

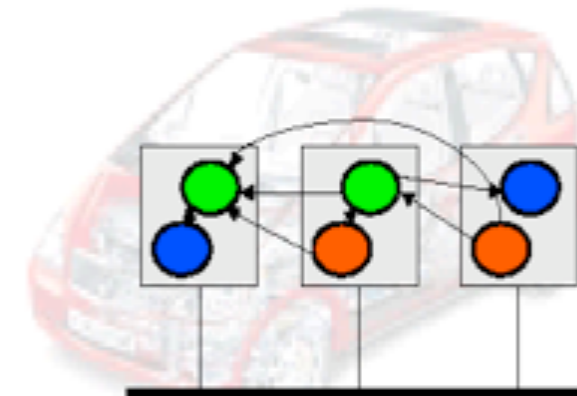
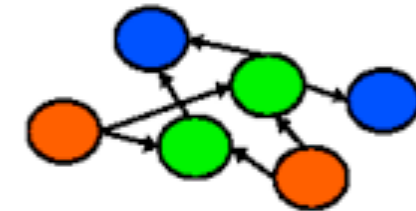
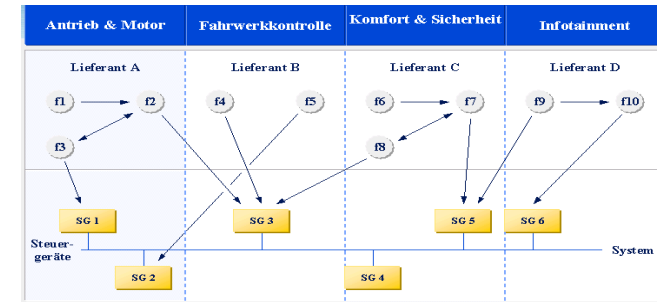
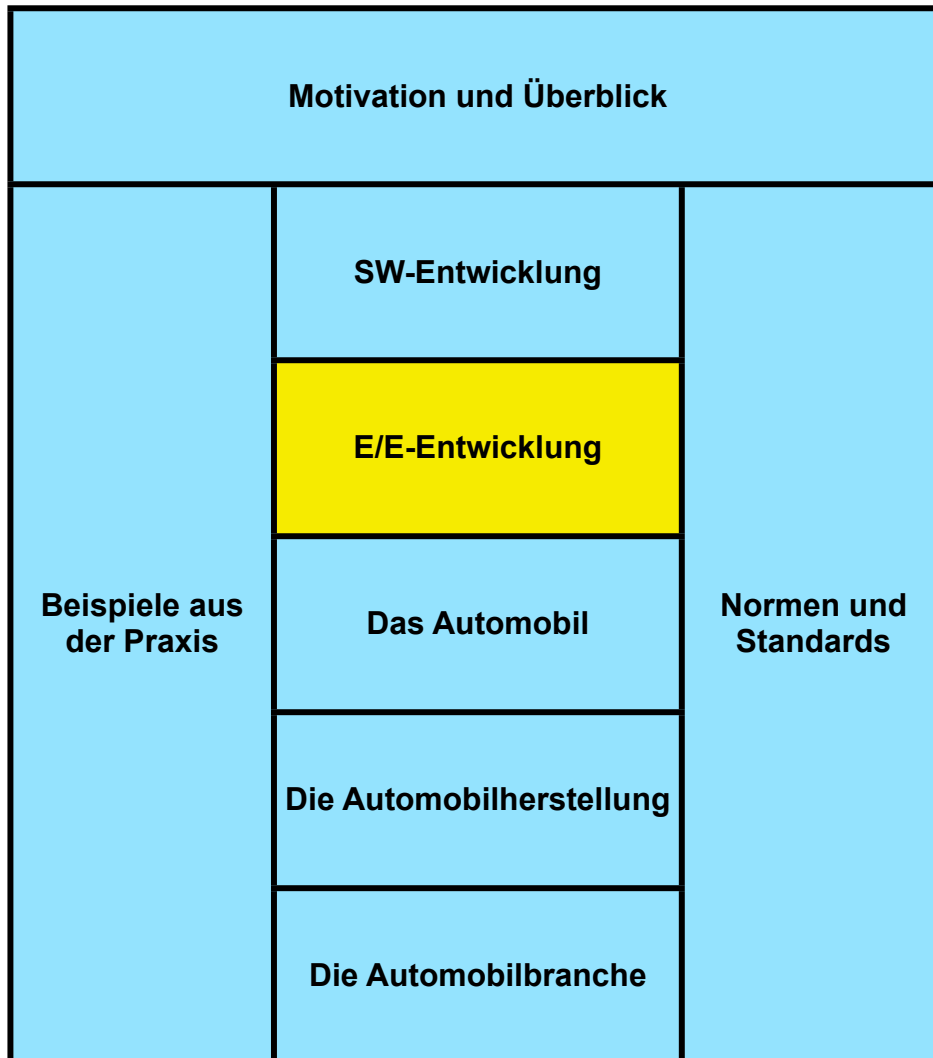
Vorlesung Automotive Software Engineering Teil 5 E/E-Entwicklung (2)

TU Dresden, Fakultät Informatik

Sommersemester 2012

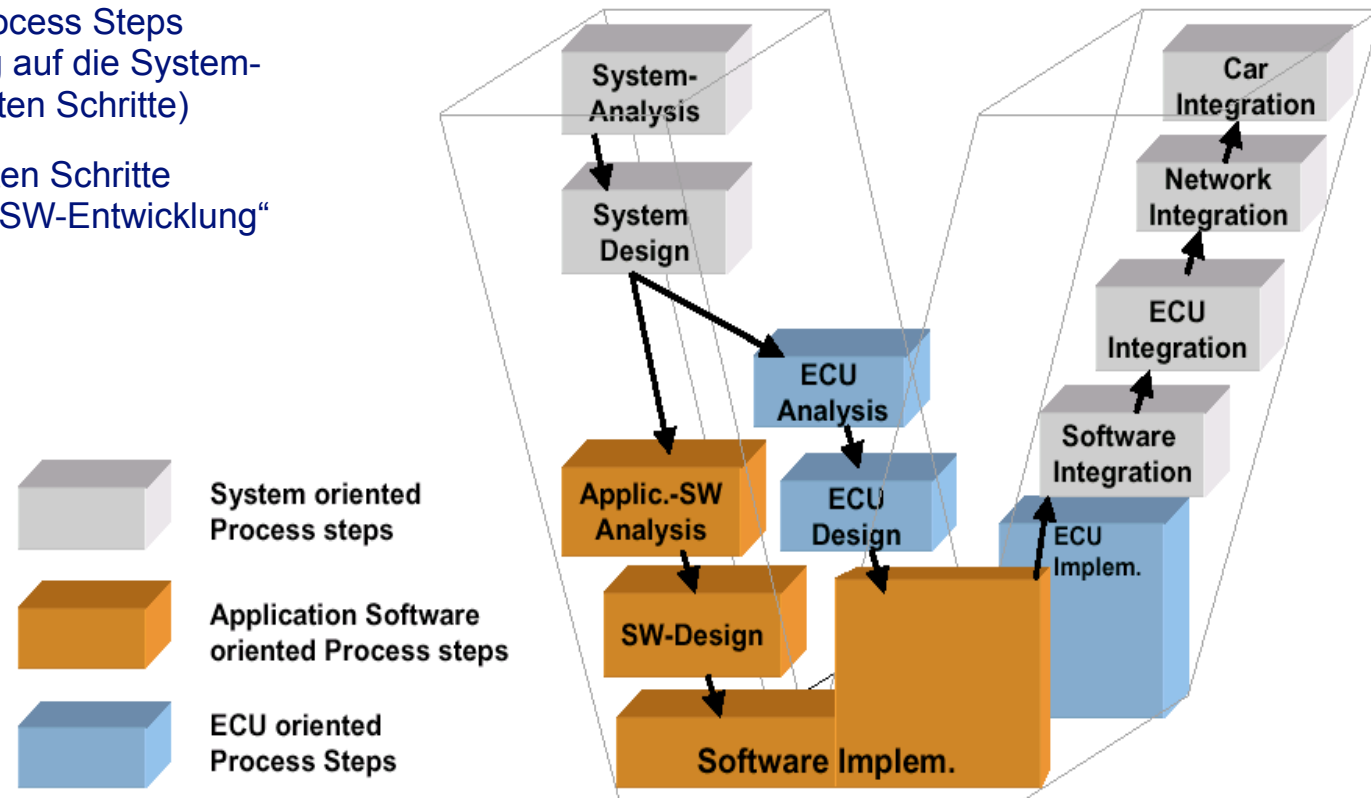
Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Hohlfeld

bernhard.hohlfeld@daad-alumni.de



- Randbedingungen der Elektrik/Elektronik-Entwicklung im Automobil und deren Auswirkung auf die Software-Entwicklung kennenlernen:
 - Halbleitertechnologie
 - Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
 - Mechatronik-Entwicklungen im Automobil
 - Kabelbaum und Energiebordnetze
 - Bussysteme im Automobil

- Automotive Elektrik/Elektronik-Entwicklung
- Ziel:
Darstellung einiger Randbedingungen der Elektrik/Elektronik-Entwicklung für eingebettete Systeme speziell im Automobil
- Schwerpunkt:
ECU oriented Process Steps
(mit Rückwirkung auf die System- und SW-orientierten Schritte)
- Die SW-orientierten Schritte werden in Teil 6 „SW-Entwicklung“ behandelt
- ECU?



5. E/E-Entwicklung

1. Halbleitertechnologie
2. Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
3. Mechatronik-Entwicklungen im Automobil
4. Kabelbaum und Energiebordnetze
5. Bussysteme im Automobil

5. E/E-Entwicklung

1. Halbleitertechnologie
2. Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
3. Mechatronik-Entwicklungen im Automobil
4. Kabelbaum und Energiebordnetze
- 5. Bussysteme im Automobil 18.06.2012**

5. E/E-Entwicklung



5. Bussysteme im Automobil

1. Einleitung und Anforderungen

2. Fehlersicherheit und Codierung

3. Zeitverhalten

4. Topologien

5. Protokolle und Bussysteme

Einleitung und Anforderungen



■ Früher:

- Geringer Umfang der E/E-Systeme im Fahrzeug
- Übertragung der Informationen über dedizierte Leitungen
 - Schalter -> SG
 - Sensor -> SG
 - SG -> Aktor
 - SG <-> SG

■ Heute

- Ständig steigende Anzahl von Steuergeräten, Sensoren, elektromechanischen Aktuatoren und Bedienelementen
- Gestiegener Informationsaustausch zwischen verschiedenen Steuergeräten und Teilsystemen
- Verkabelung über einzelne Kabel stößt an Grenzen bzgl. Bauraum, Gewicht, Anschlußzahl und Kosten

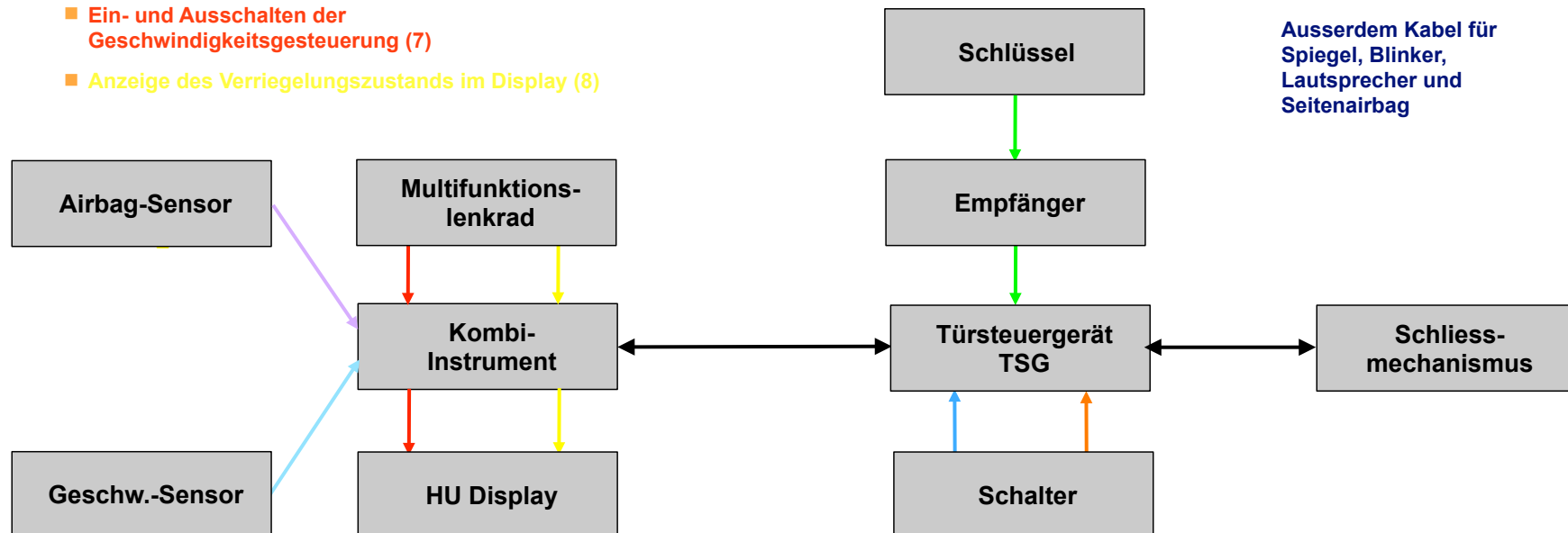
■ Lösung

- Bussysteme im Automobil

Türsteuerung: Steuergeräte, Aktoren, Sensoren Struktur und Vernetzung



- Funktion "Tür entriegeln"
 - Von aussen über Funkschlüssel (1)
 - Von innen über Schalter (2)
 - Von innen über Airbagsensor (3)
- Funktion "Tür verriegeln"
 - Von aussen über Funkschlüssel (1)
 - Von innen über Schalter (4)
 - Von innen zeitgesteuert (5)
 - Von innen geschwindigkeitsgesteuert (6)
- Komfortfunktionen
 - Ein- und Ausschalten der Geschwindigkeitssteuerung (7)
 - Anzeige des Verriegelungszustands im Display (8)



Hardware Layer	Topologie, Übertragungsmedium
Transferrate	Brutto- und Nettotransferrate
Zeitverhalten	Synchron (deterministisch) vs. Asynchron
Fehlererkennung	Hamming-Distanz, Busmonitoring, ACK
Ausfallsicherheit	Auswirkung ausgefallener oder störender ECUs, Redundanz
Kosten	Hardware- und Softwarekosten, Lizenzgebühren

5. E/E-Entwicklung



5. Bussysteme im Automobil

1. Einleitung und Anforderungen

2. Fehlersicherheit und Codierung

3. Zeitverhalten

4. Topologien

5. Protokolle und Bussysteme

■ Parity:

- XOR aller Bits der Nachricht wird als Paritybit angehängt
- Bandbreitenbedarf: 1 Bit unabhängig von der Wortlänge
- Hammingdistanz: 2 -> erkennt nur einfache Fehler

■ Checksum:

- Quersumme aller Bits des Wortes wird angehängt
- Bandbreitenbedarf: $\log_2(n)$ Bits
- Empfindlich gegen systematische Fehler (Zahlendreher etc.)

■ Zyklische Codes:

- Verwendet nichtlineare Eigenschaften bestimmter mathematischer Gruppen (Ideale) zur Optimierung des Verhältnisses von Hammingdistanz zu Bandbreitenbedarf
- Unempfindlich gegen die meisten statistischen und systematischen Fehler

Fehlersicherheit und Codierung - Anforderungen

■ Sprache / Telefon

- Verlust von Datenpaketen Unkritisch
- Verzögerung Kritisch

■ email

- Verlust von Datenpaketen Kritisch
- Verzögerung Unkritisch

■ Motorsteuerung

- Verlust von Datenpaketen Kritisch
- Verzögerung Kritisch

■ Steer by Wire

- Verlust von Datenpaketen Kritisch!!
- Verzögerung Kritisch!!

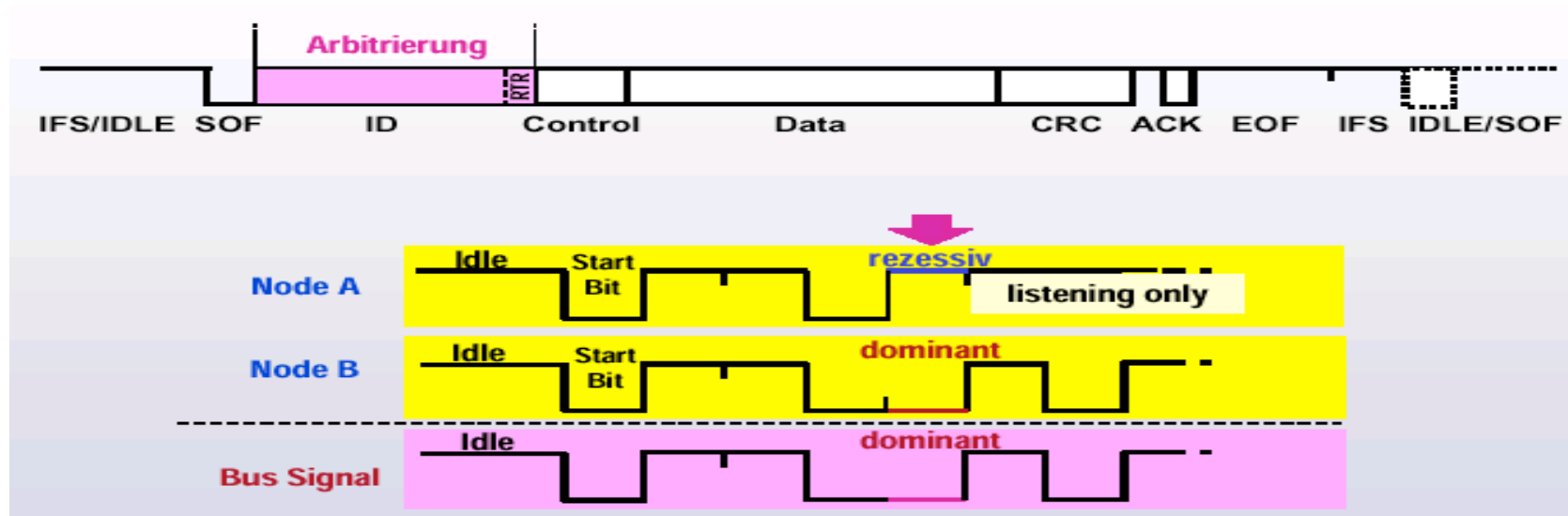
5. E/E-Entwicklung



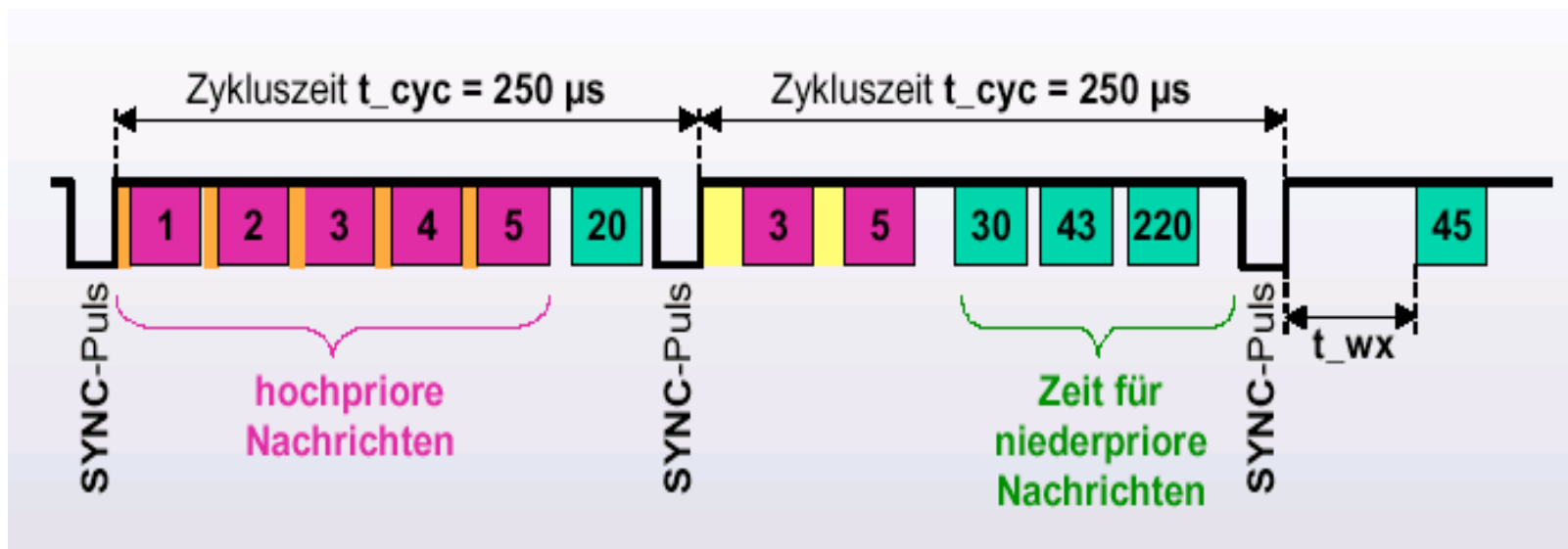
5. Bussysteme im Automobil

1. Einleitung und Anforderungen
2. Fehlersicherheit und Codierung
- 3. Zeitverhalten**
4. Topologien
5. Protokolle und Bussysteme

- Bei inaktivem Bus (idle) kann jeder Teilnehmer durch Senden des dominanten Start-Bit Kommunikation beginnen
- Beginnen 2 oder mehr Teilnehmer gleichzeitig einen Sendeversuch, wird über das ID-Feld eine Arbitrierung durchgeführt
 - Flexible Bandbreitennutzung
 - Versenden von Nachrichten in bestimmter Zeit kann nicht garantiert werden



- Ein Busmaster synchronisiert alle Teilnehmer durch Senden eines Synchronisationssignals (SYNC-Puls)
- Innerhalb eines Zyklus gibt es für bestimmte (hochpriore) Nachrichten-IDs festgelegte Zeitfenster, in denen deren Übertragung garantiert wird.
- Freibleibende Zeit kann für asynchrone (niederpriore) Nachrichten genutzt werden
 - Deterministisches Verhalten und flexible Bandbreitennutzung
 - Bedarf für dedizierten Busmaster, inflexible Struktur für die Auslegung niederpriorer/hochpriorer Nachrichten



5. E/E-Entwicklung

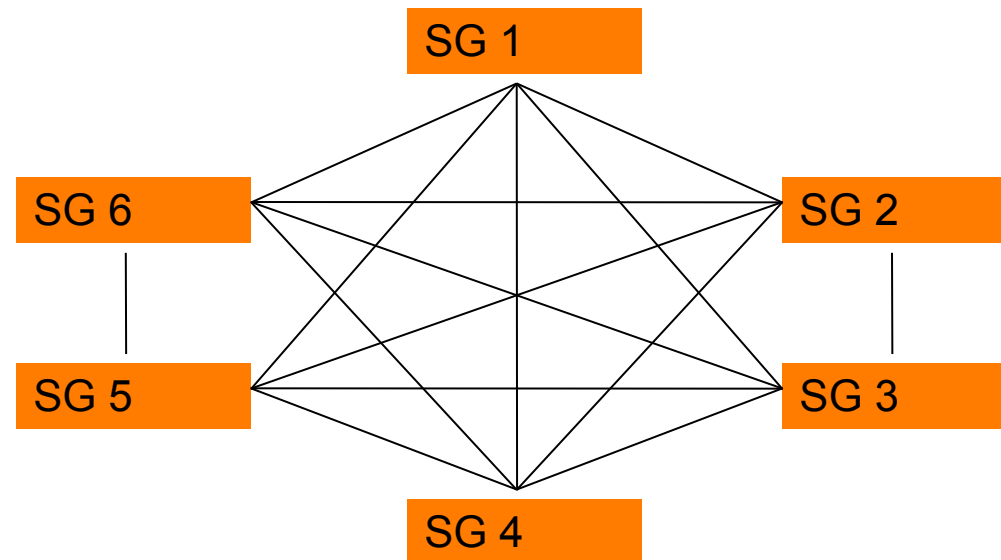


5. Bussysteme im Automobil

1. Einleitung und Anforderungen
2. Fehlersicherheit und Codierung
3. Zeitverhalten
- 4. Topologien**
5. Protokolle und Bussysteme

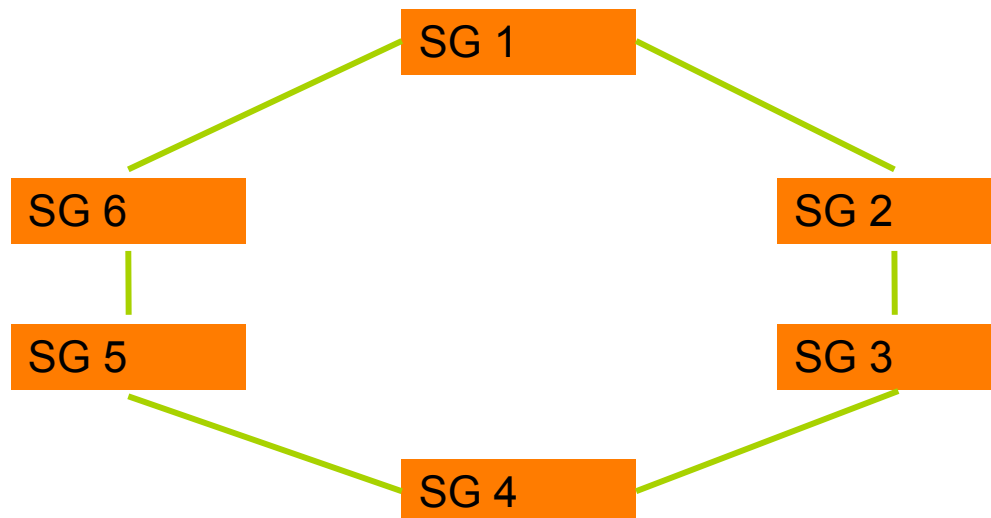
Topologien - Direkte Verbindung

- Bei direkter Verbindung sind für 6 SGe 15 Leitungen und 30 Transceiver notwendig
- Keine Probleme mit Deterministik
- Datenmanagement im SG sehr aufwändig
 - Anwendung lediglich für Point-to-Point-Verbindung
 - Nicht benutzbar für große Systeme (Gewicht, Kosten, Datenmanagement)



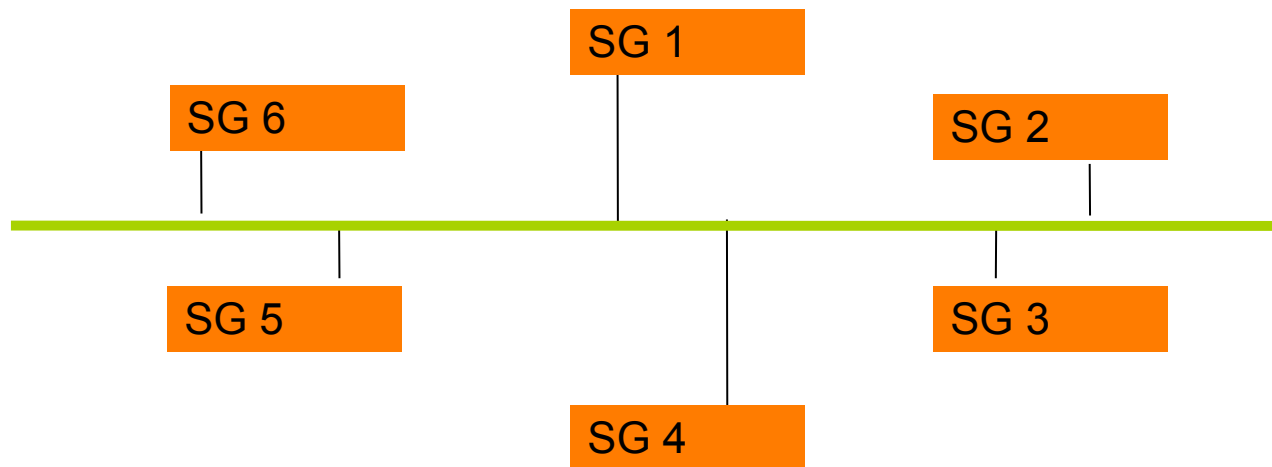
Topologien - Ring

- Im Ring sind für 6 SGe 6 Leitungen und 12 Single Ended Transceiver notwendig
- Protokollstruktur z.B. durch Tokens, gewährleistet hohe Performance, aber Einbrüche der Übertragung bei Verlust des Tokens
- Busmaster notwendig, aber Backup durch beliebiges anderes SG möglich
- Gewährleistung der Kommunikation bei Ausfall der Transceiver eines SG schwierig
 - Hervorragend für Breitband-Datendienste (Infotainment)
 - Nicht geeignet für sicherheitskritische Anwendungen



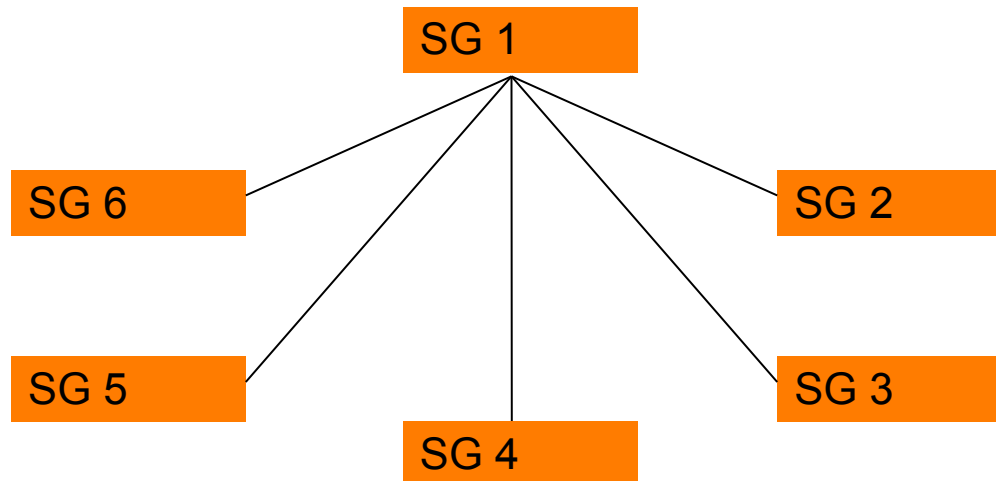
Topologien - Bus

- Beim Bus ist für 6 SGe „eine große Leitung“ und 6 bidirektionale Transceiver notwendig
- Aushandlung der Kommunikation über nichtdeterministische Arbitrierung oder aufwändige und bandbreitenintensive Protokolle
- Ausfall eines SGe beeinträchtigt Kommunikation nicht
- Kostengünstig und (bei niedriger Bandbreite) unkompliziert
 - Einsatz für sicherheitskritische Systeme erfordert spezielles Protokoll
 - Nettobandbreite ungeeignet für datenintensive Dienste



Topologien - Stern

- Im Stern sind für 6 SGe 5 Leitungen und 10 bidirektionale Transceiver notwendig
- Zentrales SG kann effektiv Netzmanagement betreiben (Fehlerbehandlung etc.)
- Mit zentralem SG steht und fällt das System, ansonsten extrem ausfallsicher!
- Protokolle können je nach Anforderung als Point-to-Point oder Bus gefahren werden
 - Je nach Protokoll für alle Anwendungen geeignet
 - Abhängigkeit von zentralem SG erfordert spezielle Maßnahmen: Ausfallsicherheit



5. E/E-Entwicklung

5. Bussysteme im Automobil

1. Einleitung und Anforderungen
2. Fehlersicherheit und Codierung
3. Zeitverhalten
4. Topologien
- 5. Protokolle und Bussysteme**

Klasse	Übertragungsraten	Anwendung	Vertreter
Klasse A	Geringe Datenraten (bis 10 kBit/s)	Vernetzung von Aktoren und Sensoren	LIN
Klasse B	Mittlere Datenraten (bis 125 kBit/s)	Komplexe Mechanismen zur Fehlerbehandlung, Vernetzung von Steuergeräten im Komfortbereich	Lowspeed-CAN
Klasse C	Hohe Datenraten (bis 1 MBit/s)	Echtzeitanforderungen, Vernetzung von Steuergeräten im Antriebs- und Fahrwerksbereich	Highspeed-CAN
Klasse C+	Sehr hohe Datenraten (bis 10 MBit/s)	Echtzeitanforderungen, Sicherheitsanforderungen, Vernetzung von Steuergeräten im Antriebs- und Fahrwerksbereich	FlexRay
Klasse D	Sehr hohe Datenraten (> 10 MBit/s)	Vernetzung von Steuergeräten im Telematik- und Multimediabereich	MOST

Quelle: BOSCH: Krafftfahrtechnisches Taschenbuch, Vieweg+Teubner, 27. Auflage, 2011.

Bussysteme im KFZ - Überblick

Quelle: Vector Informatik GmbH

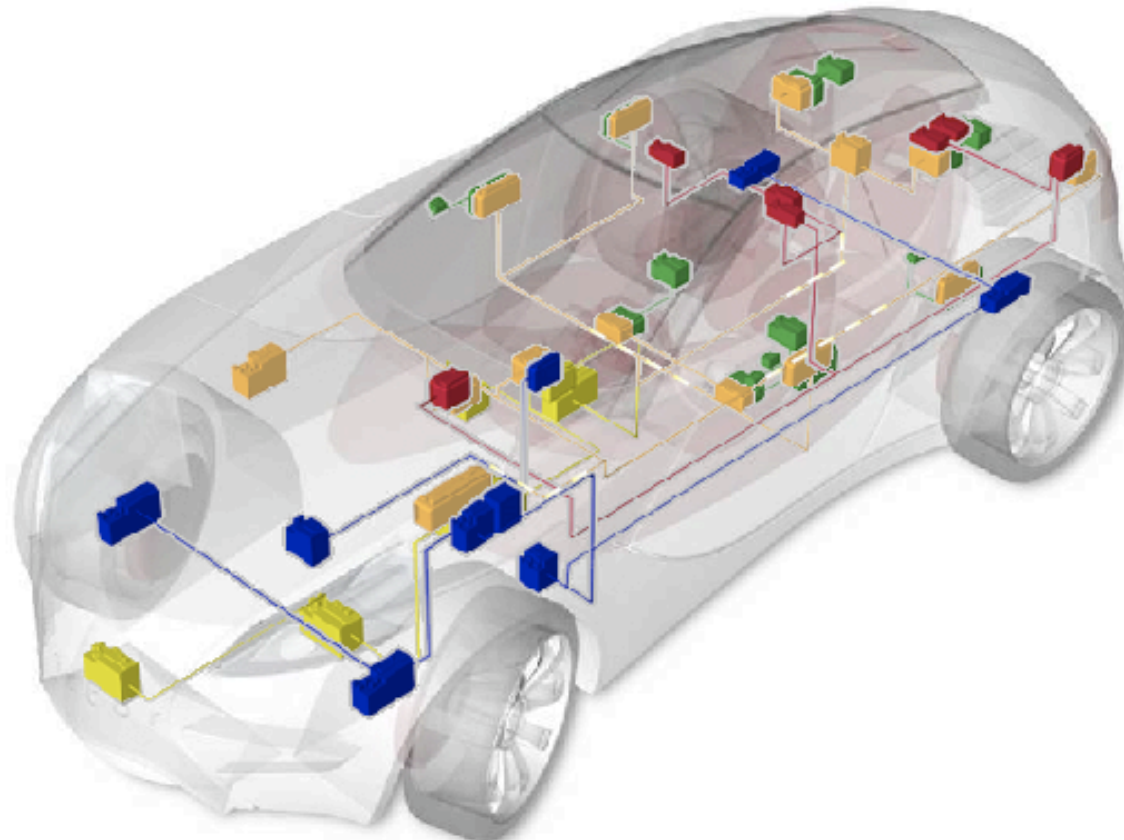


Bussystem	Beschreibung	Anwendungsgebiet
CAN	CAN (Controller Area Network) wurde von der Robert Bosch GmbH Anfang der achtziger Jahre entwickelt und 1994 international genormt (ISO 11898). CAN wurde speziell für den schnellen seriellen Datenaustausch zwischen elektronischen Steuergeräten in Kraftfahrzeugen entwickelt. Daneben wird CAN auch für die Realisierung industrieller Mikrocontroller-Netzwerke eingesetzt.	Kfz-Technik, Automatisierungstechnik
LIN	LIN (Local Interconnect Network) wurde speziell für die kostengünstige Kommunikation intelligenter Sensoren und Aktuatoren in Kraftfahrzeugen entwickelt. Charakteristisch für LIN-Bussysteme ist: <ul style="list-style-type: none"> > Master/Slave-Architektur > zeitgesteuerte Datenübertragung > Single-Wire-Datenübertragung mit max. 20kBaude > im Protokoll eingebauter Synchronisationsmechanismus (keine teuren Quarze nötig) 	Kfz-Technik (Innenraumbus, z.B. Vernetzung innerhalb eines Sitzes)
MOST	MOST (Media Oriented Systems Transport) wurde speziell für die Übertragung von Multimediadaten im Kraftfahrzeug entwickelt. Charakteristisch für MOST Bussysteme ist: <ul style="list-style-type: none"> > optische Datenübertragung bis zu 25Mbit/s > Ringstruktur des Busses > Verwendung des genormten XML-Funktionskatalog > Plug&Play-Fähigkeit 	Kfz-Technik (Multimedia-Anwendungen; Vernetzung von Infotainmentgeräten wie Tuner, DVD-Wechsler, etc.)
FlexRay	FlexRay ist als Bussystem für alle sicherheitskritischen Anwendungen sowie zur Übertragung großer Datenmengen im Kraftfahrzeug konzipiert. Charakteristisch für FlexRay-Bussysteme ist: <ul style="list-style-type: none"> > Datenübertragung bis zu 10Mbit/s > redundante Ausführung aller Netzteile 	Kfz-Technik (z.B. sicherheitsrelevante Anwendungen, Brake-by-Wire)



Elektronikvernetzung im Kfz

✕ schließen



- Antriebsstrang (Powertrain)
- Fahrwerk (Chassis)
- Karosserie (Body)
- Multi-Media (Telematics)

■ CAN H

■ **CAN L**

■ LIN

■ FlexRay

■ MOST

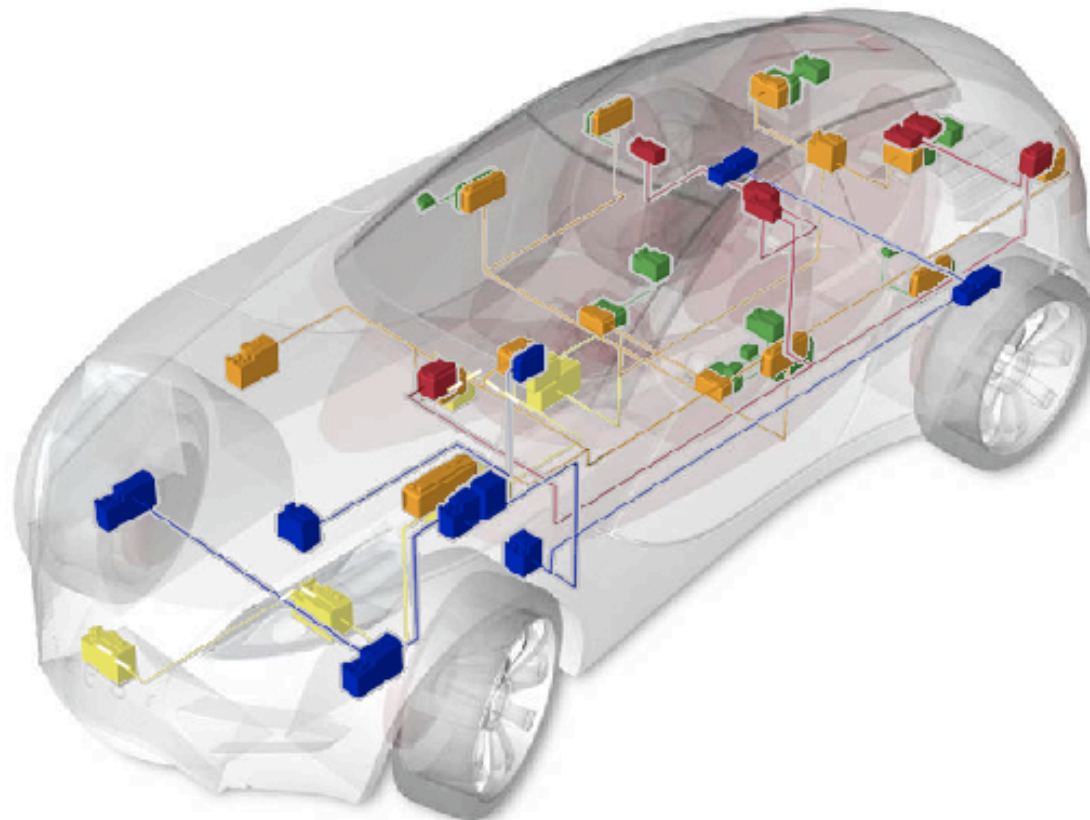
CAN Lowspeed Bus für die Vernetzung der Steuergeräte im Innenraum, Komfortfunktionen z.B. Sitzsteuergerät.



Elektronikvernetzung im Kfz

✕ schließen

- Antriebsstrang (Powertrain)
- Fahrwerk (Chassis)
- Karosserie (Body)
- Multi-Media (Telematics)



■ **CAN H** ■ CAN L ■ LIN ■ FlexRay ■ MOST

CAN Highspeed Bus für die Vernetzung der Steuergeräte im Motorraum, z.B.ESP-Steuergerät.

Protokolle und Bussysteme: CAN (Controller Area Network)



- Entwickelt von Bosch und Intel 1981
- ISO/OSI-Standard
- Eigenschaften:
 - Bandbreite bis 150 kbit/s, mit Terminierung bis 500 kbit/s (PT-CAN)
 - Asynchroner Betrieb ohne Busmaster mit Arbitrierung
 - Variante für Synchronbetrieb: TTCAN (time triggered CAN)
 - Physical Layer: Bus, twisted pair
 - Fehlererkennung: CRC-16, d=6
- Große Zahl von Systemkomponenten verfügbar (Transceiver, Controller)
 - Geeignet für allgemeine, nichtkritische Anwendungen (Karosserie, Komfortsysteme)
 - Nicht geeignet für Multimedia, x-by-Wire, Sicherheitssysteme
 - Deswegen auch Einsatz in anderen Bereichen, z. B. Luftfahrt, Automatisierungstechnik, Rüstungsindustrie
- <http://www.can-cia.org/>

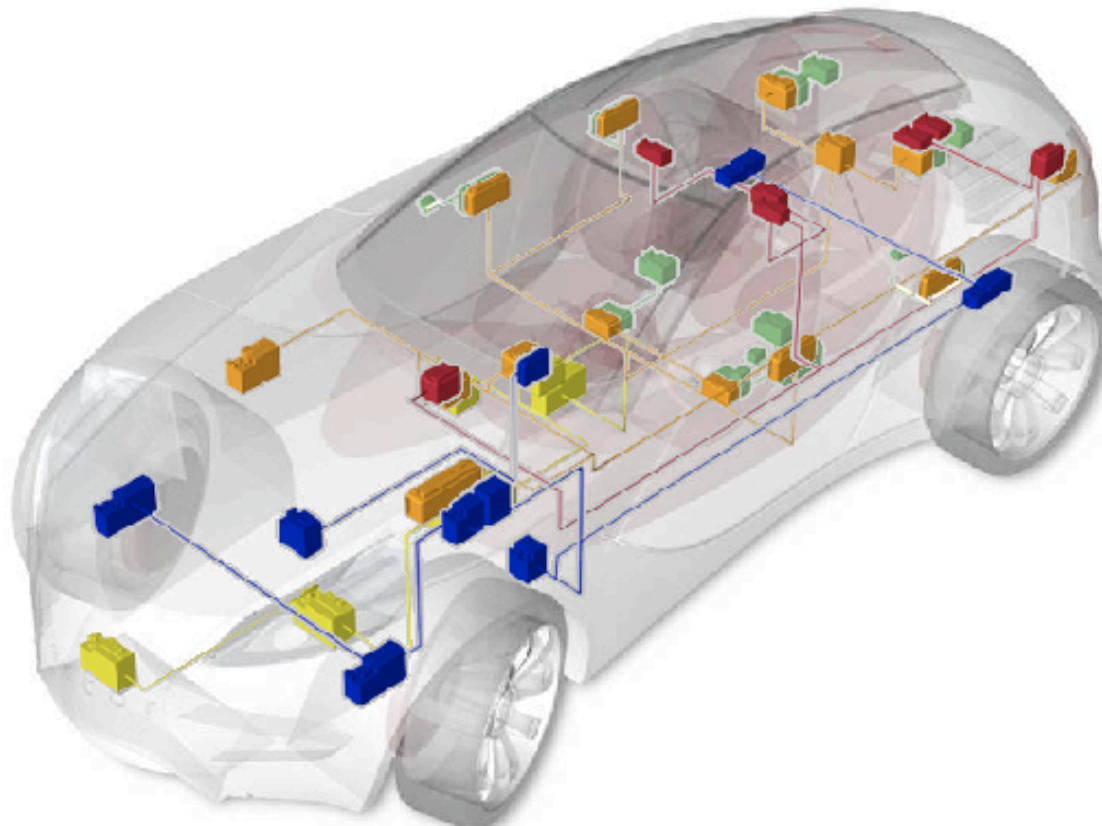




Elektronikvernetzung im Kfz

✕ schließen

- Antriebsstrang (Powertrain)
- Fahrwerk (Chassis)
- Karosserie (Body)
- Multi-Media (Telematics)



■ CAN H ■ CAN L ■ **LIN** ■ FlexRay ■ MOST

Local Interconnect Network für verteilte, räumlich abgegrenzte elektronische Systeme, z.B. Vernetzung innerhalb eines Sitzes.

Protokolle und Bussysteme: LIN (Local Interconnect Bus)



- Entwickelt von internationalem OEM-Konsortium
- Nichtkommerziell
- Eigenschaften:
 - Bandbreite 19.2 kbit/s
 - Synchroner Master/Slave-Betrieb, optimierbar für P2P
 - Physical Layer: Bus, twisted pair
 - Fehlererkennung: inverted mod256-Checksum
- Mit gängigen Line Drivers realisierbar: kostengünstig
- Flexible, kostengünstige und hinreichend sichere Lösung für alle wenig datenintensiven Kommunikationsdienste und Point2Point-Verbindungen
 - Intelligente Sensoren
 - Backupleitungen
 - Diagnoseschnittstellen
- <http://www.lin-subbus.org/>

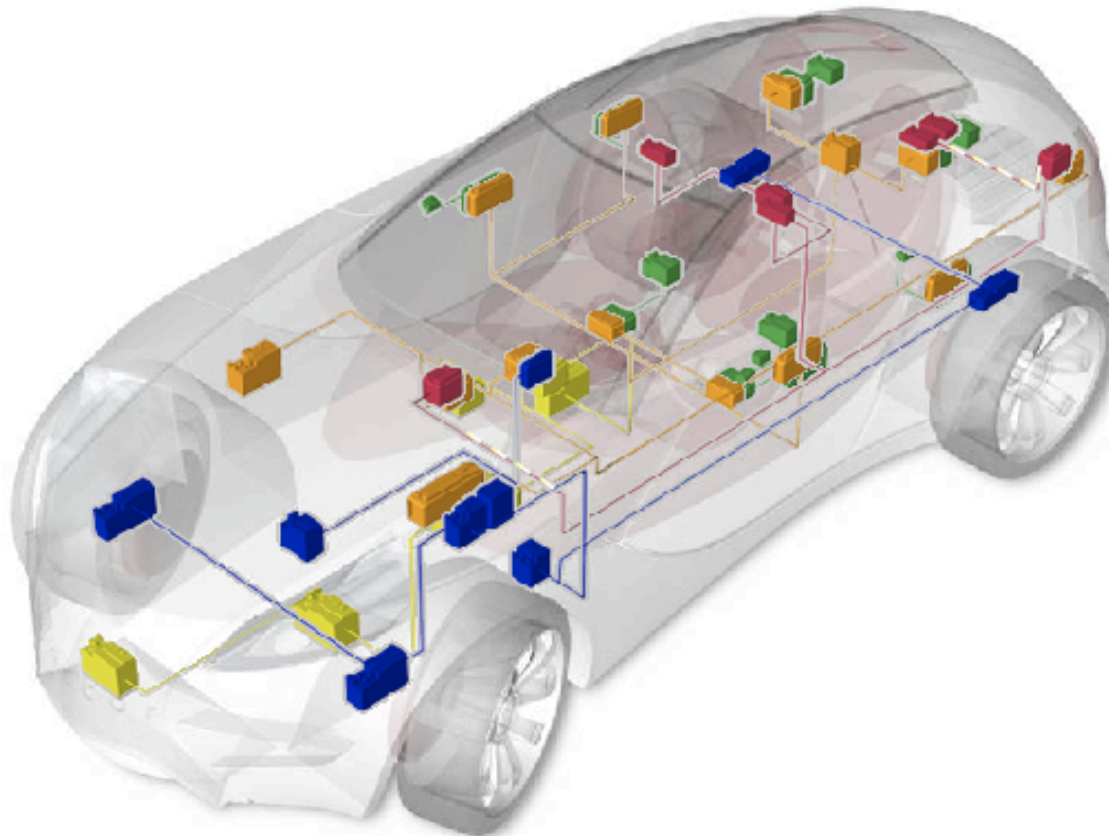




Elektronikvernetzung im Kfz

✕ schließen

- Antriebsstrang (Powertrain)
- Fahrwerk (Chassis)
- Karosserie (Body)
- **Multi-Media (Telematics)**



■ CAN H

■ CAN L

■ LIN

■ FlexRay

■ **MOST**

Optischer Multimedia-Bus zur Vernetzung von Infotainment-Komponenten im Kfz.

Protokolle und Bussysteme: MOST (Media Orientated System Transport)



- Entwickelt von BMW, DaimlerChrysler, Harman, OASIS seit 1998
- ISO/OSI-Standard, frei
- Eigenschaften:
 - Bandbreite 24.8 Mbit/s
 - Asynchroner und synchroner Betrieb mit Busmaster
 - Physical Layer: Stern, Kette, Ring (in praxi: Ring), Lichtwellenleiter
 - Fehlererkennung: CRC-16, d=6
- Geeignet für datenintensive Infotainment-Dienste
- Nicht geeignet für x-by-Wire, Sicherheitssysteme

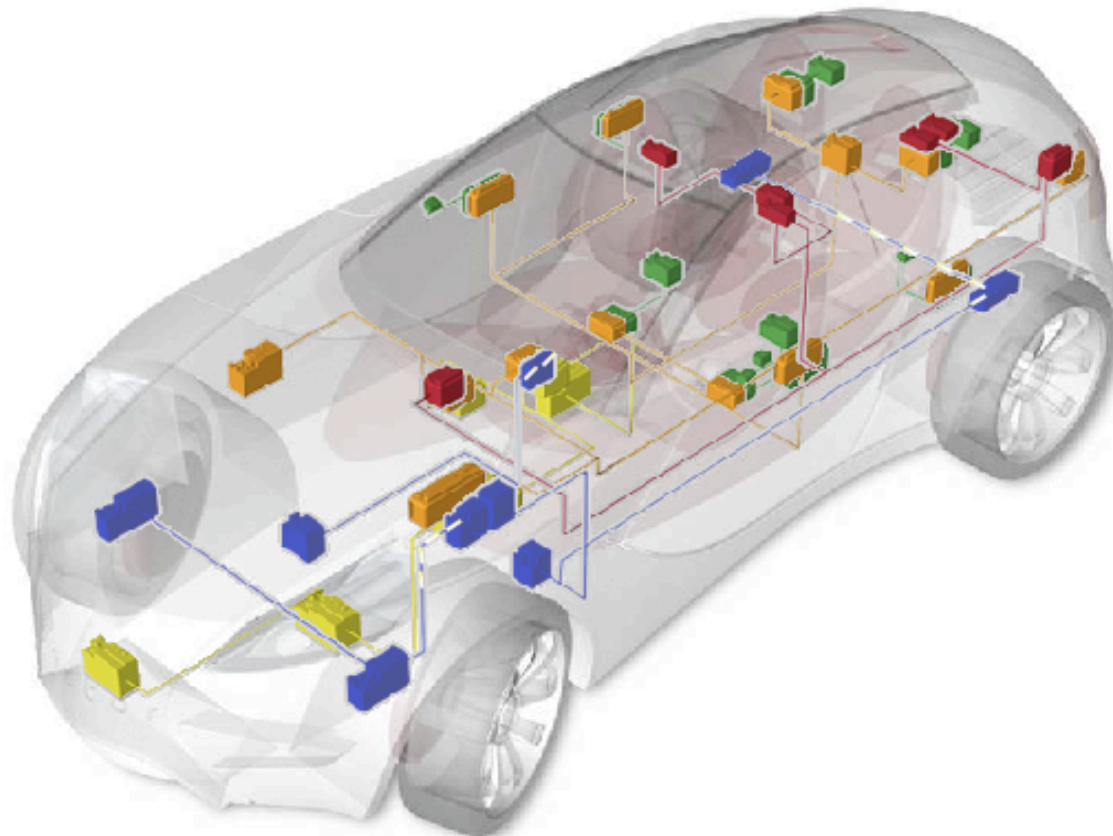
- <http://www.mostcooperation.com/home/index.html>





Elektronikvernetzung im Kfz

✕ schließen



- Antriebsstrang (Powertrain)
- Fahrwerk (Chassis)
- Karosserie (Body)
- Multi-Media (Telematics)

■ CAN H

■ CAN L

■ LIN

■ FlexRay

■ MOST

Bussystem für zeitkritische Systeme sowie für die Übertragung großer Datenmengen, z.B. BreakbyWire, SteerbyWire, XbyWire.

Protokolle und Bussysteme: FlexRay



- Entwickelt von BMW, DaimlerChrysler & div. HL-Herstellern seit 1999
- Nichtkommerziell, frei
- Eigenschaften:
 - Bandbreite bis 10 Mbit/s
 - Asynchroner und synchroner Betrieb mit Busmaster
 - Physical Layer: beliebige Topologie, beliebiges Medium
 - Redundante Systemauslegung möglich
 - Fehlererkennung: CRC-16, d=6
- Geeignet für sicherheitskritische Anwendungen (x-by-Wire)
- Für Multimedia u.U. Bandbreite zu niedrig

- <http://www.flexray.com/>



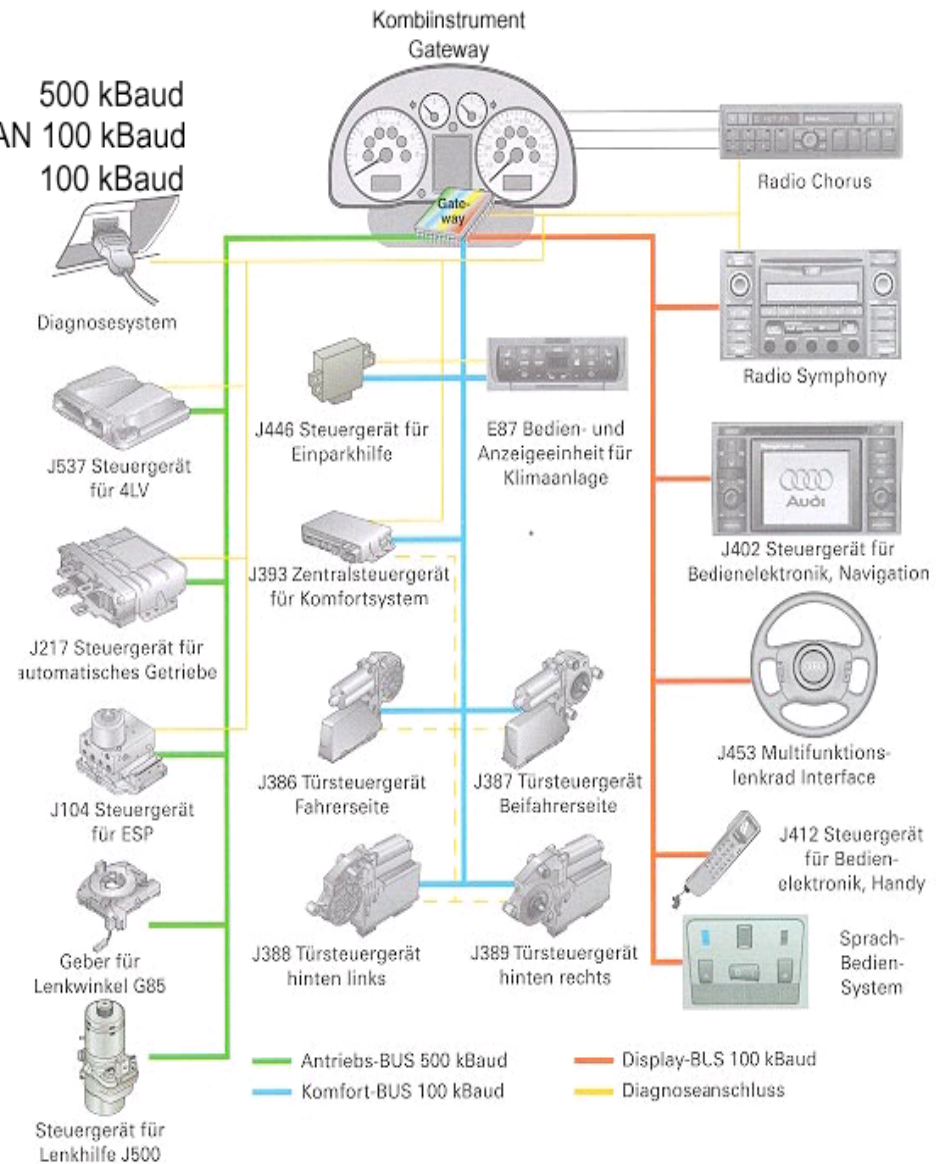
Protokolle und Bussysteme: Beispiele



Audi A2, Modelljahr 2002

- Powertrain: Highspeed-CAN
- Innenraum/Karosserie: Lowspeed-CAN
- Display/MMI: Lowspeed-CAN
- Unabhängiger Diagnosebus
- Gateway: Kombi
 - Motor-CAN
 - Innenraum-CAN
 - Display-CAN

Motor-CAN 500 kBaud
Innenraum-CAN 100 kBaud
Display-CAN 100 kBaud

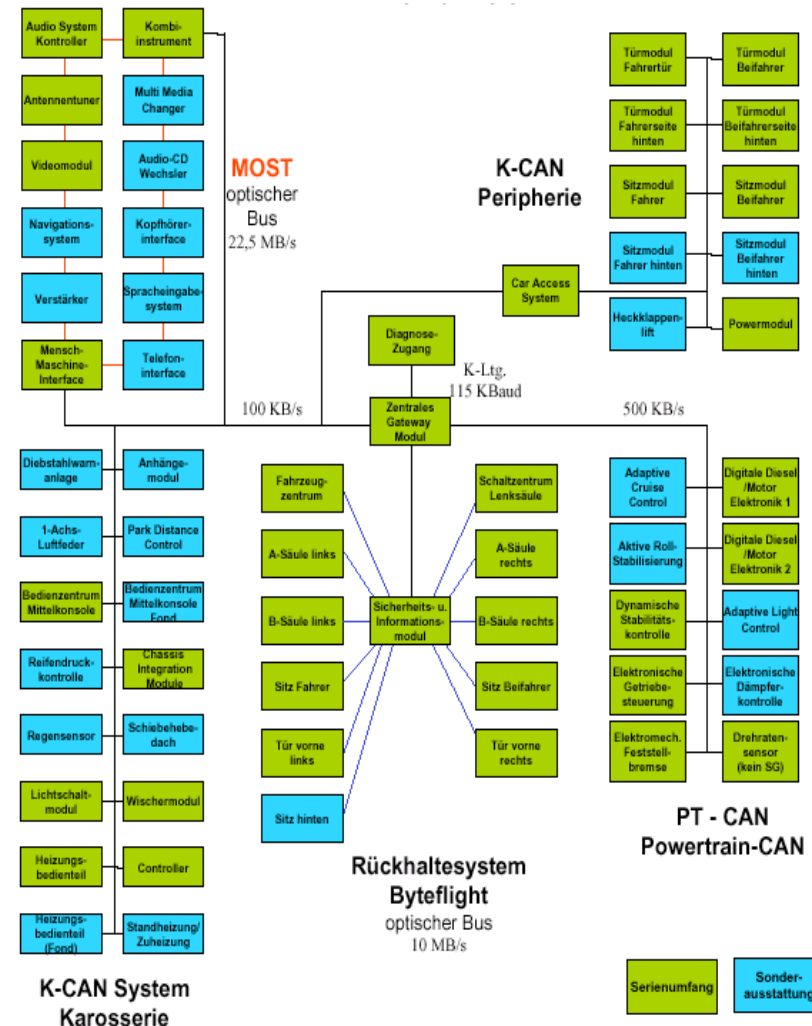


Protokolle und Bussysteme: Beispiele



BMW 7er, Modelljahr 2001 (E65)

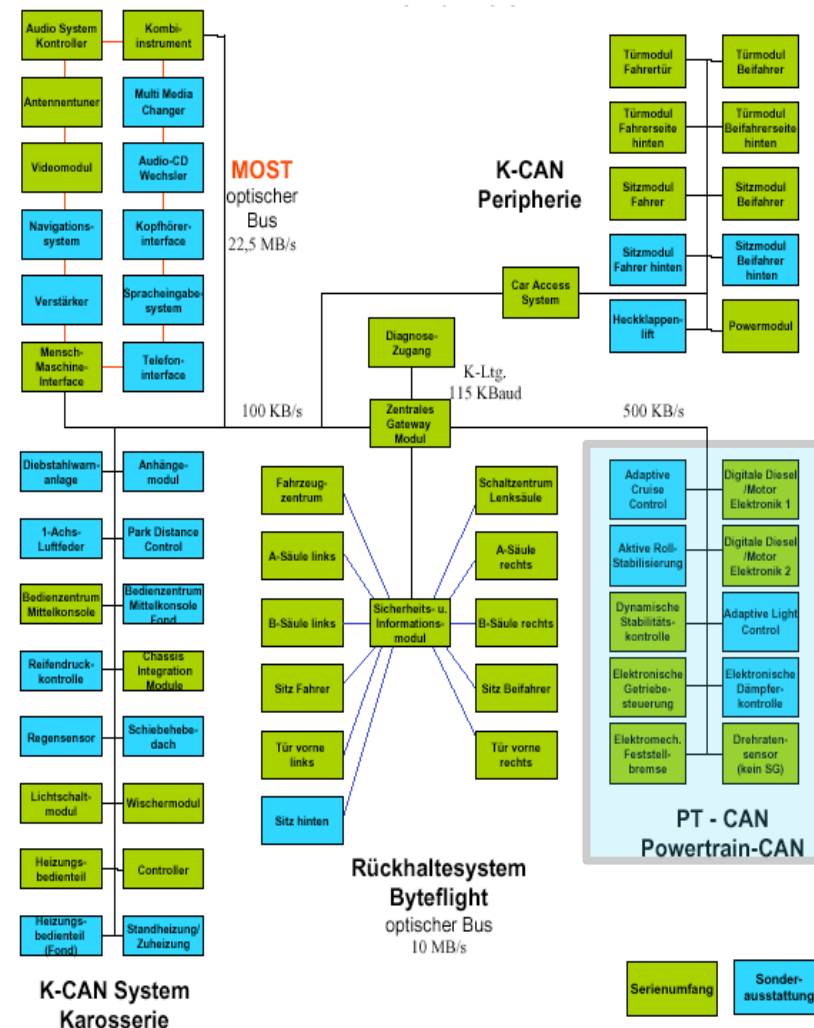
- Powertrain: Highspeed-CAN
- Karosserie und Peripherie: Lowspeed-CAN
- Infotainment: MOST
- Passive Sicherheit: byteflight
- Motor: Highspeed-CAN (nicht gezeigt)
- Diagnose: K-Line
- Backups: K-Line
 - Airbag-Telefon, Blinkerhebel-LSZ, Gangwahl-EGS, DSC-ABS,...)
- Gateways
 - ZGM (byteflight, K-CAN, PT-CAN, Diagnose)
 - DME (PT-CAN, LoCAN)
 - MMI (K-CAN, MOST)
 - Kombi (K-CAN, MOST)



Protokolle und Bussysteme: Beispiele

BMW 7er, Modelljahr 2001 (E65)

- **Powertrain: Highspeed-CAN**
- Karosserie und Peripherie: Lowspeed-CAN
- Infotainment: MOST
- Passive Sicherheit: byteflight
- Motor: Highspeed-CAN (nicht gezeigt)
- Diagnose: K-Line
- Backups: K-Line
 - Airbag-Telefon, Blinkerhebel-LSZ, Gangwahl-EGS, DSC-ABS,...)
- Gateways
 - ZGM (byteflight, K-CAN, PT-CAN, Diagnose)
 - DME (PT-CAN, LoCAN)
 - MMI (K-CAN, MOST)
 - Kombi (K-CAN, MOST)

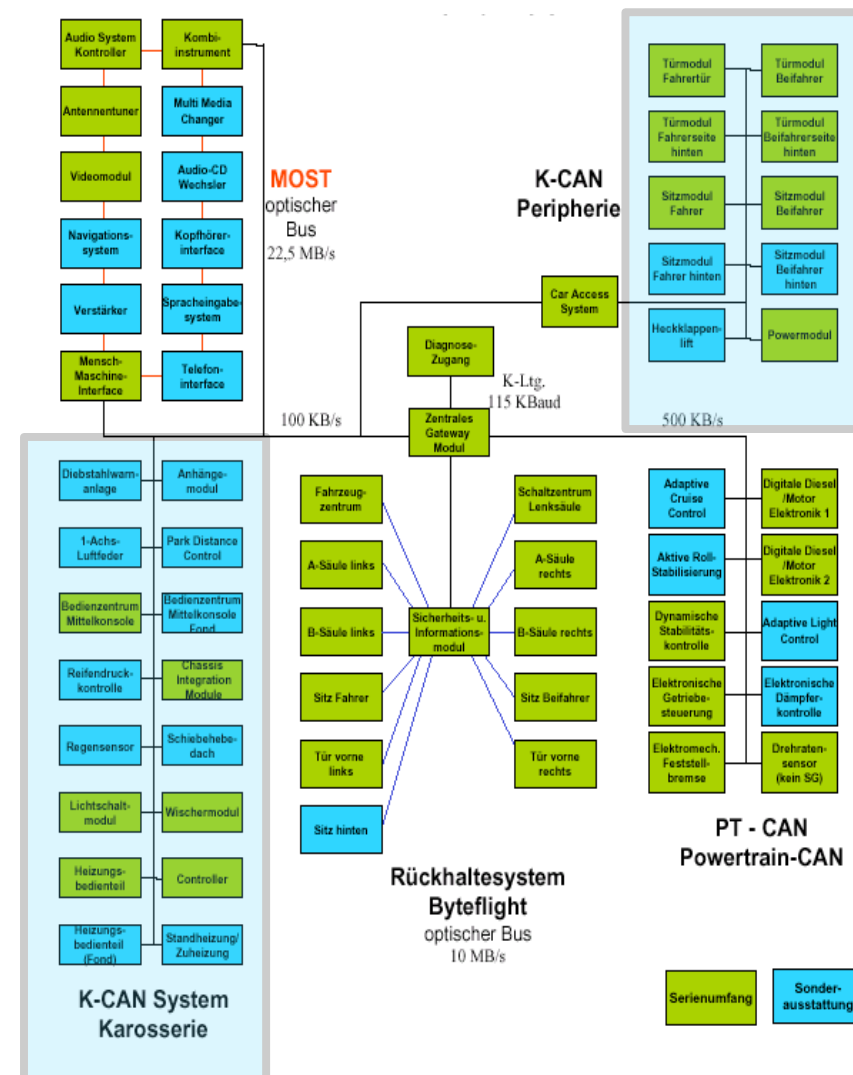


Protokolle und Bussysteme: Beispiele



BMW 7er, Modelljahr 2001 (E65)

- Powertrain: Highspeed-CAN
- **Karosserie und Peripherie: Lowspeed-CAN**
- Infotainment: MOST
- Passive Sicherheit: byteflight
- Motor: Highspeed-CAN (nicht gezeigt)
- Diagnose: K-Line
- Backups: K-Line
 - Airbag-Telefon, Blinkerhebel-LSZ, Gangwahl-EGS, DSC-ABS,...)
- Gateways
 - ZGM (byteflight, K-CAN, PT-CAN, Diagnose)
 - DME (PT-CAN, LoCAN)
 - MMI (K-CAN, MOST)
 - Kombi (K-CAN, MOST)

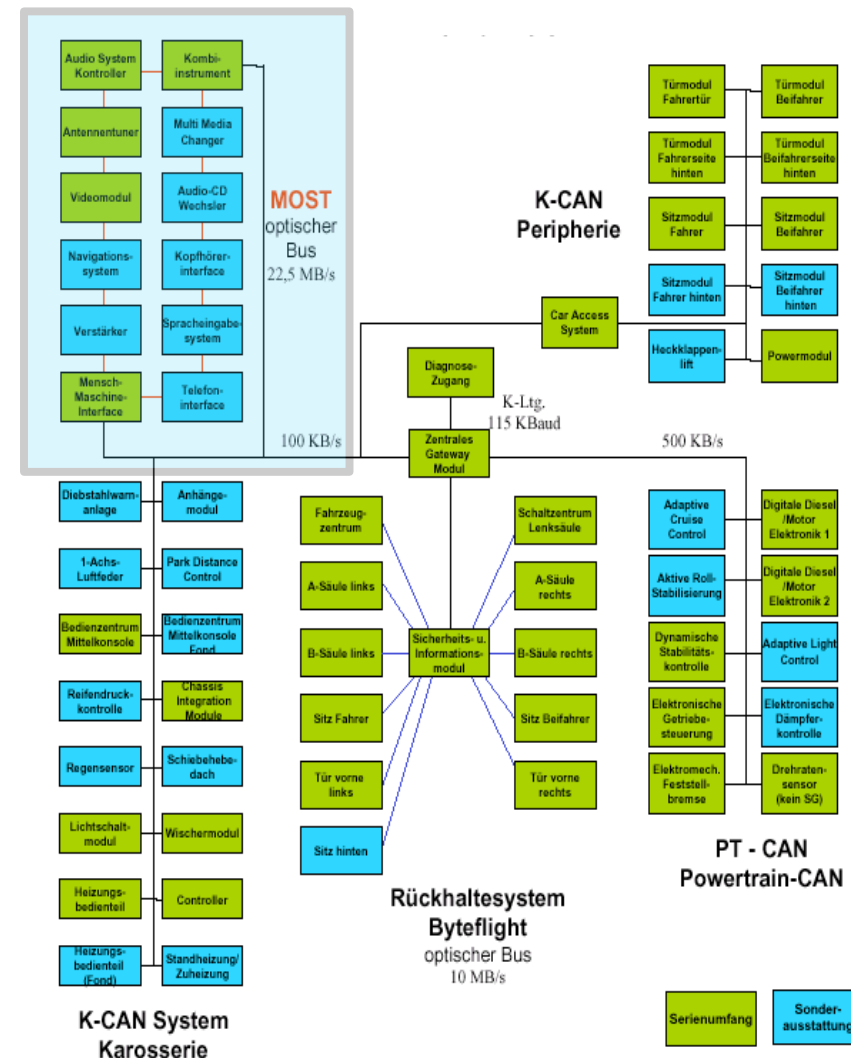


Protokolle und Bussysteme: Beispiele



BMW 7er, Modelljahr 2001 (E65)

- Powertrain: Highspeed-CAN
- Karosserie und Peripherie: Lowspeed-CAN
- Infotainment: MOST
- Passive Sicherheit: bytflight
- Motor: Highspeed-CAN (nicht gezeigt)
- Diagnose: K-Line
- Backups: K-Line
 - Airbag-Telefon, Blinkerhebel-LSZ, Gangwahl-EGS, DSC-ABS,...
- Gateways
 - ZGM (bytflight, K-CAN, PT-CAN, Diagnose)
 - DME (PT-CAN, LoCAN)
 - MMI (K-CAN, MOST)
 - Kombi (K-CAN, MOST)

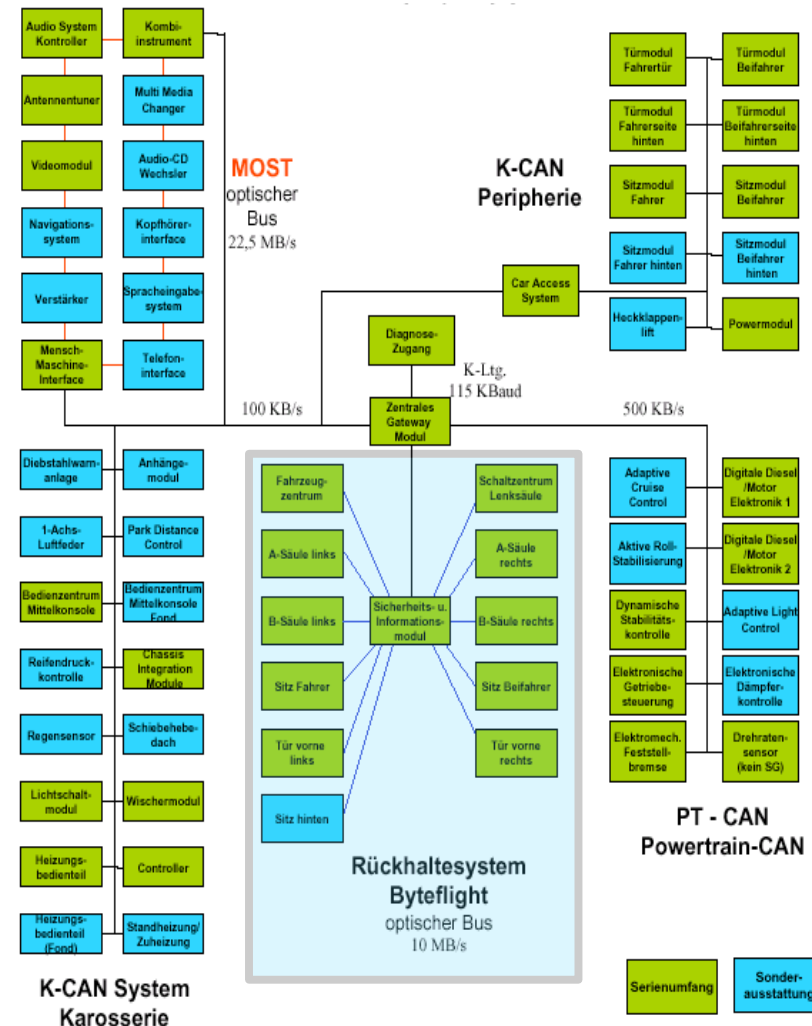


Protokolle und Bussysteme: Beispiele



BMW 7er, Modelljahr 2001 (E65)

- Powertrain: Highspeed-CAN
- Karosserie und Peripherie: Lowspeed-CAN
- Infotainment: MOST
- **Passive Sicherheit: byteflight**
- Motor: Highspeed-CAN (nicht gezeigt)
- Diagnose: K-Line
- Backups: K-Line
 - Airbag-Telefon, Blinkerhebel-LSZ, Gangwahl-EGS, DSC-ABS,...)
- Gateways
 - ZGM (byteflight, K-CAN, PT-CAN, Diagnose)
 - DME (PT-CAN, LoCAN)
 - MMI (K-CAN, MOST)
 - Kombi (K-CAN, MOST)

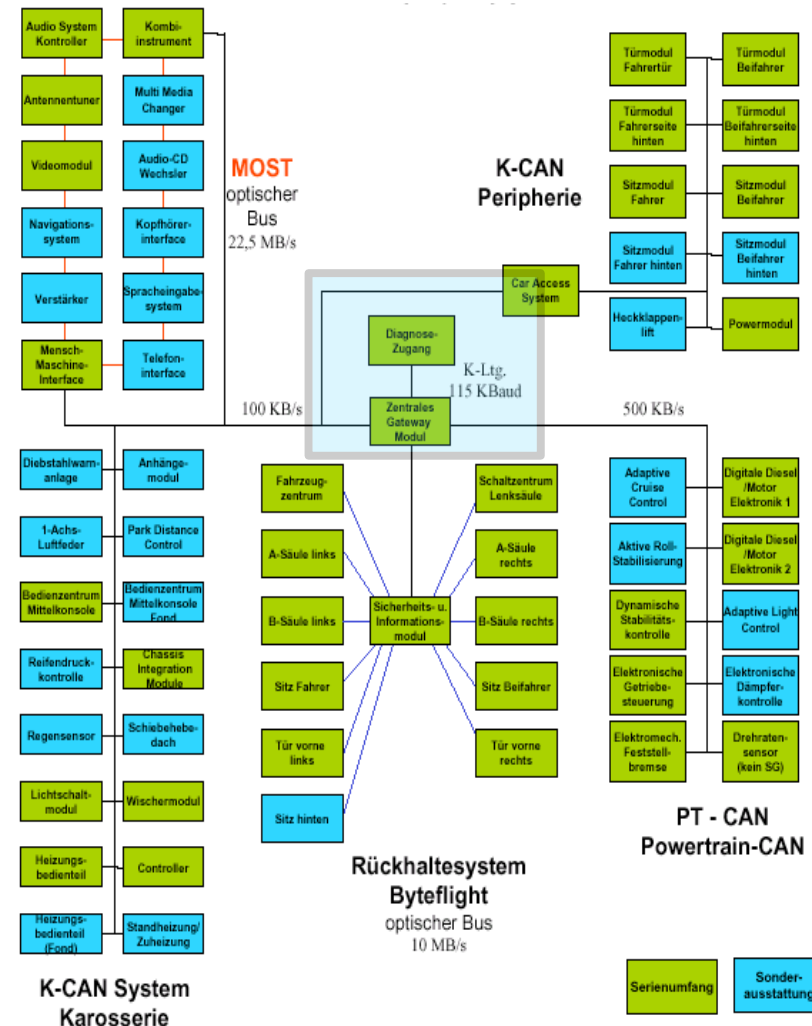


Protokolle und Bussysteme: Beispiele



BMW 7er, Modelljahr 2001 (E65)

- Powertrain: Highspeed-CAN
- Karosserie und Peripherie: Lowspeed-CAN
- Infotainment: MOST
- Passive Sicherheit: byteflight
- Motor: Highspeed-CAN (nicht gezeigt)
- Diagnose: K-Line
- Backups: K-Line
 - Airbag-Telefon, Blinkerhebel-LSZ, Gangwahl-EGS, DSC-ABS,...)
- Gateways
 - ZGM (byteflight, K-CAN, PT-CAN, Diagnose)
 - DME (PT-CAN, LoCAN)
 - MMI (K-CAN, MOST)
 - Kombi (K-CAN, MOST)

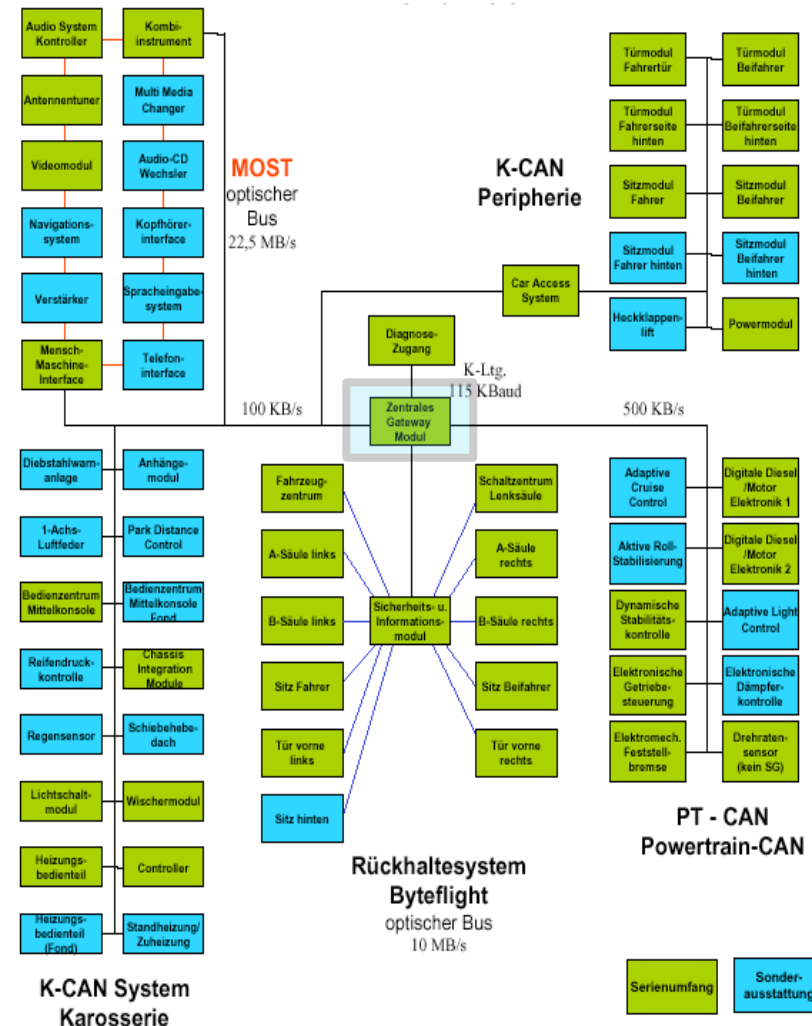


Protokolle und Bussysteme: Beispiele



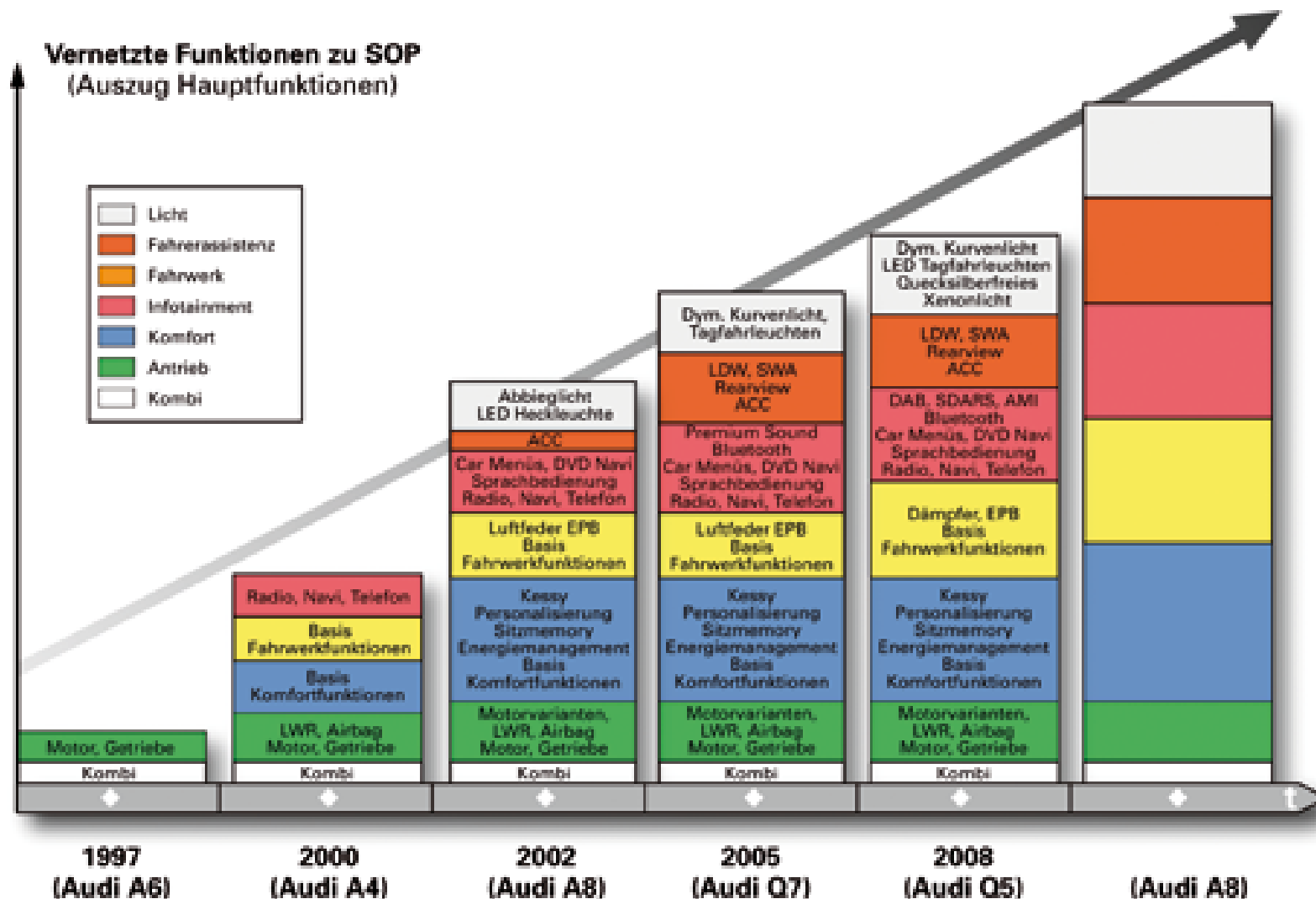
BMW 7er, Modelljahr 2001 (E65)

- Powertrain: Highspeed-CAN
- Karosserie und Peripherie: Lowspeed-CAN
- Infotainment: MOST
- Passive Sicherheit: byteflight
- Motor: Highspeed-CAN (nicht gezeigt)
- Diagnose: K-Line
- Backups: K-Line
 - Airbag-Telefon, Blinkerhebel-LSZ, Gangwahl-EGS, DSC-ABS,...)
- Gateways
 - ZGM (byteflight, K-CAN, PT-CAN, Diagnose)
 - DME (PT-CAN, LoCAN)
 - MMI (K-CAN, MOST)
 - Kombi (K-CAN, MOST)

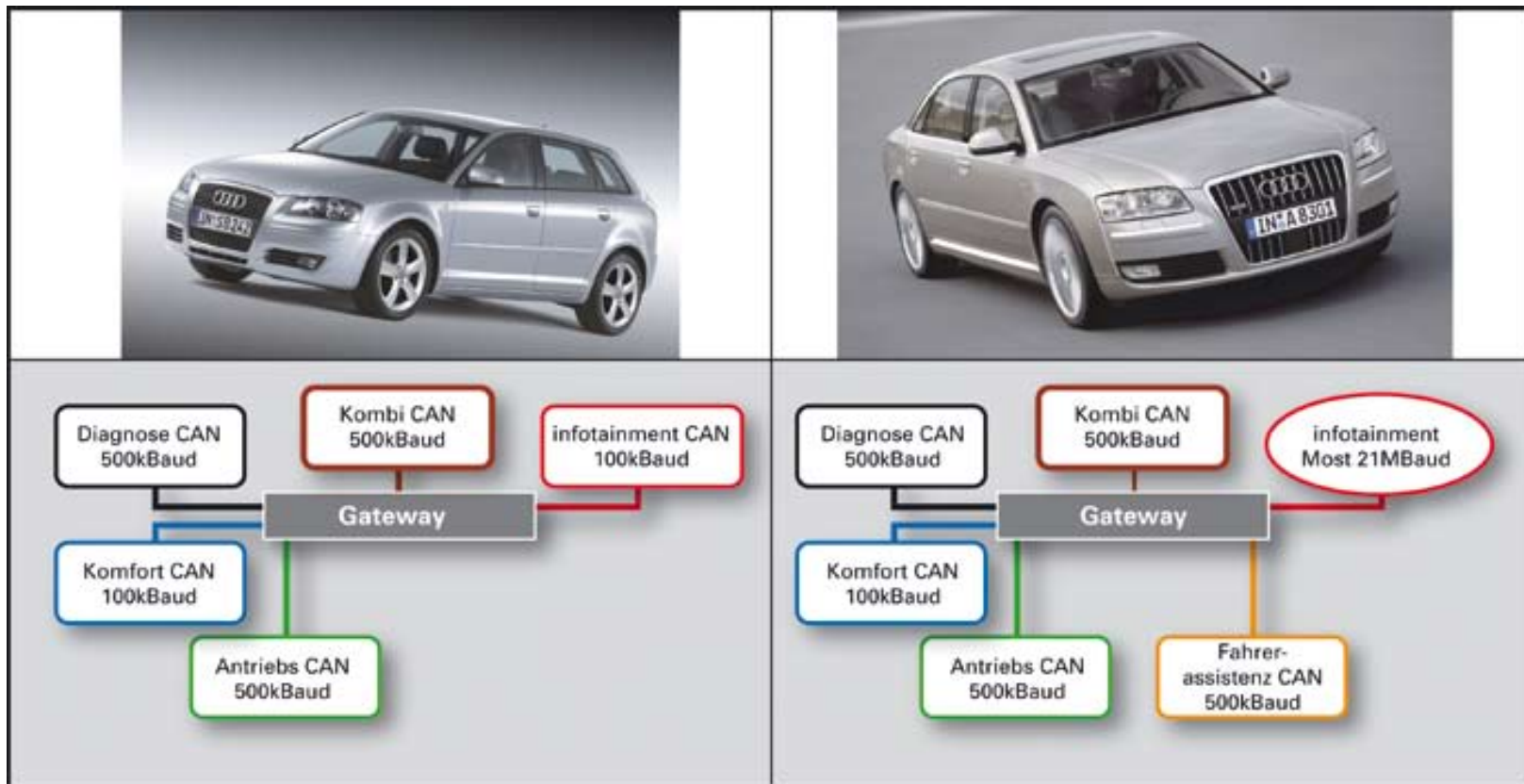




Zunahme der vernetzten Funktionen: Beispiel Audi

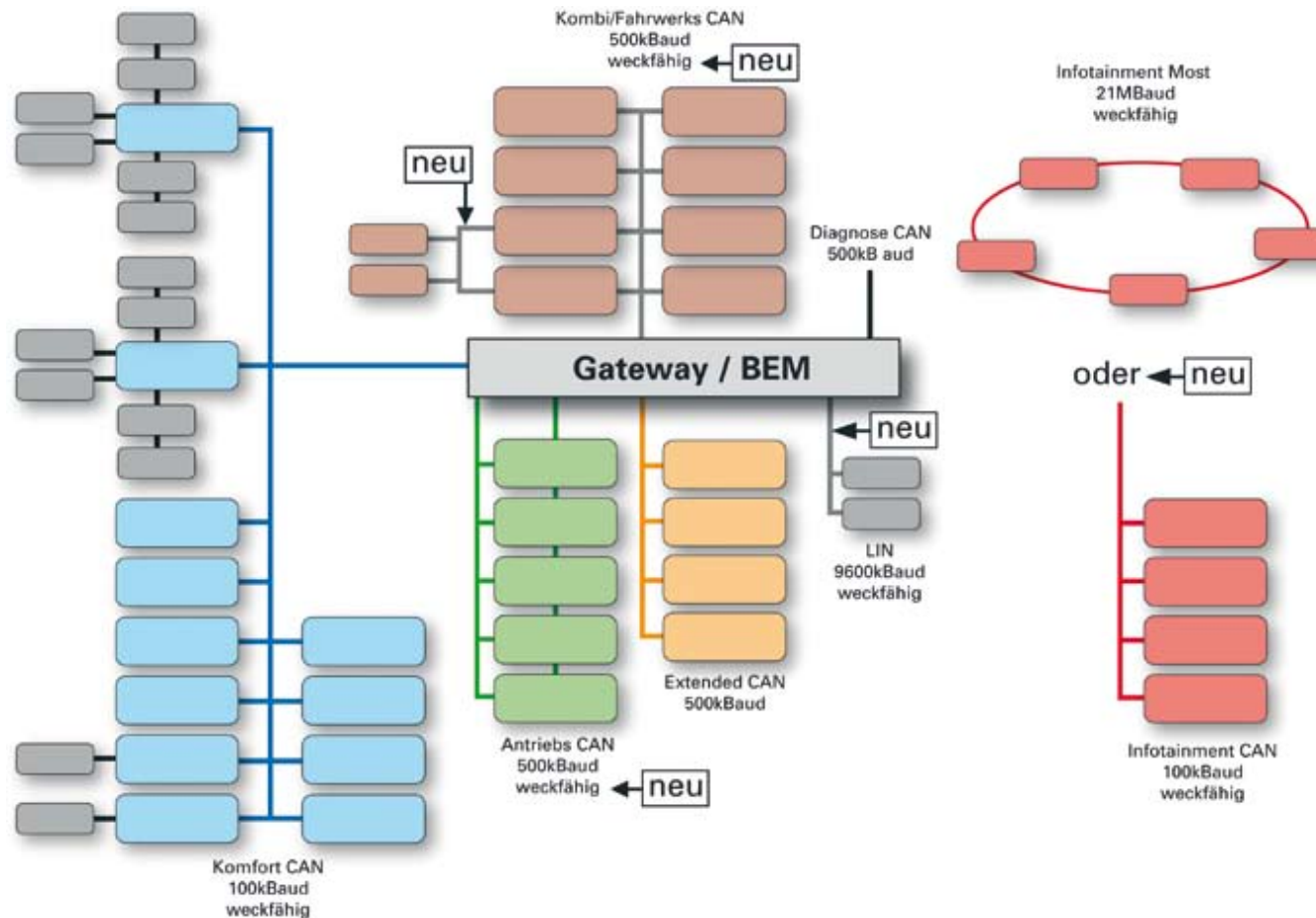


Im Infotainment-Bereich vereint der neue Audi Q5 Elemente des Audi A3 (CAN) und des A8 (MOST)



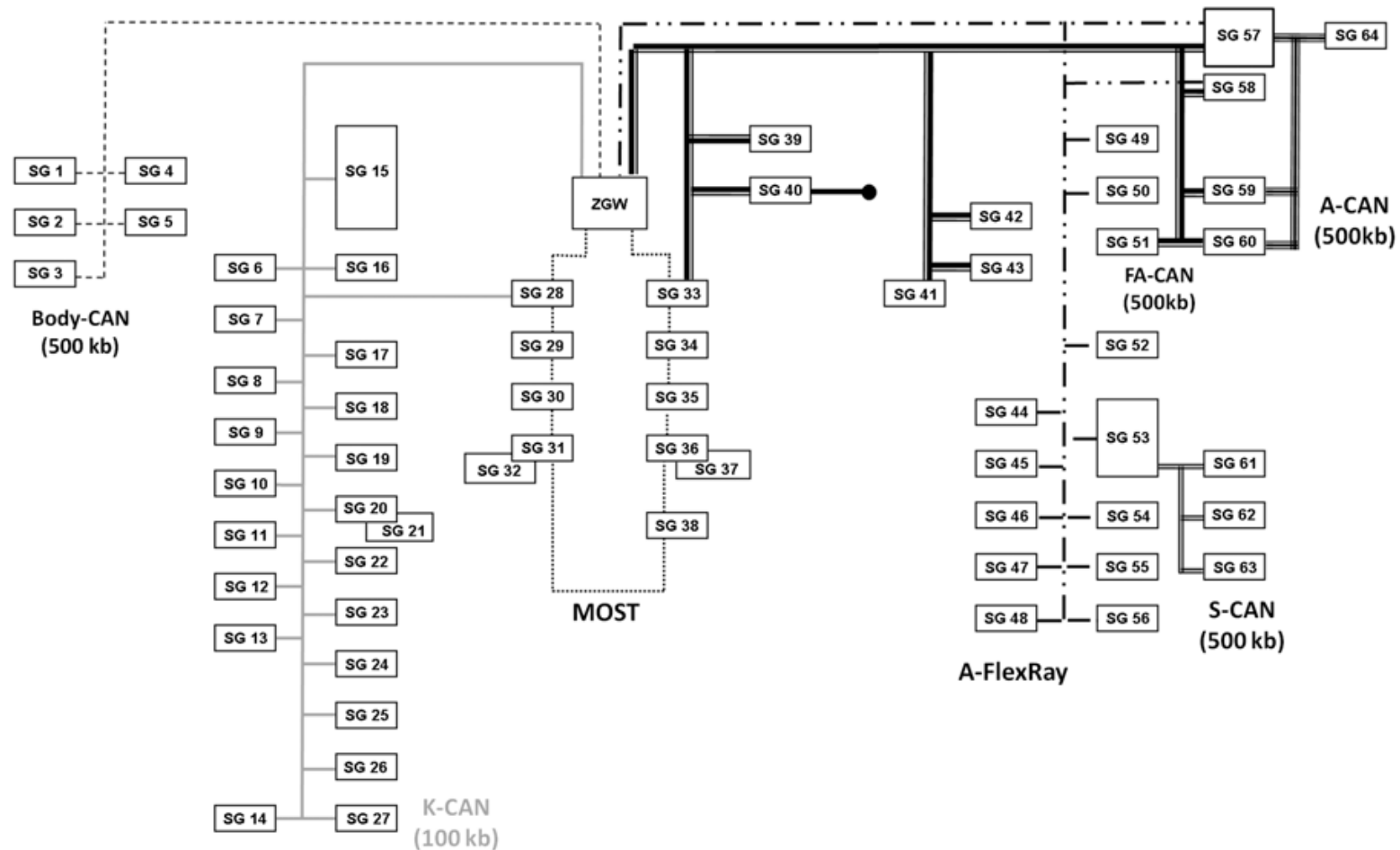
Im Audi A3 kommen ausschließlich Infotainmentsysteme auf Basis der CAN-Bustechnologie zum Einsatz, im Audi A8 kommunizieren die Infotainmentsysteme auf Basis der MOST-Technologie. Im Audi Q5 sollten beide Systemvarianten, CAN und MOST, ermöglicht werden.

Der Audi Q5 zeigt eine Elektronik-Gesamtarchitektur wie im Oberklasse-Segment



Des Weiteren musste das im Audi A8 bereits vorhandene Bussystem für die Fahrerassistenzsysteme eingesetzt werden. Zusätzlich wurde ein Konzept zur kostengünstigen Darstellung eines Basisumfangs analog Audi A3 notwendig. Die Abdeckung dieser Variantenvielfalt erforderte die Entwicklung einer hochskalierbaren Architektur.

Datenkommunikationsbordnetz des BMW F01/F02



Quelle: F. Burgdorf: Eine kunden- und lebenszyklusorientierte Produktfamilienabsicherung für die Automobilindustrie, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2010.