gefahren schon frühzeitig zu erkennen und ihnen entgegenzuwirken.

In Tabelle 14 werden die beschriebenen Hemmnisse und Handlungsfelder im Bereich Gesellschaft und Recht noch einmal zusammengefasst. Die jeweils primär betroffenen Szenarien sind dabei symbolisch gekennzeichnet.

Hemmnisse	Handlungsfelder	Szenario
Die zu bewältigenden **Herausforderungen** sind hochgradig **komplex** sowie **disziplin- und branchenübergreifend**. Bisher findet eine nur sehr begrenzte Abstimmung und Kooperation statt.	Zusammenbringen aller relevanten **Stakeholder** in einem **gemeinsamen Forum** des strategischen Dialogs und der Kooperation.	
Die **mangelnde Klarheit** der politischen **Gesamtstrategie** zu IVS erschwert die Planbarkeit und Investitionssicherheit für Unternehmen. Hinzu kommen Zuständigkeits- und Kompetenzüberschneidungen zwischen Ministerien/ Ebenen, was die Reaktionszeit verlangsamt.	**Festlegung klarer** politischer **Ziele** und **Prioritäten** im Zusammenhang mit IVS.Erarbeitung konsistenter Gesamtstrategien und Umsetzungs-Roadmaps mit konkretem Zeitbezug für die Einführung neuer Technologien.	
Der bestehende **Rechtsrahmen** erlaubt hochgradig **automatisiertes Fahren** im Straßenverkehr nicht. National unterschiedliche Regelungen erschweren eine rasche Technologiediffusion.	Anpassungen im **Straßenverkehrsrecht**. Schaffung eines EU-weit harmonisierten, besser noch international **einheitlichen Rechtsrahmens** für automatisiertes Fahren.	
Mit dem bestehenden **Rechtsrahmen** sind hochentwickelte **Kooperative Systeme**, bei denen Straßenfahrzeuge auch von außerhalb gesteuert werden, nicht vereinbar.	Anpassungen im **Straßenverkehrsrecht**. Schaffung eines EU-weit harmonisierten, besser noch international **einheitlichen Rechtsrahmens** für Kooperative Systeme.	
Unklarheiten im Umgang mit **Mobilitätsdaten** und über die rechtliche Zulässigkeit ihrer Verwertung einerseits sowie unzureichende Transparenz über die tatsächliche Nutzung personenbezogener Mobilitätsdaten andererseits stehen der zunehmenden Vernetzung im Verkehr entgegen.	Anpassungen im **Datenschutzrecht**, welche die Nutzung anonymisierter/ pseudonymisierter Daten für Echtzeit-Mobilitätsdienste erlauben, bei gleichzeitiger Wahrung berechtigter Datenschutzinteressen und höchstmöglicher Transparenz über die Datenverwendung. Europaweite Harmonisierung.	
Die Angst vorm „gläsernen Autofahrer“ und vor **Verletzungen der Privatsphäre** führt zu gravierenden Akzeptanzhemmnissen für vernetzte Fahrzeuge.	Verschärfungen im **Datenschutzrecht**, speziell im Bereich von Mobilitätsanwendungen. Konsequente Umsetzung datenschutzrechtlicher Grundsätze.	
Durch die **Technologieskepsis** gegenüber automatisierten, vernetzten und kooperativen Systemen werden die Potentiale von IVS nicht voll ausgeschöpft.	Vertrauensbildende Öffentlichkeitsarbeit und öffentlicher Dialog über die Vor- und Nachteile von IVS. **Einbindung aller Stakeholder** in die Gesetzgebungsprozesse zu IVS.	
Die Trends Big Data, Virtualisierung und Cloud Computing können in hochgradig vernetzten, kooperativen und automatisierten Verkehrssystemen **ungeahnte Risiken** mit sich bringen.	Technologiefolgenabschätzungen zu den gesamtgesellschaftlichen Auswirkungen eines Entwicklungspfades, der das Szenario „Konvergenz“ weiter in die Zukunft fortsetzt.	

Tabelle 14: Hemmnisse und Handlungsfelder im Bereich Gesellschaft und Recht

7.3 Wertschöpfung und Innovation

Neben der gesellschaftlichen und der politisch-rechtlichen Einflusssphäre spielen auch Faktoren, die maßgeblich auf die eigentlichen Wertschöpfungs- und Innovationsprozesse einer Vernetzten Mobilität einwirken, eine entscheidende Rolle für das Erreichen der in den Mobilitätsszenarien 2025+ skizzierten Entwicklungen. Innovationen benötigen ein attraktives und unterstützendes

Umfeld. Innovative Produkte und Dienste, welche neue Use Cases für IKT im Zusammenhang mit Mobilität zur Realität werden lassen, können sich nur dann etablieren, wenn es gelingt, nachhaltig funktionsfähige Wertschöpfungsketten herauszubilden. Das bedeutet, eine Beteiligung an solchen Wertschöpfungsketten muss für jedes der beteiligten Unternehmen wirtschaftlich profitabel und für jeden der beteiligten Akteure ohne erwerbswirtschaftliches Ziel zumindest wirtschaftlich tragfähig sein.

Dies stellt durchaus eine sehr große Herausforderung dar. Für sehr viele der Use Cases, insbesondere für solche, welche die Sicherheit und die Nachhaltigkeit des Verkehrssystems als Ganzes erhöhen, existieren zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch keine Geschäftsmodelle. Es ist absehbar, dass ein großer Teil der Use Cases nur gemeinsam von mehreren Partnern – auch aus unterschiedlichen Branchen – erbracht werden kann. Hinzu kommt, dass der Staat mit seiner Verantwortung für die Daseinsvorsorge – konkret für die Funktionsfähigkeit von Verkehrs- und Kommunikationsinfrastrukturen – selbst ein entscheidender Akteur in diesen Wertschöpfungsketten sein wird. Es wird darauf ankommen, privatwirtschaftliche und gesamtgesellschaftliche Vorteile von einzelnen IVS-Elementen und konkreten Use Cases genauer zu eruieren, einander gegenüberzustellen und Mechanismen zu entwickeln, die einen schrittweisen Aufbau entsprechender Systeme unter Berücksichtigung der berechtigten erwerbswirtschaftlichen Interessen investierender Unternehmen ermöglichen. Die relevanten Stakeholder sollten – ausgehend von dem unter Abschnitt 7.2 angeregten strategischen Dialog – gemeinsam kooperative Geschäftsmodelle entwickeln und auch erforderliche Organisations- und Betreibermodelle erarbeiten und umsetzen.

Wichtig sind in diesem Zusammenhang auch volkswirtschaftliche Analysen, welche die Potentiale und Gefahren für den Standort Deutschland, für einzelne Branchen und Wirtschaftsregionen aufdecken. Wahrgenommene Risiken, wie der Verlust traditioneller Geschäftsfelder und Arbeitsplätze, können ein bedeutsames Innovationshemmnis darstellen und dazu führen, dass zukunftsträchtige Segmente der Wertschöpfung von anderen Akteuren aufgegriffen werden. Deshalb kommt auch der industriepolitischen Frühaufklärung eine wichtige Rolle zu. Insbesondere den KMUs fehlt meist die Möglichkeit, eigene strategische Marktbeobachtungen in diese Richtung anzustellen.

Problematisch ist auch die Entstehung von Ineffizienzen durch eine unzureichende Koordination von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Deshalb sollte bei der vorwettbewerblichen Forschungsförderung zu IVS-Themen darauf geachtet werden, die richtungsweisenden Aktivitäten von Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Hochschulen in Clustern zu bündeln.

Die herausragende Bedeutung von Mobilitätsdaten für die zukünftige Wertschöpfung im Mobilitätssektor wurde bereits zu Beginn der Studie angesprochen. Es ist festzustellen, dass die deutsche Industrie bei den Themen Big Data und Cloud Computing im Vergleich zu den USA eine gewisse Schwäche aufweist. Die großen globalen Anbieter entsprechender Lösungen sind heute fast ausschließlich im US-amerikanischen Raum beheimatet. Vor allem für das „Konvergenz“-Szenario stellt dies aus deutscher Sicht einen Nachteil dar. Insbesondere in diesem Szenario, in welchem cloudbasierte Anwendungen im Straßenverkehr allgegenwärtig sind, besteht die Gefahr, dass ein Großteil der zukünftigen Wertschöpfung im Ausland stattfinden wird. Ein entsprechendes Handlungsfeld besteht in diesem Szenario demgemäß darin, die deutsche Industrie dazu zu befähigen, in diesen Technologiefeldern eigene Kompetenzen aufzubauen. Wenn eine integrierte „AUTO-IT-MOTIVE“-Industrie am Entstehen ist, so müssen geeignete Entwicklungs- bzw. Ansiedlungskonzepte erarbeitet und umgesetzt werden.

Kennzeichnend für viele Innovationen im Bereich der Vernetzten Mobilität ist, dass sie häufig im Umfeld von jungen Start-ups, hochschulischen Ausgründungen oder KMUs entstehen. Solche Unternehmen finden in Deutschland im Vergleich zum Silicon Valley und ähnlich attraktiven Techno-

logiestandorten jedoch keine idealen Bedingungen vor. Hinsichtlich bürokratischer Hürden, eines erschwerten Zugangs zu Risikokapital und eines eher abschreckenden Insolvenzrechts existieren gewisse innovationshemmende Standortnachteile im Vergleich zu den USA. Die Verbesserung der Gründungsbedingungen sollte daher auf der Agenda der politischen Entscheidungsträger stehen. Es sollte auch darüber nachgedacht werden, einen expliziten Förderschwerpunkt auf Themen im Zusammenhang mit der Vernetzten Mobilität zu setzen, denn Kommunikation für die bzw. während der Mobilität ist ein Zukunftsthema, welches uns die nächsten 10 bis 20 Jahre begleiten wird. Die bestehende Innovationsförderung sollte zudem besser auf KMUs ausgerichtet werden.

Ein weiteres Innovationshemmnis besteht darin, dass viele Innovationspotentiale ungenutzt bleiben, da einzelne Ideenträger zwar prinzipiell marktfähige Ideen besitzen, sie diese aber aufgrund fehlender eigener Ressourcen oder einer unzureichenden Kenntnis über die Märkte, benötigte Technologien oder die geltenden Rahmenbedingungen nicht umsetzen können. Mit dem Einsatz von Konzepten des Wissensmanagements und der Open-Innovation können auch die Potentiale einer kollektiven Wissensbasis erschlossen werden. Viele Innovationen scheitern an der fehlenden Berücksichtigung psychologischer, sozialer, rechtlicher, ökologischer und ökonomischer Faktoren. Deshalb sollten in zukünftigen Innovationstestfeldern für neue Produkte und Dienstleistungen auch explizit solche Faktoren – mit einer Begleitung durch entsprechende Wissenschaftsdisziplinen – berücksichtigt werden. Die aktuelle „Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren“ [S4] sieht als Testfeld vor allem die Bundesautobahn 9 vor. Hierbei ist anzumerken, dass ein Großteil der zukünftig relevanten Use Cases für IKT im Bereich der Mobilität seine Potentiale in urbanen Räumen entfalten wird und es daher sinnvoll erscheint, auch hierfür Testfelder zu schaffen.

Speziell für das „Konvergenz“-Szenario, dass von einer groß angelegten Aufrüstung bestehender Verkehrswege zu „intelligenten“ Infrastrukturen in Ballungsräumen und im Fernstraßennetz ausgeht, könnten die versunkenen Kosten in bereits bestehende Technologien und Telematiksysteme innovationshemmend wirken. Es erscheint sinnvoll zukünftig beim Neubau, Ausbau und der Sanierung von Verkehrsinfrastrukturen bereits die zukünftig erwartbaren Technologien im Sinne eines vorausschauenden Bauens zu berücksichtigen. Auch proprietäre Systeme und unzureichende Schnittstellen können den Erfolg von im Szenario „Konvergenz“ vorhergesagten multi- und intermodalen Mobilitätskonzepten sowie cloudbasierenden (Lokalisierungs-)Diensten erschweren. Hier könnten Crowdsourcing- und Open-Data-Ansätze, insbesondere für Geodaten und Mobilitätsdaten, eine entscheidende Rolle als Enabler zukommen.

In Tabelle 15 werden die beschriebenen Hemmnisse und Handlungsfelder im Bereich Wertschöpfung und Innovation noch einmal zusammengefasst. Die jeweils primär betroffenen Szenarien sind dabei symbolisch gekennzeichnet.

Hemmnisse	Handlungsfelder	Szenario
Für viele Use Cases **fehlen** noch **Geschäftsmodelle**. Sie können nur in Wertschöpfungsnetzen mehrerer Partner erbracht werden. Die Verantwortung des Staates für Infrastrukturen (Verkehr und IKT) macht auch ihn zu einem wichtigen Akteur.	**Erarbeitung** von kooperativen **Geschäftsmodellen** sowie von Organisations- und Betreibermodellen für innovative Use Cases der Vernetzten Mobilität **gemeinschaftlich** durch privatwirtschaftliche Akteure (verschiedener Branchen) und die öffentlichen Hand.	
Die **volkswirtschaftlichen** und gesamtgesellschaftlichen Auswirkungen des Wandels der Mobilität sind mit großer Unsicherheit behaftet. Wahrgenommene **Risiken hemmen Innovationen**.	Durchführung **volkswirtschaftlicher Analysen**, die Chancen und Risiken für den Standort Deutschland sowie potentielle Gewinner und Verlierer identifizieren. Industriepolitische Frühaufklärung in Unternehmen.	

→

Hemmnisse	Handlungsfelder	Szenario
Eine **unzureichende Koordination** von **Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten** führt zu Mehr- und Parallelaufwänden.	Vorwettbewerbliche Forschungsförderung und Bündelung der IVS-Aktivitäten von Wirtschaft, Forschungseinrichtungen und Hochschulen in **Spitzenforschungsclustern**.	
Die **relative Schwäche** der deutschen Industrie bei den Themen **Big Data** und **Cloud Computing** im Vergleich zu den USA könnte dazu führen, dass ein Großteil der zukünftigen Wertschöpfung im Ausland stattfindet.	Erarbeitung und Umsetzung von Ansiedlungskonzepten für eine „**AUTO-IT-MOTIVE**"-Industrie in Deutschland. Unterstützung der Automobilindustrie beim Aufbau eigener IT-Kompetenzen.	
Viele Innovationen im Bereich der Vernetzten Mobilität und von IVS entstehen in jungen **Start-ups** und **KMUs**, welche in Deutschland jedoch **keine idealen Bedingungen** vorfinden.	**Verbesserung der Gründungsbedingungen** und Setzung eines neuen Förderschwerpunkts auf IVS-Themen. Bessere Ausrichtung der **Innovationsförderung** auf KMUs.	
Innovationspotentiale bleiben ungenutzt, wenn einzelne Marktakteure mit der Umsetzung ihrer Ideen aufgrund **fehlender Ressourcen** oder **unzureichenden Wissens** überfordert sind.	Erschließung der Potentiale einer kollektiven Wissensbasis durch **Wissensmanagement** und **Open-Innovation-Konzepte**.	
Die fehlende Berücksichtigung psychologischer, sozialer, rechtlicher, ökologischer & ökonomischer Faktoren führt häufig dazu, dass Inventionen der **Sprung zu Innovationen nicht gelingt**.	Schaffung von **Innovationstestfeldern** für neue Produkte und Dienstleistungen (mit einer wissenschaftlichen Begleitung durch alle für einen Markterfolg relevanten Disziplinen).	
Die **versunkenen Kosten bestehender Verkehrsinfrastrukturen** und der darin verwendeten Technologien wirken innovationshemmend.	Berücksichtigung von zukünftig denkbaren IKT-Elementen bei Neubau, Ausbau und Sanierung von Verkehrsinfrastruktur (**vorausschauendes Bauen**).	
Proprietäre Systeme und unzureichende Schnittstellen erschweren den Erfolg **multi- und intermodaler Systeme** sowie von auf einer präzisen Verortung basierenden Diensten.	Unterstützung von **Crowdsourcing**- und **Open-Data-Ansätzen** (insbesondere für Geodaten und Mobilitätsdaten).	

Tabelle 15: Hemmnisse und Handlungsfelder im Bereich Wertschöpfung und Innovation

7.4 Sicherheit und Verfügbarkeit

Ausgehend von den Ergebnissen der Analysen zu den Bereichen Sicherheit und Verfügbarkeit im Kapitel 4 wurden Technologielücken und Entwicklungspotentiale bereits aufgezeigt und ausführlich erläutert (vgl. Abschnitt 4.3). Nachfolgend sollen die identifizierten Hemmnisse und die daraus abgeleiteten Handlungsfelder in tabellarischer Form zusammenfassend dargestellt werden. Tabelle 16 zeigt Hemmnisse und Handlungsfelder für den Bereich Sicherheit.

Hemmnisse	Handlungsfelder	Szenario
Existierende **PKI-Ansätze** lassen sich nicht 1 : 1 auf die **Car-to-X-Kommunikation** übertragen.	Anpassung von **PKI-Ansätzen** an **Car-to-X.**	
Besondere Anforderungen an PKI: Ständig **wechselnde Kommunikationsteilnehmer**, **Skalierbarkeit** (Anzahl Fahrzeuge), **internationale** Funktionsfähigkeit, **Anonymität**.	Anpassung und Validierung der Ansätze auf internationaler Ebene (Forschungsbedarf, **Pilotierung, internationale Standardisierung** und Tests).	
Trend in Richtung **hybride Netze** → bisher **keine Technologie- bzw. netzwerkübergreifende Sicherheitskonzepte** vorhanden, Bsp.: Car-to-X-PKI.	Entwicklung neuer **Sicherheitskonzepte für hybride Netze** und Systemverbünde.	
Kryptographische Verfahren für Datensicherheit allein sind **nicht ausreichend** für sichere Kommunikation, insbesondere für Fahrzeugautomatisierung.	Nutzung von **Plausibilitätschecks** sowie Definition von **sicheren Zuständen für kritische Funktionen.**	
Fehlende Erkennbarkeit von **Insider-Attacken**, die von kryptographischen Verfahren nicht erkannt werden können (Manipulierbarkeit von Inhalten).	**Sicherung von Zugängen** zu Serverstandorten, **Schulungen** der Mitarbeiter/Administratoren (Steigerung sowie regelmäßige Auffrischung des Sicherheitsbewusstseins) sowie **technische Unterstützung** der Einhaltung von Sicherheitsanforderungen (beispielsweise Auto-Logout).	
Fehlende Erkennbarkeit von **Angriffen außerhalb kryptografischer Verfahren** (Manipulierbarkeit von Signallaufzeiten, relay-attacks).	Erforschung der **Synchronisation von Zeitgebern** sowie der **Erkennung von Signallaufzeitmanipulationen** bzw. Entwicklung von Konzepten, die robust gegen Signallaufzeitmanipulationen sind.	
Problem der **Verfolgbarkeit** und Verletzung der **Privatsphäre**. Bestehende technische Lösungen gewährleisten keine netzwerk-/**systemübergreifende Anonymität** (Internetverbindung).	Einsatz von **Mechanismen zum Schutz der Privatsphäre** immer wenn sinnvoll und möglich **(Pseudonymisierung, Anonymisierung, Verschlüsselung).**	
Möglichkeit **systemimmanenter Fehler** (z. B. in den Softwarealgorithmen).	Analyse und **modellgestützte Entwicklung von Testfällen** für komplexer Systeme für die zukünftige Mobilität.	
Möglichkeit der **verzögerten Reaktion** auf zu spät erkannte Gefahren beim vollautomatisierten Fahren.	**Monitoring** komplexer Verkehrssituationen zur **Prognose** möglicher Gefahren sowie Erkennung **Anomalien mit Hilfe von Big Data Analytics** (Security-Unterstützung in ITS).	
Möglichkeit des **Ausfalls von (Teil-) Systemen**.	Kompensation durch die **Extraktion impliziter Informationen** aus den Daten eines oder mehrerer verbleibender Sensoren/Systeme mit Hilfe von Inferenz.	

→

Hemmnisse	Handlungsfelder	Szenario
KT-Netze als **kritische Infrastruktur** auch im Verkehrssystem.	**Schutzkonzepte** für kritische Infrastrukturen.	

Tabelle 16: Hemmnisse und Handlungsfelder im Bereich Sicherheit

Die zusammengefasste tabellarische Darstellung von Hemmnissen und Handlungsfeldern für den Bereich Verfügbarkeit sind in Tabelle 17 aufgezeigt.

Hemmnisse	Handlungsfelder	Szenario
Keine flächendeckende räumliche Netzabdeckung im gesamten Verkehrsnetz: Mobilfunk (4G/5G), RSUs / WLAN, Verfügbarkeit DAB sehr länderspezifisch unterschiedlich.	**Infrastrukturausbau, Entwicklung hybrider Netzkonzepte** zur Erhöhung der Redundanz bzw. Resilienz (DAB bzw. Ad-hoc-Netzwerke als Redundanz zum Mobilfunk, bzw. D2D im 5G Mobilfunk).	
Verlust sicherheitsrelevanter Informationen bei **Netzüberlast**.	Entwicklung von Konzepten und Methoden zur **Sicherstellung der Kommunikation sicherheitsrelevanter Daten auch in Extremsituationen**, z. B. mittels Priorisierung oder separater Übertragungskanäle.	
Fehlende Echtzeitfähigkeit (im einstelligen Millisekunden-Bereich) für sicherheitskritische Anwendungen, insbesondere bei Mobilfunk.	Konsequenter Ausbau des **5G-Mobilfunknetzes.**	
Inkonsistenzen beim Zusammenwirken **redundanter Kommunikations- und Sensorsysteme**.	Entwicklung von Lösungen für den **konsistenten Betrieb** redundanter Kommunikations- und Sensorsysteme (z. B. gemeinsame, konsistente Datenhaltung).	
Permanente zeitliche Verfügbarkeit von Kommunikation aktuell nicht garantierbar.	**Neue Konzepte**, v. a. für Redundanz und Priorisierung.	
Auslastung der vorhandenen Übertragungskapazität durch enorme Zunahme der Anzahl an Kommunikationsteilnehmern aufgrund zunehmender Fahrzeugvernetzung.	**Erhöhung der Ausnutzung genutzter Frequenzbänder** durch Sekundärnutzer mithilfe von Cognitive Radio. Ausbau des 5G-Mobilfunknetzes zur Erhöhung der Übertragungskapazität.	

Tabelle 17: Hemmnisse und Handlungsfelder im Bereich Verfügbarkeit

Hinsichtlich der Verfügbarkeit kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die Hemmnisse in der Hauptsache in der nicht flächendeckenden Verfügbarkeit von Mobilfunknetzen sowie der fehlenden Echtzeitfähigkeit als Voraussetzung für sicherheitskritische Anwendungen (beide besonders für das Szenario „Konvergenz“) zu suchen sind. Grundsätzlich eignet sich für die Echtzeitdatenübertragung auch die WLAN-Technologie; Anwendungen, wie sie im Szenario „Konvergenz“ skizziert wurden, wären damit jedoch nicht möglich. Die Vorteile der mobilen Vernetzung kommen somit erst mit dem Aufkommen der neuen Mobilfunkgeneration 5G zur Geltung, deren konsequenter Ausbau hiermit auch empfohlen wird.

7.5 Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen

In Abschnitt 5 wurden Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen für Mobilitätsanwendungen analysiert und verglichen. Dabei wurde die technologische Leistungsfähigkeit bewertet und neue Anforderungen, die sich aus den Technologietrends ergeben, berücksichtigt. Für die primären Kommunikationstechnologien wurden Entwicklungspotentiale aufgezeigt und Technologieszenarien skizziert. In Tabelle 18 werden die beschriebenen Hemmnisse und Handlungsfelder aus Abschnitt 5 noch einmal zusammengefasst. Die jeweils primär betroffenen Szenarien sind wiederum symbolisch gekennzeichnet.

Hemmnisse	Handlungsfelder	Szenario
Keine der heute existierenden primären Kommunikationstechnologien erfüllt **alle Anforderungen für IVS**.	**Komplementäre** Anwendung von Kommunikationstechnologien und Schaffung von **flexiblen Netzstrukturen mit heterogenen Technologien.**	
Ausstattungsgrad von WLAN bei Fahrzeugen und Infrastruktur reicht nicht für eine effektive Nutzung der IVS-Anwendungen.	**Anreize** für WLAN-Ausstattung, **Smartphone-**basierte IVS-Lösungen im Fahrzeug, **RSU-Ausbau**, Schrittweise **Erweiterung um Funktionen** zur Unterstützung des automatisierten Fahrens sowie Einbeziehung aller Verkehrsteilnehmer.	
Mobilfunk wird ausschließlich für die **infrastrukturelle breitbandige Basisvernetzung** für Mobilitätsdienste verwendet.	Berücksichtigen von **IVS-spezifischen Anforderungen im Design von 5G Mobilfunk** – sehr geringe Latenz, sehr hohe Zuverlässigkeit, direkte Kommunikation (D2D), Multicast (MBMS), bedarfs- und marktgerechte Frequenzausstattung.	
Digitaler Broadcast ist zwar ausgebaut, wird aber wenig genutzt.	**Verbesserung der Verbreitung** von DAB Endgeräten für Verkehrsinformationen (z. B. durch Stärkung der Digitalradioverbreitung).	
Netze für IVS sind an Kommunikationstechnologien und Anwendungen gebunden, so dass isolierte Netze mit separierten Strukturen und hoher Abhängigkeit von Netzwerkbetreibern entstehen.	**IVS Referenzarchitektur mit heterogenen Kommunikationstechnologien**, Schaffen eines skalierbaren, flexiblen und betreiberunabhängigen Systemverbunds mit offenen Schnittstellen.	
Verkehrsdaten werden abhängig von der Kommunikationstechnologie gespeichert und verarbeitet, woraus **Inkonsistenzen** in den Daten entstehen.	**Konsistente, technologieübergreifende Datenspeicherung und -haltung** mit Datensynchronisierung innerhalb der Verkehrsinfrastruktur sowie mit Ad-hoc-Netzen.	
Die Kommunikation in IVS nutzt **proprietäre oder inkompatible Daten- und Nachrichtenformate**, die zu inkonsistenten Informationen führen.	Nutzung **offener und standardisierter Schnittstellen, Daten- und Nachrichtenformate; technologieunabhängige** IVS-Nachrichtenformate bzw. Konvertierbarkeit zwischen verschiedenen Formaten.	

→

Hemmnisse	Handlungsfelder	Szenario
IVS Netze werden ausgebaut ohne **technologische Trends** zu berücksichtigen, weshalb sich das volle Potential von IVS sich nicht entwickelt.	**Strategien, Architekturen und Konzepte** zur Virtualisierung der Verkehrsinfrastruktur, effektiven Nutzung von Cloud- und Big Data-basierten Anwendungen.	
Starke **Abhängigkeit** von einzelnen Netzen und Kommunikationstechnologien, keine **Redundanz** in der Datenübertragung.	**Schutz kritischer Kommunikationsinfrastruktur für IVS**, Ausbau von Broadcast für skalierbare und überregionale Verkehrsinformationsverteilung auch in Katastrophenszenarios.	
Netze der **existierenden Verkehrsinfrastruktur** werden trotz IVS Ausbau weiter betrieben, so dass parallele Verkehrsinfrastrukturen entstehen.	**Integration** der existierenden Verkehrsinfrastruktur in IVS-Netze, **Migration** von existierenden Kommunikationstechnologien und Netzen zu WLAN („Koexistenz“) bzw. 5G („Konvergenz“).	

Tabelle 18: Hemmnisse und Handlungsfelder im Bereich Technologien und Netze

7.6 Standardisierung

Im Abschnitt 6 wurde die hohe Relevanz von Standards und des Standardisierungsprozesses erläutert und ein Überblick über Standardisierungsgremien, Industriekonsortien und anderer Organisationen gegeben. Herausforderungen, Entwicklungen und Implikationen für die IVS Standardisierung wurden herausgearbeitet und szenariospezifisch konkretisiert. Diese werden in Tabelle 19 zusammengefasst. Die jeweils primär betroffenen Szenarien sind wieder symbolisch gekennzeichnet.

Hemmnisse	Handlungsfelder	Szenario
Nach dem Finalisieren des initialen Sets von Standards für Car-to-X Kommunikation stockt der **Standardisierungsprozess**, um die Kompatibilität der Standards zu gewährleisten.	**Kontinuierliche (Weiter-)Entwicklung von Standards** für IVS basierend auf existierenden Standard Releases unter Berücksichtigung von Aspekten der Vorwärts- und Rückwärtskompatibilität.	
In der Standardisierung werden keine **neuen Entwicklungen von Kommunikationstechnologien** aufgegriffen, stattdessen bleibt es beim Status-Quo um das Wachsen des Ausstattungsgrades von Fahrzeuge nicht zu gefährden.	**Offenheit der Standards für neue Kommunikationstechnologien**, wie 5G-Mobilfunk, Koordinierung von Standardisierungsgremien für IVS und Mobilfunk.	
Standards spezifizieren **Nachrichtenformate** für IVS so, dass sie letztendlich nur für bestimmte Kommunikationstechnologien bzw.-netzstrukturen nutzbar sind.	Spezifikation von Nachrichtenformaten **unabhängig von der Kommunikationstechnologie mit technologiespezifischen Anpassungen.**	

→

Hemmnisse	Handlungsfelder	Szenario
Die Entwicklung der Standards nimmt eine erhebliche **Zeitdauer** in Anspruch und führt zu Verzögerungen bei der Produktenwicklung und Systemeinführung.	**Kurze und effektive Entwicklungszyklen und Genehmigungsprozesse für Standards**, frühzeitige Validierung und Implementierungen, vorwettbewerbliche Entwicklung von Spezifikationen bzw. deren Anforderungen durch Beteiligung aller Stakeholder.	
Standards für Anwendungsfelder werden von **verschiedenen Standardisierungsgremien** entwickelt. Die Fragmentierung der Standards führt zu inkompatiblen und inkonsistenten Standards.	Breite Teilnahme am Standardisierungsprozess, **aktive Gestaltung der Standards und Koordinierung der Gremien und Organisationen**, Harmonisierung der Standards aus verschiedenen Domänen und Technologiebereichen.	
Ergebnisse aus Forschungsprojekten werden nicht in den Standardisierungsprozess transferiert.	**Ausrichtung** von Forschungs- und Entwicklungsprojekten an die **Standardisierungsprozesse** unter Mitwirkung der Projektpartner an Anforderungsanalyse, Spezifikation oder Validierung der Standards.	
Standards erweisen sich als **Innovationshemmnis**, da sie neue Konzepte oder Verfahren aus Gründen der Kompatibilität ausschließen oder von Patenten abgedeckt sind, die für eine Implementierung des Standards essentiell sind.	**Offenheit** der Standards für Technologietrends im Standardisierungsprozess, transparenter und fairer Umgang mit **geistigen Eigentumsrechten.**	

Tabelle 19: Hemmnisse und Handlungsfelder im Bereich Standardisierung

8. Fazit und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde die Frage beantwortet, wie Szenarien der IKT-Vernetzung für Mobilität im Zeithorizont 2025+ aussehen könnten. Anhand der Gegenüberstellung eines „Koexistenz"- und eines „Konvergenz"-Szenarios für die IKT im Bereich Automotive wurden mit Hilfe repräsentativer Use Cases und tiefergehender Analysen der Themen Sicherheit und Verfügbarkeit, Kommunikationstechnologien und -netzstrukturen sowie Standardisierung wichtige Hemmnisse und Handlungsfelder abgeleitet.

Beide Szenarien beschreiben einen deutlichen Innovationssprung. Die deutsche Industrie und Forschung besitzen mit ihrer Positionierung in den Bereichen Mobilfunk und Automobil sehr gute Voraussetzungen für das Innovationsfeld der Vernetzten Mobilität. Diese Vorteile gilt es nun gemeinsam zu nutzen. Aufgabe aller Stakeholder der Mobilitätswelt von morgen wird es sein, aus den identifizierten Hemmnissen und Handlungsfeldern konkrete Handlungsempfehlungen für sich selbst abzuleiten, darüber hinaus aber auch mit weiteren Partnern gemeinsame Aufgaben zur Bewältigung der gemeinsamen Herausforderungen zu definieren und umzusetzen.

Ungeachtet dessen, ob die vor uns liegenden Veränderungen eher graduell oder disruptiv erfolgen werden, ist bereits heute absehbar, dass sich die Mobilität in 10 bis 15 Jahren deutlich von der uns heute bekannten Mobilität – die sich seit der Zeit des Wirtschaftswunders kaum verändert hat – unterscheiden wird:

- Die Grenzen zwischen Verkehrs- und Kommunikationsinfrastrukturen werden zunehmend verschwimmen.
- Die Vernetzung von Fahrzeugen, Infrastrukturen und Daten-Clouds verbessert die Sicherheit, die Nachhaltigkeit und den Komfort im Verkehr deutlich.
- Fahrzeuge verfügen über eine präzise Ortung und hochgenaue digitale Karten mit dynamischen Umfeldinformationen.
- Vernetzte automatisierte Fahrzeuge koordinieren ihre Fahrmanöver und optimieren den Verkehrsfluss.
- Die zunehmende Elektrifizierung der Antriebsstränge wird nicht mehr aufzuhalten sein, denn wie die jüngsten Aussagen deutscher Hersteller zeigen, gehören Vernetzung und Elektromobilität zusammen [SO12][SO16].
- Das Unfallrisiko wird weitgehend durch das Datenrisiko ausgetauscht.

In der Studie wurden auch Themen angesprochen, die hier nicht weiter vertieft werden konnten, für die es sich aber lohnt, zukünftig weitere Untersuchungen anzustellen. Dazu gehören folgende Fragestellungen:

- Wie lang werden Mischverkehre aus Fahrzeugen mit sehr unterschiedlicher „Intelligenz", d. h. sehr unterschiedlichen Graden an Vernetzung und Automatisierung, die Mobilitätswelt prägen und wie sollte damit umgegangen werden?
- Was bedeuten die zunehmenden Interdependenzen zwischen „klassischen" Verkehrswegen und Kommunikationsnetzen für die Kritikalität und Angreifbarkeit unserer Infrastrukturen? Welche Maßnahmen sind zu ergreifen, sollte es zukünftig zu Kommunikationsausfällen im Verkehrsnetz kommen?
- Kann ein sehr leistungsfähiges und hochverfügbares Kommunikationssystem die lokale Sensorik von automatisierten Fahrzeugen substituieren und somit Kosten für Fahrzeugautomatisierung optimieren?

Anhang

A Danksagung

Die Autoren der Studie bedanken sich für die Projektbetreuung bei

Dr. Patrick Ester, VDE e. V.

sowie für die Unterstützung und inhaltlichen Diskussionen beim Erstellen der Studie beim Beirat der Studie bei:

Dr. Thomas Becks, VDE e. V.
Dr. Teodor Buburuzan, Volkswagen AG
Dr. Franz Geyer, BMW AG
Kristin Heller, Deutsches Dialog Institut GmbH
Dr. Uwe Jansen, Deutsche Telekom AG
Karl-Josef Kuhn, Siemens AG
Frank Lorentz, Vodafone GmbH
Heiko Loskill, Deutsches Dialog Institut GmbH
Dr. Marc Menzel, Continental AG
Dr. Bernd Rech, Volkswagen AG
Frank Schnellhardt, Innoman GmbH
Dr. Moritz Vogel, VDE e. V.
Timothy Waltniel, Toyota Motor Europe
Peter Wüstnienhaus, PT-DLR

sowie für Beiträge und Diskussionen bei:

Jörg Fischer, NXP Semiconductors Germany GmbH
Dr. Ralf Irmer, Vodafone Germany
Michael Kaiser, Technische Universität Dresden
Sebastian Kühlmorgen, Technische Universität Dresden
Alexej Kulakov, Vodafone Germany
Veit Leonhardt, Technische Universität Chemnitz
Christian Liebich, BMWi
David Lister, Vodafone Group
Dr. Ignacio Llatser, Technische Universität Dresden
Henning Möller, NXP Semiconductors Germany GmbH
Dr. Thomas Weber, Mugler AG
Jürgen Weingart, Swarco Traffic Systems GmbH
Hermann Wilhelm-Jakob, Swarco Traffic Systems GmbH

B Use Cases

B1 Liste der Use Cases

(1) Kartierung

- Aktualisierung von hochgenauen Kartendaten und Straßeninformationen (Fahrbahnzustand, Hindernisse, Baustellen, Umleitungen etc.)
- Möglichkeiten/Beispiele:
  - (Offline-)Vermessung mit Kartierungsflotten von Geodatenlieferanten
  - Aufbau und Nutzung einer kooperativen Local Dynamic Map – Fahrzeuge und Infrastruktur pflegen ständig neue Daten ein und nutzen das gemeinsame Ergebnis

(2) Lokalisierung

- Globale und relative Lokalisierung als Basis von (v. a. sicherheitsrelevanten) Applikationen
- Schnelle hochgenaue Lokalisierung mit Hilfe digitaler Karten
- Schnelle hochgenaue relative Lokalisierung (Ego-Position im näheren Umfeld zu anderen Verkehrsteilnehmern)
- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Nutzung kommunikationsbasierter Technologien (z. B. Phasenmessung) für relative Ortung
  - Verwendung cloudbasierter und/oder fahrzeugbasierter Verfahren

(3) Zeitsynchronisierung

- Hochgenaue Zeitsynchronisierung zwischen den Fahrzeugen bzw. der Kommunikationsinfrastruktur
- Unabhängig von GPS-Funktionalität
- Basis Technologie für andere Funktionen (z. B. relative Lokalisierung etc.) und darauf aufbauende Use Cases

(4) Übertragung von Sensor-Rohdaten

- Typischerweise werden Daten mit hohem Aggregationsgrad übertragen, z. B. Stauende-Warnung
- Zukünftige Systeme benötigen voraussichtlich Daten mit höherem Detaillierungsgrad
- Hoher Detaillierungsgrad ist sinnvoll bei Sensordatenfusion von lokalen Sensor- und Kommunikationsdaten
- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Übertragung erkannter Objekte zwischen Fahrzeugen,
  - Übertragung komprimierter Radardaten zwischen Fahrzeugen

(5) Cloud-Zugang

- Hochzuverlässiger und niedriglatenter Kommunikationszugang zur Cloud-Infrastruktur
- Ausführung von Anwendungen in der Cloud (erfordert sehr schnelle bidirektionale Kommunikation zwischen Fahrzeug und (Edge-)Cloud)

(6) Räumliche Informationsverbreitung

- Senden einer Information an alle Fahrzeuge bzw. Verkehrsteilnehmer sowie deren „Keep alive“ und Aggregierung
- Abfragen von Informationen, die in einem geografischen Gebiet relevant sind

(7) Passieren von Straßenkreuzungen

(7a) Ampelkreuzungen

- Möglichkeiten/Beispiele:
  - LSA Ampelphasenanzeige (Restdauer der Rot- und Grün-Phase)
  - LSA Grüne-Welle-Assistent (Geschwindigkeitsempfehlungen zur Erreichung einer grünen Welle)

(7b) Ampellose Kreuzungen

- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Warnung vor querenden Fahrzeugen mit Vorfahrt bzw. vor bevorstehenden Regelverstößen/Kollisionen; Eingriff in die Fahrzeugsteuerung bei Nichtreagieren des Fahrers
  - Automatisierte Steuerung der Verkehrsabläufe am Knotenpunkt durch Eingriffe in die Fahrzeugsteuerungen (Passieren von Kreuzungen ohne LSA und ohne Verkehrszeichen)

(8) Einordnen in Verkehrsströme

- Assistiertes, automatisiertes bzw. koordiniertes Einordnen in den fließenden Verkehr
- Möglichkeiten/Beispiele: Fahrstreifenwechsel, Auffahren auf Schnellstraßen, Anfahren von Bussen an Haltestellen

(9) Überholen

- Detektion von Fahrzeugen auf der Gegenfahrbahn (bzw. benachbarten Fahrstreifen)
- ggf. Einbeziehung von (mehreren) Vorgängerfahrzeugen (Share My View etc.)
- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Warnung, falls kritische Entfernung unterschritten wird
  - Automated Overtaking (AOV)

(10) Gefahrenbewältigung/Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen

- Detektion von Hindernissen, Glätte, Stauenden, Einsatzfahrzeugen, Unfällen/Pannen u. a. Gefahren für das Fahrzeug
- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Warnung vor (Voll-)Bremsvorgängen von Vorgängerfahrzeugen außerhalb des Sichtbereiches (elektronisches Bremslicht)
  - autonome Notbremsung bei Unterschreitung einer kritischer Entfernung
  - Cooperative Collision Avoidance (CCA)

(11) Schutz schwacher Verkehrsteilnehmer (Vulnerable Road User – VRU)

- Erkennung von Fußgängern, Radfahrern und Motorradfahrern
- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Warnung des Fahrers
  - Bereitstellung von Informationen für autonome Notbremsung oder Ausweichmanöver des Fahrzeugs
  - Warnung der VRU (Kommunikation zur Kollisionsvermeidung)

(12) Einhalten von Verkehrsvorschriften

- Detektion gültiger Tempolimits, Überholverbote und sonstiger Vorschriften
- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Verkehrszeichenassistenz (Sensorik erkennt Verkehrszeichen) oder Übertragung ins Fahrzeug (Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation)
  - lediglich Information oder auch Eingriffe bei Regelverstößen (z. B. Rotlichtverstoß, Einbahnstraße/Falschfahrer)

(13) Share My View („See-through")

- Projizierung der Sicht des Vorgänger-Fahrzeuges auf Displays von Nachfolgefahrzeugen
- Weiterverarbeitung der Sicht des Vorgänger-Fahrzeuges in Fahrzeugsystemen
- Bessere Beobachtung des vorausfahrenden Verkehrs, insbesondere bei großen, die Sicht behindernden Fahrzeugen, wie LKW

(14) Teleoperiertes Fahren

- Menschlicher Fahrer als externer Operator des Fahrzeugs
- Operator übernimmt alle und teilweise Fahraufgaben („Bring me home…")
- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Fahrzeugbereitstellung bei Mietwagen/Car-Sharing
  - Unbemannte Fahrzeuge in beschränkten Gebieten (Hafen, Bergbau)
  - Transport und Logistik
  - Vollautomatisierte Autobahn

(15) Parken

(15a) Parkplatzsuche

- Suche und Prüfung der Verfügbarkeit, Zielführung, Reservierung von Stellplätzen

(15b) Einparkvorgang

- Assistiertes, automatisiertes bzw. autonomes Einparken auf Parkplätzen, in Parkhäusern oder im öffentlichen Verkehrsraum

(16) Verkehrsinformation

- Dynamische Erfassung und Information über Verkehrslage, Baustellen und Störungen
- Echtzeit-Informationen über Ankunfts- und Abfahrtzeiten im ÖV und Reisezeiten intermodaler Mobilitätsketten
- Möglichkeiten/Beispiele: Broadcast oder Vehicle-to-X-Kommunikation

(17) Navigation

- Dynamische Routenführung auf Basis dynamischer Verkehrsinformationen
- Routenplanung von elektrischen Fahrzeugen basierend auf Reichweiten- und Fahrwegabschätzung
-

(18) Entertainment

- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Videostreaming hochauflösender Inhalte an Mitfahrer
  - Mobiles Online-Gaming mit dauerhafter Internetverbindung
  - Zuverlässige und schnelle Internetverbindung für Mitfahrer

(19) Office/Infotainment

- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Büroanwendungen
  - News, Mail
  - Standortspezifische Informationen (Points of Interest, Veranstaltungen, Events, Werbeangebote etc.; ggf. kombiniert mit Augmented Reality

(20) Fernsteuerung

- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Fernsteuerung von Fahrzeugfunktionen: Klimaanlage/Heizung, Türverriegelung, Ladefunktionen
  - Fernsteuerung von spezifischen Fahrfunktionen: Ein-/Aus-Parken, Vorfahren, Tanken/Laden

(21) Fahrzeug als IoT (Internet of Things)-Objekt

- Fahrzeug als Datenlieferant (Sensordaten, Umgebungsinformationen) und Daten- bzw. Servicenutzer
- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Einbettung des Fahrzeugs in gewerbliche Systeme und Dienste:
  - Flottenmanagement und Fernwartungsdienste, Carsharing, intermodale Mobilitätsplattformen, Versicherungs- und Finanzdienstleistungen
  - Einbettung des Fahrzeugs in die persönliche digitale Nutzerumgebung (Social Networks, Smart Home)
  - Nachhaltigkeit

(22) Energieeffizientes Fahren

- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Verbrauchsoptimierende Informationen und Fahrzeugsteuerungen auf Basis von 3D-Streckenprofilen
  - Koordinierung mehrerer LSA zu „Ad-hoc“ Grüne Wellen etc.
  - Synchronisierung von Fahrzeugpulks (z. B. koordiniertes Anfahren an der Ampel)

(23) Konvoifahren und Platooning

- Energieeffizientes Fahren in Fahrzeugkolonnen
- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Kooperative ACC ohne zentralisierte Steuerung (Konvois), Elektronische Deichsel
  - Platooning mit zentralisierter Steuerung durch Platoon-Führungsfahrzeug (nicht teleoperiertes Fahren)

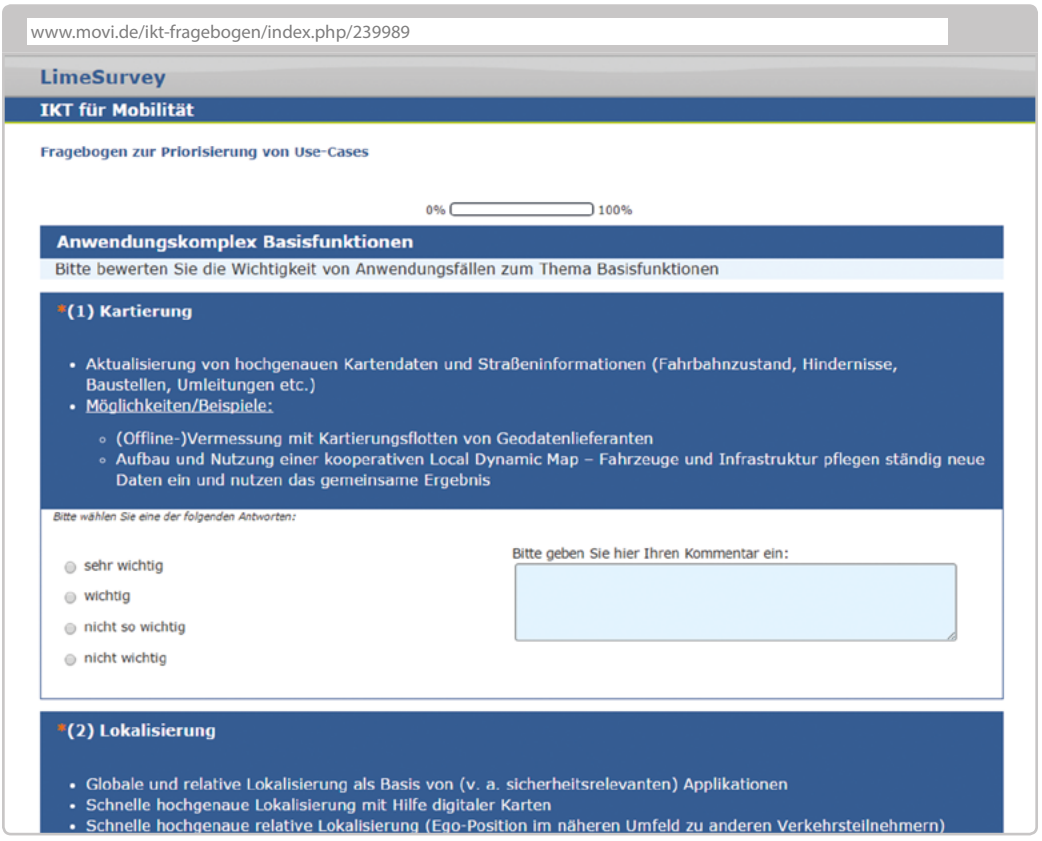
(24) Verkehrsmanagement – Smart Traffic Anwendungen

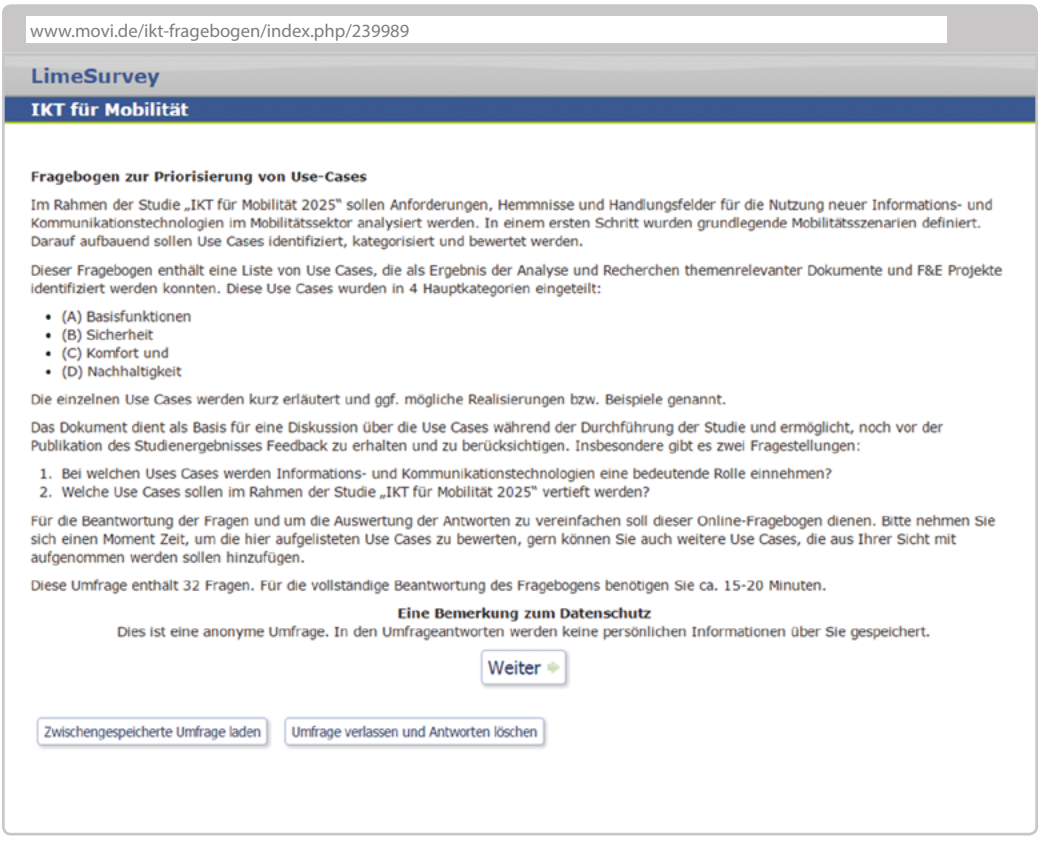
- Prognosebasierte Verkehrssteuerungen auf Grundlage von „Big Data“ Analysen
- Verkehrsbeeinflussung/Verkehrsflussoptimierung auf Basis zentraler oder selbstorganisierender dezentraler Systeme (über Verkehrsleitzentralen oder durch Kooperation zwischen dezentralen Agenten)
- Möglichkeiten/Beispiele:
  - Knotenpunkt-, Strecken- und Netzbeeinflussung
  - Umleitungsmanagement
  - Steuerung des Parksuchverkehrs

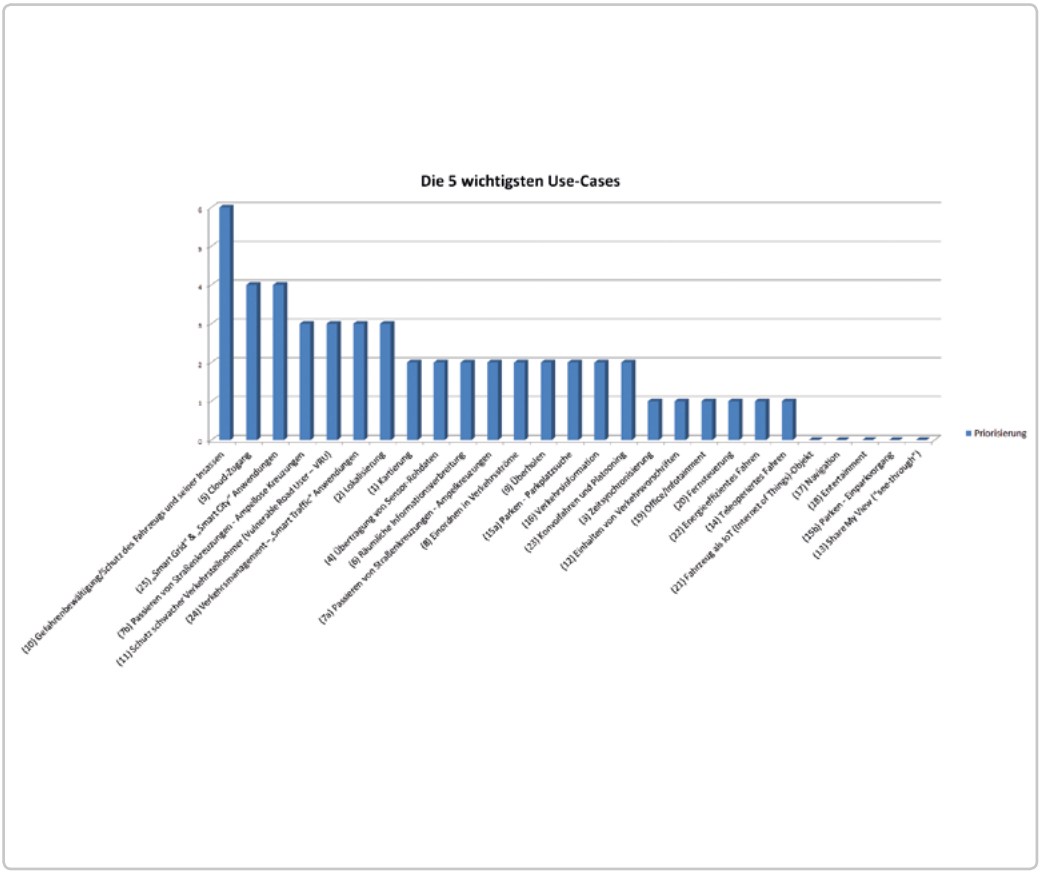
(25) „Smart Grid“ & „Smart City“ Anwendungen

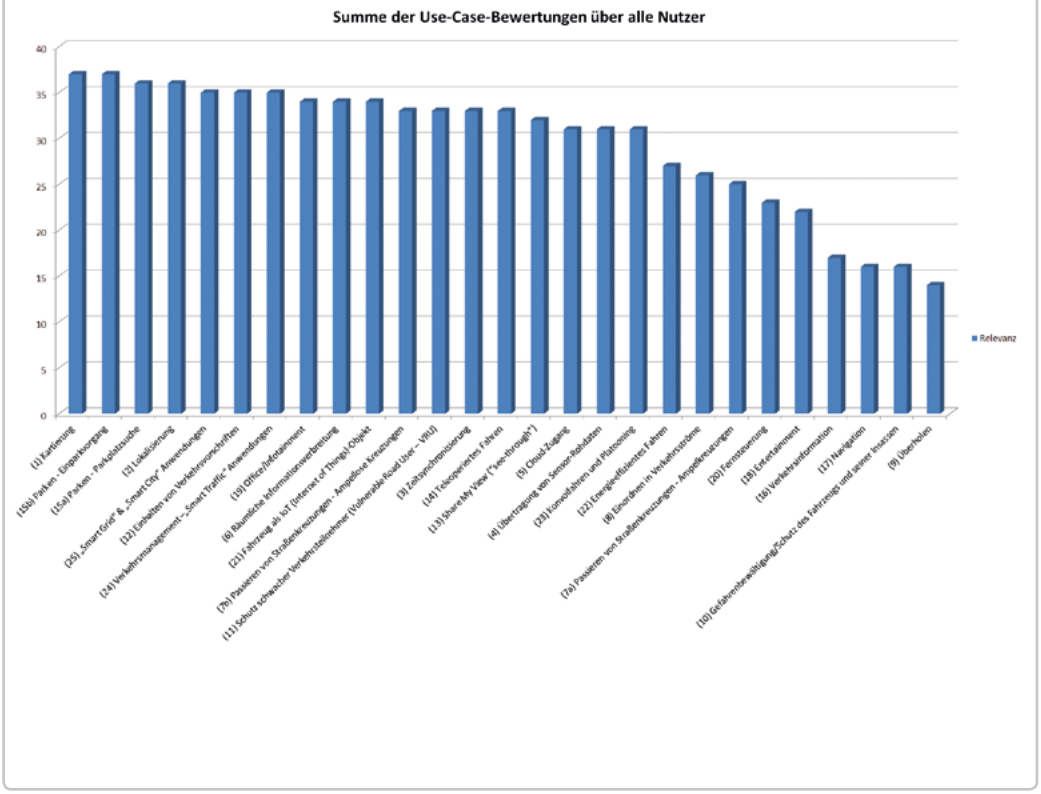
- Smart Grid-Anwendungen (Koordination zwischen Elektrofahrzeugen und dem Elektroenergiesystem), z. B. Steuerung des Ladevorgangs in Abhängigkeit vom Aufkommen an erneuerbaren Energien, Demand Side Management
- Smart City-Anwendungen (Koordination zwischen den Versorgungsinfrastrukturen urbaner Systeme)
- Smart Home-Anwendungen (Verknüpfung zwischen Car-Environment und Home-Environment)

B2 Fragebogen und Auswertung (Auszug) zur Priorisierung der Use Cases






Die 5 wichtigsten Use-Cases
Priorisierung
(10) Gefahrenbewältigung/Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen
(5) Cloud-Zugang
(25) „Smart Grid" & „Smart City" Anwendungen
(7b) Passieren von Straßenkreuzungen - Ampellose Kreuzungen
(11) Schutz schwacher Verkehrsteilnehmer (Vulnerable Road User – VRU)
(24) Verkehrsmanagement - „Smart Traffic" Anwendungen
(2) Lokalisierung
(1) Kartierung
(4) Übertragung von Sensor Rohdaten
(6) Räumliche Informationsverarbeitung
(7a) Passieren von Straßenkreuzungen - Ampelkreuzungen
(8) Einordnen in Verkehrsströme
(9) Überholen
(15a) Parken - Parkplatzsuche
(19) Verkehrsinformation
(23) Komfortfahren und Planung
(12) Einhalten von Verkehrsvorschriften
(3) Zeitsynchronisierung
(15) Office/Infotainment
(20) Fernsteuerung
(22) Energieeffizientes Fahren
(14) Teleoperiertes Fahren
(21) Fahrzeug als IoT (Internet of Things) Objekt
(17) Navigation
(18) Entertainment
(15b) Parken - Einparkvorgang
(13) Share My View ("see-through")


Summe der Use-Case-Bewertungen über alle Nutzer
Relevanz
(1) Kartierung
(15b) Parken - Einparkvorgang
(15a) Parken - Parkplatzsuche
(2) Lokalisierung
(25) „Smart Grid" & „Smart City" Anwendungen
(12) Einhalten von Verkehrsvorschriften
(24) Verkehrsmanagement - „Smart Traffic" Anwendungen
(15) Office/Infotainment
(6) Räumliche Informationsverarbeitung
(21) Fahrzeug als IoT (Internet of Things) Objekt
(7b) Passieren von Straßenkreuzungen - Ampellose Kreuzungen
(11) Schutz schwacher Verkehrsteilnehmer (Vulnerable Road User – VRU)
(3) Zeitsynchronisierung
(14) Teleoperiertes Fahren
(13) Share My View ("see-through")
(5) Cloud-Zugang
(4) Übertragung von Sensor Rohdaten
(23) Komfortfahren und Planung
(22) Energieeffizientes Fahren
(8) Einordnen in Verkehrsströme
(7a) Passieren von Straßenkreuzungen - Ampelkreuzungen
(20) Fernsteuerung
(18) Entertainment
(19) Verkehrsinformation
(17) Navigation
(10) Gefahrenbewältigung/Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen
(9) Überholen

B3 Systematisierung der Use Cases hinsichtlich Technologievarianten

Die vorgestellten Use Cases zerfallen – gemessen an ihren jeweiligen Funktionsumfängen und den technischen Realisierungsoptionen – in eine Vielzahl von Use Case-Varianten, die dann nur noch schwer handhabbar sind. Deshalb wird vorgeschlagen, zur Systematisierung eine Strukturierung anhand der beiden Dimensionen „Automatisierung“ und „Kooperation“ vorzunehmen. Bei der „Automatisierung“ wird zwischen Systemen unterschieden, die den Fahrer lediglich informieren oder warnen, und solche Systemen, die aktiv in die Fahrzeugsteuerung eingreifen bzw. diese für bestimmte (Fahr-)Aufgaben ganz übernehmen. Letztere könnten noch weiter unterteilt werden (z. B. mit Hilfe der VDA-Automatisierungsstufen); dies wird aber hier aus Gründen der Einfachheit und Handhabbarkeit nicht vorgenommen. Hinsichtlich der „Kooperation“ soll zwischen nicht-kooperativen Systemen, bei denen das Fahrzeug entsprechende Aufgaben und Funktionen weitgehend autonom und ohne Kommunikation nach außen erfüllt, und kooperativen Systemen, die eine Kommunikation und Abstimmung mit anderen Fahrzeugen oder Komponenten der Verkehrsinfrastruktur voraussetzen, unterschieden werden. Die folgende Tabelle ordnet die zuvor genannten Use Cases und Beispiele für entsprechende Varianten in eine solche Systematik ein.

Lfd. Nr.	Anwendungsfeld		Technologievarianten			
			Nicht kooperativ		Kooperativ	
			Warnen/informieren	Steuern/eingreifen	Warnen/informieren	Steuern/eingreifen
Basisfunktionen						
1	Kartierung		Vermessung mit Kartierungsflotten		Kooperative Local Dynamic Maps	
2	Lokalisierung	relative Lokalisierung	Durch Ortung und Umfelderkennung		Durch kooperative Erfassung von Positionsdaten	
		globale Lokalisierung	Durch Ortung und Kartendaten		Durch kooperative Erfassung von Positionsdaten	
3	Zeitsynchronisierung		Über GPS		Kooperative Synchronisierung	
4	Übertragung von Sensor-Rohdaten		–		Austausch von Sensor-Rohdaten zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur	
5	Cloud-Zugang		Über Mobilfunknetz		Über andere Fahrzeuge/RSU-Hotspots	
6	Räumliche Informationsverbreitung		Über Mobilfunknetz/Broadcast		Über andere Fahrzeuge/RSUs (Multi-Hop-Verbindungen)	
Sicherheit						
7	Passieren von Straßenkreuzungen	Ampelkreuzungen	Ampelphasenerkennung (sensorgestützt)	eingreifende Ampelphasenerkennung (sensorgestützt)	Ampelphasen-Assistent (Restrot- bzw. Geschwindigkeitsempfehlung)	Eingreifender Ampelphasenassistent
		ampellose Kreuzungen	warnender Querverkehrs-/ Kreuzungsassistent) (sensorgestützt)	eingreifender Querverkehrs-/ Kreuzungsassistent (sensorgestützt)	Kooperative Knotenpunktwarnungen	Kooperative und automatisierte Knotenpunktsteuerung
8	Einordnen in Verkehrsströme		Einfädelassistent (Spurwechselassistent mit Lückenführer)	automatisiertes sensorgestütztes Einfädeln	Cooperative Merging Assistance	Cooperative Merging
9	Überholen		sensorgestützte Detektion von Fahrzeugen auf der Gegenspur	Automated Overtaking (sensorgestützt)	Share My View (See Through) ins Fahrzeug	Kooperatives Automated Overtaking
10	Gefahrenbewältigung (Schutz des Fahrzeugs und seiner Insassen)		Hinderniserkennung und Warnung	Autonome Notbremsung	Cooperative Collision Warning	Cooperative Collision Avoidance
11	Schutz schwacher Verkehrsteilnehmer (Vulnerable Road User)		VRU-Detektion/Warnung	Autonome Notbremsung	Warnung der VRUs über Wearables etc.	Koordinierte Eingriffe in die Fahrzeugsteuerung
12	Einhalten von Verkehrsvorschriften		Verkehrszeichenerkennung (sensorgestützt)	Eingreifende Verkehrszeichenerkennung (sensorgestützt)	Verkehrszeichenübertragung ins Fahrzeug	Verkehrszeichenübertragung ins Fahrzeug + automatisiertes Fahren
13	Share My View (“see-through”)		Projizierung von Kameradaten auf Bildschirm an LKW-Rückseite (“Samsung Safety Truck”)	–	Übertragung von Kameradaten an die Folgefahrzeuge	–
14	Teleoperiertes Fahren		–	–	–	Übertragung von Fahrzeugdaten zum externen Operator
Komfort						
15	Parken	Parkplatzsuche	Nutzung von Parkplatzinfos digitaler Karten	–	Kooperative Zielführung zu freien Stellplätzen	Autonomous Valet Parking
		Einparkvorgang	Einparkhilfe	Parkpilot (sensorgestützt)	–	Autonomous Valet Parking
16	Verkehrsinformation		–	–	Broadcast in die Fahrzeuge, Car-to-X-Communication	–
17	Navigation		Navigationssystem	Automatisiertes Fahren (sensorgestützt)	Kooperative Navigation (Local Dynamic Mapping)	Automatisiertes Fahren mit kooperativem Routing
18	Entertainment		Musik, Videos, Spiele (Offline)	Funktionsabschaltung bei Rückübertragung der Fahraufgabe an den Fahrer	Streaming, Online Gaming & Internet	–
19	Infotainment (auch Augmented Reality)		Offline-Büroanwendungen	Funktionsabschaltung bei Rückübertragung der Fahraufgabe an den Fahrer	Videokonferenzen	–
20	Fernsteuerung		–	–	Fernsteuerung von Fahrzeugfunktionen	Fernsteuerung von spezifischen Fahrfunktionen
21	Fahrzeug als IoT (Internet of Things)-Objekt		–	–	Fernwartung, Flottenüberwachung	Automatisierte Buchung multimodaler Reiseketten
Nachhaltigkeit						
22	Energieeffizientes Fahren		Gangwechselanzeige	Eco-Modus	Fahrempfehlungen auf Basis von Cloud-Infos	Synchronisierung von Fahrzeugpulks (koordiniertes Anfahren)
23	Konvoifahren		Abstandswarner	Abstandsregeltempomat (ACC)	Abstandsempfehlungen auf Basis von Car-to-X	Kooperative ACC; Platooning
24	Verkehrsmanagement (Smart Traffic)	Knotenpunkt-, Strecken- und Netzbeeinflussung	Nutzung von stationären Verkehrsbeeinflussungsanlagen (Wechselverkehrszeichen etc.)	Automatisiertes Fahren unter Berücksichtigung von erfassten Infos der Verkehrsbeeinflussungs-anlagen	Kooperative Erfassung und Verarbeitung der Verkehrslage und individualisierte Empfehlungen z. B. zu Ausweichrouten	Zentrale Verkehrssteuerung durch Eingriffe in die Fahrzeugsteuerung
		Umleitungs-management				
		Steuerung des Parksuchverkehrs				
25	Smart Grid & Smart City		–	–	Strompreisampel	Gesteuertes Laden mit variablen Strompreisen – Demand Side Management

C Abschätzung des Datenvolumens zukünftiger Fahrzeugkommunikation

Um Aussagen zur zukünftigen Nutzung von IKT für Mobilität und zur Eignung von Kommunikationstechnologien zu treffen ist es notwendig, die Datenvolumen bzw. -raten abzuschätzen, die in den verschiedenen Use Cases generiert und über Kommunikationsnetze übertragen werden sollen. Insbesondere über das Datenvolumen, das von automatisierten Fahrzeugen generiert wird, gibt es unterschiedliche Aussagen. Diese reichen von 69 Mbytes/s [S27] über 700 Mbytes/s [SO2] bis zu 750 Mbytes/s [SO9]. Da in diesen Aussagen keine Systemannahmen dargelegt werden, die zu dem ermittelten Datenvolumen führen, sind die Quellen nur sehr eingeschränkt aussagekräftig. Insbesondere ist es fragwürdig, ob alle vom Fahrzeug intern generierten Daten auch zwischen Fahrzeugen ausgetauscht werden (müssen), wie es für „Big Data“ Anwendungen nahegelegt wird.

Grundsätzlich kann das Datenvolumen in den verschiedenen Use Cases sehr unterschiedlich sein, weshalb hier eine Beschränkung auf die Kommunikation für Fahrzeugsicherheit und -automatisierung vorgenommen wird. Es werden zwei Fälle unterschieden (1) Vernetzte Fahrzeuge ohne automatisierte Fahrfunktionen und (2) Vernetzte automatisierte Fahrzeuge.

Neben der Fahrzeugsicherheit und -automatisierung gibt es weitere Use Cases, die sehr hohe Datenraten erzeugen, insbesondere das Streaming von hochauflösenden Filmen aus dem Internet zu Smartphones von Beifahrern des Fahrzeugs. Solche Use Cases werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, da sie auch über WLAN-Hotspots realisiert werden können.

C1 Vernetzte Fahrzeuge ohne automatisierte Fahrfunktionen

Die Analyse des Datenvolumens geht davon aus, dass ein Fahrzeug grundsätzlich zwei Arten von Nachrichten aussendet: Periodische Nachrichten (CAM, ETSI EN 302 637-2) und ereignisgesteuerte Nachrichten (DENM, ETSI EN 302 637-3). Obwohl diese Nachrichtentypen im ITS-G5 Protokollstack definiert wurden, sind sie unabhängig von der Kommunikationstechnologie und können deshalb auch für ein generisches System angewendet werden. Periodische Nachrichten werden von jedem Fahrzeug regelmäßig an die Nachbarfahrzeuge versendet; ereignisgesteuerte Nachrichten werden durch sicherheitskritisches Vorfälle ausgelöst und an alle Fahrzeuge in einer geografischen Region, typischerweise über mehrere Relais, verteilt.

Periodische Nachrichten werden mit einer minimalen Rate von 1 Hz und einer maximalen Rate von 10 Hz gesendet; der genaue Wert hängt von der Fahrzeugdynamik (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Richtungsänderung) ab. Typische Werte sind 290 ms bei einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h oder 100 ms bei einer Vollbremsung von 50 km/h auf 0 in 19 m. Bei einer Nachrichtengröße von etwa 500 Bytes ergibt sich so ein Datenvolumen pro Fahrzeug von 500 Bytes/s (Minimum), 1.7 kBytes (typisch) und 5 kBytes/s (Maximum).

Um das Datenvolumen aller Fahrzeuge zu bestimmen werden zwei Szenarien, Autobahn und Stadt, mit unterschiedlichen Parametern angenommen (siehe Tabelle 20).

	Autobahn	Stadt
Fahrzeugdichte	60 Fahrzeuge/(km und Fahrspur)	1000 Fahrzeuge/km² (z. B. Hamburg)
Anzahl Fahrspuren	6	N.A.
Kommunikationsreichweite (Radius um das Fahrzeug)	1000 m	500 m
Periodischer Nachrichten	CAM (ETSI EN 302 637-2)	
Rate	5 Hz	
Paketgröße	500 Bytes	
Ereignisgesteuerte Nachrichten	DENM (ETSI EN 302 637-3)	
Anzahl sendende Fahrzeuge	10 %	
Größe des Zielgebiets	1,5 x 1 km²	
Weiterleitung von Paketen	5-maliges Weiterleiten pro Nachricht	
Fahrzeugdichte	1000 Fahrzeuge/km² (z. B. Hamburg)	
Sendeintervall	1 s	
Paketgröße	1 kByte	
Routing Algorithmus	Contention-based Forwarding (CBF)(ETSI EN 302 636)	

Tabelle 20: Szenarien für die Analyse des Datenvolumens

Daraus ergibt sich ein Datenvolumen durch periodische Nachrichten von 1,8 Mbytes/s im Autobahnszenario und 2,0 Mbytes/s im Stadtszenario:

Autobahnszenario:

$$2\ \text{km} \times 60\ \frac{\text{Fahrzeuge}}{(\text{km lane})} \times 6\ \text{lanes} \times 5\ \frac{1}{\text{s}} \times 500\ \text{Bytes} = 1{,}8\ \frac{\text{Mbytes}}{\text{s}}$$

Stadtszenario:

$$\frac{\pi}{4}\ \text{km}^2 \times 1000\ \frac{\text{Fahrzeuge}}{\text{km}^2} \times 5\ \frac{1}{\text{s}} \times 500\ \text{Bytes} = 2{,}0\ \frac{\text{Mbytes}}{\text{s}}$$

Ereignisgesteuerte Nachrichten erzeugen ein zusätzliches Datenvolumen von 0,9 Mbytes/s.

Anzahl generierte Pakete:

$$1{,}5\ \text{km}^2 \times 1000\ \frac{\text{Fahrzeuge}}{\text{km}^2} \times 0{,}1 \times 1\ \frac{1}{\text{s}} = 150\ \frac{1}{\text{s}}$$

Paketanzahl mit Weiterleitung:

$$150\ \frac{1}{\text{s}} + 150\ \frac{1}{\text{s}} \times 5 = 900\ \frac{1}{\text{s}}$$

Datenvolumen:

$$900\ \frac{1}{\text{s}} \times 1000\ \text{Bytes} = 0{,}9\ \frac{\text{Mbytes}}{\text{s}}$$

Dies führt zu einem aggregierten Datenvolumen von **2,7 Mbytes/s im Autobahnszenario** und **2,9 Mbytes/s im Stadtszenario**, die über das Netzwerk übertragen werden.

C2 Vernetzte automatisierte Fahrzeuge

Für die Kommunikation zwischen zukünftigen hochautomatisierten Fahrzeugen wird angenommen, dass diese (teilweise aggregierte) Sensordaten austauschen. Typische Datenraten für ausgewählte Sensoren sind in Tabelle 21 dargestellt.

Sensortyp	Messgröße	Quantisierung/Frequenz	Datenrate
Radar	Winkel, Entfernung, Geschwindigkeit, Breite der Objekte	4 x 32 Bit/100 Hz; max. 20 detektierte Objekte	32 kBytes/s
Lidar Laserscanner	Entfernung, Reflektivität der Bildpunkte	2 x 32 Bit pro Bildpunkt/50Hz; 500 Bildpunkte bei 6 Lagen	1,2 MBytes/s
Grauwertkamera	Leuchtdichte der Bildpunkte	8 Bit pro Pixel/25 Hz; 640 x 480 Pixel	7,5 MBytes/s
Farbkamera	Farbe der Bildpunkte	24 Bit pro Pixel/25 Hz; 640 x 480 Pixel	225 MBytes/s

Tabelle 21: Typische Datenraten für ausgewählte Sensoren [S23]

Aus der Tabelle ist zu ersehen, dass Kameras das größte Datenvolumen unter den gebräuchlichen Sensoren erzeugen. Im Vergleich dazu sind die Datenvolumen der anderen Sensoren nahezu vernachlässigbar. Das Gesamtdatenvolumen eines autonomen Fahrzeugs wird neben dem Sensortyp von der Anzahl der Sensoren im Fahrzeug und der Anwendung von Datenreduktionstechniken bestimmt. Bei der Sensoranzahl kann davon ausgegangen werden, dass zukünftige autonome Fahrzeuge über mehrere, komplementäre Sensoren verfügen. Beispielsweise ist ein Testfahrzeug im AutoNet2030-Projekt [P2] mit drei Radarsensoren und einer Kamera ausgestattet, die eine Summendatenrate von 8,7 Mbytes/s erzeugen. Unter der theoretischen Annahme, dass alle Sensordaten kontinuierlich übertragen werden, kann die Datenrate durch Aggregation reduziert werden, beispielsweise durch Datenkomprimierung oder ereignisgesteuerte Übertragung, die nur bei sicherheitskritischen Situationen aktiviert wird. Bei einem angenommenen Aggregationsgrad von 50% ergibt sich somit eine Datenrate von 4,3 Mbytes/s.

Eine Datenrate von mehreren Mbytes/s für jedes Fahrzeug führt zu einer erheblichen Datenlast im Netzwerk, die wesentlich über dem Datenvolumen für vernetzte Fahrzeuge ohne automatisierte Fahrfunktionen (siehe D.2) liegt. In einem Autobahn-Szenario würde das aggregierte Datenvolumen von allen Fahrzeuge in Kommunikationsreichweite 4,3 Mbytes/s * 720 Fahrzeuge = 3,1 Gbytes/s betragen. In einer Stadtumgebung würde sich die Datenmenge auf 4,3 Mbytes/s * 785 Fahrzeuge = 3,4 Gbytes/s belaufen. Diese Datenvolumen würden eine sehr hohe Kanalauslastung verursachen. Um diese hohe Auslastung zu verringern muss ein höherer Aggregationsgrad für Sensordaten erreicht werden.

Im Vergleich zu den vorher genannten Extremaussagen zum Datenvolumen eines einzelnen Fahrzeugs [S27][SO2][SO9] kann festgestellt werden, dass solche Werte nur durch eine unkomprimierte Datenübertragung mehrerer HD-Kameras sowie durch die direkte und ungefilterte Übertragung von Daten des fahrzeuginternen Datenbusses erreicht werden können und damit – auch unter Einbeziehung zukünftiger Anforderungen der Fahrzeugsensorik – unrealistisch hoch sind.

D Glossar

Anonymisierung	Veränderung von Datensätzen, um personenbezogene Informationen zu entfernen.
Assistiertes Fahren	Niedrigste Stufe des automatisierten Fahrens, bei dem der menschliche Fahrer dauerhaft die Längs- oder die Querführung des Fahrzeugs ausführt. Das System übernimmt die jeweils andere Funktion.
Automatisiertes Fahren	Einsatz von Informations-, Kommunikations- und Automatisierungstechnologien in Fahrzeugen, welcher der Bewältigung der Fahraufgabe dient. Dies reicht von der Unterstützung eines menschlichen Fahrers bei einzelnen Teilaufgaben bis hin zur vollständigen Übernahme der gesamten Fahraufgabe durch ein technisches System. Zur Unterscheidung von Funktionsumfängen innerhalb dieser Bandbreite haben verschiedene Institutionen Stufen des automatisierten Fahrens definiert.
Automotive	Umfasst alle Aktivitäten und Aspekte der Fahrzeugproduktion, u. a. technische Anforderungen, Technologien und den Wirtschaftszweig der Fahrzeugindustrie und ihrer Zulieferer.
Autonomes Fahren	Höchste Stufe des automatisierten Fahrens, bei dem das System das Fahrzeug vollständig vom Start bis zum Ziel führt, und zwar bei allen Straßentypen, Geschwindigkeitsbereichen und Umfeldbedingungen.
Big Data	Das Anfallen, Sammeln und Auswerten sehr großer, komplexer und dynamischer Datenmengen.
Broadcast	Kommunikationsnetz für die Verteilung von Daten zu vielen Endgeräten. Im Kontext der Studie ist (digitaler) Broadcast ein Synonym für die Übertragung von Verkehrsinformationen basierend auf DAB und deren Varianten.
Car-to-Car Communication	Direkter Informationsaustausch zwischen (fahrenden) Kraftfahrzeugen über drahtlose Kommunikationsnetze.
Car-to-Cloud Communication	Informationsaustausch zwischen Kraftfahrzeugen und zentralen Rechenzentren (z. B. von Verkehrsmanagementzentralen und Dienstleistern) über drahtlose Kommunikationsnetze.
Car-to-Infrastructure Communication	Informationsaustausch zwischen Kraftfahrzeugen und Infrastruktureinrichtungen (wie Funkbaken und Lichtsignalanlagen) über drahtlose Kommunikationsnetze.
Car-to-X Communication	Oberbegriff für den Informationsaustausch zwischen Kraftfahrzeugen und anderen technischen Objekten über drahtlose Kommunikationsnetze.
Cloud oder Cloud Computing	Delokalisierung von Datenspeicherung und Datenverabeitungsprozessen in eine entfernte metaphorische Wolke (Cloud), also die Wahrnehmung dieser Aufgaben durch zentrale Rechenzentren, die über Rechnernetzwerke – in der Regel das Internet – mit dem Nutzer verbunden sind.
Consolidation	Verschmelzung verschiedener Branchen durch den Aufbau branchenfremder Kompetenzen oder branchenübergreifende Unternehmensübernahmen und -fusionen.
Coopetition	Kooperationswettbewerb, bei dem Marktakteure gleichzeitig miteinander kooperieren und im Wettbewerb stehen.
Dedicated Short Range Communication (DSRC)	Familie von Standards basierend auf IEEE 802.11 und dem WAVE Protokollstack, der von IEEE und SAE entwickelt wurde.
Deskriptor	Qualitativer oder quantitativer Beschreibungsfaktor, der zur inhaltlichen Charakterisierung eines Szenarios dient. Für kritische Deskriptoren werden in der Zukunft alternative Ausprägungen als plausibel angesehen und dementsprechend mehrere Projektionen gebildet. Für unkritische Deskriptoren werden einwertige Prognosen abgegeben, da ihre Entwicklung als vergleichsweise sicher angesehen wird.

Device-to-Device Communication	Kommunikationsmodus in Mobilfunknetzen, die eine direkte Kommunikation zwischen Endgeräten im Kommunikationsbereich ermöglicht.
Dezentralisierte Überlastkontrolle	Mechanismen zur Steuern der Datenlast in einem dezentralisierten Netz wie WLAN OCB. DCC gewährleistet die Stabilität des Netzwerks, Effizienz der Datenübertragung und fairen Zugang von Netzwerkressourcen (Englisch: Decentralized Congestion Control, DCC).
Fahrassistenzsysteme (FAS)	Elektronische Zusatzeinrichtungen in Fahrzeugen zur Unterstützung des Fahrers in bestimmten Fahrsituationen, meist zur Verbesserung der Sicherheit, aber auch zur Steigerung des Fahrkomforts (Englisch: Advanced Driver Assistance Systems, ADAS).
Geschäftsmodell	Ein Geschäftsmodell beschreibt die Grundprinzipien, mit denen ein Unternehmen Werte schafft und diese an Kunden, Partner sowie weitere Anspruchsgruppen weitergibt bzw. für sich selbst vereinnahmt.
Hochautomatisiertes Fahren	Mittlere Stufe des automatisierten Fahrens, bei dem das System die Längs- und Querführung des Fahrzeugs in ausgewählten Anwendungsbereichen übernimmt. Der menschliche Fahrer muss das System nicht dauerhaft überwachen. Das System erkennt seine Grenzen und fordert den Fahrer mit einer ausreichenden Zeitreserve zur Rückübernahme der Fahraufgabe auf.
Human-type communication (HTC)	Kommunikation mit hauptsächlich menschliche Interaktion, wie Sprache und Videoübertragung. HTC hat andere Anforderungen als „Machine-type Communication“ (MTC). Begriff wird typischerweise im Kontext von Mobilfunknetzwerken verwendet.
Intelligente Verkehrssysteme (IVS)	Intelligente Verkehrssysteme sind Verkehrssysteme, bei denen Informations- und Kommunikationstechnologien zum Einsatz kommen, um innovative Use Cases zu ermöglichen, welche bestimmten übergeordneten Zwecken (Verkehrssicherheit, Verkehrseffizienz, Energieeffizienz, Wirtschaftlichkeit, Ökologische Nachhaltigkeit, Mobilitätskomfort) dienen (Englisch: Intelligent Transport Systeme, ITS).
Intermodalität	Die Verkettung verschiedener Verkehrsmittel auf einer Wegstrecke.
Internet der Dienste	Kommunikation, mit der Softwareanbieter und Dienstleister (menschlichen) Nutzern ermöglichen, flexibel über das Internet webbasierte Anwendungen auszuführen und digitale Güter zu konsumieren.
Internet der Dinge	Kommunikation zwischen in technischen Systemen (z. B. Fahrzeugen, Lichtsignalanlagen, Ladeinfrastrukturanlagen, Verkehrsleitstellen) eingebetteten Computern in einem Rechnernetzwerk untereinander. (Englisch: Internet-of-Things, IoT)
Konnektivität	Vernetzung von Fahrzeugen mit Hilfe von IKT, die es erlaubt mit anderen Verkehrsteilnehmern, Daten-Clouds sowie dem infrastrukturellen Umfeld Informationen austauschen.
Konvoi	Formation einer Gruppe von Fahrzeugen. Im Gegensatz zum Platoon hat ein Konvoi keinen Koordinator, d. h. funktioniert dezentralisiert (Englisch: Convoy).
Kooperative Intelligente Transport Systeme	Siehe Intelligente Verkehrssysteme (IVS) / Intelligent Transport System (ITS). Hier wird betont, dass die Systeme (typischerweise Fahrzeuge) miteinander kooperieren, statt nur ihr Umfeld mit Hilfe von Sensorik zu beobachten (Englisch: Cooperative ITS).
Machine-type Communication	Kommunikation ohne oder mit geringer menschlicher Interaktion, MTC hat andere Anforderungen als „Human-type Communication“ (HTC). Begriff wird typischerweise im Kontext von Mobilfunknetzwerken verwendet.
Manöversychronisierung	Austausch von Informationen zwischen Fahrzeugen zur Abstimmung von geplanten Fahrmanövern.
Mobilitätsanwendung	Konkreter Anwendungsfall (Use Case), der im Zusammenhang mit der Mobilität von Personen und Gütern stehende Funktionalitäten eines technischen Systems beschreibt.

Mobilitätsmarkt	Zusammentreffen von Angebot und Nachfrage mobilitätsbezogener Leistungen. Zu den Akteuren auf Mobilitätsmärkten gehören die Fahrzeugindustrien, Verkehrsdienstleister (wie ÖPNV, Taxi, Autovermietung etc.) und sonstige Mobilitätsdienstleister (wie Reisevermittler, Pannendienste, Versicherungen etc.), Verkehrsinfrastrukturbetreiber sowie die Energiewirtschaft und die IKT-Branche.
Mobilitätsszenario	Ein plausibel erscheinendes und in sich widerspruchsfreies Zukunftsbild für Verkehrssysteme und Mobilitätsmärkte, welches in Verbindung mit anderen Mobilitätsszenarien das Spektrum möglicher Entwicklungen aufzeigt.
Multimodalität	Variation zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln für einzelne Wegstrecken innerhalb eines Zeitraums.
Network Function Virtualization	Anwendung von IT Virtualisierung in Mobilfunknetzwerken um spezielle Funktionen zum Betrieb eines Mobilfunknetzwerks auf Standardhardware auszuführen.
Platoon oder Platooning	Gruppe von Fahrzeugen mit ähnlichem Mobilitätsverhalten und-muster (Geschwindigkeit, Richtung), die eine Formation bilden. Im Gegensatz zum Konvoi hat ein Platoon einen Koordinator, typischerweise das führende Fahrzeug.
Protokollierung	Speicherung von Ereignissen inklusive der Reihenfolge ihres Auftretens.
Pseudonymisierung	Veränderung von Datensätzen, um personenbezogene Informationen darin so zu manipulieren, dass sie auf ein Pseudonym abgebildet werden. Dies kann im Gegensatz zur Anonymisierung revidiert werden.
Public Key Infrastruktur	Ein System zur Erstellung und Verwaltung digitaler Zertifikate.
Redundanz	Das zusätzliche Vorhalten funktional gleicher oder vergleichbarer Ressourcen eines technischen Systems.
Resilienz	Fähigkeit technischer Systeme, bei einem Teilausfall nicht vollständig zu versagen.
Safety	Schutz vor Unfällen/Fehlbedienungen beim Betrieb technischer Anlagen (Betriebsschutz).
Security/IT-Security	Schutz vor Angriffen auf IT-Systeme sowie deren Erkennung und Abwehr.
Sensoren oder Sensorik	Fahrzeugsensoren wie Radar, LiDAR und Kameras, die dem Fahrzeug Informationen des Fahrzeugumfelds liefern.
Sensordatenfusion	Verschmelzung von Sensordaten um die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der Daten zu verbessern. Umfasst sowohl die Fusion von Sensordaten von lokalen Sensordaten eines Fahrzeugs, aber zukünftig auch die Fusion von Sensordaten verschiedener Fahrzeuge.
Smart Grid	Ein „intelligentes“ (Elektro-)Energieversorgungssystem, bei dem Erzeugungsanlagen, Speicher, Verbraucher und Netzbetriebsmittel in den Übertragungs- und Verteilnetzen mit Hilfe von IKT vernetzt und gesteuert werden.
Software Defined Networking	Konzept für Kommunikationssysteme, das Netzwerksteuerung und Datenweiterleitungsfunktion trennt.
Telematik	Verbindung von Telekommunikation und Informatik, d. h. die Vernetzung mindestens zweier rechnergestützter Informationssysteme durch ein Kommunikationssystem.
Teilautomatisiertes Fahren	Niedrige Stufe des automatisierten Fahrens, bei dem das System die Längs- und Querführung des Fahrzeugs in ausgewählten Anwendungsbereichen übernimmt. Der menschliche Fahrer muss das System dauerhaft überwachen.
Teleoperiertes Fahren	Übernahme der Fahraufgabe durch einen externen (sich außerhalb des Fahrzeugs befindlichen) Operator.
TCP/IP	Protokollstack des Internet, auch Synonym für Internet-basierte Kommunikation.

Use Case	siehe → Mobilitätsanwendung
Verkehrseffizienz	Steigerung der Effizienz von Verkehrsleistungen (gemessen z. B. an Personen- bzw. Tonnenkilometern pro Zeiteinheit). Im engeren Sinne geht es dabei um die Reduzierung von auftretenden Verkehrsstockungen und Staus unter gleichzeitig bestmöglicher Ausnutzung der bereits vorhandenen Verkehrsinfrastruktur.
Verkehrssicherheit	Die grundsätzliche Vermeidung von Unfällen mit Personen- und Sachschäden sowie die Milderung der Schwere von nicht mehr vermeidbaren Unfällen und ihrer Folgen. IVS können häufig auf menschliches Versagen zurückzuführende Unfälle verhindern bzw. im Unglücksfall den Schaden begrenzen und für schnelle Hilfe sorgen.
Verkehrssystem	Verkehrssysteme werden als Gesamtheit der strukturellen Komponenten verstanden, die zur Ortsveränderung von Personen und Gütern erforderlich sind. Sie bestehen u. a. aus Verkehrswegen, Verkehrsmitteln und-trägern, Verkehrsstationen und-anlagen sowie einer institutionellen Infrastruktur.
Vernetzung oder vernetztes Fahren	Interaktion zwischen Fahrzeugen und zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur über Kommunikationsnetze (WLAN-, Broadcast- oder Mobilfunknetze).
Verschlüsselung	Veränderung von Daten durch Verschieben und Ersetzen der Einheiten anhand eines Schlüssels, so dass sie für Unbefugte unkenntlich werden.
Vollautomatisiertes Fahren	Hohe Stufe des automatisierten Fahrens, bei dem das System im spezifischen Anwendungsfall alle Situationen automatisch bewältigen kann. Ein menschlicher Fahrer ist im spezifischen Anwendungsfall nicht erforderlich.
Zertifizierung	Sicherstellung, der Vertrauenswürdigkeit von Kommunikationspartnern durch vertrauenswürdige Instanzen.

E Literatur

E1 Forschungs- und Entwicklungsprojekte

[P1]	EU Projekt ADAPTIVE. AdaptIVe – Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles, URL https://www.adaptive-ip.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P2]	EU Projekt AutoNet2030. AutoNet2030 – Co-operative Systems in Support of Networked Automated Driving by 2030, URL http://www.autonet2030.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P3]	EU Projekt CODECS. CODECS – COoperative ITS DEployment Coordination Support, URL http://www.codecs-project.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P4]	EU Projekt COMPANION. COMPANION – Cooperative dynamic formation of platoons for safe and energy-optimized goods transportation, URL http://www.companion-project.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P5]	EU Projekt COMPASS4D. COMPASS4D – Cooperative Mobility Pilot on Safety and Sustainability Services for Deployment, URL http://www.compass4d.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P6]	Projekt CONVERGE. CONVERGE: COmmunication Network VEhicle Road Global Extension,URL http://www.converge-online.de, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P7]	EU Projekt DRIVE C2X. DRIVE C2X – Accelerate Cooperative Mobility, URL http://www.drive-c2x.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015], Use cases URLhttp://www.drive-c2x.eu/use-cases, see also [18] Annex A.3
[P8]	EU Projekt ecoFEV. ecoFEV – eco-efficient Cooperative infrastructure for Fully Electric Vehicles, URL http://www.eco-fev.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P9]	EU Projekt FUTURE CITIES. FUTURE CITIES Porto Living Lab an ecosystem for the future, URL http://futurecities.up.pt, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P10]	EU Projekt HAVEIT. Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport, URL http://www.haveit-eu.org, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P11]	EU Projekt iGame. Interoperable GCDC (Grand Cooperative Driving Challenge) AutoMation Experience, URL http://www.gcdc.net, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P12]	EU Projekt METIS. METIS – Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society, URL https://www.metis2020.com, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P13]	EU Projekt Mobility 2.0. Mobility2.0 – Co-operative ITS Systems for Enhanced Electric Vehicle Mobility, URL http://mobility2.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P14]	EU Projekt MOBINCITY. Smart Mobility in Smart City, URL http://www.mobincity.eu
[P15]	EU Projekt MOBINET – Europe-Wide Platform for Cooperative Mobility Services, URL http://www.mobinet.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P16]	EU Projekt POSSE – Promoting Open Specifications and Standards in Europe. URL http://www.posse-openits.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P17]	EU Projekt PRESERVE. PRESERVE – Preparing Secure Vehicle-to-X Communication Systems, URL http://www.preserve-project.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P18]	EU Projekt SATRE. SATRE – Safe Road Trains for the Environment, URL http://www.sartre-project.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P19]	Projekt SIMTD. SIMTD – Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland, URL http://www.simtd.de, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]Beschreibung der C2X-Funktionen, Deliverable D11.1, Juni 2009

[P20]	Projekt TEAM. TEAM users, stakeholders and use cases – Part B State of the art and use cases of basic technologies, V1.5, May 2013, URL https://www.collaborative-team.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P21]	Projekt UR:BAN. UR:BAN – Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement, URL http://www.urban-online.org, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P22]	Projekt VISIO.M. URL http://www.visiom-automobile.de/home, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[P23]	EU Projekt VRA. VRA – Networking in Automation, URL http://vra-net.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]

E2 Studien und White Paper

[S1]	5G Infrastructure Public Private Partnership (5GPPP) (2015). 5G Vision, [Online], URL http://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2015/02/5G-Vision-Brochure-v1.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015], Februar 2015
[S2]	5G Infrastructure Public Private Partnership (5GPPP) (2015). 5G Automotive Vision, [Online], URL https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2014/02/5G-PPP-White-Paper-on-Automotive-Vertical-Sectors.pdf, September 2015, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[S3]	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2012). IVS-Aktionsplan 'Straße', Koordinierte Weiterentwicklung bestehender und beschleunigte Einführung neuer Intelligenter Verkehrssysteme in Deutschland bis 2020, September 2012, [Online], URL http://www.bmvi.de/cae/servlet/contentblob/102800/publicationFile/70307/ivs-aktionsplan-strasse-broschuere.pdf, [Zugegriffen: 27-Nov-2015]
[S4]	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2015). Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren, September 2015, [Online], URL http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StB/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[S5]	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi); Bundesministerium des Innern (BMI); Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2014). Digitale Agenda 2014 – 2017, August 2014, [Online], URL http://www.digitale-agenda.de/Content/DE/_Anlagen/2014/08/2014-08-20-digitale-agenda.pdf?__blob=publicationFile&v=6, [Zugegriffen: 27-Nov-2015]
[S6]	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2015). Strategie Intelligente Vernetzung, September 2015, [Online], URL http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/strategie-intelligente-vernetzung,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf, [Zugegriffen: 27-Nov-2015]
[S7]	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. (Bitkom) (2015). Aktionsplan Intelligente Mobilität, März 2015, [Online],URL https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Aktionsplan-Intelligente-Mobilitaet.html, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[S8]	Continental AG (2015). Continental-Mobilitätsstudie 2015, Januar 2015, [Online], URL http://www.continental-corporation.com/www/download/presseportal_com_de/themen/initiativen/ov_mobilitaetsstudien_de/ov_mobilitaetsstudie2015_de/download_channel/mobistud2015_praesentation_de.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[S9]	Deloitte & Touche GmbH (2015). Datenland Deutschland. Connected Car. Generation Y und die nächste Generation des Automobils, September 2015, [Online], URL http://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/manufacturing/150909_DEL-15-5015_Brosch%C3%BCre_DasConnectedCar_rz_WEB-safe.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]

[S10]	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) (2015). Neue autoMobilität, Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft, September 2015, [Online], URL http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Stellungnahmen/NaM_acatech_POSITION_Neue_autoMobilitaet_Web.pdf, [Zugegriffen: 27-Nov-2015]
[S11]	Everis (2015) Connected Car Report, August 2015, [Online],URL http://www.everis.com/global/WCRepositoryFiles/everis%20connected%20car%20report.pdf,
[S12]	Fettweis, G. et al. (2014). Taktiles Internet, VDE Positionspapier, 32 Seiten, Januar 2014, URL https://www.vde.com/de/fg/ITG/Seiten/PosiPapTaktilesInternet.aspx, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[S13]	Fettweis, G. et al. (2014). The Tactile Internet, ITU-T Technology Watch Report, 18 Seiten, August 2014, [Online], URL https://www.itu.int/oth/T2301000023/en,
[S14]	ForTISS GmbH (2011). Mehr Software (im) Wagen: Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) als Motor der Elektromobilität der Zukunft. Abschlussbericht des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Verbundvorhabens „eCar-IKT-Systemarchitektur für Elektromobilität“, Februar 2011, [Online], URL http://download.fortiss.org/public/ikt2030/ikt2030de.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015],
[S15]	Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI); Prognos AG (2015). Industriepolitisches Grundkonzept für den Bereich Intelligente Verkehrssysteme im Freistaat Sachsen. Abschlussbericht, Februar 2015
[S16]	Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) (2015). Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen – Industriepolitische Schlussfolgerungen, Dienstleistungsprojekt 15/14. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), November 2015, [Online],URL https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/H/hochautomatisiertes-fahren-auf-autobahnen,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf, [Zugegriffen: 27-Nov-2015]
[S17]	Gasser T. M. et al. (2012). Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik Heft F 83, Januar 2012
[S18]	Global Mobile Suppliers Association (GSA) (2015). Evaluating the LTE Broadcast, November 2015, Opportunity, URL http://www.gsacom.com/lte-broadcast/, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[S19]	GSM Association (GSMA) (2012). 2025 Every Car Connected: Forecasting the Growth and Opportunity. Whitepaper, GSMA Connected Living programme: mAutomotive, Februar 2012, [Online], URL http://www.gsma.com/connectedliving/wp-content/uploads/2012/03/gsma2025everycarconnected.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[S20]	ITU-R (2015). IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. Recommendation ITU-R M.2083-0, September 2015, [Online], URL http://www.itu.int/md/R12-SG05-C-0199/en, [Zugegriffen: 18-Nov-2015],
[S21]	KPMG (2012). Self-driving cars: The next revolution, Juli 2012, [Online], URL https://www.kpmg.com/US/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/self-driving-cars-next-revolution.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015],
[S22]	KPMG (2015). Connected and Autonomous Vehicles – The UK Economic Opportunity, März 2015, [Online], URL https://www.kpmg.com/BR/en/Estudos_Analises/artigosepublicacoes/Documents/Industrias/Connected-Autonomous-Vehicles-Study.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015],
[S23]	Lietz, H. et al. (2011). Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study, FAT-Schriftenreihe 229 (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. FAT, Hrsg.), VDA, April 2011
[S24]	McKinsey & Company (2014). Connected car, automotive value chain unbound, Advanced Industries, September 2014, [Online], URL http://www.sas.com/images/landingpage/docs/3_McKinsey_John_Newman_Connected_Car_Report.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015],
[S25]	National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles, Mai 2013, [Online], URL http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/Automated_Vehicles_Policy.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015],
[S26]	NGMN Alliance (2015). NGMN 5G White Paper, Februar 2015, [Online],URL https://www.ngmn.org/uploads/media/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf[Zugegriffen: 18-Nov-2015],
[S27]	Pinto, G. M. T. (2014). The Internet on Wheels and Hitachi, Ltd., November 2014, [Online], URL https://www.hds.com/assets/pdf/hitachi-white-paper-internet-on-wheels.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015],

[S28]	Phlebs, P.; Feige, I.; Zapp, K. (2015). Die Zukunft der Mobilität. Szenarien für Deutschland in 2035, Institut für Mobilitätsforschung (Hrsg.), München, März 2015, [Online], URLhttp://www.ifmo.de/tl_files/publications_content/2015/ifmo_2015_Zukunft_der_Mobilitaet_Szenarien_2035_de.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015],
[S29]	Shell Deutschland Oil GmbH (2014). Shell PKW-Szenarien bis 2040. Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität, Hamburg, September 2014, [Online], URL http://www.shell.de/aboutshell/media-centre/annual-reports-and-publications/shell-pkwszenarien.html, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[S30]	U. S. Energy Information Administration (EIA) (2015). Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040, Washington, April 2015, [Online], URL http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383%282015%29.pdf, [Zugegriffen: 26-Nov-2015]
[S31]	Verband der Automobilindustrie (VDA) (2015). Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren, September 2015, [Online],URL https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/automatisiertes-fahren.html, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[S32]	World Economic Forum; Boston Consulting Group (2015). Self-Driving Vehicles in an Urban Context. Press Briefing, November 2015, [Online],URL http://de.slideshare.net/TheBostonConsultingGroup/self-driving-vehicles-in-an-urban-context, [Zugegriffen: 27-Nov-2015]

E3 Normen und Standards

[N1]	DATEX-II, Version 2.3, URL http://www.datex2.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[N2]	ETSI (2006). Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers, ETSI EN 300 401 V1.4.1, Januar 2006
[N3]	ETSI (2009). Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic set of applications; Definitions, TR 102 638 V1.1.1, Juni 2009
[N4]	ETSI (2010). Digital Audio Broadcasting (DAB); Transport of Advanced Audio Coding (AAC) audio, ETSI TS 102 563 V1.2.1, Mai 2010
[N5]	ETSI (2013). Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band, EN 302 663, V1.2.1, Juli 2013
[N6]	ETSI (2014): Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular communications; Basic set of applications; Part 2: Specification of cooperative awareness basic service, EN 302 637-2, November 2014
[N7]	ETSI (2014): Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular communications; Basic set of applications; Part 3: Specifications of decentralized environmental notification basic service, EN 302 637-3, November 2014
[N8]	ETSI (2015). Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular communications; Basic Set of Applications; Facilities layer protocols and communication requirements for infrastructure services, TS 103 301, Version 0.0.11, October 2015
[N9]	IEEE (2012): IEEE Standard for information technology – Telcommunications and Information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements, Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, März 2012, URL http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6178209, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[N10]	ISO (2015). Intelligent transport systems (ITS) – Location referencing for geographic databases – Part 3: Dynamic location references (dynamic profile), ISO 17572-3:2015, URL: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:63402:en, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]

[N11]	ISO (2013). Intelligent transport systems – Traffic and Travel Information (TTI) via Transport Protocol Experts Group, Generation 1 (TPEG1) binary data format, ISO/TS 18234, Part 1–6, 2006-2013
[N12]	ISO (2015). Intelligent transport systems – Traffic and Travel Information (TTI) via Transport Protocol Experts Group, Generation 2 (TPEG2), ISO/TS 21219, Parts 2, 3, 4, 5, 6, 18, 2014–2015
[N13]	Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems (OCIT), URL http://www.ocit.org, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[N14]	OpenLR – Dynamic Location Referencing, URL http://www.openlr.org, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[N15]	Open Traffic Systems (OTS), URL http://www.opentrafficsystems.org, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[N16]	SAE International (2014): Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems, SAE J3016, January 2014, URL http://standards.sae.org, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]

E4 Bücher, Artikel und Konferenzbeiträge

[A1]	Blind, K. (2013) The Impact of Standardization and Standards on Innovation, Nesta Working Paper, [Online], URL http://www.nesta.org.uk/publications/impact-standardization-and-standards-innovation, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[A2]	Chucholowski, F.; Gnatzig, S. ; Tang, T.; Hosseini, A. und Lienkamp, M. (2013). Teleoperiertes Fahren Aktuelle Entwicklungen, 6. Tagung Fahrerassistenz, November 2013.
[A3]	Festag, A. (2014). Cooperative Intelligent Transport Systems standards in Europe. IEEE Communications Magazine , 52 (12), Seiten 166-172, Dezember 2014
[A4]	Götze, U.; Rehme, M. (2013). Intelligente Verkehrssysteme in der Neuen Mobilität. Formen, Entwicklungstrends und Wertschöpfungsnetze, GUC Verlag, Chemnitz
[A5]	Götze, U.; Rehme, M. (2014). Analyse und Prognose von Wertschöpfungsstrukturen der neuen Mobilität. Instrumentarium für das strategische Innovationsmanagement, in: Proff, H. (Hrsg.): Radikale Innovationen in der Mobilität. Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte, Springer Fachmedien, Wiesbaden, Seiten 188-205
[A6]	Kenney, J. B. (July 2011). Dedicated Short-Range Communications (DSRC) standards in the United States. Proceedings of the IEEE, 99 (7), 1162-1182
[A7]	Hoeg,W. und Lauterbach, T. (2009). Digital Audio Broadcasting: Principles and applications of DAB, DAB+ and DMB, John Wiley & Sons, Ltd., ISBN 978-0-470-51037-7, 2009
[A8]	Kato, S.; Hiltunen, M.; Joshi, K. und Schlichting, R. (2013). Enabling Vehicular Safety Applications over LTE Networks, International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE ‘13), Seiten 747-752, Las Vegas, LV, USA, Dezember 2013
[A9]	Kopitz, D. und Marks, B. (1999). RDS: The radio data system, Artech House, ISBN 0-89006-744-9, 1999
[A10]	Lutz, L. (2015). Autonome Fahrzeuge als rechtliche Herausforderung, Neue juristische Wochenschrift , Heft 3, Seiten 119-124, 2015
[A11]	Matheus, K.; Morich, R. und Lübke, A. (2004). Economic background of car-to-car communications, Informationssysteme für mobile Anwendungen (IMA 04), Braunschweig, Oktober 2004
[A12]	Michailow, N. et al. (2014). Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation cellular networks, in IEEE Transactions on Communications, Volume 62, Issue 9, Seiten 3045-3061, August 2014

[A13]	Neckermann, L. (2015). The mobility revolution – Zero emissions, zero accidents, zero ownership. Troubador Publishing Ltd, Februar 2015URL http://threezeroes.com, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[A14]	Porter, M. E. und Heppelmann, J.E. (2014). How smart, connected products are transforming competition, Harvard Business Review 92, no. 11, November 2014, Seiten 64 – 88, November 2014, URL https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[A15]	Prasad, A. et al. (2014). Energy-efficient D2D discovery for proximity services in 3GPP LTE-Advanced networks: ProSe discovery mechanisms, in IEEE Vehicular Technology Magazine, Vol.9, Nr. 4, Seiten 40–50, Dezember 2014
[A16]	Scheuer, F. (2015), Schutz der Privatsphäre in Ad-hoc-Fahrzeugnetzen. Dissertation, Januar 2013, [Online], URL http://ediss.sub.uni-hamburg.de/volltexte/2013/6016/pdf/Dissertation.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[A17]	Harding, J. et al. (2014). Vehicle-to-vehicle communications: Readiness of V2V technology for application, Report Nr. DOT HS 812 014, Washington, DC:, US DoT National Highway Traffic Safety Administration, August 2014, [Online], URL http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/V2V/Readiness-of-V2V-Technology-for-Application-812014.pdf
[A18]	Moser, M.; Estor, D.; Minzlaff, M.; Weimerskirch, A. und Wolleschensky, L. (2014). Operating a Car-to-X PKI–Challenges for Security and Privacy, FISITA World Automotive Congress ‘14, Maastricht, Niederlande, Juni 2014

E5 Organisationen

[O1]	Amsterdam Group. URL http://www.amsterdamgroup.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O2]	3rd Generation Partnership Project (3GPP). URL http://www.3gpp.org, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O3]	Car-2-Car Communication Consortium (C2C-CC).URL http://www.car-2-car.org, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O4]	Car Connectivity Consortium (CCC). URL http://carconnectivity.org, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O5]	Deutsches Institut für Normung (DIN). URL: http:// www.din.de, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O6]	Easyway. URL https://www.easyway-its.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O7]	ERTICO, URL http://ertico.com, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O8]	European Committee for Standardization (CEN). URL https://www.cen.eu , [Zugegriffen: 18-Nov-2015]CEN TC 278: URL http://www.itsstandards.eu, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O9]	European Telecommunications Standards Institute (ETSI).URL http://www.etsi.org, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O10]	Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).URL https://www.ieee.org, WG 802.11 URL https://standards.ieee.org/develop/wg/WG802.11.htmlWG 1609 – Dedicated Short Range Communication (DSRC) URL http://standards.ieee.org/develop/wg/1609_WG.html[Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O11]	International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector (ITU-T), URL http://www.itu.int/en/ITU-T, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]

[O12]	International Organization for Standardization (ISO). URL http://www.iso.orgISO/TC204 Intelligent transport systems, URL http://www.iso.org/iso/iso_technical_committee?commid=54706, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O13]	Next Generation Mobile Networks (NGMN) Alliance. URL http://www.ngmn.de/home.html, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O14]	Open Traffic Systems City Association (OCA e. V.),URL http://www.oca-ev.info/oca-orig/, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O15]	SAE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. URL https://www.sae.org, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O16]	TISA – Traveller Information Services Association. URL http://www.tisa.org, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[O17]	World DAB Forum, URL http://www.worlddab.org, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]

E6 Sonstige Referenzen

[SO1]	CEN and ETSI (2013). Final joint CEN/ETSI-progress report to the European Commission on Mandate M/453, Juli 2013, [Online], URL: http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/intelligent-transport, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[SO2]	Coyer, D. [2015]. The Connected Cow, Contextual Awareness, and the IoT, DataInformed Blog, Januar 2015, [Online], URL http://data-informed.com/connected-cow-contextual-awareness-iot, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[SO3]	Digitalradio.de (2015). Fakten zum deutschen Digitalradio, [Online], URL http://www.digitalradio.de/index.php/de/fakten-zum-deutschen-digitalradio, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[SO4]	Du, J. (2015). The status of LTE-V in 3GPP, ITU Workshop on Vehicle Communications and Automated Driving, Beijing, China, July 2015, [Online], URL http://www.itu.int/en/ITU-T/extcoop/cits/Documents/Meeting-201507-Beijing/010%20-%20LTE-V%20in%203GPP.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[SO5]	Europäische Kommission (2009). M/453 Standardisation mandate addressed to CEN, CENELEC and ETSI in the field of information and communication technologies to support the interoperability of co-operative systems for intelligent transport in the European community, Juni 2009, [Online], URL http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/mandates/index.cfm?fuseaction=search.detail&id=434, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[SO6]	Europäische Kommission (2014), New connected car standards put Europe into top gear, Februar 2014, [Online], URL: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-141_en.htm, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[SO7]	Gerke, J. (2015). Autofahren ohne Schlüssel, WDR.de, [Online], URL http://www1.wdr.de/themen/verbraucher/themen/freizeit/autodiebstahl-leicht-gemacht-100.html, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[SO8]	Greenberg, A. (2015). Hackers remotely kill a jeep on the highway—With me in it, WIRED, [Online], URL http://www.wired.com/2015/07/hackers-remotely-kill-jeep-highway/. [Zugegriffen: 18-Nov-2015].
[SO9]	Gross, B. [2015]. Google's self driving car gathers nearly 1 GB/sec, Mai 2013, [Online],URL https://www.linkedin.com/pulse/20130502024505-9947747-google-s-self-driving-car-gathers-nearly-1-gb-per-second, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]

[SO10]	Nationaler IT-Gipfel (2014). Arbeitsgruppe 8. Anlage zum High-Level-Strategiepapier, Hamburg 2014 URL https://www.atkearney.de/documents/856314/5240963/PPT-digitale-infrastruktur-fuer-intelligente-mobilitaet.pdf/354ced22-8c06-47b5-b9eb-47eb8bada976, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[SO11]	O. V. (2014). Autoindustrie gegen IT-Branche. Der Kampf der Branchen um die Zukunft des Autos, Wirtschaftswoche Online, [Online], URL http://www.wiwo.de/unternehmen/auto/autoindustrie-gegen-it-branche-der-kampf-der-branchen-um-die-zukunft-des-autos/11168482.html, [Zugegriffen: 20-Nov-2015]
[SO12]	O. V. (2015). stern-Exklusiv: VW-Chef Müller im Interview. "Wir werden andere Autos bauen - die Zukunft ist elektrisch", http://www.stern.de, [Online], URL http://www.stern.de/auto/news/vw-chef-matthias-mueller-im-stern--werden-andere-autos-bauen---die-zukunft-ist-elektrisch-6583940.html, [Zugegriffen: 02-Dez-2015]
[SO13]	Pretty Good Privacy (PGP). URL: http://www.pgpi.org, [Zugegriffen: 20-Nov-2015]
[SO14]	Ross, P. E. (2015). Cars Talk to Cars on the Autobahn, IEEE Spectrum Blog Cars that think, November 2015, [Online], URL: http://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/infrastructure/cars-talk-to-cars-on-the-autobahn, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[SO15]	Shi, Y. (2015). LTE-V: A Cellular-assisted V2X communication technology, ITU Workshop on Vehicle Communications and Automated Driving, Beijing, China, July 2015, [Online], URL https://www.itu.int/en/ITU-T/extcoop/cits/Documents/ITS%20Events-201507-Beijing/Presentations/S3P2-Yi-Shi.pdf, [Zugegriffen: 18-Nov-2015]
[SO16]	Wimmelbücker, S. (2015). Vorstandschef Harald Krüger: BMW setzt auf E-Mobilität, http://www.automobilwoche.de, [Online], URL http://www.automobilwoche.de/article/20151201/NACHRICHTEN/151209996/1276/vorstandschef-harald-kruger-bmw-setzt-auf-e-mobilitat#.Vl7Dx0a_uxT, [Zugegriffen: 02-Dez-2015]

Impressum

Hauptautoren:

Dr. Andreas Festag, Technische Universität Dresden, Vodafone Stiftungslehrstuhl Mobile Nachrichtensysteme (MNS)
Marco Rehme, IVM Institut für Vernetzte Mobilität gGmbH
Dr. Jan Krause, ifak Institut für Automation und Kommunikation e. V.

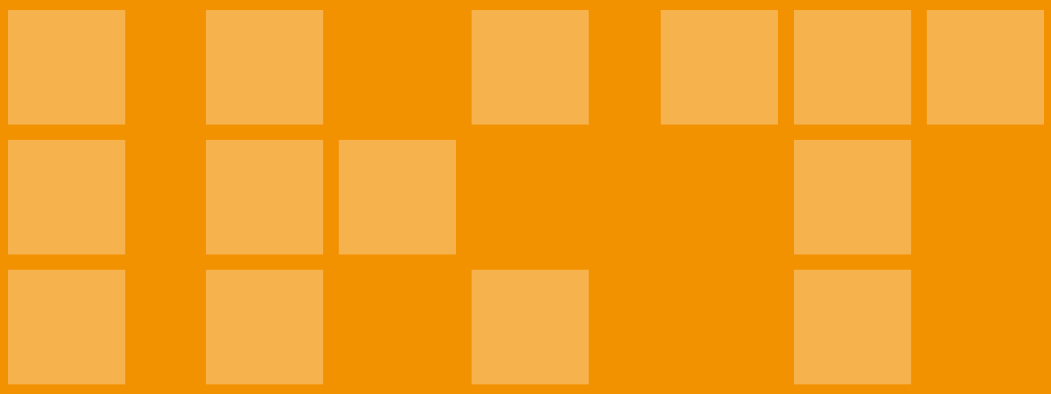
Mit fachlicher Unterstützung von:

Christoph Engel, ifak Institut für Automation und Kommunikation e. V.
Sebastian Kühlmorgen, Technische Universität Dresden, MNS
Dr. Ignacio Llatser, Technische Universität Dresden, MNS
Michael Müller, IVM Institut für Vernetzte Mobilität gGmbH
Joachim Schade, ifak Institut für Automation und Kommunikation e. V.
Peter Talatzko, IVM Institut für Vernetzte Mobilität gGmbH

Herausgeber und Ansprechpartner:

Dr. Patrick Ester, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
Geschäftsstelle der Begleitforschung IKT für Elektromobilität II
Bismarckstraße 33
10625 Berlin
Telefon: +49 30 3838 68 33
patrick.ester@vde.com

Layout, Satz, Illustration:
Medien&Räume | Kerstin Gewalt

Erscheinungsdatum:
Januar 2016

Diese Publikation ist im Rahmen des Technologieprogramms „IKT für Elektromobilität II“ erstellt worden. Sie ist kostenfrei erhältlich.