

Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der
Technischen Universität München

Kommunikation für Fährantriebe - Entwicklungsmethoden am Beispiel eines Hybridantriebs

Thomas Anderl

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades
eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. B.-R. Höhn

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. K.-Th. Renius, i. R.
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Heißing

Die Dissertation wurde am 27.12.2004 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 10.03.2005 angenommen.

Die vorliegende Arbeit erscheint auch im
VDI Verlag als Fortschritt Bericht der Reihe 12.

Geleitwort

Digitale Kommunikationssysteme gewinnen seit einigen Jahren für Fahrzeugantriebe stetig an Bedeutung, besonders für Antriebsstränge mit hohem „Managementbedarf“. Dazu gehören z. B. stufenlose Pkw-Antriebe oder auch stufenlose automatische Traktorfahrantriebe, wie man sie von Deutschland ausgehend 1996 einführte.

Die vorliegende Doktorarbeit von Herrn Thomas Anderl entwickelte sich aus der Bearbeitung des DFG-SFB 365 Teilprojekts B8, das an meinem ehemaligen Lehrstuhl für Landmaschinen im DFG-Sonderforschungsbereich 365 der TU München unter dem Motto „Umweltfreundliche Antriebstechnik für Fahrzeuge“ unter der Leitung von Herrn Kollegen B. R. Höhn lief.

Das Teilprojekt B8 beinhaltete in der Realisierungsphase des „Autarken Münchner Hybrid“ (ab 2000) die Mitwirkung bei der Gestaltung der zwei realisierten Bus-Systeme („Messen“ und „Steuern/Regeln“), die Komplettierung und Inbetriebnahme der gesamten messtechnischen Fahrzeugausrüstung, die Inbetriebnahme des neuen Garching Rollenprüfstands, die messtechnische Gesamtbetreuung des Hybridautos und die Signalauswertung bzw. -aufbereitung.

In der vorliegenden Dissertationsschrift legt Herr Anderl zunächst einen kompakten Überblick und eine Bewertung aktueller Fahrzeug-Kommunikationsnetze vor und widmet sich systematisch den Methoden und Werkzeugen für deren Entwicklung. Über das Projekt B8 hinausgehend erarbeitet er ein Zukunftskonzept, bei dem eine hohe Fehlertoleranz dadurch erreicht wird, dass parallele Bussysteme über ihre Grundaufgaben hinaus bei Kommunikationsfehlern gegenseitig einspringen und so die Sicherheit ohne Zusatzhardware erhöhen.

Besonders eindrucksvoll war für mich, welche Schlagkraft Herr Anderl entwickelte, um das Betriebsverhalten des ausgeführten Hybridantriebes und das seines Zukunftskonzeptes mit Matlab/Simulink/Stateflow, dSpace-Echtzeittools, CANalyzer und Hardware-in-the-Loop-Methoden abzubilden bzw. zu untersuchen. So ließen sich u. a. Systemreaktionen auf Kommunikationsstörungen schon im „Trockenlauf“ bewerten.

Herr Dr.-Ing. Th. Anderl entwickelte sich in seiner Assistentenzeit zu einem kompetenten Fachmann für komplexe Bus-Kommunikationssysteme. Meine Anerkennung und mein besonderer Dank gelten seiner weit überdurchschnittlichen Gesamtleistung, die er mit großer Selbständigkeit, Umsicht, und Beharrlichkeit auf einem sehr neuen Gebiet erreichte.

Daneben danke ich allen beteiligten Mitarbeitern und Förderern – besonders der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) – für ihre großzügige Unterstützung.

Garching, im Juli 2005

Prof. Dr-Ing. Dr. h.c. Karl Th. Renius

Vorwort

Die vorliegende Dissertation bildet den Abschluss meiner Ausbildung und Forschung an der Technischen Universität München. Ich konnte meine Arbeit im Februar 2000 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am ehemaligen Lehrstuhl für Landmaschinen beginnen und ab Oktober 2003 am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik fortsetzen. Die Dissertation entstand aus meiner Mitarbeit in dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereich „Umweltfreundliche Antriebstechnik für Fahrzeuge“ (SFB 365, Sprecher: Prof. Dr.-Ing. B. R. Höhn).

Besonders danken möchte ich meinem Doktorvater Herrn Professor Renius. Sein kooperativer und verlässliche Führungsstil sowie seine stets kompetente und freundliche Betreuung schufen angenehme und produktive Arbeits- und Forschungsbedingungen. Die Zusammenarbeit in der Lehre über Land- und Baumaschinen prägte viele wertvolle Grundlagen für meine berufliche Zukunft.

Herrn Prof. Heißing danke ich für die Übernahme des Koreferats, vor allem aber für die freundliche Aufnahme und Integration der ehemaligen Mitarbeiter des Lehrstuhls für Landmaschinen in seinen Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. Damit wurden die Weiterführung wichtiger Vorlesungen, die Fortsetzung von Forschungsprojekten und die Abschlüsse der damit verbundenen Dissertationen ermöglicht.

Herrn Prof. Höhn möchte ich für den Vorsitz der Prüfungskommission sowie für die gute Zusammenarbeit im SFB 365 danken. Die interessante Mitarbeit bei der Realisierung eines Prototypen-Pkw mit stufenlosem Kettenwandlergetriebe und Hybridantrieb war gleichsam spannend und lehrreich. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die optimale Finanzierung und die wertvollen Investitionen.

Bei allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen möchte ich mich für das familiäre Arbeitsklima, all die fruchtbaren Diskussionen, die tatkräftigen Unterstützungen sowie für den herzlichen Umgang bedanken. Gleiches gilt für alle Mitarbeiter aus dem SFB 365 sowie für die Studenten, die mich durch Studien- und Diplomarbeiten und als Hiwis unterstützten.

München, im Juni 2005

Thomas Anderl

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Management von Fahrtrieben	1
1.2	Ziele dieser Arbeit	1
2	Stand der Technik	2
2.1	Steuer- und Regelsysteme für Fahrtriebe	
2.2	Vernetzte Fahrtriebssysteme	7
2.2.1	Mobile Arbeitsmaschinen	7
2.2.1.1	Traktoren	7
2.2.1.2	Radlader	9
2.2.2	Nutzkraftwagen	10
2.2.3	Personenkraftwagen	12
2.3	Tendenzen für zukünftige Antriebssysteme	14
3	Gestaltung der Signalkommunikation für Fahrtriebe	16
3.1	Komponenten für Steuer- und Regelgerätenetzwerke	16
3.1.1	Steuer- und Regelgeräte	16
3.1.2	Bussysteme	19
3.1.2.1	Netzwerktopologien	19
3.1.2.2	Vergleich von Bussystemen zur Vernetzung von ECUs	20
3.1.2.3	Controller Area Network (CAN)	23
3.1.2.4	Time Triggered CAN (TTCAN)	27
3.1.2.5	FlexRay	29
3.1.2.6	Time-Triggered Protocol (TTP)	34
3.2	Kommunikationsdesign	37
3.2.1	Entwicklungsprozess	37
3.2.2	Regelungstechnische Anforderungen	39
3.2.2.1	Abstraten für Messglieder	40
3.2.2.2	Abstraten für Regelungen	41
3.2.3	Sicherheitstechnische Anforderungen	42
3.2.4	Zuverlässigkeitsaspekte	45
3.2.5	Absicherungs- und Toleranzverfahren	47
3.2.5.1	Redundanzverfahren	47
3.2.5.2	Diagnose und Kompensation von Sensorfehlern	49
3.2.5.3	Sicherheitsgerichtete Programmierung	50
3.2.5.4	Absicherung von Kommunikationsfehlern	51
4	Eingesetzte Entwicklungsmethoden und Werkzeuge	53
4.1	Spezifikation und Moduldesign	53
4.2	Implementierung	54

4.3	Modultest	54
4.4	Integrationstest	54
4.5	Validierung im Versuchsfahrzeug	56
5	Kommunikationskonzept für einen stufenlosen Parallelhybridantrieb.	57
5.1	Der Autarke Hybrid	57
5.2	Signalkommunikation für das Antriebskonzept	58
5.2.1	Systemarchitektur	58
5.2.2	Regelungstechnische Anforderungen an die CAN-Kommunikation . . .	60
5.2.3	Sicherheitstechnische Anforderungen an die CAN-Kommunikation . .	63
5.2.4	Fehlertolerante CAN-Kommunikation auf dynamisch redundanten Systemen	63
5.2.5	Aktivierung vernetzter Sensorredundanzen	72
5.2.6	Hinweise zur Übertragung auf ein Konzept mit FlexRay	74
6	Versuchsfahrzeug und Fahrversuche.	78
6.1	Steuer- und Regelgerätenetzwerk des Versuchsfahrzeugs	78
6.2	Das Messsystem	80
6.3	Funktionalität und Kommunikation des Versuchsfahrzeugs	82
6.3.1	Analyse von Funktionalität und Komfort bei Straßenfahrten	82
6.3.2	Versuche auf dem Rollenprüfstand	84
6.3.2.1	Reproduzierbare Fahrsimulationen auf dem Rollenprüfstand.	84
6.3.2.2	Untersuchungen zum Kraftstoffverbrauch	86
6.4	Analyse und Bewertung der Signalkommunikation	88
7	Modellbasierte Entwicklung der Kommunikation des Autarken Hybrids	91
7.1	Aufbau und Struktur der zentralen Systemsimulation	91
7.2	Modellbildung	94
7.2.1	Baugruppen des Antriebs mit Steuer- und Regelgeräten	94
7.2.1.1	Verbrennungsmotor	94
7.2.1.2	Elektroantrieb	97
7.2.1.3	i ² -Getriebe	100
7.2.1.4	Traktionsbatterie, Bordnetze, elektrische Nebenverbraucher	105
7.2.1.5	Fahrzeugmodell	106
7.2.1.6	Fahrerschnittstelle	107
7.2.2	Antriebsmanagement	108
7.2.3	Steuer- und Regelgerätenetzwerk	109
7.2.3.1	Modellierung der CAN-Systeme	109
7.2.3.2	Methoden zur Fehlerprovokation in den CAN-Systemen	110
7.2.3.3	Methoden und Werkzeuge zur Analyse der CAN-Kommunikation	112

7.3	Vergleich von Simulationen mit Versuchen auf dem Rollenprüfstand . . .	112
7.3.1	Geschwindigkeitsregelung im rein elektrischen Betrieb	113
7.3.2	Fahrsimulation im Hybridbetrieb	114
7.4	Modellbasierte Analyse eines NEFZ-Zyklus	115
7.5	Entwicklung einer Getriebe-ECU	116
7.6	HIL-Simulationen zur Absicherung der Signalkommunikation	116
7.6.1	Vorgehen	116
7.6.2	Analyse und Validierung des Systemverhaltens.	117
7.6.2.1	Kommunikationsablauf der durch die HIL-Umgebung abgebildeten CAN-Systeme	117
7.6.2.2	HIL-Funktionstest der Getriebe-ECU	120
7.6.3	Absicherung von Ausfall- und Fehlerszenarien der fehlertoleranten CAN-Kommunikation.	121
7.6.3.1	Leitungs- und Kontaktfehler	121
7.6.3.2	Fehlfunktionen und Defekte von Netzknoten	123
7.6.3.3	Störungen	124
7.6.3.4	Übertragungsfehler	126
7.6.3.5	Zusammenbruch der Kommunikation.	128
7.6.3.6	Alarmmeldung und Kompensation von Sensorausfällen	129
8	Zusammenfassung	130
9	Verzeichnisse	133
9.1	Literaturstellen	133
9.2	Zitierte Autoren.	152

Formelzeichen, Einheiten und Indices

Formelzeichen

A_{Fzg}	m^2	Fahrzeugstirnfläche
a_n, b_n	-	Koeffizienten für Polynomsätze und Approximationen
b_e	g/kWh	spezifischer Kraftstoffverbrauch
b_x	m/s^2	Fahrzeuginnenbeschleunigung
c_w	-	Luftwiderstandbeiwert
d_{VS}	-	Dämpfungsgrad Verstellmech. Kettenwandlermodell
f_{Rad}	-	Rollwiderstandbeiwert
$F_{stat,1/2}$	N	quasistatische Kraft an den Anpressscheiben
F_{stell}	N	Kraft für Verstellmechanismus Kettenwandlermodell
F_{FW}	N	Fahrwiderstandskraft (Luft-, Roll- und Steigungswid.)
$F_{W,Luft}$	N	Luftwiderstandskraft
$F_{W,Roll}$	N	Rollwiderstandskraft
$F_{Z,RPS}$	N	Zugkraft am Laufrollenumfang des Rollenprüfstands
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
i	-	Übersetzung, z. B. i_{ED} für Übersetzung Welle E auf D
i_{CVT}	-	hier: Kettenwandlerübersetzung
I	A	Stromstärke
$M_{A/B/C/D/E}$	Nm	Moment an den Wellen A/B/C/D/E
M_{an}	Nm	Antriebsmoment
$M_{A,E-M}$	Nm	Momentanteil der Elektromaschine auf Welle A
$M_{A,E-V}$	Nm	Momentanteil des Verbrennungsmotors auf Welle A
M_{Brems}	Nm	Bremsmoment bezogen auf Radantriebswellen
M_{FW}	Nm	Fahrwiderstandsmoment bezogen auf Radantriebswellen
m_{Fzg}	kg	Fahrzeugmasse
$M_{G,Stütz}$	Nm	am Getriebe abstützbares Moment
M_K	Nm	Kippmoment der Asynchronmaschine
M_L	Nm	Luftspalmmoment
$M_{M,RPS}$	Nm	Wert der Momentenmesswelle des Rollenprüfstands
M_{RPS}	Nm	an den Radantriebswellen wirksames Moment, hervorgerufen durch Zugkraft am Rollenumfang
M_S	Nm	Anlasser-/Startermoment
$M_{TK,Stütz}$	Nm	an der Trennkupplung abstützbares Moment
M_V	Nm	aus Verbrennungsprozess resultierendes Moment
M_W	Nm	Widerstandsmoment

$M_{W,RPS}$	Nm	Verluste aus Reibung im Laufrollensatz Rollenprüfstand
$n_{A/B/C/D/E}$	U/min	Drehzahlen der Wellen A/B/C/D/E
n_{E-M}	U/min	Rotordrehzahl der Elektromaschine
n_{V-M}	U/min	Drehzahl des Verbrennungsmotors
p_{FC}/p_{FB}	bar	Druck an den Drehmomentfühlern Welle B/C
p_{K1}/p_{K2}	bar	an Lamellenkupplungen K1/K2 anliegender Druck
p_{L1}/p_{L2}	bar	an Lamellenkupplungen L1/L2 anliegender Druck
p_P	bar	durch die Hydraulikpumpe erzeugter Druck
p_{TK}	bar	an der Trennkupplung anliegender Druck
$p_{VSS,an/ab}$	bar	Drücke in den Anpresszylindern des Kettenwandlers
P	W	Leistung
$P_{CAN,Rest}$	-	Restfehlerwahrscheinlichkeit eines CAN-Systems
$P_{el,wirk,3\sim}$	W	elektrisch wirksame Leistung des 3-Phasen-Drehfelds
P_L	W	Luftspaltleistung in der Asynchronmaschine
$P_{S,el}$	W	elektrische Leistung für Anlassers/Starters
$P_{S,el,Bedarf}$	W	elektrische Leistungsbedarf für Anlassers/Starters
Q_K	l/h	Kraftstoffdurchfluss
r	-	Rückführgröße
$r_{Rad,dyn}$	m	dynamischer Rollradius
r_{RPS}	m	Radius der Laufrollen des Rollenprüfstands
s	-	Schlupf (normiert)
s_K	-	Kippschlupf (normiert)
s_{K1}/s_{K2}	-	Stellung/Position Klauenkupplung K1/K2 (normiert)
T	K	Temperatur
T_A	s	Abtastzeit
T_B	s	Zykluszeit eines digitalen Reglers
T_F	s	Totzeit eines Filters
T_H	s	Haltezeit
T_R	s	Zykluszeit eines Regler
t	s	Zeit
U	V	Spannung
u	-	Ausgangsgröße (normiert)
$v_{Rolle,soll}$	km/h	Sollwert für Rollenumfangsgeschwindigkeit
w	-	Führungsgröße (normiert)
x	-	Regelgröße (normiert)
x_{VS}	-	Position Verstelleischiebe Kettenwandlermodell (normiert)
x_{VSS}	-	Position Vierkantensteuerschieber (normiert)

y	-	Stellgröße (normiert)
	-	Fahrbahnsteigungswinkel
EP	-	Stellhebelwinkel Einspritzpumpe (normiert)
	rad	Winkel
A	rad	Winkel der Getriebeeingangswelle
$B/C/D$	rad	Winkel der Welle B/C/D
$E M$	rad	Winkel Rotorwelle Elektromaschine
$V M$	rad	Winkel Kurbelwelle Dieselmotor
TK	rad	Winkel Trennkupplung auf Getriebeeingangswelle
ASM,L	-	Wirkungsgrad der ASM Luftspaltmomentenerzeugung
$CVT, mech$	-	mechanischer Wirkungsgrad des Kettenwandlers
DC/DC	-	Wirkungsgrad DC/DC Wandler
PWR	-	Wirkungsgrad des Pulswechselrichters
S	-	Wirkungsgrad des Anlassers/Starters
S	rad/s	Kreisfrequenz eines Signals
A	rad/s	Abtastkreisfrequenz
RPS	rad/s	Winkelgeschwindigkeit Laufrollen Rollenprüfstand
$Luft$	kg/m ³	Dichte von Luft
$E M$	kgm ²	Massenträgheitsmoment Asynchronmaschine
Fzg	kgm ²	radbezogenes Fahrzeugmassenträgheitsmoment
G, an	kgm ²	Massenträgheitsmoment Getriebe an-/abtriebsseitig
RPS	kgm ²	Massenträgheitsmoment Laufrollensatz Rollenprüfstand
$V M$	kgm ²	Massenträgheitsmoment Kurbelwelle und Schwungrad
	-	Anpresskräfteverhältnis der Kettenwandlerscheiben

Indices, Kurzzeichen

120 V	120 V-Bordnetz
3~	3-Phasen-Drehfeld
an	Antrieb/antriebsseitig
ab	Abtrieb/abtriebsseitig
A/B/C/D/E	Wellen A oder B/C/D/E
Autrg	Außenträger einer Kupplung
CVT	hier: Kettenwandler
Bedarf	angeforderte bzw. benötigte Energie/Leistung
dig	digitaler Wert
el	elektrisch
E-M	Elektromaschine

HD	Hochdruckpumpe (Hydraulikversorgung)
Intrg	Innenträger einer Kupplung
K1/2	Klauenkupplung 1/2
L1/2	Lamellenkupplung 1/2
Lad	Ladevorgang
li/ re	links/ rechts
Modell	mit einem Modell berechneter Wert
ND	Niederdruckpumpe (Hydraulikversorgung)
NV	Nebenverbraucher
red	redundant
S	Starter bzw. Anlasser
Stütz	abstützbares Moment
V-M	Verbrennungsmotor
V1/V2	Fahrbereiche des i ² -Getriebes

Abkürzungen

A	Aktor
ABS	Anti-Blockier-System
ACC	Adaptive Cruise Control
ACK	Acknowledgement
A/D bzw. D/A	analog/digital bzw. digital/analog
ALB	Automatische lastabhängige Bremse/Bremskraftregelung
AM	Antriebsmanagement
ASM	Asynchronmaschine
ASR	Antriebs-Schlupf-Regelung
AUTOSAR	Automotive Open System Architecture
BIOS	Basic Input Output System
BUS	Binary Unit System
CAN	Controller Area Network
CiA	CAN in Automation
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSEV	Channel Status Error Vector
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
CVT	Continuously Variable Transmission
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
E	elektrisch/elektronisch

EBS	Elektronisches Brems-System
ECU	Electronic Control Unit
EE	Energieeinheiten
EEPROM	Electronical Erasable Programmable ROM
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EN	Europäische Norm
ESP	Elektronisches Stabilitäts-Programm
FBW	Fahrbereichswechsel
FFR	Fahrzeugführungsrechner
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FS	Fehlerszenario
FSEV	Frame Status Error Vector
FTA	Fault Tree Analysis
FTDMA	Flexible Time Division Multiple Access
FTP	Federal Test Procedure
HIL	Hardware-in-the-Loop
ID	Identifizier
IEC	International Electrotechnical Commission
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
I/O	in/out
ISO	International Organization for Standardization
J	Massenträgheitsmoment
K1/2	Klauenkupplung 1/2
KWP 2000	Keyword Protocol 2000
L1/L2	Lamellenkupplung 1/2
LIN	Local Interconnect Network
MEDL	Message Descriptor List
MISRA	Motor Industry Software Reliability Association
MTBF	Mean Time Between
NEFZ	Neuer-Europäischer-Fahrzyklus
Nkw	Nutzkraftwagen
NM	Netzwerk-Management
OBD	On-Board-Diagnose
OSEK	Offene Systeme für die Elektronik im Kraftfahrzeug
OSI	Open System Interconnection
PCMCIA	PC-Memory Card International Association
Pkw	Personenkraftwagen

PWM	Pulsweitenmodulation/Pulse Width Modulation
PWR	Pulswechselrichter
RAM	Random Access Memory
RCP	Rapid Control Prototyping
ROM	Read Only Memory
S	Sensor
SAE	Society of Automotive Engineers
SFB	Sonderforschungsbereich
SIL	Safety Integrity Level
SYN	Synchronpunkt
TDMA	Time Division Multiple Access
TFM	Transversalflussmaschine
TK	Trennkupplung
TTA	Time Triggered Architecture
TTCAN	Time Triggered CAN
TTL	Transistor Transistor Logic
TTP	Time Triggered Protocol
TTSB	Time Triggered Sensor Bus
V	Vornorm
V1, V2	Fahrbereiche
V-Modell	Vorgehensmodell
VSS	Vierkantensteuerschieber
ZBR	zentraler Bordrechner
C	Mikrocontroller

1 Einleitung

1.1 Management von Fahrrieben

Damit gewünschte Fahreigenschaften und -funktionen bei effizientem Leistungseinsatz des Gesamtsystems erzielt werden können, betreibt man Fahrrieben zunehmend mit Managementsystemen. Der Mensch wird dabei von Aufgaben entbunden und durch elektronische Systeme unterstützt. Bezogen auf Fahrrieben versteht man unter dem Begriff „Management“ ein System, welches Fahrrieforderungen und Fahrwünsche automatisiert umsetzt und neben Steuer- und Regelaufgaben auch Betriebsstrategien, Systemüberwachungen und Absicherungen realisiert. Fahrwünsche können dabei über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle oder allgemein durch Assistenzsysteme eingeleitet werden. Der für ein Management notwendige Systemverbund wird durch die informationstechnische Vernetzung von Steuer- und Regelgeräten einzelner Antriebskomponenten realisiert. Die zur Übermittlung von Stell-, Soll- und Messwerten sowie Diagnosedaten eingesetzten Kommunikationssysteme sind integrale Bestandteile von Managementsystemen. Deren funktionelle und sicherheitstechnische Bedeutung steigt.

1.2 Ziele dieser Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit sollen nach einer Betrachtung vernetzter Fahrriebssysteme Entwicklungstendenzen analysiert und ein Leitfaden zur regelungs- und sicherheitstechnisch anforderungsgerechten Kommunikationsgestaltung erstellt werden. Neben einer Beschreibung von Komponenten wie Steuer- und Regelgeräten, Sensoren und Aktoren sollen vor allem der Aufbau, die Funktionen und die Eigenschaften relevanter Bussysteme gezeigt werden. Zur Konzeption, Auslegung, Absicherung und Entwicklung der Signalkommunikation in Steuer- und Regelgerätenetzwerken von Fahrrieben sind wichtige Hinweise zu geben und Regeln aufzustellen.

Am Beispiel eines innovativen stufenlosen Hybridantriebs für Pkw ist ein Kommunikationskonzept zu entwickeln. Dabei sollen ein Versuchsfahrzeug untersucht und der Einsatz modellbasierter Entwicklungs- und Testmethoden sowie die Entwicklung und Absicherung fehlertoleranter Kommunikationssysteme demonstriert werden. Besondere Aufmerksamkeit soll dem Einsatz von Hardware-in-the-Loop-Simulationen zur Absicherung der Kommunikation gewidmet werden. Hier sind neben der Analyse des komplexen Zeit- und Systemverhaltens in Netzwerken auch Möglichkeiten zur Untersuchung von Fehlerszenarien zu betrachten.

2 Stand der Technik

In der Kraftfahrzeugtechnik tragen elektronische Steuer- und Regelsysteme einen bedeutenden Anteil zu Funktionen und Innovationen in Bereichen der Längs-, Vertikal- und Querdynamik [1, 2, 3] sowie der Automatisierung bei mobilen Arbeitsmaschinen [4] bei.

Bild 2.1 zeigt exemplarisch die Entwicklung des Produktionskostenanteils der Elektronik eines durchschnittlichen Pkw. Der Programm- bzw. Datenspeicher typischer Motorsteuergeräte ist ein Indikator für die enorme Zunahme des Funktionsumfangs.

Der weltweite Bedarf an Regel- und Assistenzsystemen wird zur Steigerung von Komfort, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit weiter anwachsen [5]. Während im Jahr 2002 bereits über 70 % aller weltweit produzierten Pkw mit Motormanagement sowie über 60 % mit ABS bzw. ASR (Anti-Blockier-Systemen bzw. Antriebs-Schlupf-Regelungen) ausgestattet wurden, besteht vor allem bei Systemen zum Antriebsmanagement sowie zur Abstands- und Geschwindigkeitsregelung (ACC) weiteres Ausrüstungspotenzial.

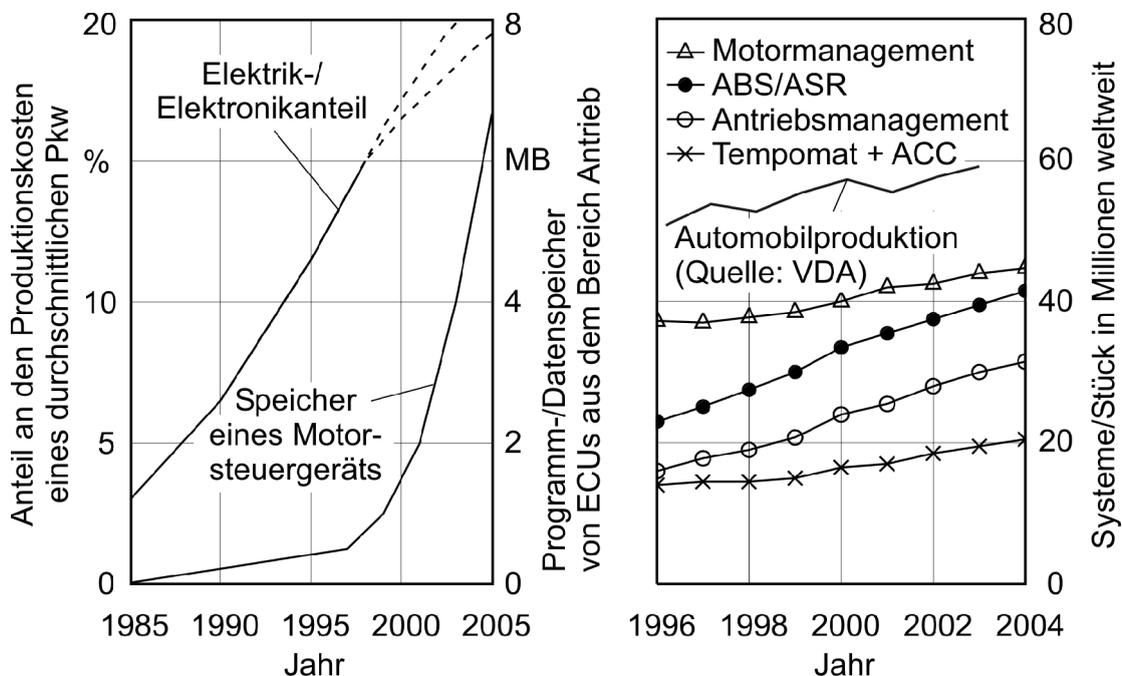


Bild 2.1: Entwicklung des Produktionskostenanteils von Elektronik bei Pkw sowie des Speichers von Motorsteuergeräten als Indikator für den Funktionsumfang; jährlicher Weltbedarf an elektronischen Regel- und Assistenzsystemen aus dem Bereich Antrieb [1,5] in Relation zur Automobilproduktion (Pkw und Nutzfahrzeuge).

2.1 Steuer- und Regelsysteme für Fahrtriebe

Bild 2.2 zeigt in Anlehnung an den schematischen Aufbau einer Regelung [6, 7] die Elementarstruktur von Steuer- und Regelsystemen bei Fahrtrieben. Als digitale Rechner für Komponenten wie Motoren oder Getriebe werden ECUs (Electronic Control Units) mit robusten und mobiltauglichen Mikrocontrollern verwendet [8, 9, 10]. Sie verfügen über integrierte Signalprozessoren oder zusätzliche Schnittstellen zur Ausgabe von Stellgrößen an Aktoren, zur Verarbeitung der mit Sensoren gemessenen Rückführgrößen sowie zur bitseriellen Kommunikation.

In **Tabelle 2.1** sind typische Merkmale von ECUs aus dem Bereich Antriebsstrang aufgeführt (siehe auch [8, 11, 12, 13, 14]). Einen Überblick über die vielfältigen

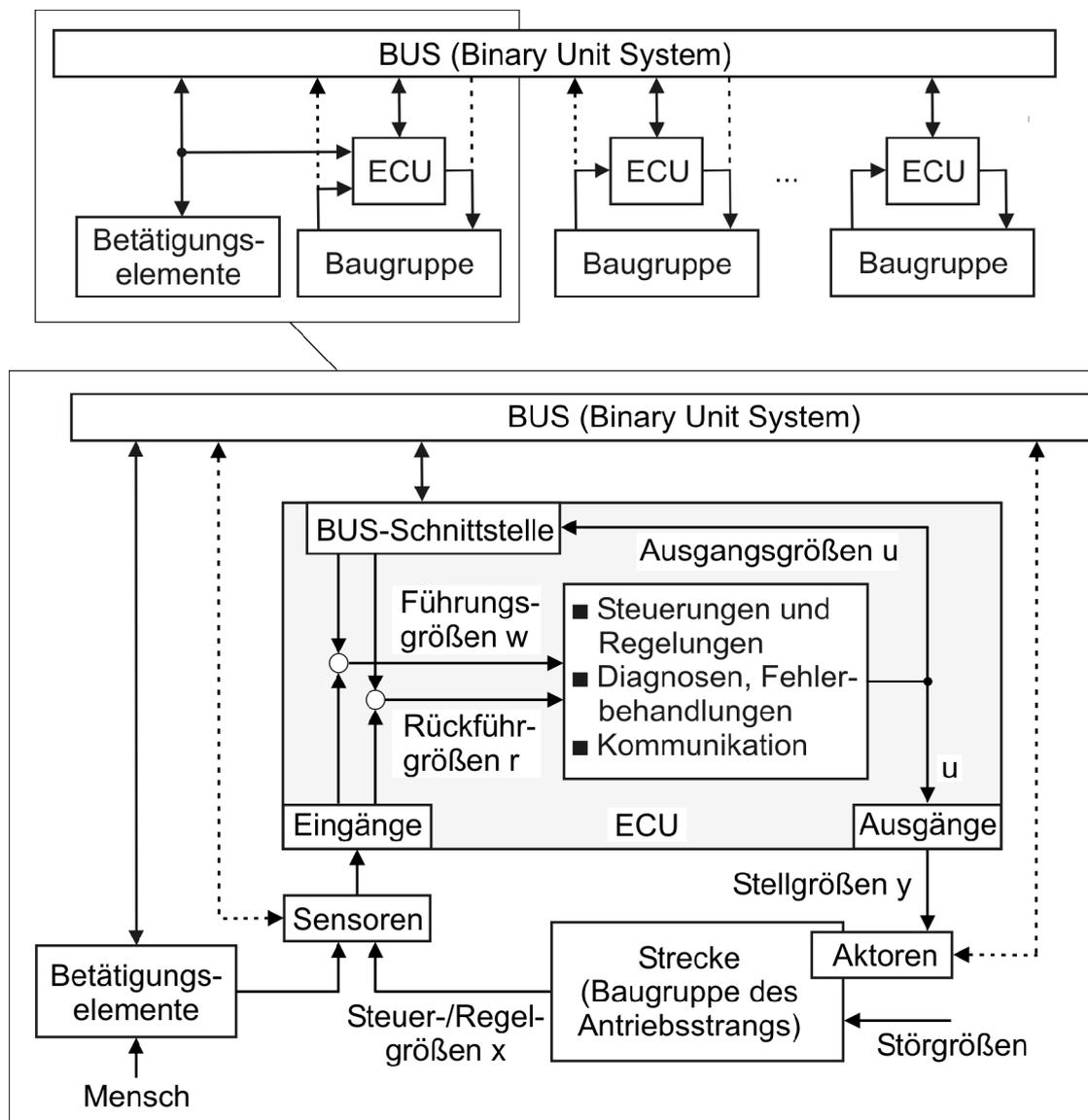


Bild 2.2: Elementare Grundstruktur und Signalfluss bei Steuer-, Regel- und Überwachungseinrichtungen von Antriebsstrangkomponenten.

Tabella 2.1: Merkmale typischer ECUs aus dem Bereich Fahrtriebe, Stand 2004.

Mikrocontroller	<ul style="list-style-type: none"> • 16- sowie 32-Bit, z. T. Doppelprozessoren • Taktfrequenz: 20, 40, z. T. bereits 80 MHz • Speicher: 0,512 kB...2 MB Flash, 32...48 kB RAM sowie nicht-flüchtiger EEPROM für Diagnose und Parameterdaten
Eingänge für Sensorsignale	<ul style="list-style-type: none"> • mehrere 10-, z. T. 16-Bit A/D-Wandler für Spannungen von 0...5 V, z. T. 0...10 V; mit entsprechender Schaltung Ströme von 0...24 mA bzw. 4...20 mA (Kabelbruchdiagnose möglich) • digitale Spannungseingänge bis Batteriespannung (12 V) • Drehzahl-/Frequenzeingänge für pulsförmige Spannungen oder TTL-Signale
Ausgänge für Aktorsignale	<ul style="list-style-type: none"> • mehrere 10-, z. T. 16-Bit D/A-Wandler für Spannungen von 0...5 V, z. T. 0...10 V mit entsprechender Schaltung • PWM-Ausgänge für Leistungen von 0...1, 2 oder 4 A • digitale Spannungsausgänge bis Batteriespannung (12 V)
Schnittstellen für Kommunikation	<ul style="list-style-type: none"> • serielle Schnittstellen • CAN, 1 bis 2 Kanäle, meist auf Mikroprozessor integriert • z. T. LIN
Software und deren Entwicklung	<ul style="list-style-type: none"> • standardisiertes Betriebssystem (z. B. OSEK kompatibel) • Funktions- und Schnittstellendiagnose • modellbasierte Regelungen sowie adaptive Verfahren • modularisierte Software • durchgängige Entwicklungsmethoden sowie automatische Codegenerierung

Sensoren und Aktoren bieten [8, 13, 14]. Einfache, digitale Stellglieder oder Aktoren werden durch Anlegen von Spannung geschaltet. Stufenlose Aktoren, die nicht mit dem Bordnetz verbunden sind, werden meist durch pulswellenmodulierte Ströme (PWM-Ausgänge) angesteuert.

Sensor-/Aktor-Bussysteme

Im Bereich Antriebsstrang ist serielle Kommunikation zwischen ECUs und sogenannten intelligenten Sensoren und Aktoren (Smart Sensors/Actuators) über kostengünstige Bussysteme (Binary Unit System) noch wenig verbreitet. LIN (Local Interconnect Network [15, 16]) wurde 1999 vorgestellt und seit 2001 vor allem im Komfortbereich eingesetzt. Das eindrahtige Sensor-/Aktor-Bussystem mit niedrigen Übertragungsraten von maximal 20 kBit/s wurde für Aufgaben mit verhältnismäßig geringen Anforderungen konzipiert. Eine für Fahrtriebe relevante Anwendung von LIN ist z. B. die Übermittlung von Schaltbetätigungen an Lenkrädern [17]. Mit einer verstärkten Ausweitung des Einsatzes von LIN ist zu rechnen. Zum Teil wird auch das teurere Bussysteme CAN (Controller Area Network) zur Sensor-/Aktor Kommunikation eingesetzt.

In jüngster Zeit gewinnen günstigere eindrahtige CAN-Systeme (Single-Wire-CAN) mit Abtastraten von 33 kBit/s an Bedeutung [18].

Neue Sicherheits-Bussysteme zur Sensor-/Aktor-Vernetzung sind auch für anspruchsvolle Einsätze im Bereich Antriebsstrang geeignet. Sie befinden sich in einem fortgeschrittenen Forschungsstadium. Speziell für das Bussystem TTP/A [15] wurden im Rahmen des Projekts TTSB (Time-Triggered Sensor Bus) aussichtsreiche Konzepte und Standards erarbeitet.

Systemvernetzung

Die Vorgabe von Führungsgrößen oder Steuerbefehlen an die zentralen Recheneinheiten von ECUs erfolgt über Sensoren von Betätigungselementen [19, 20] oder zunehmend durch serielle Datenkommunikation mit Betätigungselementen oder weiteren ECUs in einem vernetzten Regel- und Steuergeräteverbund [19, 21, 22] (siehe Bild 2.2). Dieser wird größtenteils in verteilten Systemarchitekturen realisiert, bei denen meist dezentrale ECUs die Regelung, Steuerung und Überwachung von Antriebskomponenten übernehmen. Der Informationsaustausch zwischen spezialisierten Subsystemen bzw. hierarchischen Instanzen wird durch die Vernetzung von ECUs über Bussysteme bewerkstelligt.

Bussysteme für Steuer- und Regelgerätenetzwerke bei Fahrtrieben

Im Bereich Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen hat sich das von Bosch spezifizierte und durch die ISO (International Standardization Organisation) in ISO 11898 [23] standardisierte High-Speed-CAN etabliert. High-Speed-CAN mit Übertragungsraten von 125 kBit/s bis 1 MBit/s ist in Europa der Standard für Datenkommunikation im Bereich Antriebsstrang. In Amerika wird das langsamere J1850 von CAN verdrängt, in Asien setzt sich CAN zunehmend durch und wird damit weltweit erfolgreich.

Bild 2.3 zeigt die Entwicklung der verkauften CAN-Controller, von denen allerdings nicht alle in Kraftfahrzeugen bzw. bei Fahrtrieben Anwendung finden. Einen beträchtlichen Anteil machen die für Karosserie- und Komfortsysteme konzi-

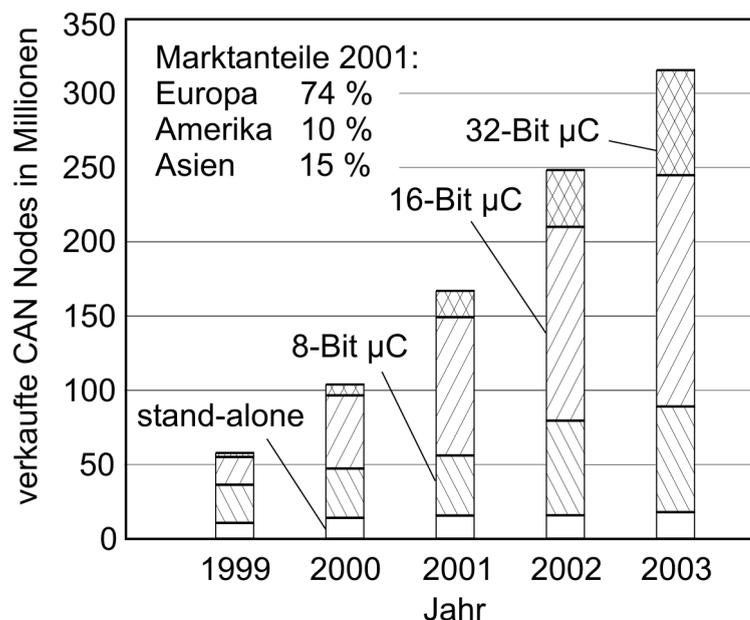


Bild 2.3: Entwicklung verkaufter CAN Controller, aufgliedert nach Anteilen der auf Mikrocontrollern integrierten Protokollcontroller, Quelle: CAN in Automation (CiA).

pierten und in Teil 3 der ISO 11898 genormten Low-Speed-CAN-Anwendungen aus. Weitere Controller werden vor allem im Bereich der Automatisierung eingesetzt.

Die für den Bereich Fahrtriebe relevante CAN-Norm ISO 11898 beschreibt in Teil 1 und 2 lediglich die physikalische Schicht 1 sowie die Datensicherungsschicht 2 des OSI-Referenzmodells (Open System Interconnection) der Datenkommunikation (ISO/IEC 7498-1 [24]). Die damit geschaffene Basis wurde zu anwendungsspezifischen sowie Hersteller übergreifenden Erweiterungen für höherschichtige Protokolle [25] und Profile genutzt, von denen jedoch nur einige von Bedeutung für Fahrtriebe sind (siehe Kapitel 2.2).

Neue zeitgesteuerte Bussysteme wie TTCAN (Time Triggered CAN, [26, 27]), TTP (Time Triggered Protocol, [28]) und FlexRay [29, 30] sind für mobile X-by-Wire Systeme mit hoher Sicherheitsrelevanz konzipiert. Ein erster Serieneinsatz von FlexRay wird 2005 für sicherheitskritische Anwendungen bei Pkw-Fahrwerken erwartet. Zukünftige Einsätze im Bereich Antriebsstrang sind denkbar. Kennzeichen von TTP und FlexRay sind hohe Datenraten, zeitgesteuerte und deterministische Übertragungen, Unterstützung des Taskmanagements von Echtzeitbetriebssystemen in verteilten Architekturen, hohe Störsicherheit sowie implementierte Mechanismen für Fehlertoleranz bzw. Redundanz. TTCAN ist eine abwärtskompatible Weiterentwicklung des ursprünglich ereignisgesteuerten CAN. TTCAN wird als Teil 4 der ISO 11898 in die Standardisierung der High-Speed-Anwendungen eingearbeitet.

Überwachungs- und Diagnosesysteme

Steuer- und Regeleinrichtungen von Antriebskomponenten verfügen über Systeme zur Überwachung, Diagnose und Behandlung von Fehlern [31]. Sie umfassen die Diagnose von Sensor-, Aktor-, Kommunikations-, Regel- und Steuerfunktionen, beschreiben gegebenenfalls die Fehlerspeicher der ECUs, leiten Maßnahmen zur Fehlerbehandlung ein oder unterstützen Service- und Wartungsarbeiten [32].

Die Kommunikation zwischen Kraftfahrzeugen und Diagnose-Testgeräten erfolgt bei europäischen Herstellern über serielle Schnittstellen nach ISO 9141 (sogenannte K-Line) sowie zunehmend über CAN. Die bedeutendsten Kommunikationsstandards für Diagnosesysteme sind das in ISO 14230 [33] genormte Protokoll KWP 2000 (Keyword Protocol 2000) sowie die bei Nutzfahrzeugen angewandte SAE J1939/73 [34]. Mit ISO 15765 [35] entsteht eine Norm für CAN basierte Diagnosesysteme, in der beide Protokolle zusammengeführt werden. Diese Norm findet auch bei mobilen Arbeitsmaschinen Anwendung [36]. Bei amerikanischen Pkw dominiert hier der SAE J1850 Standard. Übersichten zu den variantenreichen Diagnoseschnittstellen geben [13] und [37].

Bei Steuer- und Regeleinrichtungen für Verbrennungsmotoren sind Systeme zur On-Board-Diagnose (OBD) durch die Abgasgesetzgebung vorgeschrieben. In Europa gilt dies seit dem Jahr 2000 für neu zugelassene Pkw und leichte Nutzfahrzeugen bis

3,5 t mit Ottomotoren. 2003 wurden die europäischen Richtlinien auf Dieselmotoren [38] ausgeweitet (2004 in Kraft getreten) und vom amerikanischen Gesetzgeber akzeptiert. Dort wurden OBD-Systeme für Ottomotoren bereits 1988 vorgeschrieben (OBD I) und die Gesetzgebung 1994 verschärft (OBD II). Seit 1996 sind OBD-Systeme auch für Dieselmotoren Pflicht.

2.2 Vernetzte Fahrtriebssysteme

Die Vernetzung von Antriebskomponenten zu Fahrtriebssystemen ermöglicht die technische Realisierung umfangreicher Funktionen bei vertretbaren Kosten. Im Folgenden werden typische Systemarchitekturen von mobilen Arbeitsmaschinen, Pkw sowie Nkw vorgestellt.

2.2.1 Mobile Arbeitsmaschinen

Als mobile Arbeitsmaschinen bezeichnet man universelle Fahrzeuge mit Zusatzausrüstungen für Arbeitsprozesse aus Bereichen der Bau-, Land-, Forst-, und Kommunalwirtschaft sowie Spezialmaschinen. Von den vielfältigen und spezialisierten Fahrtrieben mobiler Arbeitsmaschinen [39, 40, 41] werden repräsentativ die Steuer- und Regelsysteme bei Traktoren und Radladern betrachtet.

2.2.1.1 Traktoren

Der extrem universelle Einsatz von Traktoren [42] stellt besondere Anforderungen an die Fahrtriebe sowie deren Management- und Automatisierungsfunktionen [43]. Typische Antriebskomponenten der technologisch hoch entwickelten westeuropäischen Standardtraktoren [44] sind neben lastschaltbaren Stufenautomaten zunehmend stufenlose, hydrostatisch-leistungsverzweigte Automatikgetriebe in Verbindung mit elektronisch geregelten Dieselmotoren [45, 46]. Mit diesen automatisierten Fahrtrieben lassen sich fahrgeschwindigkeitsunabhängige Managementstrategien des Antriebsstrangs [47, 48] verwirklichen und optimal in die Automatisierungen des Gesamtfahrzeugs [4, 49, 50] unter Berücksichtigung der Arbeitseinrichtungen einbinden.

Regelgrößen sind z. B. maximale Leistung, günstiger Verbrauch, konstante Zapfwellendrehzahl oder konstante Geschwindigkeit [46]. Darüber hinaus sind für den universellen Arbeitseinsatz eine Vielzahl von Steuer- und Regeleinrichtungen zur Fahrzeugführungsassistenz (z. B. Rangieren, Reversieren, aktiver Stillstand am Berg) verfügbar. Brems- und Haltefunktionen werden dabei zum Teil durch Abstützung im hydrostatischen Getriebe, meist jedoch durch mechanisch vorgesteuert betätigte Fahrzeugbremsen realisiert.

Bild 2.4 zeigt die Struktur eines vernetzten Traktors. Betätigungselemente wie Multifunktionsjoysticks, Fahrpedale oder Konsolen kommunizieren über den Traktor-CAN 1 mit weiteren ECUs und zunehmend auch direkt mit Ventilen der Ar-

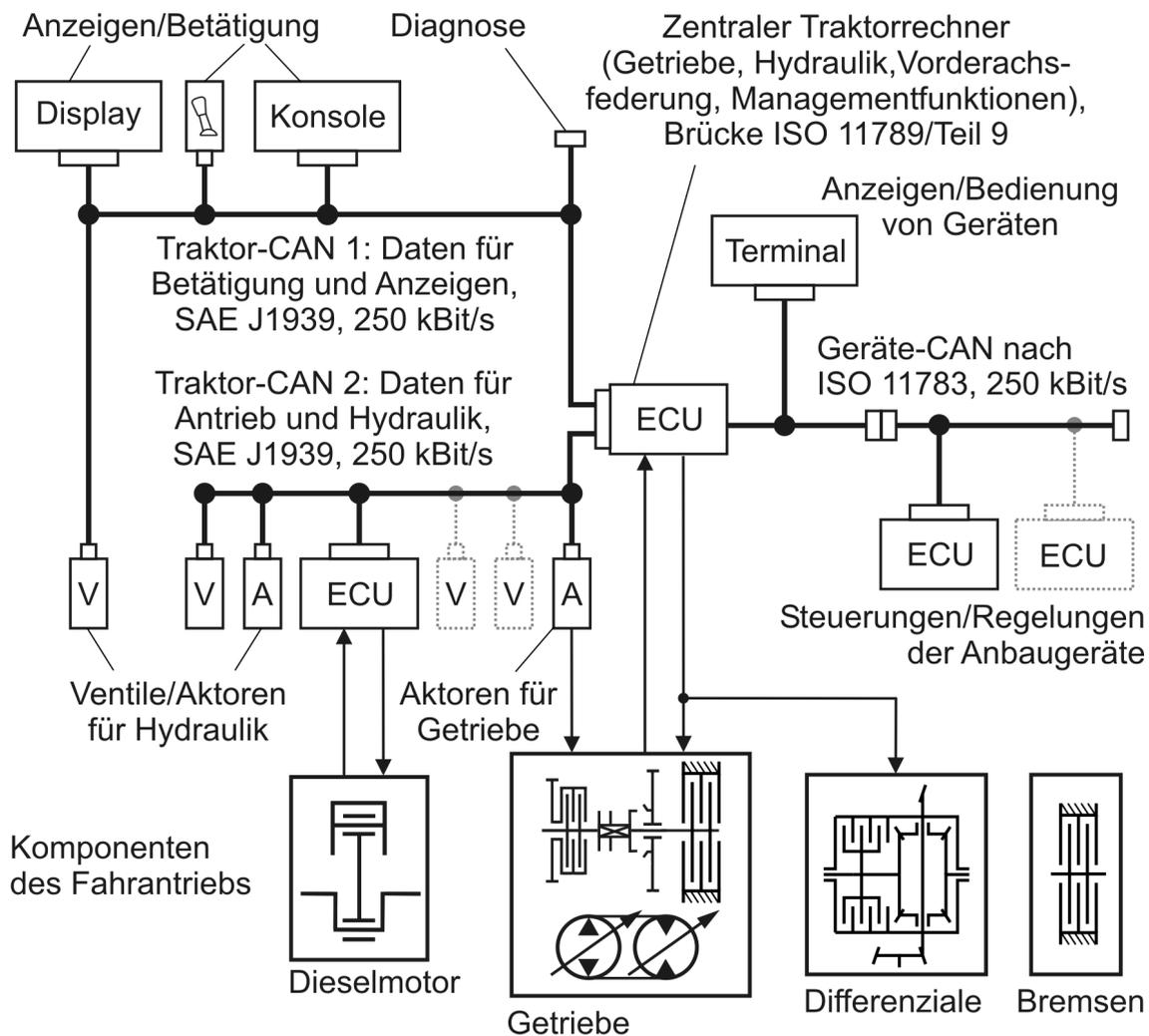


Bild 2.4: Schema eines vernetzten Traktors mit stufenlos hydrostatisch leistungsverzweigtem Getriebe und Traktor-Geräte-Kommunikation nach ISO 11783, siehe auch [46].

beitshydraulik oder Aktoren des Getriebes. Der in ISO 11783 standardisierte ISOBUS [51, 52] für Anwendungen in der Land- und Forstwirtschaft empfiehlt in Teil 8 die Vernetzung des Antriebs von Traktoren sowie selbstfahrenden Spezialmaschinen nach SAE J1939 [53, 54].

In diesem ursprünglich für Nutzfahrzeuge konzipierten Protokoll werden alle relevanten Mess- und Steuerdaten mit einem 250 kBit/s CAN in entweder fest definierten Zyklen (zwischen 10 ms und 5 s) oder in motordrehzahlabhängig variablen Intervallen (zwischen 5 bis 35 ms) ausgetauscht. Die Konfiguration, Diagnose und Kalibrierung einzelner Komponenten wird unterstützt. Neben der Art der Nachrichtenübertragung sind auch der Aufbau, Inhalt sowie die Flusskontrolle spezifiziert. Zur Realisierung herstellerspezifischer Daten können proprietäre Nachrichten definiert werden. Vereinzelt erfolgt die maschineninterne Vernetzung von Landmaschinen mit herstellerspezifischen CAN-Protokollen. Zudem werden speziell für Motoren häufig

separate CAN-Systeme über Brückensteuergeräte dem internen Bus von Landmaschinen unterlagert.

Besonders hervorzuheben ist die in ISO 11783 vorgesehene übergreifende Regelkreisbildung zwischen Traktor und Gerät. Diese geht über traktorintern implementierte Regelungen hinaus und ermöglicht Sollwertvorgaben von Geräten an den Traktor. Die Geräte kommunizieren auf einen dynamisch konfigurationsfähigen Geräte-CAN über die in Teil 9 der ISO 11783 spezifizierte Schnittstelle Traktor-Job-Rechner mit dem Traktor-CAN.

2.2.1.2 Radlader

Bei Radladern konkurrieren hydrodynamische und hydrostatische Fahrtriebssysteme [55]. Rein hydrostatische Lösungen für niedrige Leistungsklassen sowie Kombinationen mit Schaltgetrieben bei höheren Leistungen setzen sich aufgrund des flexibleren Funktionsumfangs, des erhöhten Komforts sowie der besseren Wirtschaftlichkeit zunehmend durch [56, 57, 58, 59].

Einsatzmerkmale von Radladerantrieben sind höchste Zugkräfte bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten, extrem häufiges Reversieren, Bremsen und Beschleunigen sowie eine Aufteilung der Antriebsleistungen zwischen Fahrtrieb und Arbeitseinrichtungen.

Entsprechende Funktionen und Fahrautomatiken des Antriebssystems werden zunehmend durch den Einsatz elektronischer Steuer- und Regelsysteme realisiert [60, 61, 62] bzw. durch Fahrassistenz unterstützt. So wird z. B. durch Betätigung von Fahrpedal oder Multifunktions-Joystick die Beschleunigung des Fahrzeugs angefordert. Die Umsetzung durch Verstellen des hydrostatischen Getriebes und Leistungsregelung des elektronisch angesteuerten Dieselmotors erfolgt automatisiert. Dabei werden der Anteil der hydrostatischen Abbremsung und die parametrierbare sowie zusätzlich direkt steuerbare Charakteristik der Leistungsaufteilung zwischen Fahr- und Arbeitshydraulik berücksichtigt.

Automatisierte Fahrtrichtungswechsel, Zugkraftlimitierungen, Schlupfregelungen, Retarderfunktionen über die Pumpen der Arbeitshydraulik sowie Geschwindigkeitsregelungen für Spezialaufgaben (z. B. Schneefräsen) sind möglich. Die Differenziale der Achsen sind selbstsperrend und somit betätigungsfrei. Bremsfunktionen werden neben der hydrostatischen Abstützung im Getriebe auch durch einen zweiten, vom Fahrer betätigten Pumpenspeicher-Bremszweig realisiert.

Bild 2.5 zeigt die Topologie der Regel- und Steuergeräte eines modernen Radladers. Kennzeichnend ist die maschineninterne Vernetzung von Antriebsstrangkomponenten über einen CAN nach ISO 11898. Neben vielen herstellerspezifischen Protokollen wird dabei vor allem SAE J1939 angewandt [52]. Durch die Standardisierung von Geräteprofilen und Fahrtriebkomponenten für mobile Anwendungen im

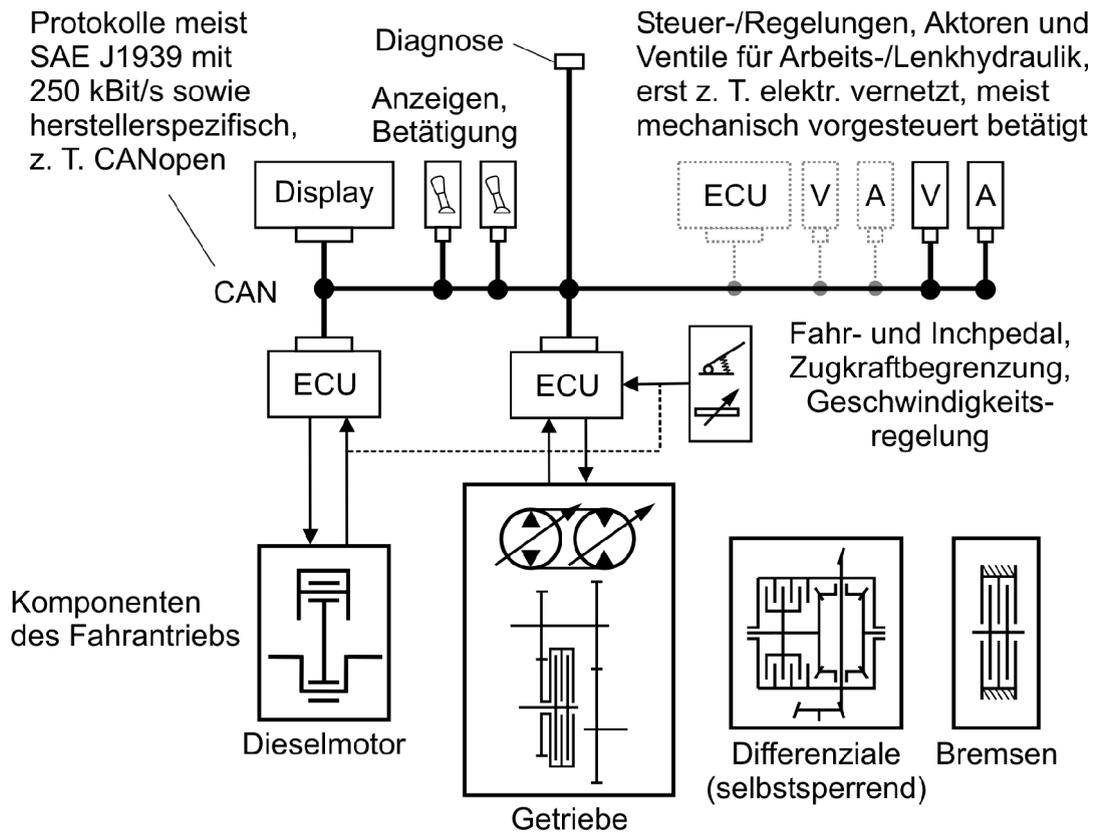


Bild 2.5: Schema eines vernetzten Radladers mit hydrostatischem Fahrtrieb, siehe [60].

Rahmen eines Forschungsvorhabens [63] gewinnt der Einsatz von CANopen [24, 64] an Bedeutung.

2.2.2 Nutzkraftwagen

Typische elektronisch geregelte Komponenten moderner Nkw-Antriebe sind verbrauchs- und schadstoffarme Dieselmotoren, automatisierte 16-Gang-Schaltgetriebe, z. T. automatisierte Anfahrkupplungen, z. T. im Getriebe integrierte Primär- sowie nachgeschaltete Sekundärretarder und leistungsstarke Bremsanlagen [65]. Automatikgetriebe mit hydrodynamischem Wandler finden vorwiegend bei Bussen, Kommunalfahrzeugen oder Schwertransportern Anwendung. Deren Hauptvorteil sind vollautomatisierte Lastschaltungen bei hohem Komfort. Von Nachteil sind die schlechteren Wirkungsgrade aufgrund der Verluste des hydrodynamischen Wandlers (wenngleich z. T. durch Überbrückung gemildert) sowie der speziell für viele Gangstufen erhöhte sicherheitstechnische und konstruktive Aufwand [66]. Einen Überblick über den Stand der Nkw-Getriebe bieten [67, 68, 69, 70].

Aufgrund der hohen bewegten Massen nehmen neben den Antriebsaggregaten auch die Verzögerungs- und Bremsanlagen eine wichtige Rolle beim Triebstrangmanagement ein. Automatisierungen unterstützen vorwiegend Anfahr-, Schalt-, Verzögerungs- und Bremsvorgänge [71, 72, 73]. Darüber hinaus haben sich eine Reihe von As-

sistenz- und Regelsystemen aus den Bereichen Komfort, Sicherheit und Fahrdynamik etabliert [74]. Bedeutend für Fahrtriebe sind neben dem für Lastwagen gesetzlich vorgeschrieben Anti-Blockier-System (ABS) vor allem Antriebs-Schlupf-Regelungen (ASR), Bremsassistenten, Elektronische Stabilitäts-Programme (ESP), Anfahrassistenten sowie Systeme zur Abstands- und Geschwindigkeitsregelung (Adaptive Cruise Control, ACC) [75, 76, 77, 78, 79]. Mögliche Regelgrößen sind Drehzahlen oder Geschwindigkeiten, Momente sowie Abstände.

Bild 2.6 zeigt die Systemarchitektur eines modernen Nkw. Die Komponenten des Antriebsstrangs sind über einen zentralen Triebstrang-CAN gemäß der etablierten Norm SAE J1939 vernetzt [53, 54, 80]. Fahrfunktionen (z. B. Beschleunigen, Kupplungsbetätigung, Schalten, Abbremsen, Anfahren am Berg) werden zunehmend von übergeordneten Führungsrechnern [81, 82, 83] oder Fahrreglern koordiniert [65, 66, 75] und in einem verteilten System realisiert [84]. Als Schnittstellen und Übergabeparameter dienen meist Drehzahlen und Momente. Die ECU des Dieselmotors wird oft

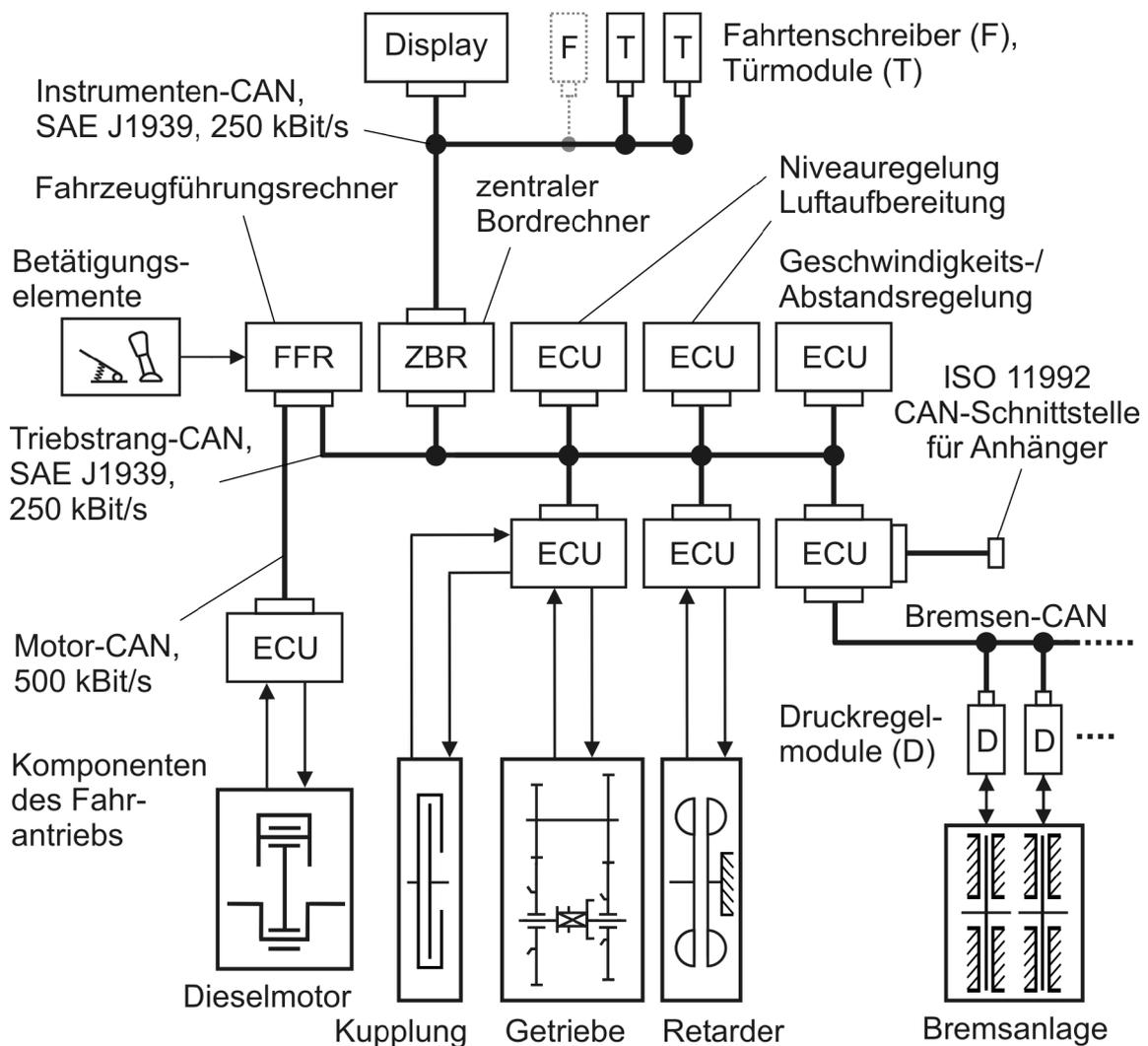


Bild 2.6: Vernetzung eines Nkw mit automatisiertem Antriebsstrang, siehe auch [81,87].

durch einen separaten CAN an den Führungsrechner oder Fahrregler geknüpft. Weitere Subsysteme von ECUs können gegebenenfalls deren Peripherie bzw. die intelligente Aktorik von Kupplungen, Achsmodulen (Differenzialsperren für Baufahrzeuge) oder Bremsen (Druckregelmodule) sein. Hervorzuheben ist hierbei auch die Miteinbeziehung von Anhängern in das elektronische Brems-System EBS [85] über die Truck-Trailor-Schnittstelle nach ISO 11992 [86].

Die Bedienelemente sind z. T. noch direkt mit den Steuer- und Regelgeräten der betreffenden Antriebsstrangkomponenten oder mit dem Fahrzeugführungsrechner verbunden (siehe Bild 2.6). Die Anzeigeelemente sowie die Bedienung von Karrosseriefunktionen (z. B. Licht) werden von einem zentralen Bordrechner gemanagt. Die Informationsbündelung im zentralen Bordrechner ermöglicht neben der realisierbaren Funktionsvielfalt bzgl. der Bedienung auch eine Einbindung der Betätigungs- und Anzeigeelemente in Systeme zur On- und Off-Board-Diagnose.

Um hohe Verfügbarkeit zu gewährleisten, werden verstärkt Redundanzkonzepte für fahrrelevante Funktionen ausgeführt [84, 87]. Aus Sicherheitsgründen werden vor allem bei Automatikgetrieben mit hydrodynamischem Wandler und nachgeordneten Planetengetrieben die ECUs zum Teil mit Doppelprozessoren und diversitärer, sich gegenseitig überwachender Software ausgeführt. Damit soll sowohl einer Fehlbedienung durch den Fahrer als auch Fehlfunktionen und daraus resultierenden Getriebeschäden vorgebeugt werden. Der dafür notwendige Sicherheitsaufwand beträgt über 40 % der Steuergerätesoftware und überprüft in Eigendiagnose die Ein- und Ausgänge sowie die Peripherie des Getriebesteuergeräts. Bei Doppelprozessoren werden die Rechnergebnisse zyklisch (meist alle 10 ms) verglichen, Fehler gegebenenfalls kompensiert oder korrigiert oder Ganghalte- bzw. Notfahrfunktionen aktiviert [64].

Ähnliche Vorkehrungen werden bei den Bremssystemen getroffen. Auch hier sind die Prozessoren der ECUs meist doppelt ausgeführt. Im Fehlerfall bzw. beim Ausfall der EBS-Elektronik werden die Funktionen ABS, ASR und ALB (lastabhängige Bremskraftregelung) deaktiviert und auf eine pneumatische Druckluft-Bremsanlage [85] geschaltet (Rückfallebene).

2.2.3 Personenkraftwagen

Fahrtriebssysteme von Pkw sind durch eine Vielzahl herstellerspezifischer Varianten zur charakteristischen Erzielung von Komfort, Dynamik und Wirtschaftlichkeit geprägt. Dies gilt für Baugruppen des Antriebs wie Motoren oder Getriebe [68] sowie für die zur Regelung, Steuerung und zum Management von Fahrtrieben eingesetzten elektronischen Systeme. Typische Komponenten von Pkw-Antrieben sind elektronisch geregelte Otto- und Dieselmotoren [88, 89] und neben konventionellen Handschaltgetrieben vermehrt für Fahrautomatiken geeignete automatisierte Schaltgetriebe

[90], Automatikgetriebe mit hydrodynamischem Wandler [91], Doppelkupplungsgetriebe [92] sowie stufenlose Getriebe [17, 93, 94].

Bild 2.7 zeigt schematisch die Topologie eines vernetzten Antriebssystems für moderne Pkw mit Fahrautomatiken und Assistenzsystemen. Die Vernetzung des Gesamtfahrzeugs ist durch eine ausgeprägte Spezialisierung und Vielfalt an anforderungsspezifischen Subsystemen für Infotainment, Karosserie und Antrieb gekennzeichnet [95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103]. Dabei kommen unterschiedliche Bussysteme zum Einsatz, wobei sich im Bereich Antrieb High-Speed-CAN nach ISO 11898 mit vielfältigen herstellerspezifischen Protokollen durchgesetzt hat. Die Subsysteme werden durch den Einsatz von Gateways [104, 105], die auch mehrere verschiedene Bussysteme verknüpfen können, zu Systemarchitekturen des Gesamtfahrzeugs vernetzt. Beim Pkw sind die Verbrennungsmotoren sowie die automatisierten Getriebe meist mit eigenen Steuergeräten ausgerüstet (Ausnahmen siehe z. B. [106, 107]). Sie kommunizieren über einen 500 kBit/s CAN miteinander sowie mit Steuere-

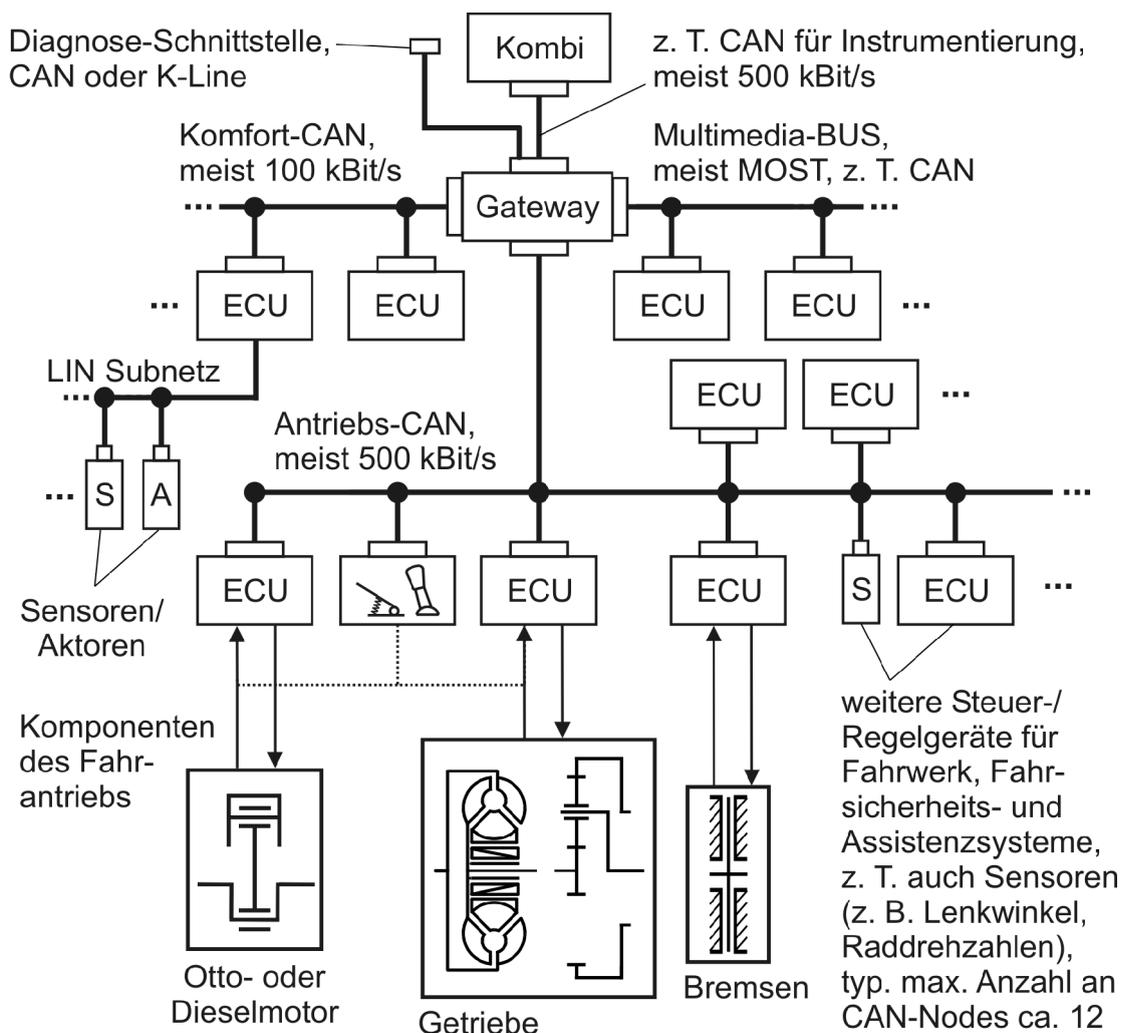


Bild 2.7: Topologie eines vernetzten Pkw mit Fahrautomatiken bzw. Fahrassistenzsystemen und zentralem Gateway, siehe auch [95–104].

räten für Sicherheits- bzw. Fahrdynamiksysteme. Über die Vernetzung unterstützte oder realisierten Fahrautomatiken und Assistenzsysteme mit Motor- und Getriebeeingriffen sind je nach Getriebevariante automatisierte Schaltvorgänge [10, 108] oder Übersetzungsregelungen [109], adaptive Fahrstrategien [110], Anfahrhilfen sowie Geschwindigkeits-, Anti-Schlupf- (ASR) oder Abstandsregelungen (ACC) [2]. Darüber hinaus können durch die Gesamtsystemvernetzung adaptive Komfortfunktionen (z. B. fahrgeschwindigkeitsabhängige Scheibenwischer) realisiert werden.

Zur Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit werden die Signalübertragungen von Sensordaten sowie die Soft- und Hardware der Regel- und Steueralgorithmen zum Teil redundant ausgeführt. Getriebesteuergeräte verfügen dazu über Doppelprozessoren, die ihre Ergebnisse gegenseitig überwachen und gegebenenfalls Fehler abfangen oder Rückfallebenen aktivieren. Sensoren von Drehzahlen, Stellungen von Bedien- oder Schaltelementen sind teilweise doppelt ausgeführt [111, 112, 113]. Ähnliches gilt für Sensoren von Motorsteuergeräten, bei denen z. B. Ersatzwerte für die Motordrehzahlen über die Lichtmaschinen zur Verfügung gestellt werden [88, 89]. Die Kommunikation zwischen Bedienelementen und Getriebesteuergeräten wird neben der Übertragung auf dem Antriebs-CAN vereinzelt auch durch einen parallelen, seriellen Übertragungspfad zwischen den beiden Teilnehmern abgesichert [74].

2.3 Tendenzen für zukünftige Antriebssysteme

Verteilte Systemarchitekturen und Bussysteme

Verteilte Systemarchitekturen haben sich aus technologischen und wirtschaftlichen Gründen zumindest mittelfristig für Regel- und Managementsysteme von Fahrzeugen etabliert, siehe **Tabelle 2.2**. Fahrantriebssysteme werden als spezialisierte Subsysteme in vollvernetzte Fahrzeuge integriert. Eine Zunahme der vernetzten Funktionen und die verstärkte Nutzung fusionierender Sensordaten ist zu erwarten. Bestrebungen zur Reduktion von Anzahl und Variantenvielfalt von ECUs sowie zur Standardisierung von Software sind im Gang [114, 115]. Zukünftig werden auch Verlagerungen von ECU-Funktionen im Zuge dynamischer Fehlertoleranzverfahren erwartet [116]. Zentralen Kommunikationssystemen wird dabei eine wichtige Rolle zuteil. Neben CAN werden leistungsfähigere zeitgesteuerte Bussysteme [28, 30] an Bedeutung gewinnen.

Koordiniertes Antriebsmanagement

Bei der heute üblichen Aufteilung und Verknüpfung von Funktionen in einem vernetzten Steuer- und Regelsystem von Fahrzeugen wird voraussichtlich ein Übergang zu einer hierarchischen Ordnung mit koordiniertem Antriebsstrang- und Energiemanagement [5, 117] vollzogen. Als Gründe hierfür können eine hardwareunabhängige Realisierung übergeordneter Managementfunktionen sowie eine strukturierte und damit in Entwicklung, Betrieb und Diagnose beherrschbare Systemarchitektur angeführt

Tabelle 2.2: Bewertung verteilter Automatisierungssysteme.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • anforderungsgerechte Automatisierungseinheiten • überschaubare, modulare Softwarestruktur der Automatisierungseinheiten • größere Fehlertoleranz durch verteilte Aufgaben möglich • flexible Erweiterungsmöglichkeiten • günstige Verkabelung mit störungsresistenten Bussystemen 	<ul style="list-style-type: none"> • anspruchsvoller Kommunikationsbedarf zwischen den Automatisierungseinheiten • im Gegensatz zu Strukturen mit zentralen Leitrechnern ist ein erhöhter Aufwand für die Synchronisierung von Automatisierungsprozessen nötig • u. U. erhöhter Aufwand für die Fehlererkennung in dezentralen Strukturen

werden. Eine hierarchische Strukturierung dient auch als Plattform für zukünftige Systeme zur Fahrzeugführungsassistenz [78, 79, 81]. Dabei werden die durch Bedienelemente oder von Assistenzsystemen angeforderten Fahrfunktionen von Power-by-Wire Systemen automatisiert abgearbeitet. Dies vereinfacht die Fahrzeugbedienung und ermöglicht eine Optimierung der Triebstrangführung hinsichtlich Komfort, Effizienz und Dynamik.

Zusätzliche elektrische Komponenten im Antriebsstrang

Zur Verbesserung von Gesamtwirkungsgraden, zur Emissionsreduktion und zur Deckung des steigenden elektrischen Energiebedarfs [118, 119, 120] gewinnen Hybridantriebe [121, 122, 123, 124] und Starter-/Generatorkonzepte [125, 126], Systeme zum Energie- und Antriebsmanagement [127, 128] sowie alternative Antriebe an Bedeutung. Neben den Verbrennungsmotoren und Getrieben ist mit einem vermehrten Einsatz elektrischer Antriebe (auch bei Nkw [128] und mobilen Arbeitsmaschinen [129, 130, 131]), elektrischer Komponenten in Getrieben [132, 133, 134] sowie von Energiespeichern, Wandlern und langfristig auch von Brennstoffzellen zu rechnen.

Steigender Funktionsumfang und Gesamtfahrzeugintegration

Der mit Hilfe elektronischer Systeme koordinierte Funktionsumfang im Bereich Fahrtrieb wird weiter steigen [135]. Beispiele für zukünftige Funktionen mit zunehmend höherer Sicherheitsrelevanz sind Notbrems- oder Stauassistenten [136]. Zur Verbesserung von Dynamik und Traktion werden z. B. Momentenverteilungen zwischen einzelnen Rädern [137] sowie bei Allradantrieben zwischen Vorder- und Hinterachse [138, 139] geregelt. Antriebs- und Fahrdynamiksysteme werden also zunehmend verknüpft [140, 141].

Fazit:

Die Kommunikationssysteme bei Fahrtrieben müssen künftig mehr Daten mit größerer Relevanz bezüglich Funktionalität, Sicherheit und Verfügbarkeit übertragen.

3 Gestaltung der Signalkommunikation für Fahrtriebe

Im Folgenden wird ein Leitfaden zur Gestaltung der Signalkommunikation von Power-by-Wire Antriebssystemen entwickelt. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt in der Kommunikation zwischen Steuer- und Regelgeräten. Im Anschluss an die Vorstellung wichtiger Komponenten folgen Hinweise zum Kommunikationsdesign.

3.1 Komponenten für Steuer- und Regelgerätenetzwerke

3.1.1 Steuer- und Regelgeräte

Bild 3.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau von Steuer- und Regelgeräten für Antriebskomponenten. Eine ECU besteht im Wesentlichen aus einem zentralen Mikrocontroller sowie anforderungsgerechten elektronischen Schaltungen, die Schutz-, Verstärkungs- und Filterfunktionen erfüllen, Leistungen (z. B. PWM-Signale mit wenigen Ampere, diagnosefähig bezüglich Strom und Frequenzen) erzeugen oder die physikalische Kopplung an Bussysteme herstellen. Die elektronischen Elemente sind mobiltauglich, gegen Umwelteinflüsse robust und kompakt in Gehäuse integriert.

Durch den Zugriff auf Schnittstellen für Aktoren, Sensoren und Bussysteme ermöglicht der im Programmspeicher (ROM, EPROM) abgelegte und durch den Mikroprozessor ausgeführte Code die Realisierung umfangreicher Funktionen. Der Datenspeicher (EEPROM) dient zur Ablage von (Regler-)Parametern (die z. B. in adaptiven Verfahren angepasst werden) sowie zum Speichern von Diagnosedaten. Diagnosefunktionen der ECU sowie deren Peripherie werden vom Betriebssystem und Anwendungsfunktionen unterstützt und müssen letztendlich als Bestandteil des Funktionscodes durch Software implementiert werden.

Elektronische Fehler führen zu Teil- oder Totalausfällen einer ECU, zu Fehlinterpretationen oder Fehlfunktionen. Letztere können durch Sicherheitsabfragen oder Redundanzen in Soft- und Hardware sowie durch unterschiedliche Berechnungsmethoden erkannt und beherrscht werden. Zwei sich gegenseitig absichernde Mikrocomputer einer ECU kommunizieren und synchronisieren sich dabei meist über interne serielle Schnittstellen. Hinweise zur Zuverlässigkeit von ECUs und Bauteilen sowie weiterführende Literatur geben [142, 143]. Typische Werte für Ausfallraten von ECUs liegen zwischen $0,4 \dots 1 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$.

Zur Entwicklung des meist in der Programmiersprache C (genormt in ISO IEC 9899) abgebildeten Funktionscodes stehen neben Betriebssystemen, Funktionsbibli-

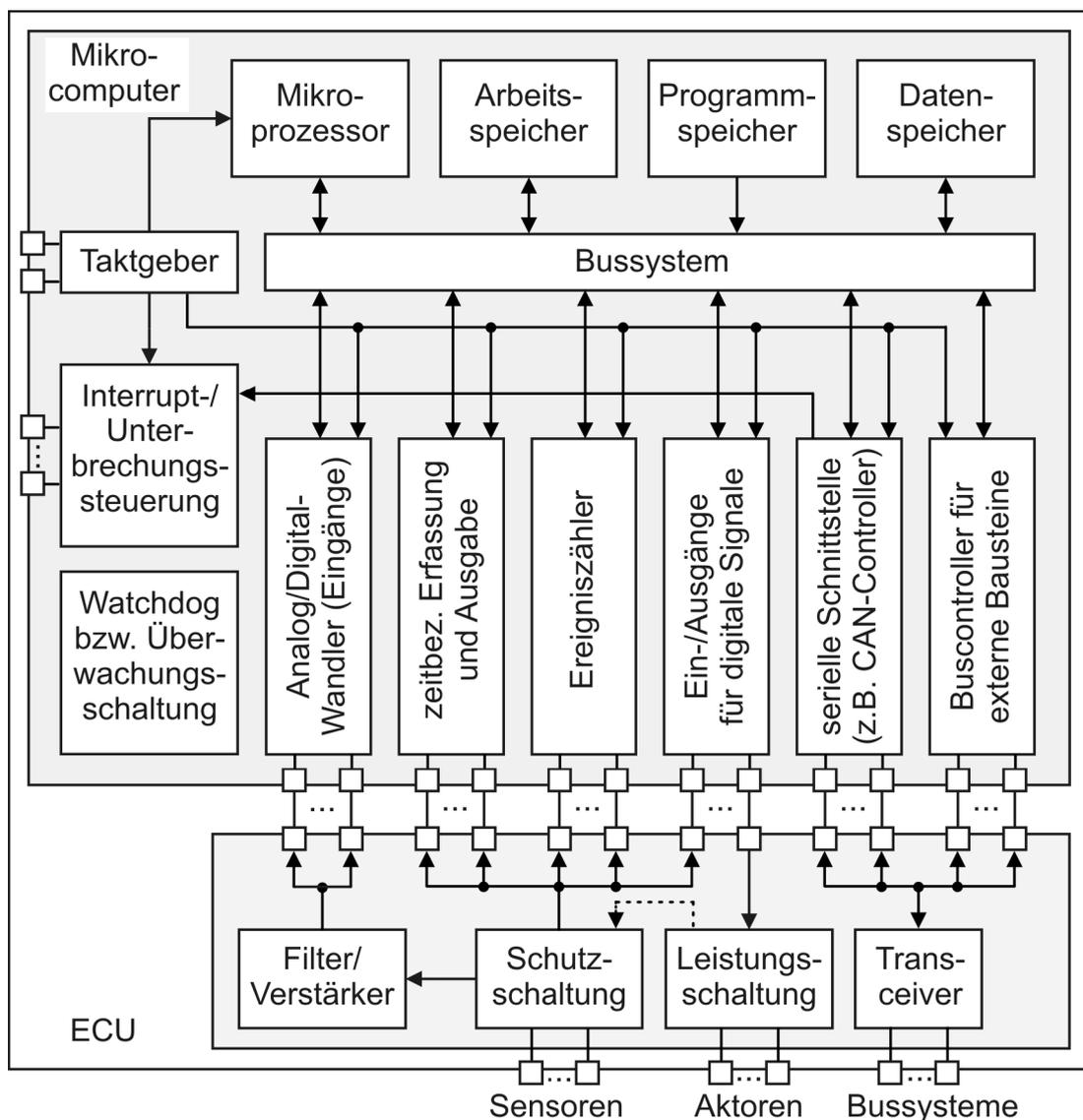


Bild 3.1: Architektur von Steuer- und Regelgeräten für Antriebskomponenten [12, 31].

otheken (Bios) und Entwicklungswerkzeugen (z. B. C-Compiler, Debugger) zunehmend durchgängige, modellbasierte Methoden und Werkzeuge zum Spezifizieren, Entwerfen und Detaillieren, Implementieren (z. B. automatische Codegenerierung [144]) sowie Testen bzw. Validieren zur Verfügung [31, 145].

Bild 3.2 zeigt ein Beispiel für den Ablauf eines zyklischen Funktionscodes. Damit auf einem Prozessor mehrere Tasks (Aufgabeneinheiten) quasi parallel gerechnet werden können, müssen diese zeitlich zugeteilt und sequenziell abgearbeitet werden. Die Aktivierung, Verwaltung, Unterbrechung und Umschaltung von Tasks erfolgt über Echtzeitbetriebssysteme [31, 146]. Im Unterschied zu Nicht-Echtzeitsystemen sind dabei Ausführungszeiten und garantierte Abschlusszeitpunkte von essenzieller Bedeutung [147].

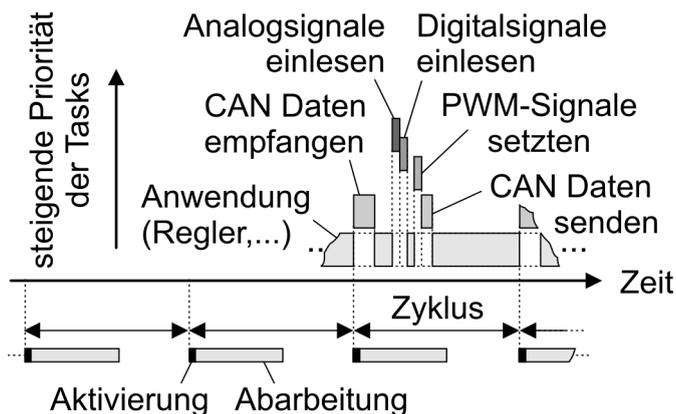


Bild 3.2: Beispiel für den Ablauf eines Funktionscodes: Die Anwendung läuft nach einer nicht dargestellten Initialisierungsphase in einer Endlosschleife. Eine Funktion (z. B. ein Regelzyklus) kann durch zeitgesteuerte Interrupts oder durch CAN-Botschaften gestartet werden. Bei der sequenziellen Abarbeitung wird die Anwendung durch Tasks höherer Priorität unterbrochen.

Neben vielen herstellerspezifischen gewinnen vor allem OSEK-kompatible Betriebssysteme an Bedeutung, **Bild 3.3**. OSEK (Offene Systeme für die Elektronik im Kraftfahrzeug) ist eine 1993 gestartete Standardisierungsoffensive der Automobilindustrie [25]. Ziele sind die Unterstützung von Funktionen für Task-, Kommunikations- und Netzwerkmanagement sowie die Verbesserung von Wiederverwendung und Austausch von Funktionscode.

Das Konsortium AUTOSAR (Automotive Open System Architecture, 2003 an die Öffentlichkeit getreten) bemüht sich ergänzend um die Austauschbarkeit von Applikationen durch Standardisierung von Softwarestrukturen. Die ISO 15504 (SPICE) normiert Software-Qualitätsstandards durch Reifegradbestimmung und Prozessverbesserungen. Einen Überblick über Standardisierungsaktivitäten im Umfeld der Automobilindustrie bietet [115].

OSEK-Betriebssysteme stellen auf einem Prozessor Ablaufumgebungen für Tasks unterschiedlicher Priorität zur Verfügung. Dabei werden eine Interruptebene (höchste Priorität), eine Ebene für Betriebssystemdienste (mittlere Priorität) sowie eine Taskebene für Anwendungssoftware (niedrigste Priorität)

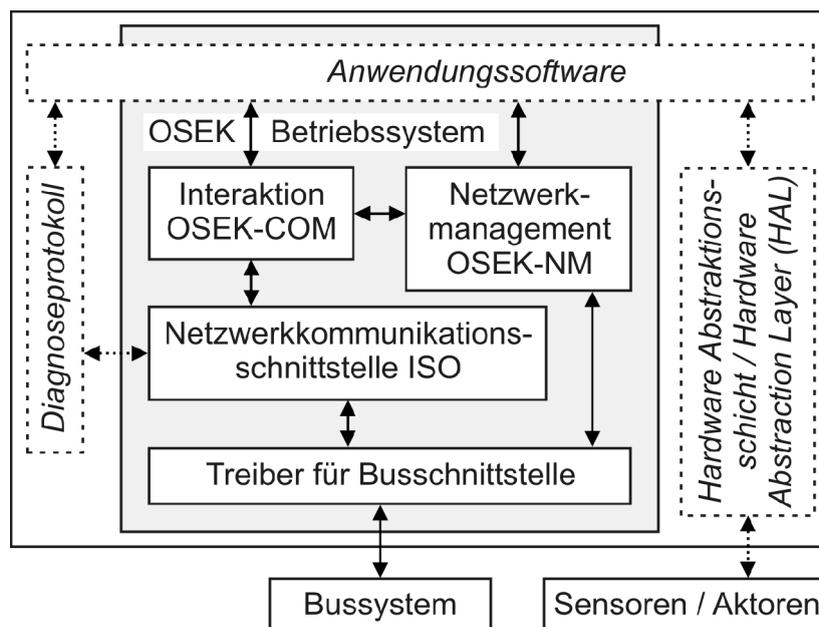


Bild 3.3: OSEK-Betriebssystemarchitektur.

strukturiert. Das Netzwerkmanagement OSEK-NM bietet neben der Unterstützung für (Überwachungs-)Zähler unter anderem einen logischen Ring an. Dabei wird zur Überwachung der Netzwerkteilnehmer ein spezifisches Telegramm (Token) weitergereicht [31]. Weitere Leistungsumfänge sind Überwachungsroutrinen für zyklische Nachrichten sowie Funktionen für den Übergang von Netzwerkteilnehmern in den Ruhestrom-Modus.

Die OSEK-Spezifikationen sollen zukünftig in ISO 17356 standardisiert werden. Neben dem Betriebssystem betrifft dies u. a. Schichten zur Nachrichtenfilterung, zum Netzwerkmanagement in verteilten Systemen sowie zur Datenübertragung.

Durch die OSEKtime-Arbeitsgruppe werden Standards für zeitgesteuerte Netzwerke und sicherheitskritische Anwendungen (z. B. mit fehlertoleranter Kommunikation) erarbeitet und ergänzt [148]. **Bild 3.4** zeigt die OSEKtime-Betriebssystemarchitektur.

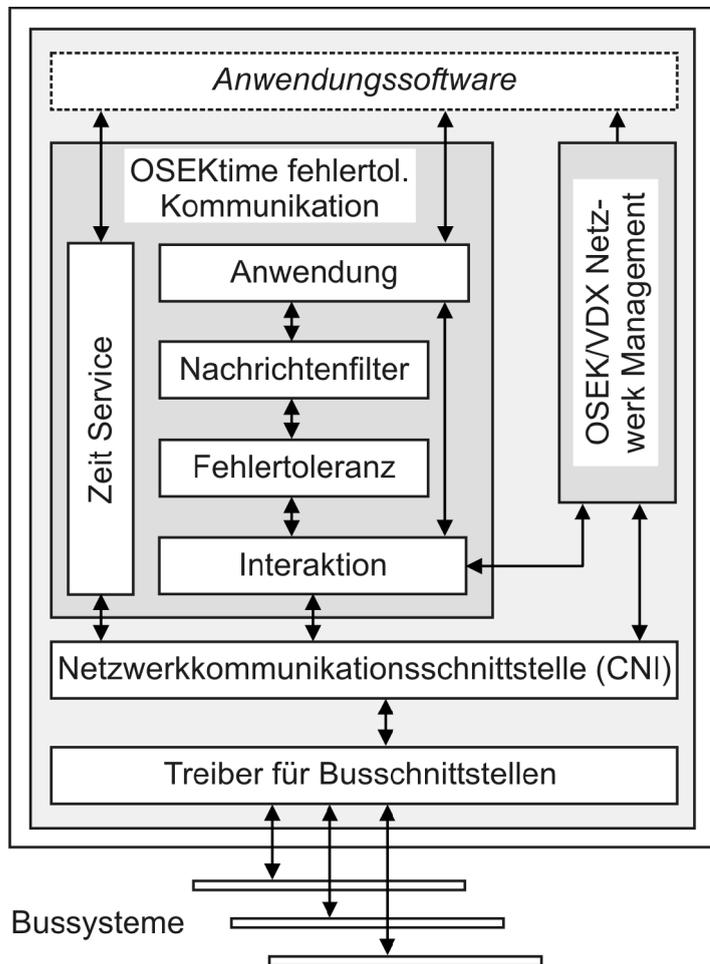


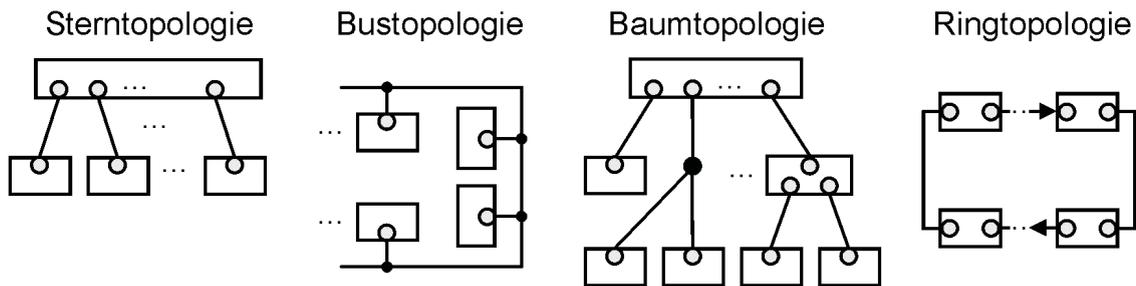
Bild 3.4: OSEKtime-Betriebssystemarchitektur.

3.1.2 Bussysteme

3.1.2.1 Netzwerktopologien

Bild 3.5 zeigt elementare Netzwerktopologien. Für steuer- und regelungstechnische Anwendungen bei Kraftfahrzeugen werden meist Bus- und Baum-, bei Subnetzten zum Teil auch Sterntopologien sowie entsprechende Kombinationen eingesetzt. Ringtopologien sind in diesem Bereich von geringer Bedeutung.

Bild 3.6 zeigt bewertete Anordnungen zur Kommunikation von Sensoren und Aktoren mit Steuer- und Regelgeräten. Für anspruchsvolle Regelungen und Steuerungen erscheinen neben den im Folgenden beschriebenen Bussystemen das



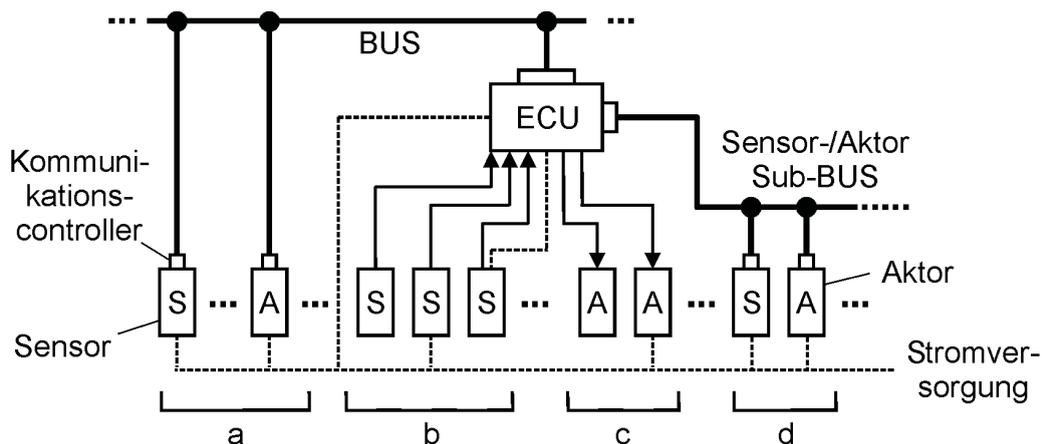
Topologie	Vorteile	Nachteile
Stern	<ul style="list-style-type: none"> flexibel erweiterbar Teilnehmerausfall unkritisch gute elektromagnetische Eigenschaften und Verträglichkeit gute Eignung für optische Medien 	<ul style="list-style-type: none"> viele Verbindungen und Schnittstellen (beim Master) bei großer Gesamtleitungslänge Interkommunikation nur über zentralen Master möglich Zusammenbruch der Kommunikation bei Ausfall des Masters
Bus (Linientopologie)	<ul style="list-style-type: none"> meist einfache Verkabelung günstige Teilnehmerankopplung Ausfall oder Abschalten von Teilnehmern bei Bus mit Stichleitungen meist unkritisch großer Gestaltungsspielraum für beliebige logische Strukturen multimasterfähig 	<ul style="list-style-type: none"> begrenzte Buslänge Buszugriffsregelung und Teilnehmererkennung erforderlich bei elektrischem Medium meist Busabschlüsse erforderlich erhöhter Aufwand bei optischen Medien
Baum	<ul style="list-style-type: none"> gut auf Anwendungsfall anpassbar (beliebige aktive oder passive Verzweigungen) gut mit anderen Topologien kombinierbar Teilnehmerausfall unkritisch 	<ul style="list-style-type: none"> hohe Kosten bei aktiven Verzweigungselementen
Ring	<ul style="list-style-type: none"> zur Realisierung ausgedehnter Netzwerke gut geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> Zusammenbruch der Kommunikation bei Teilnehmerausfall

Bild 3.5: Elementare Netzwerktopologien.

Sensor-Aktor-Bussysteme TTP/A [15], für kostengünstigere Lösungen LIN sowie Single-Wire-CAN geeignet.

3.1.2.2 Vergleich von Bussystemen zur Vernetzung von ECUs

Zur Vernetzung von ECUs für Systeme der Längs-, Quer- und Vertikaldynamik gewinnen neben dem ereignisgesteuerten und stark etabliertem CAN die zeitgesteuerten Bussysteme TTCAN, FlexRay und TTP an Bedeutung [149]. **Tabelle 3.1** vergleicht Kriterien von ereignis- und zeitgesteuerten Bussystemen. In **Tabelle 3.2** sind wichtige Merkmale von CAN, TTCAN, FlexRay und TTP zusammengefasst.



Fall	Kommunikationsverhalten	Aufwand und Auswirkungen
a	zuverlässige und störsichere digitale Übertragung über ein Feldbussystem (z. B. CAN, TTCAN, FlexRay, TTP); begrenzte Datenraten (max. übliche Raten bei CAN bis zu 100 Hz, bei speziellen Lösungen oder zukünftigen Bussystemen auch höhere Raten)	Controller an Sensoren und Aktoren notwendig; Entlastung von ECUs durch dezentrale Intelligenz; v. a. für verteilte Systeme des Gesamtfahrzeugs geeignet (z. B. Bremsanlage); je nach Bussystem ist die Teilnehmeranzahl begrenzt; optimal zur netzwerkweiten Datenglobalisierung
b	schnelle, analoge Datenübertragung; stör anfällig	Aufbereitung, Auswertung und Diagnose des Sensorsignals durch ECU
c	schnelle, analoge Datenübertragung; stör anfällig	Ansteuerung von Aktoren durch diagnosefähige Ausgänge der ECU
d	siehe Fall a, u. U. ist der Einsatz eines leistungsfähigen Sensor/-Aktor-Bussystems sinnvoll (z. B. TTP/A); gegebenenfalls sind auch LIN oder Single-Wire-CAN geeignet	siehe Fall a, jedoch ungünstig zur Globalisierung von Daten im Netzwerk

Bild 3.6: Anordnungen von Sensoren (S) und Aktoren (A) in verteilten Systemen.

Tabelle 3.1: Vergleich von Zeit- und ereignisgesteuerten Bussystemen, siehe auch [15].

Kriterium	Zeitsteuerung	Ereignissteuerung
Buszugriff	statisch, z. T. dynamische Emulation möglich	dynamisch
Busauslastung	gut bei periodischen Daten	bedarfsgerecht
Realzeitnachweis	einfach	aufwendig
Laufzeitsystem	einfache Listensteuerung	komplexes Betriebssystem
Synchronisierung	einfach, exakt	kompliziert, ungenauer
Flexibilität	niedrig	hoch

3 Gestaltung der Signalkommunikation für Fahrtriebe

Table 3.2: Eigenschaften von Bussystemen für Regel- und Assistenzsysteme der Längs-, Quer- und Vertikaldynamik mit Bedeutung im europäischen bzw. amerikanischen Markt.

	CAN (High-Speed)	TTCAN	FlexRay	TTP
Buszugriffs- verfahren	CSMA/CA	TDMA, Fenster für CSMA/CA	TDMA sowie dynamisches Segment	TDMA, dyn. Segm. teilw. emulierbar
Zeitverhalten	ereignisge- steuert, sehr komplex	im TDMA- Segment de- terministisch	im TDMA- Segment de- terministisch	determi- nistisch
max. Datenrate	1 MBit/s	1 MBit/s	10 MBit/s	5...25 MBit/s*
Nutzbyte je Botschaft	0 – 8	0 – 8	0 – 254	0 – 240
Buslast	< 30 % an- streben, max. 58% möglich	höher als bei CAN	max. 70 % (theor. 95 %)	60 – 80 % (theor. > 90)
max. Knotenanzahl (ohne spezielle Vor- kehrungen)	30	30	64 bzw. 22 bei Linien- topo- logie	> 64, physik. begrenzt
Protokollunterstüt- zung f. Redundanz	nein	nein	für 2 (misch- bare) Kanäle	für 2 Kanäle
Bitfehler- erkennung**	durch Sender, Empfänger, Teilnehmer	durch Sender, Empfänger, Teilnehmer	durch aktiven Stern am Bus	durch Sender, Empfänger, Teilnehmer
CRC Feld***	16 Bit	16 Bit	24 Bit	16 Bit
Fehlereingrenzung	teilweise ge- währleistet	teilweise ge- währleistet	gut unterstützt	gewährleistet
"babbling idiot" Vermeidung****	nicht unter- stützt	nicht unter- stützt	unterstützt	unterstützt
Regler- und Uhren- synchronisierung, globale Zeit	nicht unter- stützt	unterstützt	präzise, fehlertolerant	präzise, fehlertolerant
Erweiterbarkeit	sehr gut	gut	möglich, rela- tiv flexibel	möglich, schwierig
Flexibilität	sehr hoch	hoch	hoch	niedrig
Verfügbarkeit von Komponenten	sehr hoch	niedrig	noch niedrig	niedrig
Emulation von CAN bzw. Nutzung von CAN-Erfahrungen	-	unterstützt	nicht unter- stützt	möglich

* bis zu 25 MBit/s nur im synchronen Modus

** die Hamming-Distanz beträgt bei FlexRay und TTP 6 (d. h. bis zu 5 Bitfehler pro Nachricht können erkannt werden), bei CAN/TTCAN in ungünstigen Fällen 2

*** bei FlexRay zusätzliches 11-Bit CRC-Feld für das Header-Segment

**** Belegung oder Blockade des Bussystems durch einen defekten Teilnehmer

3.1.2.3 Controller Area Network (CAN)

Bild 3.7 zeigt die für High-Speed-CAN [23, 24] spezifizierte Busphysik. Bits werden mit einer Datenrate von 125 kBit/s bis 1 MBit/s symmetrisch durch differenzielle Spannung auf Zweidrahtleitungen übertragen. Praktisch werden aufgrund der erhöhten elektromagnetischen Verträglichkeit überwiegend nur Datenraten bis 500 kBit/s ausgeschöpft.

Netzwerke werden mit 2 bis 30 Knoten (bei speziellen Schnittstellen sind auch mehr Knoten möglich) in Linientopologie mit begrenzten Stichleitungslängen (< 30 cm bei 1 MBit/s) und Wellenabschlusswiderständen ausgeführt. Die maximalen Leitungslängen betragen bei 1 MBit/s 40 m bzw. bei 500 kBit/s 110 m.

Optische Busmedien, bei denen neben den Vorteilen einer emissions- und immissionsfreien Übertragung mit entsprechenden Koppeln auch Sterntopologien realisiert werden können, sind im Fahrzeugbau vor allem aus Kostengründen sowie einer dabei in Kauf zu nehmenden Begrenzung der möglichen Teilnehmer nicht verbreitet.

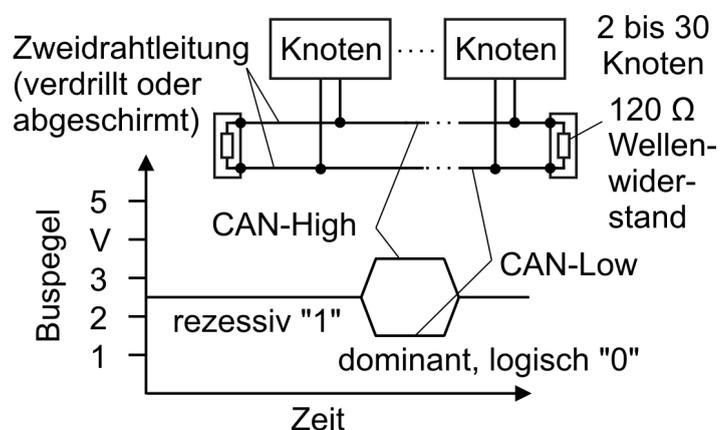


Bild 3.7: Busphysik und symmetrisch differenzielle Signalübertragung bei High-Speed-CAN (0,125 – 1 MBit/s).

Als Nachrichtenformate sind Daten- sowie Datenanforderungs-, Fehler- und Überlasttelegramme spezifiziert. **Bild 3.8** zeigt den Aufbau eines Datentelegramms bzw. einer CAN-Standard-Botschaft mit 11-Bit-Identifizier. Ist der Bus im Ruhezustand (mindestens 11 Bit mit rezessivem Pegel), so werden alle Teilnehmer auf das erste Start-of-Frame-Bit eines sendewilligen Knotens synchronisiert. Um eine Kollision

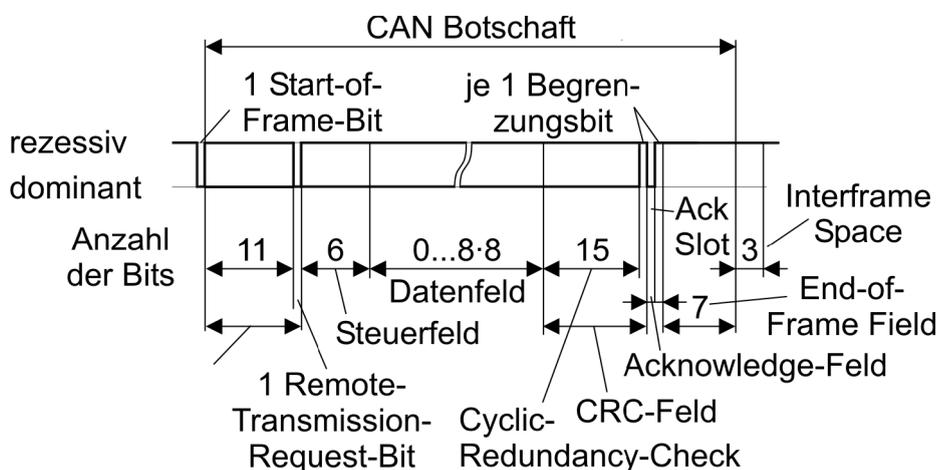


Bild 3.8: Nachrichtenformat einer Standard CAN-Botschaft mit 11-Bit-Identifizier. Bei 5 Bits gleicher Polarität werden maximal 19 zusätzliche Stuff-Bits eingefügt.

von Nachrichten zu verhindern, wird der multiple Buszugriff durch die anschließende Arbitrierung geregelt (CSMA/CA, Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance). Dabei setzt sich bei gleichzeitigen Sendeversuchen mehrerer Teilnehmer die Botschaft mit der höchsten Identifier-Priorität (der kleinste Zahlenwert hat den größten Anteil an dominanten Bit-Pegeln) durch. Teilnehmer niedrigerer Priorität brechen den Buszugriffsversuch bis zur nächsten Ruhepause ab.

Im erweiterten Format (Extended Format) ist der Identifier 29 Bit lang. Dadurch können mehr Telegramme dargestellt werden (2^{29} statt 2^{11}). Dies führt jedoch auch zu längeren Telegrammlaufzeiten sowie zu einer erhöhten Buslast.

Dem Steuerfeld mit Informationen zum Umfang des Datenfelds (bis zu 8 Byte) folgt eine 15-Bit-Prüfsequenz (CRC-Feld). Erhält der Sender die fehlerfreie Empfangsbestätigung durch einen dominanten Pegel im ACK-Slot (Acknowledgement), so wird die Nachricht als von ihm korrekt versandt interpretiert und nach dem Ende des sechsten Bits im End-of-Frame-Field vom Empfänger übernommen.

Da aufgrund des Nachrichtenformats der effektive Nutzungsgrad stark von der Länge des Datenfeldes abhängt, sollten generell möglichst viele Daten in wenigen Telegrammen zusammengefasst werden, **Bild 3.9**.

Der Arbitrierungsvorgang bzw. der priorisierte Buszugriff ermöglicht optimale ereignisgesteuerte Kommunikation, führt jedoch zu einem komplexen und schwer vorhersagbaren Zeitverhalten in CAN-Netzwerken. Daher sind Reserven freizuhalten (u. a. zur Fehlerkompensation bzw. Nachrichtenwiederholung) und niedrige Buslasten von unter 30 % anzustreben. Bei der Definition von Identifiern sind die unter Umständen langen Latenzzeiten für Nachrichten niedriger Priorität zu berücksichtigen.

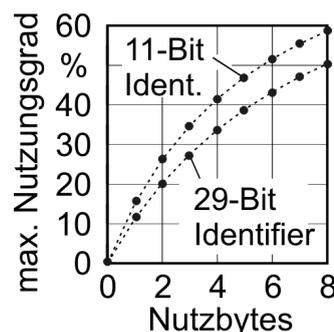


Bild 3.9: Maximaler Nutzungsgrad von CAN-Botschaften (übertragene Nutzdaten bezogen auf Botschaftslänge).

Möglichkeiten zur analytischen Bestimmung des Echtzeitverhalten sowie von Latenzzeiten in CAN-Netzwerken sind in [150] ausgeführt. Letztendlich empfiehlt es sich, das Übertragungsverhalten konfigurierter CAN-Netzwerke in Echtzeitsimulationen sowie in Versuchen abzubilden und durch das reale Systemverhalten abzusichern.

Zur Gewährleistung einer sicheren Datenübertragung sowie zur Fehlererkennung, -eingrenzung und -behandlung stehen im CAN-Protokoll fünf Fehlererkennungsmechanismen zur Verfügung, **Tabelle 3.3**. Erkennt ein Teilnehmer einen Fehler, globalisiert er diesen durch Aufschalten von sechs dominanten Bits (Fehlerflag). Dies führt zum Sendeabbruch und gegebenenfalls zur Empfangsverwerfung einer Nachricht. Ein Fehlerflag verletzt die Bitstuff-Codierungsregel und verursacht dadurch weitere Fehlerflags anderer Netzteilnehmer.

Tabelle 3.3: Fehlererkennungsmechanismen des CAN-Protokolls.

Mechanismus	Funktion und Beschreibung
Bit-Überwachung (Bit Monitoring)	Ein sendender Knoten erkennt lokal wirkende Fehler durch Überwachung des von ihm angelegten Buspegels. Bei Abweichungen vom Sollpegel wird dies als Bitfehler gewertet. Bitmonitoring durch den Sender ist im Arbitrierungsfeld sowie im Acknowledgement-Slot inaktiv.
Überprüfung des Telegrammformats (Message Frame Check)	Alle Teilnehmer überwachen definierte Elemente von Nachrichten wie z. B. rezessive Begrenzungsbits. Bei unzulässigen Werten liegt ein Formatfehler (Form Error) vor.
Überwachung der Bitcodierregel (Bitstuffing)	Bei CAN herrscht während einer Bitzeit konstanter Signalpegel. Um in einem Netzwerk ausreichend Flanken für Synchronisierungen zur Verfügung zu stellen, wird von Beginn einer CAN-Botschaft bis zum ersten Begrenzungsbit die Bitstuffing-Codierungsregel angewandt. Dabei wird nach einer Folge von fünf gleichwertigen Bits durch den Sender ein komplementäres hinzugefügt und von den Empfängern wieder entfernt. Eine Verletzung dieser Regel kann von allen Teilnehmern als Bitstuff-Fehler erkannt werden.
Zyklische Blockprüfung (Cyclic Redundancy Check)	Die zyklische Blockprüfung ist ein Sicherungsverfahren, bei dem der Rest einer Modulo-2-Division des Bitstrom vom Start-of-Frame bis einschließlich Datenfeld (ohne die Berücksichtigung von Stuff-Bits) durch ein definiertes Polynom als Prüfsequenz übertragen wird. Bei fehlerfreier Übertragung müssen die empfangenen, vom Sender berechneten CRC-Daten mit hoher Wahrscheinlichkeit den im Empfänger kalkulierten entsprechen. Dieser Fehlererkennungsmechanismus ergänzt die Überwachung von Bits durch den Sender und ermöglicht eine Fehlereingrenzung.
Überwachung der Empfangsbestätigung (Acknowledgement)	Ein dominantes Bit im ACK-Slot signalisiert einem Sender den erfolgreichen Empfang durch einen anderen Knoten. Ein rezessives Bit wird als Sendefehler interpretiert.

Jeder Teilnehmer setzt nach dem Senden des Fehlerflags ein rezessives Bit und wartet einen rezessiven Buspegel ab. Sobald dieses Eintritt, werden weitere 7 rezessive Bits aufgeschaltet. Dieser Mechanismus ermöglicht die Eingrenzung defekter Knoten, da ein Teilnehmer analysieren kann, ob er einen Fehler als erster erkannt hat. Die 6 bis 12 Bit lange Überlagerung von Fehlerflags, gefolgt von einer 8 Bit langen Telegrammendekennung, bilden ein Fehlertelegramm (Error Frame). Sobald der Bus wieder im Ruhezustand ist, erfolgt ein erneuter Übertragungsversuch abgebrochener oder nicht korrekt gesendeten Nachrichten.

Damit defekte Teilnehmer ein Netzwerk nicht dauerhaft blockieren, wird in allen Knoten ein Empfangs- und Sendefehlerzähler geführt, **Bild 3.10**. Diese Zähler werden nach Fehlerart gewichtet um den Wert 1 oder 8 erhöht und nach erfolgreichen Kommunikationsvorgängen um den Wert 1 gesenkt.

Bei Werten über 127 geht der Teilnehmer in den fehlerpassiven Zustand. Er ist damit noch verzögert kommunikationsfähig (Einschränkung: 8 Bit Pause bei Sendewiederholung), sendet im Fall einer Fehlererkennung jedoch nur passive Fehlerflags und kann damit keine Nachrichten mehr unterbrechen. Bei weiteren Fehlern geht der Teilnehmer vom Bus (Bus-Off). Aus diesem Zustand kann er nur durch ein Reset, eine Neukonfiguration und durch erfolgreiches Empfangen von 128 mal 11 rezessiven Bits wieder in den fehleraktiven Modus zurückkehren (Bus-Off-Recovery).

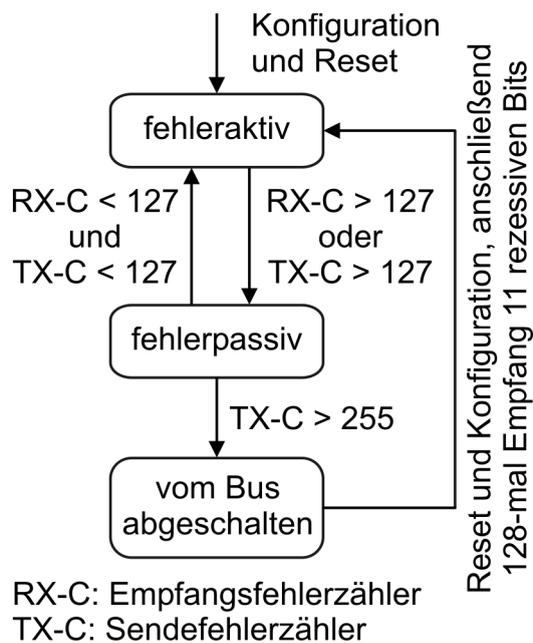


Bild 3.10: Zustände und Fehlerzähler eines CAN-Knotens.

Die Kombination der Fehlererkennungsmechanismen macht die Entdeckung von Übertragungsfehlern sehr wahrscheinlich. **Bild 3.11** zeigt exemplarisch für die in [151] untersuchten Beispiele Restfehlerwahrscheinlichkeiten in CAN-Netzwerken über der leitungsabhängigen Bitfehlerrate. Weitere Untersuchungen zum Fehlererkennungsverhalten von CAN wurden in [152] veröffentlicht. Allgemein kann die maximale Restfehlerwahrscheinlichkeit $P_{CAN,Rest}$ für Netzwerke mit 10 Knoten nach [151] wie folgt berechnet werden:

11-Bit-Identifizier: $P_{CAN,Rest} \approx 4,7 \cdot 10^{11}$ Nachrichten Fehlerrate
 29-Bit-Identifizier: $P_{CAN,Rest} \approx 7,2 \cdot 10^9$ Nachrichten Fehlerrate

Neben unentdeckten Fehlern können weitere Beeinträchtigungen oder Fehlfunktionen durch Kontaktprobleme, Bauteildefekte u. ä. auftreten. Im Extremfall kann ein Hardwaredefekt das CAN-Netzwerk destabilisieren (Linientopologie) bzw. einen kompletten Ausfall herbeiführen.

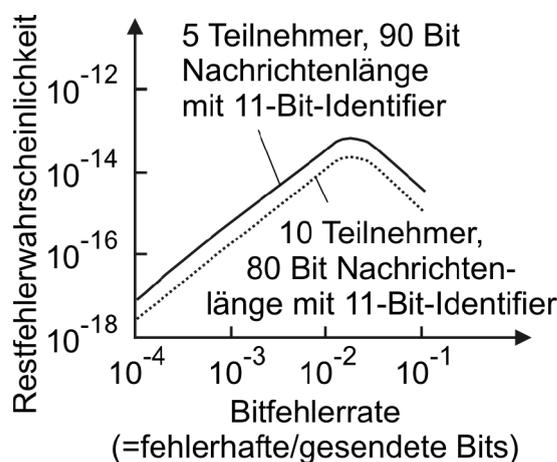


Bild 3.11: Repräsentative Verläufe der Restfehlerwahrscheinlichkeit in CAN-Netzwerken über der netzwerk- und leitungsabhängigen Bitfehlerrate nach [151].

Fehlertolerante Übertragungsverfahren (z. B. Eindrahtkommunikation als Rückfallebene) sind nur im Low-Speed Bereich möglich bzw. verfügbar [24, 153].

Die Standardisierung von CAN in ISO 11898 hat zu einer großen Verbreitung und hohen Bauteilverfügbarkeit geführt. Auf vielen für Steuer- und Regelsysteme in Fahrzeugen konzipierten Mikrocontrollern sind CAN-Controller integriert. Der in **Bild 3.12** dargestellte Full-CAN-Controller übernimmt Kommunikationsaufgaben, stellt 14 Nachrichtenpuffer sowie ein Register mit Statusinformationen (z. B. zu Fehlererkennungsmechanismen, Sende-/Empfangsstatus) zur Verfügung und entlastet damit den Prozessor der ECU. Die Funktionen des Full-CAN-Controllers sind über das Prozessor-Bios verfügbar und können z. B. für Überwachungen und Diagnosen in die Programmierung des Funktionscodes eingebunden werden.

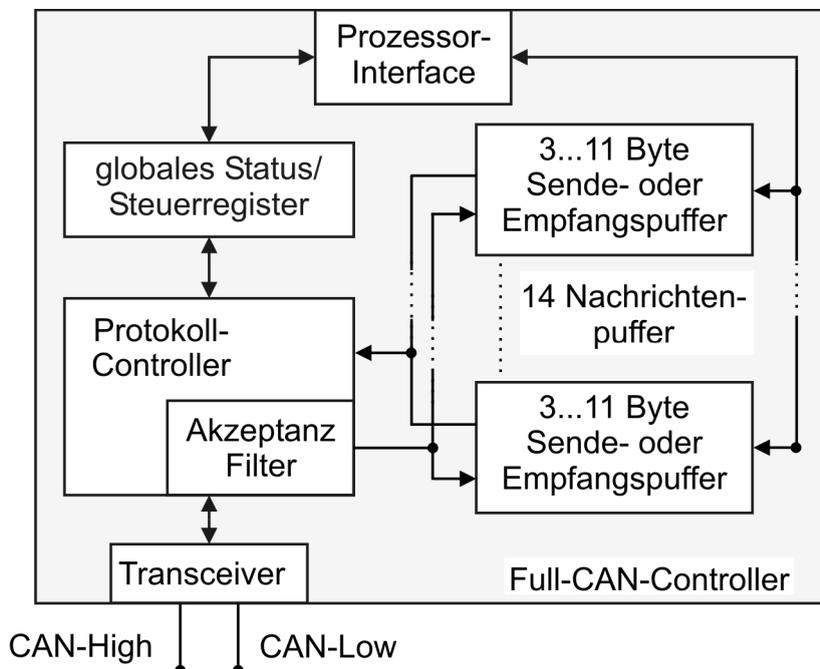


Bild 3.12: Full-CAN-Controller mit Akzeptanzfilterung und 14 Puffern für Empfangs- und Sendedaten, in denen zur Entlastung des Prozessors schnell eintreffende Nachrichten abgelegt werden. Im Statusregister werden zur Überwachung nutzbare Codes von Kommunikationsfunktionen sowie Fehlererkennungsmechanismen gesetzt.

3.1.2.4 Time Triggered CAN (TTCAN)

Time Triggered CAN ist die zeitgesteuerte Weiterentwicklung des ereignisgesteuerten CAN und wird als Teil 4 in ISO 11898 eingebunden [22, 24, 26, 154]. TTCAN wurde für das bei sicherheitskritischen Systemen geforderte deterministische Zeitverhalten konzipiert. Die Busphysik sowie der Telegrammaufbau sind voll kompatibel zum konventionellen High-Speed-CAN. Auf TTCAN-Controllern wird jedoch zusätzliche Hardware für die Zeit- und Ablaufsteuerung aufgesetzt.

Bild 3.13 zeigt die Systemmatrix mit einem exemplarischen Kommunikationsablauf in einem TTCAN-Netzwerk. Eine vom einem Netzwerkmaster entweder periodisch oder auf Ereignisse getriggerte Referenzbotschaft (z. B. ein Drehzahlsignal) initialisiert einen Basiszyklus. In einem Netzwerk mit TTCAN-Modus der Stufe 1 syn-

chronisieren sich die mit jeweils zwei Uhren ausgerüsteten Knoten auf den Empfang der durch den Identifier gekennzeichneten Referenzbotschaft. Diese enthält 1 Byte mit Steuerdaten, wodurch bei Bedarf bis zu 7 Byte für anwendungsspezifische Nutzdaten möglich sind.

In einem Netzwerk mit TTCAN-Modus der Stufe 2 stellt die Referenzbotschaft in 4 Bytes Steuerinformationen sowie eine globale Zeit zur Verfügung. Diese dient u. a. zur Korrektur von Abweichungen der lokalen Netzknottenuhren und ermöglicht Synchronisie-

rungsgenauigkeiten von bis zu einer Bitzeit (1 s bei 1 MBit/s). Leider sinkt damit auch der Umfang der mit dieser Botschaft übertragbaren Nutzdaten auf maximal 4 Byte.

TTCAN Nachrichten werden in Zeitfenstern gesendet (Time Division Multiple Access/TDMA), deren Einteilung sowie Zuweisung mit der Systemmatrix entwickelt wird. Durch die mit der Referenznachricht empfangenen Steuerinformationen des Zeitmasters und den in den Netzwerkteilnehmern abgelegten relevanten Zeitfensterdaten können die unterschiedlich gestalteten Basiszyklen (bis zu 8) abgearbeitet und der Ablauf lokal überwacht werden.

Damit bei Ausfall eines Zeitmasters die Funktion des Netzwerks erhalten werden kann, ist der Einsatz mehrere Zeitmaster möglich. Beim konkurrierenden Zugriff entscheidet die Arbitrierung bzw. die Priorität des Identifiers. Wurde eine Referenzbotschaft zweimal erhalten, so sind die Teilnehmer auf diese Botschaft synchronisiert. In exklusiven Zeitfenstern kann nur ein Knoten seine Nachricht senden. In Arbitrierungsfenstern kann ereignisgesteuerter CAN-Datenverkehr abgewickelt werden, der jedoch mit Ablauf des Zeitfensters abgebrochen wird. Dieser Abbruch ist bei zwei aufeinander folgenden und dabei verschmelzenden Arbitrierungsfenstern unwirksam. Die bei CAN angewandte Sendewiederholung nach Fehlern ist bei TTCAN innerhalb von Zeitfenstern deaktiviert. Ein relativ sicheres Senden einer Nachricht kann jedoch ge-



Bild 3.13: Systemmatrix mit beispielhafter Zeitfenstereinteilung für vier Basiszyklen: Teilnehmer synchronisieren jeden Zyklus auf die initialisierenden Referenzbotschaften. Während exklusive Zeitfenster für bestimmte Botschaften reserviert sind, gilt in Arbitrierungsfenstern das bewährte CAN-Protokoll mit ereignisgesteuerter Kommunikation.

währleistet werden, wenn entsprechende exklusive Zeitfenster reserviert oder ausreichend lange bzw. viele Arbitrierungsfenster eingefügt werden. Mehrfaches Senden einer Botschaft innerhalb eines sowie in jedem vielfachen eines Basiszyklus ist möglich.

TTCAN ermöglicht eine relativ freie Festlegung des zeit- und ereignisgesteuerten Kommunikationsanteils, höhere Buslasten als CAN sowie einen sanften Übergang bestehender CAN-Netzwerke zu zeitgesteuerten Architekturen. Durch die hohe Kompatibilität zu CAN kann auf bestehendes Fachwissen, Entwicklungswerkzeuge und bewährte Komponenten aufgebaut werden.

3.1.2.5 FlexRay

Mit FlexRay [30, 155] entsteht ein zeitgesteuertes Bussystem für innovative mobile Anwendungen, das leistungsfähige Datenübertragung bei hoher Zuverlässigkeit ermöglicht. Da die Entwicklung von FlexRay von einem Konsortium bedeutender Automobilhersteller getragen wird, sind die Erwartungen an eine weitreichende Standardisierung, eine zukünftige breite Anwendung sowie die Verfügbarkeit kostengünstiger Hardware hoch.

Bis jetzt sind erste Komponenten, Entwicklungswerkzeuge und Spezifikationen (seit Sommer 2004 [156]) verfügbar. Das unter der Führung von BMW entwickelte und seit 2001 im Serieneinsatz befindliche byteflight [105] kann als Vorstufe von FlexRay betrachtet werden. Für byteflight ist daher ein Kompatibilitätsmodus vorgesehen. Die folgenden Ausführungen beschreiben den Stand der Entwicklungen im Sommer 2004.

FlexRay ermöglicht Netzwerke in Linien-, Stern- oder Mischtopologien und bietet die Unterstützung für einen zweiten, redundanten Kanal. **Bild 3.14** zeigt ein Netzwerk in passiver Linien-, **Bild 3.15** in aktiver Sterntopologie. Gemischte Kombinationen sind möglich. Bei Linientopologien müssen Einschränkungen bezüglich der Übertragungsraten hingenommen werden. Darüber hinaus sind auch passive Sterntopologien oder Punkt-zu-Punkt-Verbindungen realisierbar.

An einem Kanal können bis zu 64 Teilnehmer vernetzt werden, bei Linientopologie maximal 22 Knoten. Hohe Übertragungsraten von 2,5 bis 10 MBit/s werden vor allem durch die reflexionsrobusten Verbindungen und ein spezielles Terminie-

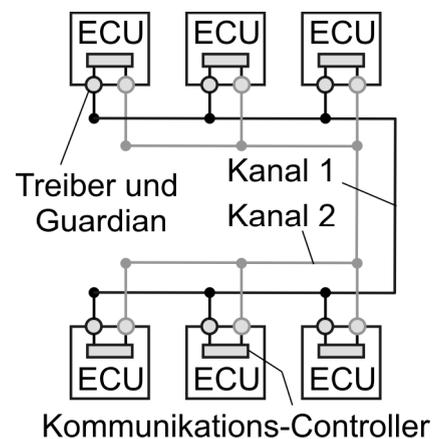


Bild 3.14: FlexRay-Netzwerk mit Linientopologie und (optional) redundantem Kanal. Das passive Busmedium hat gegenüber der Sterntopologie Kostenvorteile. Stichleitungslängen und Teilnehmeranzahl sowie die maximalen Datenraten sind wegen Reflexionen begrenzt.

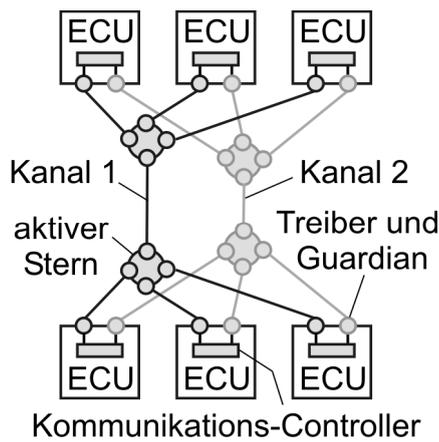


Bild 3.15: FlexRay-Netzwerk mit aktiver Sterntopologie und redundantem Kanal (optional). Hier sind hohe Datenraten bei guter Fehlereingrenzung und -toleranz erreichbar. Defekte Teilnehmer können durch den aktiven Stern vom Bus getrennt werden. Die Anordnung ist jedoch kostenintensiv. Vielfältige Erweiterungen (z. B. Kaskadierungen) sind möglich. Botschaften dürfen jedoch maximal zwei aktive Sterne durchlaufen. An die Sterne können in begrenztem Umfang und beschränkter Länge auch Subsysteme mit Linientopologie angeschlossen werden.

rungskonzept erreicht. Neben guten elektromagnetischen Eigenschaften und hoher Flexibilität in der Erweiterung bieten Sterne wirksame Möglichkeiten zur Fehlereingrenzung und -behandlung (z. B. Abschalten defekter Teilnehmer).

Als Busmedien sind neben bewährten elektrischen Zweidraht- oder Schirmleitungen auch aktive Sternkoppler sowie optische Medien konzipiert. Die maximalen Leitungslängen je aktivem Stern bzw. bei Linientopologie betragen gegenwärtig 24 m. **Bild 3.16** zeigt die Pegel für die Bitcodierung bei elektrischem Busmedium.

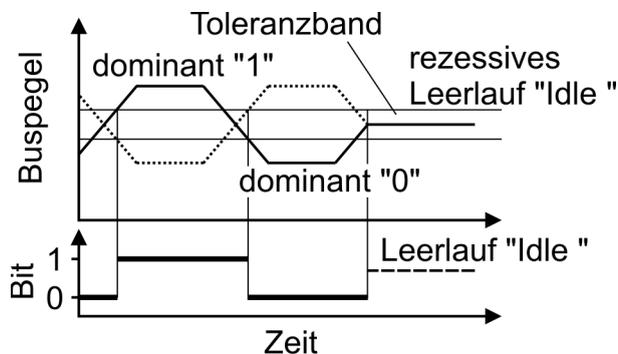


Bild 3.16: Bitdarstellung bei elektrischem Medium. Aufgrund des Terminierungskonzepts variieren die Absolutwerte der Spannungsdifferenz in Abhängigkeit von der Messstelle im Netzwerk (Größenordnung voraussichtlich zwischen 600 und 3000 mV).

Bild 3.17 illustriert den Aufbau einer FlexRay-Botschaft. Einem für Erweiterungen reservierten Bit folgen vier Bits mit Indikatoren. Bei Botschaften, die im statischen Segment gesendet werden, signalisiert ein gesetzter Payload Preamble Indicator die Übermittlung eines Vektors für Netzwerkmanagementfunktionen (zur Zeit als Option reserviert). Bei Botschaften, die im dynamischen Segment gesendet werden, wird durch einen gesetzten Indikator die Übermittlung eines zusätzlichen Nachrichten-Identifiers angekündigt.

Ein markiertes Null Frame Indicator Bit signalisiert, dass mit dem Sendevorgang gültige Daten übermittelt werden sollen. Andernfalls werden für alle mit der Botschaft eintreffenden Nutzdaten die Werte Null interpretiert. Ein gesetzter Sync Frame Indicator bestimmt gegebenenfalls die Verwendung der Nachricht zur Uhrensynchronisation

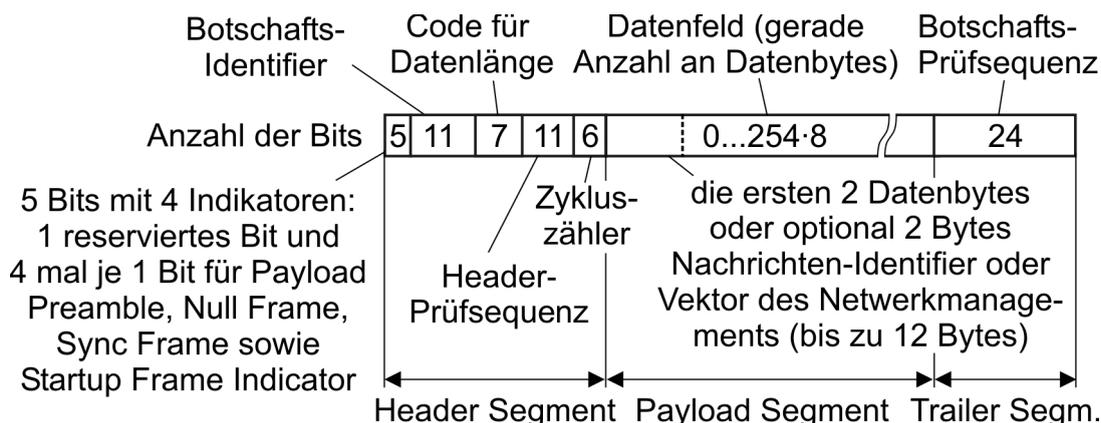


Bild 3.17: Format einer FlexRay-Botschaft.

(siehe unten). Ist zusätzlich zum Sync Frame (Synchronisierungsbit) der Startup Frame Indicator markiert, nimmt die Botschaft am Hochlaufmechanismus des Netzwerks teil bzw. aktiviert diesen.

Mit dem Identifizierfeld können bis zu 2047 Botschaften (ID 0 ist nicht zulässig) differenziert werden. Der doppelte Wert eines 7-Bit Codes informiert über die Anzahl der mit der Botschaft übertragenen Nutzbytes. Codes mit Werten über 127 werden als Fehler gewertet. Die Header-Prüfsequenz sichert mit einem zyklischen Blockprüfverfahren die Datenkonsistenz von Sync und Startup Frame Indicator, des Botschaftsidentifiziers sowie des Datenlängencodes ab.

Ein 6-Bit Code übermittelt die aktuelle Zyklusnummer aus Sicht einer sendenden ECU. Die Zyklusnummer kann für Überwachungsmechanismen, serielle Prüfübertragungen oder für Synchronisierungen mit Vielfachen der Kommunikationszyklen herangezogen werden. Im Datenfeld ist unter anderem die optionale Verwendung der ersten zwei Datenbytes als zusätzlicher Identifizier möglich (siehe oben). Weitere Daten für Netzwerkmanagementfunktionen sind vorgesehen. Die 24-Bit Botschaftsprüfsequenz sichert mit einem zyklischen Blockprüfverfahren die Konsistenz des Header und Payload Segments ab.

Bild 3.18 stellt den Nutzungsgrad für FlexRay Botschaften dar, der bei großem Payload Segment über 90 % betragen kann. Maximal mögliche Buslasten liegen über 50 %, in speziellen Fällen sind über 80 % möglich.

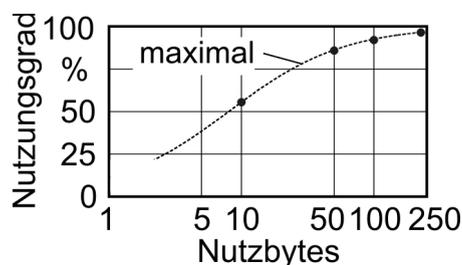


Bild 3.18: Maximaler theoretischer Nutzungsgrad von FlexRay-Botschaften (übertragene Nutzdaten bezogen auf Botschaftslänge).

Der Nachrichtenverkehr erfolgt zeitgesteuert in Kommunikationszyklen, **Bild 3.19**. Ein Kommunikationszyklus wird bei einer maximalen Länge von 16 ms in 12 bis 16000 Macrotics mit je mindesten 40 untergeordneten Minitics

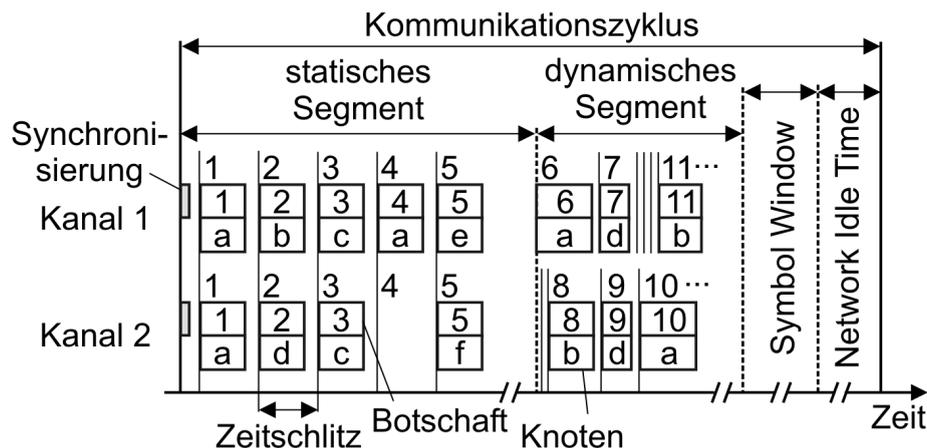


Bild 3.19: Flex-Ray-Kommunikationszyklus. Der Buszugriff erfolgt bei Übereinstimmung von Zeitschlitzzähler und Botschaftsidentifizier.

eingeteilt. Ein Zyklus ist vor allem in ein statisches und ein dynamisches Segment strukturiert.

Grundlage für die zeitgesteuerte Kommunikation ist eine netzwerkglobale, möglichst genaue und im System synchronisierte Zeit. Dazu wird im statischen Segment meist eine Botschaft (maximal zwei) mit gesetztem Synchronisierungsbit übertragen. Aus den Empfangszeiten dieser Botschaft und den abweichungslimitierten Werten der lokalen Knotenuhren wird mit einem verteilten, fehlertoleranten Durchschnittsalgorithmus eine systemkonsistente und genaue globale Zeit ermittelt [157]. Die erreichbare Synchronisierungsgenauigkeit liegt unter 50 ns.

Im statischen Teil wird die Nachrichtenübertragung nach dem TDMA (Time Division Multiple Access) Verfahren vollzogen. Das statische Segment wird in voraussichtlich zwei bis maximal 1023 gleich große Zeitschlitze dividiert. Der Buszugang erfolgt auf beiden Kanälen synchron bei Übereinstimmung von Botschaftsidentifizier und Zeitschlitzzähler (mit Hilfe der Makrotics) der Knoten. Die für den Kommunikationsablauf notwendigen Informationen werden in den lokalen Controllern abgelegt.

Im dynamischen Segment erfolgt der Buszugriff nach dem FTDMA (Flexible Time Division Multiple Access) Verfahren. Auch hier wird der Zugang bei Übereinstimmung von Zeitschlitzzähler und Botschaftsidentifizier gewährt. Die Zeitschlitzlänge ist jedoch in beiden Kanälen voneinander unabhängig variabel.

Liegt keine Sendeanforderung vor, werden die Zeitschlitzzähler weiter inkrementiert. Durch diese Zugangsverfahren haben Botschaften mit hohen Prioritäten (niedriger Identifizierwert) einen im statischen Segment vorbestimmten frühen oder im dynamischen Segment entsprechend schnellen Buszugriff. Das dynamische Segment ist frei skalierbar und ermöglicht auch rein statische Konfigurationen. Im Anschluss daran können optional weitere Segmente vorgehalten werden. Ein weiterer Zeitraum (Network Idle Time) wird zum verstreichen verbleibender Macrotics eines Zyklus belegt.

Das Kommunikationssystem funktioniert, sobald sich mindesten zwei Knoten an der Datenübertragung beteiligen. Die Netzknoten sind permanent mit der Spannungsversorgung verbunden, verfügen über ein Energiemanagement und können über den Bus geweckt oder abgeschaltet werden.

Zur Eindämmung der Busmonopolisierung durch fehlerhafte Teilnehmer werden in allen Knoten Buswächter (Busguardians) eingesetzt, **Bild 3.20**. Diese verhindern unerlaubte Sendevorgänge (bzw. gewähren den Buszugang nur in den zeitlich vorgesehen Fenstern) und fangen Fehler der lokalen Uhr des Buscontrollers oder Verfälschungen des Zeitsignals ab. In **Tabelle 3.4** sind die wichtigsten der für FlexRay konzipierten Fehlererkennungsmechanismen zusammengestellt. Erkannte Fehler werden telegramm- sowie kanalspezifisch durch im Kommunikationscontroller abgelegte Codes protokolliert (Frame Status Error Vector/FSEV bzw. Channel Status Error Vector/CSEV). Telegrammfehlercodes werden nach dem Erwartungsablauf oder dem Erhalt einer Botschaft aktualisiert und enthalten auch Statusinformationen von Nachrichten. Um schnelle oder sichere Behandlungsroutinen der Anwendung realisieren zu können, ist die Konfiguration von Fehlererkennungsmechanismen als Interrupts möglich. Die Knoten werden im Rahmen eines Fehlermanagements in vier Funktionsstufen klassifiziert, um ein geordnetes Aus- und ein gesichertes Wiedereintreten bei Fehlern zu ermöglichen.

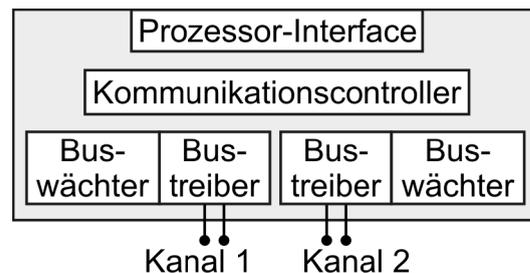


Bild 3.20: FlexRay-Knoten.

Tabelle 3.4: Für FlexRay vorgesehene Fehlererkennungsmechanismen (Stand 08/2004).

Mechanismus	Funktion und Beschreibung
Bit-Überwachung	Eine Überwachung der angelegten Buspegel ist vorgesehen; Verletzungen werden als Bitfehler erkannt (Bit Error).
Überprüfung der Zeitschlitzzuordnung	Eine Verletzung von Zeitschlitzzugriffen durch nicht autorisierte Knoten wird erkannt (Slot Mismatch).
Überprüfung des Zykluszählers	Der in Botschaften übertragene Zykluszähler wird mit den lokal inkrementierten Werten verglichen; gegebenenfalls wird ein Fehler des Zählers gesetzt (Cycle Count Mismatch).
Zyklische Blockprüfung (Cyclic Redundancy Check)	Die Konsistenz der übertragenen Botschaft wird im Rahmen einer zyklischen Blockprüfung mit einem 24-Bit Prüffeld überwacht. Übertragungsfehler können mit einer hohen Wahrscheinlichkeit entdeckt werden (CRC Error).
Überprüfung der Botschaftslänge	Fehler bzgl. der Botschaftslänge werden im telegrammspez. Fehlercode (FSEV) protokolliert (Length Mismatch).
Überwachung zyklischer Botschaften	Ausbleibende zyklische Botschaften werden im FSEV protokolliert (Missing Frame).

3.1.2.6 Time-Triggered Protocol (TTP)

Das Time-Triggered Protocol (TTP) [158] ist ein zeitgesteuertes Bussystem, das ebenso wie FlexRay für sicherheitskritische mobile Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Übertragungsleistungen entwickelt wurde. Es befindet sich nach 20 Jahren Entwicklungserfahrung in ersten Serienanwendungen (v. a. bei Zügen und Flugzeugen) und etabliert sich seit den 1998 abgeschlossenen EU-Projekten Time Triggered Architecture (TTA) sowie X-by-Wire Systeme für den Einsatz in Automobilen. Die Besonderheit von TTP liegt in den umfangreichen und zertifizierten Sicherungs- und Überwachungsmechanismen. Das Protokoll ist zudem konsequent für Redundanz konzipiert.

TTP-Netzwerke können in Linien- oder Sterntopologien (mit Sternkopplern) sowie in Kombinationen beider ausgeführt werden (siehe auch Bilder 3.14 und 3.15). Es sind maximale Übertragungsraten von 5 bis 25 MBit/s möglich. Für die Busphysik sind lediglich Anforderungen, jedoch keine Standards spezifiziert. Für redundante Netzwerke müssen zwei unabhängige Kanäle, die physikalisch different sein können, eingesetzt werden.

Für die Synchronisierung ist vor allem die Kenntnis einer möglichst geringen Signallaufzeit von Bedeutung. Gegenwärtig werden bewährte Medien und Systeme zur Bitcodierung und -darstellung wie z. B. CAN nach ISO 11898 (mit Übertragungsraten bis 500 kBit/s) oder serielle Schnittstellen wie RS 485 (5 bis 10 MBit/s) eingesetzt. Neben TTP-Controllern sind bereits eine Reihe von Produkten zur Entwicklung und Validierung verfügbar.

Bild 3.21 zeigt den Aufbau von TTP-Botschaften. Zunächst wird ein Code mit der Kennzeichnung des Botschaftstyps gesendet. Botschaften mit Nutzdaten enthalten im Anschluss einen Code mit eventuellen Anforderungen für eine neue Betriebsart des

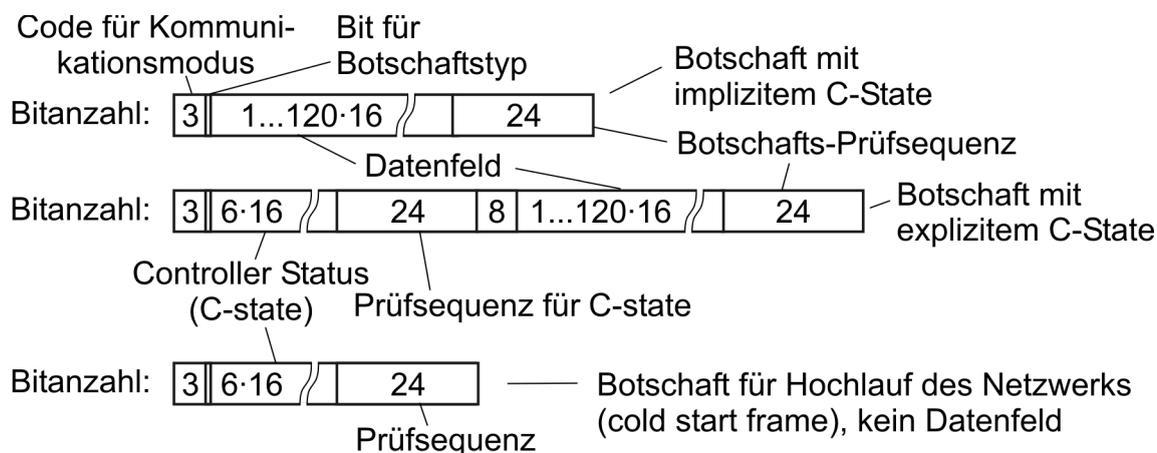


Bild 3.21: Aufbau von TTP-Botschaften. Bei Botschaften mit Nutzdaten (Datenfeld) kann der Controller-Status explizit übertragen werden. Er wird jedoch stets bei der Berechnung des Prüffeldes berücksichtigt.

Netzwerks (z. B. Hochlauf, Anwendung, Diagnose). Der Inhalt des zum Teil explizit übertragenen Controller Status ist in **Tabelle 3.5** aufgeführt. Alle Nachrichten werden im Rahmen einer zyklischen Blockprüfung mit einer 24-Bit Prüfsequenz auf ihre Konsistenz abgesichert. TTP ist vor allem bei Botschaften mit mehr als 10 Byte Nutzdaten höchst effektiv, **Bild 3.22**. In Versuchen wurden mögliche Busauslastungen von 85 % nachgewiesen.

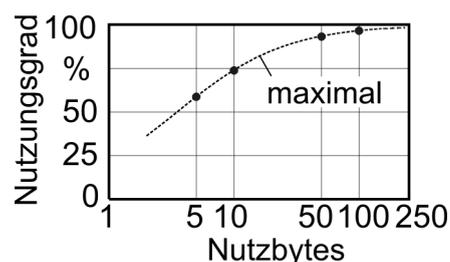


Bild 3.22: Maximaler theoretischer Nutzungsgrad von TTP-Botschaften (übertragene Nutzdaten bezogen auf Botschaftslänge).

Tabelle 3.5: Als TTP-Controller-Status (C-State) übermittelte Informationen.

Element des Controller Status (C-State)	Bedeutung
Globale Zeit (Global Time)	Globaler Zeitpunkt der folgenden Datenübertragung. Die Aktualisierung erfolgt zu Beginn des Zeitschlitzes.
Zeitschlitznummer (Round Slot Position)	Gibt die Position des Zeitschlitzes im aktuellen Kommunikationszyklus (Cluster Cycle) an.
Netzwerk Betriebsart (Cluster Mode)	Ein TTP-Netzwerk hat in der Regel mindestens zwei Betriebsarten: Im Startmodus wird das Netzwerks hochgefahren und synchronisiert. Im Anwendungsmodus werden Daten für Steuerungen und Regelungen kommuniziert.
Anforderung für Betriebsartwechsel (Deferred Pending Mode Changes/DMC)	Bestehende Anforderungen zur Änderung von Betriebsmodi werden im Controller Status abgelegt.
Aktivitätsstatus von Netzwerkknoten (Membership Information)	Knoten, die Ihre Botschaften erfolgreich senden, werden in der Membership Information angezeigt.

Bild 3.23 zeigt den zyklischen Kommunikationsablauf in einem TTP Netzwerk. Knoten, die beim (Neu-)Start Botschaften mit explizitem Controller Status oder Botschaften für den Hochlaufvorgang (sogenannte Cold Start Frames) empfangen, synchronisieren und integrieren sich in das Netzwerk. Empfängt ein Knoten bis zu einem gewissen Zeitpunkt keine entsprechenden Botschaften, so beginnt er mit dem Senden einer begrenzten Anzahl von Cold Start Frames.

Die Kommunikationszyklen sind in mehrere TDMA-Runden aufgeteilt. Der Buszugriff von Knoten erfolgt innerhalb von Zeitschlitzten (deren Länge frei konfigurierbar ist) und wird durch die globale Zeit im Netzwerk und die in den Knoten abgelegten Informationen zur Nachrichtenzuordnung innerhalb eines Kommunikationszyklus (Message Descriptor List/MEDL) bestimmt. Für ereignisgesteuerte Kommunikationsanteile können bei Bedarf Bandbreiten reserviert werden.

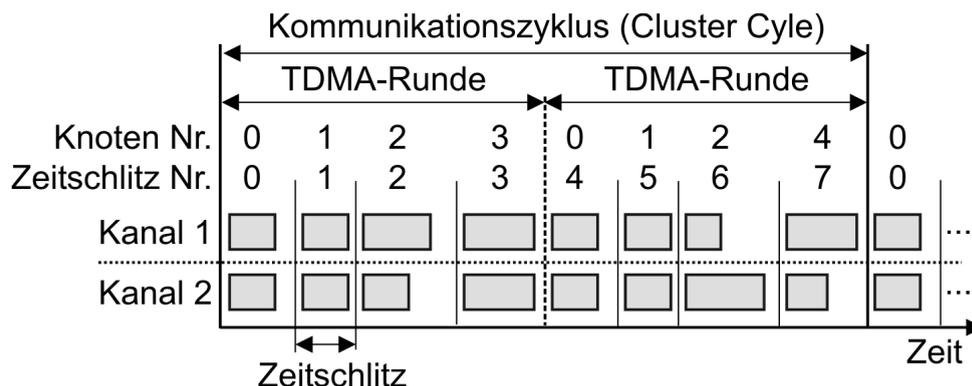


Bild 3.23: Kommunikationsablauf in einem TTP-Netzwerk. Cluster Cycle sind in TDMA-Runden mit unterschiedlichen Zeitschlitzebelegungen unterteilt. Die Kommunikation wird durch die in den Knoten abgelegte Sendefolge (Message Descriptor List/MEDL) und die globale Zeit bestimmt.

Hardware- und Übertragungsfehler können mit hoher Sicherheit erkannt und Einzelfehler durch die redundante Struktur kompensiert bzw. toleriert werden. Der im Controller Status enthaltene Aktivitätsstatus von Netzwerkknoten (Membership Information) ermöglicht die systemübergreifende Überwachung aller korrekt an der Kommunikation teilnehmenden Knoten. Darüber hinaus werden in den Knoten alle empfangenen Botschaften in Zustände klassifiziert, **Tabelle 3.6**.

Tabelle 3.6: Zustände von TTP-Botschaften im Rahmen der Kommunikationsüberwachung.

Botschaftszustände (Frame States)	Bedeutung und Kriterien zur Klassifizierung
Keine Botschaft (Null Frame)	Keine Aktivität (auch kein Rauschen) auf dem Übertragungsmedium während der Kommunikationsphase bzw. vermisste Nachrichten.
Ungültige Botschaft (Invalid Frame)	Eine Botschaft wird als ungültig eingestuft, wenn ein Codierungsfehler, ein Sendebeginn außerhalb des zugewiesenen Zeitfensters oder eine falsche Botschaftslänge vorliegt.
Falsche Botschaft (Incorrect Frame)	Eine Botschaft wird als ungültig eingestuft, wenn im Rahmen der zyklischen Blockprüfung (CRC-Prüffeld) eine Inkonsistenz festgestellt wird.
Korrekte Botschaft (Correct Frame)	Eine Botschaft wird als korrekt eingestuft, wenn im Rahmen der zyklischen Blockprüfung Nachrichtenkonsistenz festgestellt wurde, eine eventuelle Anforderung auf einen Betriebsartwechsel zulässig ist, keine Codierungsfehler vorliegen, die Botschaftslänge eingehalten wird und die Kommunikation innerhalb des zulässigen Zeitschlitzes erfolgt.
Unsichere Botschaft (Tentative Frame)	Die Botschaft konnte nicht vollständig auf Korrektheit abgesichert werden.
unbestimmter Fehler (Other Error)	Im Zuge der Botschaftsübermittlung liegt ein nicht näher bestimmter Fehler vor bzw. die Anforderung auf Wechsel der Betriebsart (Mode Change Request) ist nicht zulässig.

Der Aufbau eines TTP-Knotens ist in **Bild 3.24** dargestellt. Der TTP-Protokollcontroller greift auf die in einem Festspeicher abgelegten Informationen zum Kommunikationsablauf (MEDL) zu. Die Bustreiber der beiden Kanäle werden durch einen Überwacher (Busguardian) abgesichert.

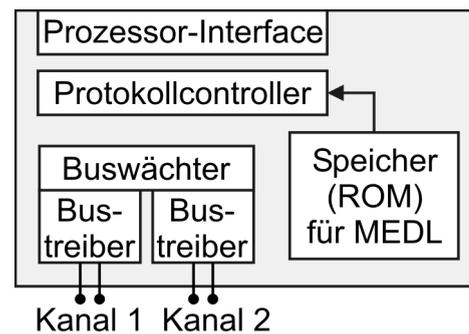


Bild 3.24: Aufbau eines TTP-Knotens.

3.2 Kommunikationsdesign

3.2.1 Entwicklungsprozess

Bild 3.25 zeigt das Vorgehensmodell (V-Modell) sowie die Kernprozesse zur Entwicklung elektronischer Systeme. Detaillierte Ausführungen mit Zuordnungen von Entwicklungsmethoden sind in [31, 145] beschrieben. Das V-Modell dient als Leitfaden

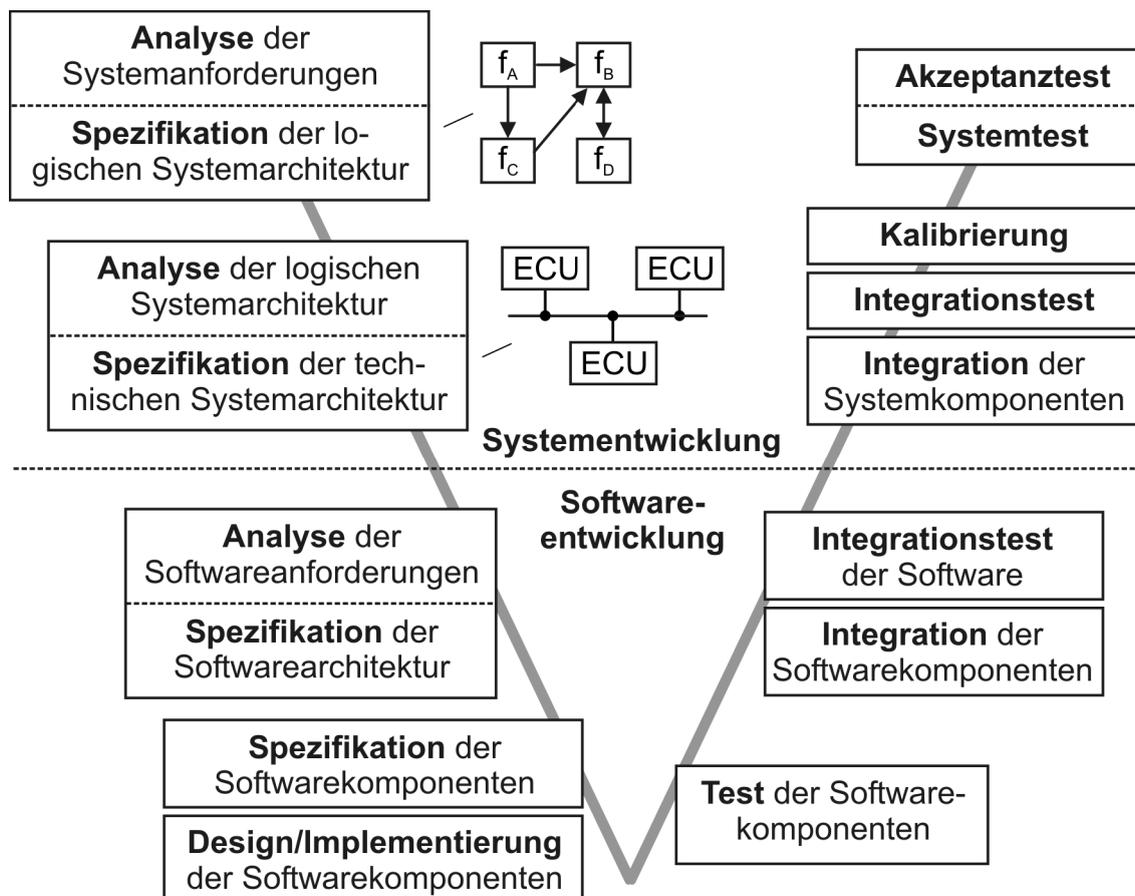


Bild 3.25: V-Modell und Prozesse zur Entwicklung elektronischer Systeme nach [31].

für ein modellbasiertes Vorgehen (siehe auch [4, 31, 159, 160, 161]). Die Zweige sind sowohl auf mechatronische Module als auch auf komplette Antriebssysteme anwendbar und werden bei komplexen Entwicklungen zum Teil auch mehrfach durchlaufen.

Neben Analysemethoden, die je nach Reifegrad des zu entwickelnden Produkts zur Ermittlung und Bewertung von Gefahren, Risiken sowie Fehlerauswirkungen eingesetzt werden, nehmen durchgängige Simulationsmodelle eine zunehmend zentrale Rolle ein [162]. Sie können den Entwicklungsprozess als ausführbare Spezifikation, aber auch als Entwurfs-, Entwicklungs-, Test- und Analysewerkzeuge unterstützen.

Spezifikation der technischen Systemarchitektur

Ein für die Gestaltung der Signalkommunikation bedeutender Vorgang ist die Spezifikation der technischen Systemarchitektur. Hier müssen die in der logischen Systemarchitektur definierten Schnittstellen und Funktionen der Kommunikation auf realisierbare Lösungen übertragen werden. Ergebnisse sind Netzwerkstrukturen, Steuer- und Regel-, Überwachungs-, Diagnose- sowie Kommunikationsfunktionen.

Bei den spezifizierten Netzwerkstrukturen müssen unter anderem technische Anforderungen wie Teilnehmeranzahl, Leitungslängen, Abstraten und Datenmengen (zulässige Buslasten, Spitzenlasten) geprüft werden. Kommunikationsfunktionen umfassen neben Art, Umfang und zeitlichem Ablauf der zu kommunizierenden Daten auch Kommunikationsbeziehungen (Kommunikationsmatrix) sowie Funktionen des Netzwerkmanagements (z. B. Hochlauf, Abschalten, Teilnehmerüberwachung). Die Verwendung oder Integration technischer Standards (Protokolle, Kommunikationsstandards, Softwarestrukturen) sollte spätestens hier berücksichtigt werden. Die Realisierung dieser Funktionen erfolgt im Softwareentwicklungsprozess.

Test und Validierung

Die im rechten Zweig des V-Modells durchzuführenden Tests sind für Qualität, Sicherheit und Verfügbarkeit bedeutend und lassen sich nach [31] wie folgt strukturieren:

Funktionsorientiertes Testen von:

- Steuer- und Regelfunktionen
- Überwachungs- und Diagnosefunktionen

System- und komponentenorientiertes Testen von:

- Echtzeitbetriebssystem (z. B. Rechen- und Prozessantwortzeiten, Variablenzugriff, Speicherverbrauch, Stabilität, Erfüllung von Echtzeitbedingungen)
- Kommunikationsschicht und Netzwerkmanagement (Kommunikationsmatrix, Überwachungsmechanismen, Kommunikationsabläufe und -raten)
- Diagnoseschicht/-funktionen

Situationsorientiertes Testen von:

- Normalfällen (u. a. bedeutend bei komplexen, verteilten Funktionen oder bei komplexem Zeitverhalten wie z. B. bei CAN)

- Extremfälle (z. B. Aktivierung/Anforderung außergewöhnlich zahlreicher oder anspruchsvoller Funktionen)
- Fehlerfälle (z. B. Verhalten bei Komponentenfehlern, Ausfällen, Störungen)

Nach erfolgreichem Abschluss der Kalibrierung (v. a. individuelles Anpassen von Parametern) erfolgt ein Akzeptanztest im Systemverbund (z. B. Einsatz im Fahrzeug).

3.2.2 Regelungstechnische Anforderungen

Bild 3.26 zeigt das Blockschaltbild einer digitalen Regelung in einem verteilten System, bei dem beispielhaft die Führungsgrößen w_{dig} über ein Bussystem vorgegeben werden. Der Regler berechnet aus den Führungsgrößen und den gemessenen Rückführgrößen r_{dig} die Ausgangsgrößen u_{dig} und leitet diese an die Stelleinrichtung weiter. Die dort generierten Stellgrößen y wirken über Aktoren auf die Strecke ein. Aus diesem elementaren aber repräsentativen Beispiel können die wichtigsten regelungstechnischen Anforderungen abgeleitet werden:

Ausreichend hohe Abtastfrequenzen

Damit die meist analogen Regelgrößen x dem Mikrocontroller zugeführt werden können, ist eine Abtastung mit Analog-Digital-Wandlern erforderlich. Entsprechend sind über Halteglieder und Stelleinrichtungen die größtenteils analogen Stellgrößen y zu generieren. Für den digitalen Regler sind geeignete Zykluszeiten zu wählen.

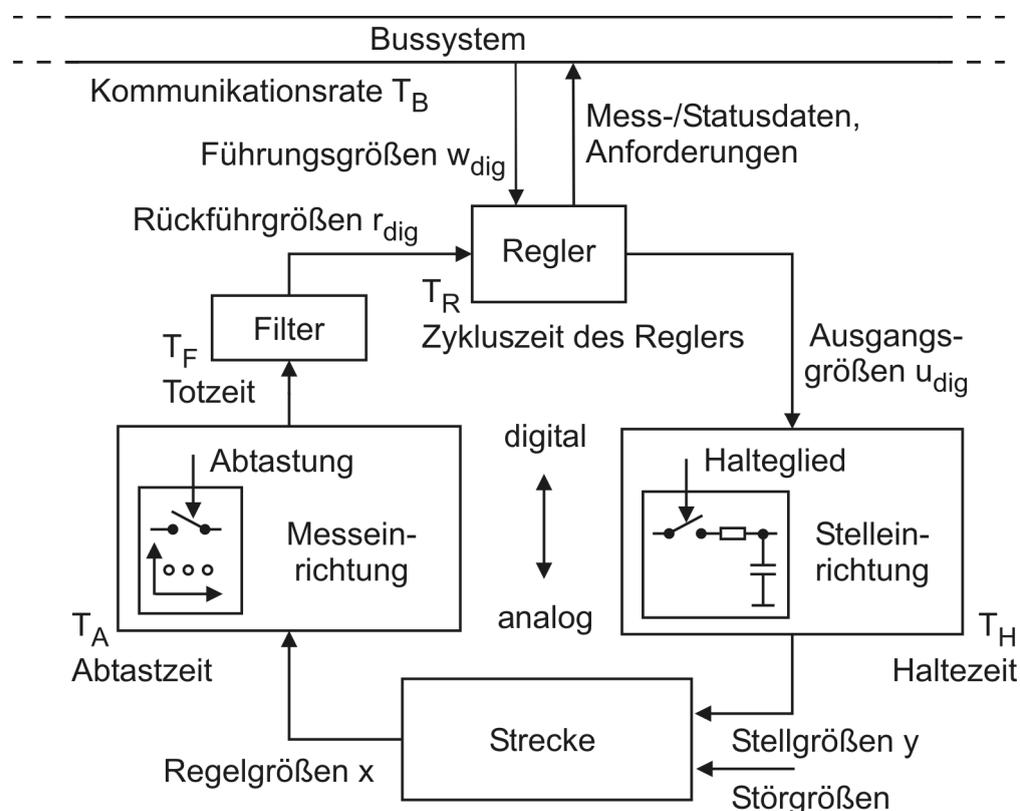


Bild 3.26: Signalfluss in einem vernetzten Subregelkreis.

Zu niedrige Abtastfrequenzen und Signalaufösungen führen zu instabilen Reglern und schlechten Regelgüten. Schnelle Abtastfrequenzen erhöhen den Aufwand und sind aufgrund begrenzter Rechenleistungen von Mikrocontrollern sowie der Leistungsfähigkeit von Stell- und Messgliedern nur bedingt realisierbar. Es muss also ein geeigneter Kompromiss gefunden werden (siehe unten).

Bezüglich der dynamischen Eignung von Stell- und Messgliedern können Frequenzgänge oder Einstellzeiten [163] herangezogen werden. Bei Vernetzung von Funktionen können Anforderungen an die Kommunikationsraten von Bussystemen (gegebenfalls auch für unterlagerte Sensor/Aktor-Bussysteme) aus den Abstraten der zu übertragenden Signale oder des zu realisierenden Regelkreises abgeleitet werden. Stell-, vor allem aber Messglieder sowie unterkaskadierte Regelungen sollten meist eine dem übergeordneten Regelkreis überlegene Dynamik aufweisen.

Ausreichend genaue Signalqualitäten und -quantitäten

Neben der Wahl der Abtastzeiten müssen die zur Regelung notwendigen Mess- und Stellsignale definiert und deren Auflösung zum Erreichen der geforderten Regelgüte festgelegt werden. Das damit ermittelbare Datenaufkommen ist neben der Auswahl geeigneter Mess- und Stellglieder vor allem für die Auslegung von Bussystemen von Bedeutung. Zur groben Abschätzung der Buslast kann unter der Annahme eines rein zyklischen Datenaustauschs folgende Faustformel angesetzt werden:

$$\text{Buslast} [\%] = \frac{\text{Kommunikationsrate} [1/s] \cdot \text{Datenvolumen} [\text{Byte}] \cdot 8 \cdot 10^3}{\text{Übertragungsrate} [\text{Bit}/s] \cdot \text{Protokolleffektivität} [\%]}$$

Werte für Übertragungsraten und durchschnittliche Protokolleffektivitäten von Bussystemen sind in Kapitel 3.1.2 aufgeführt. Geeignete Messverfahren und Hinweise zur Quantisierung von Signalen können einschlägiger Literatur entnommen werden. Einen guten Überblick gibt [164]. Ausarbeitungen zu Signalaufösungen sind in standardisierten Protokollen wie z. B. SAE J1939 [53, 54, 80] enthalten.

Synchronisierungsmechanismen

Speziell bei übergeordneten bzw. vernetzten Regelungen mit Beteiligung mehrerer ECUs ist eine Synchronisierung der Regler sowie gegebenenfalls der Mess- und Stellglieder erforderlich. Sie erfolgt über das Bussystem und über anwendungsspezifische Kommunikationsmechanismen.

3.2.2.1 Abstraten für Messglieder

Bild 3.27 zeigt den Abtast- und Haltevorgang eines kontinuierlichen Signals mit der Abtastzeit T_A . Es entsteht eine beim Reglerentwurf zu berücksichtigende Totzeit von $0,5 T_A$. Damit ein zeitkontinuierliches Signal mit der maximalen Kreisfrequenz ω_s unverfälscht rekonstruiert werden kann, muss nach dem Shannonsche Abtasttheorem [6] die Abtastkreisfrequenz ω_A mindestens doppelt so groß wie die Signalkreisfrequenz ω_s

Bestimmung der Signalabtastzeit T_A :

Shannonsches Abtasttheorem:

$$T_A < 0,5 / f_S$$

Erweiterung für Regler mit Anti-Alias-Filter:

$$T_A < 0,1 / f_S$$

$$f_S = \omega_S / 2 \cdot \pi$$

ω_S : maximale Signalkreisfrequenz

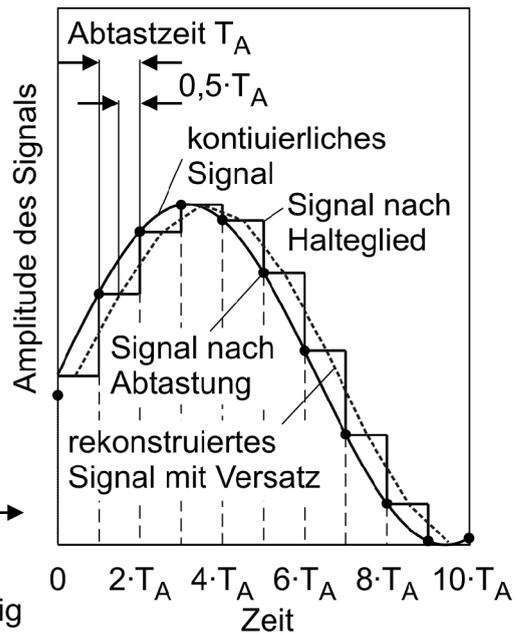
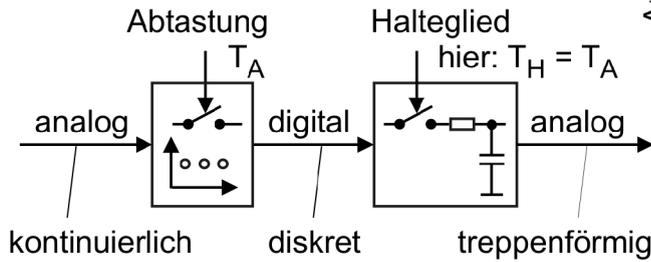


Bild 3.27: Abtastzeit T_A für Messsignale.

sein. Da Messsignale jedoch meist mit Störpegeln überlagert sind, werden die Eingänge digitaler Regler mit Tiefpass- bzw. Anti-Aliasing-Filtern auf Bandbreiten begrenzt. Zur Kompensation der dadurch entstehenden Totzeit wird die Mindestbedingung für die Abtastkreisfrequenz einer Messeinrichtungen über das Shannonsche Theorem hinaus auf $10 \cdot f_S$ erweitert, siehe auch [165, 166, 167].

3.2.2.2 Abtastraten für Regelungen

Maßgeblich für die Bandbreite und die Abtastzeiten von Messgliedern sowie von digitalen Reglern ist die Dynamik der Regelgrößen x . Zu deren Bestimmung kann prinzipiell der aus einer harmonischen Anregung des offenen Regelkreises resultierende Frequenzgang oder die Regelgrößenantwort auf eine Sprunganregung durch die Führungsgrößen herangezogen werden.

Bild 3.28 fasst Verfahren zur Bestimmung der Abtastfrequenz bei bekanntem Frequenzgang einer zu regelnden Antriebskomponente, eines Antriebssystems

Faustwerte für die Abtastzeit T_R einer Regelung:

$$T_R < 2 \cdot \pi / \omega_R \text{ mit } \omega_R = 5 \dots 10 \cdot \omega_E$$

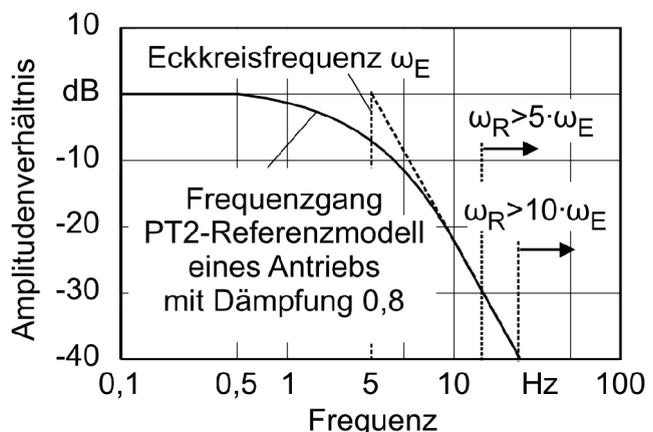


Bild 3.28: Faustwerte für die Abtastzeit von Reglern in Abhängigkeit vom Frequenzgang, siehe auch [168].

oder eines zur Regelung herangezogenen Referenzmodells nach [168] zusammen. Die mindestens notwendige Abtastfrequenz für den diskreten Regler wird dabei in Abhängigkeit der höchsten regelungstechnisch relevanten Eckkreisfrequenz bestimmt.

Bild 3.29 zeigt typische Zeitverläufe von Führungssprungantworten sowie praktikable Faustformeln für die mindestens notwendigen Abtastzeiten T_R von digitalen Reglern in Anlehnung an [7, 165, 166, 167]. Bei Mischformen ist das Minimum der ermittelten Abtastzeiten relevant.

Faustwerte für die Abtastzeit T_R einer zyklischen Regelung:

$T_R < 0,25 \cdot T_U$	mit Totzeit T_U
$T_R < 0,05 \cdot T_P$	mit Periodendauer T_P
$T_R < 0,1 \cdot T_G$ bzw. $T_R < 0,1 \cdot T_1$	mit Anregel- bzw. Totzeit T_G/T_U
$0,05 \cdot T_{95} < T_R < 0,1 \cdot T_{95}$	mit Einstellzeit T_{95}

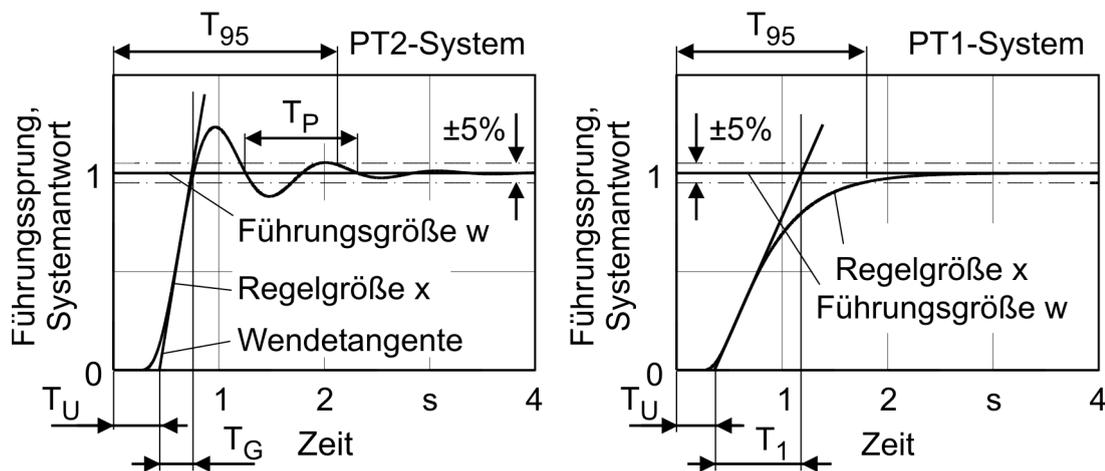


Bild 3.29: Abtastzeitermittlung über die Regelgrößenantwort von Fahrtrieben, siehe auch [7, 165–167].

Verfahren und Beispiele zur Ermittlung der Abtastrate aus den Kenngrößen des geschlossenen Regelkreises gibt [7]. Bestimmende Größen sind auch hier die Periodendauer, Anregel- bzw. Totzeiten oder die dominierende Zeitkonstante des Systems. Bei Fahrtrieben liegen typische Abtastraten für Antriebsmanagement und übergeordnete Regelungen meist im Bereich 100 Hz, bei Komfortschaltungen z. T. bei bis zu 200 Hz.

3.2.3 Sicherheitstechnische Anforderungen

Trotz der vielen Vorteile elektronischer Systeme bergen diese auch grundsätzliche Risiken, die durch Funktionsstörungen oder Ausfälle hervorgerufen werden können. Durch Gesetzgebung, Normen (Überblick siehe [145, 169]) wie die DIN EN 61508 [170] sowie das Entwicklungsziel möglichst hoher Produktqualität und Marktakzeptanz

tanz ergeben sich Forderungen nach funktional sicheren Produkten mit möglichst hoher Verfügbarkeit.

Funktionale Sicherheit, Verfügbarkeit und Fehlertoleranz

Übertragen auf die Signalkommunikation bei Fahrtrieben bedeutet funktionale Sicherheit, dass systematische Entwicklungsfehler (z. B. Softwarefehler) sowie zufällige Fehler (z. B. Defekte, Störungen) keine sicherheitskritischen Fehlfunktionen im Antriebsstrang hervorrufen dürfen. Die Verfügbarkeit des Systems bleibt gewährleistet, wenn Fehler abgefangen oder behoben werden oder zumindest ein eingeschränkter Betrieb des Antriebssystems möglich ist. Ein System ist fehlertolerant, wenn Ausfälle durch Redundanzen kompensiert werden und einen weiteren Betrieb ermöglichen.

Risikoanalyse

Die sicherheitstechnischen Anforderungen an elektronische Systeme oder Funktionen werden mit geeigneten Entwurfsmethoden ermittelt [145, 171]. Ein favorisiertes Werkzeug für die Risikoanalyse ist der Risikograph aus DIN V 19250 [172], **Bild 3.30**.

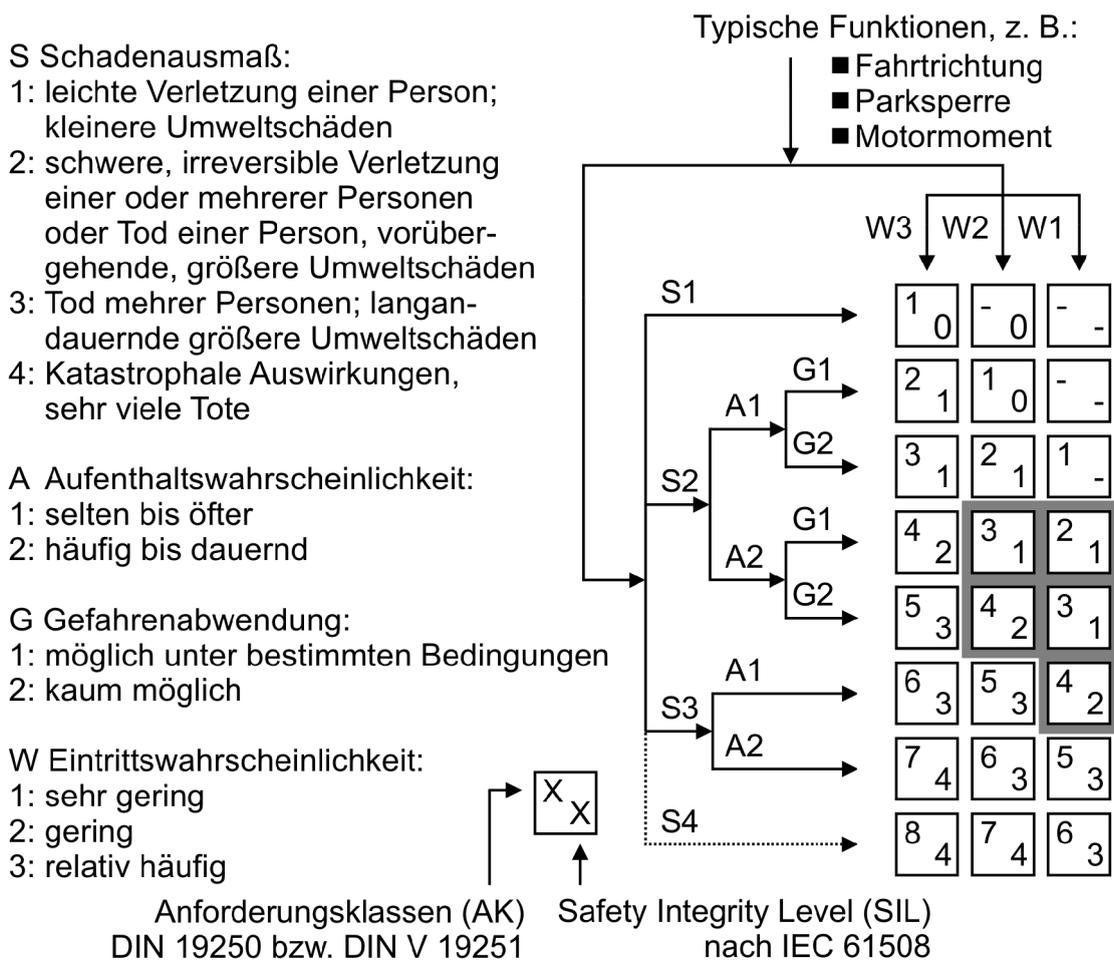


Bild 3.30: Risikograph mit Pfaden zur sicherheitstechnischen Einstufung im Rahmen einer Risikoanalyse [172]. Die für einige typische Funktionen von Fahrtrieben resultierenden Integritätsklassen sind grau hinterlegt.

Für typische sicherheitsrelevante Funktionen von Fahrtrieben lassen sich damit die Anforderungsklassen 3 bis 4 bzw. die in DIN EN 61508 spezifizierten Integritätsklassen Safety Integrity Level 1 und 2 ableiten. In **Tabelle 3.7** sind die zulässigen Ausfallwahrscheinlichkeiten quantifiziert.

Tabelle 3.7: Mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit von Sicherheitsfunktionen für den Betrieb elektronischer Systeme nach DIN EN 61508.

Safety Integrity Level	zulässige Ausfallwahrscheinlichkeit pro Funktionsanforderung bei Betrieb mit niedriger Anforderungsrate	zulässige Ausfallwahrscheinlichkeit pro Stunde bei Betrieb mit kontinuierlicher Anforderung
4	$< 10^{-5} \dots 10^{-4}$	$< 10^{-9} \dots 10^{-8} \text{ [h}^{-1}\text{]}$
3	$< 10^{-4} \dots 10^{-3}$	$< 10^{-8} \dots 10^{-7} \text{ [h}^{-1}\text{]}$
2	$< 10^{-3} \dots 10^{-2}$	$< 10^{-7} \dots 10^{-6} \text{ [h}^{-1}\text{]}$
1	$< 10^{-2} \dots 10^{-1}$	$< 10^{-6} \dots 10^{-5} \text{ [h}^{-1}\text{]}$

Auswirkung der Anforderungen auf System und Entwicklungsprozess

Aus der Risikoeinstufung können erforderliche Maßnahmen für einzelne Komponenten und das Antriebssystem sowie für die im Entwicklungsprozess anzuwendenden Methoden abgeleitet werden [145, 170]. Aus technischer Sicht ist eine Auslegung von Systemen mit analytischem Nachweis von Sicherheiten und Zuverlässigkeiten zwar möglich (siehe z. B. [143] und Tabelle 3.7), jedoch mit relativ hohem Aufwand verbunden und zum Teil subjektiv geprägt.

Praktikabler erscheint daher, Produkte mit bedeutendem Elektronikanteil durch einen sicherheitsgerichteten Entwicklungsprozess unter Verwendung geeigneter Methoden zu entwerfen und zu testen. Weitere Hinweise und Vorschläge von Anforderungsanalysen über die Realisierung bis hin zur Sicherheitsvalidierung geben neben der gesetzlich bindenden DIN EN 61508 auch Ergebnisse des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten SFB 241 „Neue integrierte mechanisch-elektronische Systeme für den Maschinenbau“ [171], des DFG-Projekts „Prozesssicherheit Landmaschinenelektronik“ [145] sowie [117].

Prinzipiell kann Sicherheit und Zuverlässigkeit durch die geeignete Kombination von Maßnahmen zur Vermeidung und zum Schutz, zur Überwachung und Diagnose, zur Behebung oder Toleranz von Fehlern erreicht werden [171] (siehe Kapitel 3.2.5). Zur Identifikation von Schwachstellen und als Entscheidungshilfe für geeignete Maßnahmen empfehlen sich vor allem Fehlerbaumanalysen [31, 143] sowie Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen (FMEA) [145].

Fazit:

Bei elektronischen Fehlern von Systemen aus dem Bereich der Längsdynamik (z. B.

ABS, ASR, ACC, E-Gas, Antriebsmanagement) ist eine Absicherung mit Überwachungen und Fail-Silent-Verhalten mit mechanischen Rückfallebenen sicherheitstechnisch zulässig und meist technisch möglich.

Für Systeme der Integritätsklasse SIL 1 sind einkanalige Systeme mit Vorkehrungen zum Selbsttest gefordert. Auf Fehler wird mit Warnmeldungen und Systemabschaltungen bzw. mit der Aktivierung einer Sicherheitsfunktion reagiert. Bei SIL 2 Systemen wird die Fehlererkennung sowie die Verfügbarkeit durch Diagnosesysteme mit zweikanaligen Vergleichsstrukturen gesteigert.

Damit besteht für Power- und Shift-by-Wire keine zwingende Forderung nach Fehlertoleranz des Gesamtsystems. Um wirksame Überwachungen zu ermöglichen, Antriebskomponenten zu schützen (z. B. Schutz vor Fehlschaltungen bei Getrieben) oder hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit wichtiger Systemfunktionen zu erzielen, sind gegebenenfalls Fehlertoleranzen für Teil- oder Subsysteme und Funktionen vorzusehen (wie z. B. bei ABS oder ESP-Funktionen meist üblich).

3.2.4 Zuverlässigkeitsaspekte

Bild 3.31 illustriert den Informationsfluss zwischen den Komponenten eines typischen verteilten Steuer- und Regelsystems. Für sichere und verfügbare Systemfunktionen muss die für die Funktionalität notwendige Kommunikation gewährleistet sein. Durch

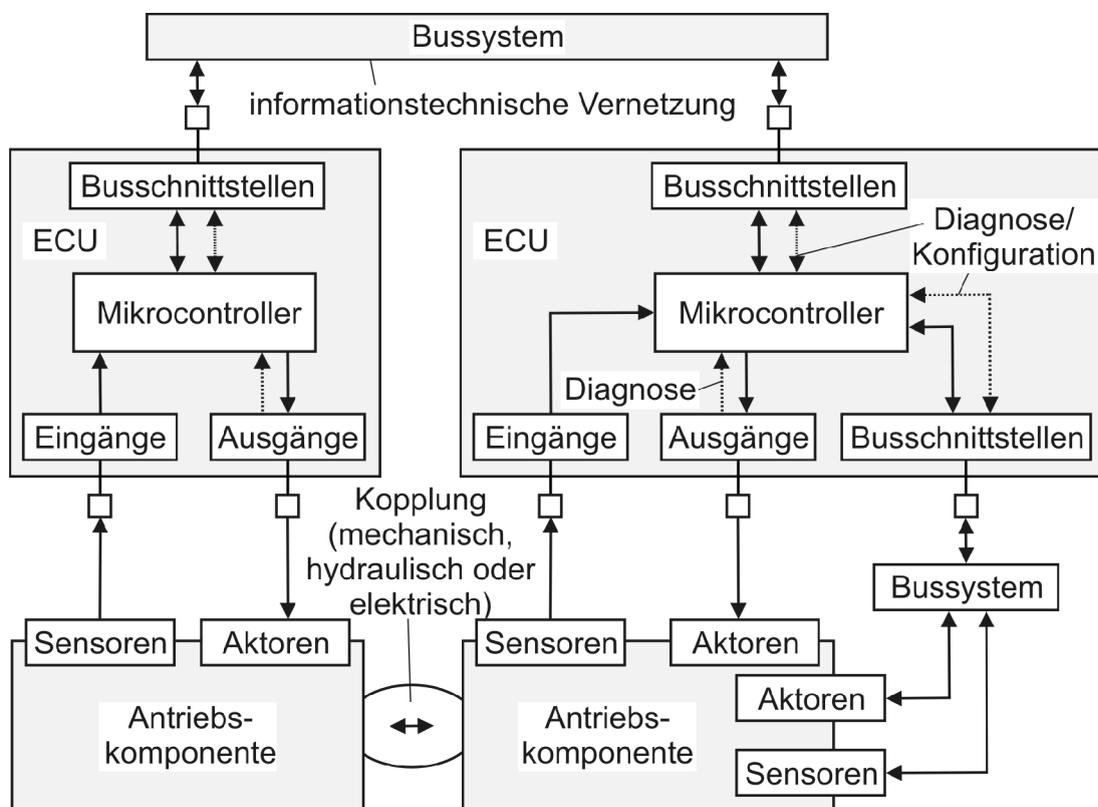


Bild 3.31: Informationsfluss in einem verteilten Regel- und Steuersystem.

die Fehlercharakteristik von Elektronik verursachte Übertragungsfehler (Restfehlerwahrscheinlichkeit), Verfälschungen oder Ausfälle sind zumindest abzusichern, z. T. durch Fehlertoleranzmechanismen zu kompensieren. **Tabelle 3.8** klassifiziert allgemein die bei mechatronischen Systemen auftretenden Fehlertypen sowie Gegen- bzw. Schutzmaßnahmen.

Tabelle 3.8: Allgemeine Fehlerklassifizierung eines mechatronischen Systems.

Fehlerquelle	Fehlerbeschreibung	Gegenmaßnahmen / Schutz
Elektronik (Sensoren, Aktoren, Bussysteme, ECUs, Schnittstellen)	Zufällig auftretende Hardwarefehler, durch Ausfallraten und Fehlerwahrscheinlichkeiten quantifizierbar	Diagnose, Plausibilisierung, Mehrfachabfragen, Prüfverfahren sowie Redundanzen von Hardwarekomponenten und Software, Fehlertoleranzmechanismen
Software	Systematische Fehler, verursacht durch Spezifikations- und Entwurfsfehler	Sicherheitsgerichteter Entwicklungsprozess bzw. -methoden
Mechanik, Hydraulik, Elektrik	Überlastung, Ermüdung, Abnutzung, Korrosion, Alterung	Diagnose (z. B. durch Steuer- und Regelsystem), Wartung, Überbelastungen verhindern, bei Fehlern sicheren Zustand einleiten oder vorsehen, Qualität bei Auslegung/Konstruktion verbessern

Eine Quantifizierung von Hardwarefehlern mit in Feldversuchen ermittelten Ausfallraten ist prinzipiell möglich, gestaltet sich jedoch mit steigender Systemkomplexität zunehmend schwieriger. In **Tabelle 3.9** sind exemplarisch einige Ausfallraten gebräuchlicher Sensoren aufgeführt [143]. Auftretende Fehler müssen diagnostiziert und durch geeignete Maßnahmen der Funktionssoftware von Steuer- und Regelgeräten oder durch Redundanzkonzepte abgefangen werden. Aktoren sind in ähnlichem Maß fehlergefährdet und werden meist mit Rückfallebenen abgesichert (z. B. bei Bremssystemen [85]).

Tabelle 3.9: Typische Ausfallraten von Sensoren, Feldversuche siehe [142].

Sensoren	Ausfallrate [h ⁻¹]
Drehzahl	8,67 10 ⁻⁶
Druck	1,44 10 ⁻⁶
Drosselklappenstellung	0,12 10 ⁻⁶
Beschleunigung	8,5 10 ⁻⁶

In **Bild 3.32** sind grundlegende Formeln zur einfachen Abschätzungen von Zuverlässigkeiten bei voneinander unabhängigem Ausfallverhalten einzelner Module zusammengefasst. Die Bewertung gegenseitiger Beeinflussungen einzelner Komponenten sowie die Quantifizierung von Software bzw. Softwarefehlern ist problematisch bzw. nicht trivial. Geeignete Methoden zur Quantifizierung des Ausfall- und Zuverlässigkeitsverhaltens komplexer Systeme

men sind u. a. zustandsraumbasierte Modellierungen wie die Markov-Ketten-Analyse [173] oder Boolesche Methoden wie Fehlerbaumanalysen (Fault Tree Analysis/FTA). Bei Markov-Ketten-Analysen wird das Zuverlässigkeitsverhalten durch die Kenntnis der Übergangsraten und -wahrscheinlichkeiten zwischen (Fehler-)Zuständen ermittelt. Für den Anwendungsbereich Kfz sind in [143] entsprechende Hinweise und Beispiele ausgeführt, einen Überblick über Methoden und Werkzeuge gibt [174].

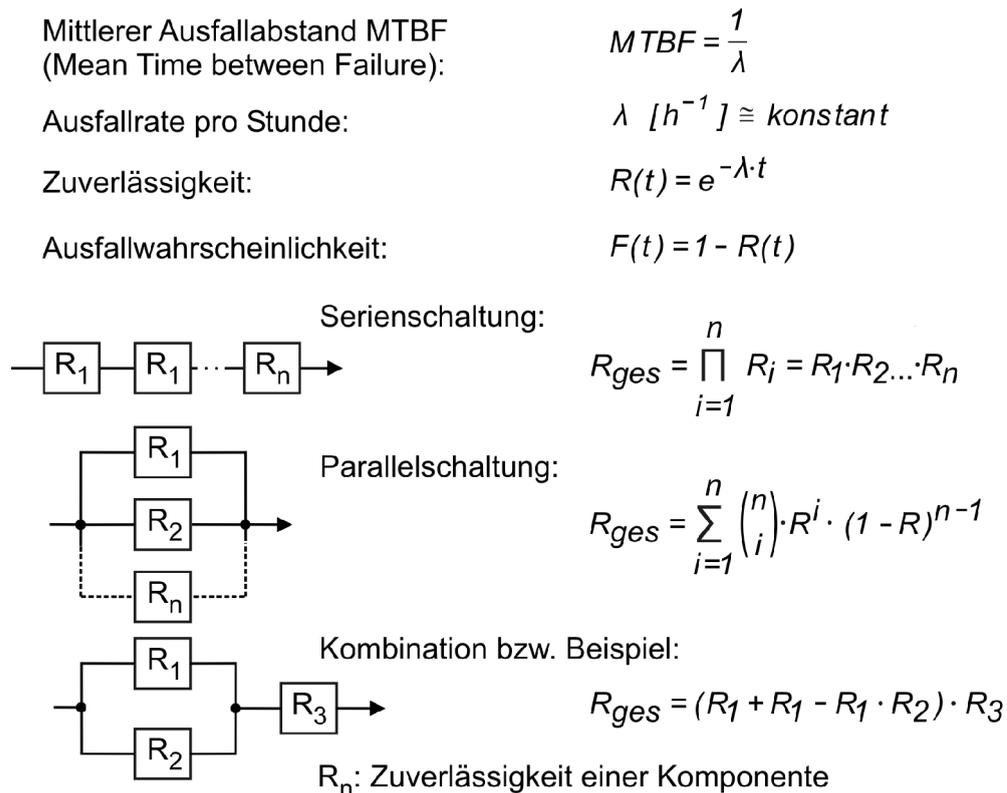


Bild 3.32: Grundschemata zur Berechnung des Zuverlässigkeitsverhaltens.

3.2.5 Absicherungs- und Toleranzverfahren

3.2.5.1 Redundanzverfahren

Bild 3.33 zeigt exemplarisch die bei ESP, ABS, Getriebe- oder Motorsteuerungen angewandten Hardwareredundanzen zur Absicherung von Sensor- und Rechenfehlern. Die wesentlich kostenintensiveren Aktoren werden meist mit sicheren Rückfallebenen (z. B. bei Bremsen [85]) ausgeführt. Zur Diagnose kommen zunehmend analytisch oder modellbasiert ermittelte Ersatzwerte zum Einsatz [32, 171, 175, 176].

Die Vernetzung erschließt neue Potenziale. Sensoren benachbarter Baugruppen oder Antriebskomponenten, die neben der informationstechnischen Vernetzung auch

physikalisch verknüpft sind (siehe Bild 3.31), können für Rege-lungs-, Steuerungs-, Diagnose- und Redundanzverfahren akti-viert bzw. herangezogen werden [17, 175, 177]. Mögliche Anwen-dungen sind z. B. die analytische Beobachtung von Drehzahlen, Drehmomenten, Temperaturen oder Strömen. Voraussetzung dafür ist eine hochverfügbare und sichere Datenübertragung.

Die **Bilder 3.34** und **3.35** zeigen die Grundschemata elek-tronischer Systeme mit statischer bzw. dynamischer Redundanz. Bei statischer Redundanz sind alle Module aktiv. Das gültige Signal wird durch eine Mehrheitsentscheidung aus-gewählt. Wird die Auswahl wie in Bild 3.34 getroffen, so kann ein fehlertolerantes Aus-gangssignal bei 2 funktionierenden von min-destens 3 Modulen ermittelt werden.

Bei dynamisch redundanten Systemen erfolgt die Auswahl des gültigen Moduls durch ein Managementsystem. Der Zustand mindestens zweier Module wird diagnosti-ziert und -analysiert (z. B. auch durch Klassi-

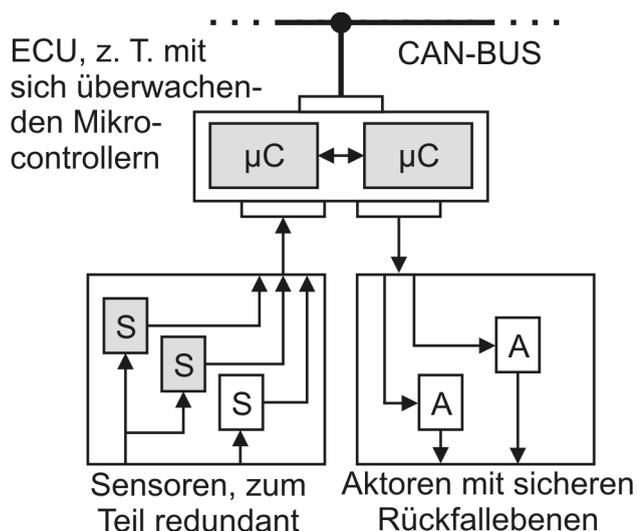


Bild 3.33: Für sicherheitskritische Systeme werden Sensoren z. T. redundant ausgeführt. Parallele Mikrocontroller sichern sich durch Ergebnisvergleiche ab.

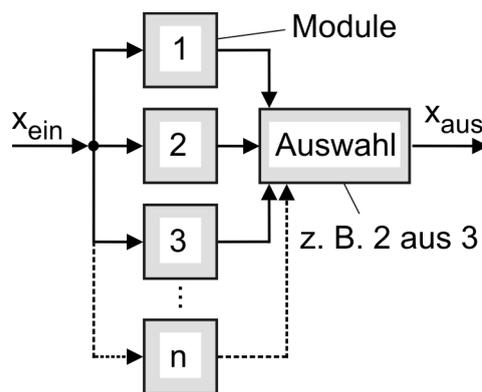


Bild 3.34: Statische Redundanz.

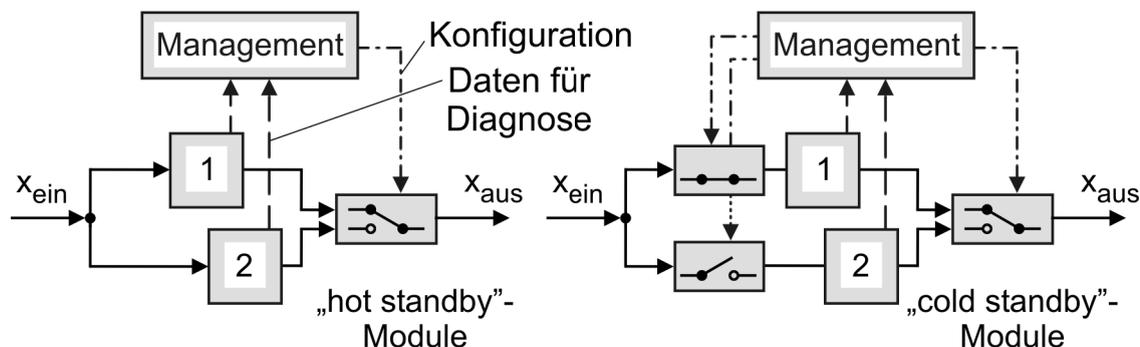


Bild 3.35: Grundstrukturen dynamisch redundanter Systeme. Die parallelen Module sind kontinuierlich aktiv (hot standby) oder aktivierbar (cold standby).

fizierung von Fehlerart, -ort und -rate) und die Anordnung dementsprechend konfiguriert.

Leistungsfähige und kostengünstige fehlertolerante Systeme können gegebenenfalls durch Kombinationen aus statischer und dynamischer Redundanz erzielt werden. Weitere Einsparungen sind durch analytische Redundanzen möglich. Dabei werden mit geeigneten Berechnungsmethoden (Modelle, Beobachter, Filter, siehe z. B. [178]) aus Sensorinformationen und empfangenen Daten Werte generiert. Diese können je nach Güte als Vergleichswerte für Plausibilitätstests oder Ersatzwerte herangezogen werden.

3.2.5.2 Diagnose und Kompensation von Sensorfehlern

In **Tabelle 3.10** sind Prinzipien zur Diagnose und Fehlererkennung von Sensoren sowie geeignete Fehlerbehandlungen bzw. Gegenmaßnahmen aufgeführt. Funktionen von Aktoren können mit Sensoren oder Sensorkombinationen, gegebenenfalls über Diagnosedaten von Ausgängen sowie durch Beobachtung der Systemreaktion überwacht werden.

Tabelle 3.10: Diagnose von Sensorfehlern und Fehlerbehandlung.

	Sensorfehler	Peaks, Aussetzer, Ausreißer	Signaldrift	Sensorausfall	Fehlfunktion allg.
X Erkennung/Kompensation möglich					
(X) Erkennung/Kompensation bedingt möglich					
Mechanismen zur Erkennung von Sensorfehlern					
Überwachung des zulässigen Wertebereichs des Signals	(X)			(X)	(X)
Überwachung der zulässigen Signaländerung (Gradienten)	(X)			(X)	(X)
Redundanz mit Mehrheitsauswahl (z. B. 2 aus 3), eventuell in Verbindung mit Plausibilitätsprüfung sowie modellbasierten Methoden (z. B. Beobachter)	X	X	X	X	X
Maßnahmen zur Fehlerbehandlung/-kompensation					
Filtern (z. T. Datenverlust sowie Verzögerung/Totzeit)	X				
Schnelle Messwiederholung, Filtern (kein/weniger Datenverlust)	X				
Schnelle Messwiederholung, bereinigte Mittelwertbildung	X				
Redundanz mit Mehrheitsauswahl (z. B. 2 aus 3), eventuell in Verbindung mit analytischen Methoden (z. B. Beobachter)	X	X	X	X	X

3.2.5.3 Sicherheitsgerichtete Programmierung

Bild 3.36 stellt einen typischen Ablauf eines Funktionscodes eines sicherheitsgerichteten Regelmoduls dar. Die Software ist in überschaubare Submodule unterteilt, denen beispielhaft eine Auswahl der wichtigsten Absicherungsmechanismen zugeordnet sind. Darüber hinaus sind zur sicherheitsgerichteten Gestaltung von Funktionscode [179] folgende Programmierregeln anzustreben:

- Modularisierung auf beherrschbare Modulgrößen und -komplexitäten.
- Prüfbarkeit von Software und Speicher anstreben bzw. vorsehen.
- Diagnose von Schnittstellen und Übergabeparameter durch Kontrolle der Werte- und Datenbereiche; Plausibilitäten und Ergebnisse sichern.

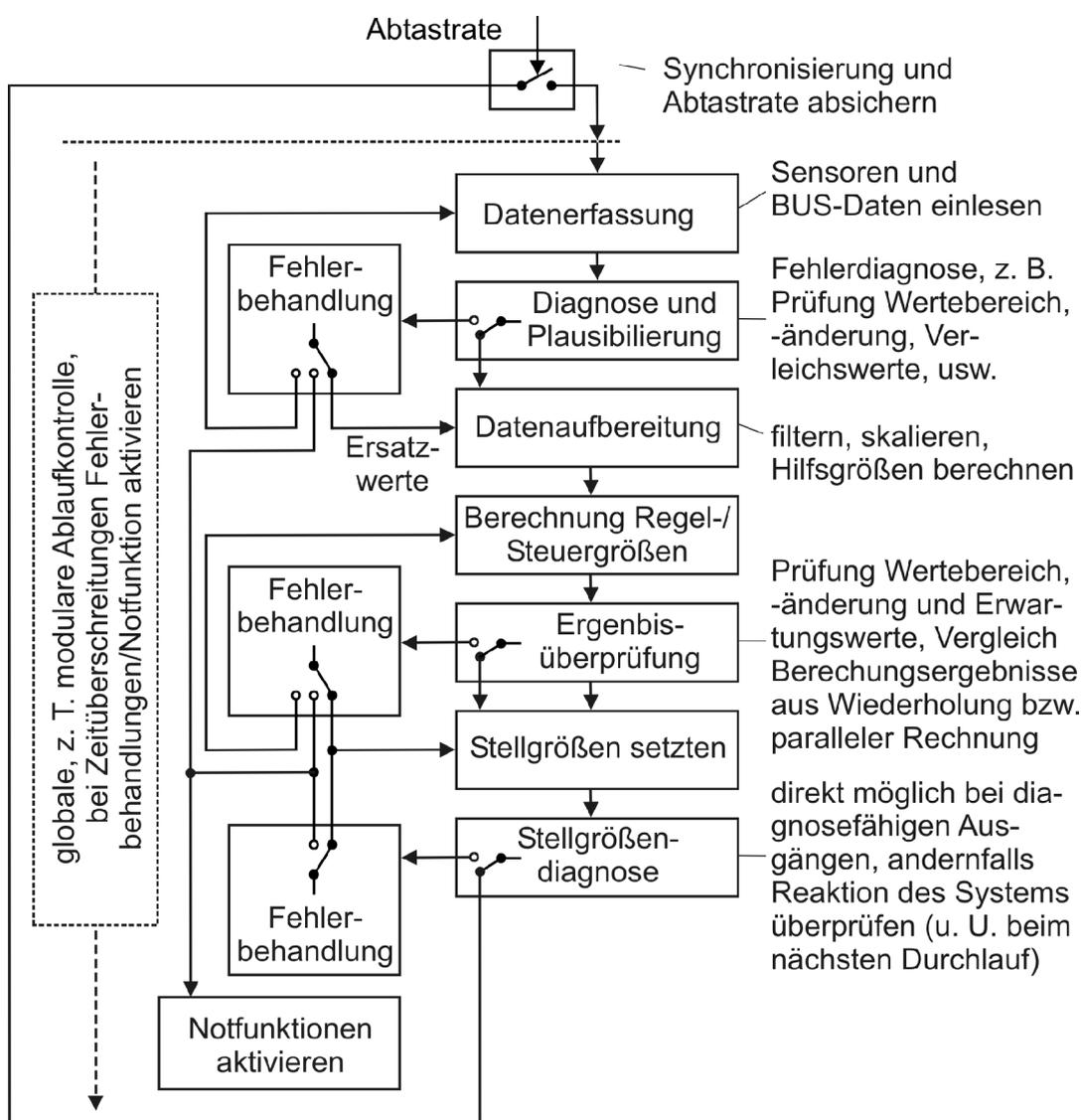


Bild 3.36: Beispielhafte Struktur eines sicherheitsgerichteten Regelmoduls: Die Sequenz wird zyklisch ausgeführt (Abtaste). Neben geeigneten Diagnosen und Plausibilitätstests wird der zeitliche Ablauf überwacht, gegebenenfalls Fehlerbehandlungen (z. B. Toleranzmechanismen) oder Notfunktionen aktiviert.

- Ausführung und Abläufe von Tasks bzw. Prozessen überwachen.
- Defensiv programmieren: Speziell bei der manuellen Programmierung ist eine eingeschränkte Verwendung von Interrupts, dynamischen Objekten, Variablen, Zeigern und Rekursivschleifen vorzusehen. MISRA (Motor Industry Software Reliability Association) Regeln beachten.
- Nach Möglichkeit automatische Codegenerierung anstreben/anwenden [144].

3.2.5.4 Absicherung von Kommunikationsfehlern

Zur Diagnose und Absicherung der Kommunikation stehen zum einen die in 3.1.2 erläuterten Fehlererkennungsmechanismen der Bussysteme zur Verfügung. Darüber hinaus kann die Diagnosefähigkeit und Übertragungssicherheit durch zusätzliche, anwendungsspezifische Maßnahmen gesteigert werden, **Tabelle 3.11**. Die durch die Übertragung von Zeitmarken erweiterten Fehlererkennungsmöglichkeiten unterstreichen das Absicherungspotenzial zeitgesteuerter Bussysteme.

Tabelle 3.11: Absicherungsmaßnahmen bei Kommunikationsfehlern.

Absicherungsmaßnahmen	Fehler				
	Verlust von Nachrichten	Verfälschung von Nachrichten	Falsche Abfolge von Nachrichten	Verzögerung von Nachrichten	unbeabsichtigte Wiederholung
(E) Fehlererkennung bedingt möglich E Fehlererkennung möglich (X) Fehlerkompensation bedingt möglich X Fehlerkompensation möglich					
Fortlaufende Zähler, die mit Nachrichten übertragen werden, kennzeichnen eine Botschaftsaktualisierung	(E)		E	(E)	(E)
Durch die Übertragung einer Zeitmarke kann die Gültigkeit von Nachrichten gesichert werden	E		E	E	E
Zyklische Kommunikation ermöglicht die Erkennung von Erwartungsüberschreitungen	E			E	
Rückmeldung und Bestätigung empfangener Daten	E	E			(E)
Zusätzliche Kennungen für Sender und Empfänger zur eindeutigen Zuordnung von Nachrichten			E		(E)
Wiederholte Übertragung auf einem Kanal und Mehrheitsauswahl der empfangenen Nachrichten	(X)	X			
Übertragung zusätzlicher Sicherungsdaten		E			
Wiederholte Übertragung von bitweise invertierten Botschaftsinhalten		E			
Redundante Übertragung auf parallelen Systemen und Vergleich der empfangenen Nachrichten	X	X	X	X	(X)

In **Bild 3.37** ist eine Auswahl geeigneter Mechanismen dargestellt, weitere Hinweise und Anwendungen aus dem Bereich der Anlagentechnik gibt [180]. Serielle Verfahren verbessern die Fehlererkennung, erhöhen jedoch durch das gesteigerte Datenaufkommen die Auslastungen der Bussysteme. Parallele Systeme bieten ein hohes Leistungspotenzial zur schnellen Diagnose und Kompensation von Fehlern (Redundanz), sind jedoch kostenintensiv und aufwendig.

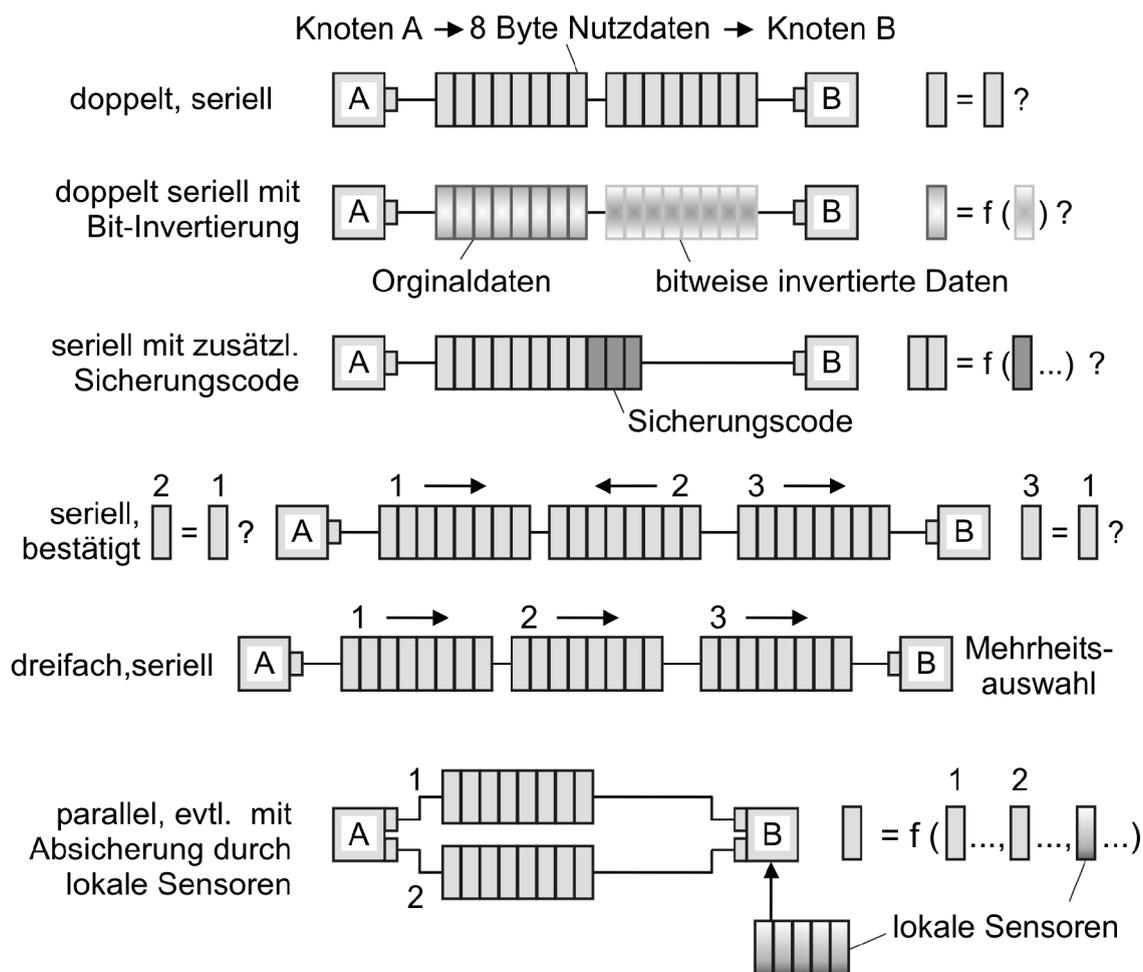


Bild 3.37: Beispiele für Maßnahmen zur Absicherung bitserieller Kommunikation. In den Beispielen werden jeweils 8 Byte Nutzdaten mit einem Bussystem von Knoten A nach Knoten B übertragen.

4 Eingesetzte Entwicklungsmethoden und Werkzeuge

Die Komplexität und Sicherheitsrelevanz fortschrittlicher Fahrtriebe kann mit geeigneten Entwicklungsprozessen beherrscht werden. Grundlagen sowie detaillierte Ausführungen mit Vorschlägen für einzusetzende Methoden sind in [4, 31, 159, 160, 176, 181] beschrieben. Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit angewandten Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung der Signal- und CAN-Kommunikation des Autarken Hybrid (siehe Kapitel 5) an Hand des V-Modells vorgestellt, **Bild 4.1**.

4.1 Spezifikation und Moduldesign

Zur Spezifikation, zum Moduldesign sowie zur Funktionsentwicklung wurden mit MATLAB/Simulink und Stateflow echtzeitfähige Simulationsmodelle erstellt.

Neben einer ausführbaren Simulation des Antriebssystems resultieren aus diesen Entwicklungsschritten Modelle der Steuer- und Regelgeräte, der Antriebskomponenten sowie ein ausführbares Modell des Antriebssystems mit modularen Funktionseinheiten (siehe Kapitel 7). Teil- und Systemfunktionalitäten können in Model-in-the-Loop-Simulationen entwickelt und getestet werden.

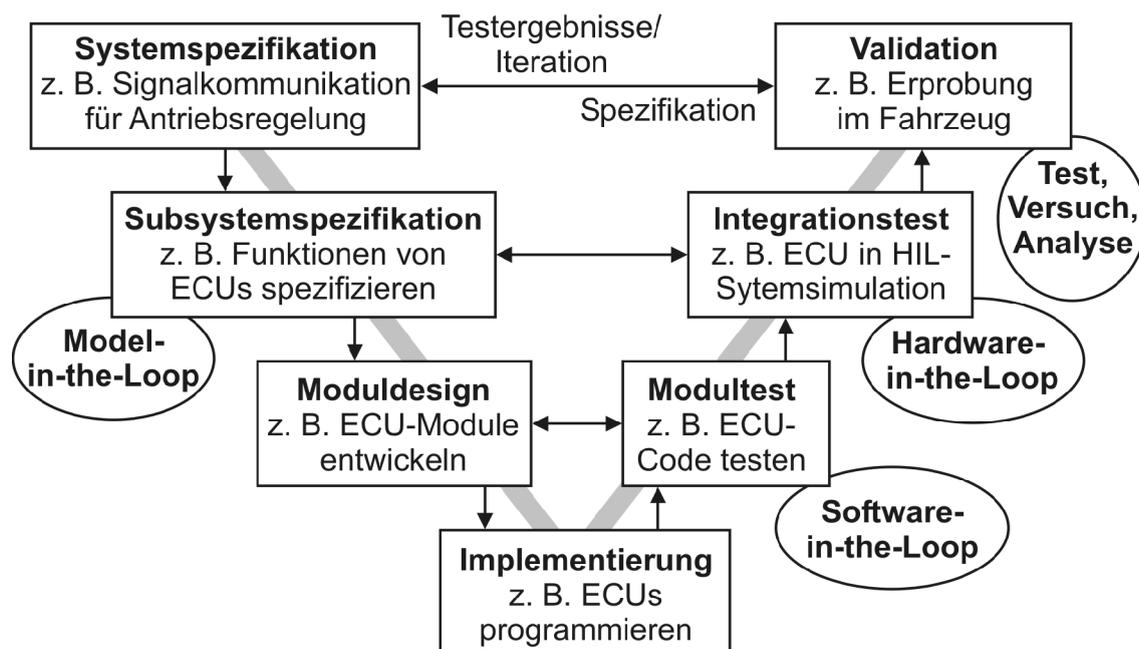


Bild 4.1: Entwicklungsprozess und angewandte Simulationenethoden.

Zur Spezifikation der CAN-Botschaften und Kommunikationsbeziehungen wurde die vor allem in der Automobilindustrie verbreitete Software CANdb++ (Fa. Vector-Informatik) eingesetzt. Sie stellt als Datenbank auch Schnittstellen zur Modellbildung unter MATLAB/Simulink bzw. dSpace zur Verfügung.

4.2 Implementierung

Im Implementierungsschritt wurden Steuer- und Regelgerätefunktionen auf einer frei programmierbaren Entwicklungs-ECU ESX (Fa. Sensor-Technik Wiedemann) eingesetzt. Die auf der Mikrocontrollerfamilie C167 basierende ESX (20 oder 40 MHz Prozessoren, 512 kByte Flash oder EPROM, 256 kByte RAM, 16 KByte EEPROM) stellt folgende diagnosefähige Schnittstellen zur Verfügung:

- 16 Digital- oder Drehzahleingänge
- 8 Analogeingänge (0...8,5 V oder 4...20 mA)
- 4 Digitalausgänge mit maximal 2,5 A, 3 Digitalausgänge mit maximal 4 A, 5 PWM-Ausgänge mit maximal 4 A und Strommessung; alternativ jeweils Spannungsausgänge mit 20...80 % der Versorgungsspannung
- 8,5 V stabilisierte Konstantversorgungsspannung
- eine (bei C167CS zwei) CAN 2.0 B Schnittstelle (Full-CAN-Controller)
- bis zu zwei Erweiterungsmodule mit je 6 zusätzlichen Schnittstellen (z. B. zusätzlicher CAN 2.0 B (Full-CAN-Controller) sowie zusätzliche Ein-/Ausgänge)

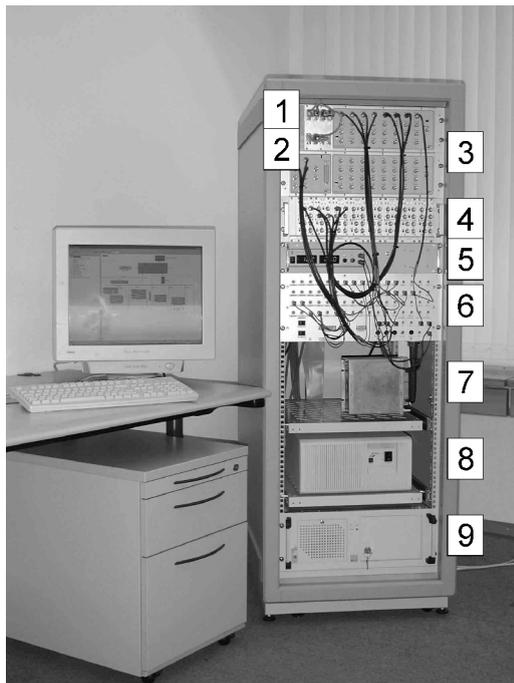
Der Funktionscode kann über einen Tasking Compiler manuell in C oder über eine Oberfläche nach IEC 1131-3 erstellt werden. Zur Einbindung von Schnittstellen und Betriebssystemfunktionen steht ein komfortables Bios (Basic Input/Output System) zur Verfügung. Eine Unterstützung der Softwareentwicklung durch einen Debugger (Werkzeug zur Verfolgung des Programmablaufs) sowie eine automatische Codegenerierung mit dSpace TargetLink ist möglich [182]. Die ESX ist zertifiziert und erfüllt die für Safety Integrity Level 2 gestellten Anforderungen.

4.3 Modultest

In Modultests wurden die entwickelten Softwarefunktionen in Testmodellen (MATLAB/Simulink, Stateflow) untersucht. Analog zum konventionellen Vorgehen kommen dabei „virtuelle Prüfstände“ zum Einsatz. Dabei werden z. B. entwickelte Teilfunktionen einer ECU in Umgebungs- und Schnittstellenmodellen getestet [31].

4.4 Integrationstest

Für HIL-Tests [183, 184, 185] wurden echtzeitfähige Systemsimulationen erstellt (siehe Kapitel 7) und auf einer dSpace-Entwicklungsumgebung gerechnet, **Bild 4.2**.



- 1 Anschluss für 4 CAN-Controller
- 2 Schaltungen zur Fehlersimulation (Kurzschlüsse, Leitungsbrüche, u. ä.)
- 3 Connector Panels zum Anschluss von Ein- und Ausgängen für Spannungs-, Digital- und Frequenzsignale
- 4 Signalanpassung von 0...+10 V auf -15...+15 V sowie -24...+24 mA
- 5 Stromversorgung für ESX (Strom und Spannung aus Simulation steuerbar)
- 6 Anschlussbox für ESX-ECU
- 7 frei programmierbare ESX-ECU (Basis C167, Fa. STW)
- 8 dSpace-Echtzeithardware mit Schnittstellen für Spannungs-, Digital, Frequenzsignale sowie 4 CAN-Controllern
- 9 PC (MATLAB/Simulink, dSpace ControlDesk, Entwicklungstools für ESX-ECU)

Bild 4.2: HIL-Entwicklungsumgebung.

Die Entwicklungsumgebung bietet Echtzeitmodellen einen Zugriff auf Schnittstellen für Spannungs-, Frequenz- und Digitalsignale und vier CAN-Controller. Sie ist damit zur Simulation von CAN-Netzwerken und zur Untersuchung und Absicherung von Steuer- und Regelgeräten geeignet. Zur Analyse der CAN-Kommunikation stellt die CAN-Schnittstelle Werkzeuge zur Verfügung, mit denen neben übertragenen Daten und exakten Zeitpunkten von Kommunikationsereignissen auch die für CAN spezifizierten Fehler zugänglich gemacht werden können.

Für analoge Signale, die nicht direkt von den dSpace-Schnittstellen verarbeitet oder erzeugt werden können, wurde eine Signalanpassung zur Erweiterung des Spannungsbereichs und zur Verarbeitung und Erzeugung von Stromsignalen für 32 Kanäle entwickelt. Eine Test-ECU wird über die Schnittstellenbox mit flexiblen Anschlüssen und Sicherungen in die Simulation mit eingebunden.

Neben dem Funktionsnachweis muss das Verhalten der Zielhardware (hier: ECU und CAN-Netzwerk) im Fehlerfall getestet werden. Dazu wurden zusätzliche Schaltungen zur Provokation von Kurzschlüssen, Leitungsbrüchen und Kontaktproblemen angefertigt und in die Entwicklungsumgebung integriert. Eine aus der Simulation steuerbare Stromversorgung ermöglicht die Simulation von Bordnetzschwankungen sowie Unterversorgungen.

Zur zusätzlichen Beobachtung, Analyse und Aufzeichnung (siehe Kapitel 6 und 7) der CAN-Kommunikation wurde das Entwicklungswerkzeug CANalyzer mit einer PCMCIA CANCardX (Fa. Vector Informatik) eingesetzt. Damit ist auch das Senden

zusätzlicher Botschaften oder Errorframes zur Störung des durch die HIL-Simulation dargestellten CAN-Netzwerks möglich.

4.5 Validierung im Versuchsfahrzeug

Für reproduzierbare Untersuchungen sowie zur Funktionserprobung eines messtechnisch ausgerüsteten Versuchsfahrzeugs (siehe Kapitel 6) stand ein Rollenprüfstand [186, 187] (Hersteller: Renk AG) zur Verfügung.

Bild 4.4 zeigt das Antriebssystem des Prüfstands, **Bild 4.3** Aufnahmen mit dem Versuchsfahrzeug. Der Prüfstand ermöglicht parametrierbare Fahrsimulationen sowie Betriebsarten zur Geschwindigkeits- oder Zugkraftregelung [186, 187].

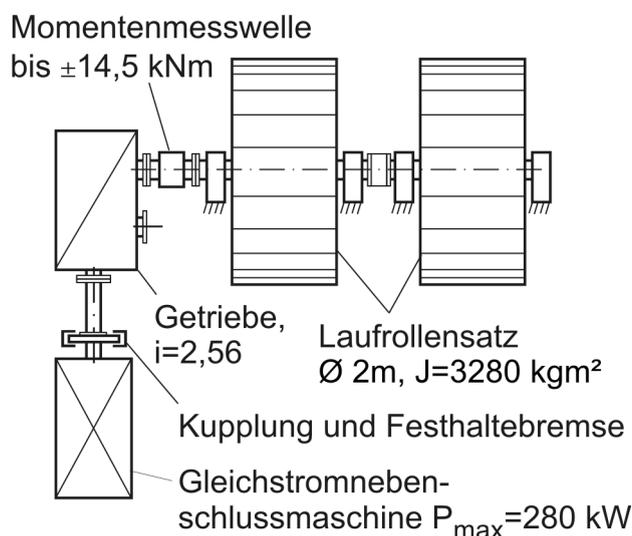


Bild 4.4: Das Antriebskonzept des eingesetzten Einachs-Rollenprüfstands.



Bild 4.3: Das Versuchsfahrzeug auf dem Rollenprüfstand der TU München.

5 Kommunikationskonzept für einen stufenlosen Parallelhybridantrieb

Im folgenden wird das in Kapitel 7 umgesetzte Kommunikationskonzept für den Autarken Hybrid entwickelt.

5.1 Der Autarke Hybrid

Im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs „Umweltfreundliche Antriebstechnik für Fahrzeuge“ (SFB 365, Sprecher: Prof. Dr.-Ing. B. R. Höhn) wurde an der TU München ein stufenloser Hybridantrieb für Pkw entwickelt, in einen Opel Astra Caravan integriert und in Versuchen auf einem Rollenprüfstand sowie auf öffentlichen Straßen untersucht [188, 187].

Bild 5.1 veranschaulicht das Konzept des Parallelhybridantriebs [189]. Die Drehmomente eines über die Trennkupplung (TK) zuschaltbaren Verbrennungsmotors sowie einer auch als Generator nutzbaren Elektromaschine werden in zwei Fahrbereichen (V1 bis ca. 30 km/h, V2 bei höheren Geschwindigkeiten) gewandelt. Dabei er-

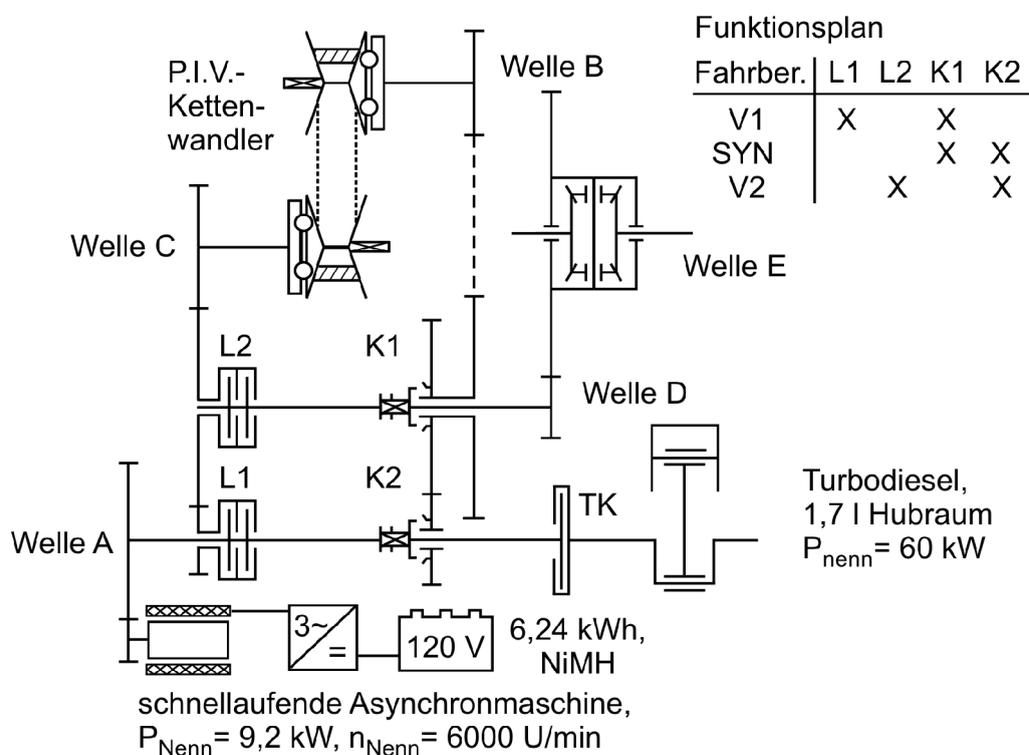


Bild 5.1: Das Antriebskonzept des Autarken Hybrid [189].

möglicht das stufenlose Getriebe den kennfeldoptimalen Betrieb des Verbrennungsmotors. Im Hybridbetrieb kann zudem die Last des Turbodiesels in Bereiche besserer Wirkungsgrade gehoben werden, indem die Elektromaschine zum Laden einer 120 V-Batterie (Kapazität 6,24 kWh, NiMH) genutzt wird. Die 120 V-Batterie versorgt neben dem elektrischen Fahrtrieb auch die für das Antriebskonzept notwendigen elektrischen Komponenten. Bei Bremsvorgängen ist die Gewinnung rekuperativer Energie sowie deren Einspeisung in die Batterie möglich. Im Stillstand und bei niedrigen Fahrleistungen wird der Verbrennungsmotor abgeschaltet.

Durch eine zugkraftunterbrechungsfreie Bereichsumschaltung des i^2 -Getriebes (bei ca. 30 km/h) kann der Verstellbereich des Kettenwandlers (hier 4,73, theoretisch ist mehr möglich) zweimal genutzt und eine große Getriebespreizung von 22,4 erzielt werden. Dies ermöglicht die rein elektrische Bewerkstellung niedriger Fahrleistungen mit hohen Zugkräften (z. B. beim Anfahren, Fahren bei niedrigen Geschwindigkeiten).

5.2 Signalkommunikation für das Antriebskonzept

5.2.1 Systemarchitektur

Zur optimalen Betriebsführung des Autarken Hybrid wird ein Regel- und Managementsystem eingesetzt. **Bild 5.2** zeigt die logische Struktur der Antriebsregelung

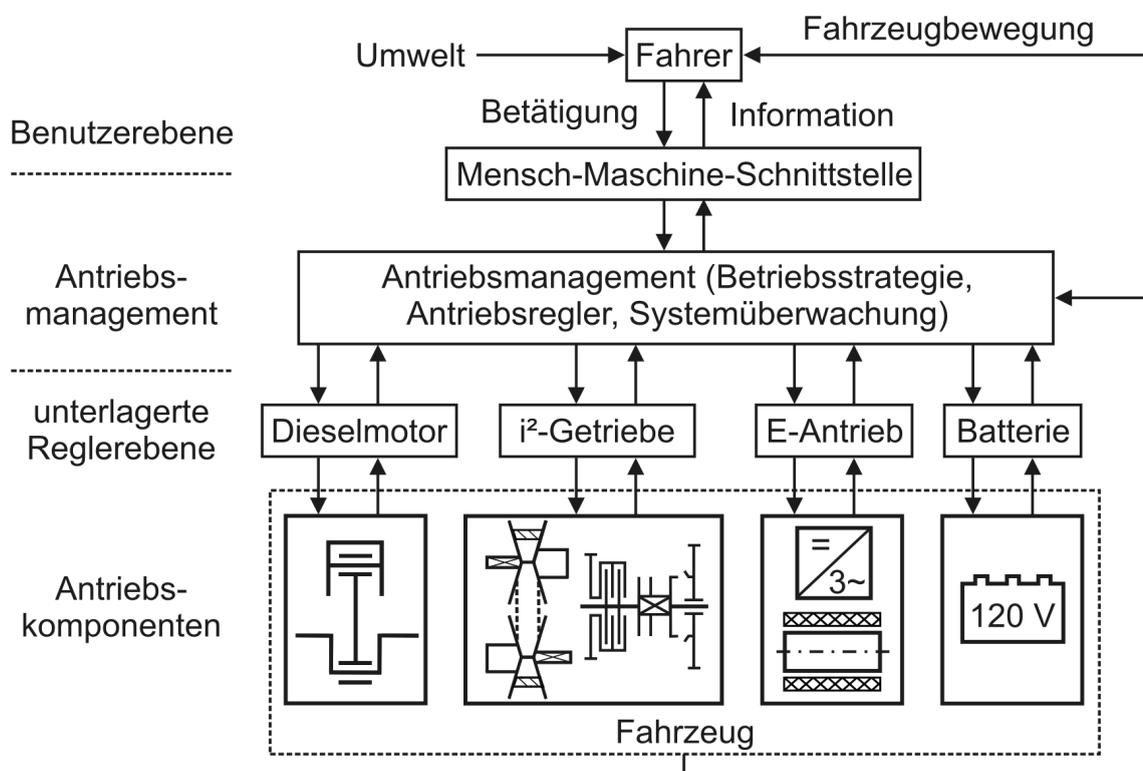


Bild 5.2: Logische Struktur der Antriebsregelung.

[190]. Basierend auf der bereits für das Versuchsfahrzeug vorgeschlagenen und realisierten technischen Systemarchitektur (siehe Kapitel 6 sowie [190, 191, 192]) wurde ein Steuer- und Regelgerätenetzwerk entwickelt, das neben einer sicheren und robusten Antriebsregelung auch Einfehlertoleranzen für die Kommunikation zwischen ECUs und Antriebsmanagement sowie für Funktionen mit hohen Verfügbarkeitsanforderungen bietet, **Bild 5.3**.

Die Komponenten des Antriebskonzepts werden von Baugruppensteuergeräten in schnellen, untergeordneten Teilsystemen kontrolliert. Der Turbodiesel (ECU V), das i²-Getriebe (ECU G), die Elektromaschine (Pulswechselrichter und Asynchronmaschine, ECU E), die 120 V-Batterie (ECU B) und die Fahrerschnittstelle (ECU F) bilden dabei dezentrale Regelkreise. Die Sensor-/Aktor-Kommunikation erfolgt in Analogtechnik, d. h. auf den Einsatz von Sensor-/Aktor-Bussystemen wird hier noch verzichtet. Den Nachteilen der größeren Störanfälligkeit sowie eines erhöhten Verdrahtungsaufwands stehen die Vorteile einer unverzögerten Signalübertragung

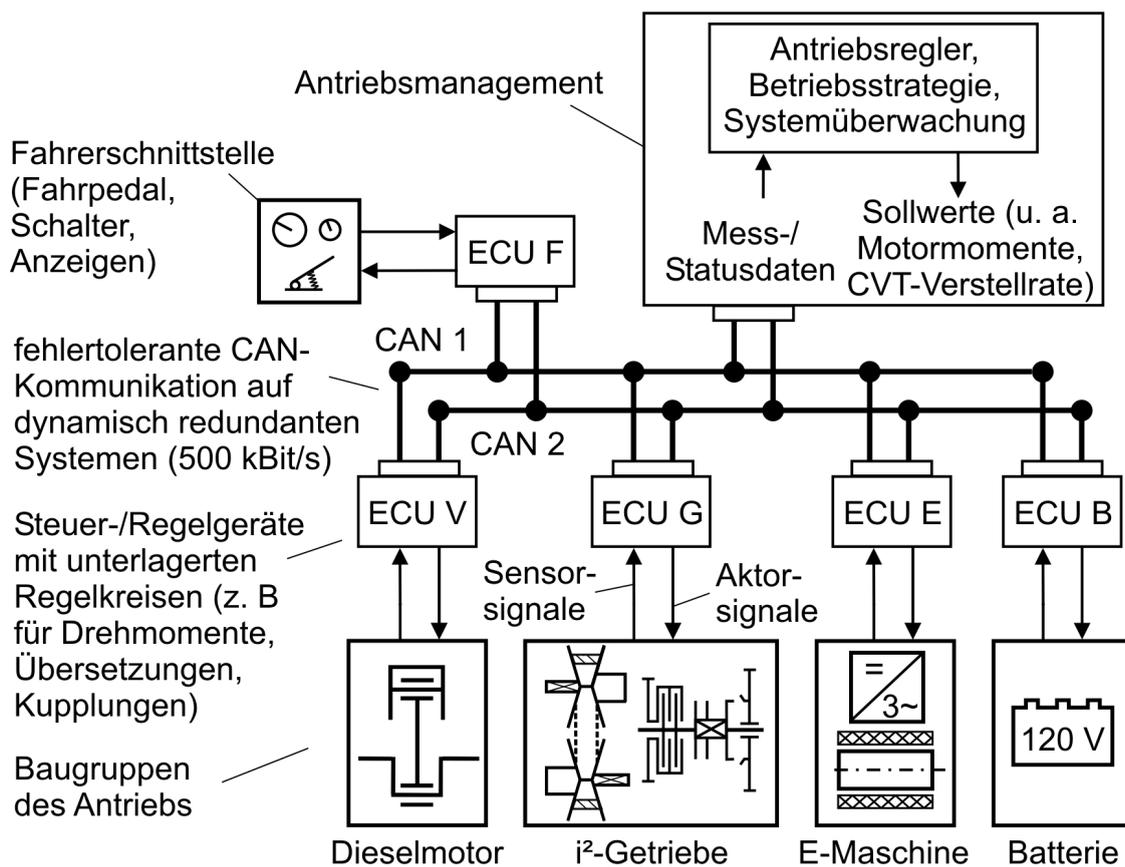


Bild 5.3: Steuer- und Regelgerätenetzwerk des Autarken Hybrid. Die Fahrerschnittstelle übermittelt über CAN Fahrwünsche an das Antriebsmanagement. Dort werden aus Mess- und Statusdaten der Antriebskomponenten Sollwerte berechnet. Diese werden wiederum über CAN an die Steuer- und Regelgeräte der Baugruppen übermittelt. Mit Ausnahme der Betriebsbremsen sind alle Funktionen über das Bussystem verknüpft. Die Signalübertragung in den untergeordneten Baugruppenregelkreisen erfolgt in Analogtechnik.

(schnelle Regelkreise), einer preiswerten und verfügbaren Sensorik sowie einfache Diagnosemöglichkeiten gegenüber.

Ein übergeordnetes Antriebsmanagement [190, 192] kommuniziert mit 100 Hz-Abtastrate über ein fehlertolerantes CAN-System mit diesen Baugruppensteuergeräten. Es sendet dabei Sollwerte für die Regelung, Betriebsführung und Koordination des Antriebs (z. B. Sollmomente, Sollübersetzung). Die Sollwerte werden abhängig von Vorgaben des Fahrers (z. B. Fahrpedalstellung), Messwerten sowie Statusdaten der Baugruppensteuergeräte und der hinterlegten Betriebsstrategie berechnet.

Das Steuer- und Regelgerätenetzwerk kann unter Berücksichtigung der zulässigen Buslast in begrenztem Umfang um weitere ECUs für Fahrdynamik-, Fahrwerks- oder Assistenzsysteme (z. B. ABS, ESP) erweitert und gegebenenfalls als Subnetz in eine Gesamtfahrzeugarchitekturen eingebunden werden. Es ist für eine Integration in eine hierarchische Cartronic-Systemstruktur [193] geeignet. Zur besseren Potenzialausschöpfung bzgl. der Rekuperation bei Bremsvorgängen wäre die vollständige Einbindung der Fahrzeugbremsen in die Funktionalität des Antriebskonzepts denkbar.

5.2.2 Regelungstechnische Anforderungen an die CAN-Kommunikation

Kommunikationsrate

In **Bild 5.4** sind Mindestanforderungen für Abtastraten wichtiger Regelungen des Antriebskonzepts sowie die aus einem benachbarten Projekt des SFB 365 ([190, 192]) vorgegebene Rate des Antriebsmanagements quantifiziert. Ausschlaggebend für die Kommunikationsrate des Bussystems sind die über das Antriebsmanagement zu bewerkstellenden Funktionen. Mit der dafür gewählten Abtastrate von 100 Hz kann

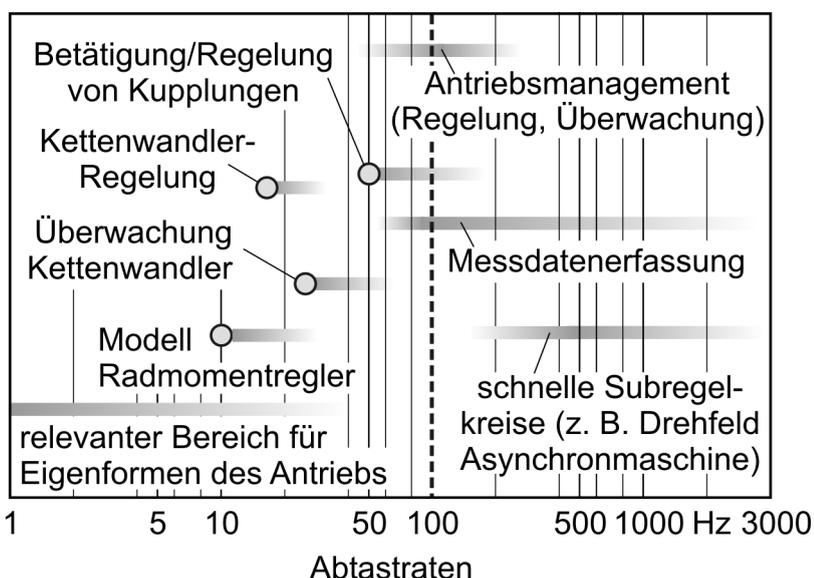


Bild 5.4: Mindestanforderungen an Abtastraten für wichtige Regelungen des Antriebskonzepts. Für das übergeordnete Antriebsmanagement wurde eine Rate von 100 Hz vorgegeben [190, 192].

eine robuste Regelung des Antriebs bei ausreichend schneller Überwachung sicherheitsrelevanter Komponenten realisiert werden [190, 192].

Hohe Anforderung an Abtastraten resultieren aus dem zur Betätigung, Regelung und Überwachung von Kupplungen notwendigen Informationsaustausch. Die fahrkomfortrelevanten Eigenkreisfrequenzen (Bereich < 30 Hz) des Antriebs können nach [190] bereits mit Abtastraten ab 10 Hz beherrscht werden. Die Eckfrequenzen der Stellglieder des Kettenwandlers (ca. 20 Hz nach [194]) sowie die zur Absicherung von Schäden notwendigen Frequenzen liegen in ausreichendem Abstand zur gewählten Abtastrate. Schnelle Vorgänge wie z. B. eingeleitete Momentenstöße können durch die Pumpwirkung des Kettenwandlers [194] kompensiert werden und daher unberücksichtigt bleiben. Regelkreise mit hochdynamischen Anforderungen (z. B. die Drehfeld-erregung für die Asynchronmaschine durch den Pulswechselrichter) und schnelle Überwachungsroutrinen (z. B. Funktion der Hydraulik) werden in den Subregelkreisen bewerkstelligt.

Kommunikationsablauf

Bild 5.5 stellt den für das Antriebskonzept projektierten zyklischen Datentransfer zwischen dem Antriebsmanagement und den ECUs dar. Im 10 ms-Takt werden Sollwerte für die Momente der Antriebe, die Verstellrate (oder Sollübersetzung) des CVT-Getriebes, Befehle (z. B. Fahrbereichswchsel, Verbrennungsmotor an/aus, Trennkupplung zu/auf) sowie Statusinformationen (z. B. Fahrmodus, Empfangsbestätigung von ECU-Alarmen) an die Baugruppensteuergeräte übertragen. Diese synchronisieren auf die Initialisierungen des Antriebsmanagements, arbeiten ihre Programme ab und antworten mit Bestätigungen, Messdaten, Statusinformationen oder Anforderungen.

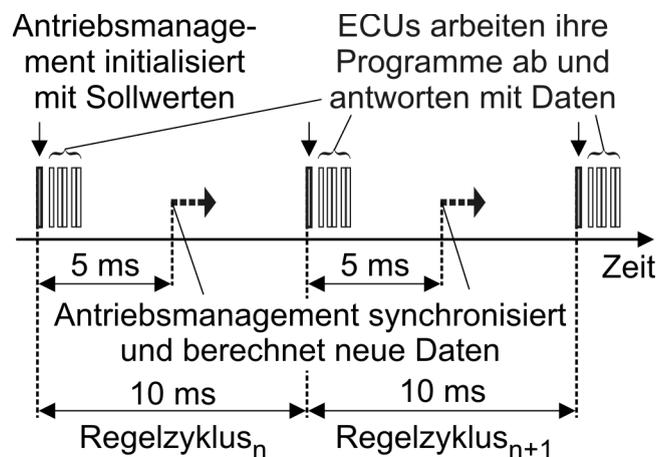


Bild 5.5: Ablauf der zyklischen Kommunikation zwischen Antriebsmanagement, Regel- und Steuergeräten.

Datenvolumen

In **Bild 5.6** sind am Beispiel des Getriebesteuergeräts die während eines Zyklus kommunizierten Informationen dargestellt. Neben den Sollwerten des Antriebsmanagements werden Momente und Drehzahlen benachbarter Baugruppen für adaptive Regler, Plausibilisierungen, Fehlertoleranz- und Überwachungsmechanismen herangezogen (ähnliche wie in [17]). Entdeckte Fehler werden über das Netzwerk gemeldet.

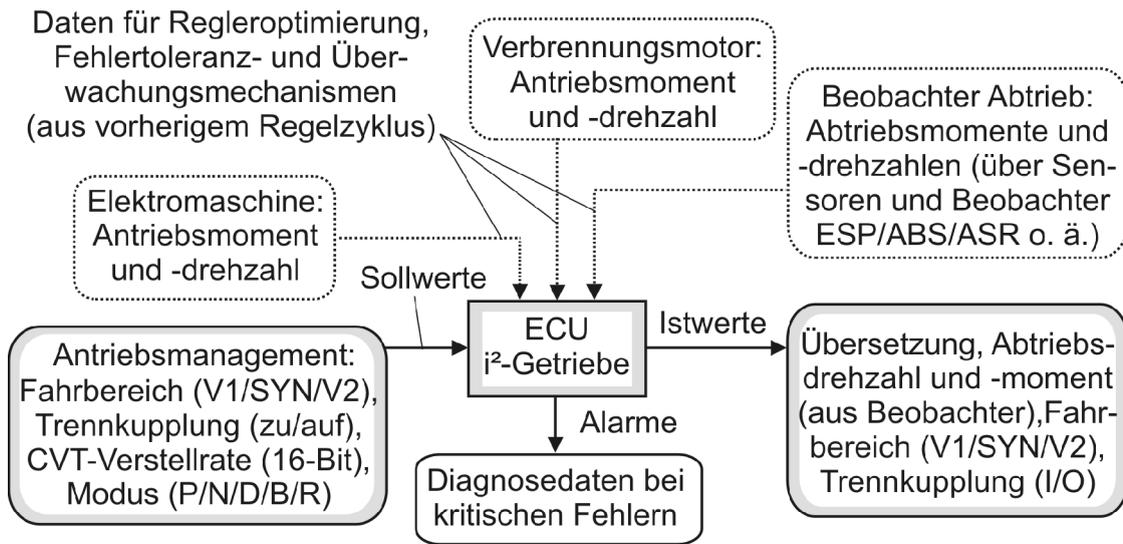


Bild 5.6: Kommunikation am Beispiel des Steuer- und Regelgeräts des i²-Getriebes.

Bild 5.7 fasst das über das Steuer- und Regelgerätenetzwerk zu kommunizierende Mindestdatenvolumen zusammen. Die Signale sind in die mindestens notwendigen Auflösungen quantisiert. Nur für anspruchsvolle Regelungen (Momente, Übersetzung, Drehzahlen) werden Auflösungen von 16 Bit gefordert.

Zusammenfassung:

- Die Kommunikationszyklen sollen möglichst stabil und schnell abgearbeitet werden (100 Hz Regeltakt, korrekter Ablauf).
- Die Synchronisierung der verteilten Regelkreise soll möglichst exakt erfolgen (genauer als 1 ms).
- Möglichst schnelle Systemreaktionszeiten bzw. geringe Latenzzeiten; speziell für Alarme muss ein Buszugriff im Bereich weniger Millisekunden sichergestellt werden.

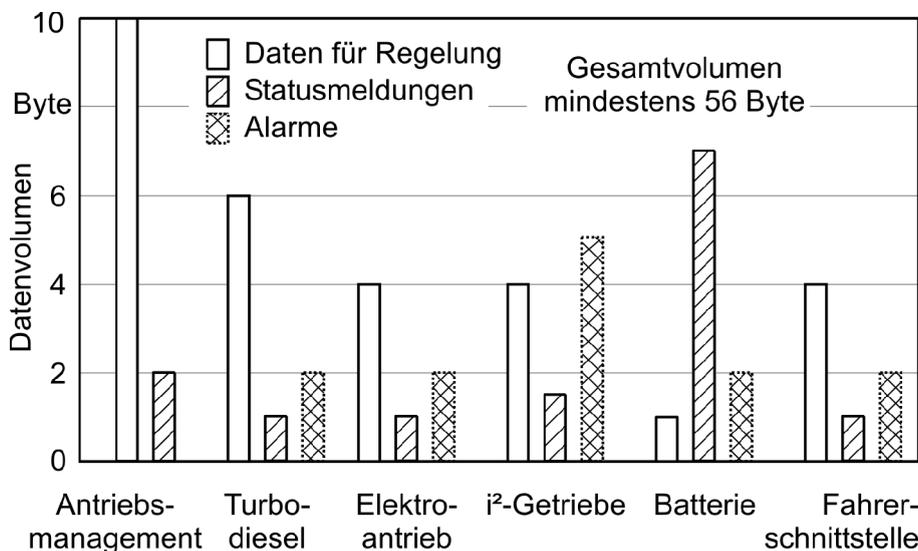


Bild 5.7: Das zur Regelung, Betriebsführung und Überwachung des Autarken Hybrids mindestens zu kommunizierende Datenvolumen.

- Die zulässige Buslast muss eingehalten werden. Kriterium ist der ungünstigste Fall.
- Die Daten sollen korrekt übertragen werden, d. h. deren zeitliche Zuordnung, der Inhalt sowie die exakte Sender- und Empfängerzuordnungen sind abzuschern.

5.2.3 Sicherheitstechnische Anforderungen an die CAN-Kommunikation

Da mit Ausnahme der Betriebsbremsenbetätigung alle wesentlichen Funktionen des Antriebskonzepts durch Kommunikation und Verknüpfungen über das Bussystem realisiert werden, ist das CAN-Netzwerk von besonderer sicherheitstechnischer Bedeutung. Ein manueller Eingriff und eine gegebenenfalls mögliche Gefahrenabwendung (z. B. durch Kupplungsbetätigung) ist konzeptbedingt nicht möglich. Zudem kann das Antriebssystem nicht unerhebliche Verzögerungen erzeugen.

Kritische Fehlerszenarien sind z. B. ein ungewolltes An- oder Auffahren, ein Auslösen der Parksperre am Berg, ein ungewolltes Beschleunigen oder Verzögern oder auch ein ungewolltes Abschalten des Antriebssystems (z. B. im Kreuzungsbereich kritisch). Die mit Risikoanalysen abgeleiteten Anforderungen an die Systemgestaltung (meist SIL 2) wurden bereits in Kapitel 3 allgemein beschrieben. Übertragen auf die CAN-Kommunikation der betrachteten Architektur können folgende Anforderungen zusammengefasst werden:

- Eine Absicherung der kommunizierten Daten bezüglich ihrer Gültigkeit und Konsistenz ist vorzusehen (Inhalt, zeitliche Zuordnung, Aktualisierungsgrad).
- Die Abarbeitung der Kommunikationszyklen muss überwacht werden. In den ECUs sowie im Antriebsmanagement sind entsprechende Diagnosemechanismen, Fehlerbehandlungen sowie Sicherungsfunktionen zu implementieren.
- Die Diagnose der CAN-Hardware ist in die Überwachungsmechanismen zu integrieren (z. B. Eigendiagnose durch Analyse des CAN-Controller-Status).
- Für den Fall von Kommunikationsausfällen sind sichere Rückfallebenen bzw. Notfallstrategien vorzusehen.

5.2.4 Fehlertolerante CAN-Kommunikation auf dynamisch redundanten Systemen

Das Steuer- und Regelgerätenetzwerk für den Autarken Hybrid erfordert anwendungsspezifische Lösungen. Die in [190, 191, 192] veröffentlichten Vorschläge für das Netzwerk des Prototypenfahrzeugs wurden im Rahmen dieser Arbeit detailliert und weiterentwickelt sowie zu einer fehlertoleranten Kommunikation auf parallelen dynamisch redundanten CAN-Systemen ausgebaut [195]. Motivation hierfür war die Steigerung der Verfügbarkeit und der Diagnosefähigkeit des Systems sowie die exemplarische

Umsetzung von Vorschlägen für zukünftige, sicherheitskritischere Assistenzsysteme bzw. -funktionen.

Dynamisch redundante CAN-Systeme

Bild 5.8 zeigt die durch ein Kommunikationsmanagement konfigurierten Betriebsarten der parallelen CAN-Systeme, **Bild 5.9** die CAN-Botschaften mit modusspezifischen Zuordnungen. In der Betriebsart Regelung werden als Antworten auf die Initialisierungen durch das Antriebsmanagement die zur Betriebsführung notwendigen Datentelegramme kommuniziert. In der Betriebsart Überwachung werden diesen bei inhaltlich gleichem Aufbau andere Identifier zugeordnet. Dies ermöglicht eine eindeutige Identifizierung von Telegrammen und die Unterscheidung von Betriebsarten, eine wirksame Überwachung der Antworten und eine einfache Plausibilisierung der auf beiden CAN-Kanälen übertragenen Daten.

Fällt ein CAN-System aus (z. B. durch einen Hardwaredefekt), so kann der redundante Kanal in einer Rückfallebene betrieben werden. Eventuell auftretende und durch die ECUs diagnostizierte Fehler werden einmal je Zyklus bis zur Empfangsbestätigung durch das Antriebsmanagement (Status) als Alarmtelegramm auf den Bussystemen übertragen, die in den Betriebsarten Regelung, Überwachung oder Rückfall konfigurieren

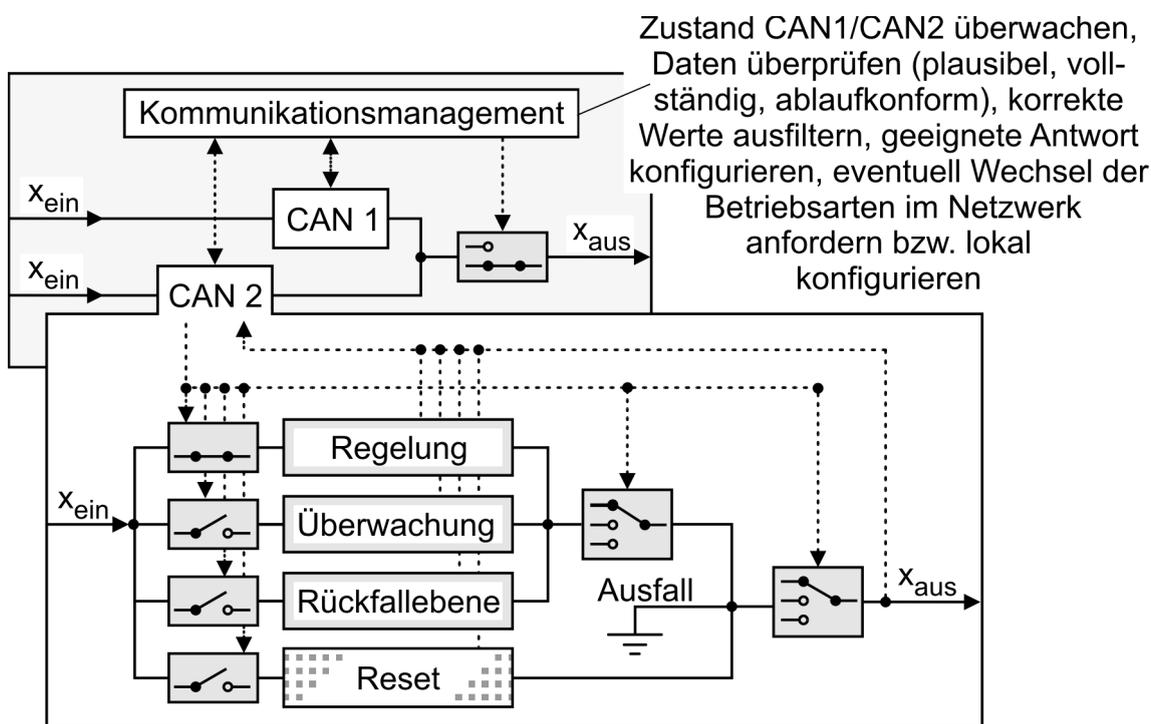


Bild 5.8: Funktion der fehlertoleranten Kommunikation auf dynamisch redundanten CAN-Systemen am Beispiel eines Netzwerkteilnehmers. Das Kommunikationsmanagement konfiguriert abhängig von empfangenen Botschaften und Diagnoseergebnissen der CAN-Hardware Betriebsarten zur Regelung oder Überwachung sowie bei Ausfall eines CAN-Kanals einen Notbetrieb als Rückfallebene. Gegebenfalls kann in einer Reset-Betriebsart die Neukonfiguration eines temporär gestörten Netzwerks vorgenommen werden.

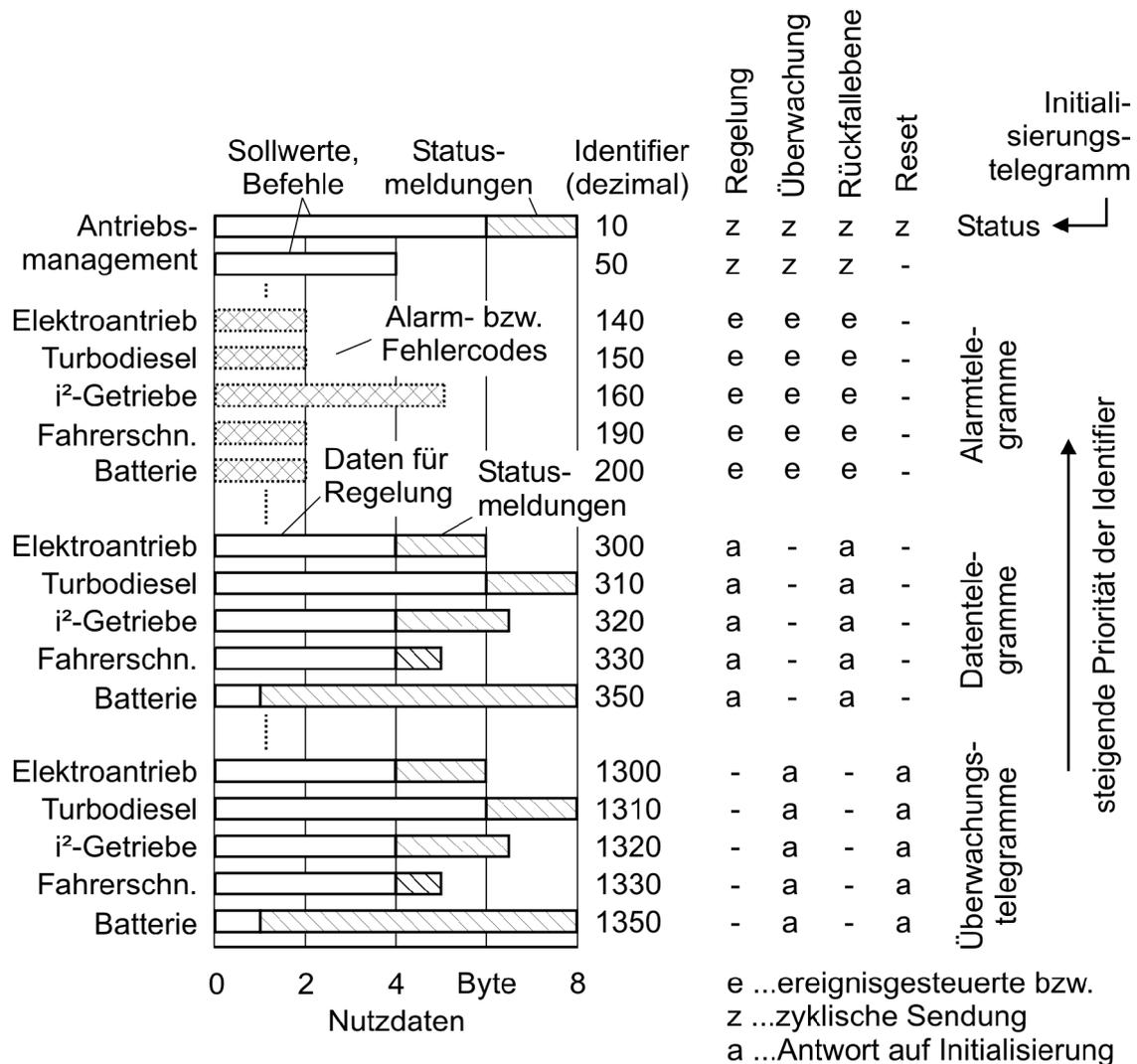


Bild 5.9: Die für den Betrieb des Autarken Hybrid konzipierten CAN-Botschaften mit betriebsartspezifischen Sendezuordnungen. Das Antriebsmanagement versendet ein Initialisierungstelegramm (Sollwerte und Statusmeldungen) sowie ein weiteres Sollwerttelegramm. Mit fallenden Identifizierprioritäten folgen die nur im Fehlerfall einmal je Zyklus versandten Alarmtelegramme, anschließend die sich nur im Identifizier unterscheidenden Daten- bzw. Überwachungstelegramme.

figurierten sind. Die bei gleichzeitigen Zugriffversuchen dominierende höchste Priorität der Identifizier fällt vom Antriebsmanagement zu den Alarm-, Daten- und Überwachungstelegrammen ab. Dadurch werden die Dominanz der Initialisierungstelegramme sowie schnelle Zugriffe für Alarme gewährleistet.

Übertragungsraten und Buslasten

Als Übertragungsrate für die CAN-Systeme wurde der in vielen Serienanwendungen als störsicher bewährte Wert 500 kBit/s gewählt. Im Nennbetrieb ergeben sich damit Buslasten von 14 bis 17 %, **Bild 5.10**. Als Auslegungskriterium für den schlimmsten fehlerfreien Fall muss man das maximal mögliche Datenaufkommen zu Grunde legen.

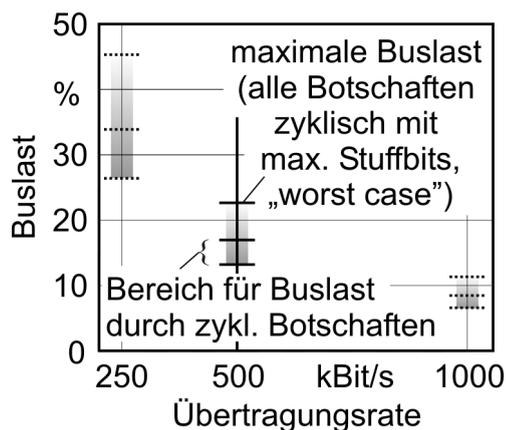


Bild 5.10: Auslastung auf einem CAN. Es wurde eine Übertragungsrate von 500 kBit/s gewählt. Die durch zyklische Botschaften des Antriebsmanagements beanspruchte Buslast liegt im Bereich zwischen 14 und 17 % (je nach Dateninhalt variiert die Anzahl eingefügter Stuffbits). Im schlimmsten Fall erhöht sich durch zyklisches Senden aller Alarmtelegramme die Buslast auf bis zu 23 %. Für Erweiterungen (z. B. ESP, ABS, ACC, u. ä.) könnte ein Bereich bis 30 % ausgelastet werden. Zum Vergleich sind Buslasten bei Übertragungsraten 250 kBit/s bzw. 1 MBit/s eingezeichnet.

In diesem Fall werden alle Daten- oder Überwachungs- sowie Alarmtelegramme im 10 ms-Zyklus gesendet. Es resultiert eine maximale Buslast von bis zu 23 %. Dieser Wert liegt noch unter den für 500 kBit/s maximal anzustrebenden 30 %.

Zum Vergleich sind in Bild 5.10 auch Variationen der Übertragungsraten eingezeichnet. Während sich die Buslasten für die gewählte Abtastrate in einem verträglichen Rahmen bewegen, wären Systeme mit 250 kBit/s bereits überlastet. Darüber hinaus wären die Telegrammlaufzeiten zu lang. Dagegen bietet die für CAN maximal spezifizierte Übertragungsrate von 1 MBit/s die schnellste Abarbeitung bei geringster Buslast. Sie wird jedoch aufgrund der etwas höheren Störanfälligkeit nicht favorisiert (u. a. gibt es darum auch keine breite Serienanwendung mit 1 MBit/s). Für den Prototypen konnte dennoch die in der Projektierungsphase vorgeschlagene Netzwerkvariante mit 1 MBit/s [190, 191, 192] entwickelt und erfolgreich getestet werden [187, 195] (siehe dazu Kapitel 6).

Ablauf von Kommunikationszyklen

Bild 5.11 zeigt beispielhaft einen übertragungsfehlerfreien Kommunikationsablauf bei zwei intakten CAN-Systemen. Das Antriebsmanagement initialisiert mit Sollwertbotschaften. Die ECUs synchronisieren auf diese Initialisierungstelegramme (z. B. durch Auslösung von Interrupts beim Eintreffen der Nachrichten) und konfigurieren abhängig von den übermittelten Statusmeldungen die Betriebsarten Regelung auf CAN 1 sowie Überwachung auf CAN 2. Unmittelbar nach den Initialisierungstelegrammen wird die zweite Sollwertbotschaft des Antriebsmanagements übertragen. Es folgt die Abarbeitung der Steuer-, Regel- und Überwachungsfunktionen durch die ECUs. Anschließend werden auf CAN 1 Daten- und auf CAN 2 Überwachungstelegramme übertragen.

Zur Demonstration sind die nur bei auftretenden und diagnostizierten Fehlern einmal je Zyklus versandten Alarmtelegramme von drei ECUs dargestellt. Durch ihre hochprioritären Identifier können sie bei gegebenenfalls gleichzeitigen Zugriffsversuchen die Übertragung von Daten- und Überwachungstelegrammen verzögern. Die Alarm-

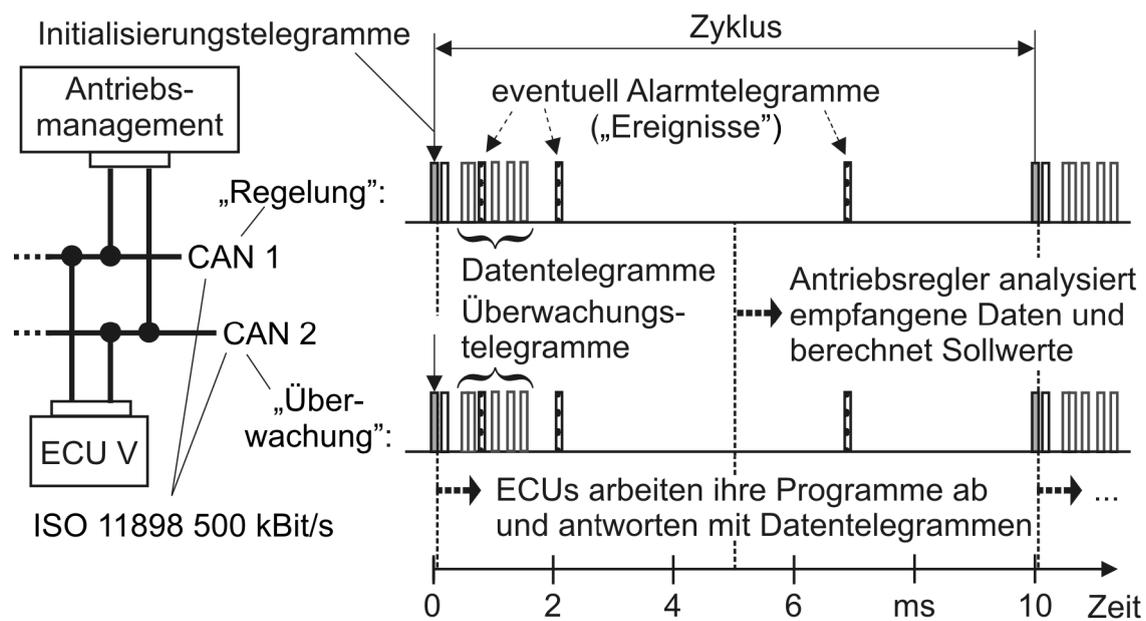


Bild 5.11: Beispiel für einen Kommunikationsablauf. CAN 1 ist in der Betriebsart Regelung, CAN 2 in der Betriebsart Überwachung konfiguriert.

botschaften werden solange gesendet, bis deren Empfang mindestens zweimal durch den Status des Antriebsmanagements bestätigt wurde. Nach 5 ms prüft das Antriebsmanagement die empfangenen Daten der ECUs und berechnet neue Sollwerte.

Kommunikations- und Netzwerkmanagement

Die **Bilder 5.12 bis 5.15** veranschaulichen im Überblick die im Antriebsmanagement sowie in den ECUs hinterlegten Mechanismen des Kommunikations- und Netzwerkmanagements sowie die durch das Antriebsmanagement vorgenommenen Konfigurationen der Betriebsarten der parallelen CAN-Systeme. Um eine Hilfestellung zur Umsetzung der Mechanismen mit geeigneten Modellierungstools (z. B. Stateflow) zu geben, wurden die komplexen Zusammenhänge in Anlehnung an gedächtnisbehaftete Zustandsübergangdiagramme formuliert.

Zur Überwachung der Kommunikation werden als Kriterien Diagnoseergebnisse der lokalen CAN-Hardware (Status der CAN-Controller) und die erwarteten oder empfangenen Initialisierungs-, Daten- und Überwachungstelegramme sowie deren zeitliche Zuordnung herangezogen. Ein eventuell durch ECUs angeforderter Wechsel (signalisiert durch Antwort mit Daten- und Überwachungstelegrammen) des für die Regelung dominanten CAN-Kanals wird erst durch das Initialisierungstelegramm des Antriebsmanagements wirksam umgesetzt.

Für den Eintritt sowie die Verweildauer in Fehler- und Warnzuständen werden Zähler geführt und im EEPROM der ECUs abgelegt. Dadurch kann unter Berücksichtigung eines längeren Beobachtungszeitraums im Zweifel (z. B. beim Systemstart) der

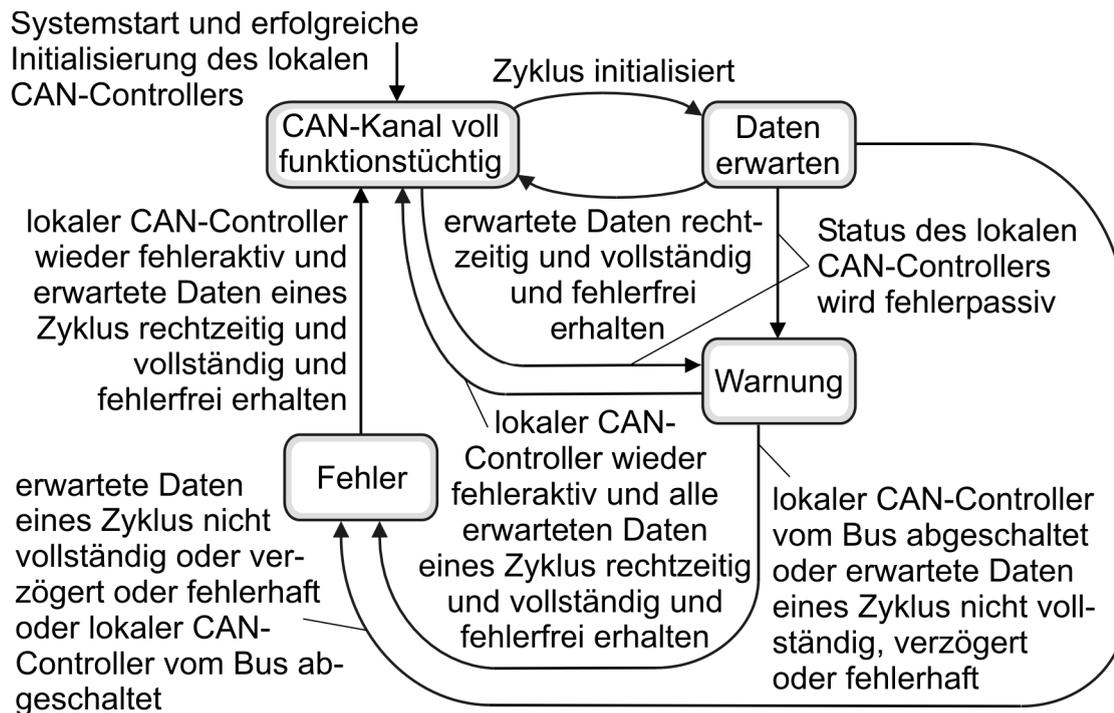


Bild 5.12: Überwachung der lokalen CAN-Hardware (Auswertung CAN-Controller-Status) sowie des Netzwerks (Antworten der ECUs) für einen CAN-Kanal des Antriebsmanagements.

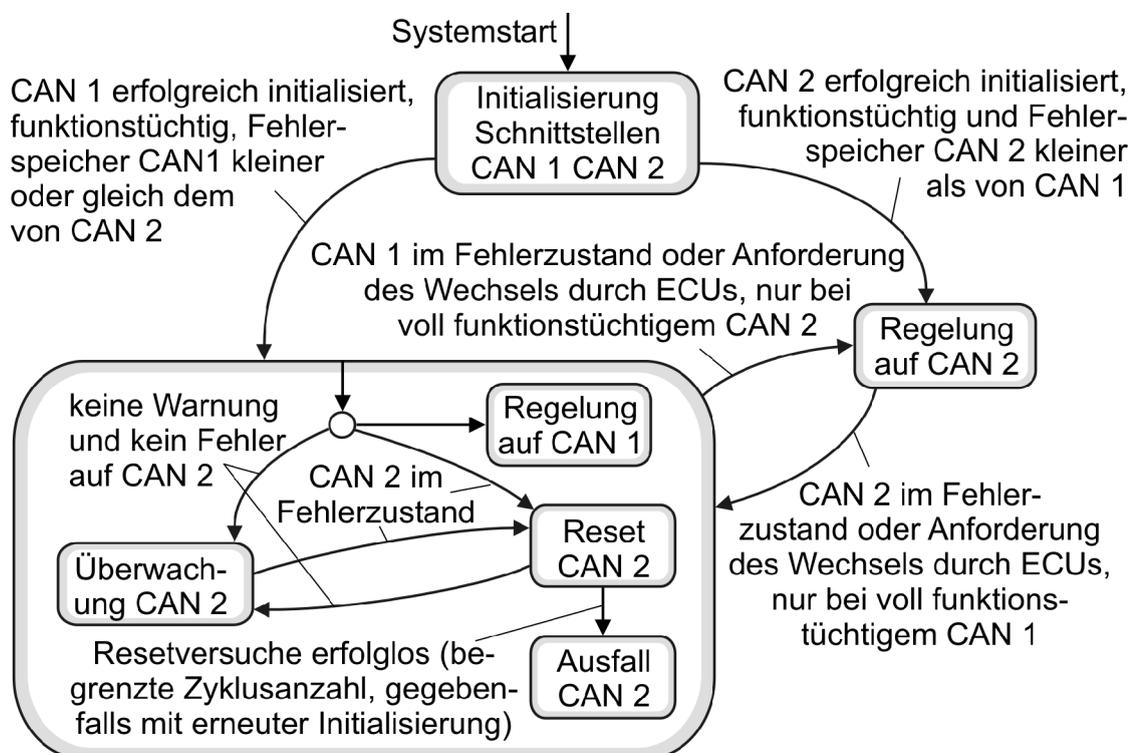


Bild 5.13: Konfiguration der Betriebsarten der CAN-Kanäle des Antriebsmanagements.

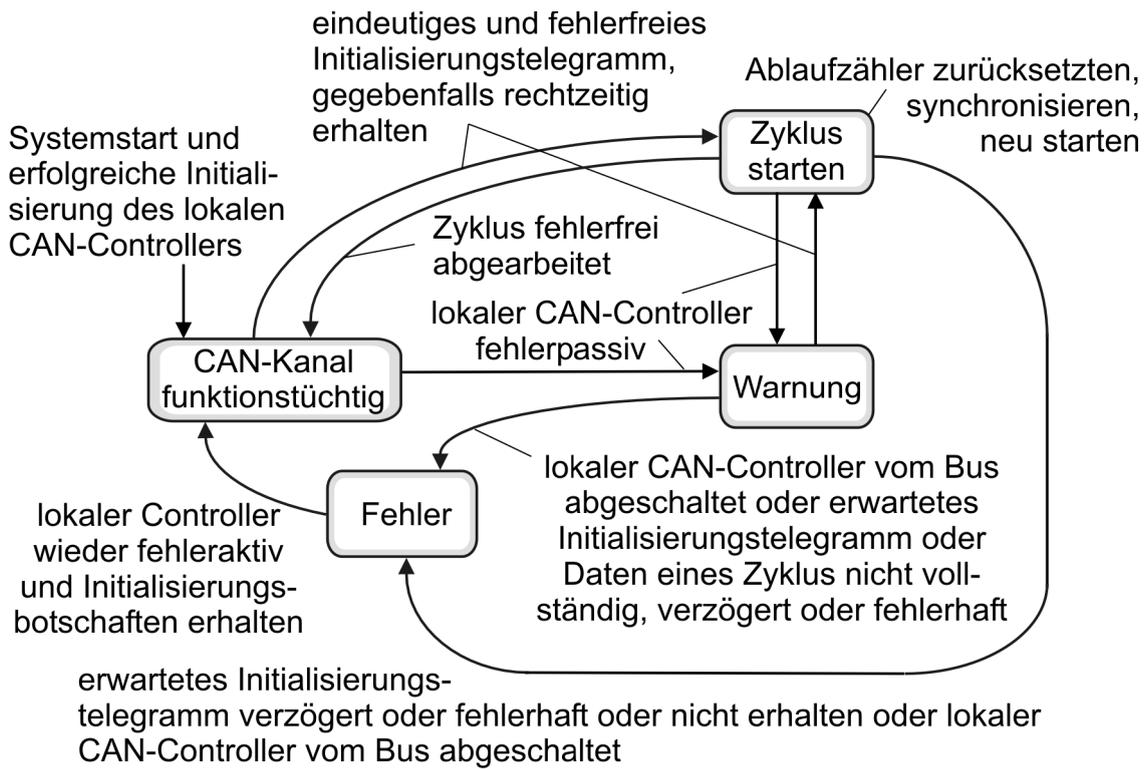


Bild 5.14: Überwachung der lokalen CAN-Hardware (Auswertung CAN-Controller-Status) sowie der Initialisierung und Zyklusabarbeitung für einen CAN-Kanal einer ECU.

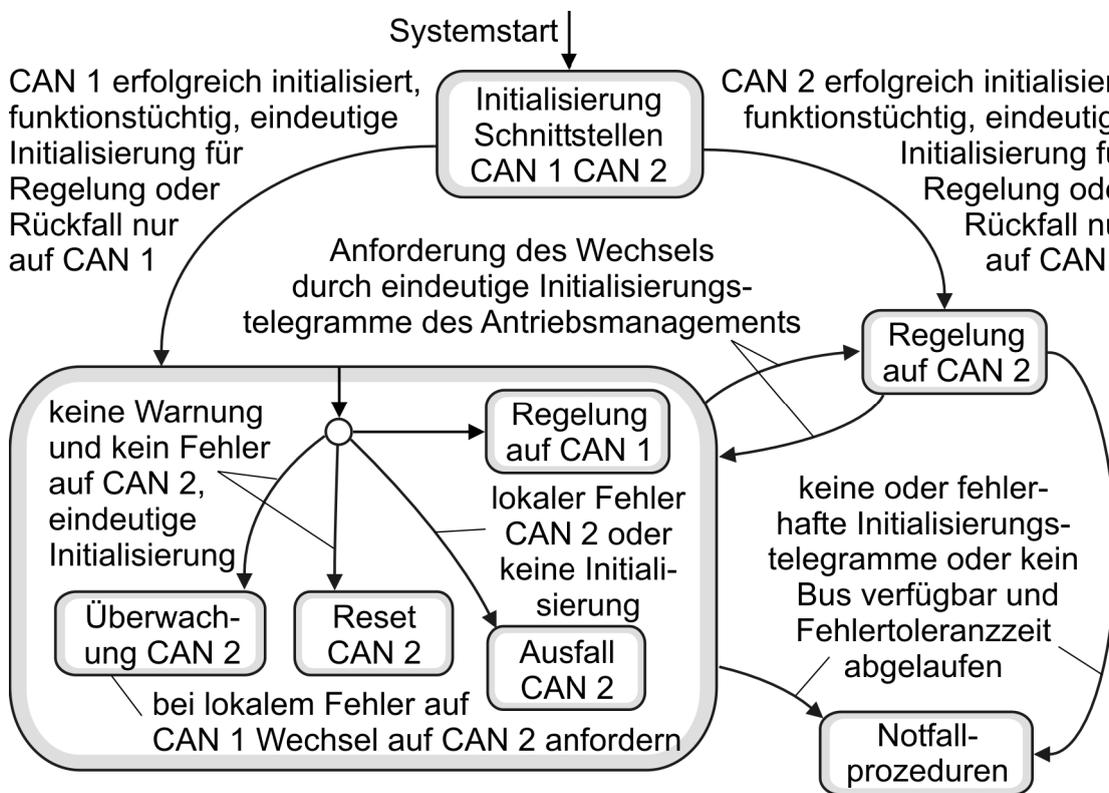


Bild 5.15: Konfiguration der Betriebsarten der CAN-Kanäle einer ECU.

vertrauenswürdiger Kanal für die dominanten Betriebsarten gewählt und es können ferner Servicedaten für die Wartung zur Verfügung gestellt werden.

Die Überwachung des Kommunikationsverlaufs wird im Antriebsmanagement mit dem erfolgreichen und korrekten Senden von Initialisierungstelegrammen gestartet. In den ECUs wird die Kommunikationsüberwachung mit erfolgreichem und korrektem Empfang der Initialisierungsbotschaften ausgelöst. Der Ablaufzähler wird dabei synchronisiert oder neu gestartet, **Bild 5.16**. Erreichbare Synchronisierungsgenauigkeiten zwischen den ECUs und dem Antriebsmanagement liegen unter 0,5 ms.

Die Konsistenz der Initialisierungstelegramme wird zusätzlich zu den Fehlererkennungsmechanismen von CAN durch den übertragenen Status sowie einen 8-Bit Zykluszähler gesichert, **Bild 5.17**. Initialisierungsbotschaften werden als gültig eingestuft, wenn Zykluszähler mit der Sendeabfolge übereinstimmen und der übermittelte Status eine zulässige und eindeutige Konfiguration der Betriebsart erkennen lässt. Mit den Antworten der ECUs (Daten- oder Überwachungstelegramme) wird der aus der Sicht des Senders gültige Zykluszähler zurückgemeldet.

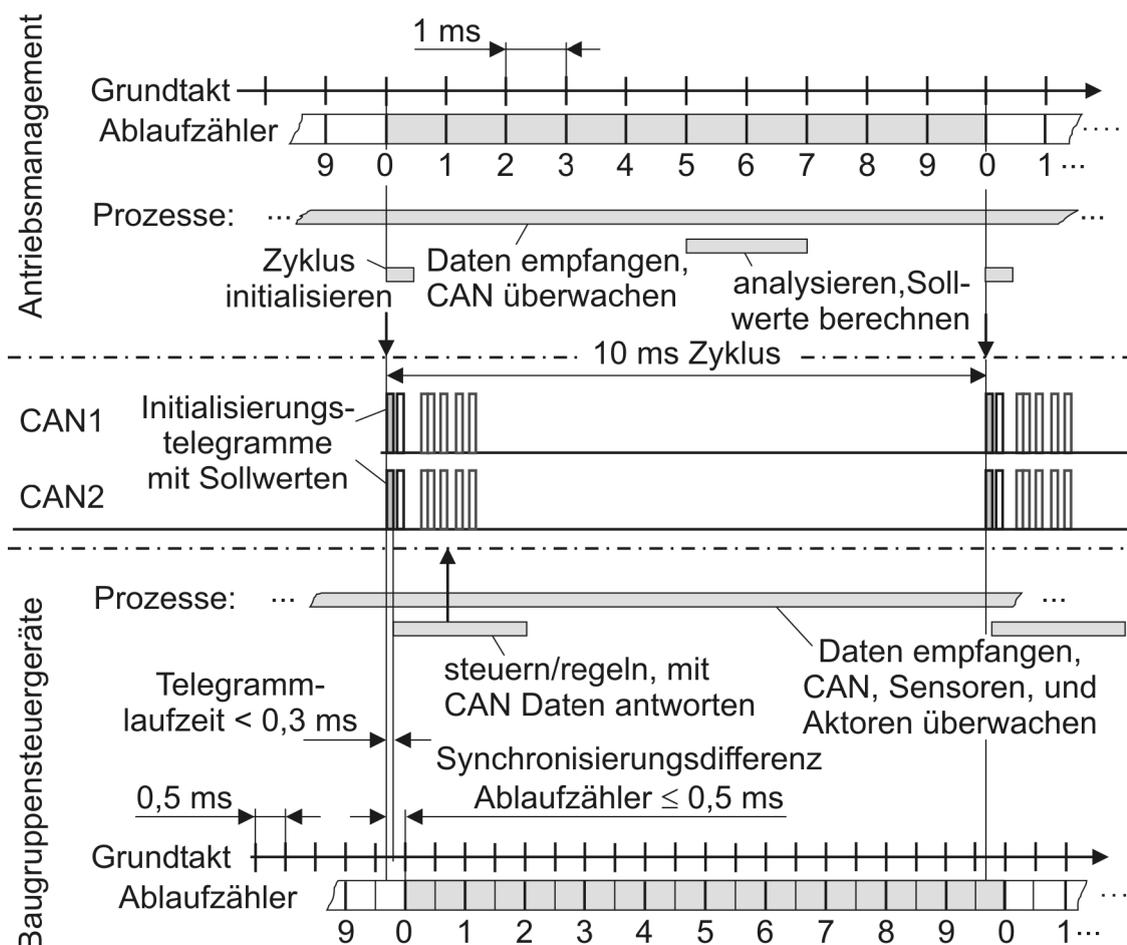


Bild 5.16: Synchronisierung einer ECU auf die Initialisierungsbotschaft des Antriebsmanagements.

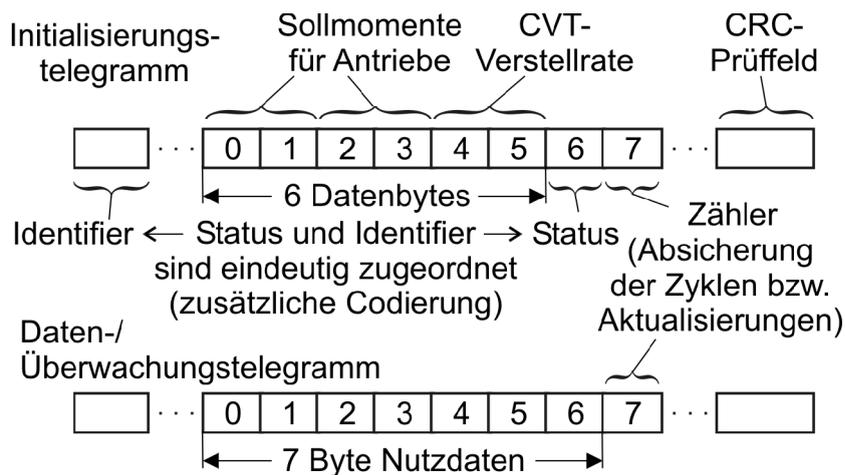


Bild 5.17: Initialisierungstelegramme werden durch eindeutige Zuordnung von Statusmeldungen und Identifier und die Abarbeitung von Zyklen durch einen übertragenen Zählwert überwacht.

Bei Full-CAN-Controllern erfolgt eine zusätzliche Überwachung der Aktualisierung bzw. des Empfangs von Botschaften durch zyklische Abfrage des im CAN-Controller abgelegten Status-Codes (gesetztes Bit bei neuer Nachricht). Bei Ausbleiben der erwarteten Initialisierungstelegramme melden die ECUs zusätzlich Alarme, nach Überschreiten tolerierbarer Fehlertoleranzzeiten (Ablaufzähler wird nicht zurückgesetzt) werden Notfallprozeduren eingeleitet. Wird über 40 ms lang kein eindeutiges und fehlerfreies Initialisierungstelegramm empfangen, wird ein Nothalt [196] eingeleitet (Kupplungen öffnen, Verbrennungsmotor abschalten, E-Maschine abschalten).

Neben der Überwachung des Kommunikationsablaufs müssen die Inhalte der übertragenen Botschaften abgesichert werden. Das CAN-Protokoll stellt mächtige Fehlererkennungsmechanismen und Sendewiederholungen bei erkannten Übertragungsfehlern bereit. Dennoch muss eine geringe Wahrscheinlichkeit unentdeckter Übertragungsfehler (siehe Kapitel 3.1.2) beherrscht werden. Bei kontinuierlichen Signalen wie Sollmomenten, Verstellraten oder Rückmeldungen von Messdaten (z. B. Drehzahlen) können diese meist durch Filter, filterähnliche Wirkungen von Baugruppen oder vergleichbare Maßnahmen abgefangen werden. Kritischer sind Übertragungsfehler bei Schaltbefehlen (Kupplung auf/zu, Motor an/aus).

Bild 5.18 veranschaulicht den angewandten Mechanismus zur Absicherung von Schaltbefehlen. Sind beide CAN-Kanäle im fehlerfreien Betrieb, werden die empfangenen Daten der Initialisierungstelegramme auf Übereinstimmung geprüft. Ist dies der Fall, werden die Daten durch die ECUs akzeptiert und zurückgemeldet. Stimmen sie nicht überein, werden die je Kanal empfangenen Werte sowie Alarmtelegramme an das Antriebsmanagement zurückgemeldet und dort diagnostiziert. Änderungen von Schaltbefehlen werden erst nach dem durch das Antriebsmanagement erteilten Befehl, einer Rückmeldung durch die betreffenden ECUs sowie einer anschließenden Bestätigung durch das Antriebsmanagement wirksam. Dieser Mechanismus funktioniert auch in der Rückfallebe beim Betrieb auf nur einem CAN-Kanal. Beim Betrieb auf par-

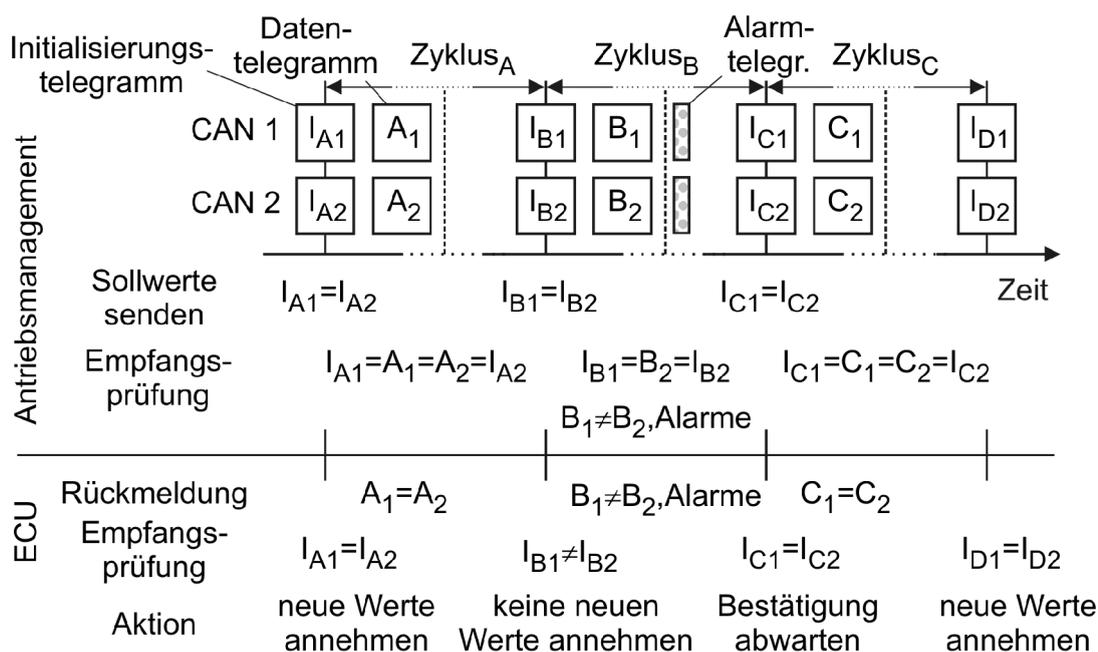


Bild 5.18: Mechanismus zur Absicherung von Schaltbefehlen. Im dargestellten Beispiel wird der Inhalt des Initialisierungstelegramms mit Stellwerten I_B von mindestens einer ECU falsch empfangen. Durch Rückmeldung in Form der Daten- und Überwachungstelegramme (A, B, C) und Alarme kann der Fehler vom Antriebsmanagement eindeutig diagnostiziert werden.

allelen Systemen quadriert sich damit die Wahrscheinlichkeit der Fehlererkennung (siehe Kapitel 3.2.4, Zuverlässigkeit von Parallelschaltungen).

5.2.5 Aktivierung vernetzter Sensorredundanzen

Bild 5.19 zeigt die wichtigsten Sensoren des i^2 -CVT-Getriebes. Zur kostengünstigen Steigerung der Verfügbarkeit bzw. zur Kompensation von Sensorausfällen können die über CAN zur Verfügung gestellten Daten benachbarter Baugruppen unter folgenden Voraussetzungen für Redundanzmechanismen herangezogen werden:

- Die Signalabtastrate muss ausreichend schnell sein.
- Die Genauigkeit des Signals muss dem Regelkreis genügen.
- Die über das Bussystem übertragenen Daten müssen abgesichert sein.

Durch nicht dargestellte Beobachter in den ECUs der Antriebsmaschinen bzw. durch Beobachtern der Längsdynamik lassen sich antriebs- bzw. abtriebsseitige Momente berechnen. Speist man damit ein parallel zur Getriebehardware gerechnetes Modell, können kostengünstige Überwachungs- und Fehlertoleranzmechanismen sowie eine optimierte Regelung realisiert werden.

Beispielhaft wird im folgenden ein Redundanzkonzept für die zur Übersetzungsregelung des Kettenwandlers notwendigen Drehzahlsensoren n_B sowie n_C dargestellt. Für den Sensor n_B kann in allen Fahrbereichen des Getriebes durch einfache Berech-

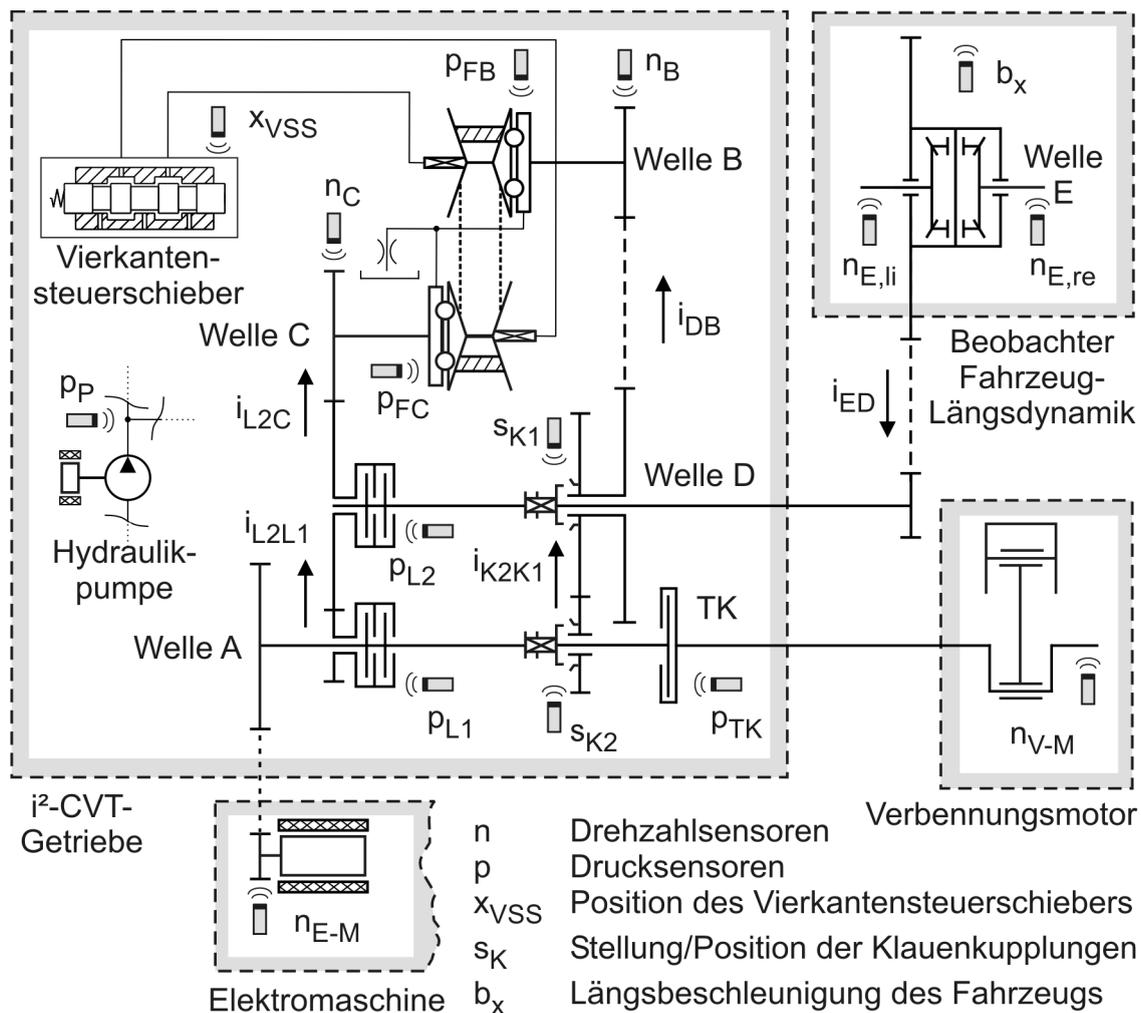


Bild 5.19: Bedeutende Sensoren im i^2 -CVT Getriebe sowie eine Auswahl physikalisch verknüpfter Baugruppen.

nungen (konstante Übersetzungen) ein redundanter Wert für Notfunktionen aus benachbarten Baugruppen abgeleitet werden:

$$\text{Fahrbereich V1 und SYN} \quad n_{B,red} = \frac{n_{E,li} \cdot n_{E,re}}{2} \cdot i_{ED} \cdot i_{DB}$$

$$\text{Fahrbereich V2} \quad n_{B,red} = n_{E-M} \cdot 3 \cdot i_{K2K1} \cdot i_{DB}$$

Für den Sensor n_C kann dieser Mechanismus aufgrund der Entkopplung im Synchronpunkt nur für die Fahrbereiche V1 und V2 genutzt werden:

$$\text{Fahrbereich V1} \quad n_{C,red} = n_{E-M} \cdot 3 \cdot i_{L2L1} \cdot i_{L2C}$$

$$\text{Fahrbereich V2} \quad n_{C,red} = \frac{n_{E,li} \cdot n_{E,re}}{2} \cdot i_{ED} \cdot i_{L2C}$$

Um die Übersetzungsregelung fehlertolerant gegen Sensorausfällen zu gestalten, ist ein zusätzlicher Sensor (z. B. am Außenträger der Lamellenkupplung 2) notwendig.

Bild 5.20 zeigt ein in der Getriebe-ECU hinterlegtes Prinzip für eine fehlertolerante Drehzahl n_B . Wie oben beschrieben, werden Ersatzwerte aus benachbarten Baugruppen berechnet. Zur eindeutigen Diagnose eines eventuellen Fehlers wird ein dritter Wert $n_{B,Modell}$ eines parallel zur Komponente gerechneten Modells herangezogen. Eventuelle Einbußen in der Signalqualität bzw. der Auflösung der Ersatzwerte bleiben zu beachten.

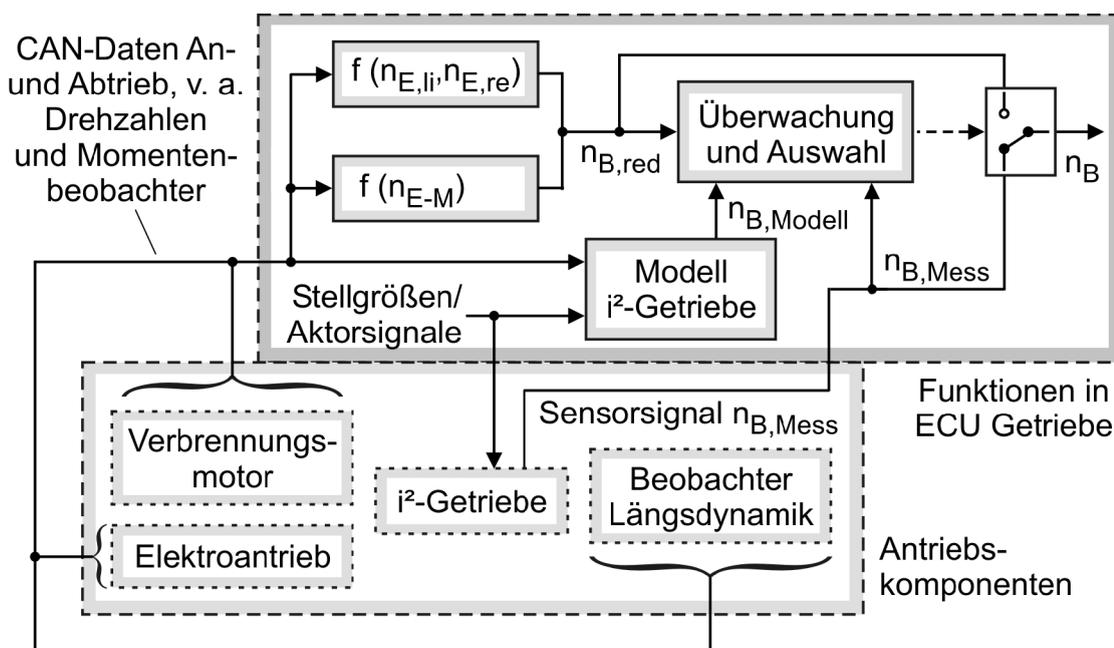


Bild 5.20: Funktionsprinzip für ein fehlertolerantes Drehzahl­signal an der Welle B. Neben dem Messsignal wird ein redundanter Wert aus den An- und Abtriebsdrehzahlen benachbarter Komponenten berechnet. Zur Überwachung, Diagnose und Auswahl der korrekten Drehzahl wird ein dritter Wert aus einem parallel zur realen Baugruppe geführten Modell herangezogen.

5.2.6 Hinweise zur Übertragung auf ein Konzept mit FlexRay

Das eben beschriebene Kommunikationskonzept auf Basis CAN kann auf ein Netzwerk mit FlexRay übertragen werden, **Bild 5.21**. Neben einer gesteigerten Leistungsfähigkeit bezüglich der übertragbaren Datenmengen bietet FlexRay auch Funktionalitäten, die die Absicherung und Überwachung unterstützen und den Aufwand für die Anwendungssoftware reduzieren.

Aufgrund der erwarteten zukünftigen Bedeutung von FlexRay werden im folgenden einige Hinweise zum Transfer der betrachteten Anwendung auf ein FlexRay-Netz-

werk gegeben. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt jedoch keine Umsetzung dieser Vorschläge.

Telegrammaufbau

Die Botschaften können ähnlich wie in Bild 5.9 aufgebaut und bezüglich ihrer Priorität geordnet werden. Da mehr Nutzdaten je Telegramm übermittelbar sind, lassen sich alle Soll- und Stellwerte sowie Befehle in einem Initialisierungstelegramm zusammenfassen. Dabei ist zu beachten, dass für die codierten Nutzdaten nur gerade Anzahlen an Bytes zulässig sind. Codierung und Dekodierung von Botschaften können gegebenenfalls durch die OSEKtime Standards [148] unterstützt werden.

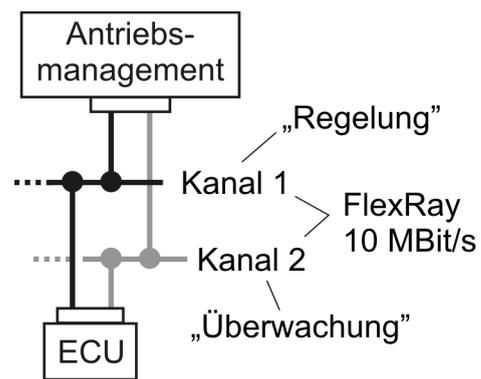


Bild 5.21: Systemarchitektur mit einem FlexRay-Netzwerk in Linientopologie. Der optionale Einsatz eines redundanten Kanals wird vom Protokoll unterstützt.

Die Unterscheidung der Betriebsarten durch modusspezifische Identifier ist denkbar. Da FlexRay Telegramme durch zusätzliche Prüfverfahren (Header CRC und Botschafts CRC) abgesichert sind und gegenüber CAN erheblich mehr Daten pro Botschaft codiert werden können, lassen sich die Differenzierungen der Betriebsarten auch durch in den Nutzdaten übermittelte Informationen und zusätzlichen Sicherungscodes umsetzen. Das Antriebsmanagement kann in einen zentralen Fahrzeugkoordinator integriert werden. Die Initialisierungsbotschaften könnten dazu um weitere Sollwerte für Systeme der Vertikal- und Querdynamik ergänzt werden.

Synchronisierung

Zur Synchronisierung der in den ECUs abgelegten Mess-, Steuer-, Regel- und Überwachungsfunktionen können die in einem FlexRay-Netzwerk verfügbaren Mechanismen genutzt werden [157]. Dabei synchronisieren Teilnehmer ihre lokalen Uhren mittels Differenzen aus erwarteten und tatsächlichen Kommunikationszeitpunkten. Eine globale Zeit hoher Genauigkeit wird also nicht explizit durch Übertragung, sondern lokal durch Abweichungskorrekturen vom Kommunikationscontroller generiert und als Zykluszeit bzw. untergliederte Macrotics den Mikrocontrollern der ECUs zur Verfügung gestellt. Dies entlastet die zu entwickelnde Anwendungssoftware und die Rechenleistung der ECU-Controller. Darüber hinaus stehen auch Hilfsgrößen wie die in Botschaften übertragenen Zyklusähler zur Verfügung.

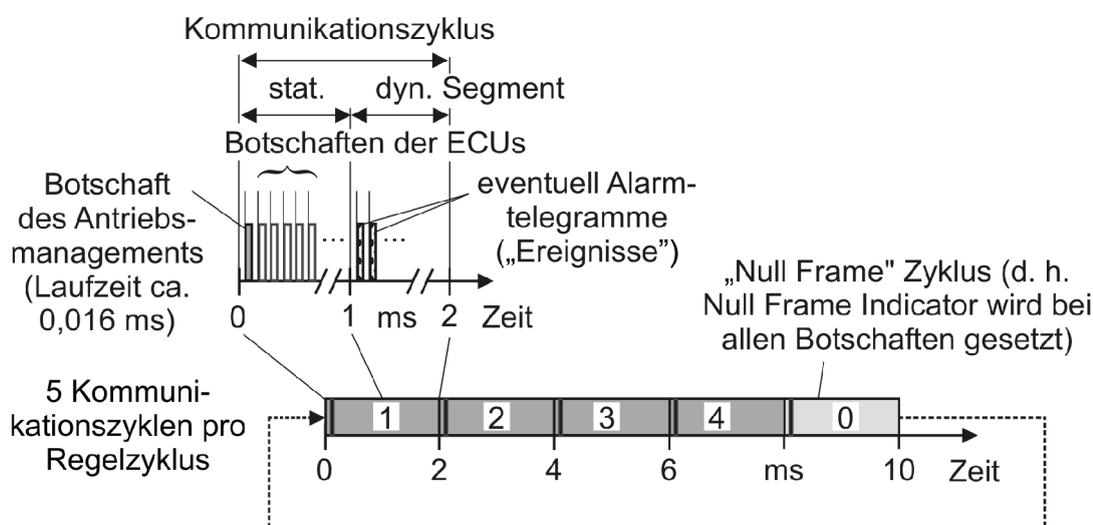
Kommunikationsablauf

Die regelungstechnisch erforderliche Kommunikationsrate von 100 Hz sowie das mindestens notwendige Datenvolumen inklusive Alarmmeldungen führen bei einer Übertragungsrate von 10 MBit/s zu Buslasten von unter 1,5 %. Die Busbelegung durch ein Initialisierungstelegramm des Antriebsmanagements, das in 12 Nutzbyte alle Soll- und Stellwerte, Befehle und Statusmeldungen enthält, liegt bei ca. 0,016 ms. Diese

durch die hohe Datenrate geschaffene Kapazität kann für Absicherungsmaßnahmen genutzt werden. **Bild 5.22** zeigt ein ausgewähltes Beispiel für einen möglichen Kommunikationsablauf. Die Kommunikationsrate wurde dabei auf 500 Hz erhöht, d. h. pro Regelzyklus des Antriebsmanagements werden 5 Kommunikationszyklen abgearbeitet.

In einem Kommunikationszyklus werden in den Zeitschlitzes des statischen Segments zunächst das Initialisierungstelegramm des Antriebsmanagements und anschließend die Daten- oder gegebenenfalls die Überwachungstelegramme der ECUs übertragen. Dies ist nach 1 ms abgeschlossen. Im dynamischen Segment erfolgt die eventuell notwendige Sendung von Alarmtelegrammen, nach 2 ms startet ein neuer Kommunikationszyklus. Ein schneller Buszugang für Alarmtelegramme bleibt damit gewährleistet.

Die Sendewiederholungen ermöglichen die Kompensation gestörter Übertragungen (die bei CAN mögliche Nachrichtenwiederholung besteht hier nicht) sowie eine hohe Sicherheit durch Mehrheitsauswahl gültiger Signale. Im schlimmsten Fall (wenn auch alle Alarmtelegramme zyklisch versandt werden) liegt die Buslast mit unter 7,5 % noch in deutlichem Abstand zur Auslastungsgrenze von ca. 70 %. Erweiterungen



- Zyklus 1: ECUs empfangen neue Sollwerte des Antriebsmanagements und beginnen mit der Sensordatenerfassung
- Zyklus 2: ECUs berechnen Mess-, Steuer- und Regelroutinen und antworten mit Daten; Aktoren werden noch nicht neu gesetzt
- Zyklus 3: ECUs analysieren die nun zum dritten Mal empfangenen Daten des Antriebsmanagements (Mehrheitsauswahl) und setzen bei gültigen Sollwerten neue Aktorsignale
- Zyklus 4: Antriebsmanagement analysiert die wiederholt empfangenen Daten der ECUs (u. a. Mehrheitsauswahl) und berechnet Sollwerte
- Zyklus 0: Es werden keine relevanten Daten übertragen

Bild 5.22: Beispiel für einen möglichen Kommunikationsablauf in einem FlexRay-Netzwerk.

sowie die Integration quer- oder vertikaldynamischer Systeme sind also bedenkenlos möglich. Die Einhaltung der Echtzeitfähigkeit der in den ECUs sowie im Antriebsmanagement zu berechnenden Tasks ist zu beachten.

Überwachung und Fehlertoleranz

FlexRay ist für sicherheitskritische Anforderungen konzipiert und unterstützt den Einsatz redundanter Kanäle zur Absicherung und Kompensation von Übertragungsfehlern und Hardwaredefekten. Das in Bild 5.22 gezeigte Kommunikationsverfahren veranschaulicht exemplarisch, wie durch die hohen Datenraten auch weitere Sicherungs- und Kompensationsmöglichkeiten erschlossen werden können. Darüber hinaus sind die Überwachungs-, Fehlereingrenzungs- und Kompensationsmöglichkeiten durch die dem Kommunikationscontroller vorgeschalteten Buswächter nützlich (siehe Kapitel 3). Die zur Überwachung von Zyklen und Aktualisierungen von Daten eingesetzten Zyklusähler werden bereits durch das FlexRay-Protokoll zur Verfügung gestellt.

6 Versuchsfahrzeug und Fahrversuche

Im Rahmen des SFB 365 wurde das Antriebskonzept Autarker Hybrid [124] in einen Opel Astra Caravan integriert (**Bild 6.1**) und Fahrversuche auf einem Rollenprüfstand sowie auf öffentlichen Straßen durchgeführt [187, 196].

Während in anderen Arbeiten [196] die Funktionalität und Akzeptanz des Antriebskonzepts untersucht sowie die gegenüber dem konventionellen Referenzfahrzeug vorausgesagten Einsparpotenziale überprüft werden konnten, stehen hier folgende Ziele im Vordergrund:



Bild 6.1: Der zum Hybridfahrzeug umgerüstete Prototyp.

- Beschreibung von Architektur und Funktion des für das Versuchsfahrzeug entwickelten Steuer- und Regelgerätenetzwerks. Dieses Netzwerk unterscheidet sich von dem in Kapitel 5 entwickelten Konzept (Details siehe unten) und kann als dessen Vorstufe betrachtet werden.
- Beschreibung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Messsystems.
- Darstellung der Funktionalität des Antriebssystems an Hand aussagekräftiger Messdaten.
- Analyse der CAN-Kommunikation des Antriebssystems im Versuchsfahrzeug.
- Gewinnung repräsentativer Referenzdaten für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte HIL-Systemsimulation (siehe Kapitel 7).

6.1 Steuer- und Regelgerätenetzwerk des Versuchsfahrzeugs

Bild 6.2 zeigt die technische Systemarchitektur des im Versuchsfahrzeug realisierten Steuer- und Regelgerätenetzwerks. Es basiert auf Vorschlägen aus der Projektierungsphase des SFB 365 [190, 191, 192]. Die Komponenten des Antriebsstrangs werden durch 6 ECUs in schnellen Teilsystemen kontrolliert. So bilden die 120 V-Batterie (ECU B), der Pulswechselrichter und die Asynchronmaschine (ECU E), der Turbodiesel (ECU V), das i²-Getriebe (mit einem Steuergerät für den PIV-Kettenwandler und die Hydraulik (ECU H) sowie einem Steuergerät für den Lastschaltvorgang (ECU U) und die Fahrerschnittstelle (ECU F) schnelle, dezentrale Regelkreise.

Ein mit einem dSpace Rapid-Control-Prototyping-System realisiertes übergeordnetes Antriebsmanagement [192] sendet zyklisch im 10 ms-Takt Sollwerte für die

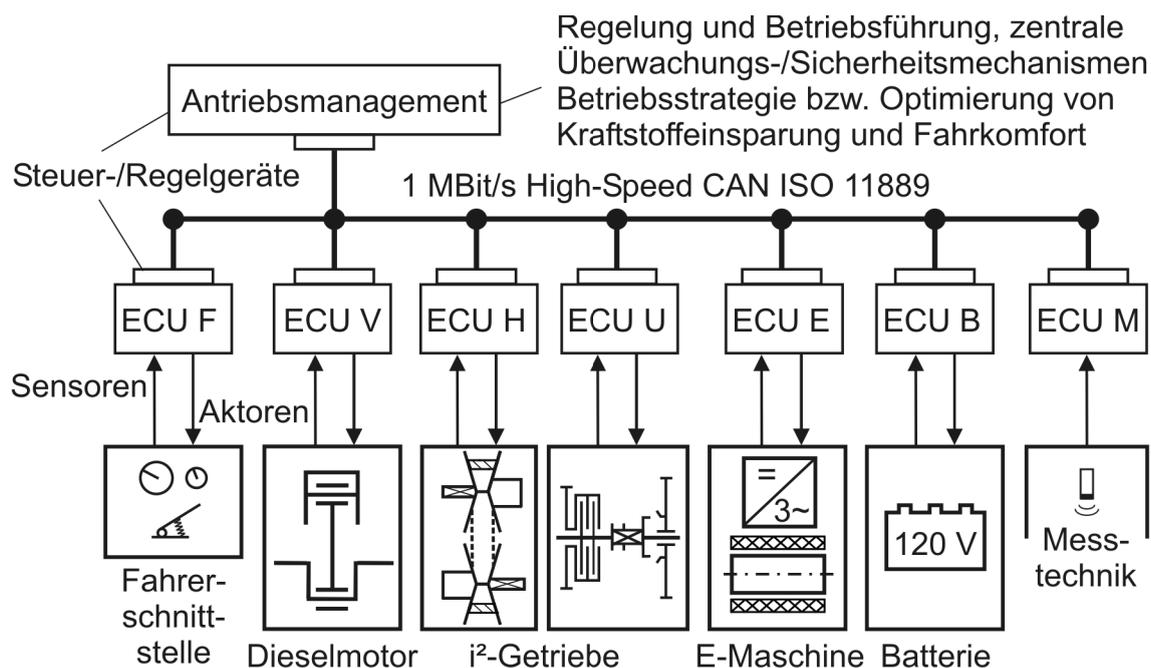


Bild 6.2: Struktur des Steuer- und Regelgerätenetzwerks des Versuchsfahrzeugs.

Betriebsführung der Antriebsstrangkomponenten (z. B. Sollmomente, Sollübersetzung). Die Sollwerte werden abhängig von Vorgaben des Fahrers (Fahrpedalstellung, gewählte Schalter), Messwerten der ECUs und der hinterlegten Betriebsstrategie berechnet. Die Kommunikation läuft dabei weitgehend nach dem in Kapitel 5 beschriebenen Mechanismus ab, d. h. die ECUs synchronisieren auf das vom Antriebsmanagement gesendete Sollwerttelegramm, arbeiten ihre Programme ab und antworten mit Datentelegrammen. Start-, Überwachungs- und Abschaltstrategien sind implementiert. Das Steuer- und Regelgerätenetzwerk des Versuchsfahrzeugs unterscheidet sich von dem in Kapitel 5 beschriebenen System vor allem in folgenden Punkten:

- Die Übertragungsrate beträgt 1 MBit/s (statt 500 kBit/s).
- Das i²-Getriebe wird von zwei ECUs gemanagt (statt von einer).
- Das Netzwerk ist nicht redundant ausgelegt (nur 1 CAN).
- Die Definitionen bzw. die Zusammensetzungen von Botschaften unterscheiden sich teilweise.
- Die Prioritäten von Identifiern sind abweichend definiert: Höchste Priorität haben Alarme, gefolgt von Telegrammen des Antriebsmanagements sowie den Datentelegrammen der ECUs.
- Neben den für das CAN-Protokoll spezifizierten Fehlererkennungsmechanismen sind keine zusätzlichen Sicherungsmaßnahmen implementiert (also keine Zykluszähler oder zusätzliche Codierungen u. ä.).
- Für die Messdatenerfassung wird eine zusätzliche ECU eingesetzt (ECU M).

6.2 Das Messsystem

Das Steuer- und Regelgerätenetzwerk des Versuchsfahrzeugs wurde durch Erweiterungen um zusätzliche Sensoren sowie um eine ECU zur Fahrdatenerfassung zu einem Messsystem ausgebaut [187, 191], **Bild 6.3**.

Die ECU zur Fahrdatenerfassung (ECU M) greift auf Sensoren zur Ermittlung der Momente an den Radantriebswellen (Dehnmessstreifen und Telemetriesystem), der Drehzahlen der Räder und Antriebsmaschinen (Hallsensoren) sowie der Temperaturen von Getriebe- und Motoröl (Thermoelemente) zu. Die ausgewerteten Daten werden auf dem Regelbus sowie mit einer Abtastrate von 1,3 kHz auf einem parallelen CAN (Messbus) zur Verfügung gestellt. Für Untersuchungen auf dem Rollenprüfstand wurden durch die ECU M zusätzliche Schnittstellen (Analogeingänge) bereitgestellt, um auch die Zugkraft und Geschwindigkeit am Rollenumfang oder Geschwindigkeitsvorgaben für die Untersuchung von Fahrzyklen im Netzwerk zu integrieren. Neben dem Vorteil einer umfassenden Datenaufzeichnung beschleunigte und erleichterte die Bereitstellung von Messdaten auf dem Regelbus die Entwicklung der Fahrzeug- bzw. Antriebsregelung [192].

Sensoren des Steuergeräts Fahrerschnittstelle (ECU F) übermitteln neben Aktionen des Fahrers (Fahrpedalstellung, Bremsbetätigung, Wahl von Betriebsmodi) den Kraftstoffdurchfluss (Messgerät PLU 401/108 der Fa. Pierburg) sowie die Kraftstoff- und Lufttemperatur (Thermoelemente), den Stromverbrauch in den Bordnetzen (Spannungsmessung an Shuntwiderständen) und die Längsbeschleunigung (hochauflösender Sensor an Karrosserie im Bereich Mittelkonsole) zur Überprüfung des Fahrkomforts (z. B. während des Umschaltvorgangs oder dem Zu-/Abkuppeln des Verbrennungsmotors).

Insgesamt können über den Regelbus 140 Messwerte, Regel- und Steuergrößen sowie Statusmeldungen des Antriebssystems mit 100 Hz Abtastrate einer zentralen Messdatenerfassung sowie dem Antriebsmanagement zugänglich gemacht werden. Zur Aufbereitung aufgezeichneter Daten wurde eine effiziente Software entwickelt, mit der die CAN-Daten bedarfsgerecht in verschiedene Datenformate (z. B. binäre DIAdem-Formate, Optionen für ASCII, MATLAB) konvertiert werden können. Die Software ermöglicht auch, unter Zugriff auf die CAN-Datenbank des CANalyzers Signalauswahlen zu generieren, Auswertungsbedingungen zu formulieren (z. B. Zeitrahmen bestimmen) oder Korrekturoperationen für die zeitliche Zuordnung von CAN-Daten (z. B. Zeitstempel oder Laufzeitkorrektur) zu nutzen.

Die vollständige Datenaufzeichnung beider CAN-Systeme (Datenstrom: 1,3 MByte/Minute) wurde mit einem Laptop, einer PCMCIA-CANCardX und der Software CANalyzer der Fa. Vector-Informatik bewerkstelligt. Der CANalyzer ermöglicht die Visualisierung, Aufzeichnung oder das Senden bzw. Manipulieren von

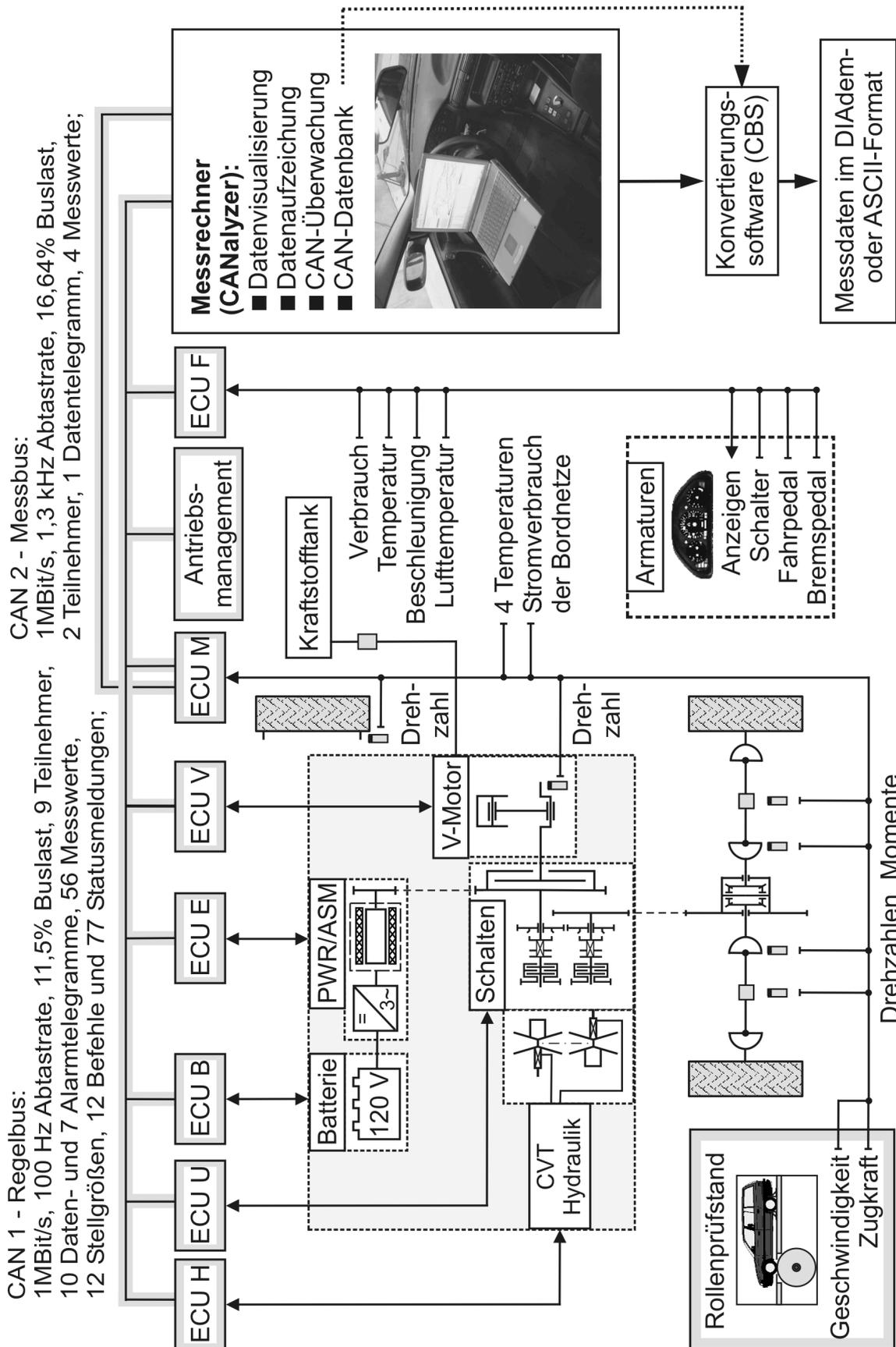


Bild 6.3: Signalkommunikation und Messsystem des Versuchsfahrzeugs.

CAN-Botschaften. Das Werkzeug konnte somit auch zur Inbetriebnahme, zum Test und zur Analyse von Netzwerkdaten (z. B. Buslast, Errorframes) im Versuchsfahrzeug eingesetzt werden.

6.3 Funktionalität und Kommunikation des Versuchsfahrzeugs

6.3.1 Analyse von Funktionalität und Komfort bei Straßenfahrten

Bild 6.4 dokumentiert am Beispiel einer typischen Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr die Funktionalität des Antriebskonzepts im inner- sowie außerstädtischen Bereich. Die Messung beginnt mit einer rein elektromotorischen Fahrt in einer verkehrsberuhigten Zone (0–50 s). Beim Anfahren beschleunigt die Elektromaschine zunächst auf ihre wirkungsgradgünstige Nenndrehzahl. Anschließend wird die Geschwindigkeit durch die einsetzende Verstellung des stufenlosen i^2 -Getriebes weiter erhöht.

Im Zeitraum 50–100 s wird aufgrund einer höheren Leistungsanforderung der Verbrennungsmotor gestartet, seine Drehzahl synchronisiert und die Trennkupplung geschlossen. Im Bereich 100–200 s wird außerorts mit höherer Geschwindigkeit gefahren. Weil dabei nur eine mäßige Beschleunigung gefordert wird (siehe Fahrpedalstellung), wird die Last des Verbrennungsmotors durch den generatorischen Betrieb der Elektromaschine in den wirkungsgradoptimalen Kennfeldbereich gehoben.

Bei ca. 30 km/h (z. B. bei 110 s) erfolgt ein Lastschaltvorgang [197] in den zweiten Fahrbereich des i^2 -Getriebes, in dem die stufenlose Übersetzung wiederholt durchfahren werden kann. Nach Erreichen der gewünschten Geschwindigkeit wird der Turbodiesel abgekuppelt und abgeschaltet. Bei der anschließenden Verzögerung wird mit der Asynchronmaschine Energie zurückgewonnen und in die 120 V-Batterie gespeist. Bei ca. 30 km/h schaltet das i^2 -Getriebe in einem Lastschaltvorgang wieder in den ersten Fahrbereich zurück.

Bild 6.5 zeigt Messdaten zur Beurteilung des Fahrkomforts für einem typischen Anfahr- und Beschleunigungsvorgang im Straßenverkehr. Das Fahrzeug entwickelt abhängig von der Fahrpedalstellung Antriebsmomente und beschleunigt zunächst rein elektromotorisch und ab 18 km/h mit dem Verbrennungsmotor. Die Elektromaschine geht aufgrund der mäßigen Beschleunigungsanforderung in den generatorischen Betrieb über.

Im Synchronpunkt (Übergang zwischen den Fahrbereichen) wird die Antriebsleistung über konstante Übersetzung gewandelt. Zum weiteren Beschleunigen (siehe Fahrgeschwindigkeit) wird darum während der Synchronphase die Drehzahl des Dieselmotors angehoben und gleichzeitig die Generatorlast der Elektromaschine gesenkt. Unmittelbar danach wird die Dieselmotordrehzahl bewusst wieder stark abgesenkt

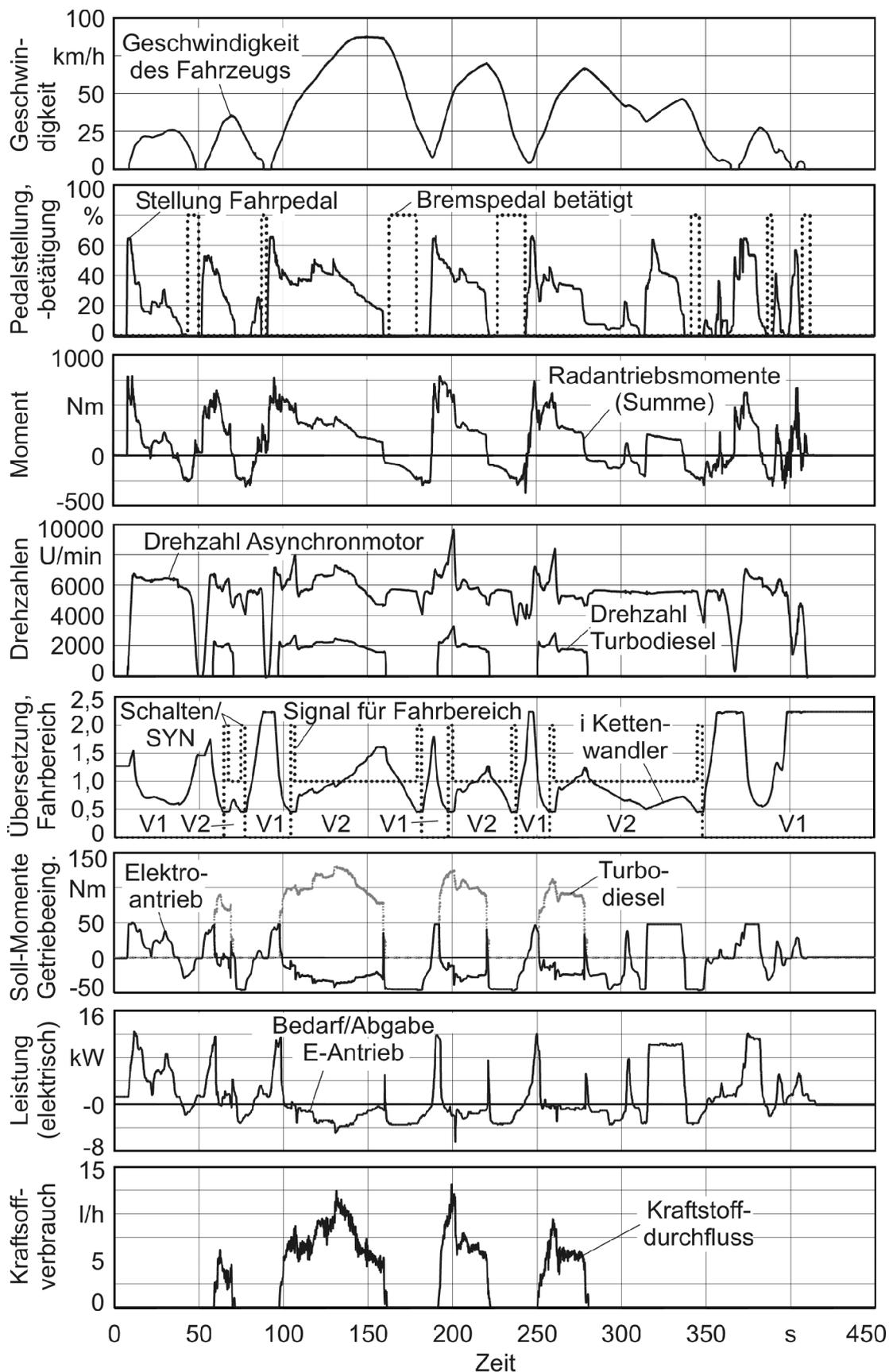


Bild 6.4: Ausgewählte Messdaten zur Demonstration der Funktion des Autarken Hybrid im öffentlichen Straßenverkehr.

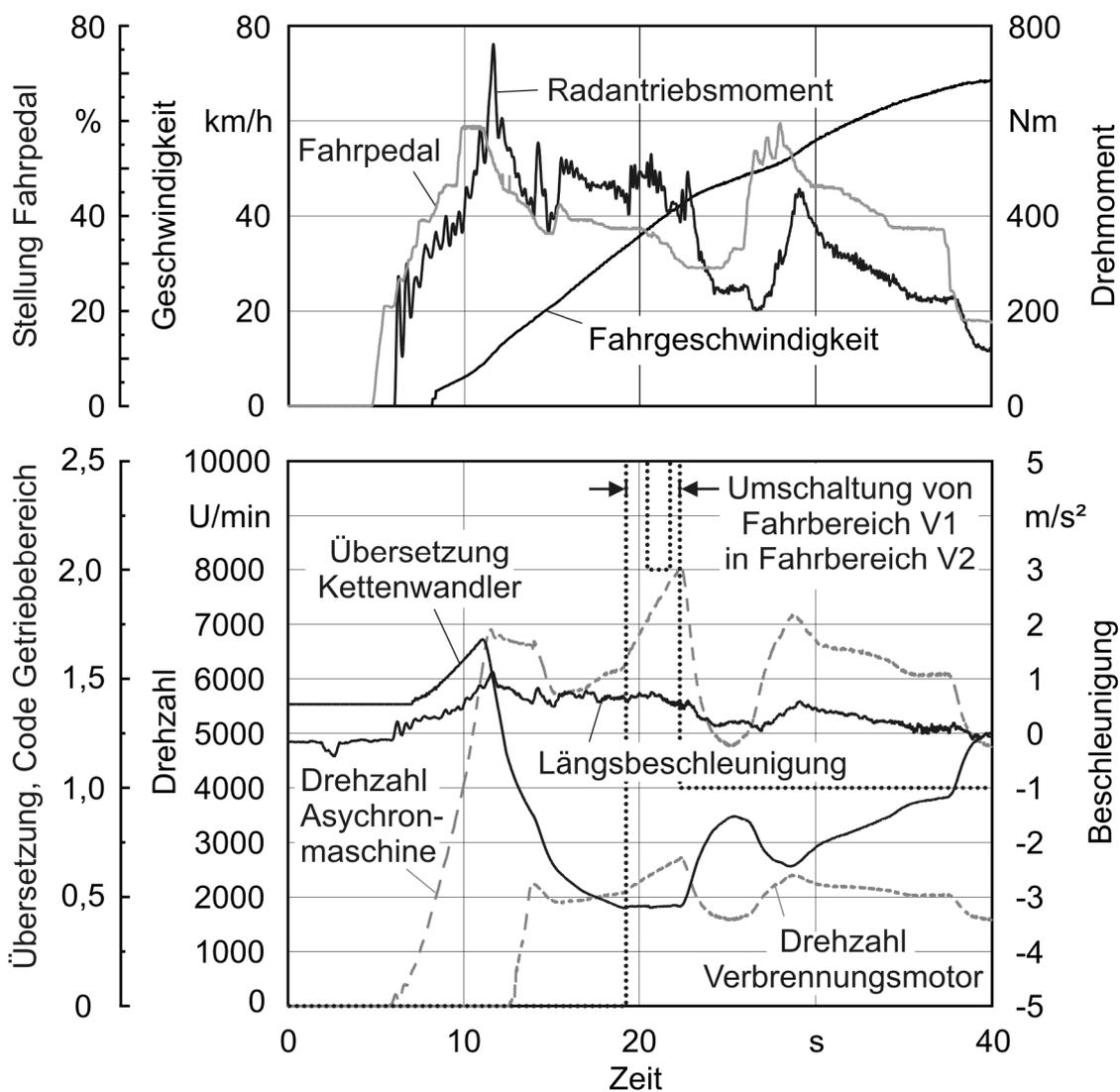


Bild 6.5: Typischer Beschleunigungsvorgang im Straßenverkehr.

und die weitere Beschleunigung durch eine rasche Verstellung des Kettenwandlers erreicht. Der im Bereich der Mittelkonsole karosseriefest angebrachte Längsbeschleunigungssensor zeigt, dass der Schaltvorgang ohne Komforteinbußen unter Zugkraft durchfahren wird. Nach dem Umschaltvorgang können die Drehzahlen der Antriebsmaschinen wieder zurückgenommen werden.

6.3.2 Versuche auf dem Rollenprüfstand

6.3.2.1 Reproduzierbare Fahrsimulationen auf dem Rollenprüfstand

Das messtechnisch ausgerüstete Versuchsfahrzeug wurde auf einem Rollenprüfstand erprobt und optimiert [186, 187, 196]. Dabei konnten auch reproduzierbare Referenzdaten zur Parametrierung der Systemsimulationen (siehe Kapitel 7) ermittelt werden. Eine dafür voraussetzende korrekte Fahrsimulation, bei der die Momente an den

Radantriebswellen des Fahrzeugs denen bei realen Straßenfahrten entsprechen, wurde nachgewiesen und mit Fahrversuchen abgeglichen [187]. Die veränderten Abrollbedingungen der Antriebsräder auf den Laufrollen sowie die am Rollenprüfstand stehende Hinterachse wurden bei der Parametrierung des Rollwiderstands berücksichtigt. Für eine Fahrsimulation ist am Umfang der Laufrollen folgender Zugkraft-Sollwert $F_{Z,RPS,soll}$ zu beaufschlagen:

$$F_{Z,RPS,soll} = F_{FW} + F_B + F_{W,Roll,RPS}$$

$$\text{mit } F_{FW} = \frac{1}{2} c_{W,Fzg} A_{Fzg} \rho_{Luft} v_{FZG}^2 + m_{FZG} g f_{Rad} + m_{FZG} g \sin \alpha$$

$$F_B = m_{FZG} \dot{v}_{FZG}$$

$F_{W,Roll,RPS}$: Rollwiderstand der Achse auf dem Laufrollensatz, geschwindigkeitsabhängig, in Schleppversuchen messbar

Die Zugkraft wird über das am Laufrollensatz antreibende oder bremsende Moment $M_{M,RPS}$ eingeregelt, **Bild 6.6**. Der Regelung des Rollenprüfstands stehen dazu die Daten einer Drehmomentmesswelle sowie die Winkelgeschwindigkeit der gekoppelten Rollen zur Verfügung. Bei Kompensation der geschwindigkeitsabhängigen Verluste $M_{W,RPS}$ aus Reibung im Laufrollensatz (v. a. Lagerreibung, messbar in einem geschwindigkeitsgeregtem Betriebsmodus ohne Fahrzeug) sowie der Trägheit J_{RPS} des Laufrollensatzes gilt für das einzuregelnde Moment $M_{M,RPS,soll}$:

$$M_{M,RPS,soll} = F_{Z,RPS,soll} r_{RPS} + M_{W,RPS} + J_{RPS} \dot{\omega}_{RPS}$$

mit $\dot{v}_{FZG} = \dot{\omega}_{RPS} r_{RPS}$

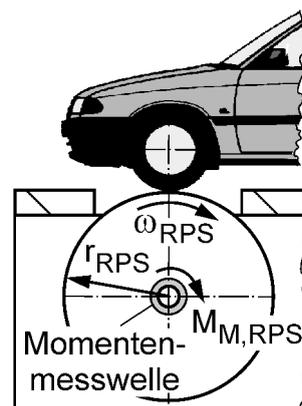


Bild 6.6: Mechanik am Laufrollensatz.

Bild 6.7 zeigt oben die durch den Prüfstand theoretisch zu beaufschlagenden Zugkräften. Zur Veranschaulichung wurden sie mit dem dynamischen Rollradius auf Radmomente umgerechnet und zusammen mit den gemessenen Radantriebsmomenten dargestellt. Als Differenz können Rollwiderstandsmomente der Vorderachse auf dem Laufrollensatz sowie als zusätzlicher Messwert Bremsmomente des Fahrzeugs analysiert werden.

Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit (z. B. in der Zeit von 925–960 s), pulsierende Beschleunigungsvorgänge (z. B. in der Zeit von 975–1050 s provoziert), Verzögerungen mit reiner Rekuperation (965–980 s) sowie mit zusätzlichem Bremsengriff (1210–1225 s) werden korrekt simuliert.

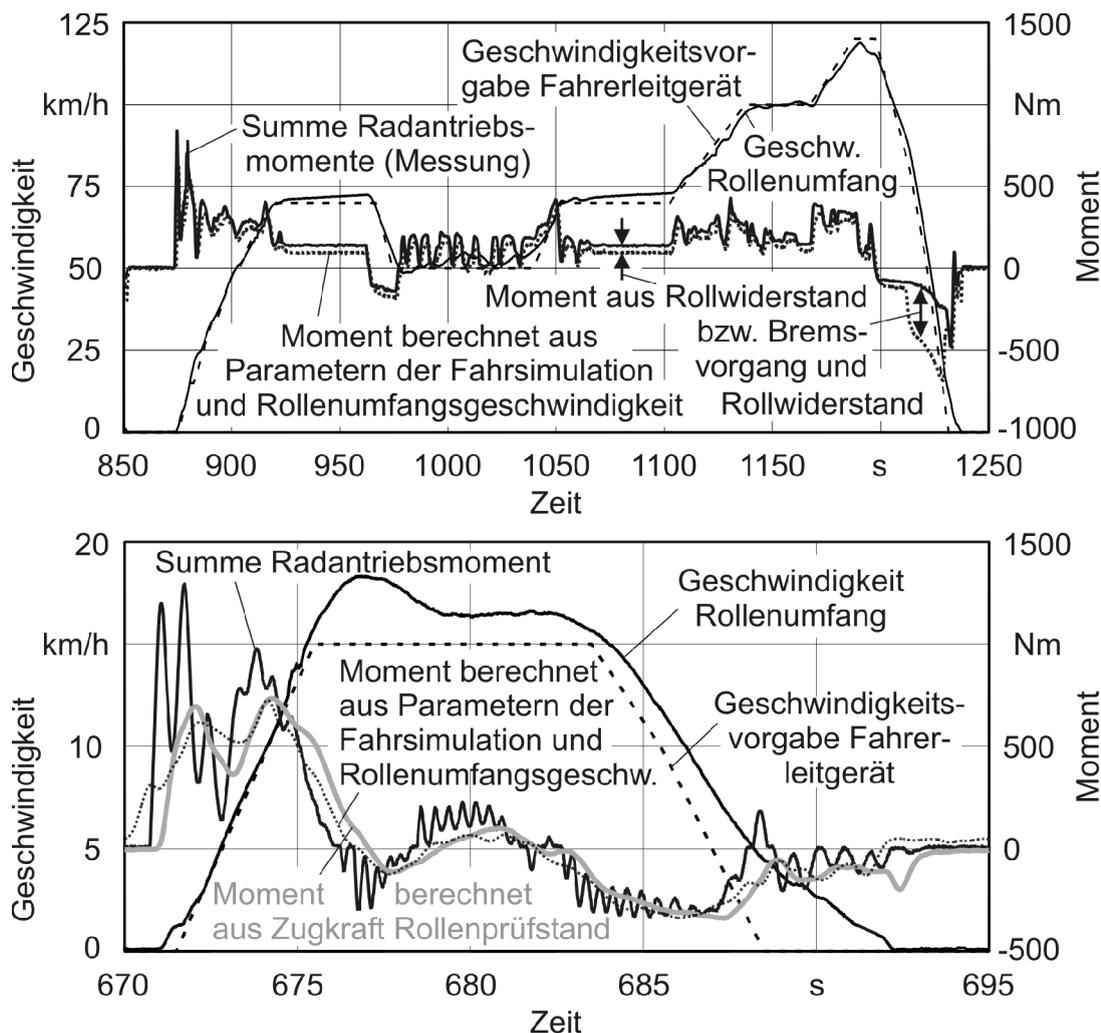


Bild 6.7: Fahrsimulation und Anfahrvorgang (unten) auf dem Rollenprüfstand.

In Bild 6.7 unten werden die Grenzen der Fahrsimulation auf dem Rollenprüfstand am Beispiel eines Anfahrvorgangs veranschaulicht. Hier ist zusätzlich der mit Hilfe der Momentenmesswelle des Rollenprüfstands ermittelte Wert eingetragen. Bei schnellen Laständerungen (> 0.5 Hz) gelingt die für die Fahrsimulation notwendige Kompensation der Trägheit des für große Fahrzeuge (z. B. Traktoren) konzipierten Laufrollensatzes (3280 kgm^2 , 2m) nicht vollständig (670–673 s). Es kommt erschwerend hinzu, dass die Prüfstandsregelung beim Anfahren erst nach 3 m zurückgelegter Fahrstrecke aktiviert wird. Ab 5 km/h ist die Fahrsimulation realistisch, ab 677 s die Dynamik des Radantriebsmoments aus der Anregung der Reifen erkennbar.

6.3.2.2 Untersuchungen zum Kraftstoffverbrauch

Zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs wurden auf dem Rollenprüfstand Fahrzyklen und Referenzfahrten untersucht [196]. Die umgesetzten Energien konnten durch simulationsgestützte Analysen der aufgezeichneten Messdaten abgesichert werden (siehe

Kapitel 7). Energetische Analysen des Versuchsfahrzeugs bzw. des Antriebssystems bieten [196] sowie [198].

Gegenüber konventionellen Fahrzeugen setzt sich der Energieverbrauch beim Autarken Hybrid aus der elektrischen Energie und dem verbrauchten Referenzkraftstoff zusammen. Im Versuchsfahrzeug wurden auch die von den Nebenverbrauchern (z. B. Hydraulikversorgung und Schmierölpumpe), den modifizierten oder zusätzlich erforderlichen Komponenten (z. B. dem elektrisch angetriebenen Bremskraftverstärker), den Steuergeräten, dem Fahrzeugregler und dem DC/DC-Wandler beanspruchten Energieanteile erfasst und analysiert (siehe Kapitel 7).

Die Betriebsstrategie verfolgt das Ziel einer ausgeglichenen Ladebilanz der 120 V-Batterie. Dabei ist die Korrektur mittels eines Kraftstoffäquivalents [189], mit dem abhängig von der Betriebsstrategie Energiedifferenzen in Kraftstoffmengen umgerechnet werden können, für geringe Abweichungen (<2 %) zulässig. **Bild 6.8** zeigt Kraftstoffverbräuche für das Antriebskonzept im NEFZ-Prüfzyklus nach [196], **Bild 6.9** das Geschwindigkeitsprofil eines entsprechenden Fahrversuchs.

Weiteres Einspar- bzw. Optimierungspotenzial [198] kann durch eine innovative, druckgeregelte Anpresshydraulik für den Kettenwandler [199], eine Gewichtsreduktion (150 kg Mehrgewicht statt 400 kg sind möglich) und durch einen wirkungsgradoptimierten Elektroantrieb sowie optimierte Nebenverbraucher erwartet werden.

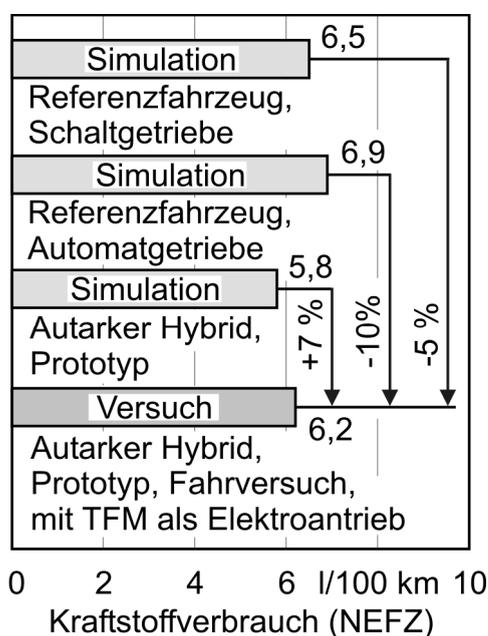


Bild 6.8: Einsparpotenzial des Autarken Hybrid im NEFZ-Prüfzyklus [196].

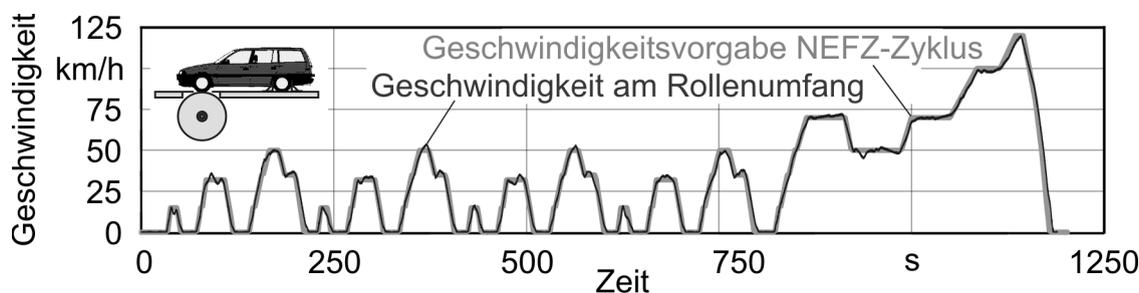


Bild 6.9: Geschwindigkeitsprofil eines NEFZ-Prüfzyklus (Neuer-Europäischer-Fahrzyklus, 93/116/EWG in der Fassung 1999/100/EG).

6.4 Analyse und Bewertung der Signalkommunikation

Die in Voruntersuchungen prognostizierte Eignung von CAN [191] für ein Netzwerk zur Regelung und Messdatenerfassung im Autarken Hybrid hat sich in eingehenden Untersuchungen sowie im Versuchsbetrieb grundsätzlich bestätigt. Die Kommunikation im Versuchsfahrzeug funktionierte störungsfrei.

Kommunikationsablauf

Im regulären Betrieb kommunizieren die ECUs und das Antriebsmanagement über einen CAN (Regelbus) mit 1 MBit/s Datenrate. Das Antriebsmanagement löst mit einer im 10 ms-Takt versandten Initialisierungsbotschaft (mit Sollwerten) hoher Priorität einen Kommunikationszyklus aus. Nach Empfang dieser Botschaft arbeiten die ECUs der Baugruppen ihre Mess-, Regel- und Steueraufgaben ab, **Bild 6.10**. Anschließend werden mit CAN-Botschaften Ergebnisse, Anforderungen und Messwerte der Steuergeräte als Datentelegramme übertragen und damit auch die erfolgreiche Abarbeitung der jeweiligen Steuergeräteprogramme bestätigt. Der zeitliche Kommunikationsablauf wird durch die Latenzzeit (Sendeaufforderung bis erfolgreiches Senden) aus der Arbitrierung (Buszugriffsverfahren) sowie die Geschwindigkeit, mit der die Steuergeräte ihre Programme abarbeiten, bestimmt.

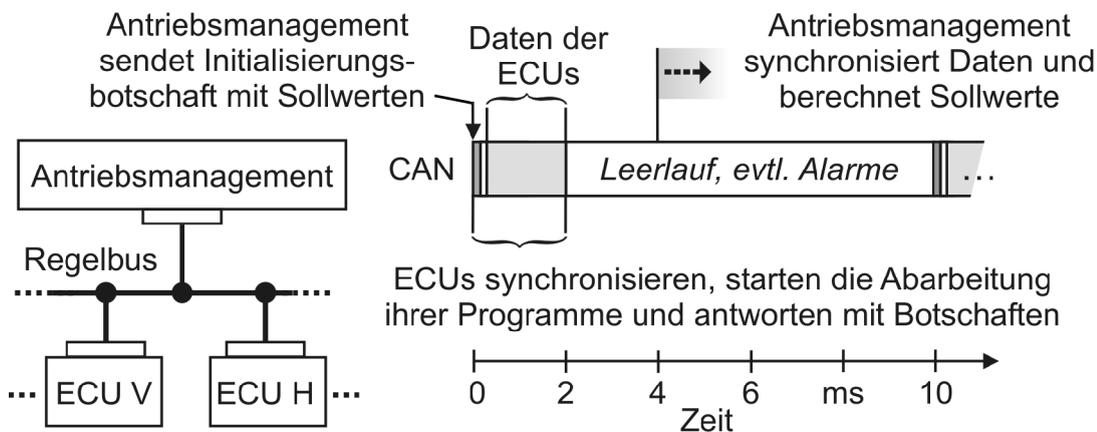


Bild 6.10: CAN-Kommunikationsablauf im Versuchsfahrzeug.

Bild 6.11 zeigt anhand eines Ausschnitts statistisch aufbereiteter Messdaten den Verlauf aller zyklisch kommunizierten Botschaften. Die Verteilung der Empfangszeitpunkte der Botschaften lässt neben den Schwankungen (Jitter) und erzielbaren Synchronisierungsgenauigkeiten auch das Ergebnis von Arbitrierungsvorgängen erkennen. Aus technischen Gründen konnte das Telegramm mit Stellwerten des Antriebsmanagements nur im Bedarfsfall unmittelbar nach der Initialisierungsbotschaft und damit nicht zyklisch gesendet werden. Diese Botschaft wurde daher nicht ausgewertet. Die Kommunikation ist in der Regel nach 2 ms vollständig abgearbeitet. Damit wird eine wichtige Echtzeitbedingung ausreichend erfüllt. Dabei variieren die Rechengeschwin-

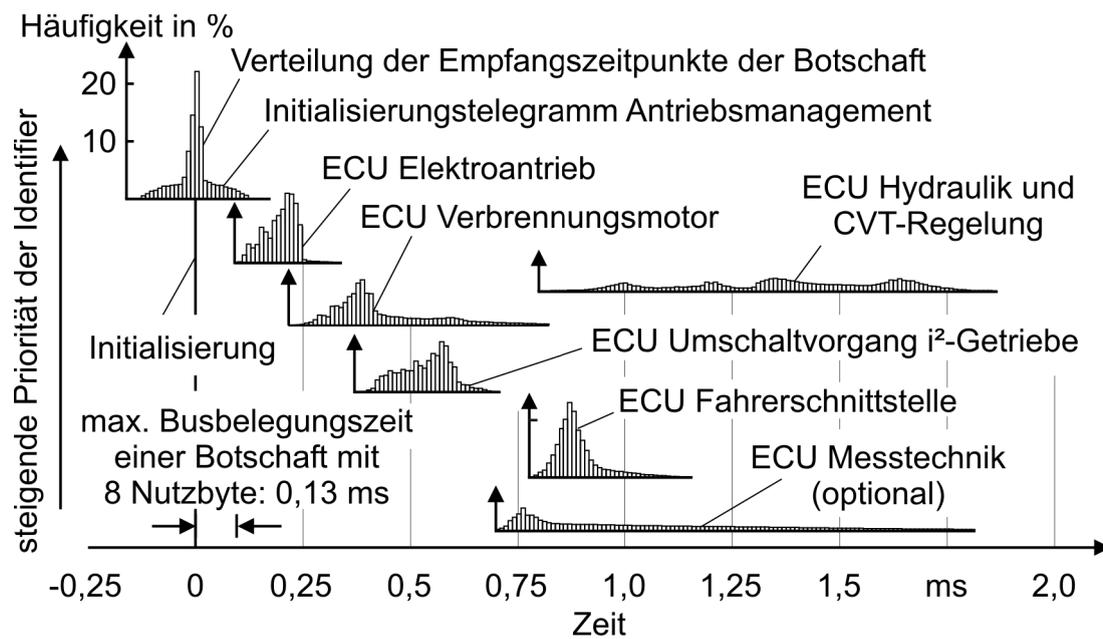


Bild 6.11: Verteilung der Empfangszeitpunkte aller im 10 ms-Zyklus kommunizierten CAN-Botschaften (statistische Auswertung eines längeren Beobachtungszeitraums).

digkeiten der für den Kommunikationsablauf relevanten Tasks der ECUs je nach Code und Betriebsmodus (Stillstand, Umschaltphase, Fahrt) zwischen 0,3 bis 1 ms.

Buslast

Die Buslast des im Versuchsfahrzeug auf dem Regelbus implementierten Protokolls (Botschaftsdefinitionen weitestgehend nach [190]) beträgt bei geringen Abweichungen durchschnittlich 11,5 %. Im Fall von Störungen stehen damit noch ausreichend Zeit und Kapazität zur Wiederholung von Nachrichten gemäß der für CAN spezifizierten Fehlermechanismen zur Verfügung.

Alarmtelegramme und Fehlermeldungen

Die ECUs der Antriebskomponenten können Fehler ihrer Peripherie (Sensoren/Aktoren) sowie Ergebnisse implementierter Überwachungen mit hochprioritären Alarmtelegrammen wirksam im Netzwerk melden. Alarmbotschaften werden unmittelbar nach der Fehlerdiagnose einmal innerhalb des Kommunikationszyklus auf dem Regelbus gesendet. Der dazu erforderliche Buszugriff erfolgt aufgrund der hohen Prioritäten der Identifier der Alarmbotschaften innerhalb weniger Millisekunden. Unterbrechen einzelne Alarmtelegramme einen Kommunikationszyklus, so verlängert sich dessen zeitlicher Ablauf um maximal 2 ms.

Verhalten bei Störungen oder Ausfällen

Für die Datenkommunikation problematische Szenarien sind vor allem nicht vollständig abgearbeitete Zyklen sowie temporäre oder permanente Ausfälle von Teilnehmern. Bei kurzzeitig auftretenden Störungen (z. B. EMV-Störung) kann die Kommunikation für den Zeitraum der Einwirkung vollständig ausfallen. Die Fehlererkennungsmecha-

nismen von CAN diagnostizieren die Störung und globalisieren den Fehler netzwerkweit durch Errorframes. Sobald der Bus wieder ungestört und in Ruhe ist, werden Sendeversuche für die abgebrochenen Nachrichten wiederholt.

Bei Hardwaredefekten fällt hingegen mindestens eine Komponente permanent aus (z. B. eine ECU, CAN-Transceiver, Leitungsbruch). Diese Ausfälle werden von den Busteilnehmern erkannt, da z. B. die erwartete CAN-Botschaft nicht mehr gesendet wird oder die Busphysik gestört ist. Bei derartigen Kommunikationsausfällen oder Hardwaredefekten wird das System bei intaktem Regelbus nach einer vom Fehler abhängigen Toleranzzeit durch das Antriebsmanagement in einen sicheren Zustand geführt oder heruntergefahren.

Nothalt bei Zusammenbruch der Kommunikation

Fällt die zyklische Kommunikation auf dem Regelbus über 40 ms lang aus, so wird das System in einer Nothaltstrategie heruntergefahren. In den ECUs wurden dafür dezentral Mechanismen implementiert, die den zyklischen Empfang des vom Antriebsmanagement gesendeten Sollwerttelegramms prüfen und bei Überschreiten von Fehlertoleranzzeiten den Kraftfluss im i^2 -Getriebe unterbrechen, die Antriebsmaschinen und schließlich auch das ECU-Netzwerk abschalten.

7 Modellbasierte Entwicklung der Kommunikation des Autarken Hybrids

Im folgenden werden Modellierungs- und Simulationsmethoden zur Entwicklung und Absicherung von ECU-Software sowie von Netzwerkfunktionen demonstriert. Als Anwendungsbeispiel wird dazu das in Kapitel 5 entwickelte fehlertolerante Kommunikationskonzept sowie das Antriebssystem Autarker Hybrid auf einer HIL-Systemsimulation abgebildet. Die in Kapitel 6 gewonnen Messdaten konnten dabei zur Modellparametrierung sowie als Referenzdaten herangezogen werden, **Bild 7.1**.

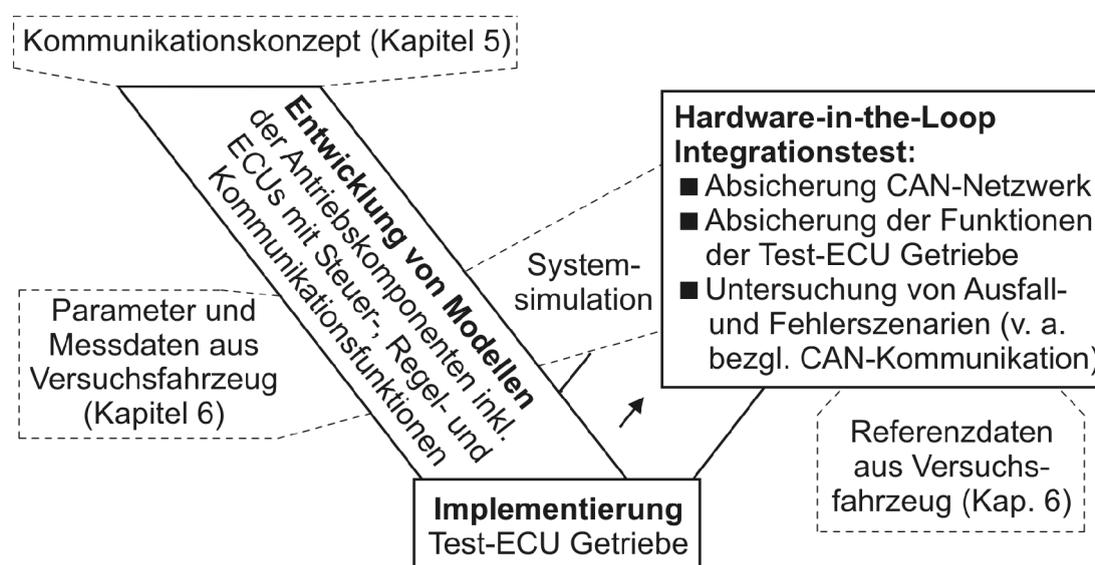


Bild 7.1: Strukturbild zur Entwicklung der HIL-Systemsimulation.

Als Testhardware der HIL-Simulationen werden exemplarisch eine programmierte Test-ECU der Antriebskomponente Getriebe sowie das CAN-Netzwerk analysiert bzw. bezüglich ihrer Funktionalität abgesichert. Die anschließende Untersuchung von Fehler- und Ausfallszenarien der CAN-Kommunikation zeigt die Einsatzmöglichkeiten sowie die Bedeutung von HIL-Simulationen zur Absicherung sicherheitskritischer und speziell fehlertoleranter Systeme.

7.1 Aufbau und Struktur der zentralen Systemsimulation

Es wurden MATLAB/Simulink-Modelle erstellt, die das Steuer- und Regelgerätenetzwerk des Autarken Hybrids samt Antriebsstrang im Systemverbund abbilden. Diese Systemsimulation bildet dabei das zentrale Element des modellbasierten Entwick-

lungsprozesses und kann in Varianten als ausführbare Spezifikation, zum Funktionsentwurf, zur Analyse des Antriebssystems sowie als HIL-Simulation [200] für Tests und die Optimierung des entwickelten Steuer- und Regelgerätenetzwerks eingesetzt werden. Neben der Echtzeitfähigkeit muss die Simulation folgenden Ansprüchen genügen:

- Möglichst realistische Abbildung der CAN-Kommunikation, d. h. neben dem Aufbau von CAN-Telegrammen (Datenbank) und den Kommunikationsbeziehungen müssen auch der Kommunikationsablauf, das Zeitverhalten sowie die Signallauf- und Latenzzeiten angemessen modelliert sein.
- Möglichst kausale Abbildung von Funktionen, Wirkprinzipien und Architekturen (u. a. zur Entwicklung und Absicherung von Sicherheitskonzepten sowie für Fehlersimulationen).
- Ausreichend genaue und aktualisierte Daten der Antriebskomponenten (um realistische Daten für Regler und Überwachungen sowie für eine modellbasierte Analyse des Antriebskonzepts zu erhalten).

Die Basis der Systemsimulationen bildet ein Modell, welches die Mechanik, die Wirkprinzipien und Verknüpfungen der Baugruppen des Antriebs beschreibt, **Bild 7.2**. Schnittstellen zu den Baugruppensteuergeräten bilden wie im Versuchsfahrzeug repräsentative Aktor- und Sensorsignale. Die Modelle der Antriebskomponenten werden von Modellen der Steuer- und Regelgeräte kontrolliert. Diese kommunizieren untereinander sowie mit dem Antriebsmanagement auf CAN-Systemen der Entwicklungsumgebung. Gegebenfalls können einzelne Test-ECUs in die Simulation eingebunden werden.

Um den Echtzeitbedingungen und den Anforderungen an die Simulation gerecht werden zu können, wurde im Hinblick auf die eingesetzte Simulationshardware eine Schrittweite von 10 ms für die Modelle der Antriebskomponenten gewählt. Dieser 10 ms-Takt entspricht dem für eine robuste Regelung des Antriebskonzepts erforderlichen Kommunikationszyklus zwischen den ECUs und dem Antriebsmanagement. Die Modelle der ECUs sowie die kommunikationsrelevanten Module werden mit der Schrittweite 1 ms gerechnet. Auf diese Weise lassen sich Kommunikationsvorgänge, Funktionsabläufe und Überwachungsmechanismen mit Auflösungen im Bereich weniger Millisekunden realisieren.

Die Modellierung der mechanischen, hydraulischen und elektrischen Module des Antriebskonzepts konnte mit physikalischen Ansätzen, regelungstechnischen Gliedern und Kennfeldern bewerkstelligt werden. Zur Parameterbestimmung konnten Messergebnisse aus Komponentenprüfständen, einem Antriebstrangprüfstand [198] sowie aus Versuchen mit dem Prototypenfahrzeug [187, 196] (sowie Kapitel 6) genutzt werden.

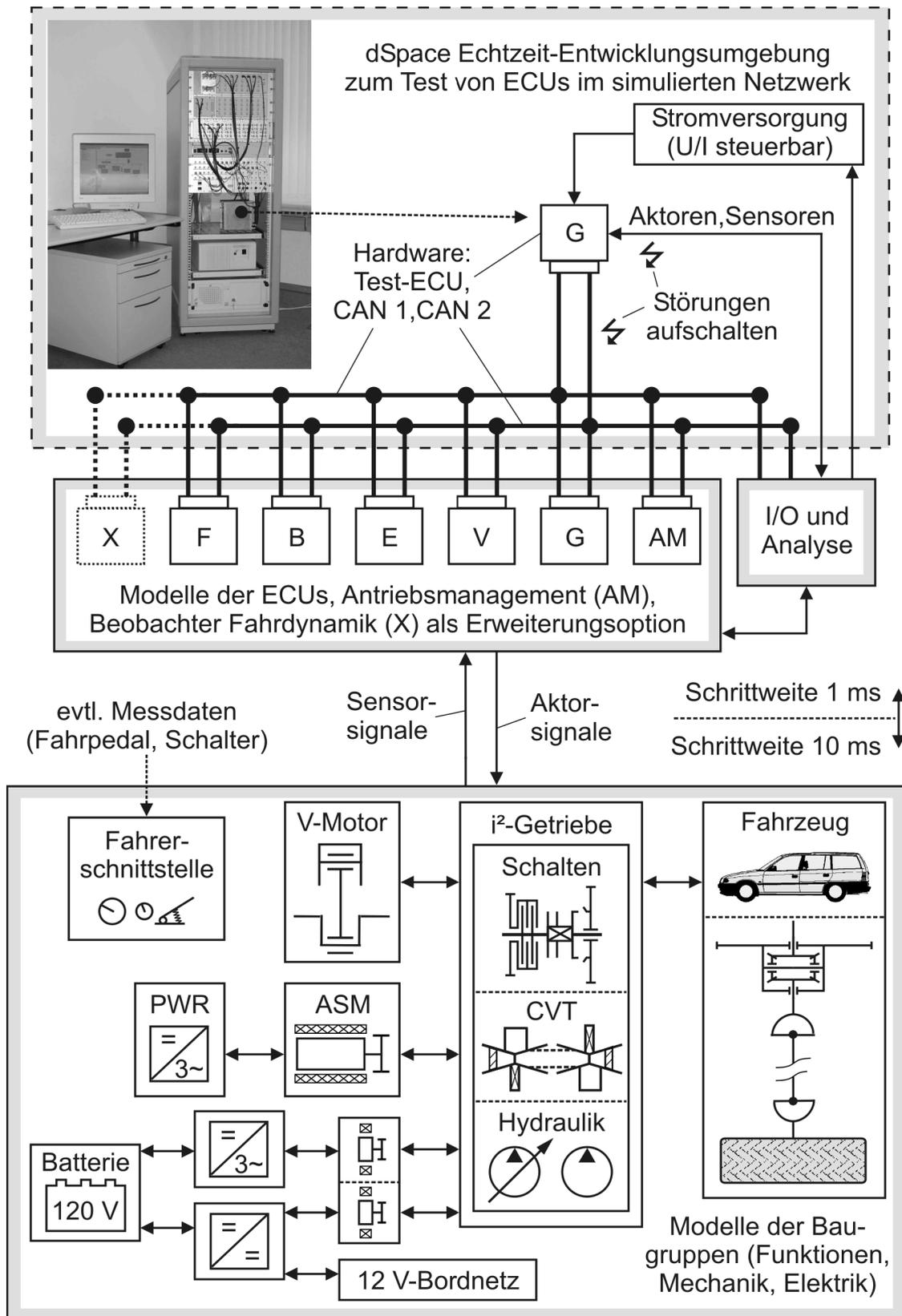


Bild 7.2: Aufbau und Struktur der HIL-Systemsimulation. Bezeichnungen und Zuordnungen der Steuer- und Regelgeräte (ECUs) zu den Antriebskomponenten siehe Bild 5.3.

7.2 Modellbildung

7.2.1 Baugruppen des Antriebs mit Steuer- und Regelgeräten

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit erstellten echtzeitfähigen Modelle der Antriebskomponenten und der zugehörigen Steuer- und Regelgeräte beschrieben. Das Antriebssystem wurde mit einem einzigen Drehfreiheitsgrad abgebildet. Steifigkeiten, Dämpfungen und Spiele wurden weitgehend vernachlässigt.

7.2.1.1 Verbrennungsmotor

Um schnelle Rechenzeiten bei anforderungsgerechter Genauigkeit zu erzielen, wurde das mechanische Modell des 1,7 l Turbodiesels aufgrund folgender Randbedingungen relativ einfach gestaltet:

- Die Betriebspunkte scharen sich vor allem in einem Bereich optimaler Betriebspunkte, siehe auch **Bild 7.3**.
- Das stufenlose i²-Getriebe und die Betriebsstrategie des Antriebsmanagements stellen keine hohen Anforderungen an die Modelldynamik.
- Die Abtastrate der betrachteten Ebene Antriebsmanagement beträgt 100 Hz. Höhere Dynamiken müssen für die Anwendung nicht abgebildet werden.
- Das Schadstoffverhalten sowie der Luftmassendurchsatz können in der betrachteten Anwendung zunächst unberücksichtigt bleiben.

Bild 7.4 zeigt die Grundstruktur des für die Systemsimulation entwickelten Expertenmodells. Ähnliche Ansätze werden z. B. auch in [201] verfolgt. Das durch den Verbrennungsprozess induzierte Moment M_V sowie die den Zylindern zugeführte Kraftstoffmenge Q_K wurden mit Hilfe von Messdaten durch Orthogonalpolynomsätze approximiert (d. h. die Physik wurde nicht detailliert modelliert):

$$M_V(Q_K, \dot{V}_M) = a_0 + a_1 \dot{V}_M + a_2 \dot{V}_M^2 + a_3 \dot{V}_M^3 + b_1 Q_K + b_2 Q_K^2 + b_3 Q_K^3 + c_3 \dot{V}_M Q_K$$

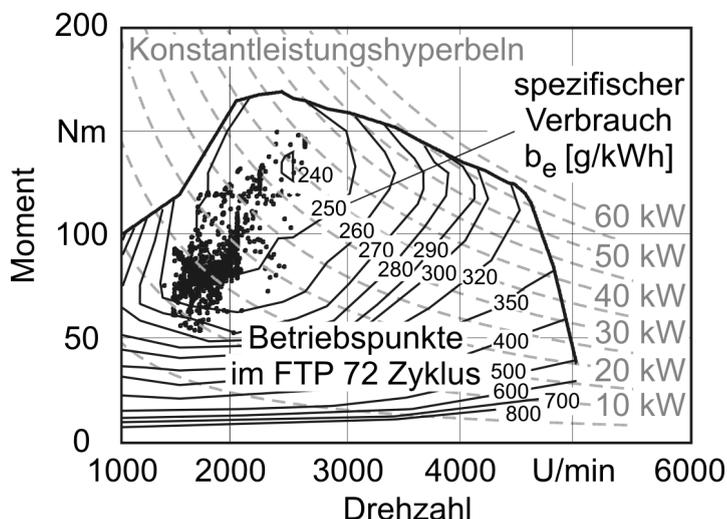


Bild 7.3: Modelliertes Verbrauchskennfeld sowie Betriebspunkte im FTP 72-Zyklus (Simulation) nach [189].

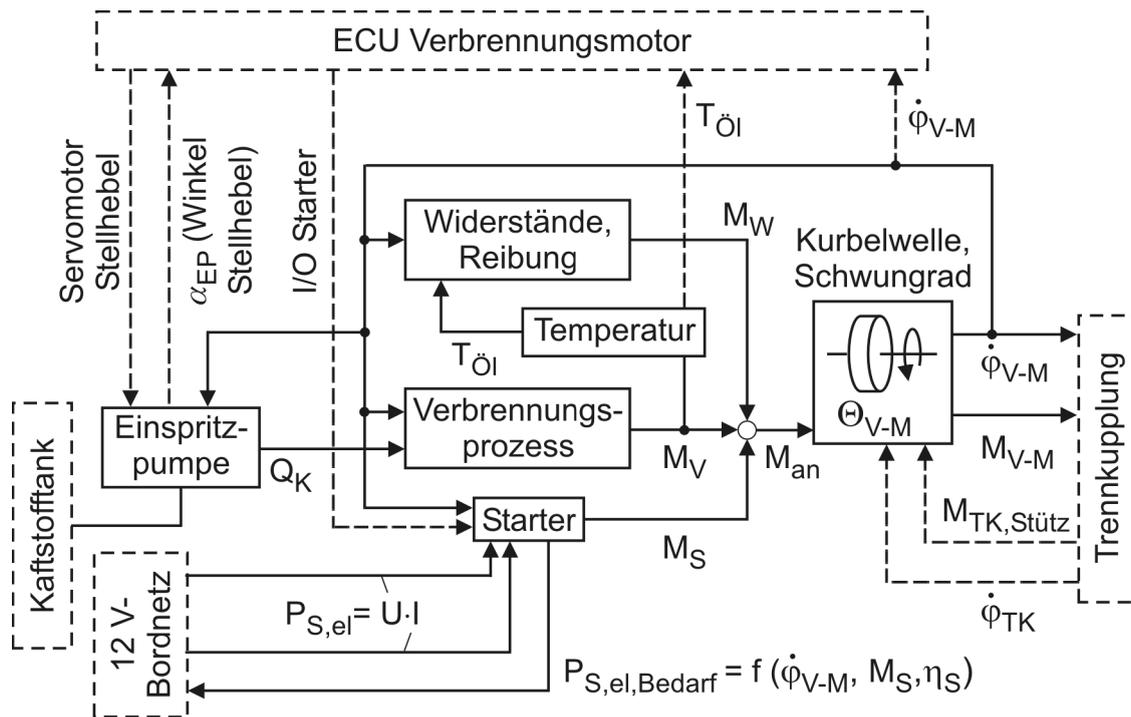


Bild 7.4: Struktur und wichtige Schnittstellen des Expertenmodells des Turbodiesels.

$$Q_K(\alpha_{EP}, \dot{\varphi}_{V-M}) = a_0 + a_1 \alpha_{EP} + a_2 \alpha_{EP}^2 + b_1 \dot{\varphi}_{V-M}$$

Während der Stellhebelwinkel α_{EP} die zu den Pumpenhüben proportionale Fördermenge bestimmt, wird mit der Kurbelwelledrehzahl $\dot{\varphi}_{V-M}$ der zeitbezogene Kraftstoffzufluss in alle Zylinder ermittelt.

Die Momentenapproximation durch ein orthogonales Polynom 3. Grades erzeugt einen für den Anwendungsfall ausreichenden, jedoch im Vergleich zum realen Kennfeld zu glatten Verlauf. Nach Untersuchungen von [178], wo auch alternative Polynomansätze sowie Neuronale Netze oder Fuzzy-Identifikationsverfahren angewandt werden, sind bei orthogonalen Polynomapproximationen mit Graden bis 15 exaktere Kennfeldverläufe mit mittlerer Abweichungsgenauigkeiten von unter 1 % erzielbar. Bei dem hier angewandten Grad 3 ist bei guter Parametrierung eine mittlere Genauigkeit von unter 4 % zu erwarten.

Die Dynamik der Stellglieder (z. B. Servomotor für Regelhebel der Einspritzpumpe) und Prozesse (z. B. Kraftstoffförderung) wurde mit PT1-Gliedern angenähert. Komponenten wie Turbolader und Ladeluftkühler wurden dabei nicht explizit modelliert.

Bild 7.5 zeigt die gemittelten Reib- und Widerstandsmomente, **Bild 7.6** das resultierende stationäre Motorkennfeld des Modells. Die üblicherweise durch Gas- und

Massenkräfte hervorgerufenen Ungleichförmigkeiten des Moments an der Kurbelwelle wurden somit stark vereinfacht bzw. vernachlässigt.

Die Dynamik des Modells wird im wesentlichen durch die mit dem Moment M_{an} beschleunigte Trägheit von Kurbelwelle und Schwungrad bestimmt. Die mechanische Rückkopplung zum Antriebsstrang erfolgt über das an der Trennkupplung maximal abstützbare Moment $M_{TK,Stütz}$ sowie die Drehzahl $\dot{\varphi}_{TK}$ der Trennkupplungsscheibe an der Getriebeeingangswelle. Für das vom Motor abgegebene Moment M_{VM} sowie für die Drehzahl $\dot{\varphi}_{VM}$ der Kurbelwelle gilt:

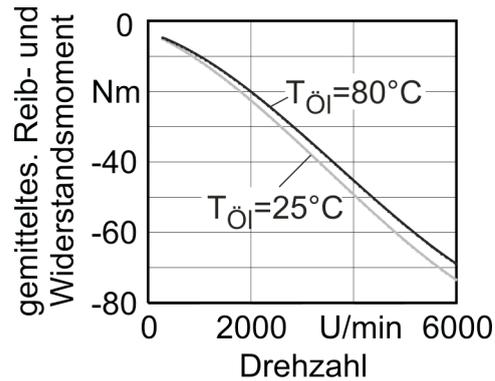


Bild 7.5: Modellierte Reib- und Widerstandsmomente.

$$M_{VM} = M_V + M_S + M_W + \dot{\varphi}_{VM} \cdot J_{VM}$$

wenn $M_{TK,Stütz} = M_{an}$: $\dot{\varphi}_{VM} = \frac{1}{J_{VM}} \int M dt$ $\dot{\varphi}_{VM, Startbedingung}$

mit $M = M_V + M_S + M_W + M_{TK,Stütz}$
(Vorzeichen M_W siehe Bild 7.5)

wenn $M_{TK,Stütz} = M_{an}$: $\dot{\varphi}_{VM} = \dot{\varphi}_{TK}$

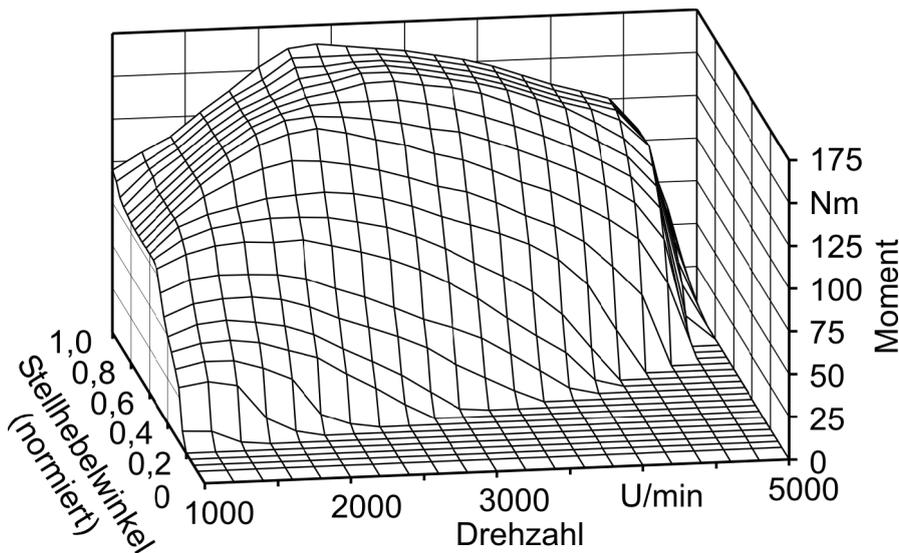


Bild 7.6: Durch das Expertenmodell approximiertes Motor-kennfeld.

Rückkopplungen zum 12 V-Bordnetz bestehen über die vom Starter angeforderten bzw. die zur Verfügung gestellten elektrischen Leistungen $P_{S,el, Bedarf}$ bzw. $P_{S,el}$. Die **Bilder 7.7** und **7.8** zeigen die Struktur des Modells der ECU Verbrennungsmotor mit den wichtigsten Funktionen.

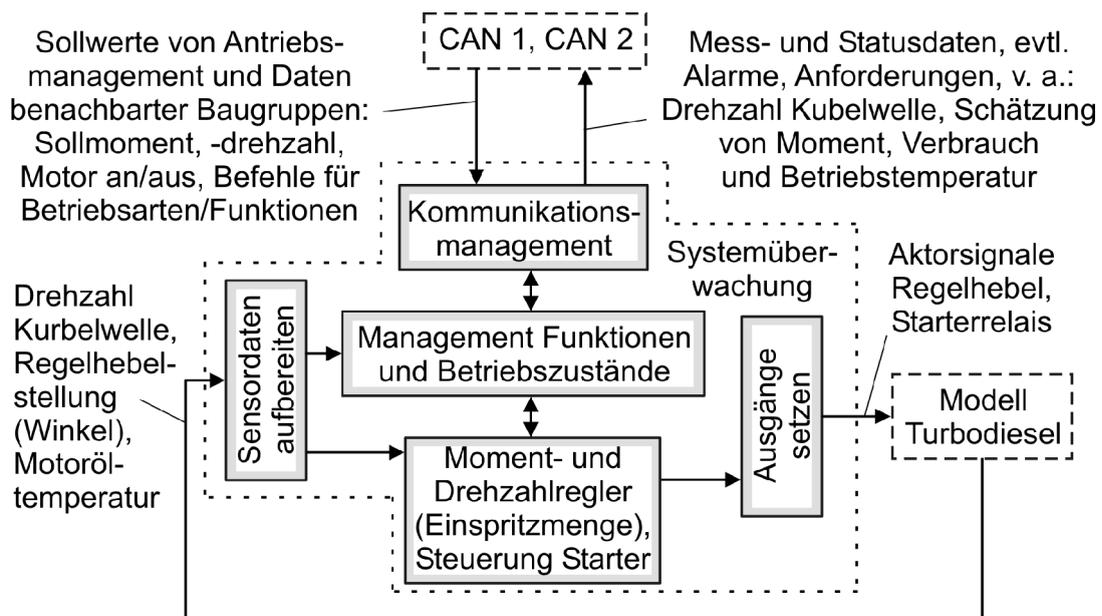


Bild 7.7: Struktur der modellierten Funktionen der ECU Verbrennungsmotor.

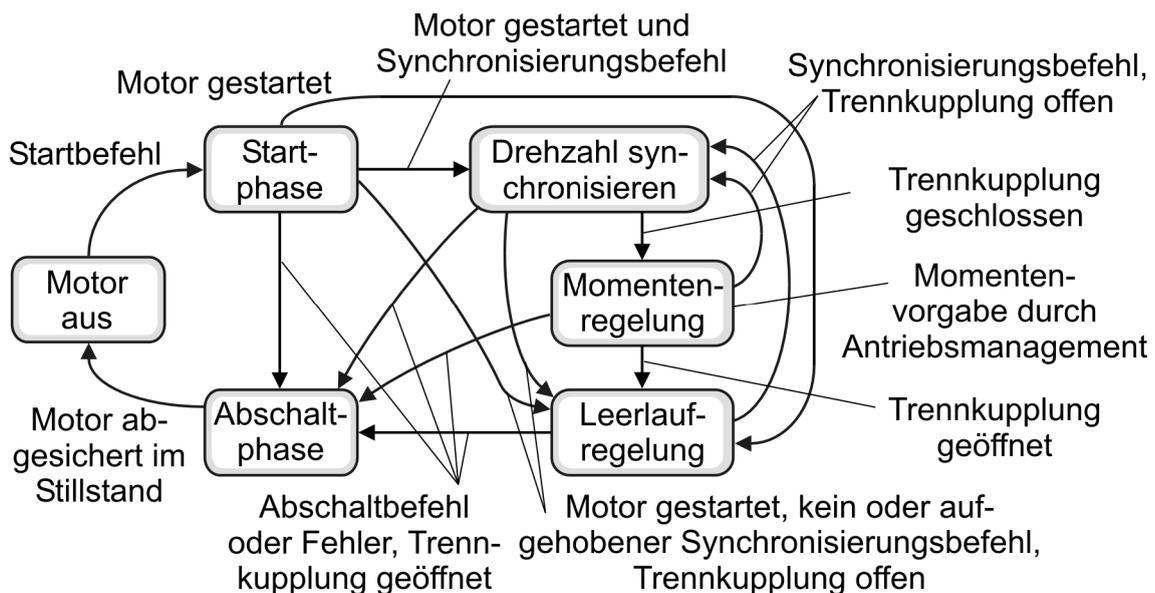


Bild 7.8: Funktionen und Betriebszustände der ECU Verbrennungsmotor.

7.2.1.2 Elektroantrieb

Bild 7.9 stellt das stark vereinfachte Modell des Elektronantriebs dar. Der Pulswechselrichter ist energetisch mit dem Netz der 120 V-Traktionsbatterie gekoppelt. Er beaufschlagt die Ständerwicklung der Asynchronmaschine mit einem spannungs- und frequenzvariablen Drehfeld und erzeugt damit ein zum Schlupf zwischen Ständerfrequenz und Rotordrehzahl proportionales Luftspalmmoment.

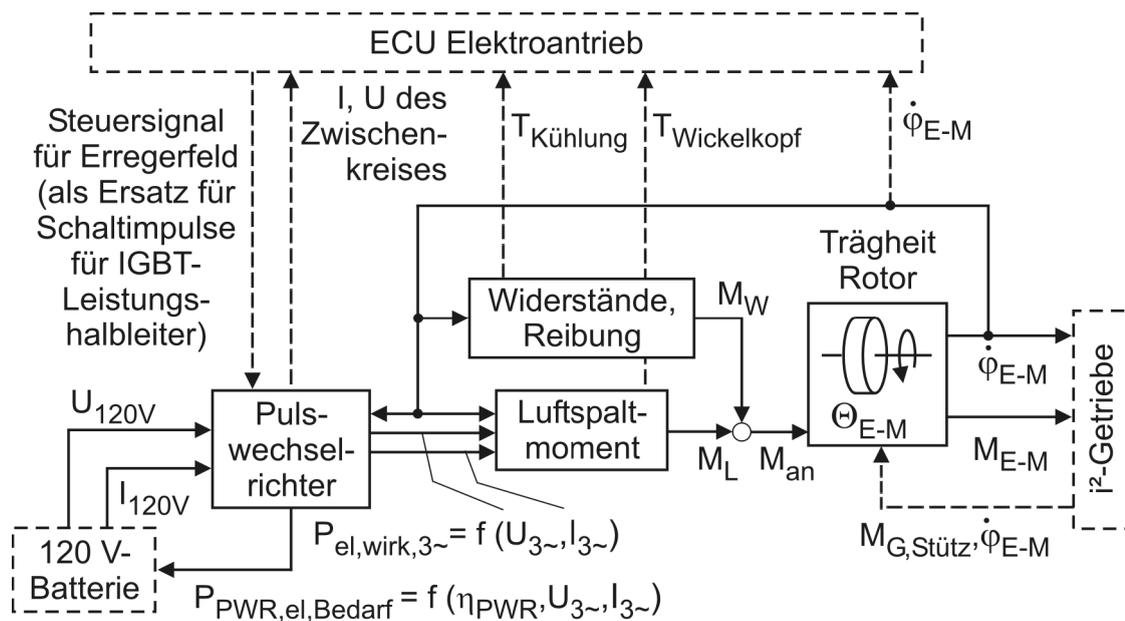


Bild 7.9: Struktur und wichtige Schnittstellen des Modells der Asynchronmaschine mit Pulswechselrichter.

In Näherung (ungenau, da Änderungen des Ständerwiderstands unberücksichtigt bleiben) kann dieses nach der Klossschen Gleichung für den Betrieb in einem Quadranten (z. B. motorisch, vorwärts) in Abhängigkeit vom Kippmoment M_K , Kipp-schlupf s_K sowie vom Schlupf s berechnet werden [202]:

$$M_L = M_K \frac{2 s s_K}{s^2 s_K^2} f(s), \text{ mit } M_K, s_K \text{ aus Kennfeld}$$

Im Nennbetriebsbereich gilt für die im Luftspalt erzeugte mechanische Leistung P_L in Abhängigkeit der eingespeisten elektrischen Wirkleistung des Drehfelds $P_{el,wirk,3\sim}$ in guter Näherung:

$$P_L = M_L \cdot \omega_{EM} = P_{el,wirk,3\sim} (1 - s)$$

Die Luftspaltleistung kann mit folgendem Wirkungsgrad $\eta_{ASM,L}$ umgesetzt werden:

$$\eta_{ASM,L} = \frac{P_L}{P_{el,wirk,3\sim}} = 1 - s$$

Das ideale Luftspaltmoment M_L wird um die in **Bild 7.10** dargestellten Reibwiderstände M_W reduziert. Für die Asynchronmaschine ergibt sich damit der in **Bild 7.11** dargestellte und im Quervergleich sehr gute Gesamtwirkungsgrad.

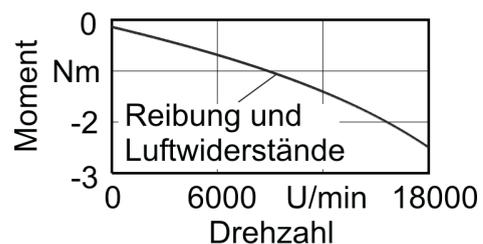


Bild 7.10: Modellierte Reibmomente.

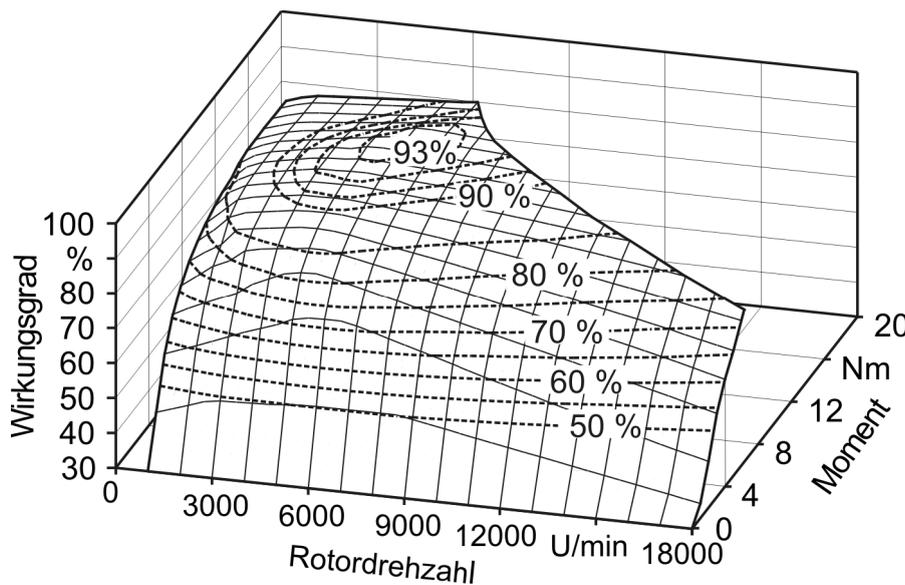


Bild 7.11: Modelliertes Wirkungsgradkennfeld der Asynchronmaschine (hier nur motorischer Quadrant dargestellt).

Das von der Elektromaschine abgegebene bzw. im generatorischen Fall aufgenommene Moment M_{EM} sowie für die Rotordrehzahl $\dot{\varphi}_{EM}$ berechnen sich wie folgt:

$$M_{EM} = M_L + M_W + M_{G,Stütz}$$

$$\text{wenn } M_{G,Stütz} = M_{an}: \quad \dot{\varphi}_{EM} = \frac{1}{J_{EM}} \int M dt \quad \dot{\varphi}_{EM, Startbedingung}$$

$$\text{mit } M = M_L + M_W + M_{G,Stütz} \\ (M_L \text{ vorzeichenbehaftet, } M_W \text{ siehe Bild 7.10})$$

$$\text{wenn } M_{G,Stütz} = M_{an}: \quad \dot{\varphi}_{EM} = 3 \cdot \dot{\varphi}_A$$

Die Rückkopplungen erfolgen über die Drehzahl $\dot{\varphi}_{EM}$ der Eingangswelle des Elektroantriebs am i^2 -Getriebe, das im i^2 -Getriebe maximal abstützbare Moment $M_{G,Stütz}$ sowie den vorzeichen- und wirkungsgradbehafteten Leistungsbedarf $P_{PWR,el, Bedarf}$ des Pulswechselrichters. Detaillierte, echtzeitfähige Modellierungen von Asynchronmaschinen unter Berücksichtigung der Maschinenparameter (Ständer-, Läufer- und Hauptreaktanzen, Streuzahl sowie Ohmsche Widerstände) sind in [203, 204] ausgeführt bzw. beschrieben. Aufgrund einiger unsicherer Parameter der im Versuchsfahrzeug eingesetzten Maschine konnten diese Verfahren leider nicht angewandt werden.

Bild 7.12 illustriert die modellierte Funktionsstruktur der ECU Elektroantrieb. Im Versuchsfahrzeug wurde die Asynchronmaschine mit feldorientierten Verfahren (Entkoppelung von feld- und momentenbildendem Strom) geregelt. In der Simulation wurde vereinfachend ein schlupfproportionales Steuersignal an das Modell des Pulswechselrichters übergeben. Für diese Arbeit wichtige Funktionen im Rahmen des

übergeordneten Antriebsmanagements sowie die Entwicklung und Optimierung der CAN-Kommunikation ließen sich auch mit dieser Vereinfachung realisieren.

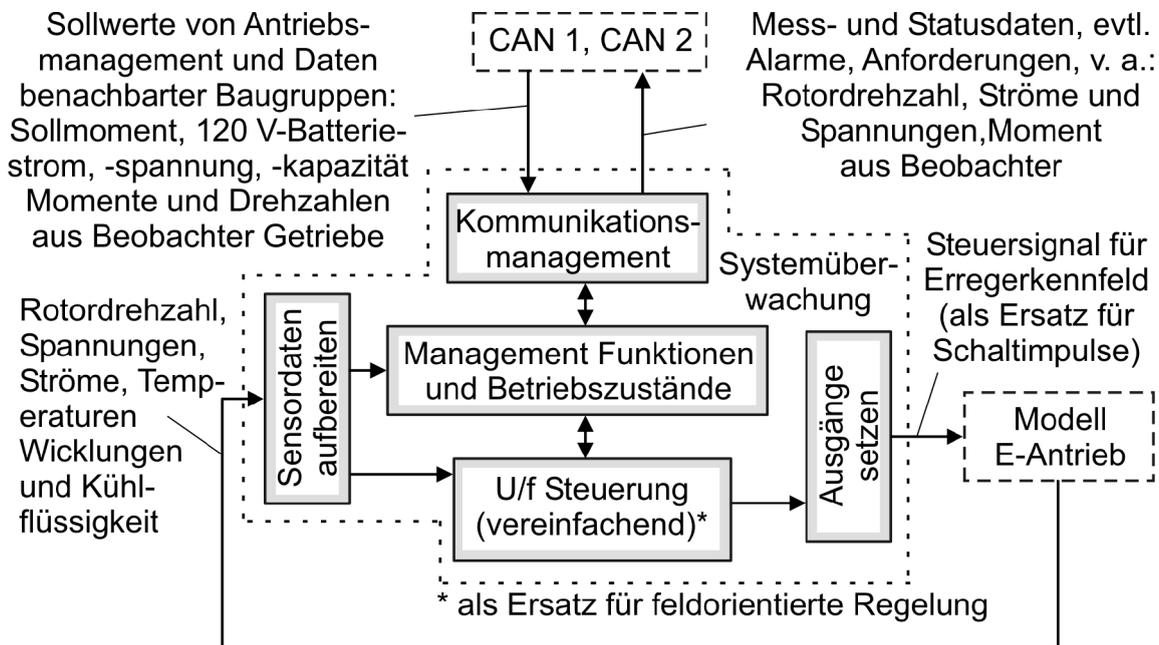


Bild 7.12: Struktur der modellierten Funktionen der ECU Elektroantrieb.

7.2.1.3 i²-Getriebe

Bild 7.13 zeigt die Struktur des Getriebemodells (Struktur des i²-Getriebes siehe Bild 5.1). Die summierten Antriebsmomente werden auf einem wirkungsgradbehafteten Momentenpfad durch die Übersetzungen der Zahnradstufen (nicht dargestellt) sowie des Kettenwandlers gewandelt. Bei geschlossenen Kupplungen werden die Drehzahlen von Innen- oder Außenträgern entsprechend der sich im Eingriff befindenden Zahnradstufen zurück- oder weitergeführt. Bei schleifenden oder geöffneten Kupplungen werden diese Kopplungen aufgelöst. **Bild 7.14** zeigt den nach Untersuchungen von [189] implementierten resultierenden Gesamtwirkungsgrad des Getriebes. Der Kettenwandler wurde mit Ergebnissen nach [205] berücksichtigt.

Die Modellierung der reibschlüssigen Kupplungen (TK, L1 und L2) wird exemplarisch für Lamellenkupplungen in **Bild 7.15** erläutert. Das von der ECU Getriebe angesteuerte Ventil moduliert den vom Hydrauliksystem zur Verfügung gestellten Druck $p_{p,v}$ zum an der Kolbenfläche der Kupplung angelegten Druck p_L . Der Druckanstieg wurde mit einem PT1-Glied (Zeitkonstante ca. 40 ms) vereinfacht. Aus dem Gleichgewicht mit der gegenwirkenden Kraft des Federpakets kann das direkt druckproportionale maximal übertragbare Reibmoment $M_{L,Stütz}$ berechnet werden (für L1: 250 Nm bei

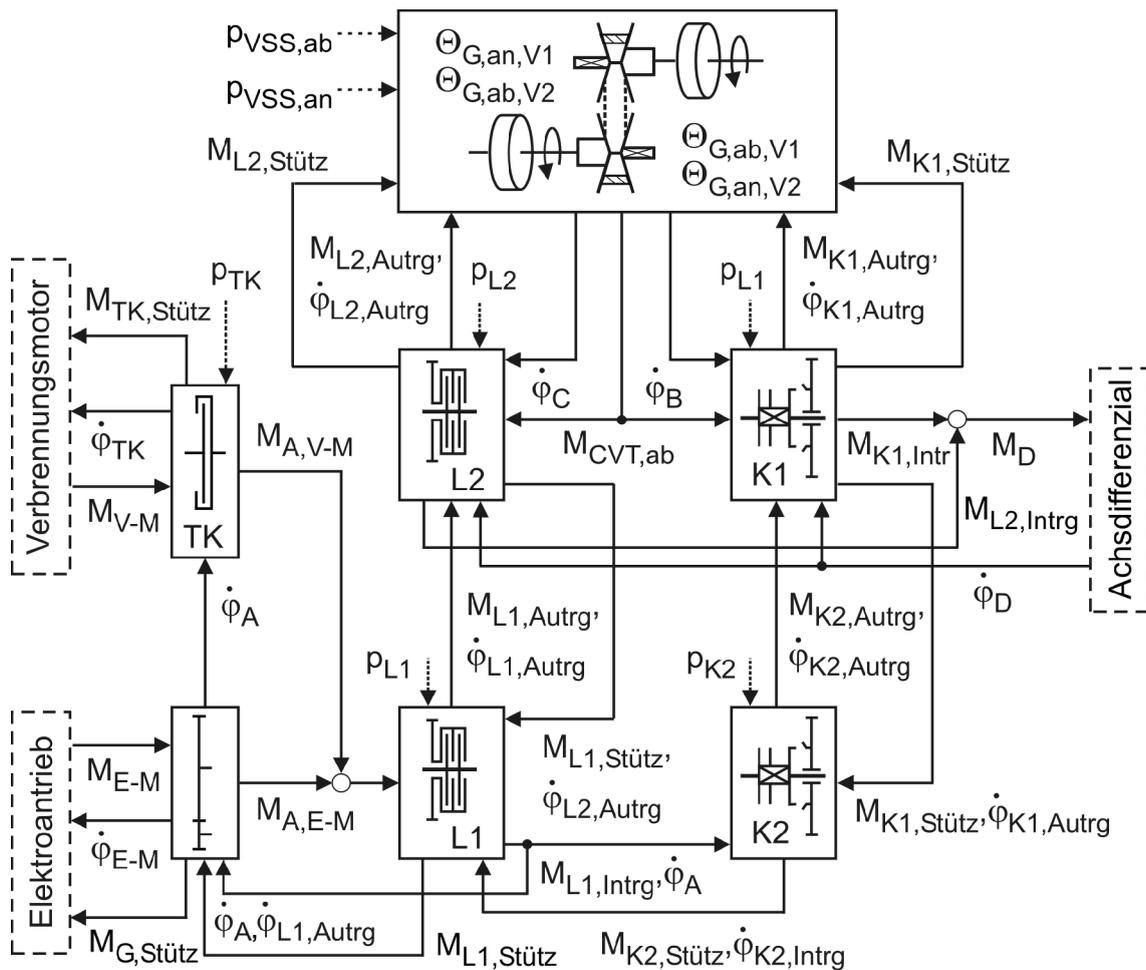


Bild 7.13: Struktur des reduzierten Mechanikmodells des i^2 -Getriebes mit wichtigen Schnittstellen, Momenten- und Drehzahlpfad sowie reduzierten Trägheiten an An- und Abtrieb.

25 bar, für L2: 375 Nm bei 30 bar, siehe [197]). Für die durch die Kupplung übertragenen Momente gilt:

$$M_{ab} = M_{an} \text{ für } M_{L,an} = M_{L,Stütz} \\ \text{sonst } M_{ab} = M_{L,Stütz}$$

Das maximal abstützbare Moment wird zurückgeführt, so dass auch nicht übertragbare Anteile in der antriebsseitigen Beschleunigung berücksichtigt werden können.

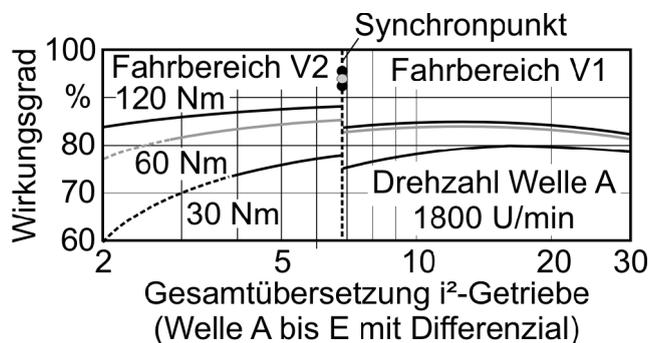


Bild 7.14: Gesamtwirkungsgrade des i^2 -Getriebes bei konstanter Eingangsdrehzahl und drei ausgewählten Eingangsdrehmomenten nach [189]. Messergebnisse zum Getriebewirkungsgrad bietet [198].

Die synchronisierten Klauenkupplungen (K1 und K2) sind nach einem ähnlichen Funktionsprinzip vereinfacht. Modellierungsmethoden für Kupplungen mit hoher Detaillierung der Ventilfunktionen, des Hydrauliksystems sowie der Momentenübertragung sind z. B. in [108] ausgeführt.

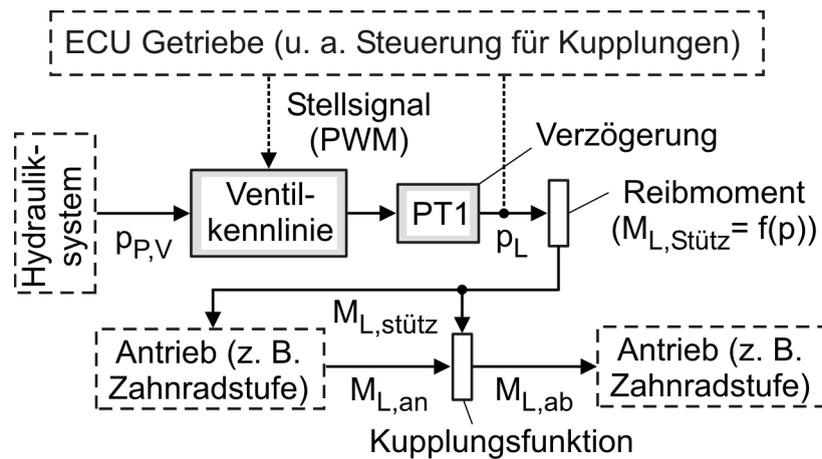


Bild 7.15: Struktur der modellierten Lamellenkupplungen.

Die Massen des Getriebes sind auf je eine fahrbereichsabhängige an- und abtriebsseitige Trägheit des Kettenwandlers reduziert. Das vom Kettenwandler abgegebene Moment $M_{CVT,ab}$ sowie die Abtriebsdrehzahlen $\dot{\omega}_{w,B}$ (im Fahrbereich V1) bzw. $\dot{\omega}_{w,C}$ (im Fahrbereich V2) werden vereinfachend wie folgt berechnet:

$$M_{CVT,ab} = \frac{M_{CVT,an} \cdot G_{,an} \cdot \ddot{\omega}_{CVT,an} + C_{VT,mech} \cdot \dot{\omega}_{CVT} + G_{,ab} \cdot \ddot{\omega}_{CVT,ab}}{i_{CVT}}$$

wobei $\ddot{\omega}_{CVT,ab} = \frac{\ddot{\omega}_{CVT,an}}{i_{CVT}} + \frac{\dot{\omega}_{CVT,an} \cdot \dot{i}_{CVT}}{i_{CVT}^2}$

Für Werte der Antriebsseite sind im Fahrbereich V1 Abtriebsmomente und Abtriebsdrehzahlen der Lamellenkupplung L2, im Fahrbereich V2 sowie im Synchronpunkt SYN Werte am Abtrieb der Klauenkupplung K1 einzusetzen. **Tabelle 7.1** bietet einen Funktionsplan zum i^2 -Getriebe.

Das Hydrauliksystem sowie die Pumpen für die Druck- und Schmierölversorgung wurden stark vereinfacht. Zur Darstellung der Kausalität wurden lediglich die prinzipiellen Funktionen wie Ein-/Ausschalten sowie ein drehzahlproportionales Stellsignal für die Hydraulikpumpe des Konstantstromsystem (ca. 6 l/min, bei Schaltvorgängen mehr) bereitgestellt. Detaillierte Modelle zur Hydraulikversorgung und Regelung sind in [206] beschrieben.

Tabelle 7.1: Funktionsplan und Fahrbereiche des i^2 -Getriebes.

	K1	K2	L1	L2
V1	X		X	
SYN	X	X		
V2		X		X

Bild 7.16 zeigt das aus [194] abgeleitete echtzeitfähige Modell des Kettenwandlers. Die Übersetzungsregelung gibt einen Sollwert zur Verstellung des Vierkantensteuerschiebers vor. Dieser moduliert damit die auf die Anpresszylinder des Scheiben-

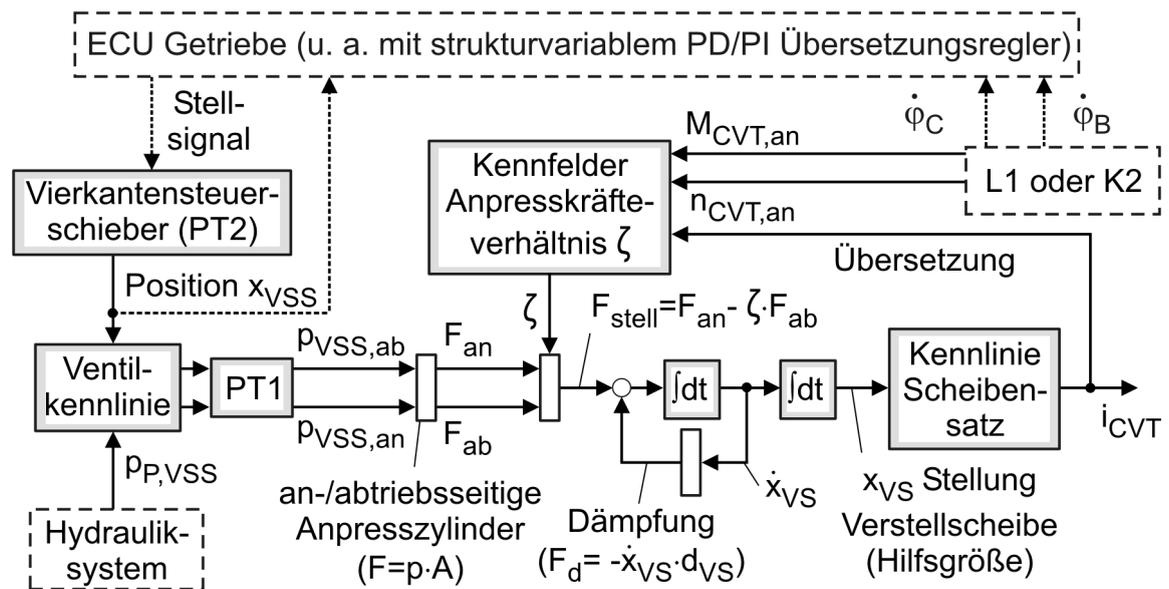


Bild 7.16: Struktur des Kettenwandlermodells mit Aktor, Wirkprinzip und Regler nach [194] sowie Schnittstellen verknüpfter Baugruppen.

setzes beaufschlagten Drücke $p_{VSS,an/ab}$. Aus den wirksamen Kolbenflächen der Anpresszylinder und den in Kennfeldern abgelegten Anpresskräfteverhältnissen (für Nenndrehzahlbereich siehe **Bild 7.17**) wird eine zur Übersetzungsverstellung wirksame Kraft F_{stell} ermittelt. Die resultierende Übersetzung wird mit einem Kennfeld der Verstellscheibenposition ausgelesen. Die Regelgröße Kettenwandlerübersetzung wird aus den an den Wellen C und B gemessenen Drehzahlen berechnet.

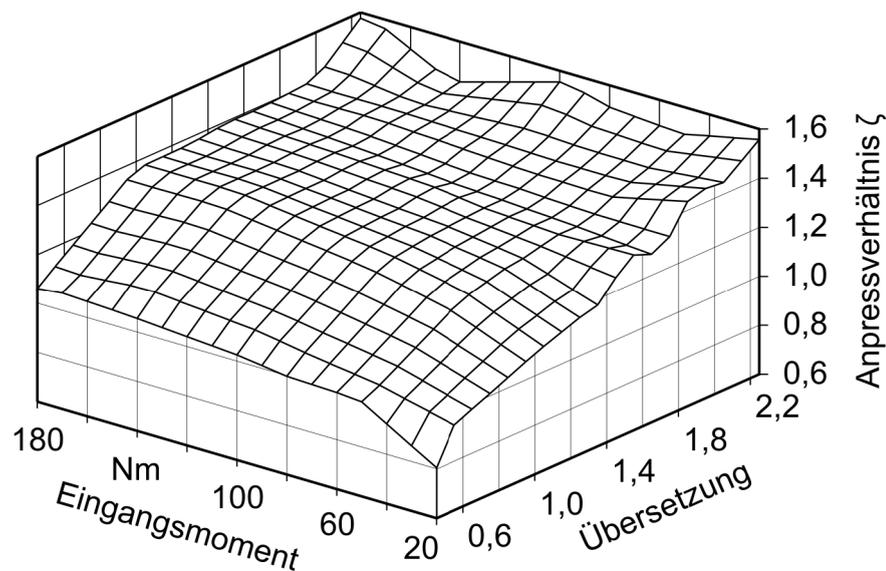


Bild 7.17: Modelliertes Zetakennfeld des Kettenwandler für eine Antriebsdrehzahl von 1000 min^{-1} nach [194]. Der gesamte Drehzahlbereich läßt sich durch Interpolation zwischen mehreren Kennfeldern relativ exakt erschließen.

Die **Bilder 7.18** und **7.19** geben einen Überblick über die modellierten Funktionen der ECU Getriebe.

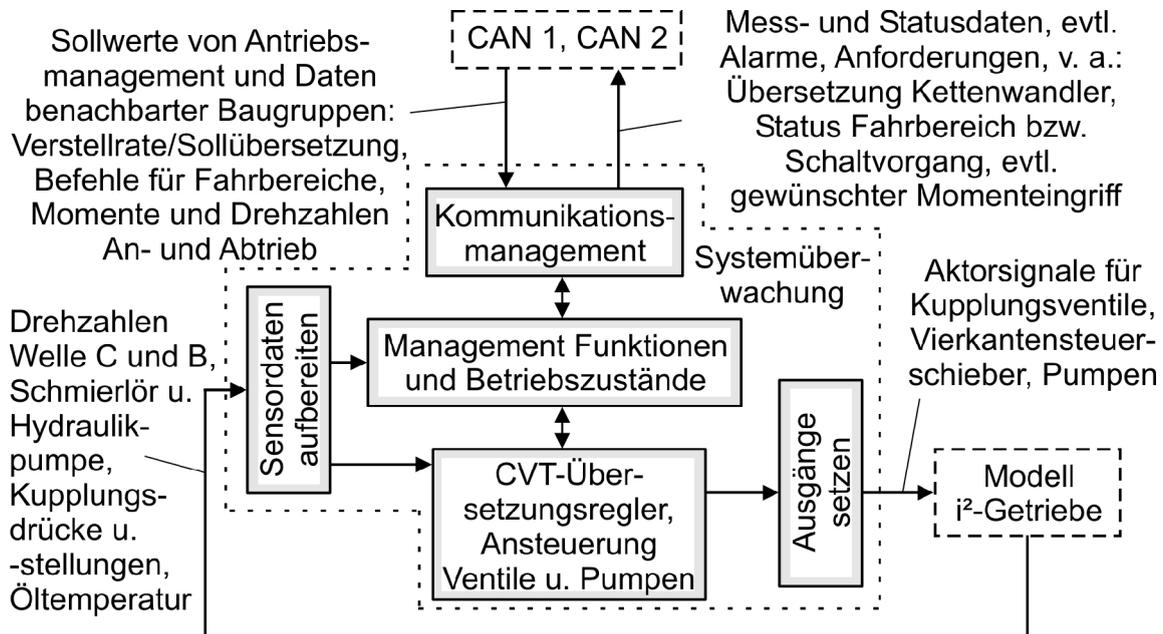


Bild 7.18: Struktur der modellierten Funktionen der ECU Getriebe.

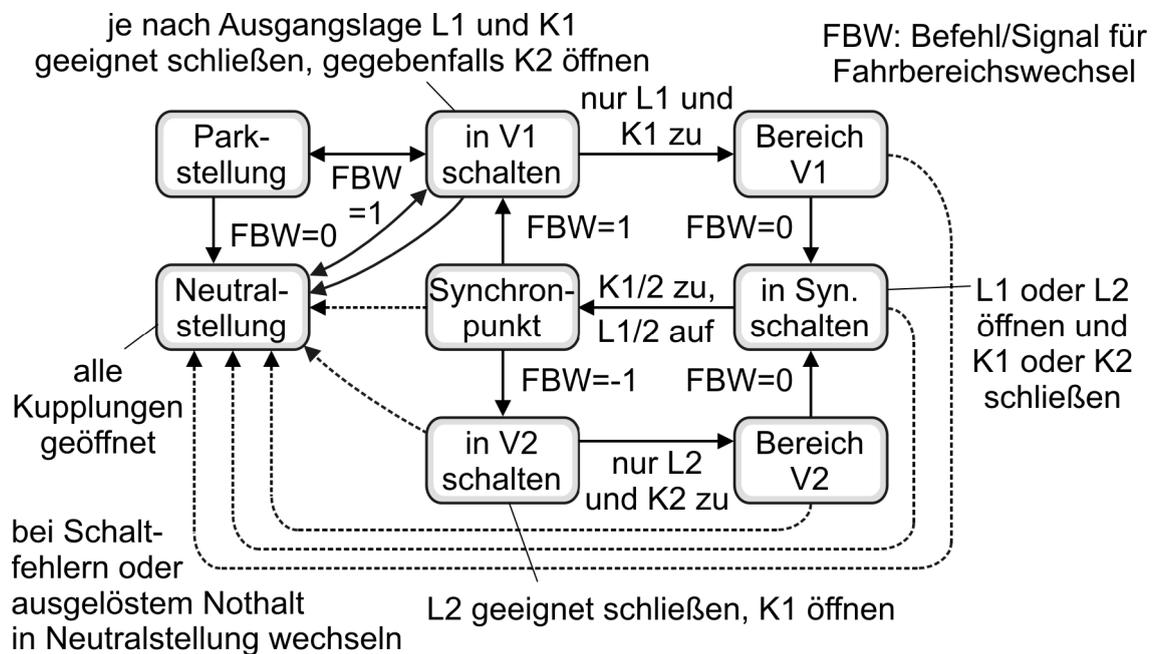


Bild 7.19: Struktur des übergeordneten Zustandsautomaten für das Management von Funktionen und Betriebszuständen der ECU Getriebe.

7.2.1.4 Traktionsbatterie, Bordnetze, elektrische Nebenverbraucher

Für detaillierte Modelle und Analysen sowie Ausführungen zum Management der im Versuchsfahrzeug eingesetzten Traktionsbatterie wird auf [207] verwiesen.

Ein vereinfachtes Modell der NiMH-Batterie mit zugehörigem Steuergerät sowie die elektrischen Nebenverbraucher wurden wie in **Bild 7.20** beschrieben modelliert. Rückführungen zur 120 V-Batterie werden durch die vom Elektroantrieb oder Nebenverbrauchern angeforderten elektrische Leistungen $P_{el, Bedarf}$ [198] realisiert. Dabei werden die elektrischen Wirkungsgrade durch die verlustbehafteten Leistungsanforderungen berücksichtigt. Der Bedarf der elektrisch angetriebenen Hydraulikpumpe $P_{HD, el, Bedarf}$ wurde in Anlehnung an [206] approximiert. Hinweise und Untersuchungen zum Leistungsbedarf von Nebenverbrauchern geben [196, 198].

Lade- und Entladewirkungsgrade, Verluste durch Selbstentladung und abgeführte Reaktionswärmen der 120 V-Batterie und die notwendige Kühlung sind in Anlehnung an [207] gemittelt.

Bild 7.21 illustriert die wichtigsten Funktionen des Modells der ECU Batterie.

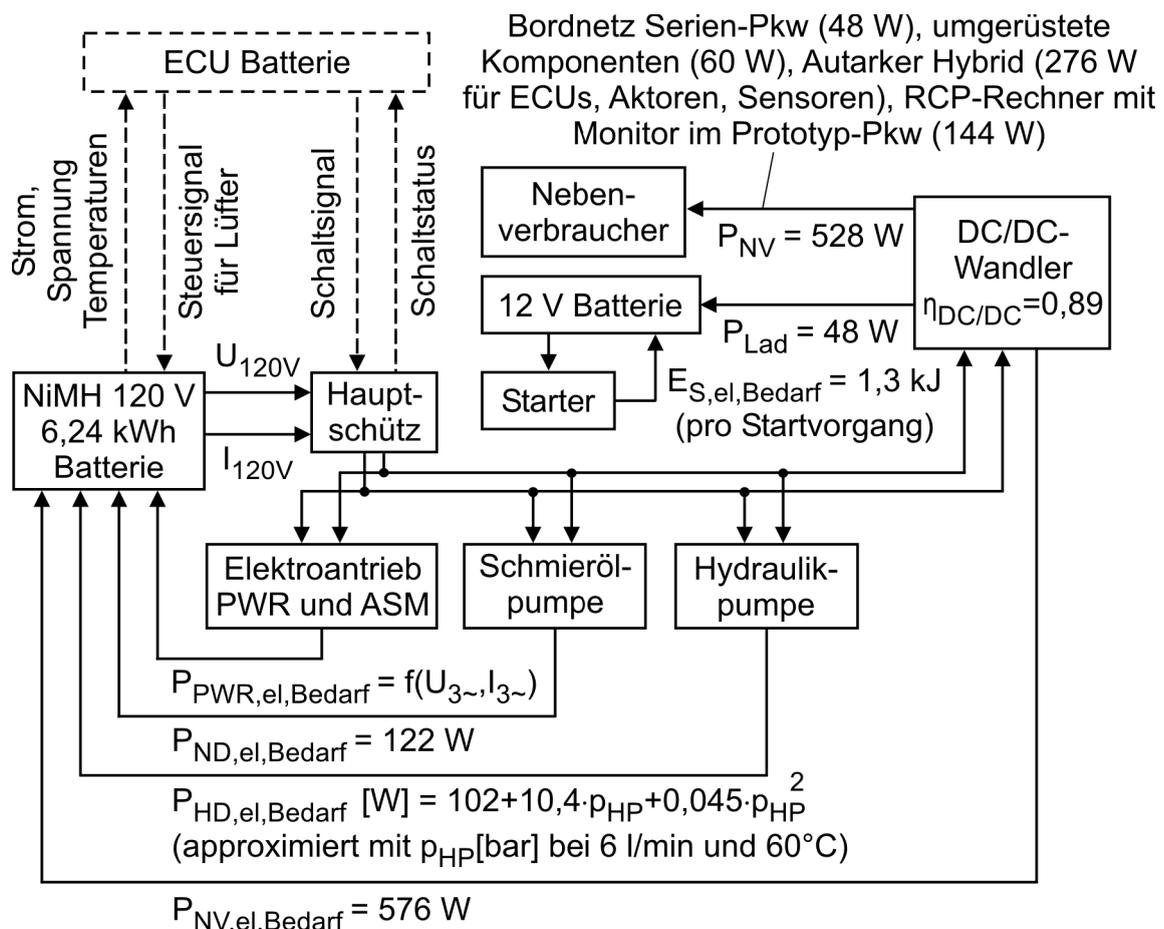


Bild 7.20: Modell der elektrischen Verbraucher sowie Schnittstellen der ECU Batterie.

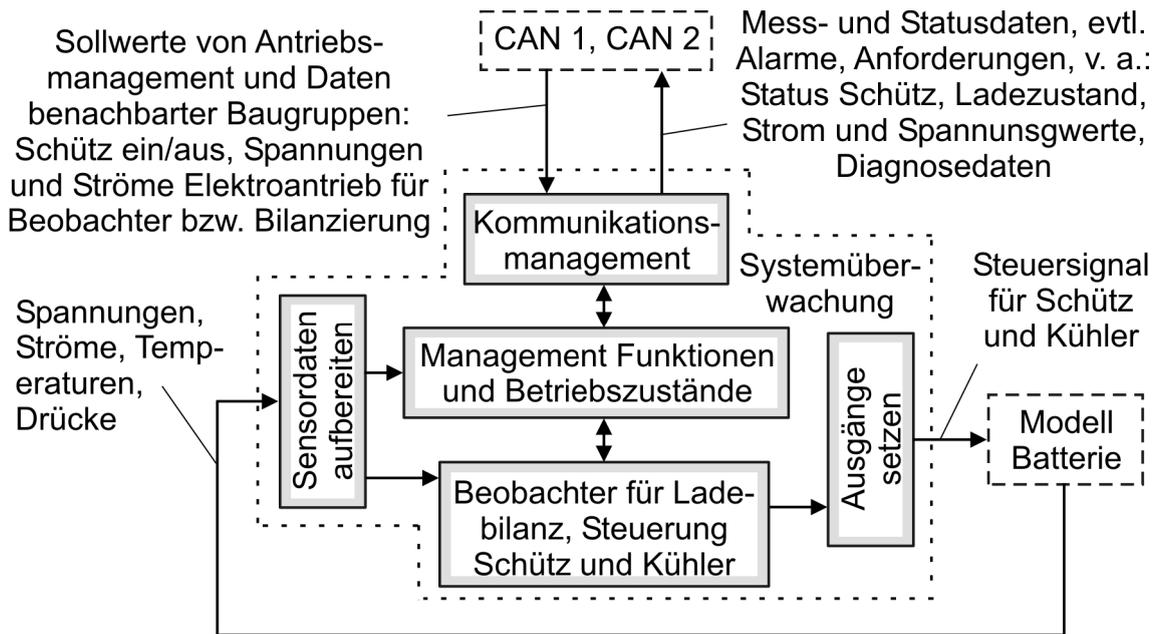


Bild 7.21: Struktur der modellierten Funktionen der ECU Batterie.

7.2.1.5 Fahrzeugmodell

Bild 7.22 zeigt die Struktur der modellierten Längsdynamik des Prototypenfahrzeugs. Für die Untersuchungen des Antriebssystems wurden die Quer- und Vertikaldynamik vernachlässigt und ein einfaches, ebenes Einradmodell implementiert.

Die Summe M_{ab} aus den an den Radantriebswellen anliegenden Momenten wird um die Momente aus Roll- und Luft- und Steigungswiderständen und gegebenenfalls um ein durch den Fahrer initiiertes Bremsmoment reduziert. Das resultierende Moment

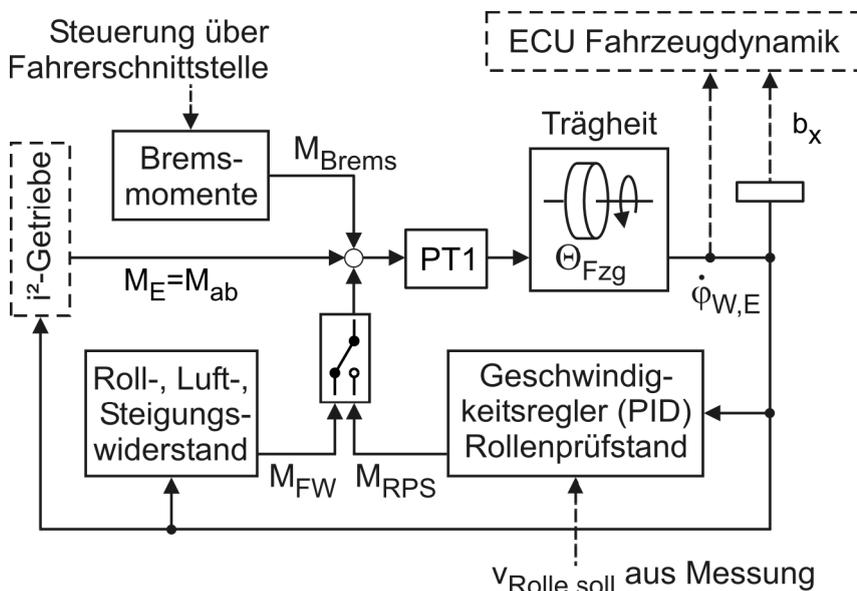


Bild 7.22: Struktur des vereinfachten Modells der Längsdynamik des Fahrzeugs sowie der Geschwindigkeitsregelung des Rollenprüfstands.

beschleunigt eine die Fahrzeugmasse sowie die Reifen repräsentierende Trägheit. Die Winkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_{W,E}$ der Abtriebswelle und die Fahrzeug-Längsbeschleunigung b_x werden über Sensoren dem Beobachter der ECU Fahrzeugdynamik zugeführt. Die bei Beschleunigungen wirksamen Trägheiten des Antriebsstrangs werden bereits in den jeweiligen Subsystemen berücksichtigt.

Das schlupfabhängige Umfangkraftschlussverhalten sowie Rollradiusänderungen wurden vereinfachend vernachlässigt. Da die Simulationen mit Versuchen auf dem Rollenprüfstand (trocken, guter Kraftschluss, veränderte Abrollbedingungen, wenig Achslastverlagerungen, Versuche bis 120 km/h) parametrisiert und verglichen wurden, können die geringen Fehler durch diese Vereinfachungen toleriert werden. Der Rollwiderstand ist geschwindigkeitsabhängig modelliert. **Bild 7.23** zeigt die resultierenden Fahrwiderstände. Die Drehzahl $\dot{\varphi}_{W,E}$ der Abtriebswellen berechnet sich wie folgt:

$$\dot{\varphi}_{W,E} = \frac{1}{r_{Fzg}} (M_{ab} - M_{FW} - M_{Brems}) dt$$

$$\text{mit } M_{FW} = r_{Rad,dyn} F_{FW}$$

$$F_{FW} = \frac{c_{W,Fzg}}{2} A_{Fzg} \rho_{Luft} r_{Rad,dyn}^2 \dot{\varphi}_{W,E}^2 + m_{FZG} g f_{Rad} + m_{FZG} g \sin \alpha$$

Mit diesen Fahrwiderständen können Fahrsimulationen durchgeführt werden. Zum besseren Abgleich des Antriebssystems mit dem Versuchsfahrzeug wurde zusätzlich die Betriebsart Geschwindigkeitsregelung des eingesetzten Rollenprüfstands nachgebildet. Weitere Ausführungen und Beispiele zur echtzeitfähigen Modellierung der Fahrzeugdynamik mit adaptiven Modellen gibt [178].

7.2.1.6 Fahrerschnittstelle

Fahrwünsche werden über die Stellung des Fahrpedals sowie über betätigte Schalter und Taster (Fahrmodus, Wählhebel Getriebe) mittels entsprechender Sensorik an die ECU Fahrerschnittstelle geleitet, **Bild 7.24**. Hauptaufgaben dieser ECU sind die Übermittlung dieser Fahrwünsche an das Antriebsmanagement (über CAN) sowie die Information des Fahrers durch Anzeigen (Betriebsmodus, Batterieladezustand usw.) und gegebenenfalls durch akustische Warnsignale (z. B. bei Nothalt).

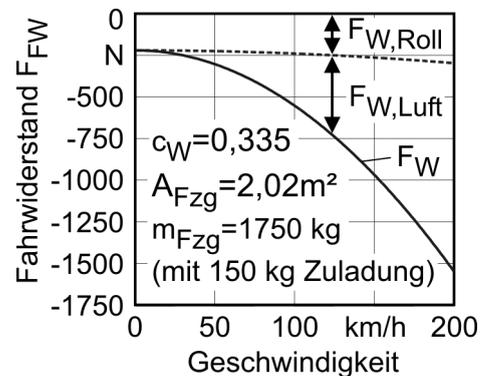


Bild 7.23: Modellierter Fahrwiderstand (hier ohne Steigungswiderstand) mit Anteilen des Luft- und Rollwiderstands.

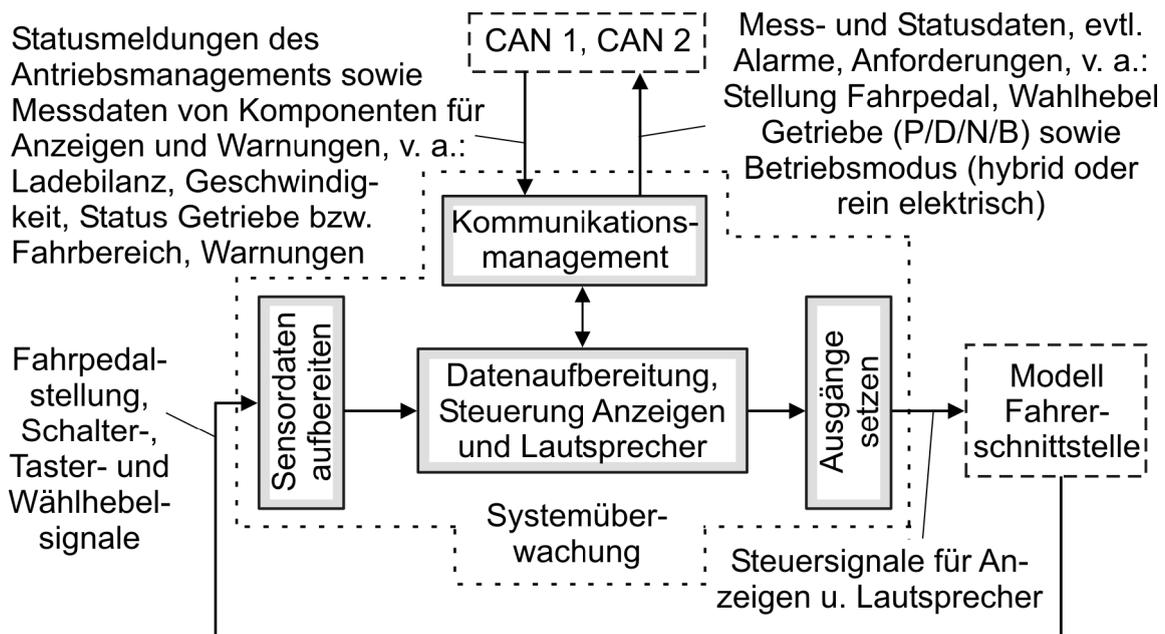


Bild 7.24: Struktur der modellierten Funktionen der ECU Fahrerschnittstelle.

Zur Bedienung des Antriebskonzepts wurde ein einfaches Fahrer- (PID-Regelung der Geschwindigkeit über Fahrpedalstellung) sowie ein Umgebungsmodell (Geschwindigkeits- und Streckenprofil) implementiert. Alternativ kann das Modell mit Messdaten aus Fahrversuchen (Fahrpedalstellung und Schalterbetätigung) oder bei Echtzeitsimulationen auch interaktiv angesteuert werden.

7.2.2 Antriebsmanagement

Die modellierten Funktionen des Antriebsmanagements sind in **Bild 7.25** dargestellt und aus Arbeiten zur Regelung des Autarken Hybrid [190, 192] sowie aus Untersuchungen zur Optimierung der Betriebsstrategien [189, 208] abgeleitet.

Das Antriebsmanagement empfängt über das CAN-System Mess- und Statusdaten der Antriebskomponenten und interpretiert einen Fahrerwunsch. Gemäß der hinterlegten Radmomentregelung sowie der Betriebs- und Sicherheitsstrategie werden Sollwerte für die Antriebskomponenten berechnet und wiederum über CAN übermittelt. Das Radmoment wird durch Vorgabe der Sollmomente der Antriebsmaschinen sowie der Verstellrate des Kettenwandlers eingeregelt. Die bei der Übersetzungsverstellung auftretenden unerwünschten Dynamiken durch die Beschleunigung antriebsseitiger Massen werden durch ausgleichende Momente der Elektromaschine kompensiert. Eine optimale Betriebspunktführung ist nach [208] durch ein Gütefunktional erreichbar, das eine Minimierung der Antriebsstrangverluste unter Berücksichtigung des Batteriezustands bzw. deren Änderung formuliert.

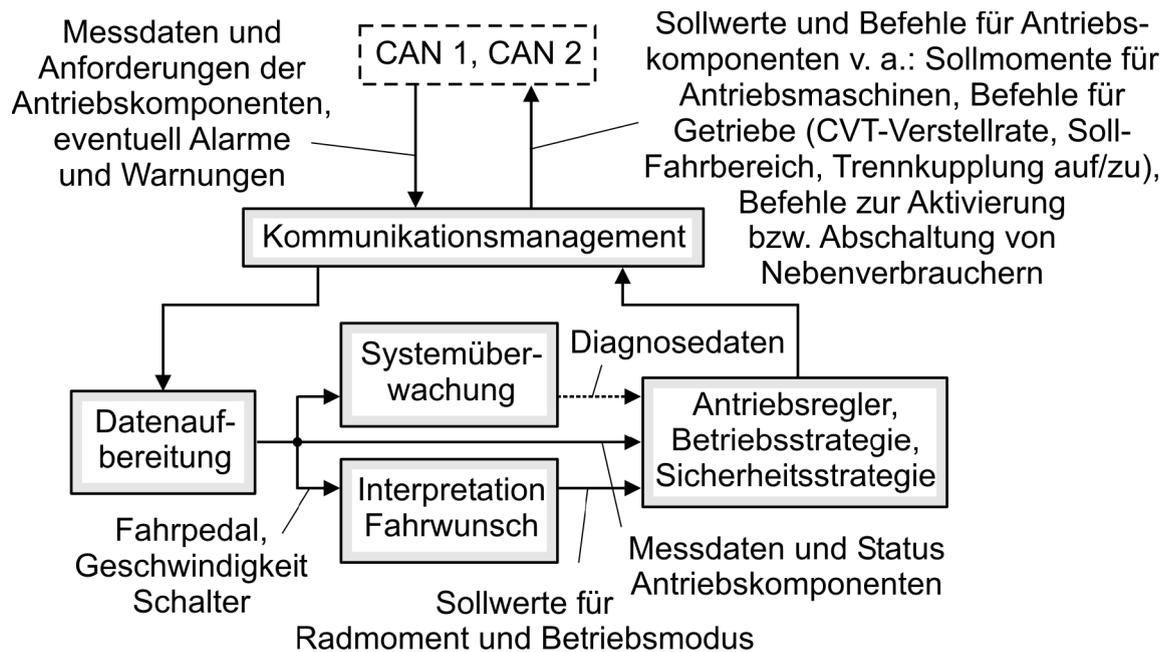


Bild 7.25: Überblick über die modellierten Funktionen des Antriebsmanagements.

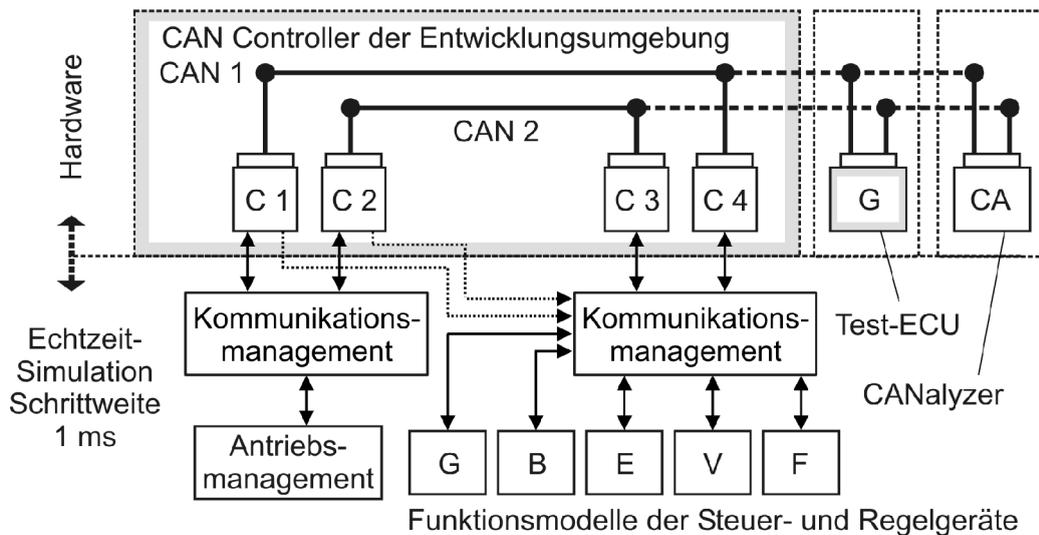
7.2.3 Steuer- und Regelgerätenetzwerk

7.2.3.1 Modellierung der CAN-Systeme

Auf der Ebene des Steuer- und Regelgerätenetzwerks wurde neben den Funktionen der ECUs und des Antriebsmanagements auch die CAN-Kommunikation implementiert. Das Kommunikationsmanagement konnte wie in Kapitel 5 beschrieben in Stateflow umgesetzt werden. Aufgrund der begrenzten Hardwareressourcen mussten jedoch einige Kommunikationsfunktionen der Antriebskomponenten-ECUs zusammengefasst werden. **Bild 7.26** zeigt hierzu zwei Konfigurationen für die Zuordnung der von der dSpace-Entwicklungsumgebung zur Verfügung gestellten CAN-Controller.

Da in der Konfiguration für parallele Netze (Bild 7.26 oben) alle Modelle der ECUs auf einen einzigen CAN-Controller zugreifen, kann leider kein konkurrierender Buszugriff und somit keine realistische Arbitrierung zwischen diesen simulierten ECUs dargestellt werden. Zudem müssen Daten benachbarter Baugruppen vereinfachend über den Controller des Antriebsmanagements erfasst werden. Beide Einschränkungen werden durch eine zusätzliche Softwareschicht in der Simulation kompensiert. Ausfälle und Fehler von CAN-Anbindungen und CAN-Funktionen lassen sich so durch gezielte, individuelle Fehlerinjektion nachahmen. Bis auf die genannten Einschränkungen ermöglicht dieser Simulationsaufbau die Entwicklung und Untersuchung von Kommunikationsfunktionen bei ausreichender zeitlicher Auflösung. Durch

Zuordnung der CAN-Controller und Modellierung bei parallelen Netzen:



Zuordnung der CAN-Controller und Modellierung bei einem CAN-System:

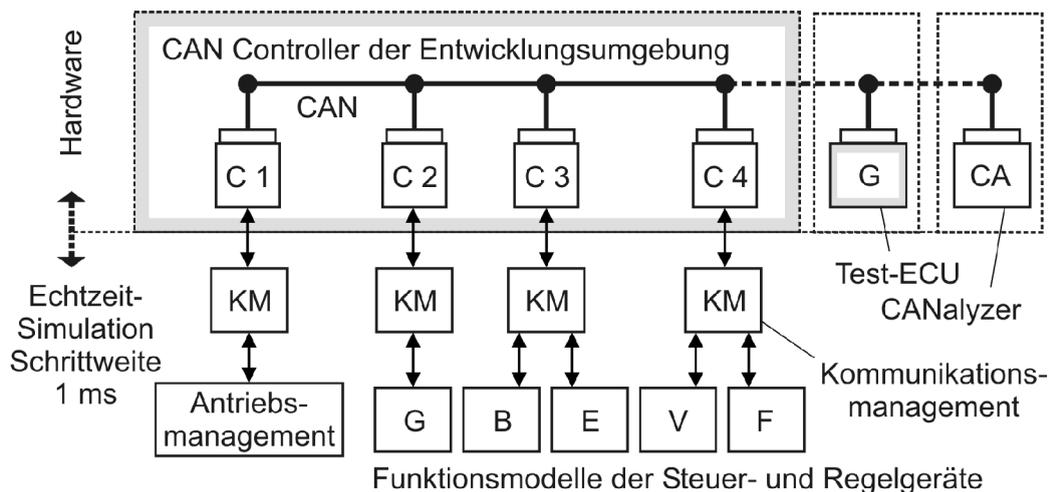


Bild 7.26: Zwei Konfigurationen zur Simulation der CAN-Netzwerke mit geeigneten Zuordnungen der CAN-Controller (C1 bis C4) der HIL-Entwicklungsumgebung.

die bestehenden funktionalen Verknüpfungen wird eine realistische Umgebung zum Test programmierter Steuer- und Regelgeräte zur Verfügung gestellt.

Die in Bild 7.26 unten dargestellte Konfiguration ermöglicht ausgeprägte Interaktionen und Arbitrierungen zwischen den Controllern der modellierten ECUs sowie die genauere Abbildung von Signallauf- und Latenzzeiten. Hier kann allerdings nur ein CAN-Netzwerk untersucht werden.

7.2.3.2 Methoden zur Fehlerprovokation in den CAN-Systemen

Um das Systemverhalten bei Fehlern absichern zu können, müssen geeignete Szenarien provoziert werden. Da eine nachgewiesene Einfehlersicherheit bereits anforderungsgerecht ist (siehe Kapitel 3), können die mit erheblichem Aufwand verbundenen

Kombinationen von Ausfallszenarien größtenteils unbetrachtet bleiben. Geeignete Testszenarien können mit analytischen Hilfsmitteln wie z. B. FMEAs entwickelt werden [145].

Da der Aufbau der Systemsimulation die Kausalitäten von Sensor-, Aktor- und CAN-Signalen sowie die technische Systemarchitektur repräsentiert, können Fehler durch geeignete Manipulationen an der zu testenden Hardware oder der Simulation provoziert und die Auswirkungen auf Baugruppen sowie das Antriebssystem analysiert werden.

In **Tabelle 7.2** ist eine Auswahl von Fehlerszenarien zum Test der CAN-Kommunikation zusammengestellt. Mögliche aufschaltbare Fehler für Sensor- und Aktorsig-

Tabelle 7.2: Möglichkeiten zur reproduzierbaren Provokation von Fehlerszenarien der CAN-Kommunikation mit Zuordnung zum OSI-Referenzmodell der Datenkommunikation.

Abk.	Fehlerszenario	proviziert durch
Provokation von Fehlern auf der Ebene Anwendungsschicht		
FS7/1	Botschaftsausfall (temporär/permanent)	Manipulation von Auslöse-/Triggermechanismen oder Konfigurationen von Botschaften durch gezielten Eingriff in das Simulationsmodell, Zugriff und automatisierbare Testsequenzen z. B. über dSpace-Software; alternativ Manipulation in einem zwischen zwei physikalisch getrennten Bussystemen eingefügtem Gateway (Fehlertgateway)
FS7/2	Verzögertes Senden von Botschaften (Ablauf von Zyklen stören)	
FS7/3	Wiederholtes, zu häufiges Senden von Botschaften (z. B. mehrfach je Zyklus)	
FS7/4	Senden protokollfremder Botschaften	
FS7/5	Fehler in der Aktualisierung der Botschaft (z. B. falscher Zykluszähler)	
FS7/6	Senden falscher Telegramme (inkonsistente Konfiguration von Telegrammen)	
FS7/7	Verfälschen der zu übertragenden Daten	
Provokation von Fehlern auf der Ebene Datensicherungsschicht		
FS2	gezielte Manipulation von Bitfeldern oder einzelner Bits zur Verletzung der Sicherungsmechanismen des CAN-Protokolls (siehe Kapitel 3.1.2)	Störsequenz externer Geräte mit Zugriff auf physikalische Schicht (z. B. CANstress der Fa. Vector Informatik), auch aus HIL-Simulation ansteuerbar (ext. Trigger)
Provokation von Fehlern auf der Ebene physikalische Schicht		
FS1/1	gezielte Störung von Bitpegeln zur Manipulation/Zerstörung von CAN-Botschaften	wie FS2
FS1/2	Aufschaltung von Errorframes	wie FS2 (bei geeigneter Programmierung) oder mit CANalyzer
FS1/3	Totalausfall eines Knotens	Bus abtrennen (durch manuell betätigten Schalter)
FS1/2	Kurzschlüsse zwischen Leitungen, gegen Batteriespannung und Fahrzeugmasse	wie FS2 oder mit spezieller Schaltung
FS1/3	Leitungsbrüche (permanent)	
FS1/4	Wackelkontakte	

nale sind Offset, Rauschen, Peaks, Drift, Leitungsbrüche oder Kurzschlüsse. Darüber hinaus ist die Manipulation von Funktionen von Sensoren und Aktoren sowie die Wirkung von Ab- oder Ausfällen der Spannungsversorgung an ECUs simulierbar.

7.2.3.3 Methoden und Werkzeuge zur Analyse der CAN-Kommunikation

Zur Untersuchung der Funktionalität, Güte und Leistungsfähigkeit der Signalkommunikation sind aufgrund der Komplexität und Ablaufgeschwindigkeit von Vorgängen neben speziellen Werkzeugen (z. B. CANalyzer) auch modellierte Analysesysteme erforderlich. Die Fehlereingrenzung wurde mit Hilfe zusätzlicher Test-Überwachungen und Test-Abfragen automatisiert. Deren Ergebnisse können mit zeitlicher Zuordnung als Messdaten einer HIL-Simulation aufgezeichnet werden. Zur gezielten Überwachung und Analyse der CAN-Kommunikation wurden folgende Mechanismen implementiert:

- Beobachtung der Sendezeitpunkte einzelner Telegramme sowie Analyse der Zyklusabarbeitung (nicht, teilweise oder vollständig abgearbeitet).
- Beobachtung der Sendezeitpunkte sowie Statistiken zu Alarmtelegrammen.
- Beobachtung der Konfigurationen und Zustände der CAN-Kanäle.
- Beobachtung des Auftretens von Fehlertelegrammen (Errorframes) mit Ursachenbestimmung (z. B. CRC-, ACK-, Bit-, Stuffbitfehler) und Fehlereingrenzung (Sender oder Empfänger).
- Beobachtung von Netzknoten (fehleraktiv, fehlerpassiv, vom Bus abgeschaltet) sowie Statistikdaten zu verursachten Fehlern.

Die Buslast wurde mit einem externen PC und der Software CANalyzer gemessen. Parallel dazu wurde eine analytische Maximalabschätzung durch Auswertung der beobachteten Telegramme und Errorframes umgesetzt. Dabei wurde für die zu berücksichtigenden Stuffbits (vom übertragenen Inhalt abhängig) vereinfachend der maximal mögliche Wert je Telegramm verwendet.

7.3 Vergleich von Simulationen mit Versuchen auf dem Rollenprüfstand

Zur Parametrierung und Validierung der Antriebssimulation konnten die mit dem Versuchsfahrzeug (siehe Kapitel 6) sowie mit einem Antriebsprüfstand [198] ermittelten Messdaten herangezogen werden. Im Folgenden werden exemplarisch Daten zweier Fahrversuche auf dem Rollenprüfstand mit den korrespondierenden Simulationen verglichen.

7.3.1 Geschwindigkeitsregelung im rein elektrischen Betrieb

Bild 7.27 zeigt eine Auswahl an Mess- und Simulationsdaten eines Versuchs, bei dem der Autarke Hybrid betriebswarm im rein elektrischen Modus auf dem Rollenprüfstand gefahren wird. Im Versuch wurden Rollenumfangsgeschwindigkeiten vom Prüfstand eingeregelt und durch Variation der Fahrpedalstellung Punkte im Zug- bzw. Schubbetrieb angefahren. Die entsprechende Simulation wurde mit den gemessenen Rollenumfangsgeschwindigkeiten als Sollwerte für das Rollenprüfstandsmodell sowie den aufgezeichneten Fahrpedalstellungen gespeist.

Der Versuchsablauf ermöglicht eine erste Beurteilung der modellierten Funktionen der Antriebskomponenten (mit Ausnahme von Trennkupplung und Turbodiesel) inklusive der Regelungen und Steuerungen. Die guten Übereinstimmungen zwischen den Radantriebsmomenten und den aus den Strom- und Spannungsverläufen berech-

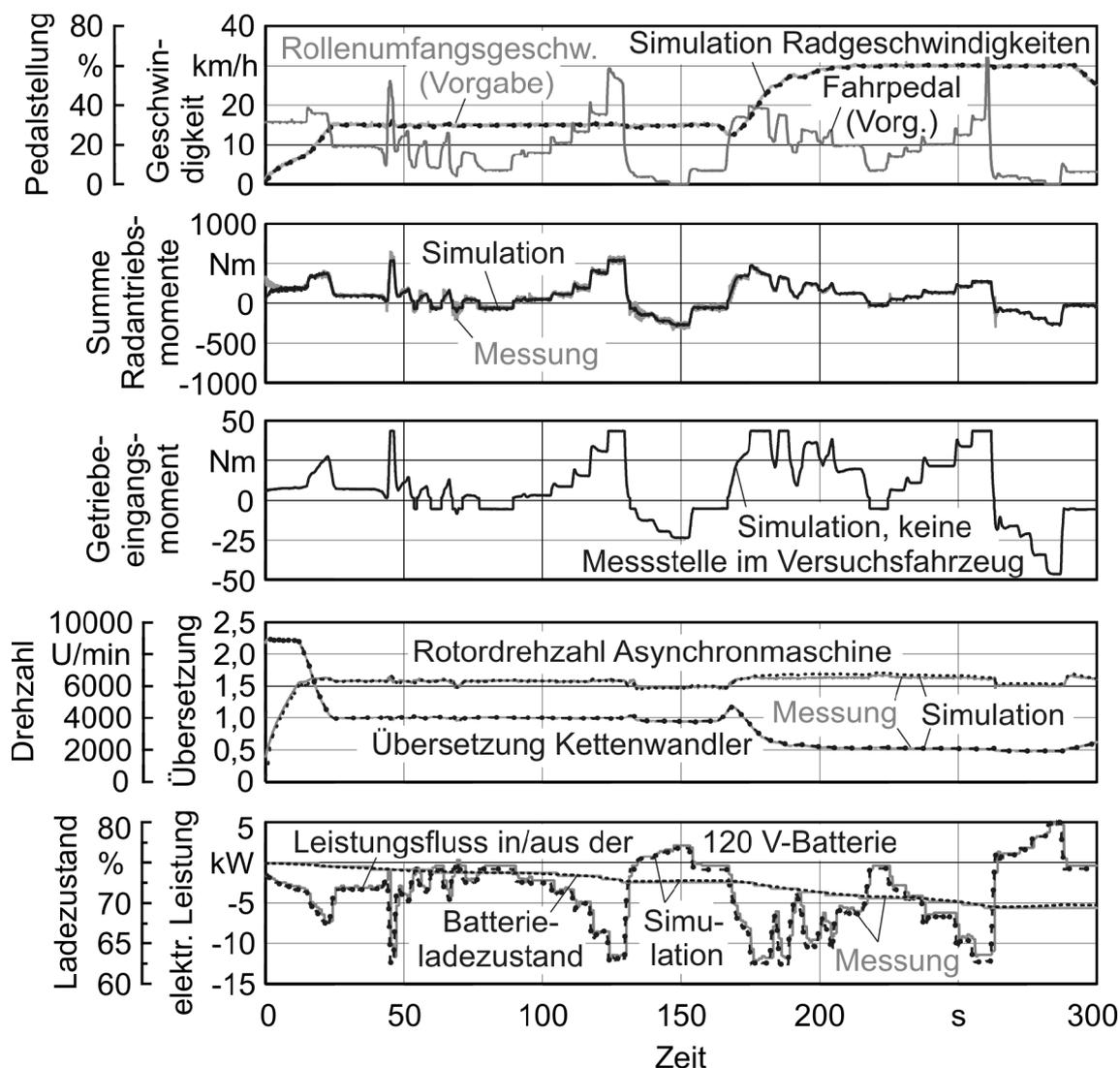


Bild 7.27: Vergleich Messung und Simulation einer rein elektrischen Versuchsfahrt auf dem Rollenprüfstand. Die Rollenumfangsgeschwindigkeit wird durch den Prüfstand eingeregelt.

neten elektrischen Leistungen verdeutlichen die Brauchbarkeit der Simulation und bestätigen indirekt auch die angenommenen Wirkungsgrade. Damit sind relativ verlässliche Berechnungen zusätzlicher, im Fahrzeug nicht gemessener Größen (z. B. Getriebeeingangsmoment) für Analysen im betriebswarmen Modus zulässig.

7.3.2 Fahrsimulation im Hybridbetrieb

Bild 7.28 zeigt den Vergleich von Versuch und Simulation einer Fahrsimulation auf dem Rollenprüfstand. Exemplarisch wurde ein Ausschnitt aus dem NEFZ-Prüfzyklus

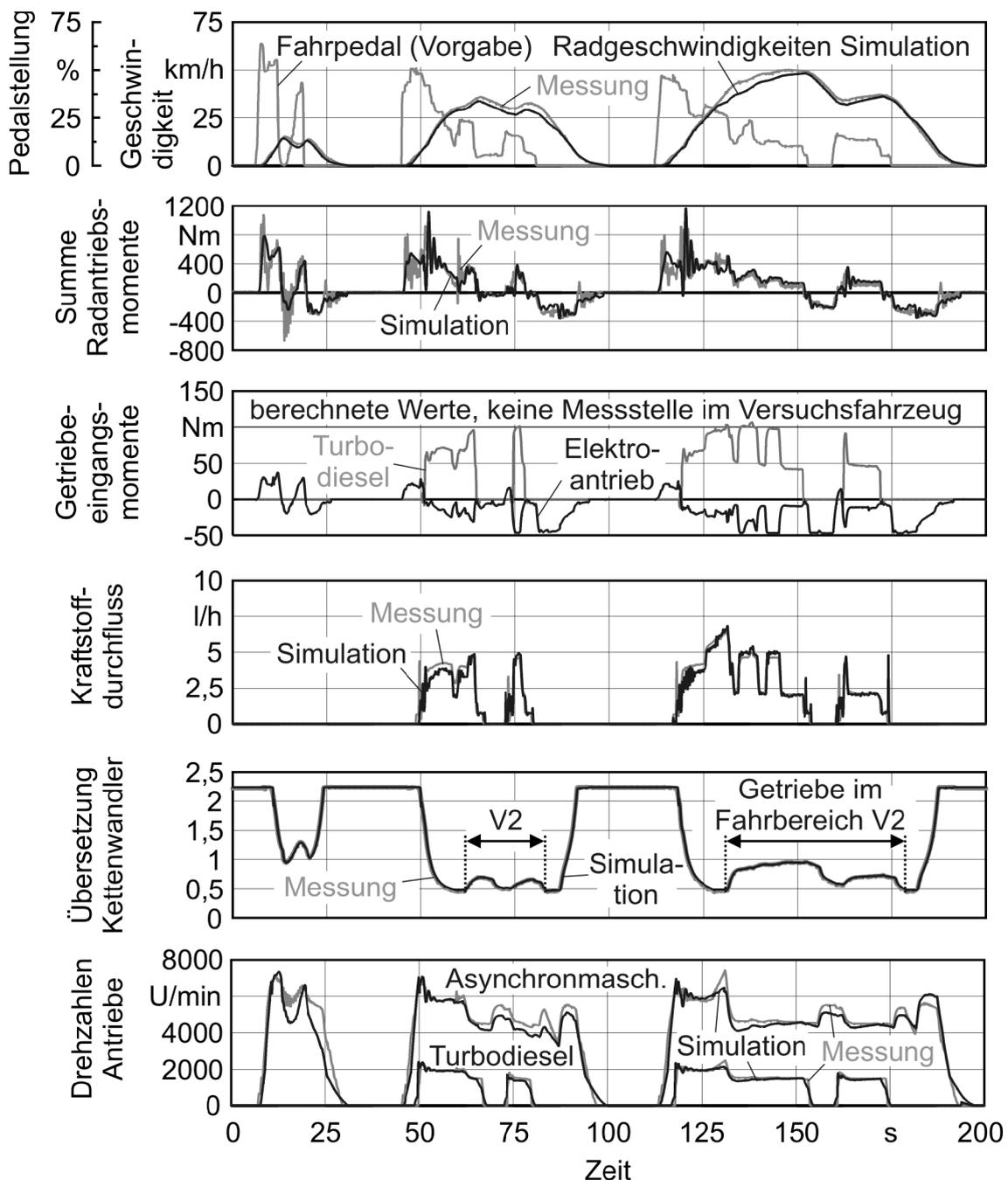


Bild 7.28: Versuch und Simulation einer Fahrsimulation auf dem Rollenprüfstand.

gewählt, in dem sowohl der rein elektrische als auch der hybride Modus des Autarken Hybrid betrachtet werden kann.

Die Simulation wird mit den im Versuch ermittelten Fahrpedalstellungen und Schalterbetätigungen gespeist. Die guten Übereinstimmungen und vergleichbaren funktionalen Zusammenhänge bestätigen die Eignung der Systemsimulation zur Entwicklung und Optimierung der Signalkommunikation. Hinzunehmende Einschränkungen aufgrund der stark vereinfacht modellierten Dynamik sind vor allem an den Abtriebsmomenten und Drehzahlen der Antriebsmaschinen erkennbar.

7.4 Modellbasierte Analyse eines NEFZ-Zyklus

Das parametrisierte Simulationsmodell kann für detaillierte Analysen von Versuchen mit dem Prototypenfahrzeug eingesetzt werden. In guter Näherung können z. B. die Drehmomente am Getriebeeingang sowie umgesetzte Energien und Leistungen ermittelt werden.

Bild 7.29 zeigt das Ergebnis einer entsprechenden Auswertung für einen simulierten NEFZ-Prüfzyklus. Dabei wurde das Modell mit in Versuchen gemessenen Sollwerten des Antriebsmanagements gespeist. Alternativ ist die Interaktion realer Fahrer mit der Echtzeitsimulation über geeignete Betätigungselemente oder eine Simulationsumgebung denkbar.

100 EE = 7,241 kWh Energiegehalt des verbrauchten Dieselkraftstoffs

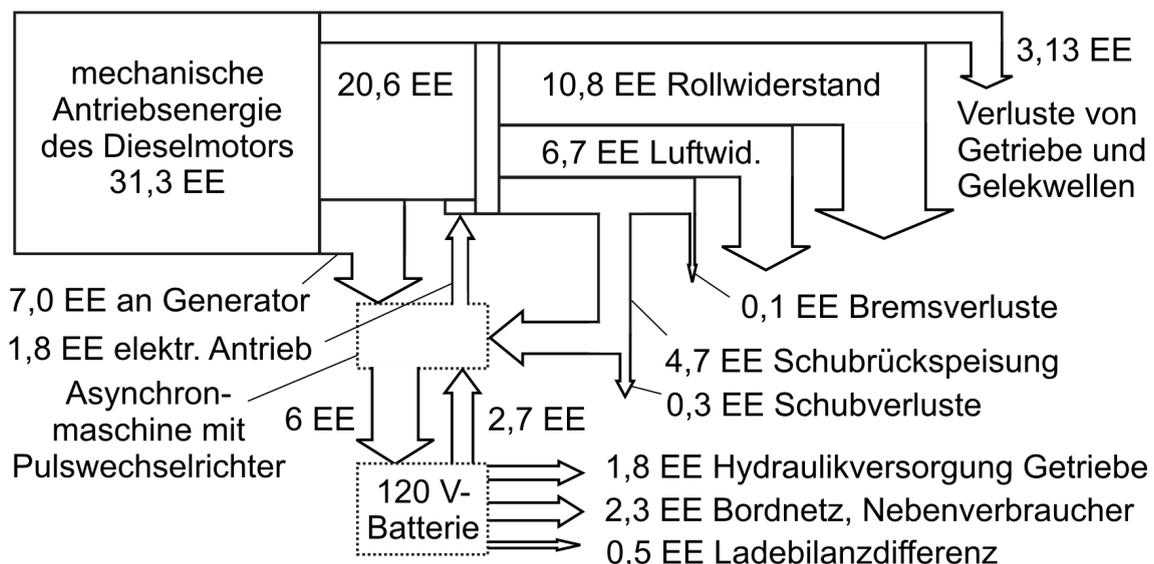


Bild 7.29: Mit Hilfe der Systemsimulation analysierte Energiebilanz des modellierten Antriebssystems für einen NEFZ-Prüfzyklus. Die Wirkungsgrade der Komponenten sowie die Energien der Nebenverbraucher wurden über das Modell eingerechnet.

7.5 Entwicklung einer Getriebe-ECU

Das im Kapitel 7.2.1.3 dokumentierte Modell der Getriebe-ECU wurde exemplarisch in einem modellbasierten Entwicklungsprozess (Beispiel und Anleitung siehe [145]) auf eine ESX (siehe Kap. 4.2.2) implementiert. Damit konnte das Kommunikationskonzept auf einer für das Antriebssystem funktional bedeutenden Zielhardware abgebildet werden. Der z. T. vereinfachte Funktionscode erfüllt folgende Zielvorgaben:

- Vollständige Funktionalität des in Kapitel 5 beschriebenen fehlertoleranten Kommunikationskonzepts auf zwei dynamisch redundanten CAN-Systemen (d. h. Kommunikations- und Überwachungsfunktionen, Netzwerkmanagement).
- Funktionalität einer strukturvariablen Kettenwandlerregelung in Anlehnung an [194]. Weiterentwicklungen der Kettenwandlerregelung mit adaptiver Störgrößenkompensation nach [209] wurden nicht berücksichtigt.
- Funktionalität der Schaltprogramme und Ansteuerungen der Lamellen- und Klauenkupplungen des i^2 -Getriebes sowie der Trennkupplung.
- Ansteuerung der Hydraulik- und Schmierölpumpe.
- Exemplarische Überwachungs- und Fehlertoleranzmechanismen für ausgewählte Sensoren (z. B. für Drehzahlsensoren, siehe Kapitel 5) und Aktoren.

7.6 HIL-Simulationen zur Absicherung der Signalkommunikation

7.6.1 Vorgehen

Das Kommunikationskonzept wurde in HIL-Simulationen untersucht, **Bild 7.30**. Dabei wurde in folgender Chronologie vorgegangen:

Schritt 1: Validierung der Echtzeit-Systemsimulation

- Abbildung der Antriebssimulation mit Modellen der Antriebskomponenten, des Fahrzeugs, der ECUs sowie des Antriebsmanagements auf dem Prozessor der HIL-Umgebung. Nachweis der Echtzeitfähigkeit, Funktion und Plausibilität der Modelle (siehe Kapitel 7.3).
- Abbildung der CAN-Systeme auf den Controllern der dSpace-Entwicklungsumgebung und Validerung der CAN-Kommunikation (v. a. Absicherung der Datenbank, Kommunikationsmatrix und Kommunikationsmechanismen).

Schritt 2: Funktionstest der Test-ECU Getriebe

- Einbindung der Test-ECU Getriebe über die Schnittstellen Sensoren, Aktoren und CAN. Anschließend Durchführung von Funktionstests und Analyse des Systemverhaltens. Das Modell der ECU kann dabei z. B. als parallele Referenz benutzt werden.

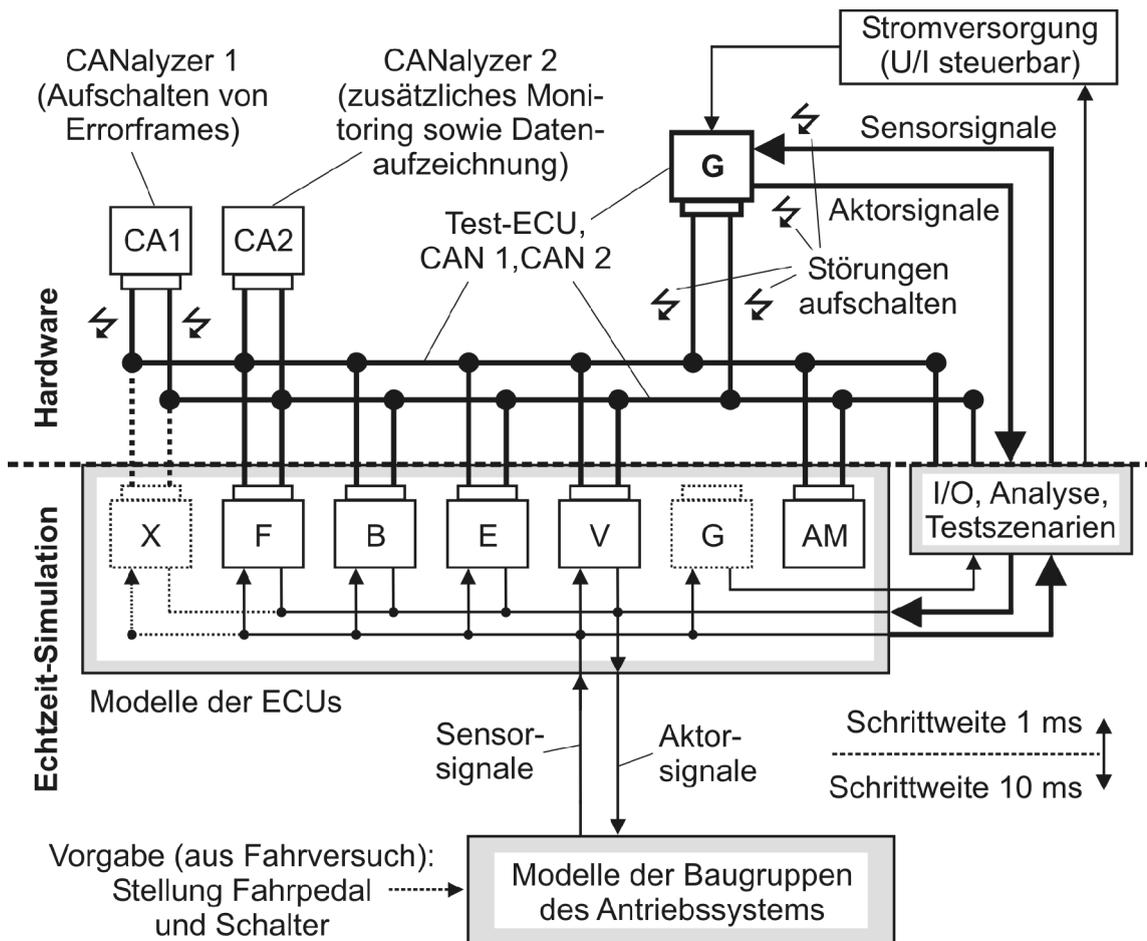


Bild 7.30: HIL-Aufbau zum Test der ECU Getriebe. Bezeichnungen und Zuordnungen der Modelle der Steuer- und Regelgeräte (ECUs) zu den Antriebskomponenten siehe Bild 5.3.

Schritt 3: Untersuchung von Fehlerszenarien

- Untersuchung und Absicherung der Funktionssicherheit durch Provokation von Fehlerszenarien. Gezielte Manipulation von Signalen durch Schaltungen und Fehlermodelle (siehe Kapitel 7.2). Analyse der Reaktionen der ECU Getriebe, der CAN-Systeme sowie des Gesamtsystems.

7.6.2 Analyse und Validierung des Systemverhaltens

7.6.2.1 Kommunikationsablauf der durch die HIL-Umgebung abgebildeten CAN-Systeme

Durch die Abbildung der CAN-Netzwerke auf Controllern der Entwicklungsumgebung sowie auf der Zielhardware konnte das komplexe Zeit- und Kommunikationsverhalten dargestellt und an der Systemsimulation untersucht werden. Die Funktion des Kommunikationskonzepts sowie eine Übertragbarkeit der HIL-Simulation auf das

Versuchsfahrzeug wurde nachgewiesen. Die Validierung der Kommunikation umfasste dabei vor allem folgende Punkte:

Absicherung der Kommunikationsmatrix

Hierzu wurden die Sender-Empfänger-Beziehungen, die korrekte Kommunikation von Botschaften und Signalen sowie deren Codierung und Dekodierung überprüft. Im Anwendungsfall erfolgte dies durch gezieltes Busmonitoring, Aufzeichnung des Datenverkehrs mit dem CANalyzer und anschließenden Analysen.

Absicherung des Kommunikationsablaufs

Im Anwendungsfall wurden Abläufe der Kommunikationszyklen, das Hochlauf- und das Abschaltverhalten analysiert. Die Überprüfung erfolgte mit Testmodellen und Überwachungsfunktionen (z. B. mit Stateflow), die auf die Systemsimulationen aufgesetzt wurden. **Bild 7.31** zeigt eine statistische Auswertung von Kommunikationszyklen einer Netzwerkvariante mit 1 MBit/s Übertragungsrate (wie im Versuchsfahrzeug eingesetzt), **Bild 7.32** die entsprechende Auswertung für das entwickelte Netzwerk mit 500 kBit/s.

Da in der betrachteten HIL-Konfiguration auf einem CAN-Kanal nur drei Controller (Antriebsmanagement, Modelle der ECUs und Test-ECU) kommunizieren, finden reale Arbitrierungsvorgänge meist nur zwischen der Test-ECU Getriebe und den Modellen der ECUs statt. Als weitere Einschränkung gegenüber dem Versuchsfahrzeug muss aufgrund der Schrittweite 1 ms Reaktionszeit zwischen der Initialisierung und dem Beginn der Sendevorgänge in Kauf genommen werden. Der Kommunikationsablauf wird dennoch realistisch genug abgebildet. Neben dem an der Verteilung der Empfangszeitpunkte erkennbaren Jitter (Schwankungen) sind die Latenz- und Laufzeiten der Botschaften zu erkennen. Im entwickelten Netzwerk (mit 500 kBit/s) ist die Kommunikation im störungsfreien Fall nach 3 ms abgearbeitet. Die Grenzen der mit CAN-Botschaften erreichbaren Synchronisierungsgenauigkeiten werden deutlich. Die Übertragung der nur im Fehlerfall einmal je Zyklus gesendeten Alarmtelegramme wurde überprüft, ein schneller Buszugriff (im Bereich 1 ms) konnte nachgewiesen werden.

Buslastmessung

Die in der Netzwerkauslegung (Kapitel 5.2.3) prognostizierten Buslasten wurden experimentell mit dem Entwicklungswerkzeug CANalyzer verifiziert. Darüber hinaus wurde die Buslast mit zusätzlichen, zyklisch versandten Telegrammen auf bis zu 30 % erhöht. Damit konnte die Funktion des Kommunikationskonzepts bei Ausschöpfung des prognostizierten Potenzials (z. B. für Botschaften weiterer Teilnehmer) abgesichert werden.

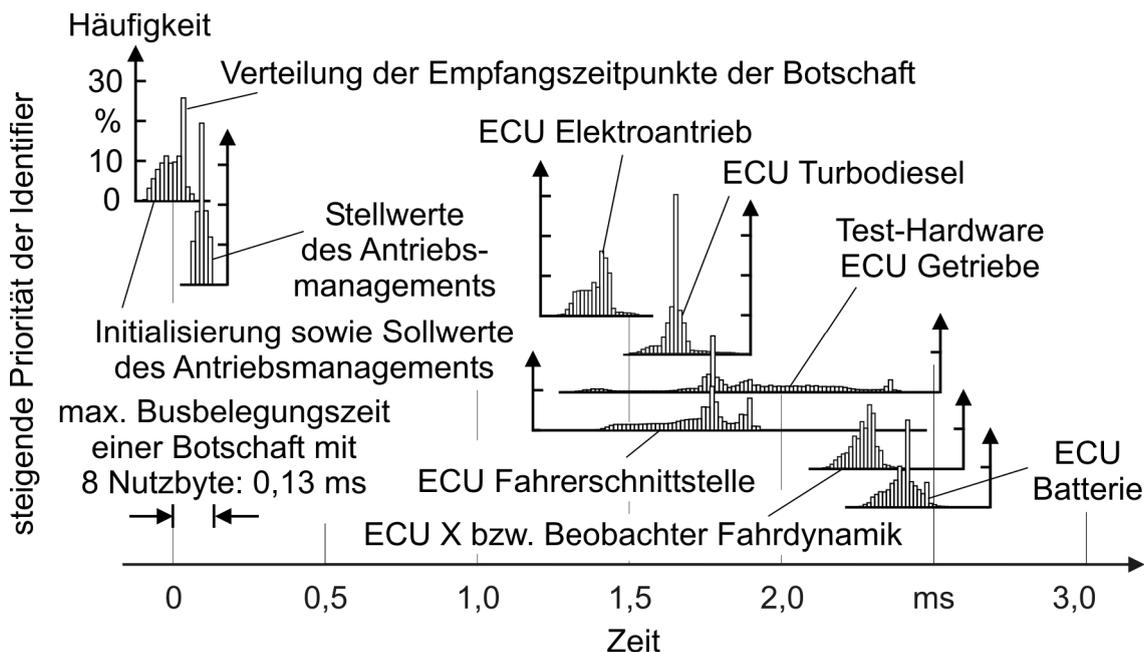


Bild 7.31: Verteilung der Empfangszeitpunkte aller im 10 ms-Zyklus kommunizierten Botschaften auf einem CAN-Kanal (hier exemplarisch in der Betriebsart Regelung). Die Übertragungsrate beträgt wie im Versuchsfahrzeug 1 MBit/s. Als Hardware ist die Test-ECU Getriebe in die Systemsimulation eingebunden, alle anderen Steuer- und Regelgeräte werden durch die HIL-Entwicklungsumgebung simuliert.

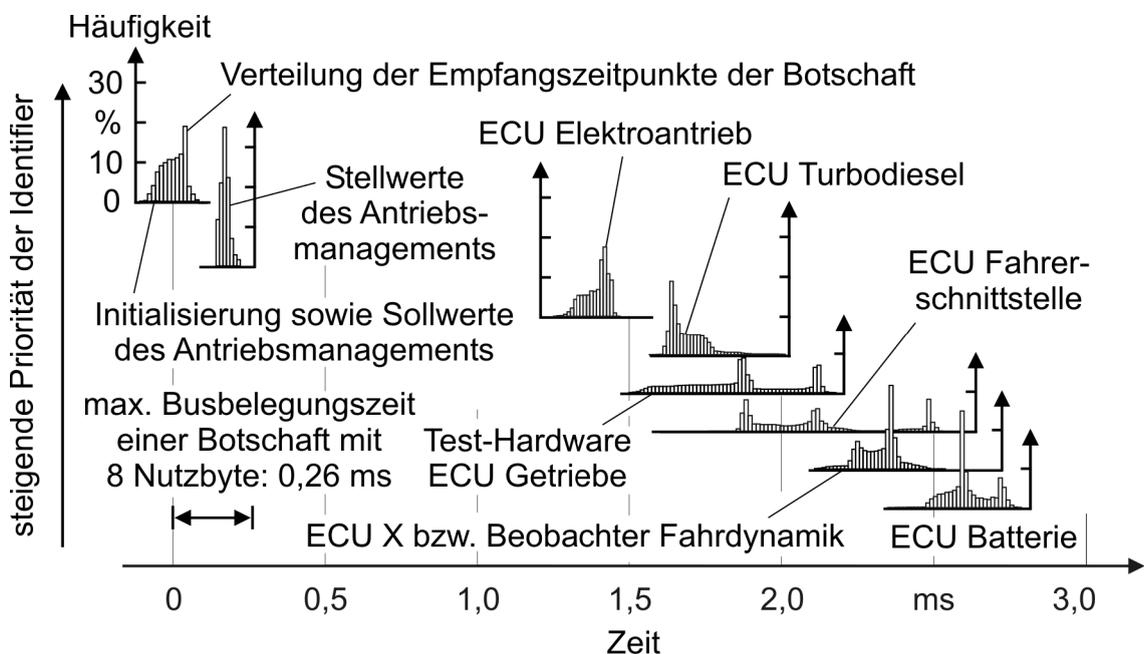


Bild 7.32: Verteilung der Empfangszeitpunkte aller im 10 ms-Zyklus kommunizierten Botschaften auf einem CAN-Kanal (hier exemplarisch in der Betriebsart Regelung). Die Übertragungsrate beträgt wie in Kapitel 5 erläutert 500 kBit/s. Als Hardware ist die Test-ECU Getriebe in die Systemsimulation eingebunden, alle anderen Steuer- und Regelgeräte werden durch die HIL-Entwicklungsumgebung simuliert.

7.6.2.2 HIL-Funktionstest der Getriebe-ECU

Bild 7.33 zeigt im Vergleich Messdaten aus Rollenprüfstandsfahrten mit dem Versuchsfahrzeug und der in Bild 7.30 beschriebenen HIL-Simulation. Die Simulation wird wieder mit im Versuch ermittelten Fahrpedalstellungen und den betätigten Schaltern gesteuert. Die Sensor- und Aktorsignale sowie die über CAN kommunizierten Daten der eingebundenen Test-ECU Getriebe können direkt mit dem parallel gerechneten Modell der Getriebe-ECU verglichen werden. Exemplarisch sind in Bild 7.33 die von der Getriebe-ECU über CAN gesendeten Messwerte Kettenwandlerübersetzung, Position des Vierkantensteuerschiebers sowie Abtriebsdrehzahl des Kettenwandlers in Relation zum Referenzmodell gesetzt.

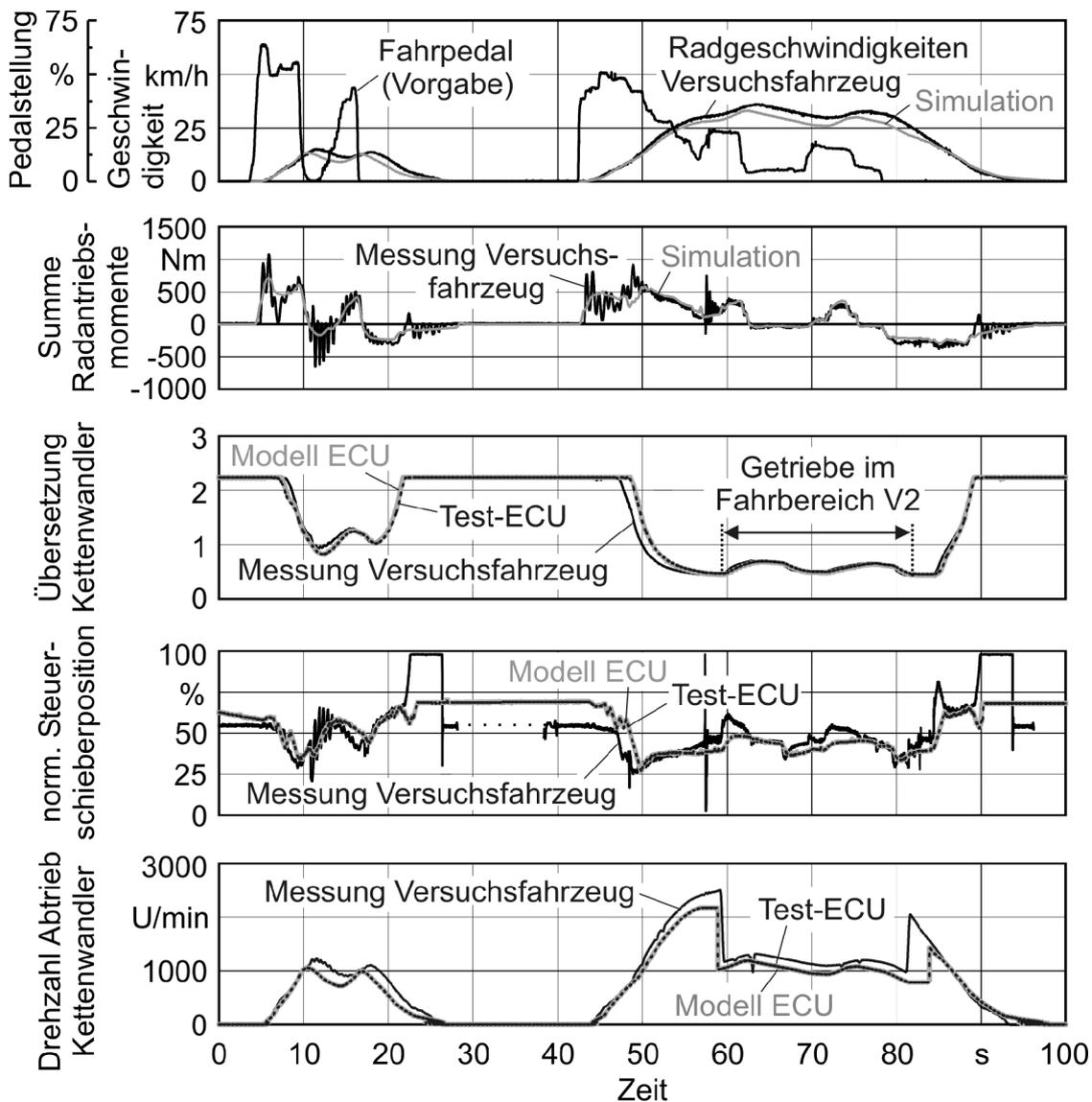


Bild 7.33: Vergleich zwischen Messung und HIL-Simulation mit eingebundener Test-ECU Getriebe. Als Referenz zur Test-ECU sind exemplarisch Messwerte des parallel gerechneten Modells der ECU Getriebe dargestellt.

Die gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten der Modell-ECU und der als Hardware eingebundenen Test-ECU Getriebe beweisen deren Messgenauigkeit. Die Kommunikations-, Regel- und Steuerfunktionen der Test-ECU Getriebe werden durch die korrekte Funktion im Verbund mit der Systemsimulation untermauert.

Bild 7.34 zeigt einen Detailausschnitt zur Kommunikation zwischen dem Antriebsmanagement und der eingebundenen Test-ECU Getriebe. Das Antriebsmanagement übermittelt im 10 ms-Zyklus u. a. Sollwerte für die Übersetzung sowie einen Zykluszähler zur zusätzlichen Konsistenzüberprüfung. Die Getriebe-ECU setzt diese Sollwerte nach einer Konsistenz- und Plausibilitätsprüfung um und bestätigt mit Messwerten (hier ist nur die Übersetzung dargestellt) sowie dem aus Sicht der ECU aktuellen Zykluszähler.

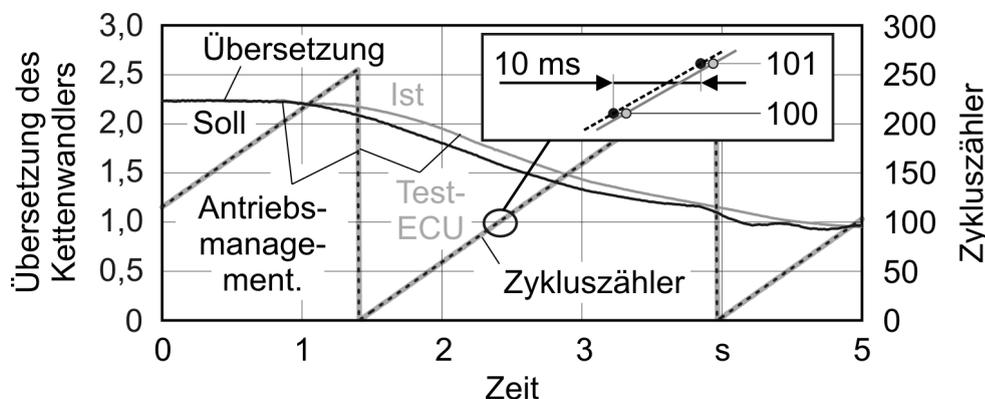


Bild 7.34: Initialisierungsbotschaft des Antriebsmanagements und Antwort der Test-ECU Getriebe.

7.6.3 Absicherung von Ausfall- und Fehlerszenarien der fehlertoleranten CAN-Kommunikation

Die HIL-Simulation eignet sich zur Untersuchung und Absicherung des Systemverhaltens bei Fehlerszenarien. Im Folgenden werden einige ausgewählte Fehler der CAN-Kommunikation provoziert, die System- und Komponentenreaktion analysiert und an Beispielen die Funktion des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten fehlertoleranten Kommunikationskonzepts demonstriert. Das Grundprinzip der Fehlertoleranz besteht dabei darin, einen im Überwachungsmodus betriebenen redundanten CAN als Ersatz für den gestörten Regelbus zu benutzen.

7.6.3.1 Leitungs- und Kontaktfehler

Mit Hilfe elektrischer Schaltungen wurden Leitungs- und Kontaktbrüche, Wackelkontakte, Kurzschlüsse sowie Totalausfälle einzelner Knoten provoziert (siehe Tabelle 7.1). Diese unterschiedlichen Fehlerarten werden durch das Kommunikationssystem zwar z. T. differenziert diagnostiziert, jedoch mit weitgehend ähnlichen Reaktionen kompensiert.

Bild 7.35 veranschaulicht einen Versuch, bei dem zunächst auf CAN 1 im Betriebsmodus Regelung und auf CAN 2 im Modus Überwachung fehlerfrei kommuniziert wird. Dann wird z. B. beim Zeitpunkt 10,63 s das CAN-Kabel auf Kanal 2 aufgetrennt. Das Antriebsmanagement sowie die ECUs diagnostizieren ausbleibende Botschaften, erhalten keine Sendebestätigungen oder erkennen falsche Spannungspegel bzw. können eigene Pegel nicht aufschalten (Fehlererkennungsmechanismus Bitmonitoring wird wirksam). Das Antriebsmanagement veranlasst daraufhin bei der folgenden Zyklusinitialisierung einen Wechsel in die Rückfallebene auf CAN 1, **Bild 7.36**. Die ECUs empfangen dieses Initialisierungstelegramm, erkennen die Anweisung zum Wechsel der Betriebsarten und antworten nur noch auf CAN 1 mit Datentelegrammen.

Da der Fehler auf CAN 2 eventuell nur temporär ist, startet das Antriebsmanagement Sendeversuche mit Initialisierungstelegrammen zur Betriebsart Reset auf CAN 2. Dies führt nach über 255 Sendefehlversuchen zum Abschalten des CAN-Controllers (Bus-Off-Zustand). Der Controller wird dann wieder neu initialisiert und ein entspre-

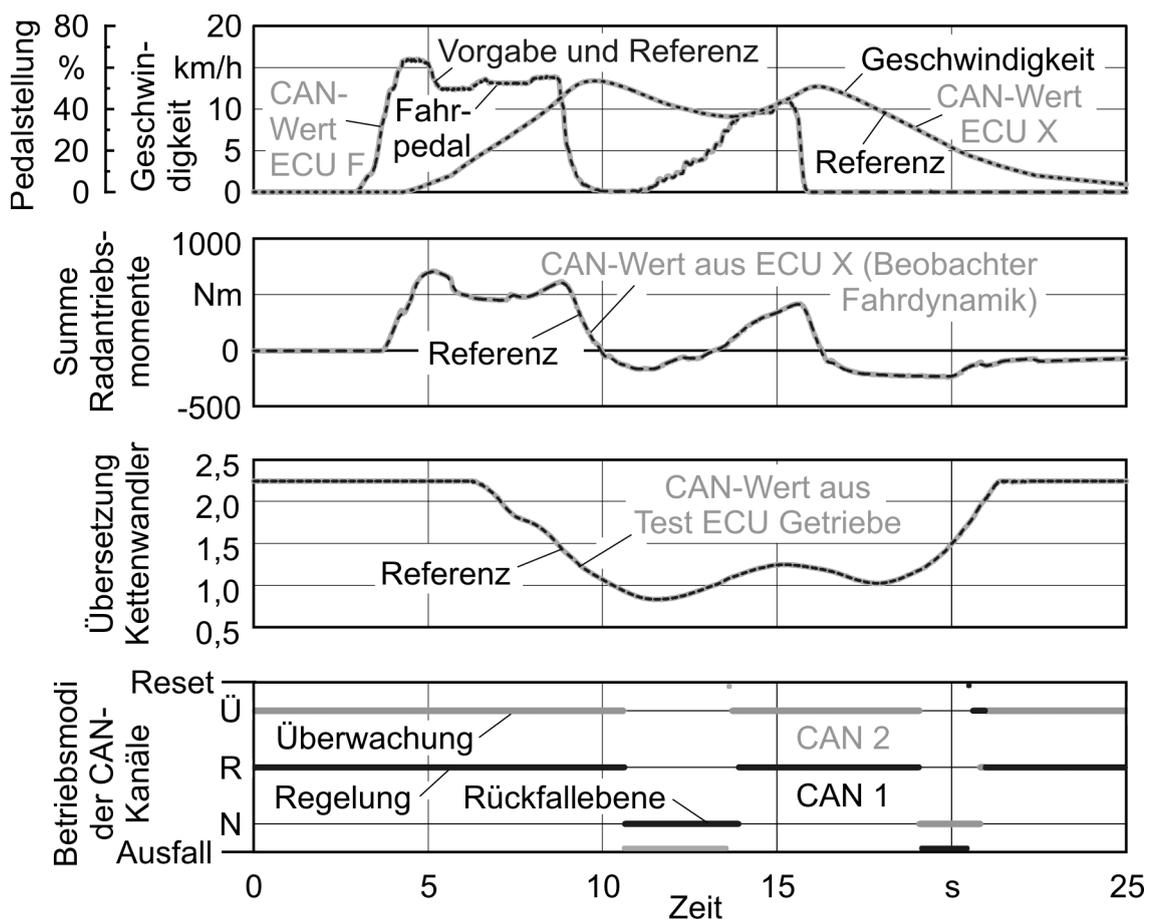


Bild 7.35: Systemverhalten und Fehlerkompensation bei provozierten Leitungs- und Kontaktbrüchen, Wackelkontakten und Ausfällen von Knoten. Durch Fehlerdiagnose und geeignete Wechsel der Betriebsmodi kann das Antriebsmanagement ohne Beeinträchtigungen aufrecht erhalten werden. Die über CAN kommunizierten Werte stimmen mit den Referenzsignalen der Simulation ohne Fehlerprovokation überein.

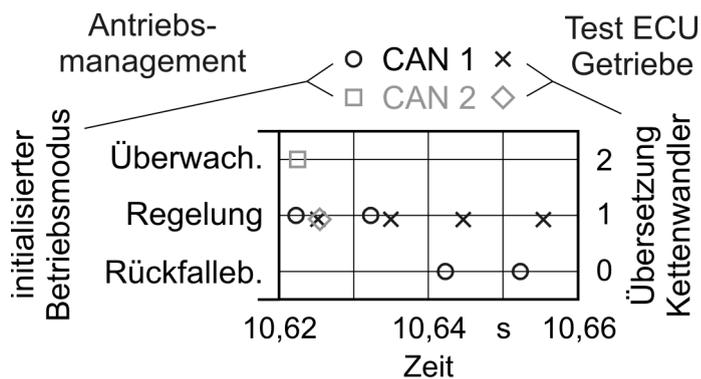


Bild 7.36: Zeitliche Auflösung des Wechsels der Betriebsarten. Um den Zeitpunkt 10,63 bricht die Kommunikation auf CAN 2 zusammen. Das Antriebsmanagement diagnostiziert dies im kommenden Zyklus und wechselt danach in die Betriebsart Rückfallebene auf CAN 1.

chender Fehlerzähler inkrementiert. Nach maximal 5 erfolglosen Resetläufen (Gesamtdauer ca. 12,75 s) wird der Kanal als defekt eingestuft und abgeschaltet. Ist ein Resetversuch erfolgreich, antworten die ECUs mit Daten, Bild 7.35 (Zeitpunkt ca. 14 s). CAN 2 wechselt wieder in die Betriebsart Überwachung und der Fehlerspeicher der Netzwerkteilnehmer wird mit jedem erfolgreichen Kommunikationszyklus wieder gesenkt.

Anschließend wurde der gleiche Fehler auf CAN 1 provoziert. Nach dem erfolgreichen Reset wechselte aufgrund des geringeren Fehlerspeichers der Netzwerkteilnehmer am CAN 1 die Regelung wieder auf Kanal 1.

7.6.3.2 Fehlfunktionen und Defekte von Netzknoten

Defekte und Fehlfunktionen von Netzknoten wurden durch Manipulation der Systemsimulation provoziert. Das System reagierte wie folgt:

Ausbleiben von CAN-Botschaften einzelner ECUs

Ausbleibende CAN-Botschaften einzelner ECUs oder Totalausfälle von CAN-Controllern werden durch das Antriebsmanagement sowie z. T. durch betroffene ECUs im Rahmen der lokalen Überwachung der Zyklusabarbeitung erkannt. Die Initialisierungstelegramme des Antriebsmanagements werden nach der Fehlerdiagnose mit dem nächst folgenden Zyklus entsprechend geändert, z. B. auf die Betriebsmodi Rückfallebene (auf dem fehlerfreien CAN-Kanal) und Reset (auf dem fehlerbehafteten CAN-Kanal), siehe auch Bild 7.35.

Scheitern die Resetversuche nur am Ausbleiben einzelner ECUs, wird die Kommunikation auf dem fehlerhaften CAN in der Betriebsart Überwachung fortgesetzt. Im Antriebsmanagement wird ein entsprechender Fehlerspeicher gesetzt und über den Status des Initialisierungstelegramms im Netzwerk globalisiert. Die Betriebsart Regelung ist auf dem defekten Bus nicht mehr möglich. Scheitern die Resetversuche komplett, werden auf dem fehlerhaften CAN bis zum nächsten Systemstart keine Initialisierungsbotschaften versendet und der Kanal damit stillgelegt.

Ausbleiben von CAN-Botschaften des Antriebsmanagements

Haben ECUs nur auf einem CAN-Kanal eine Initialisierungsbotschaft erhalten, so antworten sie nur auf diesem vermutlich intakten CAN mit Datentelegrammen. Damit kann das Antriebsmanagement diesen Fehler gegebenenfalls erkennen und einen geeigneten Wechsel der Betriebsart bzw. der Initialisierungen vornehmen. Die Betriebsführung des Antriebssystems kann damit ohne Einschränkung aufrecht erhalten werden.

Verzögerte Initialisierungsbotschaften des Antriebsmanagements

Die ECUs überprüfen mit Hilfe ihrer Ablaufzähler sowie der empfangenen Zykluszähler den erwarteten Kommunikationszeitpunkt. Verzögert sich bei Parallelkommunikation ein Initialisierungstelegramm um mehr als 2 ms, so wird dies als Fehler interpretiert. Geeignete Maßnahmen der ECUs sind Antworten mit Datentelegrammen auf dem fehlerfreien CAN und Überwachungstelegrammen auf dem verzögerten Kanal. Wenn die Abweichung nicht durch Überwachungs- und Korrekturmechanismen des Antriebsmanagements behoben werden kann, melden die ECUs diesen Fehler mit Alarmbotschaften und stellen anschließend die Kommunikation auf dem fehlerhaften CAN ein.

7.6.3.3 Störungen

Im Rahmen dieser Arbeit werden unter dem Begriff „Störungen“ Fehlerszenarien zusammengefasst, die durch elektromagnetische Wirkungen von außen auftreten. Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) der im Versuchsfahrzeug verbauten elektronischen Komponenten ist relativ gut. Eine EMV-Störung kann dennoch auftreten und Fehlfunktionen oder Bauteildefekte hervorrufen. Als Ursache kommen sowohl Störungen benachbarter stromführender Leitungen als auch Störungen aus der weiteren Umgebung infrage.

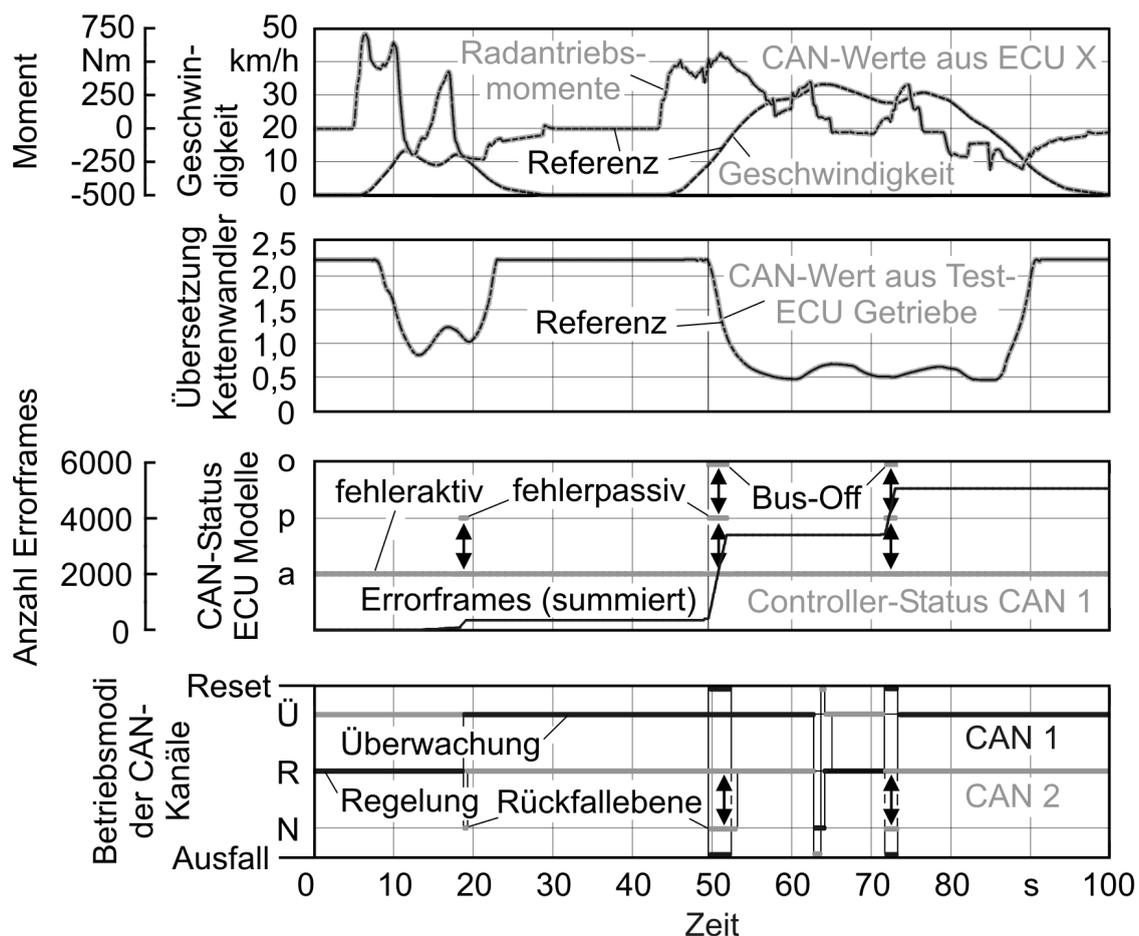
Das Risiko von EMV-Störungen kann vor allem durch konstruktive Maßnahmen (EMV-gerechte Gestaltung elektronischer Bauteile) und geeignete Kabelführungen (Bauteile mit hohen elektrischen Leistungen umgehen) minimiert werden. Bei Verwendung redundanter CAN-Kanäle, die so weit möglich räumlich getrennt im Fahrzeug installiert werden, ist eine Kompensation massiver Störungen möglich und sehr wahrscheinlich.

In CAN-Netzwerken führen temporäre Störungen direkt oder infolge zu einer Reihe von Errorframes auf dem betroffenen Kanal (siehe Kapitel 3.1.2.3). Telegrammübertragungen werden abgebrochen und Zugriffe auf dem belegten oder gestörten Bus behindert. Dabei erhöhen sich die in den CAN-Controllern der Netzwerkteilnehmer geführten Empfangs- und Senderfehlerzähler mit jedem abgebrochenen Übertragungsversuch (siehe Bild 3.10). Gegebenfalls gehen Knoten in den fehlerpassiven Zustand, bei massiveren Störungen in den Bus-Off-Zustand über.

Im vorliegenden Steuer- und Regelgerätenetzwerk führen temporär begrenzte Störungen zu unvollständigen oder nicht abgearbeiteten Kommunikationszyklen, gegebenenfalls zu Ausfällen einzelner Netzwerkknoten oder zum totalen Ausfall aller Kommunikationsteilnehmer.

Bild 7.37 zeigt einen Versuch, bei dem auf CAN-Kanal 1 Störungen durch Beaufschlagung mit Errorframes nachgebildet werden. Zunächst befindet sich das System im fehlerfreien Zustand. CAN-Kanal 1 kommuniziert in der Betriebsart Regelung, CAN-Kanal 2 im Überwachungsmodus. Im Zeitraum von 12–18 s wird CAN 1 mit vereinzelt Errorframes belastet. Die Störung (8 mal jeweils 10 aufeinander folgende Errorframes, maßstabsbedingt hier fast nicht sichtbar) beeinträchtigen die Kommunikation nur geringfügig. Die Zyklen können noch korrekt abgearbeitet werden.

Dann wird (ab dem Zeitpunkt ca. 18 s) die Kommunikation auf Kanal 1 durch eine Folge von Errorframes beeinträchtigt. Die im Netzwerkmanagement aller an der Kom-



↕ kennzeichnet schnell wiederholend wechselnden CAN-Controller-Status

Bild 7.37: Systemverhalten bei provozierten Störungen der Kommunikation (hier durch Beaufschlagung von Errorframes über den CANalyzer).

munikation beteiligten Knoten implementierten Überwachungen erkennen nicht vollständig abgearbeitete Kommunikationszyklen (Botschaften wurden abgebrochen oder der Buszugriff blockiert). Das System wechselt die Betriebsart des fehlerfreien CAN 2 in den Modus Regelung und CAN 1 in den Modus Überwachung.

Exemplarisch ist der Status des CAN-Controllers (auf CAN 1) der Modell-ECUs dargestellt. Er geht bei über 127 Sende- oder Empfangsfehlern in den fehlerpassiven Zustand über und wird bei erfolgreichen Sende- und Empfangsvorgängen wieder fehleraktiv. Dieser sich mehrfach wiederholende Vorgang läuft in ähnlicher Weise auch in den Controllern der Test-ECU sowie des Antriebsmanagements ab. Nach Beendigung der Störung geht der Controller wieder in den fehleraktiven Zustand über.

Eine massivere Störung (ab dem Zeitpunkt ca. 50 s) führt zum Zusammenbruch der Kommunikation auf CAN 1. Die Controller der Netzwerkteilnehmer auf CAN 1 gehen in den Bus-Off-Zustand über, CAN 2 wechselt in die Rückfallebene bzw. in den Modus Notbetrieb. Da die Störung nur temporär sein könnte, reinitialisieren die ECUs sowie das Antriebsmanagement ihre Kommunikationscontroller auf CAN 1 (Bus-Off-Recovery). Der Kanal CAN 1 geht damit in die Betriebsart Reset über. Scheitern die Resetversuche auch nach 12 s, so wird der fehlerhafte CAN 1 bis zum nächsten Systemstart abgeschaltet und die Fehlerzustände in einem Fehlerspeicher abgelegt.

Im betrachteten Versuch (Bild 7.37) gelingt die Wiederaufnahme des Überwachungsbetriebs auf CAN 1. CAN 2 wechselt wieder in die Betriebsart Regelung (ab Zeitpunkt ca. 52 s). Um die wiederhergestellte Funktionsweise des CAN 1 zu demonstrieren, wird CAN 2 durch einen simulierten Kabelbruch gestört. Der erholte CAN 1 wechselt zunächst in den Notbetrieb, nach Behebung der provozierten Bruchstelle auf CAN 2 in die Betriebsart Regelung. Im Zeitraum 72–73 s wird CAN 1 noch einmal massiv gestört, das Kommunikationssystem reagiert wieder wie eben beschrieben. In **Tabelle 7.3** sind Systemreaktionen auf Störungen zusammengefasst.

7.6.3.4 Übertragungsfehler

In CAN-Netzwerken können mit geringer Restfehlerwahrscheinlichkeit vereinzelt unerkannte Übertragungsfehler auftreten. Bei Parallelkommunikation werden diese Fehler mit hoher Wahrscheinlichkeit (bzw. mit quadratierter Restfehlerwahrscheinlichkeit) durch den Vergleich der auf beiden CAN-Kanälen übertragenen Daten erkannt. Bei Regelkreisen mit in Relation zu den Zeitkonstanten verhältnismäßig hohen Abtastraten können vereinzelt Übertragungsfehler durch Filter (siehe Tabelle 3.11) oder das wirksame Übertragungsverhalten der Strecken beherrscht werden. Ein entsprechender Nachweis erfolgte in hier nicht weiter beschriebenen HIL-Tests.

Kritischer wirken sich Übertragungsfehler von Befehlen aus. Im entwickelten Kommunikationskonzept werden Befehle erst nach einer Bestätigung sowie nur bei gültigen Initialisierungstelegrammen des Antriebsmanagements angenommen und

Tabelle 7.3: Systemreaktion auf Störungen.

Eskalationsstufe	Systemreaktion
<ul style="list-style-type: none"> • vereinzelte Errorframes • Zyklus abgearbeitet • alle Knoten fehleraktiv 	Betrieb kann aufrecht erhalten werden, kein Umschalten auf den redundanten CAN-Kanal bei Parallelkommunikation.
<ul style="list-style-type: none"> • viele Errorframes • Zyklus nicht oder nicht vollständig abgearbeitet • alle Knoten fehleraktiv 	Bei Parallelkommunikation wird der Betriebsmodus Regelung auf den redundanten CAN umgeschaltet (nur wenn dieser fehlerfrei ist oder wesentlich weniger intensiv gestört wird).
<ul style="list-style-type: none"> • viele Errorframes • Zyklus nicht oder nicht vollständig abgearbeitet • fehlerpassive Knoten 	Bei Betrieb in der Rückfallebene (nur 1 CAN-Kanal verfügbar) wird nach dem vierten nicht abgearbeitetem Zyklus die Notwendigkeit eines Nothalts geprüft, gegebenenfalls wird dieser vom Antriebsmanagement eingeleitet oder bei Kommunikationsausfall von den dezentralen ECUs vollzogen.
<ul style="list-style-type: none"> • viele Errorframes • Zyklus nicht oder nicht vollständig abgearbeitet • Knoten vom Bus abgeschaltet 	<p>Falls sich bei Parallelkommunikation die Regelung bereits auf dem redundanten Bus in der Rückfallebene befindet, können die CAN-Knoten des gestörten Kanals neu initialisiert und über die Betriebsart Reset in den Modus Überwachung geführt werden.</p> <p>Bei Betrieb in der Rückfallebene (nur 1 CAN verfügbar) müssen die Knoten schnell reinitialisiert werden. Gelingt die Wiederaufnahme der Betriebsart Regelung nicht innerhalb von 40 ms, wird die Nohaltstrategie wirksam.</p>

wirksam umgesetzt. Dieser Mechanismus greift auch bei Kommunikation in der Rückfallebene auf nur einem CAN-Kanal.

Als ausgewähltes Beispiel zur Absicherung von Übertragungsfehlern zeigt **Bild 7.38** die Übermittlung von Schaltbefehlen an die Getriebe-ECU. Das System arbeitet dabei in der Rückfallebene, d. h. zur Kommunikation steht nur ein CAN-Kanal zur Verfügung. Im Bild oben übermittelt das Antriebsmanagement einen Code mit einem Schaltbefehl. Dieser wird durch die Getriebe-ECU bestätigt. Im Bild unten wird ein Fehler des vom Antriebsmanagement übertragenen Zykluszählers provoziert. Die Ge-

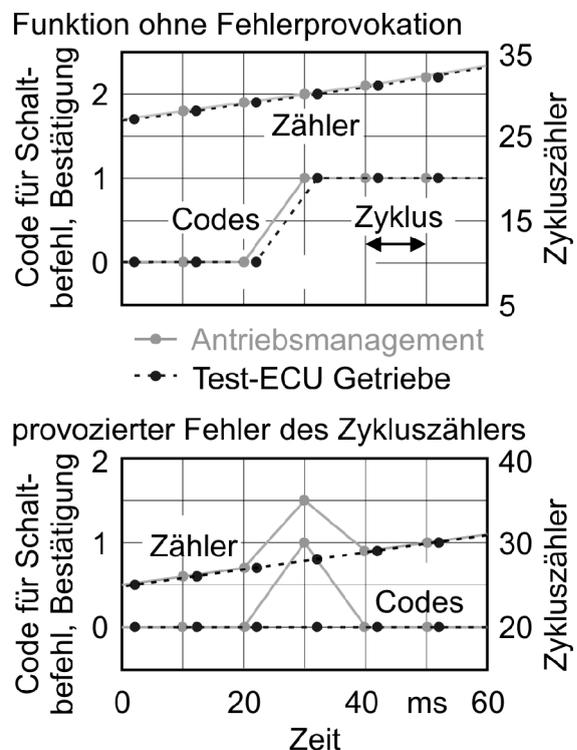


Bild 7.38: Versuch zur Absicherung von Schaltbefehlen und Zykluszählern.

triebe-ECU erkennt die Abweichung und verweigert die Bestätigung des Schaltbefehls.

7.6.3.5 Zusammenbruch der Kommunikation

Bricht die Kommunikation auf beiden CAN-Kanälen zusammen, so wird nach spätestens 40 ms ein Nothalt eingeleitet. Die zugehörige Prozedur ist in den ECUs abgelegt und wird dezentral abgearbeitet. Zur wirksamen und schadfreien Abarbeitung sind zeitlich koordinierte Aktionen erforderlich.

Kommunikationsrelevant und im Rahmen dieser Arbeit bezüglich der Wirksamkeit abgesichert wurde das rechtzeitige und korrekte Erkennen von Kommunikationsausfällen durch die im Netzwerkmanagement implementierten Überwachungsmechanismen.

Bild 7.39 zeigt einen entsprechenden Versuch. Zum Zeitpunkt 9,95 s wird das Senden der Initialisierungstelegramme eingestellt. 40 ms später leiten die ECUs Maßnahmen der Nothaltprozedur ein. So werden z. B. die Momente von Elektroantrieb und Verbrennungsmotor zurückgenommen und die Kupplungen des Getriebes geöffnet. Der Antriebsstrang wird damit momentenfrei und das Fahrzeug rollt aus. Im Anschluss werden die Baugruppen in sichere Zustände geführt.

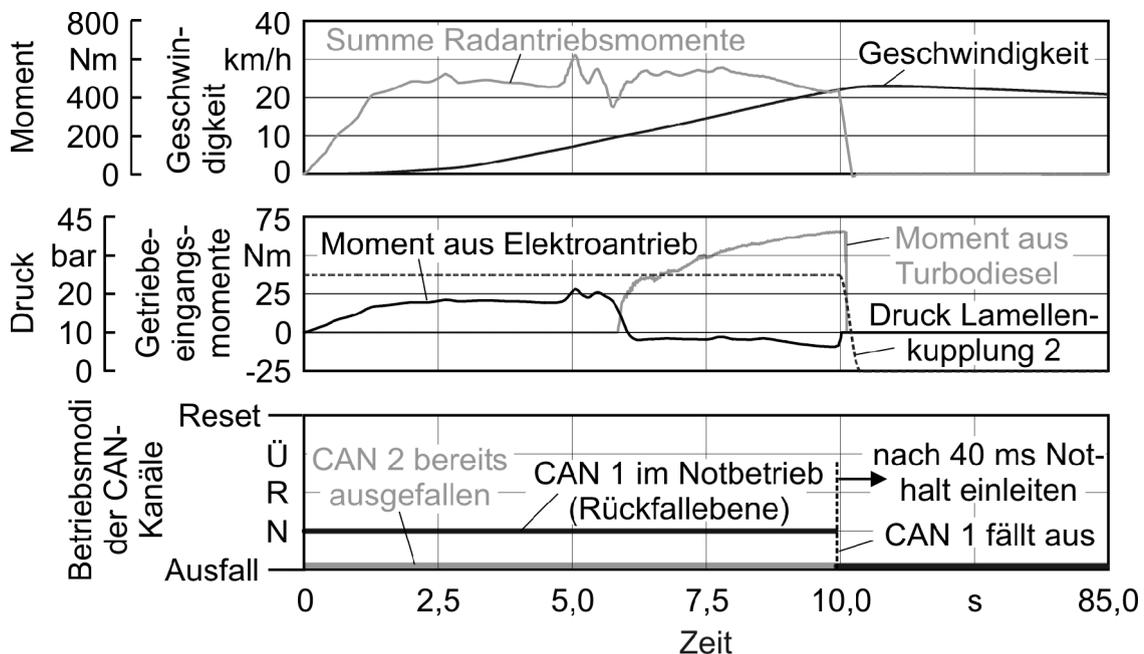


Bild 7.39: Versuch zur Absicherung der einzuleitenden Nothaltstrategie bei Zusammenbruch der Kommunikation.

7.6.3.6 Alarmmeldung und Kompensation von Sensorausfällen

Kritische Fehler in Baugruppen werden durch die Überwachungsmechanismen der ECUs erkannt und im Netzwerk als Alarmbotschaft gemeldet. Kommunikationsrelevant ist eine wirksame und möglichst schnelle Übermittlung von Fehlern an das Antriebsmanagement bzw. weitere betroffene ECUs.

Der in **Bild 7.40** dargestellte Versuch demonstriert darüber hinaus die in Kapitel 5.2.5 vorgestellte Sensorredundanz durch Nutzung der Informationen vernetzter Baugruppen. Zum Zeitpunkt 15 s wird ein Ausfall des Drehzahlsensors an der Getriebewelle B provoziert. Die Test-ECU Getriebe erkennt diesen Ausfall und meldet dies mit einem Alarmtelegramm. Aufgrund der hohen Priorität der Alarmbotschaften liegt deren Latenzzeit in der Regel unter 1 ms.

Die Alarmbotschaft wird nur einmal je Zyklus versandt. Erfolgt eine Empfangsbestätigung durch den mit dem Initialisierungstelegramm des Antriebsmanagements versandten Fehlercode, so wird das zyklische Senden der Alarmbotschaft eingestellt. Der Fehlercode bestätigt dabei nur den Empfang eines Alarmtelegramms. Tritt ein weiterer Fehler auf oder kann der Fehler behoben werden, so wird wiederum ein Alarmtelegramm gesendet, der Fehlercode des Antriebsmanagements gegebenenfalls zurückgesetzt oder wieder aktualisiert.

Das zur Ermittlung der Kettenwandlerübersetzung notwendige Signal des defekten Sensors wird unterdessen von der Test-ECU Getriebe durch Verrechnung des über CAN empfangenen Drehzahlsignals der ECU zur Beobachtung der Fahrdynamik ersetzt (Konzept siehe Kapitel 5.2.5).

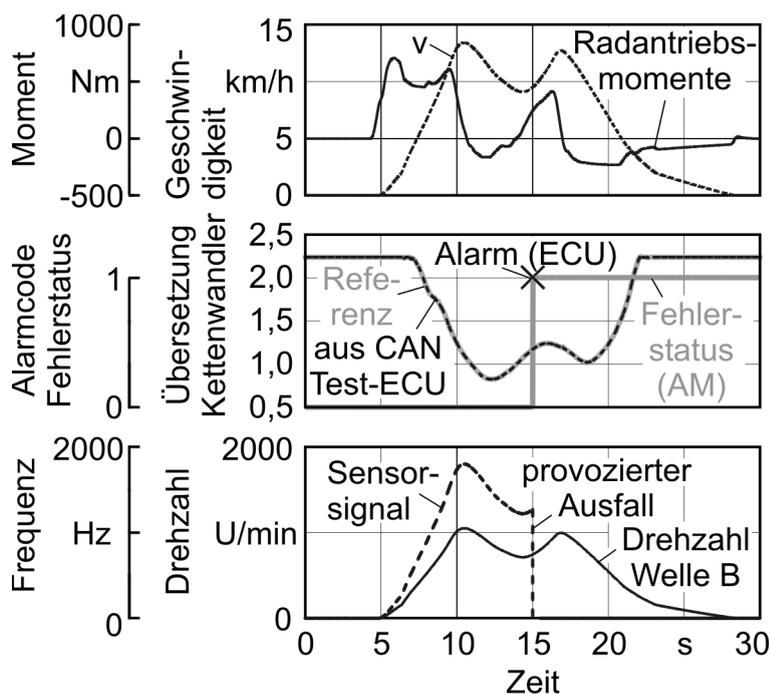


Bild 7.40: Versuch zur Absicherung der Fehlermeldung mit Alarmtelegrammen und Kompensation des Ausfalls des Drehzahlsensors an der Welle B durch Nutzung der Information vernetzter Komponenten. Die übereinstimmenden Übersetzungen des als Referenz gerechneten Modells sowie der Test-ECU beweisen die korrekte Kompensation des ausgefallenen Sensors.

8 Zusammenfassung

Einleitend wird ein Überblick über Strukturen vernetzter Steuer- und Regelsysteme bei Fahrtrieben von Pkw, Nkw und mobilen Arbeitsmaschinen geboten. Als wichtige Entwicklungstendenzen können Bestrebungen zu einem hierarchisch koordinierten Antriebs- und Energiemanagement, eine zunehmende Integration von Fahrtrieben in Systeme zur Fahrzeugführungsassistenz sowie der Einzug zusätzlicher Antriebskomponenten (wie elektrischer Maschinen, Wandler und Speicher) zusammengefasst werden. Dies führt zu weiter steigenden Anforderungen an die Kommunikationssysteme. Sie müssen zukünftig mehr Daten mit größerer Relevanz bezüglich Funktionalität, Sicherheit und Verfügbarkeit übertragen.

Zur Gestaltung der Signalkommunikation für Fahrtriebe wurden anschließend der jeweilige Aufbau, die Funktionsweise und die Eigenschaften von mobiltauglichen Steuer- und Regelgeräten, des dominierenden ereignisgesteuerten Bussystems CAN sowie der an Bedeutung gewinnenden zeitgesteuerten Bussysteme TTCAN, FlexRay und TTP beschrieben. Diese Komponentenbetrachtung wird mit Anleitungen und Hinweisen zur modellbasierten Auslegung von Kommunikationssystemen sowie zur Qualifizierung und Quantifizierung sicherheits- und regelungstechnischer Anforderungen abgerundet.

Typische sicherheitsrelevante Funktionen von Fahrtrieben konnten mit Risikoanalysen in die Integritätsklassen Safety Integrity Level 1 und 2 eingestuft werden. Ausgehend davon werden Vorschläge zu Überwachungs-, Absicherungs- und Fehler-toleranzverfahren für Sensor- und Aktorsignale, für die Kommunikation mit Bussystemen und für Software von Steuer- und Regelgeräten gegeben. Zur Bestimmung von Abtast- und Kommunikationsraten sowie zur Abschätzung von Buslasten wurden praktikable Faustformeln zusammengefasst.

Als Anwendungsbeispiel wurde die Kommunikation für einen innovativen Pkw-Hybridantrieb mit stufenlosem Kettenwandlergetriebe entwickelt. Ausgangslage waren Vorarbeiten aus Teilprojekten des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs „Umweltfreundliche Antriebstechnik für Fahrzeuge“ (SFB 365, Sprecher: Prof. Dr.-Ing. B. R. Höhn). In einer am Lehrstuhl für Elektrische Antriebstechnik der TU München erstellten Dissertation zur Modellierung und Regelung eines Autarken Hybridfahrzeugs sowie in einem Teilprojekt am Lehrstuhl für Landmaschinen der TU München wurde ein erstes Konzept für eine zu realisierende Antriebsregelung erarbeitet.

Dieses Konzept konnte zusammen mit benachbarten Teilprojekten des SFB 365 in einem Versuchsfahrzeug realisiert werden. Das dabei eingesetzte Bussystem (ein CAN mit 1 MBit/s) verknüpft die Steuer- und Regelgeräte der Antriebskomponenten miteinander sowie mit einem übergeordneten Antriebsmanagement.

Zur Untersuchung der Funktionalität des Antriebs sowie der Kommunikation wurde ein leistungsfähiges Messsystem entwickelt, das die zur Betriebsführung des Prototypen-Fahrzeugs notwendigen Daten sowie zusätzliche Messwerte auf dem zur Antriebsregelung eingesetzten CAN zur Verfügung stellt. Neben der Installation von Sensoren und der notwendigen Programmierung zweier ECUs wurde für die Auswertung der umfangreichen Messdaten eigene Software erstellt. Reproduzierbare Daten konnten durch den Einsatz eines Rollenprüfstands ermittelt werden.

Die mit dem Versuchsfahrzeug gewonnenen Ergebnisse flossen in eine Optimierung und Weiterentwicklung des Kommunikationskonzepts ein. Für eine robuste und sichere Regelung und Betriebsführung des Antriebskonzepts entstand eine zyklische Datenübertragung (10 ms-Takt) mit anwendungsspezifischen Kommunikations-, Netzwerkmanagement- und Diagnosefunktionen. Aufgrund des hohen Automatisierungs- und Vernetzungsgrads konnten die Anforderungen nicht mit standardisierten Lösungen erfüllt werden. Eine Integration des Antriebsmanagements in eine zukünftig bei Fahrzeugen zu erwartende hierarchische Gesamtfahrzeugkoordination ist sowohl technisch als auch funktional vorgesehen.

Zur Steigerung der Verfügbarkeit, Leistungs- und Diagnosefähigkeit wurde ein fehlertolerantes Kommunikationssystem mit zwei parallelen CAN-Kanälen entwickelt. Hardwaredefekte und Fehlfunktionen eines CAN-Kanals können dabei durch automatisiertes Umschalten auf den redundanten CAN-Kanal kompensiert werden. Auf beiden CAN-Kanälen mit Übertragungsraten von je 500 kBit/s werden dazu dynamisch konfigurierbare Betriebsarten bzw. Kommunikationszyklen initialisiert. Die dafür erforderlichen Managementfunktionen (d. h. die Überwachung der CAN-Hardware und der kommunizierten Daten sowie die Konfigurationen der CAN-Kanäle) sind auch auf andere sicherheitskritischere X-by-Wire Systeme und Applikationen sowie auf zeitgesteuerte Bussysteme übertragbar. Ein entsprechender Ausblick für ein Kommunikationskonzept mit FlexRay wurde gegeben.

Das neu entwickelte fehlertolerante Kommunikationssystem mit zwei redundanten CAN-Kanälen wurde zwar nicht im Prototyp-Pkw eingesetzt, jedoch wurden die elektronischen Komponenten und das Gesamtnetzwerk in einem modellbasierten Entwicklungsprozess zu einem praxistauglichen Reifegrad entwickelt. Dabei konnte der Einsatz der Simulationswerkzeuge MATLAB/Simulink/Stateflow, eines dSpace-Echtzeit-Systems sowie des universellen Bus-Entwicklungswerkzeugs CANalyzer demonstriert werden. Exemplarisch wurde eine Hardware-in-the-Loop-Simulation des Antriebssystems zum Funktions- und Integrations-

test einer entwickelten Getriebe-ECU sowie zur Validierung der fehlertoleranten CAN-Kommunikation erstellt. Hierzu wurde eine Entwicklungsumgebung konfiguriert und geeignete echtzeitfähige Modelle der Antriebskomponenten mit zugehörigen Steuer- und Regelgeräten und möglichst kausalen Abbildungen von Funktionen, Wirkprinzipien und Architekturen angefertigt. Die mit dem Versuchsfahrzeug gewonnen reproduzierbaren Daten dienen zur Parametrierung der Modelle bzw. als Referenz für die Simulation.

Die Systemsimulation kann zur Funktionsentwicklung und Systemvalidierung, aber auch für Analysen des Antriebskonzepts genutzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Schwerpunkt auf die Validierung des Komponenten- und Systemverhaltens im regulären Betrieb sowie bei Fehlerszenarien gelegt. Hierzu wurden abschließend Methoden zur Absicherung von Fehlertoleranzmechanismen aufgezeigt. Dabei wurden gezielt Störungen, Fehler und mögliche Fehlfunktionen der CAN-Systeme bzw. der Sensorik provoziert und die Reaktion bzw. die Kompensationsmechanismen der eingebundenen Test-ECU, des durch die HIL-Simulation abgebildeten CAN-Netzwerks sowie des simulierten Antriebssystems überprüft. Die Absicherung von Fehlertoleranzmechanismen mit HIL-Simulationen gewinnt vor allem für sicherheitskritische X-by-Wire Anwendungen an Bedeutung.

9 Verzeichnisse

9.1 Literaturstellen

Bücher sind mit • gekennzeichnet

- [1] Dais, S.: *Elektronik im Kraftfahrzeug – ein Beitrag zur Aufrechterhaltung der Mobilität*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2000, Baden-Baden, 05./06.10.2000, In: VDI-Berichte 1547, S. 3–15; Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- [2] • Goldbrunner, W. und G. Walliser: *Steuern und Regeln im Kraftfahrzeug*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeugwesen*; Renningen: Expert Verlag 2002.
- [3] Runge, W., H., Schwarz, J. Deiss und H. Remmlinger: *Entwicklungstendenzen in der Automobilelektronik*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2001, Friedrichshafen, 19./20.06.2001, In: VDI-Berichte 1610, S. 13–36; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [4] • Freimann, R.: *Automation mobiler Arbeitsmaschinen – Gerät steuert Traktor*. Dissertation Technische Universität München 2003; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 14, Nr. 116; Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.
- [5] • Walther, M., P. Torre Flores, T. Bertram und G. Walliser: *CARTRONIC als Ordnungskonzept für den Systemverbund – Analyse mechatronischer Systeme im Kraftfahrzeug*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeugwesen*; Renningen: Expert Verlag 2002.
- [6] • Föllinger, O.: *Regelungstechnik – Einführung in die Methoden und ihre Anwendungen*. Heidelberg: Hüthig 1992.
- [7] • Lutz, H. und W. Wendt: *Taschenbuch der Regelungstechnik*. Frankfurt am Main: Harri Deutsch Verlag 2003.
- [8] • Bolz, S., G. Lugert und G. Walliser: *Aufbau moderner Steuergeräte – im Bereich Antriebsstrang – Derzeitiger Stand und Zukunft*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeugwesen*, S. 145-163; Renningen: Expert Verlag 2002.
- [9] • Glöckler, O. und G. Walliser: *Steuerung für Ottomotoren*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeugwesen*, S.164-188; Renningen: Expert Verlag 2002.

- [10] • Vetter, H. und G. Walliser: *Elektronische Getriebesteuerung – System und Funktion*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeugwesen*, S. 292-303; Renningen: Expert Verlag 2002.
- [11] Haller, Th.: *32bit Mikrocontroller für Getriebeanwendungen*. Vortrag: IIR-Tagung Getriebeelektronik 2002, Mannheim, 13./14.05.2002.
- [12] • Schaefer, U.: *Mikrocontroller*. In: *Mikroelektronik im Kraftfahrzeug*; Stuttgart: Robert Bosch GmbH 2001.
- [13] • N., N.: *Automotive Electronics Handbook*. New York: McGraw-Hill Inc. 1999.
- [14] N., N.: *Sensoren im Kraftfahrzeug*. Robert Bosch GmbH, Gelbe Reihe, 2001.
- [15] • Huber, R.: *Konzept, Realisierung und Bewertung des Sensor/Aktorbusses TTP/A*. Dissertation Technische Universität München 2003.
- [16] Rucha, B. und G. Teepe: *LIN – Local Interconnect Network – Ein ganzheitliches Entwurfssystem für mechantronische Netzwerke*. *Elektronik Automotive* (2003) H. 1, S. 42–49.
- [17] Greiner, J., J. Kiesel, A. Veil und J. Strenkert: *Front-CVT Automatikgetriebe (WFC280) von Mercedes-Benz*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2004, Friedrichshafen, 22/23.07.2004, In: *VDI-Berichte 1827*, S. 421–443; Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.
- [18] Braunsperger, M., J. Vogt und U. Ochner: *Die neue BMW R1150 GS*. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 106 (2004) H. 5, S. 308–409.
- [19] Eberspächer, R., K. Heber, R. Pätzold und A. Rink: *Sequentronic – Ein automatisiertes Schaltgetriebe von Mercedes-Benz*. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 103 (2001) H. 11, S. 1036–1046.
- [20] Büchs, H.P., H. Versmold und T. Neunzig: *Shift-by-Wire Schaltung – Vereinfachtes Schaltungskonzept mit elektronischer Realisierung von Sicherheitsfunktionen*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2001, Friedrichshafen, 19./20.06.2001, In: *VDI-Berichte 1610*, S. 481–496; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [21] Burkhardt, S., R. Ehrmaier und S. Fürst: *Shift-by-Wire-Schaltung in der neuen BMW 7er Baureihe*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2001, Friedrichshafen, 19./20.06.2001, In: *VDI-Berichte 1610*, S. 497–518; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [22] • Mathony, H.-J. und G. Walliser: *Vernetzung der Elektronik im Kfz*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeugwesen*, S. 86-102; Renningen: Expert Verlag 2002.

- [23] N., N.: *ISO 11898: Road vehicles – Controller area network (CAN) – Part 1: Data link layer and physical signalling, Part 2: High-speed medium access unit, Part 3: Low-speed fault tolerant medium dependent interface, Part 4: Time triggered communication.*
- [24] • Etschberger, K.: *Controller-Area-Network.* München: Hanser-Verlag 2000.
- [25] Felbinger, L.: *CAN und offene Protokolle im Nutzfahrzeug.* Elektronik Automotive (2004) H. 4, S. 60–66.
- [26] Führer, Th., W. Dieterle, R. Hartwich, R. Hugel, D. Kraft, B. Müller und A. Weigl: *TTCAN: Zeitgesteuerter Nachrichtenverkehr im CAN-Netzwerk.* Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2001, Baden-Baden, 27./28.09.2001, In: VDI-Berichte 1646, S. 43–52; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [27] Zeltwanger, H.: *Zeitgesteuerte Kommunikation in CAN-basierenden Netzwerken.* Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2000, Baden-Baden, 05./06.10.2000, In: VDI-Berichte 1547, S. 95–103; Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- [28] Plankensteiner, M., S. Polenda und G. Stöger: *Das zeitgesteuerte Protokoll TTP – Die Plattform für sicherheitskritische Anwendungen in der Automobilindustrie.* Automotive Electronics (2002) H. 2, S. 60–63.
- [29] Hedenetz, B., J. Ruh, M. Kühlewein, A. Schedl, E. Fuchs, A. Krüger, Y. Domaratsky, P. Pelcat, S. Boutin, E. Dilger, Th. Führer, St. Polenda, M. Glück und Th. Ringler: *Ein zuverlässiges fehlertolerantes Echtzeit Betriebssystem und Kommunikationsschicht für By-Wire Applikationen.* Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2000, Baden-Baden, 05./06.10.2000, In: VDI-Berichte 1547, S. 59–74; Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- [30] Belscher, R., J. Berwanger, C. Bracklo, Ch. Ebner, B. Hedenetz, W. Kuffner, P. Lohrmann, J. Minuth, M. Peller, A. Schedl und V. Seefried: *Anforderungen an ein zukünftiges Bussystem für fehlertolerante Anwendungen aus Sicht der Kfz-Hersteller.* Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2000, Baden-Baden, 05./06.10.2000, In: VDI-Berichte 1547, S. 23–41; Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- [31] • Schäuffele, J. und Th. Zurawka: *Automotive Software Engineering – Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge.* Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlag GmbH 2003.
- [32] Schwarte, A., F. Kimmich und R. Isermann: *Modellbasierte Fehlererkennung und Diagnose für Dieselmotoren.* MTZ Motortechnische Zeitschrift 67 (2002) H. 7-8, S. 612–620.

- [33] N., N.: *Straßenfahrzeuge – Diagnosesysteme – Schlüsselwort 2000 – Norm ISO 14230*. Berlin: Beuth Verlag, 2000.
- [34] N., N.: *Recommended Practice for a Serial Control and Communications Vehicle Network – Application Layer Diagnostics. Norm SAE J1939/73*. Berlin: Beuth Verlag 2001.
- [35] N., N.: *Road Vehicles – Diagnostics on Controller Area Networks (CAN). Normenentwurf ISO/DIS 15765*. Berlin: Beuth Verlag 2003.
- [36] Schlingmann, N.: *Diagnose im Feldeinsatz bei CLAAS*. Vortrag: VDI-Tagung Landtechnik 2004, Dresden, 7./8.10.2004, In: VDI-Berichte 1855, S. 145–150; Düsseldorf: VDI Verlag 2004.
- [37] • Nemeč, D., R. Endermann und G. Walliser: *Servicekonzept für Eigendiagnose-Auswertung*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeugwesen*. S. 266-276.; Renningen: Expert-Verlag 2002.
- [38] Braunschweig, M. und Th. Czarnecki: *On-Board Diagnose bei Dieselmotoren*. MTZ Motortechnische Zeitschrift 65 (2004) H. 7-8, S. 552–557.
- [39] Renius, K.Th.: *Unterlagen zur Vorlesung Getriebe für mobile Arbeitsmaschinen*. Lehrstuhl für Landmaschinen der Technischen Universität München. Stand: April 2003.
- [40] Renius, K.Th.: *Hydrostatische Fahrantriebe für mobile Arbeitsmaschinen*. Vortrag: VDI-Tagung Antriebssysteme für Off-Road-Einsätze, Garching, 18./19.09.2003, In: VDI-Berichte 1793, S. 65–78; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [41] • Resch, R.: *Leistungsverzweigte Mehrbereichsfahrantriebe mit Kettenwandlern*. Dissertation Technische Universität München 2004.
- [42] • Renius, K.Th.: *Traktoren – Technik und ihre Anwendung*. München: BLV Verlagsgesellschaft 1987.
- [43] • Renius, K.Th.: *Two Axle Tractors*. In: *CIGR Handbook of Agricultural of Agritural Engineering, Vol. III (Plant Production Engineering)*, S. 115-184. S; St. Joseph MI, USA: American Society of Agricultural Engineers 1999.
- [44] Renius, K.Th. und R. Mölle: *Traktoren 2001/2002*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 104 (2002) H. 10, S. 882–889.
- [45] Schmitz, G., H. Aitzetmüller, H. Nakesch und J. Nötstaller: *Mechatronik im Automobil – Stufenlos-Getriebe S-Matic*. Renningen: Expert Verlag 2000.
- [46] Reiter, H.: *Innovative Technologien am Traktor durch Elektronikanwendungen*. Landtechnik 58 (2003) H. 3, S. 162–165.
- [47] • Seeger, J.: *Antriebsstrategien eines Traktors bei schwerer Zugarbeit*. Dissertation Technische Universität Braunschweig 2001.

- [48] Huwendiek, O., G. Bailly und K. Grad: *Das stufenlose Getriebe ZF-ECCOM: Komponenten und Regelstrukturen*. Vortrag: VDI-Tagung Landtechnik 2004, Dresden, 7./8.10.2004, In: VDI-Berichte 1855, S. 17–22; Düsseldorf: VDI Verlag 2004.
- [49] Dittrich, T., R. Hofmann und J. Ammann: *TMS-Option für individuelle Wahl der Bedienung und Fahrstrategie*. Vortrag: VDI-Tagung Landtechnik 2003, Hannover, 07./08.11.2003, In: VDI-Berichte 1798, S. 55–59; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [50] Forche, J. und H.-H. Harms: *Management hydraulischer Antriebe in mobilen Arbeitsmaschinen*. Vortrag: VDI-Tagung Landtechnik 2003, Hannover, 07./08.11.2003, In: VDI-Berichte 1798, S. 239–244; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [51] N., N.: *ISO 11783: Tractors and machinery for agriculture and forestry – Serial control and communications data network – Part 2: Physical Layer (2002), Part 3 Data link layer (1998), Part 4: Network layer (2001), Part 5: Network management (2001), Part 7: Implement messages application layer (2002), Part 9: Tractor ECU (2002)*.
- [52] • Goering, C.E., M.L. Stone, D.W. Smith und P.K. Turnquist: *Off-Road Vehicle Engineering Principles*. St. Joseph, MI, USA: American Society of Agricultural Engineers 2003.
- [53] N., N.: *SAE J1939: Recommended Practice for a Serial Control and Communication Vehicle Network: J1939/21, Data Link Layer, Juli 1994; J1939/71 Vehicle Application Layer, Mai 1996; J1939/73, Application Layer – Diagnostics*. Warrendale, PA, USA: Society of Automotive Engineers, 1996.
- [54] Stepper, M.R.: *J1939 Serial Vehicle Network Explanation and Tutorial*. Warrendale, PA, USA: Society of Automotive Engineers, 1997.
- [55] • Kunze, G., H. Göhring und K. Jacob: *Baumaschinen – Erdbau- und Tagebaumaschinen*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg Verlag 2002.
- [56] Schrempp, R. und W. Wiest: *Neue Antriebstechnik bei einem Kompaktlader – Stufenlos geregelter Antrieb*. Vortrag: 4th International Fluid Power Conference, Dresden, 25./26.03.2004, Tagungsband, S. 107–116.
- [57] Pfab, H. und K. Schröder: *Hydrostatisches Steuerungs- und Regelungssystem für Radlader*. Vortrag: VDI-Tagung Antriebssysteme für Off-Road-Einsätze, Garching, 18./19.09.2003, In: VDI-Berichte 1793, S. 85–95; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [58] Pfab, H.: *Der Antriebsstrang von Radladern mit hydrostatischem Fahrtrieb*. Landtechnik 58 (2003) H. 3, S. 185–186.

- [59] • Matthies, H.J. und K.Th. Renius: *Einführung in die Ölhydraulik*. Wiesbaden: Teubner-Verlag 2003.
- [60] Rinck, S.: *Moderne hydrostatische Antriebssysteme mit Microprozessorsteuerungen für mobile Arbeitsmaschinen*. O+P Ölhydraulik und Pneumatik 43 (1999) H. 3, S. 154–163.
- [61] Latour, Ch. und J. Beck: *Fahrertrieb und Arbeitshydraulik für einen Radlader*. O+P Ölhydraulik und Pneumatik 44 (2000) H. 5, S. 310–317.
- [62] Weber, J.: *Funktionelle Flexibilität durch Elektrohydraulik am Radlader*. Vortrag: 2. Internationales Fluidtechnisches Kolloquium, TU Dresden, 16./17.03.2000, Tagungsband, S. 65–79.
- [63] Unger, E., H. Witte und W. Poppy: *CANopen in mobilen Baumaschinen*. Vortrag: 2. Internationales Fluidtechnisches Kolloquium, TU Dresden, 16./17.03.2000, Tagungsband, S. 105–112.
- [64] N., N.: *EN 50325-4: CANopen, Anwendungsprotokolle auf Basis des CAN, Genormt und Betreut durch die Anwendervereinigung CiA (CAN in Automation e.V.), Erlangen*. Berlin: Beuth Verlag, 2001.
- [65] • Hoepke, E., W. Appel, H. Brähler, U. Dahlhaus, Th. Esch und J. Gräfenstein: *Nutzfahrzeugtechnik – Grundlagen, Systeme, Komponenten*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg Verlag 2000.
- [66] • Paulsen, L. und G. Walliser: *Die Steuerung des Antriebsstrangs bei Nutzfahrzeugen*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeugwesen*, S. 204-228; Renningen: Expert Verlag 2002.
- [67] Reichenbach, M.: *Getriebeinnovationen auf der 58. IAA*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 102 (2000) H. 11, S. 935–940.
- [68] • Lechner, G. und H. Naunheimer: *Fahrzeuggetriebe – Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*. Berlin: Springer-Verlag 1994.
- [69] • Förster, H. J.: *Automatische Fahrzeuggetriebe – Grundlagen, Bauformen, Eigenschaften, Besonderheiten*. Berlin: Springer-Verlag 1991.
- [70] Rüchart, C., O. Ebner, R. Keller, M. Rossmann, T. Jäger, M. Gansohr, M. Erb und G. Thüncher: *AS Tronic lite, die neue AS-Getriebebaureihe der ZF für das mittlere Nutzfahrzeugsegment*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2004, Friedrichshafen, 22/23.07.2004, In: VDI-Berichte 1827, S. 303–326; Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.
- [71] Hofmann, R., F. Baumgartner, L. Paulsen und H. Raiser: *Die Telligent-Schaltautomatik des ACTROS von Mercedes-Benz*. Vortrag: VDI-Tagung Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 22./23.10.1998, In: VDI-Berichte 1418; Düsseldorf: VDI Verlag 1998.

- [72] • Spiegelberg, G.: *Automatisierung des Lkw-Antriebsstrangs*. Dissertation ; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 460; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [73] Haiss, H.: *Moderne Bremssysteme im Nutzfahrzeug (EBS, ESC)*. Vortrag: VDI-Tagung Nutzfahrzeuge 2003, Steyr, 22./23.05.2003, In: VDI-Berichte 1760, S. 77–97; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [74] Hecker, F. und J. Wrede: *Fahrassistenzsysteme im Nutzfahrzeug*. ATZ 106 (2004) H. 9, S. 810–818.
- [75] Schiehlen, J. und K.V. Schaller: *Fahrerassistenzsysteme für Nutzfahrzeuge – Komfort und Sicherheit*. Vortrag: VDI-Tagung Nutzfahrzeuge 2001, Neu-Ulm, 28./29.07.2001, In: VDI-Berichte 1617, S. 405–423; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [76] Hoepke, E.: *Nutzfahrzeugtechnik 2003*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 106 (2004) H. 1, S. 26–33.
- [77] • Gehring, O.: *Automatische Längs- und Querverführung einer Lastwagenkolonne*. Dissertation Universität Stuttgart 2000.
- [78] Kitterer, H., F. Zielke, R. Kamping, D. Sandkühler und K. Breuer: *Sicherheit, Kraftstoffeffizienz und Fahrbarkeit – Zielkonflikte bei der Auslegung von ACC-Regelalgorithmen für Nutzfahrzeuge*. Vortrag: VDI-Tagung Nutzfahrzeuge 2003, Steyr, 22./23.05.2003, In: VDI-Berichte 1760, S. 99–115; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [79] Gehring, O., O. Rooks, G. Spiegelberg und A. Schwarzhaupt: *Fehlertolerante Fahrzeuglängsdynamikregelung eines Drive-by-Wire Nutzfahrzeugs*. Vortrag: VDI-Tagung Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG 2002, Mannheim, 15./16.04.2002, In: VDI-Berichte 1672, S. 473–485; Düsseldorf: VDI Verlag 2002.
- [80] Schäfer, Chr.: *Neue Funktionsanforderungen und Realisierungskonzepte infolge dezentraler Fahrzeugvernetzung*. Vortrag: VDI-Tagung Nutzfahrzeuge 2003, Steyr, 22./23.05.2003, In: VDI-Berichte 1760, S. 67–75; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [81] Heintze, W., F. Herrmann und B. Maierhofer: *Mantronic – Fahrzeugführungsrechner im CAN-Netzwerk*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2000, Baden-Baden, 05./06.10.2000, In: VDI-Berichte 1547, S. 159–166; Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- [82] Schmitt, M.: *Software-Update, Variantenbildung und Feldprogrammierung für individualisierte Fahrzeuge auf Basis eines intelligenten Datenkonfigurationssystems*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2003, Baden-Baden, 25./26.09.2003, In: VDI-Berichte 1789, S. 1021–046; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.

- [83] Rieck, G., K. Feitzelmayer, E. Kneifel, B. Maierhofer und R. Harmeier: *Die Trucknology Generation TG-A der MAN Nutzfahrzeuge AG*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 102 (2000) H. 11, S. 976–988.
- [84] Spiegelberg, G., A. Maisch und A. Sulzmann: *Intelligentes Fahrzeugkonzept auf Basis Drive-by-Wire. Umsetzungsschritte in den EU-Projekten PEIT und SPARC*. Vortrag: Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme, Garching, 11./12.03.2004, Tagungsunterlagen.
- [85] • N., N.: *Fahrsicherheitssysteme*. Hrsg. Robert Bosch GmbH. Wiesbaden: Vieweg 1998.
- [86] Hiermann, U.: *Schnittstelle Truck Gateway*. Vortrag: VDI-Tagung Nutzfahrzeuge 2003, Steyr, 22./23.05.2003, In: VDI-Berichte 1760, S. 13–33; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [87] Appel, W. und T. Dunke: *Elektrik-/Elektronikarchitektur des neuen Mercedes-Benz Actros*. Vortrag: VDI-Tagung Nutzfahrzeuge 2003, Steyr, 22./23.05.2003, In: VDI-Berichte 1760, S. 377–395; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [88] • N., N.: *Ottomotor-Management*, Hrsg. Robert Bosch GmbH. Wiesbaden: Vieweg 1998.
- [89] • N. N.: *Dieselmotor-Management*, Hrsg. Robert Bosch GmbH. Wiesbaden: Vieweg 1998.
- [90] Löffler, J. und H. Hülser: *Koordinierte Antriebsstrangsteuerung für Fahrzeuge mit Automatisiertem Schaltgetriebe*. Vortrag: VDI-Tagung Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 22./23.10.1998, In: VDI-Berichte 1418, S. 463–483; Düsseldorf: VDI Verlag 1998.
- [91] Greiner, J., G. Indlekofer, H. Naverz, J. Dorfschmid, T. Gödecke und C. Dörr: *Siebengang-Automatikgetriebe von Mercedes Benz*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 105 (2003) H. 10, S. 920–930.
- [92] Schreiber, W., F. Rudolph und V. Becker: *Das neue Doppelkupplungsgetriebe von Volkswagen*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 105 (2003) H. 11, S. 1022–1039.
- [93] Goppelt, G.: *Stufenloses Automatikgetriebe Multitronic von Audi*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 102 (2000) H. 2, S. 110–111.
- [94] Wagner, G.: *Einsatz von Getriebesystemen für unterschiedliche Triebstrangkonfigurationen in Personenkraftwagen*. Vortrag: VDI-Tagung Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 26./27.10.2000, In: VDI-Berichte 1565, S. 155–193; Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.

- [95] Specks, W., D. Gerpen und T. Gänsicke: *Die Elektrik und Elektronik des Volkswagen 1-Liter-Autos*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2003, Baden-Baden, 25./26.09.2003, In: VDI-Berichte 1789, S. 25–40; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [96] Hietl, H.: *Vernetzung mit zentralem Gateway-Konzept*. ATZ und MTZ (2003) Sonderheft: Der neue Audi A3, S. 118–119.
- [97] Neumayer, R., J. Franke-Wand, H. Thierauf, V. Nieten, G. Nemeth, J. Krammer und O. J. Brugger: *Kommunikationsstruktur und Bordnetz des neuen BMW 5er*. ATZ und MTZ (2003) Sonderheft: Der neue BMW 5er, S. 106–114.
- [98] Lehner, A., G. Sterler, G.-P. Duba und W. Streit: *Elektronische Vernetzung und Energiesysteme*. ATZ und MTZ (2002) Sonderausgabe: Der neue Audi A8, S. 144–151.
- [99] Wörner, S., A. Bauer, A. Drossos, Ch. Groß, A. Willikens, K. Eitzenberger und F. Marrono: *Bordnetz und Telematik – Komfort und Sicherheit*. ATZ und MTZ (2002) Sonderausgabe: Der neue Maybach, S. 120–129.
- [100] Eberspächer, R., K. Heber, R. Hornung, P. Marx, K. Neft, W. Oetken, A. Rink und M. Schmidtman: *Dynamik und Agilität – Der Antriebsstrang der neuen E-Klasse*. ATZ und MTZ (2002) Sonderausgabe: Die neue Mercedes-Benz E-Klasse, S. 130–141.
- [101] Armendt, O., J. H. Drolshagen, S. Lawitzki, U. Messner, Th. Michel, I. Pajer, R. Roppel, R. Sandvoss, H. Schmitz und M. Sprengart: *Elektronik im Cayenne – Innovationen in allen Bereichen*. ATZ und MTZ (2003) Sonderausgabe: Porsche Cayenne, S. 126–139.
- [102] Kraft, D., A. Lapp und J. Schirmer: *Elektrik/Elektronik-Architektur – Die Herausforderung für die Automobilindustrie*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2003, Baden-Baden, 25./26.09.2003, In: VDI-Berichte 1789, S. 601–621; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [103] Zunhammer, R., J. Franke-Wand, F. Traub und H. Wiedemann: *Das Netzwerk – Interne und externe Kommunikation*. ATZ und MTZ (2004) Sonderausgabe: Der neue BMW 6er, S. 102–111.
- [104] Beck, A., C. Bracklo, G. Faulhaber und V. Seefried: *Backbone-Architektur: Vom zentralen Gateway zur systemintegrierenden Kommunikationsplattform*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2001, Baden-Baden, 27./28.09.2001, In: VDI-Berichte 1646, S. 227–291; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

- [105] Peller, M., J. Berwanger und R. Griebach: *byteflight Ein neues Hochleistungs-Datenbussystem für passive Sicherheitsanwendungen im Automobil*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2000, Baden-Baden, 05./06.10.2000, In: VDI-Berichte 1547, S. 1045–1064; Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- [106] Hall, W., R. Pour, D. Mathiak und C. Gueter: *Das stufenlose Automatikgetriebe für den Mini*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 104 (2002) H. 5, S. 458–463.
- [107] Sinkwitz, H., H.-J. Neu, M. Hansmann, W. RiediBer, H.-H. Bernd, M. Fischer, Ch. Schulenburg und K. Zinser: *Smart Roadster und Roadster-Coupe*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 105 (2003) H. 4, S. 314–330.
- [108] • Haj-Fraj, A.: *Dynamik und Regelung von Automatikgetrieben*. Dissertation Technische Universität München 2001; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12 Nr. 489; Düsseldorf: VDI-Verlag 2002.
- [109] Nowatschin, K. und T. Gleich, P. Franzen, G. Hommes, H. Faust, O. Friedmann, H. Wild H.-P. Fleischmann: *multitronic – Das neue Automatikgetriebe von Audi - Teil 2*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 102 (2000) H. 9, S. 746–753.
- [110] Nelles, S. und M. Manz: *Die lernende Fahrstrategie IntelligenTip*. Vortrag: IIR-Tagung Getriebeelektronik 2002, Mannheim, 13./14.05.2002, Tagungsunterlagen.
- [111] Büchs, H. P. und H. Versmold: *Shift-by-Wire Schaltung – Vereinfachtes Schaltungskonzept mit elektronischer Realisierung*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2001, Friedrichshafen, 19./20.06.2001, In: VDI-Berichte 1610, S. 481–495; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [112] Burkhardt, S., R. Ehrmaier, S. Fürst, J. Neuner, B. Kreppold, U. Rühringer, A. Sax, M. Meißner und G. Rödinger: *“Shift-by-Wire“-Schaltung in der neuen BMW 7er Baureihe*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2001, Friedrichshafen, 19./20.06.2001, In: VDI-Berichte 1610; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [113] Hirt, M. und H. Naunheimer: *Universal-Steuerungssystem für Automatikgetriebe*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2001, Friedrichshafen, 19./20.06.2001, In: VDI-Berichte 1610, S. 655–672; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [114] Teepe, G. und G. Reichert: *LIN – Ein ganzheitliches Kommunikationssystem für eine neue Automobilarchitektur – Transformationen der Zulieferstruktur*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2003, Baden-Baden, 25./26.09.2003, In: VDI-Berichte 1789, S. 833–847; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.

- [115] Chodura, H., P.-M. Hofmann, B. Kalusche, J. Knoblach, J. Spohr und Th. Weber: *Standardisierung im Automotive-Umfeld*. Elektronik Automotive (2004) H. 4, S. 48–52.
- [116] Torlo, M. und T. Bertram: *Dynamische, verteilte Fehlertoleranz in vernetzten Kraftfahrzeugsystemen*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2001, Baden-Baden, 27./28.09.2001, In: VDI-Berichte 1646, S. 99–122; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [117] Jessen, H., L. Kaiser, B. Mencher und J. Gerhardt: *CARTONIC – Schnittstellen und Strategien zur Momentenkoordination und Umsetzung in Motorsteuerungssystemen für Ottomotoren*. Vortrag: VDI-Tagung Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG 2002, Mannheim, 15./16.04.2002, In: VDI-Berichte 1672, S. 61–70; Düsseldorf: VDI Verlag 2002.
- [118] Schöttle, R. und G. Threin: *Elektrisches Energiebordnetz: Gegenwart und Zukunft*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2000, Baden-Baden, 05./06.10.2000, In: VDI-Berichte 1547, S. 449–475; Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- [119] Knorr, R., M. Bienert, S. Bolz, G. Lugert und P. Skontzek: *Überblick und Perspektiven des 14/42 V Bordnetzes – Komponenten, Architektur und Möglichkeiten*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2000, Baden-Baden, 05./06.10.2000, In: VDI-Berichte 1547, S. 477–497; Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- [120] Dudenhöffer, F., M. Krüger und H. Schmalzer: *Qualitäts—Herausforderung – Stabiles Energiemanagement*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 106 (2004) H. 1, S. 42–44.
- [121] Oba, H., T. Kotani, M. Tabata und O. Komeda: *Charakterisierung und Analyse des Wirkungsgrades verschiedener Hybridsysteme*. Vortrag: Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 4.-6.10.2004, Tagungsband, S. 935–957.
- [122] Druten, v. R. M., A. F. A. Serrarens, B. G. Vroemen, v. d. E. Tillaart und d. J. Haas: *Mild Hybrids with CVT: Comparison of Electrical and Mechanical Torque Assist*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2001, Friedrichshafen, 19./20.06.2001, In: VDI-Berichte 1610, S. 331–345; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [123] Wallentowitz, H., J.-W. Biermann, R. Bady und C. Renner: *Strukturvarianten von Hybridantrieben*. Vortrag: VDI-Tagung Hybridantriebe, Technische Universität München, 25./26.02.1999, In: VDI-Berichte 1459, S. 49–71; Düsseldorf: VDI-Verlag 1999.

- [124] • Kersch, S.: *Der Autarke Hybrid – Optimierung des Antriebsstrangs hinsichtlich Energieverbrauch und Bestimmung des Einsparpotentials*. Dissertation Technische Universität München 1998.
- [125] Paulus-Neues, J., A. Denner und K. Welke: *Innovative Antriebsstrangkonzepete durch den Einsatz einer permanenterregten Synchronmaschine als Startergenerator oder Hybrid*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2001, Friedrichshafen, 19./20.06.2001, In: VDI-Berichte 1610, S. 317–330; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [126] Probst, G., F. Graf, G. Graßl, F. Gurtknecht und M. Rampeltshammer: *Integrierte Antriebsstrangsteuerung mit ISG*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2001, Friedrichshafen, 19./20.06.2001, In: VDI-Berichte 1610, S. 363–378; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [127] Harms, K., K.-P. Schnelle, Kneifel M. und S. Tumback: *COMET – ein neuartiger Hybridantriebsstrang mit Dual-E-Getriebe*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2004, Friedrichshafen, 22/23.07.2004, In: VDI-Berichte 1827, S. 111–125; Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.
- [128] Kersch, S., E. Hipp und G. Lexen: *Optimierter Antriebsstrang für Verteiler-Lkw*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2004, Friedrichshafen, 22/23.07.2004, In: VDI-Berichte 1827, S. 127–149; Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.
- [129] Tarasinski, N.: *Elektrische Antriebe in Traktoren*. Vortrag: VDI-Tagung Landtechnik 2004, Dresden, 7./8.10.2004, In: VDI-Berichte 1855, S. 231–239; Düsseldorf: VDI Verlag 2004.
- [130] Szajek, A., M. Saller, A. Albrecht, U. Herb, T. Treichtl, M. Hackner, W. Schleich und M. Krompaß: *MELA – Mobile elektrische Leistungs- und Antriebstechnik für Fahrzeuge – ein offenes elektrisches Leistungsnetz für Offroad-Anwendungen*. Vortrag: VDI-Tagung Landtechnik 2004, Dresden, 7./8.10.2004, In: VDI-Berichte 1855, S. 241–246; Düsseldorf: VDI Verlag 2004.
- [131] Bernhard, B., M. Schreiber und H.D. Kutzbach: *Vergleich elektrischer und hydraulischer Fahrantriebe für Mähdrescher*. Vortrag: VDI-Tagung Landtechnik 2004, Dresden, 7./8.10.2004, In: VDI-Berichte 1855, S. 211–219; Düsseldorf: VDI Verlag 2004.
- [132] Hofmann, W.: *Ein mechatronisches Produkt – Stufenloses elektronisches Getriebe für Hybridfahrzeuge*. Antriebstechnik 43 (2004) H. 8, S. 46–50.

- [133] Höhn, B.-R.: *Automatisiertes Schaltgetriebe ohne Zugkraftunterbrechung*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2004, Friedrichshafen, 22/23.07.2004, In: VDI-Berichte 1827, S. 749–762; Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.
- [134] Villeneuve, A.: *Dual Mode Electric stufenlos variables Getriebe*. Vortrag: Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 4.-6.10.2004, Tagungsband, S. 895–922.
- [135] Paul, M., M. Grumbach und Ch. Pelchen: *Der Antriebsstrang als vernetztes System im Fahrzeug*. Vortrag: VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2004, Friedrichshafen, 22/23.07.2004, In: VDI-Berichte 1827, S. 5–18; Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.
- [136] Höver, N. und T. Seubert: *Heutige Fahrerassistenz-Systeme und ihr Potential für die Zukunft*. ATZ 105 (2003) H. 10, S. 956–964.
- [137] Yuassa, H.: *Torque Vectoring, applied in the EVO Vehicles*. Vortrag: 5. Grazer Allradkongress, Graz, 12./13.02.2004, Proceedings 2004.
- [138] • Brenninger, M.: *Stufenlos geregelter Allradantrieb für Traktoren*. Dissertation Technische Universität München 2002; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 526; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [139] Bock, Ch., H.-S. Braun, H. Fischer, C.-O. Griebel und E. Jägerbauer: *Der neue Hochleistungsantrieb des BMW X5 4,8iS*. MTZ Motortechnische Zeitschrift 65 (2004) H. 6, S. 454–461.
- [140] Leffler, H.: *Integration fahrdynamischer Regelsysteme – Eine Herausforderung für die Systemarchitektur*. Vortrag: Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 4.-6.10.2004, Tagungsband, S. 581–592.
- [141] Semmler, S. J. und P. E. Rieth: *Global Chassis Control – Das vernetzte Fahrwerk*. Vortrag: Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 4.-6.10.2004, Tagungsband, S. 611–626.
- [142] Pauli, B., A. Meyna und P. Heitmann: *Zuverlässigkeit elektronischer Bauteile und Steuergeräte im Kraftfahrzeugeinsatz*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 1998, Baden-Baden, In: VDI-Berichte 1415, S. 1009–1024.
- [143] • Mahmoud, R.: *Sicherheits- und Verfügbarkeitsanalyse komplexer Kfz-Systeme*. Dissertation Universität-Gesamthochschule Siegen 2000.
- [144] Thomson, T.: *Integration automotiver Standards in die Serieneicodegenerierung*. Vortrag: VDI-Tagung Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG 2002, Mannheim, 15./16.04.2002, In: VDI-Berichte 1672, S. 205–221; Düsseldorf: VDI Verlag 2002.

- [145] • Martinus, M.: *Funktionale Sicherheit von mechatronischen Systemen bei mobilen Arbeitsmaschinen*. Dissertation Technische Universität München 2004.
- [146] Gliwa, P. und R. Sauer: *OSEK-basiert Sicherheit bieten*. *Electronic Embedded Systeme* (2001) H. 07-08, S. 14–15.
- [147] • Stümpfle, M.: *Planning and Optimization of Priority-Based Vehicular Controller Networks*. Dissertation Universität Stuttgart 1999.
- [148] Hedenetz, B., J. Ruh, M. Kühlwein, A. Schedl, E. Fuchs, A. Krüger, Y. Domaratsky, P. Pelcat, S. Boutin, E. Dilger, Th. Führer, St. Polenda, M. Glück und Th. Ringler: *OSEKtime – Die neue fünfte OSEK/VDX Arbeitsgruppe – Ein zuverlässiges fehlertolerantes Echtzeit Betriebssystem und Kommunikationsschicht für By-Wire Applikationen*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2000, Baden-Baden, 05./06.10.2000, In: VDI-Berichte 1547, S. 59–74; Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- [149] Albert, A. und A. Trächtler: *Verteilte Fahrdynamikregelung mit zeitgesteuerter Architektur am Beispiel des Bosch-Konzeptes VDM*. Vortrag: Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 4.-6.10.2004, Tagungsband, S. 593–610.
- [150] • Bloos, M. F.: *Echtzeitanalyse der Kommunikation in Kfz-Bordnetzen auf Basis des CAN Protokolls*. Dissertation Technische Universität München 1999.
- [151] Unruh, J., H.-J. Mathomy und K.-H. Kaiser: *Error Detection Analysis of Automotive Communication Protocols*. Vortrag: SAE International Congress Advances in Multiplexing in Automobiles, Detroit, 26.02.-02.03.1990, Tagungsband 806, S. 43-52; Warrendale, PA, USA: Society of Automotive Engineers, 1990.
- [152] Charzinski, J. und O. Friedrichsohn: *Sicherheit der Datenübertragung serieller Bussysteme im Automobil*. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 96 (1994) H. 5, S. 324–329.
- [153] • Mores, R.: *Fehlertoleranz serieller Bussysteme*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 1996, Baden-Baden, 12.9.1996, In: VDI Berichte Nr. 1287, S. 709–731; Düsseldorf: VDI Verlag 1996.
- [154] Hartwich, F., B. Müller, Th. Führer und R. Hugel: *CAN Network with Time Triggered Communication*. Herstellerunterlagen Robert Bosch GmbH. <http://www.can.bosch.com>.

- [155] Belschner, R., J. Berwanger, Ch. Eber, H. Eisele, S. Fluhner, Th. Fores, Th. Führer, F. Hartwich, B. Hedenetz, R. Hugel, A. Knapp, J. Krammer, A. Millsap, B. Müller, M. Peller und A. Schedl: *FlexRay – Requirements Specifications, Version 2.0.2*. BMW AG, DaimlerChrysler AG, Robert Bosch GmbH, General Motors/Opel AG, 2002.
- [156] N., N.: *FlexRay Communications System. Protocol, Electrical Physical Layer, Bus Guardian Specifications. Version 2.0*. <http://www.flexray.com>.
- [157] Belschner, R., J. Berwanger, C. Bracklo, Ch. Ebner, B. Hedenetz, W. Kuffner, P. Lohrmann, J. Minuth, M. Peller, A. Schedl und V. Seefried: *Anforderungen an ein zukünftiges Bussystem für Fehlertolerante Anwendungen aus Sicht der Kfz-Hersteller*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2000, Baden-Baden, 05./06.10.2000, In: VDI-Berichte 1547, S. 23–41; Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- [158] N., N.: *Time-Triggered Protocol TTP/C – High-Level Specification Document Protocol Version 1.1*. TTTech Computertechnik AG, 2003.
- [159] Martinus, M. und R. Freimann: *Prozesssicherheit Landmaschinenelektronik – Gerät steuert Traktor*. Agrartechnische Forschung 8 (2002) H. 3, S. 61–69.
- [160] Dornseiff, M., M. Stahl, M. Sieger und E. Sax: *Durchgängige Testmethoden für komplexe Steuerungssysteme*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2001, Baden-Baden, 27./28.09.2001, In: VDI-Berichte 1646, S. 347–366; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [161] Kasper, M.: *Rapid-Prototyping-System zur Entwicklung neuer Einstritzkonzepte bei Dieselmotoren*. MTZ Motortechnische Zeitschrift 65 (2004) H. 10, S. 804–811.
- [162] Mutz, M., M. Harms, M. Horstmann, M. Huhn, G. Bikker, C. Krömke, K. Lange, U. Goltz, E. Schnieder und J.-U. Varchmin: *Ein durchgehender modellbasierter Entwicklungsprozess für elektronische Systeme im Automobil*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2003, Baden-Baden, 25./26.09.2003, In: VDI-Berichte 1789, S. 43–75; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [163] • Roddeck, W.: *Einführung in die Mechatronik*. Stuttgart: Teubner 1997.
- [164] Thümmel, Th.: *Vorlesung Schwingungsmessung*. Unterlagen zur Vorlesung am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik der Technischen Universität München. Stand: 1999.
- [165] • Isermann, R.: *Digitale Regelsysteme*. Berlin: Springer-Verlag 1977.
- [166] • Büttner, W.: *Digitale Regelungssysteme – Grundlagen zum Systementwurf*. Braunschweig: Vieweg 1991.

- [167] • Mann, H., H. Schiffelgen und R. Froriep: *Einführung in die Regelungstechnik – Analoge und digitale Regelung, Fuzzy-Regler, Regler-Realisierung, Software*. München: Hanser 1997.
- [168] • Kortüm, W. und P. Lugner: *Systemdynamik und Regelung von Fahrzeugen – Einführung und Beispiele*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 1994.
- [169] Beer, A. und M. Schmidt: *Funktionale Sicherheit sicherheitsrelevanter Systeme im Kfz*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2000, Baden-Baden, 05./06.10.2000, In: VDI-Berichte 1547, S. 391–409; Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- [170] N., N.: *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme*. Norm DIN EN 61508. Berlin: Beuth Verlag, 2001.
- [171] Isermann, R.: *Fehlertolerante Komponenten für Drive-by-Wire Systeme*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2001, Baden-Baden, 27./28.09.2001, In: VDI-Berichte 1646, S. 739–765; Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
- [172] N., N.: *Leittechnik; Grundlegende Sicherheitsbetrachtungen für MSR-Schutzeinrichtungen*. Vornorm DIN V 19250. Berlin: Beuth Verlag, 1994.
- [173] • Buchholz, P., J. Dunkel, B. Müller-Clostermann, M. Sczittnick und S. Zäske: *Quantitative Systemanalyse mit Markovschen Ketten*. Stuttgart: Teubner Verlag 1994.
- [174] • Walter, M.: *Quantitative Bewertung hochverfügbarer Systeme*. Dissertation Technische Universität München 2002.
- [175] Fehrenbach, H., C. Hohmann, Th. Schmidt, W. Schultalbers und H. Rasche: *Bestimmung des Motordrehmoments aus dem Drehzahlsignal*. MTZ Motortechnische Zeitschrift 63 (2002) H. 12, S. 1020–1027.
- [176] • Isermann, R.: *Mechatronic Systems – Fundamentals*. London Berlin Heidelberg: Springer 2003.
- [177] Naab, K.: *Sensorik und Signalverarbeitungsarchitekturen für Fahrerassistenz und Aktive Sicherheit*. Vortrag: Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme, Garching, 11./12.03.2004, Tagungsunterlagen.
- [178] • Halfmann, Ch. und H. Holzmann: *Adaptive Modelle für die Kraftfahrzeugdynamik*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag 2003.
- [179] • Hatton, L.: *Safer C – developing software for high integrity and safety critical systems*. London: McGraw-Hill 1995.
- [180] • Reinert, D. und M. Schaefer: *Sichere Bussysteme für die Automation*. Heidelberg: Hüthig Verlag 2001.

- [181] Jung, Ch. und M. Woltereck: *Vorschlag eines Funktionssicherheitsprozesses für die verteilte Entwicklung sicherheitsrelevanter Systeme*. Vortrag: VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug 2003, Baden-Baden, 25./26.09.2003, In: VDI-Berichte 1789, S. 245–264; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [182] Tappeiner, M.: *Automatische Code Generierung für einen elektronischen Steuerrechner im automatisierten Traktor/Geräte-Gespann*. Unveröffentlichte Diplomarbeit Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik 2004.
- [183] • Spitzer, B.: *Modellbasierter Hardware-in-the-Loop Test von eingebetteten elektronischen Systemen*. Dissertation Universität Karlsruhe 2001.
- [184] Wältermann, P., H. Schütte und K. Diekstall: *Hardware-in-the-Loop-Test verteilter Kfz-Elektroniksysteme*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 106 (2004) H. 5, S. 416–425.
- [185] • Baumann, G.: *Werkzeuggestützte Echtzeit-Fahrsimulation mit Einbindung vernetzter Elektronik*. Dissertation Universität Stuttgart 2003; Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart; Renningen: Expert-Verlag 2004.
- [186] Anderl, Th. und M. Rempfer: *Der Einachs-Rollenprüfstand der TU München*. Landtechnik 57 (2002) H. 1, S. 22/23.
- [187] Anderl, Th.: *Messtechnische Untersuchung des Münchner Autarken Hybrids*. Vortrag: VDI-Tagung Mess- und Versuchstechnik in der Fahrzeugentwicklung, Würzburg, 03./04.04.2003, In: VDI-Berichte 1755, S. 165–189; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [188] Höhn, B.-R., H. Pflaum und Th. Schmidbauer: *The Autark Hybrid – Results from the Test Vehicle Operating*. Vortrag: CVT 2002 Congress, München, 7./8.10.2002, In: VDI-Berichte 1709, S. 583–602; Düsseldorf: VDI-Verlag 2002.
- [189] • Kersch, S.: *Der Autarke Hybrid – Optimierung des Antriebsstrangs hinsichtlich Energieverbrauch und Bestimmung des Einsparpotentials*. Dissertation Technische Universität München 1998.
- [190] • Mayer, Th.: *Modellierung und Regelung des Autarken Hybridfahrzeugs*. Dissertation Technische Universität München 1998.
- [191] Freimann, R. und K. Th. Renius: *Messtechnik im Autarken Hybrid der TUM auf Basis des CAN-BUS*. Vortrag: VDI-Tagung Hybridantriebe, Technische Universität München, 25./26.02.1999, In: VDI-Berichte 1459, S. 265–279; Düsseldorf: VDI-Verlag 1999.

- [192] Schröder, D. und C. Müller: *Entwurf und Implementierung der Regelung am Autarken Hybrid*. Vortrag: VDI-Tagung Hybridantriebe, Technische Universität München, 25./26.02.1999, In: VDI-Berichte 1459, S. 211–226; Düsseldorf: VDI-Verlag 1999.
- [193] Kallenbach, R., W. Kind, F. Bickendorf und Th. Jünemann: *CARTRONIC Antriebsstrang- und Energiemanagement*. Vortrag: 1. Braunschweiger Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, Braunschweig, 21.02.2002, In: Fortschritt-Berichte VDI Nr. 484, S. 191–201; Düsseldorf: VDI-Verlag 2002.
- [194] • Westenthanner, U.: *Hydrostatische Anpress- und Übersetzungsregelung für stufenlose Kettenwandlergetriebe*. Dissertation Technische Universität München 2000; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12 Nr. 442; Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- [195] Anderl, Th.: *Entwicklung und Absicherung der CAN-Kommunikation des Münchner Autarken Hybrids mit modellbasierten HIL Simulationen*. In: VDI-Berichte 1745, S. 321–342; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [196] • Schmidbauer, Th.: *Aufbau und Erprobung des Autarken Hybrid-Antriebsstrangs im Versuchsfahrzeug*. Dissertation Technische Universität München, Lehrstuhl für Maschinenelemente 2004.
- [197] • Förster, W.: *Der Lastschaltvorgang beim stufenlosen i2-Getriebe des Autarken Hybrid-Antriebsstrangs*. Dissertation Technische Universität München 1999.
- [198] • Guttenberg, Ph.: *Der Autarke Hybrid am Prüfstand – Funktion, Kraftstoffverbrauch und energetische Analyse*. Dissertation Technische Universität München 2004.
- [199] Stöckl, B.: *Development of an Pressure-Controlled Clamping System for Continuously Variable Belt and Chain Transmissions*. Vortrag: CVT 2002 Congress, München, 7./8.10.2002, In: VDI-Berichte 1709, S. 571–582; Düsseldorf: VDI-Verlag 2002.
- [200] Heißing, B.: *Vorlesung Entwurf und Simulation von Straßenfahrzeugen*. Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München. Stand Oktober 2004.
- [201] Lichtenthäler, D., M. Ayeb, H. Theuerkauf und Th. Winsel: *HIL-Simulation: Neuroverfahren zur Erstellung echtzeitfähiger Verbrennungsmotormodelle*. In: Mechatronik im Automobil; Renningen-Malmsheim: Expert Verlag 2000, S.149-165.
- [202] • Linse, H. und R. Fischer: *Elektrotechnik für Maschinenbauer – Grundlagen und Anwendungen*. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B. G. Teubner 2000.

- [203] • Scholz, M.: *Echtzeitberechnung des Luftspaltemomentes der Asynchronmaschine im stationären und dynamischen Betrieb mittels parameterunempfindlichem Beobachter*. Dissertation Technische Universität Bergakademie Freiberg 1998.
- [204] Beckert, U. und H. Arnold: *Sensorlose Zustandsregelung zur Verschleißminderung – Schätzeinrichtung für Drehstromantriebe*. Antriebstechnik 43 (2004) H. 7, S. 36–41.
- [205] • Sauer, G.: *Grundlagen und Betriebsverhalten eines Zugketten-Umschlingungsgetriebes*. Dissertation Technische Universität München 1996; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 293; Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.
- [206] • Koberger, M.: *Hydrostatische Ölversorgungssysteme für stufenlose Kettenwandlergetriebe*. Dissertation Technische Universität München, Lehrstuhl für Landmaschinen 1999; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 413; Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- [207] Angloher, J. und U. Wagner: *Analyse und Modellierung des Einsatzes einer Nickel/Metallhydrid-Batterie im Autarken Hybrid*. Vortrag: VDI-Tagung Hybridantriebe, Technische Universität München, 25./26.02.1999, In: VDI-Berichte 1459, S. 147–165; Düsseldorf: VDI-Verlag 1999.
- [208] Kleimaier, A. und D. Schröder: *Optimal Control and Emission Behaviour*. Vortrag: CVT 2002 Congress, München, 7./8.10.2002, In: VDI-Berichte 1709, S. 603–621; Düsseldorf: VDI-Verlag 2002.
- [209] Mölle, R.: *Control and Operating Behavior of Continuously Variable Chain Transmissions*. Vortrag: VDI-Tagung Landtechnik 2003, Hannover, 07./08.11.2003, In: VDI-Berichte 1798, VDI-Berichte Nr. 1798, S. 397–402; Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.

9.2 Zitierte Autoren

Auflistung der Erstautoren der zitierten Literatur mit den Nummern der Literaturstellen und den Seitenzahlen der Zitate.

Autor

Lit.-Nr. Seite

Albert, A.		Braunsperger, M.	
149	20	18	5
Anderl, Th.		Brenninger, M.	
186	56, 84	138	15
187	56, 57, 66, 78, 80, 84, 85, 92	Buchholz, P.	
195	63, 66	173	47
Angloher, J.		Büchs, H. P.	
207	105	111	14
Appel, W.		Büchs, H.P.	
87	12	20	5
Armendt, O.		Burkhardt, S.	
101	13	21	5
Baumann, G.		112	14
185	54	Büttner, W.	
Beck, A.		166	41, 42
104	13	Charzinski, J.	
Beckert, U.		152	26
204	99	Chodura, H.	
Beer, A.		115	14, 18
169	42	Dais, S.	
Belscher, R.		1	2
30	6, 14, 29	Dittrich, T.	
Belschner, R.		49	7
155	29	Dornseiff, M.	
157	32, 75	160	38, 53
Bernhard, B.		Druten, v. R. M.	
131	15	122	15
Bloos, M. F.		Dudenhöffer, F.	
150	24	120	15
Bock, Ch.		Eberspächer, R.	
139	15	19	5
Bolz, S.		100	13
8	3	Etschberger, K.	
Braunschweig, M.		24	6, 10, 23, 27
38	7		

Fehrenbach, H.		Haller, Th.	
175	47, 48	11	3
Felbinger, L.		Harms, K.	
25	6	127	15
Föllinger, O.		Hartwich, F.	
6	3, 40	154	27
Forche, J.		Hatton, L.	
50	7	179	50
Förster, H. J.		Hecker, F.	
69	10	74	11
Förster, W.		Hedenetz, B.	
197	82, 101	29	6
Freimann, R.		148	19, 75
4	2, 7, 38, 53	Heintze, W.	
191	59, 63, 66, 78, 80, 88	81	11, 15
Führer, Th.		Heißing, B.	
26	6, 27	200	92
Gehring, O.		Hiermann, U.	
77	11	86	12
79	11, 15	Hietl, H.	
Gliwa, P.		96	13
146	17	Hirt, M.	
Glöckler, O.		113	14
9	3	Hoepke, E.	
Goering, C.E.		65	10, 11
52	8, 9	76	11
Goldbrunner, W.		Hofmann, R.	
2	2, 14	71	10
Goppelt, G.		Hofmann, W.	
93	13	132	15
Greiner, J.		Höhn, B.-R.	
17	4, 13, 48, 61	133	15
91	13	188	57
Guttenberg, Ph.		Höver, N.	
198	87, 92, 105, 112	136	15
Haiss, H.		Huber, R.	
73	10	15	4, 5, 20
Haj-Fraj, A.		Huwendiek, O.	
108	14, 102	48	7
Halfmann, Ch.		Isermann, R.	
178	49, 95, 107	165	41, 42
Hall, W.		171	43, 44, 47
106	13	176	47, 53

Jessen, H.		Mahmoud, R.	
117	14, 44	143	16, 44, 46, 47
Jung, Ch.		Mann, H.	
181	53	167	41, 42
Kallenbach, R.		Martinus, M.	
193	60	145	17, 37, 42, 43, 44, 111, 116
Kasper, M.		159	38, 53
161	38	Mathony, H.-J.	
Kersch, S.		22	5
124	15, 78	Matthies, H.J.	
128	15	59	9
189	57, 87, 100, 108	Mayer, Th.	
Kitterer, H.		190	59, 60, 61, 63, 66, 78, 89, 108
78	11, 15	Möller, R.	
Kleimaier, A.		209	116
208	108	Mores, R.	
Knorr, R.		153	27
119	15	Mutz, M.	
Koberger, M.		162	38
206	102, 105	N, N.	
Kortüm, W.		89	12, 14
168	42	N., N.	
Kraft, D.		13	3, 4, 6
102	13	14	3, 4
Kunze, G.		23	5, 23
55	9	33	6
Latour, Ch.		34	6
61	9	35	6
Lechner, G.		51	8
68	10, 12	53	8, 11, 40
Leffler, H.		64	10
140	15	85	12, 46, 47
Lehner, A.		88	12, 14
98	13	156	29
Lichtenthaler, D.		158	34
201	94	170	42, 44
Linse, H.		172	43
202	98	Naab, K.	
Löffler, J.		177	48
90	13	Nelles, S.	
Lutz, H.		110	14
7	3, 42	Nemec, D.	
		37	6

Neumayer, R.		Roddeck, W.	
97	13	163	40
Nowatschin, K.		Rucha, B.	
109	14	16	4
Oba, H.		Rüchart, C.	
121	15	70	10
Paul, M.		Runge, W.	
135	15	3	2
Pauli, B.		Sauer, G.	
142	16	205	100
Paulsen, L.		Schaefer, U.	
38	11	12	3
66	10, 11	Schäfer, Chr.	
Paulus-Neues, J.		80	11, 40
125	15	Schäuffele, J.	
Peller, M.		31	6, 17, 19, 37, 38, 44, 53, 54
105	13, 29	Schiehlen, J.	
Pfab, H.		75	11
57	9	Schlingmann, N.	
58	9	36	6
Plankensteiner, M.		Schmidbauer, Th.	
28	6, 14	196	71, 78, 84, 86, 87, 92, 105
Probst, G.		Schmitt, M.	
126	15	82	11
Reichenbach, M.		Schmitz, G.	
67	10	45	7
Reinert, D.		Scholz, M.	
180	52	203	99
Reiter, H.		Schöttle, R.	
46	7	118	15
Renius, K.Th.		Schreiber, W.	
39	7	92	13
40	7	Schrempp, R.	
42	7	56	9
43	7	Schröder, D.	
44	7	192	59, 60, 61, 63, 66, 78, 80, 108
Resch, R.		Schwarte, A.	
41	7	32	6, 47
Rieck, G.		Seeger, J.	
83	11	47	7
Rinck, S.		Semmler, S. J.	
60	9	141	15

Sinkwitz, H.		Wältermann, P.	
107	13	184	54
Specks, W.		Walther, M.	
95	13	5	2, 14
Spiegelberg, G.		Weber, J.	
72	10	62	9
84	11, 12	Westenthanner, U.	
Spitzer, B.		194	61, 102, 116
183	54	Wörner, S.	
Stepper, M.R.		99	13
54	8, 11, 40	Yuassa, H.	
Stöckl, B.		137	15
199	87	Zeltwanger, H.	
Stümpfle, M.		27	6
147	17	Zunhammer, R.	
Szajek, A.		103	13
130	15		
Tappeiner, M.			
182	54		
Tarasinski, N.			
129	15		
Teepe, G.			
114	14		
Thomson, T.			
144	17, 51		
Thümmel, Th.			
164	40		
Torlo, M.			
116	14		
Unger, E.			
63	10		
Unruh, J.			
151	26		
Vetter, H.			
10	3, 14		
Villeneuve, A.			
134	15		
Wagner, G.			
94	13		
Wallentowitz, H.			
123	15		
Walter, M.			
174	47		