

Inhalt

| | |
|--|----------|
| Vorwort | V |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Zum Inhalt dieses Buches | 1 |
| 1.2 Vorhandene Literatur | 2 |
| 1.2.1 Monografien | 2 |
| 1.2.2 Weitere Literatur | 3 |
| 1.3 Aufbau und Nomenklatur | 3 |
| 1.4 LDF-Editor als Zusatzmaterial | 4 |
| I Grundlegende Funktionsweisen | 5 |
| 2 Grundlagen (1) | 7 |
| 2.1 Einführung in die Kommunikation | 7 |
| 2.2 Begriffe | 8 |
| 2.2.1 Elemente eines Kommunikationssystems | 8 |
| 2.2.2 Begriffe zur Adressierung | 9 |
| 2.2.2.1 Unicast | 9 |
| 2.2.2.2 Multicast | 9 |
| 2.2.2.3 Broadcast | 10 |
| 2.2.2.4 Simplex | 10 |
| 2.2.2.5 Vollduplex | 11 |
| 2.2.2.6 Halbduplex | 11 |
| 2.2.3 Bussysteme | 11 |
| 2.2.4 Notwendigkeit einer Vernetzung | 12 |
| 2.2.5 Weitere Begriffe | 13 |
| 2.3 Aufbau | 13 |
| 2.3.1 Aufbau eines Knotens | 13 |
| 2.3.2 Aufbau eines Clusters | 15 |
| 2.3.3 Komponenten | 15 |
| 2.3.4 OSI-Modell | 16 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.4 | Topologien..... | 17 |
| 2.4.1 | Bustopologie | 17 |
| 2.4.2 | Sterntopologie | 19 |
| 2.4.3 | Ringtopologie | 19 |
| 2.4.4 | Hybride Topologien | 20 |
| 2.5 | Zugriffsverfahren | 22 |
| 2.5.1 | Einführungsbeispiel | 22 |
| 2.5.2 | Master-Slave-Prinzip | 23 |
| 2.5.3 | Zeitgesteuertes Zugriffsverfahren..... | 24 |
| 2.5.4 | Token Passing | 24 |
| 2.5.5 | Ereignisgesteuertes Zugriffsverfahren..... | 24 |
| 2.5.6 | Zusammenfassung Zugriffsverfahren | 25 |
| 2.6 | Codierung | 26 |
| 2.6.1 | Begriffe..... | 27 |
| 2.6.2 | Reihenfolge der Bits | 28 |
| 2.6.3 | Anzahl der Leitungen | 29 |
| 2.6.3.1 | Ein-Draht-Leitung | 30 |
| 2.6.3.2 | Zwei-Draht-Leitung | 30 |
| 2.6.4 | Signalübertragung | 31 |
| 2.6.4.1 | Asymmetrische Signalübertragung | 31 |
| 2.6.4.2 | Symmetrische Signalübertragung | 32 |
| 2.6.5 | Bitsynchronisation | 32 |
| 2.6.5.1 | Rahmenbildung für Resynchronisation | 33 |
| 2.6.5.2 | Bit Stuffing für Resynchronisation | 34 |
| 2.6.6 | Leitungscodes | 35 |
| 2.6.6.1 | NRZ-Codierung | 35 |
| 2.6.6.2 | RZ-Codierung | 36 |
| 2.6.6.3 | Manchester-Code | 37 |
| 2.6.6.4 | 4B5B-Code..... | 38 |
| 2.6.6.5 | MLT-3-Code | 39 |
| 2.6.6.6 | 4B3T-Code | 39 |
| 2.7 | Kenngrößen | 40 |
| 2.7.1 | Datenmenge | 40 |
| 2.7.2 | Datenübertragungsrate | 41 |
| 2.7.3 | Baudrate | 42 |
| 2.7.4 | Verzögerung..... | 42 |
| 2.7.5 | Jitter | 43 |
| 2.8 | Übersicht über Kommunikationsprotokolle im Automobil | 44 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | LIN (1) | 47 |
| 3.1 | Einleitung | 47 |
| 3.1.1 | Anforderungen und Eigenschaften | 47 |
| 3.1.2 | Historie | 48 |
| 3.1.3 | Anwendung von LIN | 49 |
| 3.2 | Grundlagen | 49 |
| 3.2.1 | Begriffe | 49 |
| 3.2.2 | Aufbau eines LIN-Knotens | 49 |
| 3.2.3 | Aufbau eines LIN-Clusters | 50 |
| 3.2.4 | Einordnung ins OSI-Modell | 51 |
| 3.2.5 | LIN-Standards | 51 |
| 3.3 | LIN-Frames und LIN-Schedule | 53 |
| 3.3.1 | Aufbau eines LIN-Frames | 53 |
| 3.3.2 | Frame Header | 53 |
| 3.3.2.1 | Break-Feld | 54 |
| 3.3.2.2 | Sync-Feld | 54 |
| 3.3.2.3 | Identifizier-Feld | 55 |
| 3.3.3 | Frame Response | 55 |
| 3.3.3.1 | Data-Feld | 55 |
| 3.3.3.2 | Checksum-Feld | 56 |
| 3.3.4 | LIN-Zyklus | 57 |
| 3.3.5 | Frame-Typen | 58 |
| 3.3.5.1 | Unconditional Frames | 58 |
| 3.3.5.2 | Event Triggered Frames | 59 |
| 3.3.5.3 | Sporadic Frames | 61 |
| 3.3.5.4 | Diagnostic Frames | 61 |
| 3.3.5.5 | Reserved Frames | 62 |
| 3.4 | Wecken eines LIN-Clusters | 62 |
| 3.4.1 | Zustände eines Slave-Knotens | 62 |
| 3.4.2 | Wake-up-Signal | 63 |
| 3.4.3 | Wiederholtes Wecken | 63 |
| 3.5 | Physical Layer | 64 |
| 3.5.1 | LIN-Transceiver | 64 |
| 3.5.2 | Buspegel | 65 |
| 3.5.3 | Bitraten-Toleranzen | 67 |
| 3.5.4 | Bit-Synchronisation | 67 |
| 3.5.5 | Bit Sampling | 68 |
| 3.6 | Frame-Timing | 69 |
| 3.6.1 | Berechnung der Frame-Länge und der Slotlänge | 69 |
| 3.6.2 | Slotlängen für verschiedene Konfigurationen | 70 |

| | | |
|----------|---------------------------------------|-----------|
| 4 | CAN (1) | 73 |
| 4.1 | Einleitung | 73 |
| 4.1.1 | CAN-Eigenschaften | 73 |
| 4.1.2 | Historie | 74 |
| 4.1.3 | Einsatzgebiete | 75 |
| 4.2 | Aufbau | 76 |
| 4.2.1 | Begriffe | 76 |
| 4.2.2 | Aufbau eines CAN-Knotens | 76 |
| 4.2.3 | Aufbau eines CAN-Clusters | 77 |
| 4.2.4 | OSI-Modell | 77 |
| 4.2.5 | CAN-Standards | 79 |
| 4.2.6 | Steckverbinder | 79 |
| 4.3 | Physical Layer | 80 |
| 4.3.1 | Einteilung | 80 |
| 4.3.2 | Buspegel | 81 |
| 4.3.3 | Transceiver | 83 |
| 4.3.4 | Terminierung | 85 |
| 4.3.5 | Topologie | 86 |
| 4.3.6 | Buslogik | 87 |
| 4.4 | Data Link Layer | 88 |
| 4.4.1 | CAN-Kommunikationsprinzip | 88 |
| 4.4.2 | Frame-Format | 91 |
| 4.4.2.1 | Data Frame Format | 91 |
| 4.4.2.2 | Remote Frame Format | 93 |
| 4.4.2.3 | Steuerfeld | 93 |
| 4.4.3 | Arbitrierung | 94 |
| 4.4.4 | CAN-Priorisierung | 99 |
| 4.4.5 | Bit Stuffing | 100 |
| 4.4.6 | Frame-Decodierung | 100 |
| 4.5 | Fehlerbehandlung | 102 |
| 4.5.1 | Fehlerarten | 102 |
| 4.5.2 | Fehlererkennung | 103 |
| 4.5.3 | Error Frame | 104 |
| 4.5.4 | Overload Frame | 106 |
| 4.5.5 | Fehlerzustände (Error Modes) | 107 |
| 4.5.6 | Fehlerzähler (Auszug) | 109 |
| 4.5.7 | Acknowledgement | 109 |
| 4.5.8 | Zusammenfassung Fehlererkennung | 111 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.6 | Berechnungen zur Busauslastung..... | 112 |
| 4.6.1 | Berechnung der Frame-Länge..... | 112 |
| 4.6.2 | Berechnung der maximalen Anzahl an Stuff Bits | 112 |
| 4.6.3 | Berechnung der Frame-Übertragungszeit und der Busauslastung | 113 |
| 4.6.4 | Maximale Anzahl an Frames in einem Cluster | 116 |
| 4.6.5 | Maximale Nutzdatenrate in einem Cluster | 116 |
| 5 | FlexRay (1)..... | 119 |
| 5.1 | Einleitung..... | 119 |
| 5.1.1 | Was ist FlexRay? | 119 |
| 5.1.2 | FlexRay-Eigenschaften | 119 |
| 5.1.3 | Historie | 120 |
| 5.2 | Begriffe und Aufbau | 121 |
| 5.2.1 | Begriffe..... | 121 |
| 5.2.2 | Aufbau | 121 |
| 5.2.3 | OSI-Modell | 123 |
| 5.2.4 | FlexRay-Standards | 123 |
| 5.3 | Physical Layer | 125 |
| 5.3.1 | Medien..... | 125 |
| 5.3.2 | Buspegel | 126 |
| 5.3.3 | Topologien | 126 |
| 5.3.3.1 | Bustopologie | 127 |
| 5.3.3.2 | Sterntopologie..... | 127 |
| 5.3.3.3 | Gemischte Topologien | 128 |
| 5.3.4 | Sternkoppler | 129 |
| 5.3.5 | Terminierung | 130 |
| 5.4 | Data Link Layer | 132 |
| 5.4.1 | Aufbau eines Kommunikationszyklus | 132 |
| 5.4.1.1 | Statisches Segment | 133 |
| 5.4.1.2 | Dynamisches Segment..... | 135 |
| 5.4.2 | Zeithierarchie | 137 |
| 5.4.3 | Frame-Format | 138 |
| 5.4.3.1 | Header..... | 138 |
| 5.4.3.2 | Payload | 139 |
| 5.4.3.3 | Trailer..... | 139 |
| 5.4.4 | Codierung | 140 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5.5 | Uhrensynchronisation | 141 |
| 5.5.1 | Uhrenabweichungen | 142 |
| 5.5.2 | Uhrenkorrektur | 143 |
| 5.5.2.1 | Offset-Korrektur | 143 |
| 5.5.2.2 | Raten-Korrektur | 143 |
| 5.5.2.3 | Uhrenkorrektur bei FlexRay | 144 |
| 5.6 | Konfiguration | 145 |
| 5.6.1 | Schreibweisen | 146 |
| 5.6.2 | Berechnung der Zykluszeit | 146 |
| 5.6.3 | Berechnung der statischen Slotlänge | 148 |
| 5.7 | Übungen | 151 |

II Erweiterte Prinzipien und spezielle Mechanismen..... 155

6 Grundlagen (2) 157

| | | |
|---------|--|-----|
| 6.1 | Methoden zur Berechnung eines Prüfwerts | 157 |
| 6.1.1 | Paritätsprüfung | 157 |
| 6.1.2 | Berechnung der Prüfbits bei LIN | 158 |
| 6.1.2.1 | Bestimmung der Paritätsbits im Identifier-Feld | 158 |
| 6.1.2.2 | Bestimmung der Prüfbits für das Checksum-Feld | 159 |
| 6.1.3 | Kreuzparitätsprüfung | 160 |
| 6.1.4 | Zyklische Redundanzprüfung | 162 |
| 6.2 | Kommunikationsarten | 166 |
| 6.2.1 | Signalorientierte Kommunikation | 166 |
| 6.2.2 | Serviceorientierte Kommunikation | 168 |
| 6.2.3 | Vergleich der beiden Kommunikationsarten | 170 |
| 6.3 | Leitungsreflexionen | 171 |
| 6.3.1 | Entstehung von Reflexionen | 171 |
| 6.3.2 | Leistungsparameter | 172 |
| 6.3.3 | Messung von Reflexionen | 173 |
| 6.3.4 | Ringring | 176 |

7 LIN (2) 179

| | | |
|-------|----------------------------------|-----|
| 7.1 | Entwicklungsprozess | 179 |
| 7.1.1 | Überblick | 179 |
| 7.1.2 | LIN Description File (LDF) | 180 |
| 7.1.3 | Node Capability File (NCF) | 183 |

| | | |
|-------|-------------------------------|-----|
| 7.2 | Anwendungsbeispiel | 186 |
| 7.2.1 | Beschreibung der Knoten | 186 |
| 7.2.2 | Signalcodierung | 189 |
| 7.2.3 | Signaldefinition | 190 |
| 7.2.4 | Frames | 193 |
| 7.2.5 | Schedules | 196 |

8 CAN (2) 199

| | | |
|---------|--|-----|
| 8.1 | Bit-Timing und Bitsynchronisation | 199 |
| 8.1.1 | Diskretisierung des empfangenen Spannungsverlaufs | 199 |
| 8.1.2 | Bit-Timing | 201 |
| 8.1.3 | Bitsynchronisation | 203 |
| 8.2 | Weiterentwicklungen von CAN | 204 |
| 8.2.1 | Grenzen und Erweiterungen von CAN | 204 |
| 8.2.2 | Erweiterter Identifier | 206 |
| 8.2.3 | Erweiterungen im Physical Layer | 207 |
| 8.2.3.1 | Problembeschreibung | 207 |
| 8.2.3.2 | Lösungsansatz | 208 |
| 8.2.3.3 | Wecken mittels Wakeup-Pattern (WUP) | 209 |
| 8.2.3.4 | Wecken mittels Wakeup-Frame (WUF) | 212 |
| 8.3 | CAN FD | 214 |
| 8.3.1 | Frame-Format und Funktionsweise | 214 |
| 8.3.2 | CAN FD CRC | 216 |
| 8.3.3 | Bit Stuffing | 218 |
| 8.3.4 | Übersicht über CAN-Frame-Typen | 219 |
| 8.3.5 | Hinweise zu Implementationen | 219 |
| 8.3.6 | CAN-FD-Bitraten | 220 |
| 8.3.7 | Effekt der längeren Payload und der höheren Datenbitrate | 220 |
| 8.3.8 | CAN-FD-SIC-Ansatz | 221 |
| 8.3.9 | CAN-FD-Physical-Layer-Spezifikationen | 226 |
| 8.4 | CAN XL | 226 |
| 8.4.1 | Eigenschaften und Anwendung von CAN XL | 226 |
| 8.4.2 | Frame-Aufbau und prinzipielle Funktionsweise | 227 |
| 8.4.3 | Arbitrierungsfeld | 227 |
| 8.4.4 | Steuerfeld | 228 |
| 8.4.4.1 | ADS-Feld | 229 |
| 8.4.4.2 | Service Data Unit Type | 229 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 8.4.4.3 | Data Length Code | 229 |
| 8.4.4.4 | Stuff-Bit-Zähler | 229 |
| 8.4.4.5 | Preface Cyclic Redundancy Check | 230 |
| 8.4.4.6 | Virtual CAN ID | 230 |
| 8.4.4.7 | Acceptance-Feld | 230 |
| 8.4.5 | Datenfeld | 231 |
| 8.4.6 | CRC-Feld | 231 |
| 8.4.7 | Acknowledge-Feld und EOF | 232 |
| 8.4.8 | Bit Stuffing | 232 |
| 8.4.9 | Bitraten-Umschaltung | 233 |
| 8.4.10 | Vergleich der Header von Classical CAN, CAN FD und CAN XL | 237 |
| 8.5 | Realisierung | 238 |
| 8.5.1 | CAN-Controller | 238 |
| 8.5.2 | CAN-Transceiver | 239 |
| 8.5.3 | CAN-Oszilloskope | 241 |
| 8.5.4 | Typische Schaltung eines CAN-Knotens | 241 |
| 8.6 | Berechnung der Busauslastung beim Classical CAN | 242 |
| 8.7 | Übungen | 244 |

9 FlexRay (2) 247

| | | |
|-------|---|-----|
| 9.1 | Protokollzustände | 247 |
| 9.2 | Wakeup | 249 |
| 9.2.1 | Cluster-Wakeup | 249 |
| 9.2.2 | Wakeup-Pattern | 250 |
| 9.2.3 | Wakeup-Szenario mit sich überlappenden Low-Phasen | 252 |
| 9.2.4 | Wakeup-Szenario mit sich teilweise überlappenden Low-Phasen | 253 |
| 9.2.5 | Wakeup-Szenario mit sich nicht überlappenden Low-Phasen | 254 |
| 9.3 | Startup | 255 |
| 9.3.1 | Startup von zwei Coldstart-Knoten | 255 |
| 9.3.2 | Startup eines Non-Coldstart-Knotens | 257 |
| 9.3.3 | Startup mit nur einem Coldstart-Knoten | 258 |
| 9.4 | Bus Guardian | 259 |
| 9.4.1 | Eigenschaften | 259 |
| 9.4.2 | Funktionsweise | 259 |
| 9.4.3 | Realisierung | 261 |
| 9.5 | Mechanismen und Effekte | 261 |
| 9.5.1 | Null-Frames | 261 |
| 9.5.2 | Verkürzung der Transmission Start Sequence | 263 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 9.5.3 | Uhrensynchronisation | 265 |
| 9.5.3.1 | Ablauf der Uhrensynchronisation | 265 |
| 9.5.3.2 | Erfassen der Messwerte | 265 |
| 9.5.3.3 | Berechnung der Offset-Korrekturwerte | 266 |
| 9.5.3.4 | Berechnung der Raten-Korrekturwerte | 267 |
| 9.5.3.5 | Anwendung der Korrekturwerte | 268 |
| 9.5.4 | Bit-Decodierung | 268 |
| 9.5.5 | Asymmetrien | 269 |
| 9.5.5.1 | Was ist eine Bitasymmetrie? | 269 |
| 9.5.5.2 | Auswirkungen von Bitasymmetrien | 270 |
| 9.5.5.3 | Treiberstufe im Protokollcontroller und im Transceiver | 270 |
| 9.5.5.4 | Bitasymmetrie durch Schwellwertverschiebung | 271 |
| 9.5.5.5 | Bitasymmetrie durch Änderung der Flankensteilheit | 272 |
| 9.5.5.6 | Bitasymmetrie durch Unterschiede in der Verzögerungszeit | 272 |
| 9.6 | Applizierung | 273 |
| 9.6.1 | FlexRay im BMW X5 | 273 |
| 9.6.2 | FlexRay im 7er BMW | 275 |
| 9.7 | Berechnung der Minislottlänge | 276 |
| 9.8 | Übungen | 278 |

10 Automotive Ethernet 281

| | | |
|----------|--|-----|
| 10.1 | Einleitung | 281 |
| 10.1.1 | Versionen von Automotive Ethernet | 281 |
| 10.1.2 | Entwicklungsgeschichte von (Automotive) Ethernet | 282 |
| 10.2 | Aufbau | 282 |
| 10.2.1 | Aufbau eines Ethernet-Knotens | 282 |
| 10.2.2 | Topologien | 283 |
| 10.2.3 | Interfaces | 284 |
| 10.2.4 | Media Dependent Interface | 284 |
| 10.2.4.1 | ESD-Schutz | 285 |
| 10.2.4.2 | Common Mode Termination | 286 |
| 10.2.4.3 | AC-Kopplung | 286 |
| 10.2.4.4 | Gleichtaktdrossel | 287 |
| 10.2.4.5 | Low-Pass-Filter | 287 |
| 10.2.5 | Media Independent Interface | 287 |
| 10.2.5.1 | MII | 287 |
| 10.2.5.2 | RMII | 287 |
| 10.2.5.3 | RGMII und SGMII | 287 |

| | |
|--|------------|
| 10.3 Ethernet-Versionen | 289 |
| 10.3.1 Ethernet IEEE 100BASE-TX | 289 |
| 10.3.2 Ethernet IEEE 1000BASE-T | 289 |
| 10.3.3 Ethernet IEEE 100BASE-T1 | 290 |
| 10.3.4 Versionen von Automotive Ethernet..... | 291 |
| 10.4 Physical Layer | 291 |
| 10.4.1 Aufbau des Transceivers..... | 291 |
| 10.4.1.1 Bitmanipulationen im Sendepfad des Physical Coding Sublayers..... | 292 |
| 10.4.1.2 Bitmanipulationen im Empfangspfad des Physical Coding Sublayers..... | 294 |
| 10.4.2 Leitungscodes | 295 |
| 10.4.2.1 Spannungswerte | 295 |
| 10.4.2.2 Zuordnungs- und Leitungscodes | 295 |
| 10.4.2.3 Signalhandling | 296 |
| 10.4.2.4 Oszilloskopmessungen | 298 |
| 10.4.3 Startup | 299 |
| 10.4.3.1 Transceiver-Modi und Startup-Sequenz..... | 299 |
| 10.4.3.2 Leitungscode 3B2T in der Trainingsphase | 301 |
| 10.4.3.3 Leitungscode 3B2T in der Sendephase | 301 |
| 10.4.3.4 Diagnosemöglichkeiten..... | 302 |
| 10.5 Data Link Layer | 303 |
| 10.5.1 Ethernet-Controller | 303 |
| 10.5.2 Ethernet Frame Format | 303 |
| 10.5.3 Adressierung | 306 |
| 10.5.3.1 Unicast | 306 |
| 10.5.3.2 Broadcast | 306 |
| 10.5.3.3 Multicast | 307 |
| 10.6 Weitere Aspekte zu Ethernet | 308 |
| 10.6.1 Höhere Protokolle | 308 |
| 10.6.2 Kopplungselement für Messungen | 309 |
| 10.6.3 Implementierungen nach 100BASE-T1 | 311 |
| 10.6.4 OPEN Alliance | 311 |
| Literatur..... | 313 |
| Index..... | 315 |