

**Beitrag zum systematischen Steuerungsentwurf  
von Mehrmotorenantriebssystemen  
am Beispiel eines Laborversuchsstandes mit  
fahrzeugspezifischen Eigenschaften**

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen  
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des  
akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs  
genehmigte

**Dissertation**

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

**Thomas Krüger**

geboren am: 09.10.1972                      in: Görlitz

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. H. Schwarz
Gutachter:	Prof. Dr.Ing. habil. K. Klinger
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. B. Falter
Tag der mündlichen Prüfung:	26.09.2006

---

## ***Inhaltsverzeichnis***

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>IV</b>
<b>SYMBOLVERZEICHNIS .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2 VORBEMERKUNGEN ZU ELEKTRISCHEN FAHRZEUGANTRIEBEN ...</b>	<b>4</b>
2.1 Der Antriebsstrang.....	5
2.2 Elektromotoren.....	7
2.3 Energiespeicher und Energiewandler .....	8
<b>3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZU FAHRZEUGEIGENSCHAFTEN..</b>	<b>12</b>
<b>3.1 Grundlagen der Fahrdynamik .....</b>	<b>12</b>
3.1.1 Freiheitsgrade der Fahrzeugbewegung .....	12
3.1.2 Fahr- und Radwiderstände .....	14
3.1.2.1 Fahrwiderstände.....	14
3.1.2.2 Reifenkräfte .....	16
3.1.2.3 Radschlupf.....	18
3.1.3 Bewegungsgleichungen.....	19
3.1.4 Die Belastungsmomente .....	21
3.1.5 Elektronische Fahrsicherheitssysteme.....	22
3.1.5.1 Das Antiblockiersystem – Komponenten, Funktion und Regelung .....	23
3.1.5.2 Antriebs-Schlupf-Regelung und Elektronisches Stabilitätsprogramm .....	24
3.1.5.3 Visionen für die Zukunft .....	25
3.1.6 Begriffe zum Fahrzeugverhalten .....	25
<b>3.2 Der aktuelle Stand der Technik auf dem Gebiet der Fahrzeugsteuerungen und Bussysteme .....</b>	<b>27</b>
3.2.1 Fahrzeugsteuerungen – elektronische Steuergeräte.....	27
3.2.1.1 ASICs im Kfz .....	28
3.2.2 Bussysteme im Kfz .....	31
3.2.2.1 Die Datenübertragung.....	31
3.2.2.2 Der CAN-Bus.....	33
3.2.2.3 Weitere Bussysteme .....	36

---

3.2.2.4	Zukunftsaussichten.....	40
<b>3.3</b>	<b>Der Laborversuchsstand .....</b>	<b>42</b>
3.3.1	Aufbau .....	42
3.3.1.1	Der Kfz-Antrieb .....	43
3.3.1.2	Die Belastungsmaschine.....	46
3.3.2	Theoretische Betrachtungen zum Verhalten des Laborversuchsstandes .....	47
3.3.2.1	Geradeausfahrt .....	48
3.3.2.2	Stationäre Kreisfahrt.....	50
3.3.2.3	Einfluss der Fahrsicherheitssysteme ABS und ASR .....	52
<b>4</b>	<b>STEUERUNGSTECHNISCHES SYSTEM .....</b>	<b>54</b>
<b>4.1</b>	<b>Strategie für den systematischen Entwurf .....</b>	<b>54</b>
4.1.1	Einordnung und Definition der Randbedingungen des auszulegenden Systems.....	56
4.1.2	Definition der Steuerungs- und Kommunikationsaufgaben.....	60
4.1.3	Auswahl der Komponenten.....	62
4.1.3.1	Die Steuerungen .....	62
4.1.3.2	Der Bus .....	64
4.1.4	Programmerstellung und Funktionstest.....	66
<b>4.2</b>	<b>Steuerungssystem des Laborversuchsstandes .....</b>	<b>68</b>
4.2.1	Antriebssteuerung – Variante 1.....	68
4.2.1.1	Das DSP-Board.....	69
4.2.1.2	Entwicklung der Schnittstelle Steuerung - Antriebe .....	72
4.2.1.3	Die A/D-Wandlerkarte .....	74
4.2.1.4	Das DSP-Programm .....	75
4.2.2	Die Antriebssteuerung – Variante 2 .....	80
4.2.3	Die Belastungssteuerung.....	82
4.2.3.1	Der Steueralgorithmus .....	82
4.2.3.2	Die Anbindung .....	85
4.2.3.3	Das LabVIEW-Programm.....	85
4.2.4	Messwerterfassung und –auswertung.....	87
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG UND FUNKTIONSNACHWEIS DES LABORVERSUCHSSTANDES.....</b>	<b>89</b>
<b>5.1</b>	<b>Untersuchung verschiedener Kenngrößen des Laborversuchsstandes .....</b>	<b>89</b>
5.1.1	Der Auslaufversuch.....	90
5.1.2	Der Hochlaufversuch .....	92

---

5.1.3	Aufnahme einer Sprungantwort .....	97
<b>5.2</b>	<b>Experimentelle Untersuchung der umgesetzten Steueralgorithmen .....</b>	<b>100</b>
5.2.1	Die Geradeausfahrt.....	100
5.2.2	Kurvenfahrt .....	102
5.2.3	Funktion der Fahrsicherheitssysteme ABS und ASR.....	104
5.2.4	Wertung der umgesetzten Steueralgorithmen .....	106
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICKE .....</b>	<b>108</b>
6.1	Der Laborversuchsstand .....	108
6.2	Schlussfolgerungen für den Steuerungsentwurf.....	109
6.3	Erstellen eines regelungstechnischen Modells des Laborversuchsstandes.	109
6.4	Weiterentwicklung der Komponenten des Laborversuchsstandes .....	111
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>113</b>
<b>8</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>121</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Bild 2-1 Grundstruktur eines Kfz - Antriebs .....	4
Bild 2-2 Antriebsstranganordnungen mit Elektromotor .....	6
Bild 2-3 Die Batterie als Energiespeicher.....	9
Bild 2-4 Prinzip einer Brennstoffzelle .....	11
Bild 3-1 Freiheitsgrade eines Pkws .....	13
Bild 3-2 Einteilung der Kräfte am Kfz.....	14
Bild 3-3 dynamischer Reifenhalmmesser.....	16
Bild 3-4 Radkräfte bei Schräglauf.....	17
Bild 3-5 Das Einspurmodell.....	20
Bild 3-6 Einteilung der elektronischen Systeme nach Anwendungsgebieten ....	27
Bild 3-7 Anforderungen an die Fahrzeugelektronik.....	29
Bild 3-8 ASIC - Komplexes System .....	30
Bild 3-9 Vernetzung im Kfz.....	31
Bild 3-10 SAE Klassifizierung .....	32
Bild 3-11 Datenrahmen des CAN-Protokolls .....	33
Bild 3-12 Rezessive und dominante Bits .....	34
Bild 3-13 Architektur eines TTP/C-Systems .....	37
Bild 3-14 Einsatzgebiete des MOST .....	39
Bild 3-15 Übertragungsrate und Kosten von Bussystemen.....	39
Bild 3-16 schematischer Aufbau des Laborversuchsstandes.....	42
Bild 3-17 Aufbau einer permanent erregten Axialflussmaschine .....	43
Bild 3-18 Masse-Leistungsverhältnis von Axialflussmaschinen.....	44
Bild 3-19 Kennlinien der Axialflussmaschine.....	45
Bild 3-20 Drehzahlsprungfunktion einer Axialflussmaschine.....	45
Bild 3-21 Belastungsmoment.....	49
Bild 3-22 Kurvenradien und Geschwindigkeitsvektoren.....	50
Bild 3-23 Radgeschwindigkeit bei einer Referenzgeschwindigkeit von 10 m/s .	51
Bild 3-24 Belastungsmoment in Abhängigkeit des Vorderradeinschlagwinkels .	52
Bild 3-25 Referenzmasse in Abhängigkeit des Vorderradeinschlagwinkels.....	53
Bild 4-1 Methodik zur Auslegung eines steuerungstechnischen Systems .....	55
Bild 4-2 Einflussfaktoren auf das auszulegende System.....	57

---

Bild 4-3 Beschreibungsformen für steuerungstechnische Aufgaben und deren Eignung .....	60
Bild 4-4 Kriterien zur Auswahl der Steuerung .....	62
Bild 4-5 Anforderungen an ein Bussystem.....	65
Bild 4-6 Phasen der Programmentwicklung .....	66
Bild 4-7 Bussystem und Komponenten der Antriebsmaschinen .....	69
Bild 4-8 Aufbau der Antriebssteuerung - Variante I.....	69
Bild 4-9 Evaluationsboard ADDU-21061-EZLITE .....	70
Bild 4-10 Blockschaltbild ADSP-21061 .....	71
Bild 4-11 Aufbau der Schnittstellenkarte .....	73
Bild 4-12 Aufbau der A/D-Wandlerkarte.....	75
Bild 4-13 Programmablaufplan des Hauptprogramms .....	76
Bild 4-14 Ablauf des DSP-Programms.....	77
Bild 4-15 Frontpanel mit Bedienelementen der Antriebssteuerung .....	81
Bild 4-16 Schematischer Aufbau des Blockdiagramms der Antriebssteuerung..	82
Bild 4-17 Bedienoberfläche der Belastungssteuerung.....	86
Bild 4-18 Multichoice USB.....	87
Bild 4-19 Versuchsaufbau.....	88
Bild 5-1 Auslaufversuch der Antriebsmaschine .....	91
Bild 5-2 Auslaufversuch der rechten Belastungsmaschine.....	92
Bild 5-3 Anlaufmoment der Antriebsmaschinen .....	93
Bild 5-4 Hochlaufversuche mit verschiedenen Momentvorgaben .....	94
Bild 5-5 Hochlauf der Belastungsmaschinen.....	95
Bild 5-6 Hochlauf im gekoppelten Zustand.....	96
Bild 5-7 Reibmomente der Antriebs- bzw. Belastungsmaschinen.....	97
Bild 5-8 Sprungantwort des rechten Antriebssystems.....	98
Bild 5-9 Sprungantwort der Belastungsmaschinen .....	99
Bild 5-10 Hochlauf des rechten Antriebs bei verschiedenen Reibzahlen .....	100
Bild 5-11 Antriebsschlupf .....	101
Bild 5-12 Geschwindigkeitsvergleich der Belastungswalzen.....	102
Bild 5-13 Hochlauf der Antriebe mit verschiedenen Momentvorgaben .....	103
Bild 5-14 Funktionsnachweis ABS.....	104
Bild 5-15 Funktionsnachweis ASR.....	105

Bild 6-1 Regelkreis Fahrer - Fahrzeug..... 110

## ***Symbolverzeichnis***

### **Formelzeichen**

<b>A</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>Fläche</b>
a	m/s <sup>2</sup>	Beschleunigung
a <sub>y</sub>	m/s <sup>2</sup>	Beschleunigung in Fahrzeugquerrichtung
<b>b</b>		<b>Faktor für das Bremsenspiel</b>
<b>cφ</b>	<b>Vs</b>	<b>Maschinenkonstante</b>
C <sub>w</sub>		Luftwiderstandskoeffizient
<b>F</b>	<b>N</b>	<b>Kraft</b>
f	Hz	Frequenz
f <sub>κ</sub>		Wankwinkelfaktor
f <sub>μ</sub>	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Kraftschlussbeanspruchungsfaktor
f <sub>v,l</sub>	s <sup>2</sup> /m	Neigungsfaktor
F <sub>Beschl</sub>	N	Beschleunigungswiderstand
F <sub>Br</sub>	N	Bremskraft
f <sub>G</sub>		Getriebefaktor
F <sub>K</sub>	N	Kurvenwiderstand
f <sub>k</sub>		Kurvenwiderstandsbeiwert
F <sub>L</sub>	N	Luftwiderstand
f <sub>L</sub>	kg/m	Luftwiderstandsfaktor
F <sub>Lag</sub>	N	Lagerreibungswiderstand
f <sub>m</sub>		Drehmassenzuschlagsfaktor
F <sub>N</sub>	N	Normalkraft, Hochkraft, Reifenaufschlagskraft
F <sub>R</sub>	N	Rollwiderstand
f <sub>R</sub>		Rollwiderstandsbeiwert



---

$F_{\text{Rad,ges}}$	N	Radwiderstand
$F_{\text{Sch}}$	N	Schwallwiderstand
$f_{\text{SP,1}}$		Schwerpunktfaktor 1
$f_{\text{SP,2}}$		Schwerpunktfaktor 2
$F_{\text{St}}$	N	Steigungswiderstand
$f_v$		Nickwinkelfaktor
$F_{\text{VS}}$	N	Vorspurwiderstand
$F_x$	N	Längskraft
$F_y$	N	Seitenführungskraft
$F_z$	N	Zugkraft, Antriebskraft
$F_{\text{zf}}$	N	Zentrifugalkraft
<b>g</b>	<b><math>\text{m}\cdot\text{s}^2</math></b>	<b>Erdbeschleunigung</b>
<b>J</b>	<b><math>\text{kg}\cdot\text{m}^2</math></b>	<b>Trägheitsmoment</b>
<b>k</b>		<b>Formelkoeffizient</b>
$K_M$		Verstärkungsfaktor
<b>l</b>	<b>m</b>	<b>Radstand</b>
$l_h$	m	hinterer Abstand zum Schwerpunkt
$l_v$	m	vorderer Abstand zum Schwerpunkt
<b>m</b>	<b>kg</b>	<b>Fahrzeugmasse</b>
$M$	Nm	Moment
$m_{\text{ref}}^*$		bezogene Referenzmasse
$M_A$	Nm	Antriebsmoment
$M_{\text{Anl}}$	Nm	Anlauf-, Losbrechmoment
$M_B$	Nm	Belastungsmoment
$M_{\text{Br}}$	Nm	Bremsmoment
$M_{\text{dyn}}$	Nm	Beschleunigungsmoment
$M_{\text{offset}}$	Nm	Momentenoffset

$m_{\text{ref}}$	kg	Referenzmasse
$M_W$	Nm	Widerstandsmoment
<b>n</b>	<b>1/min</b>	<b>Drehzahl</b>
$n_B$	1/min	Drehzahl der Belastungswalzen
$n_F$	1/min	Drehzahl der Antriebsräder
$n_{\text{ref}}$	1/min	Referenzdrehzahl
<b>p</b>		<b>Wankparameter</b>
<b>q</b>		<b>Steigung</b>
<b>R</b>	°	<b>Radius</b>
$r_B$	m	Durchmesser der Belastungswalzen
$r_{\text{dyn}}$	m	dynamischer Reifenhalmmesser
<b>s</b>	<b>m</b>	<b>Spurweite</b>
<b>t</b>	<b>s</b>	<b>Zeit</b>
$T_a$	s	Ausgleichszeit
$T_{\text{An}}$	s	Anregelzeit
$T_V$	s	Vorhaltzeit
$T_S$	s	Verzögerungszeit
$T_{\text{tot}}$	s	Totzeit
$T_u$	s	Verzugszeit
$T_z$	s	Zykluszeit
<b>v</b>	<b>m/s<sup>2</sup></b>	<b>Fahrzeuggeschwindigkeit</b>
$V_B$		Verstärkungsfaktor
$v_F$	m/s	tatsächliche Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_{\text{ref}}$	m/s	Referenzgeschwindigkeit
$v_{\text{res}}$	m/s	resultierende Anströmgeschwindigkeit

$v_U$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit des Rades
$v_W$	m/s	Windgeschwindigkeit
<b>w</b>		<b>Störung</b>
<b>x</b>		<b>Gaspedalstellung</b>
$x, y, z$		fahrzeugfestes Koordinatensystem
$x_0, y_0, z_0$		ortsfestes Koordinatensystem
$x_a$		Ausgangssignal
$x_e$		Eingangssignal
<b>y<sub>1</sub></b>		<b>Eingangssignal (Sollwert)</b>
$y_2$		Istwert
$y_{ist}$		Istwert durch Fahrer erfasst

### Griechische Buchstaben

$\alpha$	°	Schräglaufwinkel, Winkelbeschleunigung
$\ddot{\alpha}$	1/s <sup>2</sup>	Winkelbeschleunigung
$\beta$	°	Schwimmwinkel
$\delta_V$	Bogenmass	Vorderradeinschlagwinkel
$\lambda_A$		Antriebsschlupf
$\lambda_{Br}$		Bremsschlupf
$\mu_{Br}$		Bremskraftbeiwert
$\mu_H$		Haftreibung, Kraftschlussbeiwert, Kraftschlussbeanspruchung
$\mu_y$		seitliche Kraftschlussbeanspruchung
$\nu$	°	Nickwinkel
$\rho$	kg·m <sup>-3</sup>	Luftdichte
$\tau$	s	Zeitkonstante
$\psi$	°	Gierwinkel
$\dot{\psi}$	1/s	Gierwinkelgeschwindigkeit
$\omega$	1/s	Winkelgeschwindigkeit

## Allgemeine Indizes

A	Antrieb
B	Belastung
h	hinten
l	links
max	maximal
r	rechts
Rad	Rad
v	vorn
x	Längs-
y	Seiten-
z	Hoch-

## Abkürzungen

### A/D-Wandler

ABS

ABV

ACK

ADSP

ASIC

ASR

### Analog/Digital-Wandler

Antiblockiersystem

Automatischer Blockierverhinderer

Acknowledgement

Digitaler Signalprozessor von Analog Devices

Application Specific Integrated Circuits

Antriebs-Schlupf-Regelung

### BG

BG-BE

BG-FZ

### Bedienelemente

Bedienbaugruppe der Belastungseinheit

Bedienbaugruppe der Antriebseinheit

### C

CAN

CMOS

CNI

### Steuermodul des Wechselrichters

Control Area Network

Complementary Metal Oxide Semiconductor

Controller Network Interface

---

CODEC	Codierer/Decodierer
CPU	Central Processing Unit
CRC	Prüfbits zur Erkennung von Übertragungsfehlern

**D/A-Wandler****Digital/Analog-Wandler**

DAG	Adressgenerator
DMA	Direct Access Memory
DPL	Drive Programming Language
DPRAM	Dual-Port-RAM
DSK	Doppelschichtkondensator
DSP	Digitaler Signalprozessor

**ECE****Economic Commission for Europe**

EPROM	Eraseable Programmable Read-Only Memory
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm

**FSU****Fail Silent Unit**

FTU	Fault Tolerant Unit
-----	---------------------

**G****Tachogenerator**

GM	Gleichstrommaschine
GNM	Gleichstromnebenschlussmaschine
GR	Gleichrichter

**ID****Identifier**

IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGR	Inkrementaler Drehzahlgeber

**Kfz****Kraftfahrzeug****LED****Light Emitting Diode**

LIN	Local Interconnect Network
-----	----------------------------

---

<b>MEDL</b>	<b>Message Descriptor List</b>
MOST	Media Oriented Systems Transport
MP	momentaner Mittelpunkt
MPI	Multi Point Interface
<b>PC</b>	<b>Personalcomputer</b>
PEM	Proton-Exchange-Membran
Pkw	Personenkraftwagen
ppm/yr	Parts per Million per Year
PROM	Programmable Read Only Memory
<b>RAM</b>	<b>Random Access Memory</b>
RTR	Remote Transmission Request
<b>SAE</b>	<b>Society of Automotive Engineers</b>
SHARC	Super Harvard Architektur
SM	Synchronmotor
SOF	Start-of-Frame-Bit
SP	Schwerpunkt
SPORTx	Serieller Kommunikationsport x
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
<b>TDMA</b>	<b>Time Division Multiple Access</b>
TTCAN	Time Triggered CAN
TTP	Time Triggered Protocol
<b>UART</b>	<b>Universal Asynchron Receiver Transmitter</b>
USB	Universal Serial Bus
<b>VI</b>	<b>Virtuelles Instrument</b>
<b>WR</b>	<b>Wechselrichter</b>

## ***1 Einleitung***

Mit dem 29. Januar 1886 begann die Geschichte des Pkws, Carl Benz meldet beim Reichspatentamt unter der Nummer: 37435 das erste "Automobil" zum Patent an [69].

Die Entwicklung geht rasant weiter, durch die von Henry Ford 1913 eingeführten Produktionsmethoden wird der Weg zu einer breiten Käuferschicht und somit zu hohen Umsätzen der Produzenten frei. Ein Auto wurde in 1 Stunde und 33 Minuten gebaut, vorher dauerte es über 12 Stunden, der Preis fiel im Jahre 1924 dadurch auf 290 Dollar. Bis heute steigt der Motorisierungsgrad und somit der Pkw-Anteil. Ging es anfangs um eine schnelle und vor allem unabhängigere Art der Fortbewegung, wurde bald großer Wert auf höheren Komfort gelegt.

Mit der Energie- und Umweltproblematik sind neue Schwerpunkte der Fahrzeugentwicklung hinzugekommen, der Emissionsausstoß und der Kraftstoffverbrauch müssen minimiert werden. Dabei sollen möglichst keine Abstriche bei Komfort und Fahreigenschaften gemacht werden. Ein weiterer wichtiger Punkt ist dabei eine ständige Verbesserung der Fahrsicherheit und Zuverlässigkeit. Der Einsatz von Elektromotoren gewinnt bedingt durch ihr Betriebsverhalten und innovativer Entwicklungen auf den Gebieten der Elektronik und Energiespeichertechnik immer mehr an Bedeutung. Brennstoffzellen werden beispielsweise zur Energieversorgung auf militärischem Gebiet eingesetzt und werden zunehmend auch Einzug in die Kfz-Technik halten. Eine Verdrängung der Verbrennungsmotoren wird allerdings trotz hoffnungsvoller Neuansätze nicht so schnell erfolgen. Forschungsschwerpunkt sind auf Grund ihres Verschleißverhaltens, des Raumbedarfs und ihrer Umweltverträglichkeit, gegenüber Gleichstromkommutatormaschinen, die Drehstrommaschinen. Prädestiniert durch Preis, Gewicht und Wirkungsgrad ist eine elektronisch kommutierte Synchronmaschine.

Elektromotoren erlauben gegenüber Verbrennungsmotoren vollkommen neue Antriebsstrategien, da bei Verbrennungsmotoren auf Grund ihres technischen Konzeptes, nur ein relativ enger Drehzahlbereich und nur bei hohen Drehzahlen gute Wirkungsgrade erreichbar sind [48]. Hieraus resultiert der Einsatz von Ge-

triebe und Differential, was den Wirkungsgrad des Antriebsstranges wiederum verringert.

Beim Einsatz eines Mehrmotorenantriebs als Fahrzeugantrieb können diese mechanischen Verbindungen durch übergeordnete Steuerungen ersetzt werden, die über Bussysteme mit den zu steuernden Systemen verbunden sind. Hierbei müssen die verwendeten Komponenten Parameter einhalten, die auch in extremsten Situationen die Manövrierbarkeit und Fahrsicherheit des Fahrzeugs gewährleisten.

Um allgemeine Aussagen hierzu treffen zu können, müssen folgende Fragen beantwortet werden: Wie schnell müssen Steuerung und verwendete Bussysteme sein? Was für eine Steuerung und welches Bussystem werden eingesetzt? Welche Möglichkeiten eines Funktionsnachweises gibt es hierfür? Ist die Funktion der Fahrsicherheitssysteme gewährleistet? Welche Vorteile und Möglichkeiten bietet der Einsatz eines elektrischen Mehrmotorenantriebssystems? Diese Fragen sollen simulativ durch einen Laborversuchsstand beantwortet werden.

Ziel der Arbeit ist die systematische Auslegung der Steuerung eines komplexen Mehrmotorenantriebssystems. Grundlage bildet ein Laborversuchsstand, der als Plattform zur Untersuchung von verschiedenen Steueralgorithmen dienen soll. Bei dem zu bearbeitenden System handelt es sich um eine prozessabhängige Kopplung zweier Antriebssysteme. Koppelgröße, ist eine aus den Istdrehzahlen eines Antriebssystems - dem Fahrzeugantrieb - ermittelte Referenzdrehzahl. Auf deren Grundlage und weiterer Parameter wird durch ein zweites Antriebssystem - die Belastungsmaschinen - ein Gegenmoment vorgegeben.

Mit diesem Laborversuchsstand wird die Möglichkeit geschaffen, das Fahrverhalten und speziell die Funktion und die Anforderungen an Fahrsicherheitssysteme für Kfz bei Einsatz eines elektrischen Mehrmotorenantriebs simulativ zu untersuchen. Zum Einsatz kommen Axialflussmaschinen die, auf Grund ihrer Bauform und ihrer Betriebseigenschaften, insbesondere für einen Einsatz als Kfz-Antrieb prädestiniert sind. Auch das Erproben verschiedener Komponenten eines Fahrzeugantriebs und seines steuerungstechnischen Systems wird durch diesen Versuchsstand ermöglicht. Basis ist ein vorhandener Steueralgorithmus



für die Belastungsmaschinen. Dieser wird in den Laborversuchsstand implementiert und es erfolgt eine qualitative Wertung der Umsetzung.

Die folgende Arbeit beginnt mit Vorbetrachtungen zu elektrischen Fahrzeugantrieben in Kapitel 2. Der Schwerpunkt liegt hier bei den Hybridantrieben. Es wird eine kleine Übersicht über verschiedene Ausführungen gegeben, auch eine Betrachtung möglicher Energiespeicher erfolgt an dieser Stelle.

Es folgen theoretische Grundlagen zur Fahrdynamik und zum Stand der Technik in Kapitel 3. Hier werden die einzelnen Fahr- und Radwiderstände und die Bewegungsgleichungen kurz aufgezeigt. Ein kurzer Einblick in die Funktion von Fahrsicherheitssystemen ist ebenfalls enthalten. Weiterhin wird der vorhandene Laborversuchsstand vorgestellt. Theoretische Betrachtungen zum Verhalten des Versuchsstandes bilden den Abschluss.

Kapitel 4 stellt eine mögliche Strategie zur Auslegung des steuerungstechnischen Systems eines Mehrmotorenantriebs vor. Diese ermöglicht die strukturierte Entwicklung eines beliebigen steuerungstechnischen Systems und wird am Beispiel eines Laborversuchsstandes mit fahrzeugspezifischen Eigenschaften eingeführt. Schwerpunkt ist hier der modulare Aufbau des Systems.

Um eine Wertung der verwendeten Steueralgorithmen zu ermöglichen werden in Kapitel 5 die dynamischen Eigenschaften des Laborversuchsstandes, die Steueralgorithmen der Belastungsmaschinen und die Funktion der realisierten Fahrsicherheitssysteme experimentell untersucht. Abschließend erfolgt eine Wertung der umgesetzten Steueralgorithmen für den Fahrzeugantrieb und die Belastungsmaschinen.

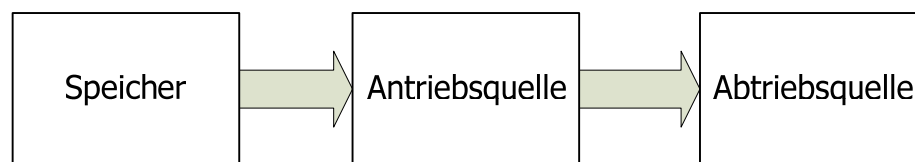
Eine Zusammenfassung in Kapitel 6 bildet den Abschluss der Arbeit. Es werden verschiedene Möglichkeiten der Weiterentwicklung des Laborversuchsstandes aufgezeigt.

## ***2 Vorbemerkungen zu elektrischen Fahrzeugantrieben***

Die Forderungen nach der Reduzierung des Energie- bzw. Treibstoffverbrauchs machen ein Umdenken im Bereich der Kraftfahrzeugentwicklung notwendig. Entwicklungen im Bereich der Energiespeichertechnik (Brennstoffzellen) und der Leistungselektronik/Elektronik eröffnen neue Perspektiven für den Einsatz von Elektromotoren im Fahrzeugbereich.

Im Vordergrund steht der Mobilitätsgedanke, er ist der primäre Zweck des Kfz. Anfangs ging es um schnellere Transportmöglichkeiten, heute spielen zusätzliche Entscheidungsgründe, wie Komfort, Design, Betriebskosten und Individualität eine Rolle.

Die Grundstruktur (Bild 2-1) eines Fahrzeugantriebssystems bleibt, unabhängig von der Antriebsquelle, immer gleich. Ein Speicher stellt die Energie für eine Antriebsquelle bereit, diese gibt die Energie wiederum an die Abtriebsquelle, in der Regel die Räder, ab [56].



**Bild 2-1 Grundstruktur eines Kfz - Antriebs**

Stand der Technik, in Bezug auf die Antriebsquelle, ist der Verbrennungsmotor, der dazugehörige Energiespeicher ist Benzin oder Diesel. Ein idealer Antrieb ist dieser nicht, das ist bedingt durch einen relativ geringen Drehzahlbereich und einen akzeptablen Wirkungsgrad nur bei hohen Drehmomenten. Im Stop-and-Go-Verkehr sinkt dieser teilweise unter 10 Prozent. Unterhalb der Leerlaufdrehzahl läuft der Verbrennungsmotor unrund und kann dort nicht betrieben werden. Auch der Wartungsaufwand ist nicht unerheblich, aber vor allem der Emissionsausstoß kann nicht auf Null verringert werden. Betrachtet man an dieser Stelle den elektrischen Antrieb, so schneidet dieser, auf Grund der Drehmomentverfügbarkeit, über den gesamten Drehzahlbereich, dem geringen Wartungsaufwand, einem hohen Wirkungsgrad und durch seine Emissionsfreiheit, erheblich besser ab [23, 48].

In dem vorliegenden Fall soll eine permanent erregte Axialflussmaschine zum Einsatz kommen. Der Energiespeicher wird hier nicht betrachtet, eine Möglichkeit ist die Brennstoffzelle oder die Verwendung eines Hybridantriebes, in den folgenden Kapiteln mehr dazu.

## ***2.1 Der Antriebsstrang***

Auch beim Einsatz von Elektromotoren wird ein hohes Maß an Sicherheit, Komfort, Fahrleistung und Wirtschaftlichkeit verlangt, Maßstäbe werden durch die aktuellen Kfz vorgegeben. Bei der Verwendung konventioneller Antriebsstränge lassen sich diese Forderungen nicht alle gleichermaßen gut erfüllen. Aus diesem Grund muss hier ein vollständiges Umdenken erfolgen. Hybridantriebe bieten hierfür viel versprechende Ansatzpunkte [16].

Eine andere Möglichkeit ist der Einsatz einer Brennstoffzelle und somit die Chance ein Kfz ohne Schadstoff Emission – Zero Emission – mit reinem Elektroantrieb zu entwickeln.

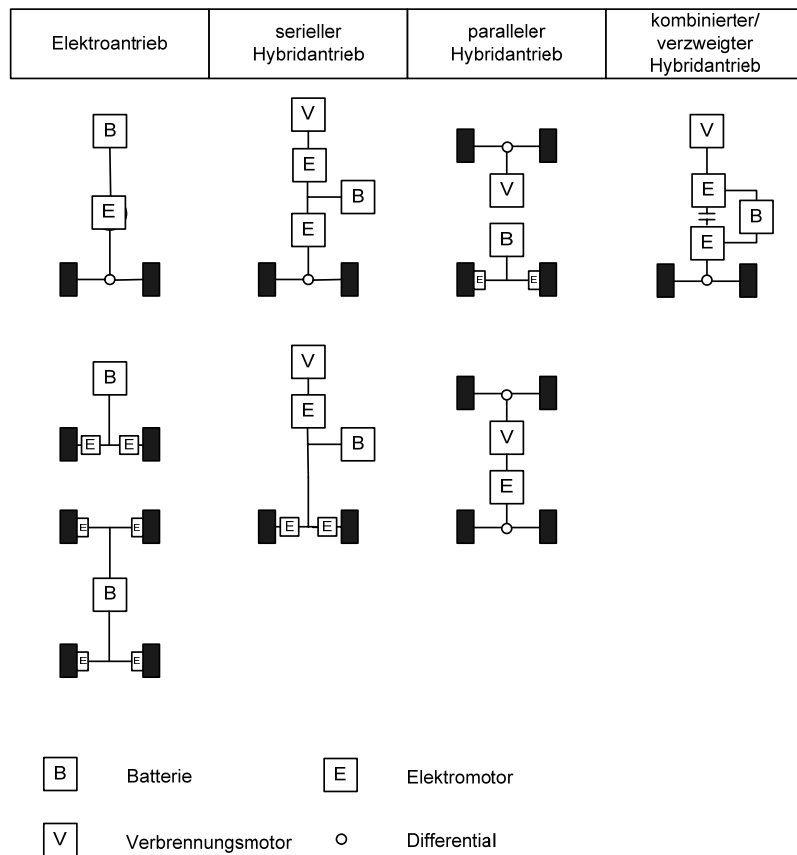
### *Hybridantriebsstränge*

Hybridantriebe sind durch das Vorhandensein verschiedener Energiespeicher bzw. -wandler in einem Antriebsstrang gekennzeichnet. Dadurch ergibt sich eine Vielzahl von Möglichkeiten die unter dem Begriff Hybridantrieb zusammengefasst werden können. In dieser Arbeit soll nur die Kombination von elektrischer Maschine und Verbrennungsmotor betrachtet werden, Bild 2-2 zeigt eine mögliche Einteilung für Hybridantriebe [16, 29].

In der obersten Ebene wird zwischen parallelen, seriellen Hybriden und Mischhybriden unterschieden. Nachfolgend werden verschiedene Ausführungsformen aufgezeigt.

Der *parallel Hybrid* ist durch die Möglichkeit, das Fahrzeug entweder elektrisch, verbrennungsmotorisch oder kombiniert anzutreiben, gekennzeichnet. In diesem Fall werden die Energiewandler mechanisch überlagert. Die elektrische Maschine kann auch generatorisch betrieben werden und während der Fahrt ihren Energiespeicher laden. Der konventionelle Antriebsstrang des Fahrzeugs wird hierbei meist durch den elektrischen Antriebsstrang ergänzt. Vorteile sind die Nutzung der Bremsenergie rückgewinnung und die Eignung zur lokalen emissionsfreien Fahrt. Je nach Leistung kann der Einsatz des Kfz elektrisch oder

verbrennungsmotorisch erfolgen. Ein Nachteil ist ein höheres Fahrzeuggewicht und der daraus resultierende größere Energiebedarf.



**Bild 2-2 Antriebsstranganordnungen mit Elektromotor**

Der *serielle Hybrid* ist durch ein rein elektrisch angetriebenes Fahrzeug gekennzeichnet. Dabei treibt der Verbrennungsmotor einen Generator an und lädt den Energiespeicher oder stellt direkt Energie für den elektrischen Antrieb bereit. Vorteil hierbei ist die vollständige Entkopplung von Verbrennungsmaschine und Fahrzeugantrieb. Die Energieerzeugung kann bei einer minimalen Emission und einem optimalen Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors erfolgen. Auf den Einsatz eines Energiespeichers kann an dieser Stelle verzichtet werden, man spricht hierbei von einem stufenlosen elektrischen Getriebe. Nachteilig ist die doppelte Energiewandlung und die daraus resultierenden Umwandlungsverluste.

*Mischhybride* sind durch eine Kombination aus seriellen und parallelen Hybridantrieben gekennzeichnet. Die Energie wird vom Verbrennungsmotor anteilmäßig auf die Antriebsräder und den Energiespeicher übertragen. Ist ein Ener-

giespeicher vorhanden kann auch elektrisch gebremst werden. Im Normalfall teilt sich der Energiefluss auf den elektrischen und den verbrennungsmotorischen Antriebsstrang auf, dadurch ergibt sich ein besserer Wirkungsgrad. Weiterhin ist durch diese Aufteilung die Realisierung einer stufenlosen Übersetzungsverstellung möglich, auf ein Getriebe kann somit verzichtet werden. Eine weitere Unterteilung ist möglich, wird aber hier nicht näher betrachtet [16, 18, 29, 53, 59].

Hybridfahrzeuge werden von allen großen Automobilherstellern entwickelt und teilweise schon als Serienfahrzeuge angeboten (z. B. Toyota Prius, Honda Civic IMA). Somit ist ein erster Schritt in Richtung des elektrischen Fahrzeugantriebs realisiert. Meist erfolgt die Umsetzung unter Verwendung konventioneller Serienplattformen, durch eine Erweiterung des Antriebsstrangs oder durch einen teilweisen Austausch der Komponenten des Antriebsstrangs [9, 11, 22, 62].

## ***2.2 Elektromotoren***

Elektromotoren werden in den verschiedensten Bereichen eingesetzt, durch die Entwicklungen im Bereich der Leistungselektronik kommen vor allem auf dem Gebiet der drehzahlvariablen Antriebe immer neue Einsatzfelder hinzu. Ein Punkt ist der Fahrzeugantrieb [56]. Zur Wahl stehen z. B. Gleichstrommaschinen, Asynchronmaschinen und elektrisch oder permanentmagnetisch erregte Synchronmaschinen. Bei der Auswahl sind niedrige Kosten, hohe Leistungsdichten, ein hoher Wirkungsgrad, Zuverlässigkeit und Robustheit von Bedeutung.

Zu allen elektrischen Motoren gehört ein elektrischer Steller, der die eingesetzte Spannungsquelle mit dem Motor verbindet und die jeweils geeignete Spannung zur Verfügung stellt. Hierfür werden leistungselektronische Bauelemente verwendet. Trotz einer sehr dynamischen Entwicklung bei Verkleinerung, Kostenreduktion und Optimierung des Wirkungsgrades stellt dieser Bereich einen sehr kostenintensiven Faktor dar. Vor allem bestimmt durch die Stromtragfähigkeit und die Spannungsfestigkeit eingesetzter IGBTs. Dies ist auch bei der Auswahl geeigneter Motoren zu berücksichtigen.

Insbesondere die Möglichkeit der Integration eines Elektromotors direkt in die Radnabe und somit die Einsparung mechanischer Übertragungsglieder erlaubt, gegenüber herkömmlichen Kfz, ein vollständig neues Antriebskonzept [50].

Hierfür bietet sich der Einsatz permanentmagnetisch erregter Synchronmotoren an. Diese Motoren zeichnen sich aus durch:

- einen robusten Aufbau
- ein hohes Drehmoment
- günstige Bauformen
- gute dynamische Eigenschaften
- einfache Herstellbarkeit
- geringe Produktionskosten

Speziell die Entwicklung der Permanentmagnete in den letzten zwei Jahrzehnten hat dazu beigetragen.

Eine modulare Realisierung der Antriebseinheit, bestehend aus Stromrichter mit integrierter Intelligenz und Kommunikationseinheit in Verbindung mit einem Radnabenmotor, erlaubt einen einfachen Fahrzeugentwurf.

Eine Weiterentwicklung ist die Integration des Stromrichters einschließlich seiner Steuerelektronik in einen Radnabenmotor. Hierdurch wird der Platzbedarf der Antriebsbaugruppe weiter verringert, ein höherer Wirkungsgrad erzielt und eine bessere elektromagnetische Verträglichkeit erreicht. Nachteilig ist ein höheres Gewicht der ungedämpften Achse [10, 24, 25, 48].

### ***2.3 Energiespeicher und Energiewandler***

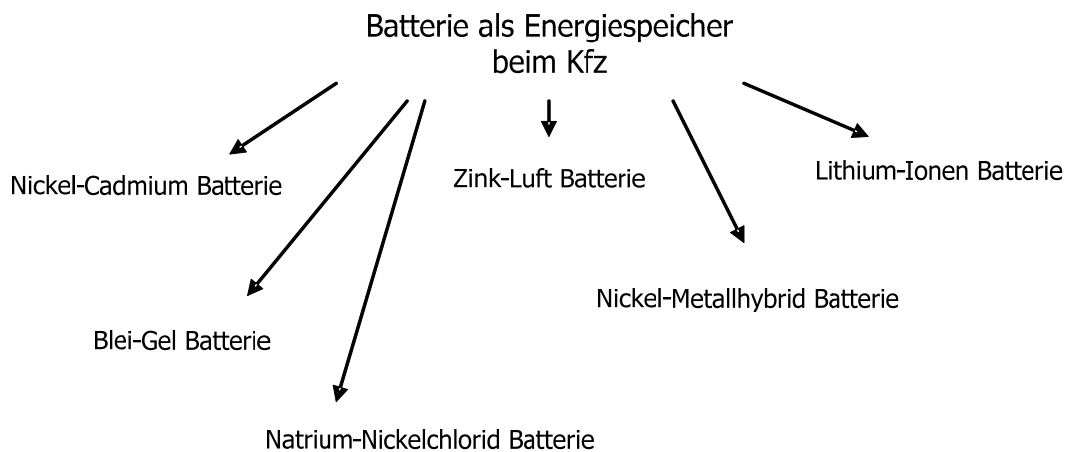
Die Energiebereitstellung ist kein Thema dieser Arbeit. Da eine Realisierung eines Kfz ohne Energiespeicher kaum möglich ist, wird sie an dieser Stelle kurz betrachtet.

Beim Einsatz von Elektromotoren, vor allem beim rein elektrischen Antrieb, ist die Energiespeicherung ein essentielles Problem. Mögliche Energiespeicher sind chemischer, hydraulischer, mechanischer und elektrischer Art, den Hauptteil bilden erstere [56].

#### ***Die Batterie***

Die bekannteste Art, elektrische Energie zu speichern, ist der Einsatz einer Batterie. Die Speicherung erfolgt durch eine chemische Reaktion. Nachteile sind Größe, Gewicht und Preis, die noch optimiert werden müssen, auch an der Leistungsdichte muss noch viel verbessert werden. Bild 2-3 stellt einen kleinen Überblick möglicher Batterien dar.

Eine wichtige Rolle bei der Auswahl der Batterie spielt neben Kosten (250 €/kWh) und Leistungsdichte die Umweltverträglichkeit. Teilweise bestehen Batterien aus stark aggressiven und hoch giftigen Stoffen. Auch muss die Leistungsfähigkeit in einem breiten Temperaturspektrum gewährleistet werden. Weitere Punkte sind Lebensdauer, auftretende Ladungsverluste, die Ladefähigkeit der Batterien und die hohen Leistungen während des Beschleunigens [41, 46, 56].



**Bild 2-3 Die Batterie als Energiespeicher**

### *Kondensatoren*

Die Entwicklung immer leistungsfähigerer Kondensatoren erlaubt deren Einsatz auch als Energiespeicher in der Fahrzeugtechnik, insbesondere bei Hybridantrieben.

Dabei kommen Doppelschichtkondensatoren (DSK), so genannte Ultracaps, zum Einsatz. Die Energiedichten sind wesentlich höher als die herkömmlicher Kondensatoren (5 - 10 Wh/kg), allerdings auch deutlich kleiner als die einer Batterie (100 Wh/kg). Es werden Kapazitäten von bis zu 5000 F erreicht. Auf Grund der benötigten Spannungen und Kapazitäten erfolgt hier der Einsatz von Modulen, einer Kombination aus parallel- und in reihengeschalteter Kondensatoren.

Optimal ist der Einsatz von DSK parallel zu Brennstoffzellen, diese stellen die Energiekomponente bereit. Die DSK können hier als Zwischenspeicher dienen, dabei Bremsenergie aufnehmen und Belastungsspitzen kompensieren.

Bei der Verwendung von sicherheitsrelevanten Anwendungen finden DSK Verwendung als Notschalt- oder Backupsystem. Eine weitere Verwendung ist der Einsatz in Kombination zu Hybridantrieben, hier können Performancedefizite kompensiert werden und der erhöhte Bedarf gedeckt werden.

Bei batteriebetriebenen Fahrzeugen ist der Einsatz nicht sinnvoll, da die Batteriegröße die mögliche Reichweite bestimmt. Somit sind die Leistungsreserven meist ausreichend [27, 28, 29, 46].

### *Brennstoffzellen*

Immer weiter in den Vordergrund als Energiequelle rückt die Brennstoffzelle. Im Gegensatz zu den behandelten Energiespeichern, Kondensator und Batterie, handelt es sich hier um einen Energiewandler. Durch Reversion der Elektrolyse werden aus Sauerstoff und Wasserstoff elektrischer Strom und Wärme erzeugt. Bereits in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts entwickelt, wurde die Brennstoffzelle in den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts zur Energieerzeugung in der Raumfahrt wiederentdeckt. Für den Einsatz sprechen ein hoher Wirkungsgrad und die Emissionsfreiheit. Auch der mechanische Aufbau ist recht einfach. In einer Brennstoffzelle erfolgt eine kontrollierte „kalte“ Verbrennung von Sauerstoff und Wasserstoff zu Wasserdampf, die Erzeugung der elektrischen Energie findet dabei ohne Schadstoffemission statt. Ein mögliches Prinzip ist dabei die Proton-Exchange-Membran (PEM) - Brennstoffzelle, sie wird häufig als eine der besten Lösungen auf dem Gebiet bezeichnet.

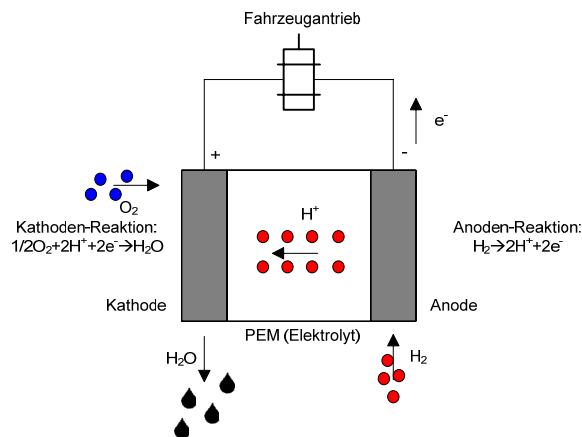
Die Gase Wasserstoff und Sauerstoff werden durch die PEM, eine Spezialfolie, getrennt. Diese stellt den Elektrolyt dar. Durch ein Katalysatormaterial wird der Wasserstoff ionisiert, positive Wasserstoff-Ionen wandern durch die Membran und reagieren mit dem Luftsauerstoff. Dabei bildet sich auf der Wasserstoffseite der Membran ein Elektronenüberschuss, dieser erzeugt gegenüber der Sauerstoffseite ein Potentialgefälle, somit kann ein elektrischer Strom zum Ladungsausgleich fließen, siehe Bild 2-4.

Wasserstoff und Luft werden dem Katalysatormaterial ständig zugeführt. Eine Reihenschaltung mehrerer Zellen stellt die benötigte Spannung bereit.

Seit Mitte der neunziger Jahre laufen vermehrt Versuche zur Nutzung der Brennstoffzelle im mobilen Bereich. Fast alle namhaften Automobilhersteller haben Testfahrzeuge entwickelt und setzen deren Weiterentwicklung fort.



Nachteilig sind die bisher hohen Kosten, das Gewicht und das Bauvolumen. Die Kosten liegen selbst bei industrieller Fertigung noch bei 500 - 2000 €/kW für den elektrischen Antriebsstrang, Ziel ist kleiner 100 €/kW.



**Bild 2-4 Prinzip einer Brennstoffzelle**

Ein weiteres Problem ist die aufwendige und energieintensive Herstellung des Treibstoffes Wasserstoff. Die Einschätzung des Zeitraums bis zu einer Fertigung von Kfz mit Brennstoffzellenantrieben in großen Stückzahlen wird von den einzelnen Unternehmen mit 10 bis 15 Jahre angegeben [17, 21, 29, 39, 49, 56, 60].

### ***3 Theoretische Grundlagen zu Fahrzeugeigenschaften***

In diesem Kapitel soll, soweit zum Verständnis erforderlich, auf die Grundlagen der Fahrdynamik, wichtige Aspekte von Fahrsicherheitssystemen, den Stand der Technik auf dem Gebiet steuerungstechnischer Systeme in Kraftfahrzeugen und den Aufbau des Laborversuchsstandes, eingegangen werden.

#### ***3.1 Grundlagen der Fahrdynamik***

Das Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen ergibt sich aus einer Aufsummierung unterschiedlichster Faktoren, die durch den Kraftfahrer, das Fahrzeug und die Umwelt gekennzeichnet werden [33, 34, 50]. Um später eine möglichst reale Umsetzung aller Fahreigenschaften am Laborversuchsstand zu erreichen, ist ein gutes Verständnis aller auf das Fahrzeug wirkenden Größen notwendig. Die Umsetzung erfolgt durch entsprechende Gleichungen, die in einer vorhergehenden Arbeit zusammengestellt wurden [50]. Eine kurze Erläuterung ist im folgenden Abschnitt zum besseren Verständnis der Arbeit zusammengestellt.

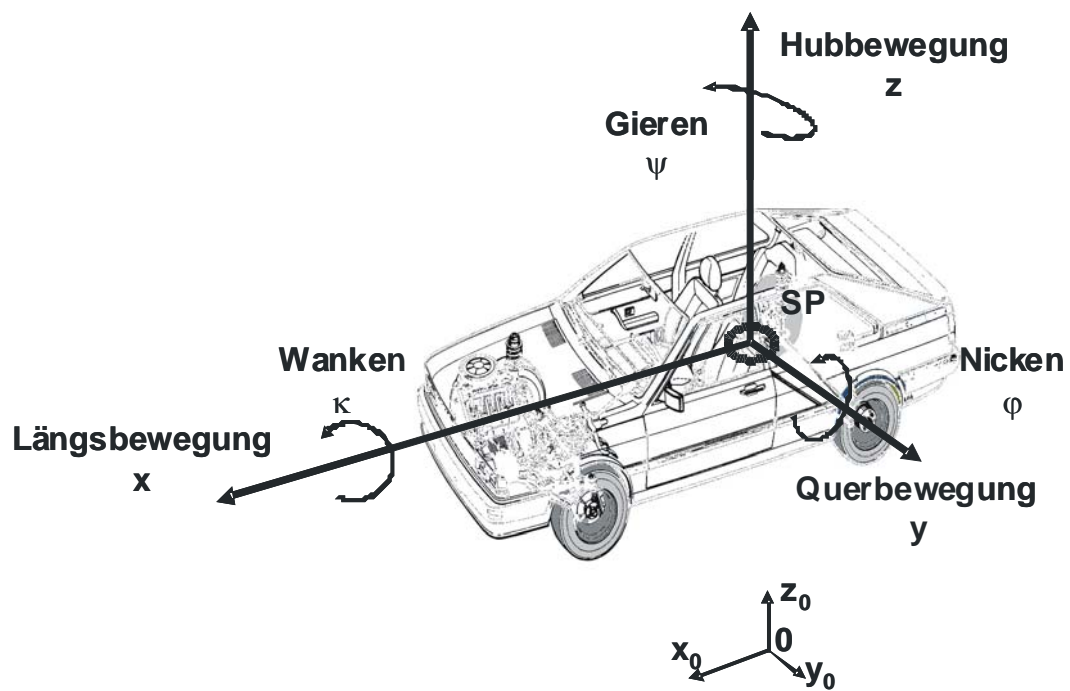
Es folgen grundlegende Betrachtungen zu den Freiheitsgraden der Fahrzeugbewegung und den am Fahrzeug wirkenden Kräften.

Zur Verbesserung des Fahrverhaltens werden in immer größerem Umfang so genannte Fahrsicherheitssysteme eingesetzt. Allgemein bekannt sind das Antiblockiersystem (ABS) und die Antriebs-Schlupf-Regelung (ASR), die hier kurz erläutert werden.

##### ***3.1.1 Freiheitsgrade der Fahrzeugbewegung***

Die Bewegung eines Kfz ist durch mögliche Freiheitsgrade bestimmt. Das Fahrzeug besitzt drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade, das entspricht denen eines frei beweglichen Körpers gegenüber einem festen Bezugssystem  $(x_0, y_0, z_0)$ , Bild 3-1 [4, 33, 34, 35].

Im einfachsten Fall der Geradeausfahrt wird eine Längsbewegung des Fahrzeugs in Richtung  $x_0$  ausgeführt. Die senkrechte Bewegung, die Querbewegung in Richtung  $y_0$  und die Winkelbewegung um die  $z$ -Achse des Fahrzeugs - das so genannte Gieren - führen zu Divergenzen bezüglich der gewünschten Fahrtrichtung. Diese Bewegungen beeinflussen in starkem Maße das Fahrverhalten des Kfz.



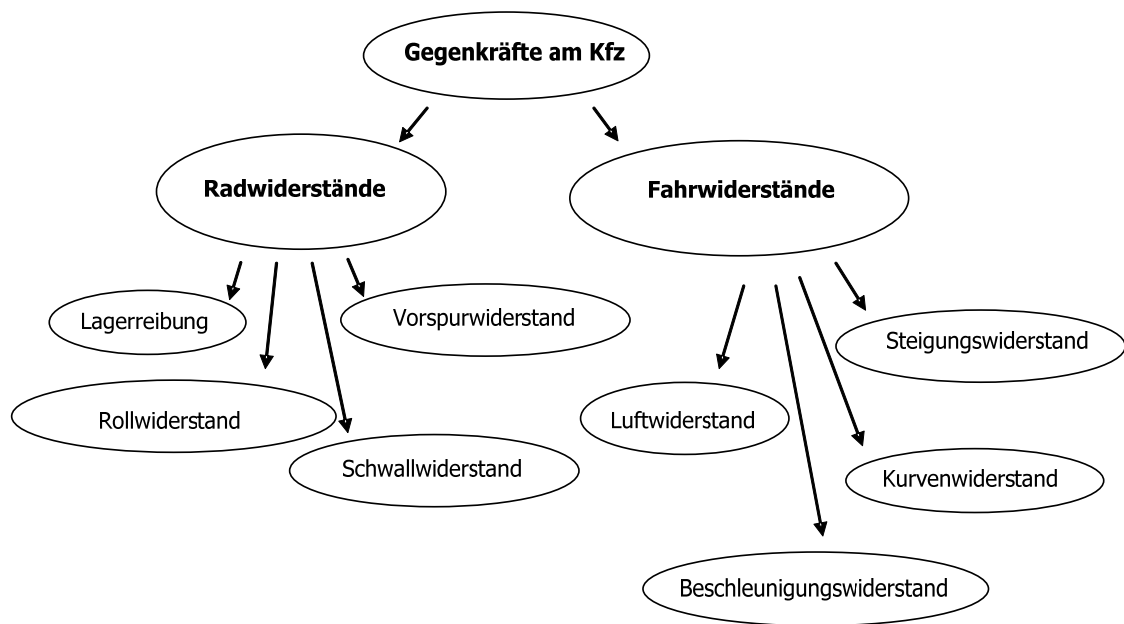
**Bild 3-1** Freiheitsgrade eines Pkws

Bei Fahrt auf einer unebenen Straße führen Schwingungen des Fahrzeugs zu Hubbewegungen in Richtung  $z_0$  und zu Winkelbewegungen um die Quer- und Längsachse - Nicken und Wanken [4, 33].

### 3.1.2 Fahr- und Radwiderstände

Durch Wind und die Eigenschaften der Fahrbahn werden die Bewegungsabläufe des Fahrzeugs beeinflusst.

Diese entgegen der Fahrtrichtung und -geschwindigkeit wirkenden Gegenkräfte müssen durch den Antriebsmotor überwunden werden, siehe Bild 3-2.



**Bild 3-2** Einteilung der Kräfte am Kfz

Hierbei treten verschiedene Kräfte mit unterschiedlichen Wirkungen auf das Fahrverhalten auf. Kräfte die direkt am Rad angreifen, die so genannten Radwiderstände und Kräfte die auf das gesamte Fahrzeug wirken, diese werden als Fahrwiderstände bezeichnet. Im Weiteren werden diese kurz aufgezeigt und betragsmäßig bestimmt.

#### 3.1.2.1 *Fahrwiderstände*

Der *Luftwiderstand*  $F_L$  entsteht durch das Umströmen des Fahrzeugs entgegen seiner Fahrtrichtung. Dieser ist abhängig von Form, Oberflächenwiderstand und Durchströmwiderstand des Fahrzeugs. Außerdem ergeben sich durch den Fahrtwind an verschiedenen Fahrzeugachsen Auf- oder Abtrieb. Dadurch kann das Fahrzeug aus der Spur gedrückt werden, daraus folgend kann dieser Teil des Luftwiderstandes der im nachfolgenden Text beschriebenen Seitenführungskraft zugeordnet werden.

*Der Steigungswiderstand*  $F_{St}$ , auch als Hangabtriebskraft bezeichnet, muss beim Befahren von Straßensteigungen überwunden werden. Er ergibt sich aus Gewichtskraft und Neigungswinkel der Fahrbahn.

*Der Beschleunigungswiderstand*  $F_{Beschl}$  muss vom Fahrzeug bei der Beschleunigung bzw. Verzögerung überwunden werden. Ein wichtiger Parameter ist das Massenträgheitsmoment, es umfasst die Summe aller rotierenden Massen. Weiterhin bezieht er die translatorische Beschleunigung der Fahrzeugmasse mit ein.

*Der Kurvenwiderstand*  $F_K$  wird durch die weiter unten beschriebenen Seitenführungskräfte während einer Kurvenfahrt verursacht [33, 35].

Der Betrag des *Radwiderstands*  $F_{Rad,ges}$  ergibt sich aus der Summe verschiedener direkt am Rad wirkender Kräfte, dem Rollwiderstand  $F_R$ , dem Schwallwiderstand  $F_{Sch}$ , den Verlusten des Lagerreibungswiderstand  $F_{Lag}$  und dem Vorspurwiderstand  $F_{VS}$ .

$$F_{Rad,ges} = F_R + F_{Sch} + F_{Lag} + F_{VS} \quad (3-1)$$

Bei Geradeausfahrt ist der Radwiderstand, bei wertemäßiger Betrachtung, praktisch gleich dem Rollwiderstand. Bedingung ist hierbei eine trockene Fahrbahn. Das Fahren bei nasser Fahrbahn spiegelt sich in der so genannten Kraftschlussbeanspruchung und dem Schwallwiderstand wider.

Um die oben beschriebenen Kräfte in der Steuerung der Belastungseinrichtung des Laborversuchsstandes zu berücksichtigen, ist die Summe aller Kräfte zur *Zugkraft*  $F_Z$  zusammengefasst worden [33, 50].

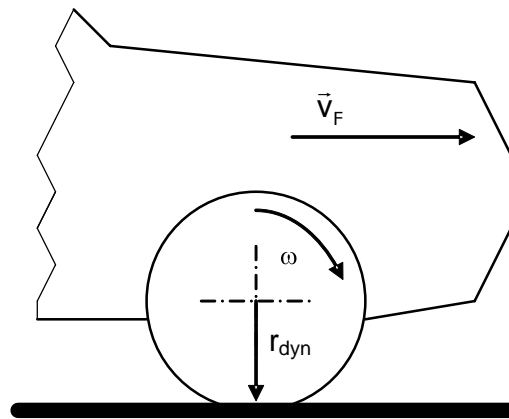
$$F_Z = F_{Rad,ges} + F_L + F_{St} + F_{Beschl} + F_K \quad (3-2)$$

Das vom Antriebsmotor, bei einem Direktantrieb, aufzubringende Gesamtmoment ergibt sich in Abhängigkeit vom dynamischen Reifenhalbmesser  $r_{dyn}$ , siehe Bild 3-3.

$$F_Z = \frac{M_A}{r_{dyn}} \quad (3-3)$$

Die Zugkraft  $F_Z$  kann durch die Summe aller Einzelwiderstände ersetzt werden, dies ist eine der wichtigsten Gleichungen der Fahrzeugtechnik.

$$F_Z = \left( f_R + q + f_m \frac{a}{g} + f_K \right) F_G + c_W A \frac{\rho}{2} v_{res}^2 \quad (3-4)$$



**Bild 3-3 dynamischer Reifenhälfte**

### 3.1.2.2 Reifenkräfte

Die eigentliche Kraftübertragung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn erfolgt über die „handtellergröße“ Aufstandsfläche der vier Reifen [42].

Sie haben eine große Bedeutung für das Schwingungsverhalten und die Laufruhe des Fahrzeugs [34, 50]. Im Folgenden werden die dabei auftretenden Reifenkräfte kurz erläutert.

Die *Hochkraft*  $F_N$ , oder auch *Reifenaufstandskraft* bzw. *Normalkraft*, wirkt senkrecht zur Fahrbahn. Durch sie wird die Gewichtskraft des Fahrzeugs auf die Straße übertragen, es besteht eine Abhängigkeit von Neigungs- und Steigungswinkel der Fahrbahn. Die Wirkung richtet sich senkrecht zur Fahrbahn und ist je nach Lage des Schwerpunktes und des Fahrzeuggewichtes (Beladung) unterschiedlich groß. Durch die Hochkraft werden die Vorderräder zusätzlich mit einer dynamischen Last beaufschlagt.

Eine weitere Reifenkraft ist die *Längskraft*  $F_x$ , durch sie werden Antriebs- und Bremskräfte auf die Fahrbahn übertragen. Ihr maximaler Wert  $F_{x,max}$  ist durch die Kraftschlussbeanspruchung  $\mu_H$  der Aufstandsfläche des Fahrzeugs begrenzt. Ein zu großes Brems- oder Antriebsmoment führt zu einem Blockieren oder Durchdrehen des Rades.

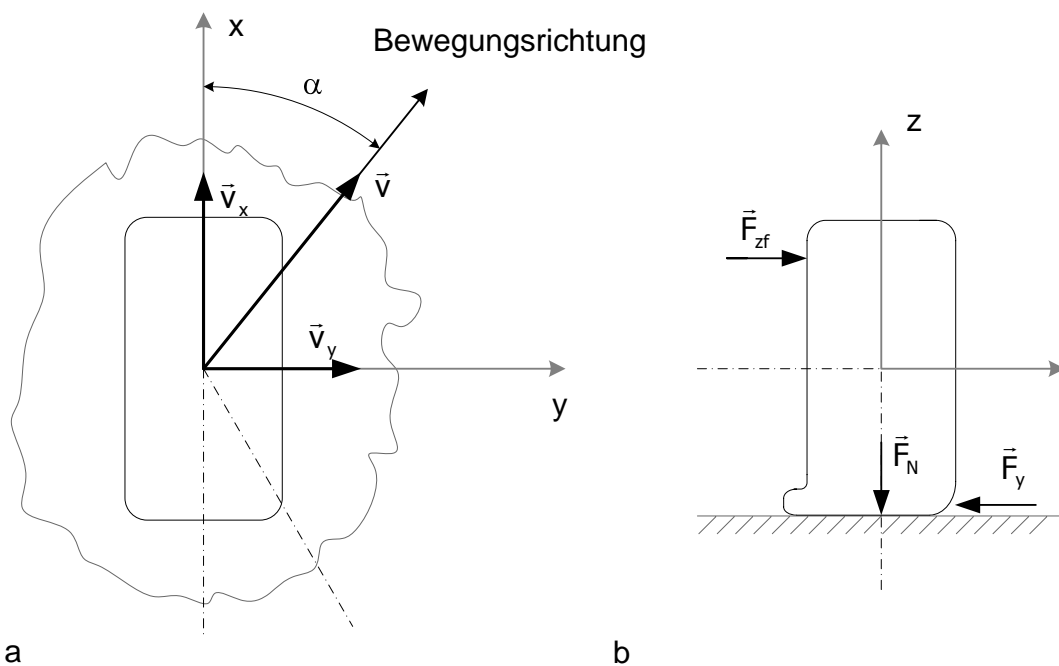
$$F_{x,max} = \mu_H \cdot F_N \quad (3-5)$$

Dabei tritt zwischen Reifen und Fahrbahn ein Gleiten auf, die hierbei relevante Gleitreibungszahl ist kleiner als die Haftreibungszahl.

Zu guter letzt gibt es die *Seitenführungskräfte*  $F_y$ , sie bringen die bei Richtungsänderung notwendigen seitlichen Kräfte auf, die der Zentrifugalkraft  $F_{zf}$  entgegenwirken, siehe Bild 3-4 b. Es besteht eine direkte Abhängigkeit zur Normalkraft  $F_N$ , somit lässt sich eine seitliche Kraftschlussbeanspruchung oder auch seitliche Reibungszahl  $\mu_y$  definieren. Die Seitenführungskraft  $F_y$  ergibt sich durch die Verdrehung der Reifen im Bereich der Aufstandsfläche, bei Kurvenfahrten. Die Seitenführungskraft ist mitbestimmend für die Fahrstabilität, siehe Bild 3-4 b [35].

$$F_y = \mu_y \cdot F_N \quad (3-6)$$

Während der Kurvenfahrt läuft das Rad unter einem Schräglaufwinkel  $\alpha$  (Bild 3-4 a) weg von der Felgenebene  $x$ . Kommt der Schräglaufwinkel über einen kritischen Wert, beginnt der Reifen zu gleiten. Der Verlauf wird in einem Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Diagramm dargestellt [50].



**Bild 3-4 Radkräfte bei Schräglauf**

Aufgrund der Geometrie und Masse des Fahrzeugrades ergibt sich ein *Trägheitsmoment*, welches der Änderung der Raddrehzahl entgegen wirkt. Unterschiedliche Längs- und Seitenkräfte an den Rädern bewirken eine Drehbewegung des Fahrzeugs um seine Hochachse<sup>1</sup>, auch als *Giermoment* bezeichnet [50].

Im Weiteren wird noch von der Brems- und Antriebskraft gesprochen. Die *Bremskraft* wird durch das Betätigen der Bremse erzeugt und über ein am Rad wirkendes Bremsmoment an die Fahrbahn übertragen. Sie wirkt der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs entgegen. Die durch die Antriebsmotoren erzeugte *Antriebskraft* wird auf die angetriebenen Räder übertragen. Hierbei kann eine oder auch mehrere Achsen angetrieben werden.

### 3.1.2.3 Radschlupf

Nicht die Radgeschwindigkeit, sondern deren Verhältnis zur Absolutgeschwindigkeit des Fahrzeugs ist eine wichtige Größe zur Beschreibung der Dynamik des Fahrzeugs und hier speziell des einzelnen Rades, dieses wird auch als Schlupf bezeichnet [34, 35, 42, 43, 50].

Vor allem beim Beschleunigen und Bremsen kommt es zu Veränderungen der Radgeometrie der getriebenen Räder. Der so genannte Reifenhalbmesser  $r_{\text{dyn}}$  siehe Bild 3-3, nimmt auf Grund der variablen Belastung unterschiedliche Werte an, hierdurch werden verschiedene Geschwindigkeiten zwischen getriebenen und nicht getriebenen Rädern hervorgerufen, es kommt zu einem Schlupf, dem Längsschlupf. Ein Reifen kann nur Kraft übertragen, wenn er sich verformt oder gleitet, somit ergibt sich bei jedem Beschleunigungsvorgang ein Schlupf gegenüber der Fahrzeuggeschwindigkeit.

In der Literatur finden sich verschiedene Definitionen des Radschlupfs. Unterschieden wird in der Wahl der Bezugsgröße und der Normierung.

Nach DIN 70000 ist der Radschlupf wie folgt definiert:

$$\text{Radschlupf} = \frac{(\text{Radgeschwindigkeit} - \text{Fahrzeuggeschwindigkeit})}{\text{Fahrzeuggeschwindigkeit}} \quad (3-7)$$

Nach Gleichung (3-7) ist beim Antreiben bei durchdrehendem Rad ein Schlupf bis  $+\infty$  möglich. Um diesen auf maximal 1 zu begrenzen, wird in dieser Arbeit der Antriebsschlupf  $\lambda_A$ , siehe Gleichung (3-8), nach [43] auf die Radgeschwindigkeit bezogen. Er ist für den Fall eines angetriebenen Rades definiert und kann Werte zwischen Null und 1 annehmen. Ein nicht getriebenes freirollendes



Rad hat einen Schlupf von Null und ein durchdrehendes Rad, bei stehendem Fahrzeug, einen Schlupf von 1.

$$\lambda_A = \frac{v_U - v_F}{v_U} \quad (3-8)$$

Ein gebremstes Rad ist gegenüber einem ungebremsten immer langsamer, der hierbei definierte Bremsschlupf  $\lambda_{Br}$  kann Werte zwischen Null und -1 annehmen. -1 werden durch ein blockierendes Rad erreicht, dabei muss das Fahrzeug noch in Bewegung sein. Bezogen wird der Schlupf auf die Umfangsgeschwindigkeit des Rades  $v_U$  und die tatsächliche Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_F$ .

$$\lambda_{Br} = \frac{v_U - v_F}{v_F} \quad (3-9)$$

Die eigentliche Aussagekraft über den Schlupf wird durch den Kraftschlussbeiwert  $\mu_{Br}$  (hier auch Bremskraftbeiwert) getroffen. Das Bremsvermögen des Rades wird größtenteils durch die Gewichtskraft des Fahrzeugs bestimmt. Ein höheres Gewicht lässt somit eine größere Bremskraft zu, Voraussetzung sind gleiche Straßenverhältnisse. In den Bremskraftbeiwert  $\mu_{Br}$  gehen die Bremskraft  $F_{Br}$  und die Radaufstandskraft  $F_N$  ein.

$$\mu_{Br} = \frac{F_{Br}}{F_N} \quad (3-10)$$

### 3.1.3 Bewegungsgleichungen

Durch theoretische Ersatzmodelle werden fahrdynamische Zusammenhänge, bis an die Grenzen des Fahrbereichs, mathematisch erfassbar gemacht. Die sich ergebenden Gleichungen sind sehr kompliziert und nichtlinear, aus diesem Grund wird zur übersichtlichen Erfassung ein vereinfachtes linearisiertes Modell, das so genannte **lineare Einspurmodell**, welches Bild 3-5 zeigt, verwendet. Zur Vereinfachung werden Radlaständerungen vernachlässigt, d. h. die Betrachtung wird in der Ebene durchgeführt. Die Radaufstandspunkte einer Achse werden zusammengefasst und die Höhe des Schwerpunktes SP ist gleich Null. Die Bewegung findet auf einer Kurve mit dem Radius R und den momentanen Mittelpunkt MP statt. Für Vorder- und Hinterrad ergeben sich die Schräglaufwinkel  $\alpha_v$  und  $\alpha_h$ . Durch ein Linearisieren der Bewegungsgleichungen erfolgt eine weitere Vereinfachung, Voraussetzung ist ein lineares Reifenverhalten. Bei Pkw-



Hierbei wird von einer Beschleunigung  $a = 0$  und einer gegenwindfreien Fahrt ( $F_{L,y} = 0$ ) ausgegangen. Weiterhin wird angenommen, dass der Vorderradein-schlagwinkel sehr klein ist ( $\delta_v \rightarrow 0$ ) und sich somit ein Schwimmwinkel  $\beta \rightarrow 0$  ergibt.

Bei der **stationären Kreisfahrt** wird von der Fahrt auf einem konstanten Radius  $R$  bei konstanter Geschwindigkeit ausgegangen. Sie ist durch einen konstanten Schwimmwinkel  $\beta$  (zwischen Fahrzeuginnenachse und Geschwindigkeitsvektor, im Schwerpunkt liegender Winkel) und konstante Gierwinkelgeschwindigkeit  $\dot{\psi}$  (Winkelgeschwindigkeit um die z-Achse) beschrieben. Der hierfür notwendige Lenkwinkel setzt sich aus dem so genannten Ackermannwinkel  $\delta_v$  und bei höheren Geschwindigkeiten zusätzlich aus einem Anteil, der die Querbeschleunigung charakterisiert, zusammen. Dabei lassen sich mit diesem einfachen linearisierten Modell grundlegende Zusammenhänge der Querbeschleunigung bis etwa  $4 \text{ m/s}^2$  zeigen [4, 35, 50, 57, 63]. Somit ergibt sich für die stationäre Kreisfahrt folgende Bewegungsgleichung:

$$F_{x,h} + F_{x,v} \cos \delta_v = F_{L,x} + m \cdot a \cdot \cos \beta + m \frac{v^2}{R} \left( \frac{l_h}{l} \sin \alpha_v + \frac{l_v}{l} \sin \alpha_h \right) \quad (3-13)$$

### 3.1.4 Die Belastungsmomente

Das im Einspurmodell und bei der stationären Kreisfahrt nicht berücksichtigte Wanken und Nicken wird durch Radlaständerungen hervorgerufen. Zur Berücksichtigung werden ein Wankwinkelfaktor  $f_k$  und ein Nickwinkelfaktor  $f_v$  eingeführt.

$$f_k = 1 - \mu_y^p \quad (3-14)$$

$$f_v = 1 - f_{v,1} \cdot a \quad (3-15)$$

Auf deren Grundlage können Referenzmassen für das rechte und linke Rad berechnet werden, die den Einfluss des Wankens und Nickens berücksichtigen.

Dabei ist  $p$  der Wankparameter, er bezieht die Intensität des Wankens mit ein. Bei  $\mu_y$  handelt es sich um die seitliche Kraftschlussbeanspruchung. Durch den Neigungsfaktor  $f_{v,1}$  wird das Nicken beschrieben.

Unter Berücksichtigung eingeführter Faktoren und durch Multiplikation von Gleichung (3-4) mit dem Radius der Belastungswalzen und einem Getriebefaktor  $f_G$  zur Anpassung der eingesetzten Antriebe an reale Verhältnisse, ergeben sich die folgenden Gleichungen für die Belastungsmomente.

$$M_{B,r} = f_G \cdot \mu_r \cdot r_B \cdot \left[ (f_{R,r} + q + f_m \cdot \frac{a}{g} + f_k) \cdot m_{ref,r} \cdot \frac{g}{2} + m_{ref}^* \cdot f_L \cdot \frac{v_{res}^2}{2} \right] \quad (3-16)$$

$$M_{B,l} = f_G \cdot \mu_l \cdot r_B \cdot \left[ (f_{R,l} + q + f_m \cdot \frac{a}{g} + f_k) \cdot m_{ref,l} \cdot \frac{g}{2} + m_{ref}^* \cdot f_L \cdot \frac{v_{res}^2}{2} \right] \quad (3-17)$$

Die benötigte Drehzahlvorgabe für die Belastungswalzen kann mit Gleichung (3-18) und (3-19) berechnet werden.

$$n_{B,r} = (1 - f_{SP,1} \cdot \delta_V + f_{SP,2} \cdot \delta_V^2) \cdot \frac{r_{dyn}}{r_B} \cdot n_F \quad (3-18)$$

$$n_{B,l} = (1 + f_{SP,1} \cdot \delta_V + f_{SP,2} \cdot \delta_V^2) \cdot \frac{r_{dyn}}{r_B} \cdot n_F \quad (3-19)$$

Im Falle der Geradeausfahrt vereinfacht sich die Formel auf:

$$n_B = \frac{r_{dyn}}{r_B} \cdot n_F \quad (3-20)$$

Die Drehzahlen der Antriebs- und Belastungsmaschinen sind direkt proportional, vorausgesetzt ist eine gleiche Drehzahl beider Antriebsräder [35, 50].

### 3.1.5 Elektronische Fahrsicherheitssysteme

Für einen Durchschnittsautofahrer ist es schwierig während einer Notbremsung, plötzlichen Fahrbahnveränderungen oder schnellen Lenkbewegungen, vor allem bei hohen Geschwindigkeiten, die Kontrolle über das Fahrzeug zu behalten. Das Verhalten des Fahrzeugs, der Reifen und der Fahrbahnoberfläche müssen koordiniert werden, ansonsten kann es zu einer unkontrollierten Fahrt und daraus folgend zu einem Unfall kommen [1, 33, 42, 50]. Um dies zu verhindern werden verschiedene Fahrsicherheitssysteme wie zum Beispiel *Elektronische Bremskraftverteilung* und *Antriebs-Schlupf-Regelung* (ASR) eingesetzt.

Auf Vollständigkeit wird bei der Behandlung der Fahrsicherheitssysteme kein Wert gelegt, vielmehr geht es um die Umsetzung der beschriebenen Systeme, deren Funktionsnachweis und das Ableiten einer allgemeinen Auslegungsstrategie für Mehrmotorenantriebe.

### *3.1.5.1 Das Antiblockiersystem – Komponenten, Funktion und Regelung*

Hierbei wird durch die Regelung des Bremsvorganges die Fahrstabilität und die Lenkfähigkeit des Fahrzeugs gewährleistet, d. h. der Kraftschluss Fahrzeug – Straße darf nicht abreißen. Auch bei ungleichen Reibwerten zwischen den einzelnen Rädern soll das Fahrzeug lenkfähig sein. Dabei ist der gesamte Geschwindigkeitsbereich des Fahrzeugs zu erfassen, bei modernen Regelungen heißt das ab etwa 3 km/h bis zu einer Geschwindigkeit von 250 km/h. Innerhalb der EU ist für die Konstruktion von Bremsanlagen und somit auch Fahrsicherheitssysteme die EG-Richtlinie 71/320 EWG, Anhang 10 bzw. ECE-R 13, Anhang 13 verbindlich. Bei Geschwindigkeiten unterhalb 15 km/h sind danach Radblockierungen bis zu 200 ms zulässig, ansonsten darf auf homogener Fahrbahn und bei Kraftschlussbeiwerten oberhalb von 0,1 bei einer beliebigen Bremsbetätigung kein Rad blockieren. Der Gesetzgeber verwendet statt ABS den Begriff ABV (Automatischer Blockierverhinderer).

Ein Radblockieren kann nur bei einer Reaktion der Regelanlage innerhalb weniger Millisekunden verhindert werden. Die Totzeiten sind innerhalb der Regelung sehr gering zu halten [42, 43].

Die Bestimmung des Radzustandes erfolgt über die Messung der Radumfangsgeschwindigkeit. Aus dieser Größe können Radverzögerung bzw. Radbeschleunigung, Referenzgeschwindigkeit und Schlupf am Rad bestimmt werden. Erfahrungen haben gezeigt, dass ein Messwert pro 10 ms ausreichend ist. Die Verlustzeiten liegen bei zirka 15 ms, bedingt durch den Druckaufbau bei Regelbeginn. Durch eine geschickte Verknüpfung dieser Größen kann ein Schluss auf die Fahrbahn- bzw. Fahrzustände erfolgen. Es gibt verschiedene Strategien zur Umsetzung und Nutzung auf ein oder mehrere Räder [7, 33, 42, 43, 63].

Die verwendeten Steueralgorithmen und Parameter sind entscheidend für die Fahrstabilität und einen möglichst kurzen Bremsweg des Fahrzeugs. Der normale Bremsvorgang darf durch das ABS nicht nachteilig beeinflusst werden. Gute Reifen erreichen eine Abbremsung mit  $1,2\text{ g}$  ( $12\text{ m/s}^2$ ), wegen unvermeidlicher Toleranzen sollte eine Regelung allerdings nicht vor  $14\text{ m/s}^2$  einsetzen [42].

### 3.1.5.2 Antriebs-Schlupf-Regelung und Elektronisches Stabilitätsprogramm

Ein weiterer Punkt sind Fahrsicherheitssysteme, die in das Fahrverhalten während der Fahrt eingreifen. Hier ist vor allem auf die Antriebs-Schlupf-Regelung und das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) hinzuweisen.

Die *Antriebs-Schlupf-Regelung* verhindert durch die Regelung des Radschlupfes, über eine Änderung des Drehmomentes, das Durchdrehen der Antriebsräder. Genauso wie bei einem blockierendem Rad können durch ein durchdrehendes Rad keine Seitenführungskräfte übertragen werden. Dies führt zu einem Stabilitätsverlust des Fahrzeugs. Es gelten dieselben Gesetze des Kraftschlusses wie beim Bremsen, auch hier gibt es einen optimalen Kraftschlussbeiwert. Die Radumfangsgeschwindigkeit ist bei einem angetriebenen Rad schlupfbehaftet, siehe Kapitel 3.1.2.3 [7, 42, 43, 44, 50].

Ergänzend zu ABS und ASR bezieht das *Elektronische Stabilitätsprogramm* die Querdynamik mit ein und stabilisiert das Fahrzeug bei allen Fahrzuständen zusätzlich. Dies erfolgt über einen gezielten Eingriff in die Radbremsen und bei konventionellen Verbrennungsmotoren über das Motormanagement. Es wird versucht, im Rahmen physikalischer Möglichkeiten, ein neutrales Fahrverhalten aufrecht zu erhalten. Die Bremse wird zum „Lenken“ benutzt.

Fahrsituationen bei denen ESP eingreift, sind das zu schnelle Einfahren in eine Kurvenkombination, beispielsweise bei Einfahrt in eine enge Kurvenfolge oder schnelle Lenkmanöver bei einem plötzlichen Auftauchen eines Hindernisses. Hierbei kann das Fahrzeug schnell in den Grenzbereich kommen, die Stabilität des Fahrzeugs ist nicht mehr gewährleistet.

Ausgehend von den Längsgeschwindigkeiten sollen Quer- und Giergeschwindigkeit dabei in definierten Grenzen gehalten werden [42]. Es erfolgt ein Vergleich zwischen dem Sollverhalten, was will der Fahrer und dem Istverhalten, wie bewegt sich das Fahrzeug tatsächlich. Zur Verringerung des Unterschiedes zwischen beiden Werten wird auf die von den Reifen übertragene Kraft eingewirkt. Je nach Realisierung werden Reaktionszeiten zwischen 60 und 200 ms erreicht. Dies ist unter anderem durch die Aufbaugeschwindigkeit des Drucks im Bremsystem oder die Ansteuerzeit für den Motoreingriff (Drosselklappenstellung) bedingt.

ESP baut auf eine Weiterentwicklung von ABS/ASR-Komponenten auf, bezieht jedoch im Gegensatz zu diesen noch das Verhalten von Fahrzeug und Fahrer mit in den Regelkreis ein [7, 42, 43, 44].

### *3.1.5.3 Visionen für die Zukunft*

**Brake-by-Wire** ist eine Vision für die Zukunft, hierbei wird vollständig auf die hydraulische Bremsanlage verzichtet. Das Bremssignal wird über eine Leistungselektronik direkt auf die Radbremse gegeben. Im Falle eines elektrischen Antriebs bremst der Motor das Fahrzeug ab. Die Zustimmung des Gesetzgebers ist dafür notwendig, aber auch der Benutzer muss von der Funktionssicherheit der Elektronik überzeugt sein. Ein erster Schritt ist die Erzeugung des Bremsbefehls durch eine Elektronik, dieser wird danach hydraulisch durch die Radbremsen umgesetzt. Dadurch können teils konventionelle Bremsenkomponenten eingesetzt werden.

**Steering-by-Wire** ist die vollelektronische Lenkung, es besteht keine mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Rädern. Über einen Lenkwinkelsensor wird der Einschlagwinkel des Lenkrades erfasst und über ein zugehöriges Steuergerät an einen oder mehrere Elektromotoren weiter gegeben. Diese sorgen für den passenden Lenkeinschlag. Ebenso wie brake-by-wire ist dieses System bereits technisch realisierbar. Allerdings fehlen für die Zulassung für den Straßenverkehr die gesetzlichen Grundlagen.

**X-by-Wire**, Sicherheitsrelevante Funktionen des Fahrzeugs werden mit Hilfe elektronischer Bauelemente realisiert. Auf eine mechanische Rückfallebene wird vollständig verzichtet [12, 42, 54, 63].

### *3.1.6 Begriffe zum Fahrzeugverhalten*

Zum besseren Verständnis werden im Folgenden im Zusammenhang mit dem Fahrverhalten benutzte Begriffe kurz erläutert. Das Fahrverhalten beschreibt den Zusammenhang der Freiheitsgrade beim Fahren des Fahrzeugs (siehe Kapitel 3.1.1). Gewünscht ist eine möglichst unabhängige Bewegungsform, die störenden Einflüsse sollen so gering wie möglich ausfallen. Die querdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs sind von großer Bedeutung, Quer- und Gierbewe-

gung unterliegen einer Zwangskopplung. Besonders durch Reifen- und Achseigenschaften wird das Fahrverhalten bestimmt [4, 33, 34, 35].

Der *Grenzbereich* kennzeichnet den Punkt, ab dem es dem Fahrer nicht mehr möglich ist, die Bewegung des Fahrzeugs seinem Wunsch entsprechend zu beeinflussen. Dies tritt bei einem intakten Fahrzeug auf, wenn die Reifen ihre maximal übertragbaren Horizontalkräfte erreicht haben. Der Fahrer kann nicht mehr im gewünschten Maße beschleunigen oder verzögern, keine gewollte Querbewegung ausführen, das Fahrzeug fährt instabil. Die Giergeschwindigkeit steigt an ohne eine entsprechende Zunahme der Querbeschleunigung. Die Hinterachse erreicht so vor der Vorderachse ihre Kraftschlussgrenze der Seitenkräfte. Der Fahrer verliert die Kontrolle über das Fahrzeug [4].

Zu den bekanntesten Begriffen mit denen das fahrdynamische Verhalten auf Basis der Kreisfahrt beschrieben wird gehören Unter- bzw. Übersteuern.

*Untersteuern* bedeutet bei einer langsamen Beschleunigung muss der Vorderradeinschlagwinkel  $\delta_v$  vergrößert werden, damit das Fahrzeug auf dem vorgegebenen Kreisdurchmesser bleibt. Andernfalls würde sich ein größerer Radius, auf dem das Fahrzeug fährt, einstellen.

*Übersteuern* ist das Gegenteil, der Vorderradeinschlagwinkel muss also verkleinert werden, um auf dem Kreisdurchmesser zu bleiben. Der zwischen diesen beiden liegende Grenzwert heißt *neutralsteuernd* [35, 50].

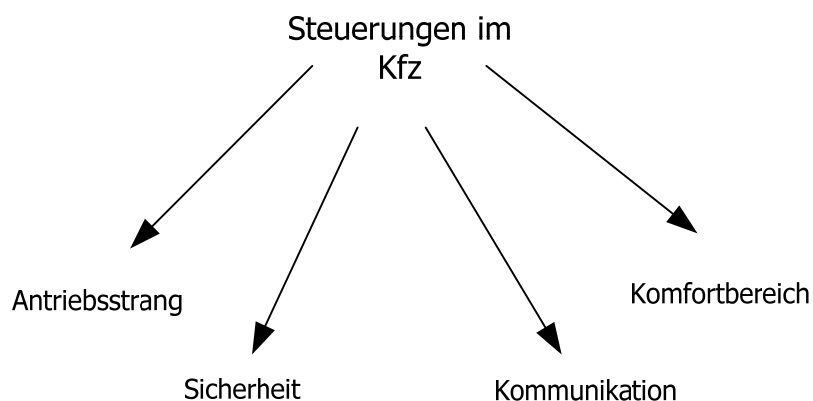


### ***3.2 Der aktuelle Stand der Technik auf dem Gebiet der Fahrzeugsteuerungen und Bussysteme***

Bei der Auslegung einer Steuerung, der Auswahl und des Entwurfs der einzelnen Komponenten ist ein Vergleich mit dem aktuellen Stand der Technik auf dem Gebiet des Automobilbaus von großer Bedeutung. Dadurch wird ausgeschlossen, ein Steuerungssystem mit unzureichenden Ressourcen in Bezug auf Rechenleistung, Signalverarbeitung und Übertragungsgeschwindigkeit, zu konzipieren. Auch der Einsatz unnötig teurer High-End-Systeme wird somit vermieden.

#### ***3.2.1 Fahrzeugsteuerungen – elektronische Steuergeräte***

Im Allgemeinen wird in Fahrzeugen von „embedded systems“, eingebetteten Systemen, gesprochen. Mikroprozessoren befinden sich nicht innerhalb eines Computers, sondern sind dezentral am Einsatzort integriert. Gerade der Automobilmarkt spielt hier eine Schlüsselrolle und ist eine treibende Kraft am Markt. In modernen Automobilen sitzen bis zu 100 Mikroprozessoren. Je nach Einsatzgebiet ergeben sich verschiedene Forderungen an Echtzeitfähigkeit und Fehlertoleranz bei gleichzeitiger Erfüllung erweiterter Umweltparameter.



**Bild 3-6 Einteilung der elektronischen Systeme nach Anwendungsgebieten**

Eine Einteilung kann nach den Anwendungsgebieten erfolgen, in Antriebsstrang, Kommunikation, Komfortbereich und den Bereich der Sicherheit. Für den Laborversuchsstand sind die Bereiche Antriebsstrang und Sicherheit relevant, siehe Bild 3-6.

Zum Antriebsstrang gehören bei konventionellen Fahrzeugen Einspritzsystem, Leerlaufregelung etc. und zur Sicherheit ABS, ASR und Systemdiagnosen. Realisiert werden diese Systeme meist aus einem oder mehreren Mikrocontrollern.

Oft werden simple 8 Bitrechner, wie der 8015 von Intel, verwendet. Die Zuverlässigkeit dieser Bauelemente ist weitaus höher als die der High-End-Prozessoren. Für komplexere Aufgaben, beispielsweise die Motorsteuerung, werden 16 Bitrechner mit 20 MHz Taktrate eingesetzt. Typische Befehlsbearbeitungszeiten liegen hier bei etwa einer Mikrosekunde.

Bei komplizierten Operationen, wie Division und Multiplikation, wird zur Unterstützung zugeschnittene Hardware eingesetzt, durch diese können auch rechenintensive Aufgaben in einem festen und vor allem bekannten Zeitintervall gelöst werden [58].

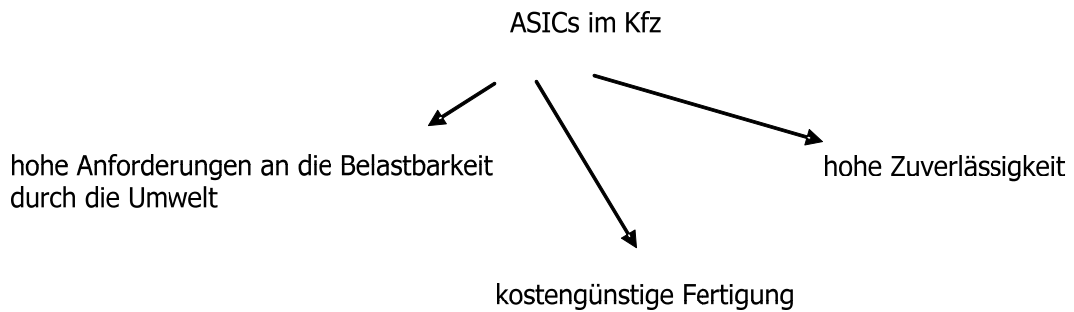
Wie der letzte Absatz zeigt, ist eine bekannte Zeitspanne für die Abarbeitung von Algorithmen von großer Bedeutung. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle der Begriff **Echtzeit** definiert: Nach DIN 44330 ist Echtzeit der Betrieb eines Rechensystems, bei dem die Software zur Datenverarbeitung ständig betriebsbereit ist. Das heißt, dass die Ergebnisse des Programmablaufs nach einer festen vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sein müssen. Ein Echtzeitsystem verarbeitet Daten also simultan mit ihrer Entstehung, es gibt keine wahrnehmbare Latenz.

Der Datenaustausch zwischen den einzelnen Steuergeräten und der Peripherie erfolgt über verschiedene Bussysteme und wird an späterer Stelle vorgestellt.

### *3.2.1.1 ASICs im Kfz*

Ohne anwenderspezifisch entwickelte integrierte elektronische Schaltungen, so genannte ASICs (Application Specific Integrated Circuits) ist die Kraftfahrzeugelektronik kaum vorstellbar.

Eine zunehmende Funktionalität und ständige Weiterentwicklungen ergeben erweiterte Anforderungen an die elektronischen Steuergeräte, siehe Bild 3-7. Vor allem sollen immer weiter Kosten eingespart werden. Baugruppen und Komponenten werden dazu zusammengefasst, Bestückungskosten und Substratfläche werden reduziert. Mit sinkender Strukturgröße werden größere Takt-raten möglich. Gleichzeitig ergibt sich dadurch ein verbesserter „Kopierschutz“.



**Bild 3-7 Anforderungen an die Fahrzeugelektronik**

Die Fahrzeugelektronik muss extreme Anforderungen an Schüttelfestigkeit und Temperaturwechselfestigkeit erfüllen, Temperaturen von bis zu 125 °C im Motorraum gehören zum Arbeitsumfeld der elektronischen Bauelemente. Insbesondere sicherheitsrelevante Systeme wie ASR und ABS müssen auch unter diesen Bedingungen zuverlässig arbeiten [58].

Im Gegensatz zum sonst schnelllebigen Elektronikbereich beträgt der Produktlebenszyklus von Kfz-Elektroniken bis zu 20 Jahre, entsprechend lange müssen die Komponenten verfügbar sein. Auch bei den Qualitätsanforderungen sind die Ansprüche entsprechend hoch, die zulässige Ausfallrate liegt in der Größenordnung von 1 ppm/yr (Parts per Million per Year) und weniger.

Daraus ergibt sich der Unterschied zu anderen Elektronikanwendungen und die Notwendigkeit anwendungsspezifischer Lösungen, der ASICs.

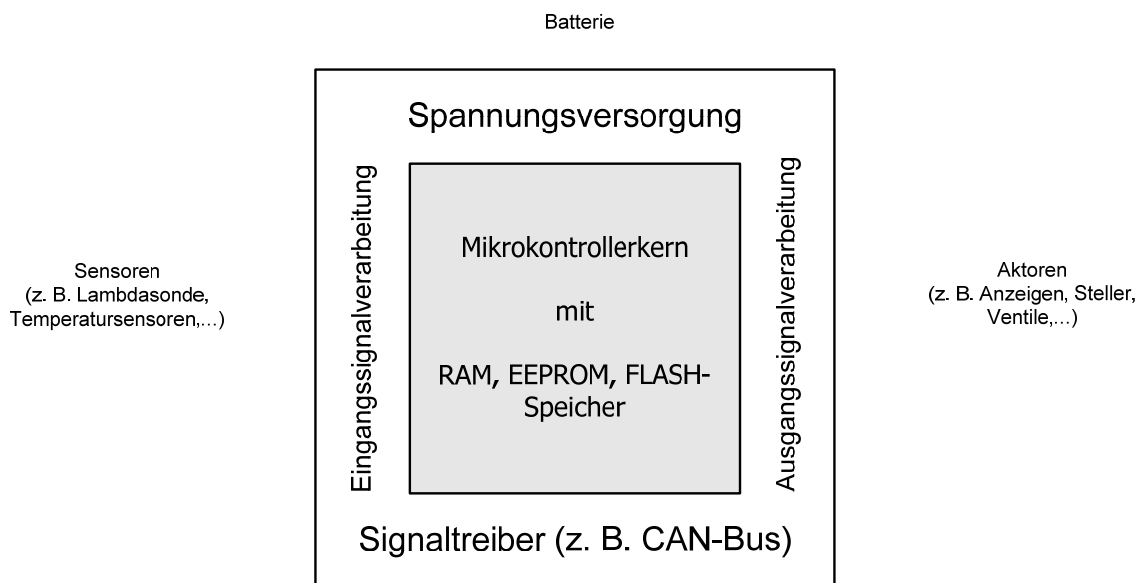
Ein weiterer Punkt sind die im Bordnetz auftretenden Störungen, daraus erwächst eine entsprechend robuste Auslegung der elektronischen Komponenten. Diese entstehen insbesondere beim Starten oder Schalten großer Lasten, z. B. kann der Spannungseinbruch beim Starten bis zu 5 V über einen Zeitraum von mehreren 10 ms betragen. Gleichzeitig muss die Funktion der Steuergeräte durch geeignete Maßnahmen sichergestellt werden.

ASICs werden sowohl als Einzelsysteme als auch als komplexe Systeme in Modulen eingesetzt.

Unter *Einzelsystemen* versteht man ein „stand alone system“ mit einer abgeschlossenen Einzelfunktion, z. B. der monolithisch ausgeführte Regler der Lichtmaschine.

Jedes System muss für sich allein Bordnetztauglich sein und auch bei hohen Temperaturen mit einer geforderten Genauigkeit arbeiten. Die Schaltungstechnik muss hier speziell für das eine Problem entworfen worden sein.

Komplexe Systeme bestehen aus einem Digitalkern (z. B. Controller mit Speichern und Bussystemen), einer Eingangssignalverarbeitung für den Anschluss notwendiger Sensoren und entsprechenden Treibern für die angeschlossenen Aktoren. Auch die Spannungsversorgung/-stabilisierung und Treiber für ein anzuschließendes Bussystem sind implementiert, Bild 3-8 zeigt als Beispiel den Aufbau einer digitalen Motorsteuerung [58].

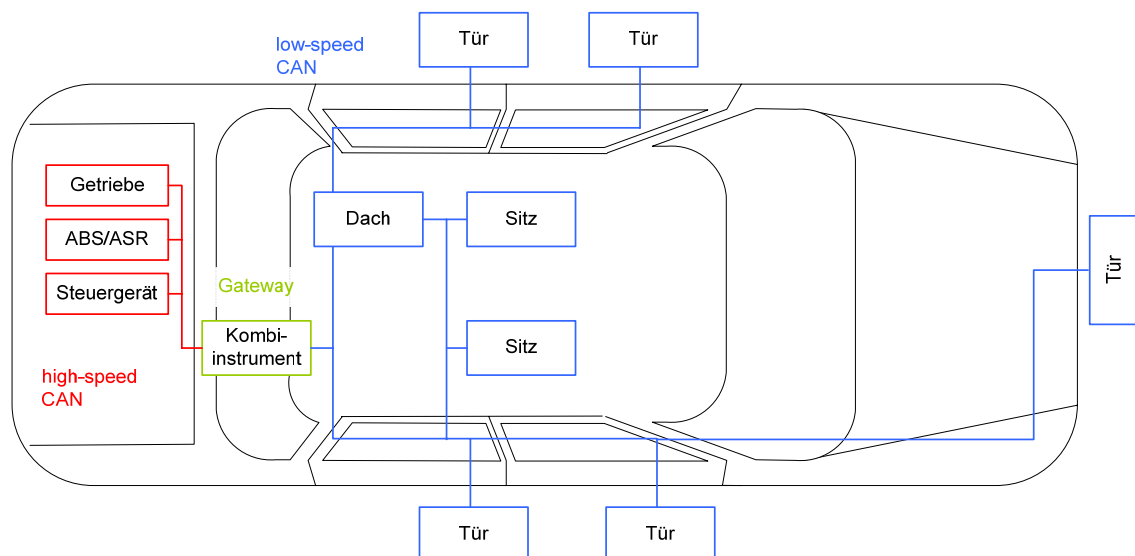


**Bild 3-8 ASIC - Komplexes System**

### 3.2.2 Bussysteme im Kfz

Im Kfz werden verschiedenste Bussysteme mit unterschiedlichen Anforderungen an Übertragungsgeschwindigkeit, Fehlertoleranz und Datenmenge miteinander vernetzt. Im Folgenden wird ein kleiner Überblick zu verschiedenen Bussystemen und deren Einsatz im Kfz gegeben.

Bild 3-9 zeigt ein vereinfachtes Beispiel für die Vernetzung eines typischen Kfz. Das Fahrzeug verfügt über zwei Netze, die über ein Gateway (Kombiinstrument) miteinander verbunden sind. CAN-Antrieb ist ein high-speed CAN-Bus für die Kommunikation der Steuergeräte des Antriebs. Im Gegensatz dazu sind die Innenraum-Komponenten über einen low-speed CAN-Bus miteinander verbunden.



**Bild 3-9 Vernetzung im Kfz**

#### 3.2.2.1 Die Datenübertragung

Für die Datenübertragung und die Kommunikation zwischen so genannten Busknoten definiert die Society of Automotive Engineers (SAE) drei Kategorien, Class A, Class B und Class C, siehe Bild 3-10.

Bei der Vernetzung der elektronischen Steuergeräte der Motorregelung, Getriebe, Fahrwerk und Bremsen bewegen sich die Übertragungsgeschwindigkeiten in echtzeittypischen Größenbereichen von 125 kBit/s bis ungefähr 1 MBit/s, das entspricht Class C. Dies ist der Bereich, der am Laborversuchsstand relevant ist.

Weitere Bereiche sind die Vernetzung der Komfort- und Karosserieelektronik, z. B. Lampensteuerung und Klimaregelung. Hier liegen die Übertragungsraten bei bis zu 125 kBit/s, Class A und Class B [70]. Und zu guter letzt der Multimediabereich, hier werden Datenraten von mehreren MBit/s benötigt. Die letzteren Bereiche sollen hier keine wesentliche Rolle spielen.

<b>Class A</b>	- Low Speed (< 10 kBit/s) - Komfortbereich (Unterhaltung, Klimasteuerung, Navigationssysteme,... )
<b>Class B</b>	- Medium Speed (10 kBit/s bis 125 kBit/s) - Allgemeiner Informations-Transfer (Instrumentenanzeigen,... )
<b>Class C</b>	- High Speed (125 kBit/s bis 1 MBit/s) - Echtzeitbereich (Motorregelung, Antriebsstrang, brake-by-wire,... )

**Bild 3-10 SAE Klassifizierung**

Eine weitere Klassifikationsmöglichkeit ist die Einteilung nach Anwendungsgebiet, Sicherheitsanforderungen und Kommunikationsmedium. Anwendungsgebiete sind beispielsweise die Antriebssteuerung, Informationsverarbeitung, Kommunikation und Fahrerassistenzsysteme. Sicherheitsanforderungen ergeben sich aus dem Anwendungsgebiet, hier gibt es passive und aktive Sicherheit, X-by-wire und break-by-wire. Als Kommunikationsmedien kommen zum Beispiel optische Ringe und Zwei-Draht-Leitungen in Frage.

In der Praxis angewandte Lösungen sind z. B.:

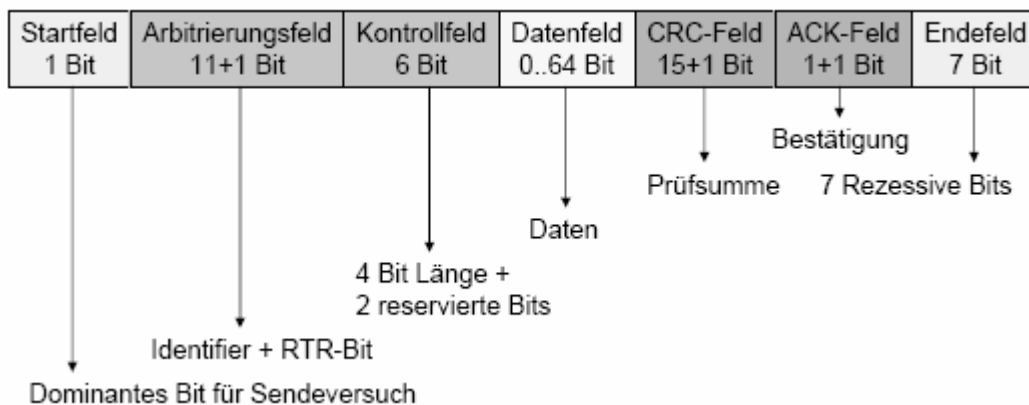
- CAN/TTCAN (Controller Area Network/Time Triggered CAN), fehlertolerant, Zwei-Draht-Leitung [40, 72]
- Media Oriented Systems Transport (MOST), optischer Ring [67]
- LIN (Local Interconnect Network), einfache Ein-Draht-Leitung [45, 66, 71]
- und „in Zukunft“ Time Triggered Protocol (TTP/C), fehlersicheres Bussystem [73]

Bei allen handelt es sich um Bustechnologien, näheres in den folgenden Kapiteln. Vorteile sind das Anschließen einer größeren Anzahl von Teilnehmern, die Möglichkeit der Fehlerdiagnose des Bussystems, Modularisierungsfähigkeit und das Schaffen notwendiger Redundanzen zur Erhöhung der Ausfallsicherheit [5, 52].

### 3.2.2.2 Der CAN-Bus

Für die Vernetzung elektronischer Steuergeräte im Bereich Komfort, Antrieb, Fahrwerk und Karosserie hat sich weltweit der CAN-Bus durchgesetzt, der Aufbau und die Funktion werden hier zum besseren Verständnis kurz erläutert.

Mit Datenraten von maximal 1 MBit je Sekunde ist die Echtzeitfähigkeit nach obiger Definition gewährleistet. Auf einer Länge von maximal einem Kilometer können bis zu 32 Geräte angeschlossen werden. Es besteht die Möglichkeit Steuergeräte, aber auch Aktorik und Sensorik seriell miteinander zu verbinden. Durch das eingesetzte Datenprotokoll können Übertragungsfehler erkannt und durch Wiederholung korrigiert werden. Bild 3-11 zeigt den verwendeten Datenrahmen [40, 42, 51, 58, 72].



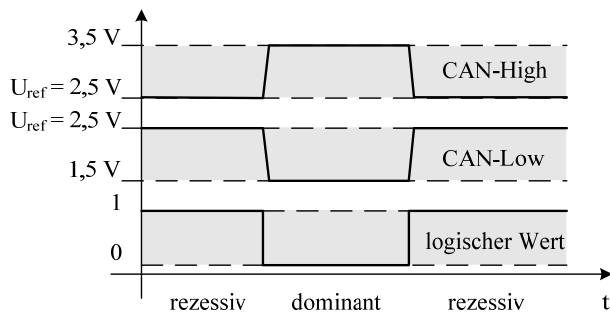
**Bild 3-11 Datenrahmen des CAN-Protokolls**

Eine Übertragung besteht somit aus 108 Bit, daraus resultiert eine Übertragungszeit, bei voller Länge mit höchster Übertragungsrate, von ca. 0,1 ms. Die Signalausbreitungszeit wird hier vernachlässigt.

Der CAN-Bus erlaubt jedem Teilnehmer das Senden einer Nachricht (Multimasterfähigkeit), jeder angeschlossene Teilnehmer kann diese empfangen und entscheiden, ob sie für ihn bestimmt ist.

Der CAN-Bus ist ein differentieller Bus, wobei die Spannungspegel beider Leitungen in einem Zustand auf einer Referenzspannung liegen und im anderen Zustand von dieser um 1 V abweichen, siehe Bild 3-12. Liefern zwei Teilnehmer am Bus unterschiedliche Signale setzt sich der Knoten mit 1,5 V bzw. 3,5 V durch, daher wird dieser Zustand als dominant bezeichnet. Der Zustand mit beiden Leitungen auf Referenzspannung wird als rezessiv bezeichnet.

Da die CAN-Spezifikation nicht festlegt, welcher Zustand, welchem logischen Wert entspricht, muss dies für alle Teilnehmer einheitlich definiert werden, in Bild 3-12 entspricht der Wert „1“ dem rezessiven Bit und der Wert „0“ dem dominanten Bit.



**Bild 3-12 Rezessive und dominante Bits**

Jede Nachricht beginnt mit einem Start-of-Frame-Bit (SOF) dem ein so genannter Identifier (ID) folgt, dieser kennzeichnet Inhalt und Priorität der Nachricht.

Dabei wird nach zwei verschiedenen Formaten unterschieden, Standard-Frames mit 11-Bit-Identifier oder Extended-Frames mit 29-Bit-Identifier. Gekennzeichnet wird dies durch den Identifier. Ist dieses Bit rezessiv, folgt danach der zweite Teil des 29-Bit-Identifiers eines Extended-Frames. Ist es dominant, wird das vorhergehende Bit als RTR-Bit behandelt (siehe unten), bei Extended-Frames wird es als SRR-Bit betrachtet (Substitute Remote Request).

Im Standard-Frame folgt ein reserviertes Bit, welches dominant gesendet wird sowie der Datenlängencode, das so genannte Kontrollfeld.

In Extended-Frames reiht sich an das IDE-Bit der zweite Identifier Teil und das RTR-Bit sowie das Kontrollfeld mit zwei reservierten Bits und dem Datenlängencode. Die reservierten Bits sind dabei dominant.

Anschließend folgt bei beiden Formaten ein bis zu 8 Byte großes Datenfeld, an welches sich eine 15 Bit große CRC-Prüfsumme anschließt. Danach kommt die immer rezessiv gesendete CRC-Enderkennung (CRC-Delimiter).

Das 2 Bit lange folgende Acknowledgementfeld soll dem Empfänger das Bestätigen der Nachricht ermöglichen, der Empfänger kann das vom Sender rezessiv gesendete Bit dominant überschreiben.



Den Abschluss bildet ein rezessives Bit (der ACK-Delimiter), das Endefeld (end-of-frame) bestehend aus sieben rezessiven Bits und einem drei Bit langem Intermissionsfeld.

Ein wichtiger Punkt der Datenübertragung ist die Datenkonsistenz im gesamten Netzwerk. Lokal erkannte Fehler werden globalisiert, so dass sie von allen Teilnehmern als solche erkannt werden können und die Nachricht für ungültig erklärt wird. Implementierte Fehlerzähler erlauben im Extremfall Teilnehmer vom Bus abzuschalten, grundlegende Schritte zur Fehlerbehandlung werden im Folgenden kurz aufgezeigt.

Zur Erkennung von Fehlern sind in CAN-Chips fünf Mechanismen integriert: Bitfehler, Stuffbit-Fehler, CRC-Fehler, Acknowledgement-Fehler und Formatfehler. Bitfehler werden durch Mithören des sendenden Teilnehmers erkannt, es wird ein anderer logischer Wert erkannt als gesendet wurde.

Bei Stuffbit-Fehlern werden mehr als fünf gleiche Bits hintereinander gesendet. Nach dem Empfang einer Nachricht wird die empfangene Checksumme mit der durch den CAN-Chip aus der Nachricht berechneten überprüft. Falls der vom Sender rezessiv gesendete Acknowledgement-Slot nicht durch den Empfänger dominant überschrieben wird, liegt ein Acknowledgement-Fehler vor. Formatfehler treten auf, falls im CRC-Delimiter oder in den ersten sechs Bits des End-Of-Frames-Feldes ein dominantes Bit entdeckt wird. In allen Fällen wird ein entsprechendes Fehlerflag gesendet und das Telegramm für ungültig erklärt.

Die soeben beschriebenen Fehler treten global auf, allerdings ist auch die Fehlererkennung lokal auftretender Fehler wichtig, beispielsweise treten diese bei gestörten Leitungen auf, durch Bauteiltoleranzen, unterschiedliche Schaltschwellen, durch Temperaturschwankungen oder durch Laufzeitverzögerungen. Hier ist die oben genannte Globalisierung lokaler Fehler von Bedeutung, dazu wird der Stuffbit-Fehler verwendet. Ein Fehlerflag aus sechs gleichen Bits verletzt diese Regel und verursacht einen Fehler in allen Knoten.

Um zu verhindern, dass ein fehlerhafter Teilnehmer permanent stört, sind in den CAN-Controller zwei Fehlerzähler implementiert. Einer zählt unkorrekt empfangene Nachrichten, der andere zählt unkorrekt gesendete Telegramme.

Bei erfolgreicher Übertragung werden die Zähler dekrementiert, bei fehlerhafter Übertragung inkrementiert, bei Überschreitung einer Grenze ( $> 127$ ) wird der entsprechende Teilnehmer abgeschaltet [40, 51, 58, 72].

### *3.2.2.3 Weitere Bussysteme*

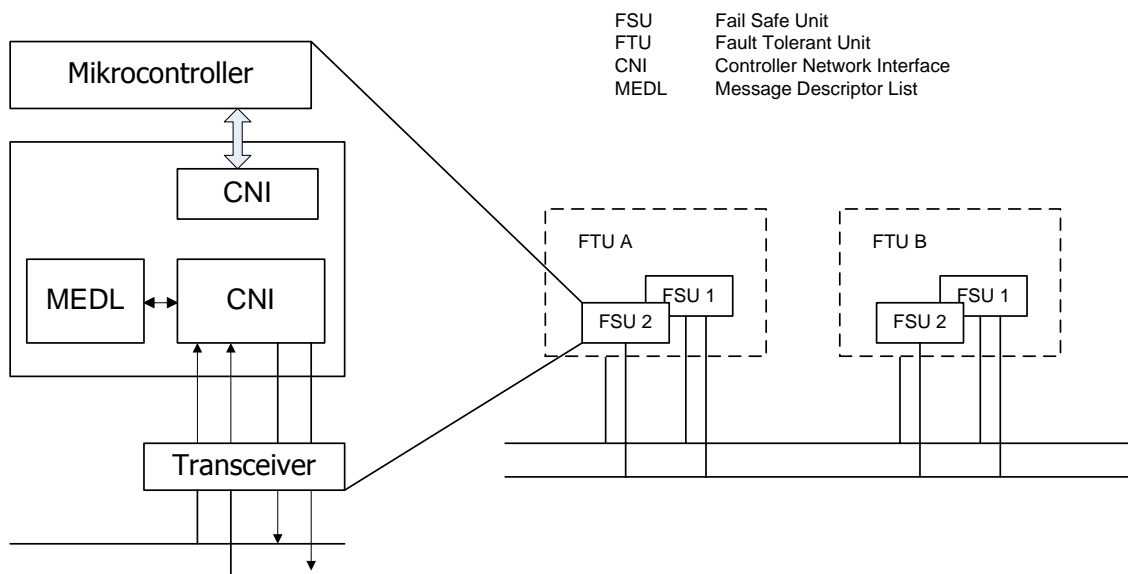
An dieser Stelle werden weitere Bussysteme für den Automobilbereich vorgestellt. Diese sind teils im Einsatz und teils noch in der Entwicklung. Dabei handelt es sich nur um einen kleinen Einblick.

#### TTP/C

Ein Beispiel für ein solches Bussystem ist das Time Triggered Protocol (TTP/C). Der Zugriff auf den Bus erfolgt in einem für jeden Teilnehmer individuell definierten Zeitrahmen. Somit werden Buskonflikte ausgeschlossen, dieses Verfahren heißt Time Division Multiple Access (TDMA). Jeder Teilnehmer hat die gleiche Zeit zur Verfügung, somit sind die Latenzzeiten nahezu konstant und berechenbar.

Die Zuordnung der Nachrichten zu festen Zeitschlitzen wird zu Beginn der Laufzeit statisch definiert und in jedem Steuergerät hinterlegt. Somit ist die Übertragung der Nachrichten synchron bei kurzer, konstanter Latenzzeit. Die globale Zeit wird durch eine Synchronisation der lokalen Uhren gewährleistet. Die implementierte Fehlererkennung erlaubt mindestens das Beheben von Einfachfehlern.

Jedes TTP/C-Steuergerät, siehe Bild 3-13, enthält einen Mikrocontroller (CPU) und einen TTP/C-Controller zur Ausführung des Kommunikationsprotokolls und einen Transceiver zur Busankopplung. Im Fehlerfall verhalten sich diese „still“, dies wird als „fail silent“ bezeichnet, die entsprechende Einheit wird hier als Fail Silent Unit (FSU) bezeichnet. Somit sendet jede Station entweder korrekte Daten oder sie verhält sich passiv. CPU und TTP/C-Controller sind über ein so genanntes Controller Network Interface (CNI) miteinander verbunden, dieses ist als Dual Port RAM ausgeführt. Nach einer Initialisierungsphase arbeitet der TTP/C-Controller vollkommen autonom. In einer Message Descriptor List (MEDL) speichert er, wann welche Station Nachrichten senden darf. Vom Bus gelesen werden kann zu jeder Zeit, durch jede Station, ohne Einschränkung.



**Bild 3-13** Architektur eines TTP/C-Systems

Der Bus ist als 2-Kanalbus ausgeführt, der TTP/C-Controller hat auf beide Kanäle Zugriff. Eine Einheit aus zwei redundanten FSU bestehend, wird als fehlertolerante Einheit bezeichnet (Fault Tolerant Unit, FTU). Jede Nachricht einer FTU wird viermal gesendet, durch die FSU 1 auf Kanal a und b und durch die FSU 2 auf Kanal a und b [52, 58, 73].

### TTCAN

Eine Weiterentwicklung des CAN-Protokolls mit zeitgesteuerter Datenübertragung ist Time Triggered CAN (TTCAN). Hierbei wird durch das Protokoll eine globale Zeitbasis bereitgestellt, diese ermöglicht allen Teilnehmern eine zeitgesteuerte Kommunikation. Hierdurch werden Buskonflikte vermieden. Ein so genannter time master (CAN-Station) sendet zu Beginn eines jeden Basiszyklus (basic cycle) eine Referenznachricht. Jeder Basiszyklus ist in verschiedene Zeitfenster unterschiedlicher Länge unterteilt. Es wird nach drei Arten unterschieden.

Exklusive Zeitfenster, eine Übertragung ohne Buskonflikt ist gewährleistet. In dieser Zeit wird immer nur eine Nachricht übertragen, somit ist es nur einer CAN-Station erlaubt zu senden.

Arbitrations-Zeitfenster, in diesem Rahmen erfolgt die Übertragung von Ereignisnachrichten, siehe auch unten. Es muss gewährleistet sein, dass die Übertra-

gung zu Beginn des folgenden exklusiven oder freien Zeitfensters beendet ist. Buskonflikte können auftreten.

Freie Zeitfenster sind für künftige Erweiterungen reserviert. Eine Übertragung ohne Buskonflikt ist gesichert.

Durch das Verknüpfen mehrerer Basiszyklen entsteht eine Systemmatrix deren Spalten die Zeitfenster bilden. Nachrichten werden einem Zeitfenster statisch zugeordnet, Zeitmarken definieren dabei das jeweilige Zeitfenster.

Jede Station muss ihre relevanten Zeitmarken kennen, im Gegensatz zu TTP/C ist nicht notwendigerweise die gesamte Systemmatrix in jeder Station hinterlegt.

Zur Realisierung einer fehlertoleranten Datenübertragung wird die time master Funktion mehrfach ausgeführt. Wird keine Nachricht durch den time master gesendet, beginnen die anderen time master mit dem Senden der Referenznachricht. Bei einem konkurrierenden Buszugriff setzt sich die Nachricht mit der höchsten Priorität beim CAN-Arbitrierungsverfahren durch. Die empfangenden Stationen erkennen diese Station als neuen time master an.

Geplant ist der Einsatz von TTCAN in zukünftigen Antriebssystemen und x-by-wire Systemen, siehe auch 3.1.5.3 [58, 73].

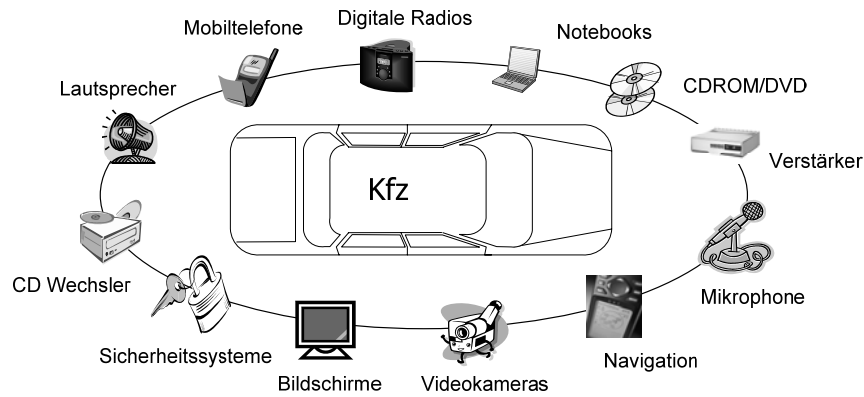
### MOST

Die bisher behandelten Bussysteme und Protokolle sind speziell für die Vernetzung von sicherheitsrelevanten Funktionen im Kfz entwickelt. In immer stärkerem Maße halten allerdings auch Multimedia- und Kommunikationsanwendungen Einzug in den Kfz-Bereich. Der Vollständigkeit wegen wird dieser Bus hier kurz vorgestellt, Bild 3-14 zeigt verschiedene Anwendungen.

Multimediaanwendungen verlangen Übertragungsraten von bis zu 20 MBit/s. Um ein hohes Maß an Ausfallsicherheit zu erreichen, wird eine entsprechende Netztopologie eingesetzt (Stern- oder Doppelring).

Eine Erweiterung wird ohne großen Aufwand, auch während des laufenden Betriebes - Hot-Plug-and-Play - möglich sein.

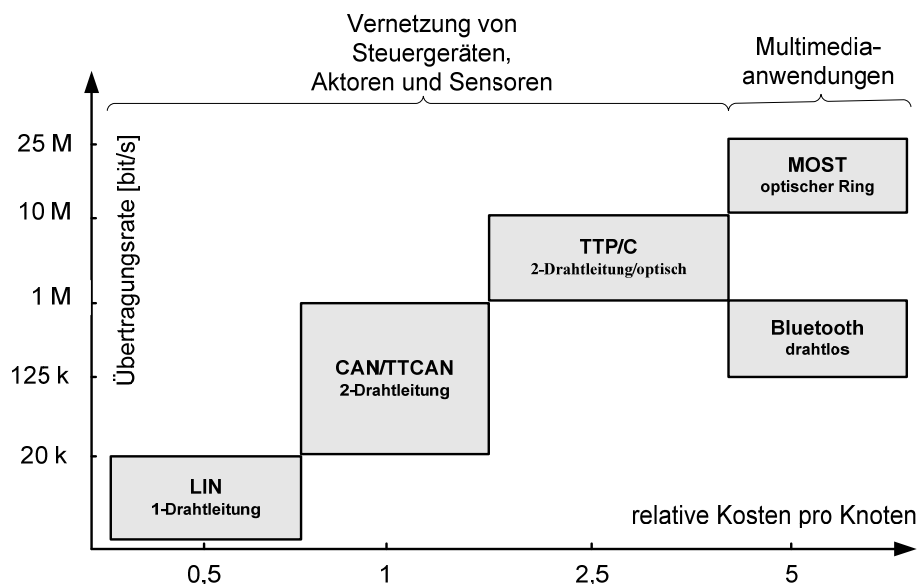
Aus diesen Überlegungen heraus wird von der Automobilindustrie der Einsatz und die Entwicklung des Media Oriented Systems Transport (MOST) zum Serieneinsatz vorangetrieben [67].



**Bild 3-14 Einsatzgebiete des MOST**

### LIN

Das Local Interconnect Network ist ein serielles Bussystem, welches sich insbesondere zur Vernetzung intelligenter Geräte, wie Sensoren und Aktoren, in Untersystemen im Automobilbereich eignet. Dabei handelt es sich um ein kostengünstiges Konzept zur Ergänzung der vorhandenen Netzwerke. Hierdurch und durch die hohe Verfügbarkeit entsprechender Halbleiterbauelemente ist die schnelle Verbreitung zu begründen. Bild 3-15 zeigt die Einteilung der verschiedenen Bussysteme nach Übertragungsgeschwindigkeit und den entstehenden Kosten je Busknoten, die Einordnung des LIN wird hieraus deutlich.



**Bild 3-15 Übertragungsgeschwindigkeit und Kosten von Bussystemen**

Der LIN-Standard spezifiziert neben dem Übertragungsprotokoll und -medium auch die Zusammensetzung der Signale, die Entwicklungsumgebung und die

Software-Schnittstellen. Ein wichtiger Punkt ist, dass das LIN herstellerunabhängig ist. Typische Anwendungen sind Steuerungen von Bedienelementen wie Klimaanlage, Lichtschalter, Sensoren für Regen und Licht sowie die Steuerung der Türverriegelung.

LIN basiert auf einem Master-Slave-Design, wodurch der einzelne Slave möglichst einfach und kostengünstig ausführbar ist. Über den Master erfolgt die Anbindung an den CAN-Bus. Die Slaves werden ohne eigenen Quarz ausgeführt, eine Synchronisation erfolgt über den Systemtakt des Masters.

Die Übertragung garantiert feste Latenzzeiten bei einer variablen Datenblocklänge. Um eine fehlertolerante Übertragung zu gewährleisten, ist eine Checksumme und eine Fehlererkennung implementiert, eine Synchronisation über die Netzwerkknoten ist vorgesehen. Dabei sind Übertragungsgeschwindigkeiten von bis zu 20 kBit/s möglich [45, 66, 71].

Die hier aufgezeigten Bussysteme stellen eine kleine Auswahl dar, für die verschiedenen Einsatzgebiete existieren weitere Bussysteme und weitere sind noch in der Entwicklung.

#### *3.2.2.4 Zukunftsaussichten*

Die Entwicklung auf dem Gebiet der Vernetzung im Automobil stößt bei den heute verwendeten Übertragungsgeschwindigkeiten an die Performance-Grenzen. Die Anforderungen im Antriebs- und Fahrwerksbereich liegen bei ca. 1 MBit/s, daraus ergibt sich eine Zielbandbreite bei der Protokolldefinition von 10 MBit/s.

Verteilte Regelsysteme fordern oftmals eine synchrone Datenübertragung, alle nicht ständig benötigten Daten können einfacher asynchron übertragen werden, z. B. Diagnose- und Servicedaten.

Durch den verstärkten Einsatz von verteilten Regelungen wird eine deterministische Übertragung immer wichtiger, um eine hohe Regelgüte zu erzielen. Eine, bei der Übertragung auftretende Variabilität der Übertragungszeit muss möglichst gering und nicht vom Betriebszustand (z. B. Buslast) abhängig sein. Die zwischen dem Senden und Empfangen auftretende Latenzzeit ist im Idealfall konstant, das bedeutet, dass die Differenz aus minimaler und maximaler Latenzzeit (Latenzjitter) minimal sein muss.

Um in Zukunft synchrone Operationen von verteilten Systemen zu verwirklichen, muss eine gemeinsame Zeitbasis geschaffen werden, eine globale Zeit. Anhand der Übertragungszeiten ermittelt das Datenbussystem diese Zeit und stellt sie allen Komponenten zur Verfügung.

Ein weiterer entscheidender Faktor ist die Fehlerverarbeitung. Ein Fehler soll bei einem fehlertoleranten Echtzeitsystem in kürzester Zeit erkannt werden. Erkennen allein reicht hierbei nicht aus. Durch entsprechende Maßnahmen, z. B. Redundanzen, müssen Einzelfehler in Echtzeit korrigiert werden. Man spricht von „fail-operational“ Verhalten.

Weitere wichtige Punkte sind die Robustheit gegen elektromagnetische Störungen. Recovery-Zeiten im Falle eines Ausfalls müssen minimal sein.

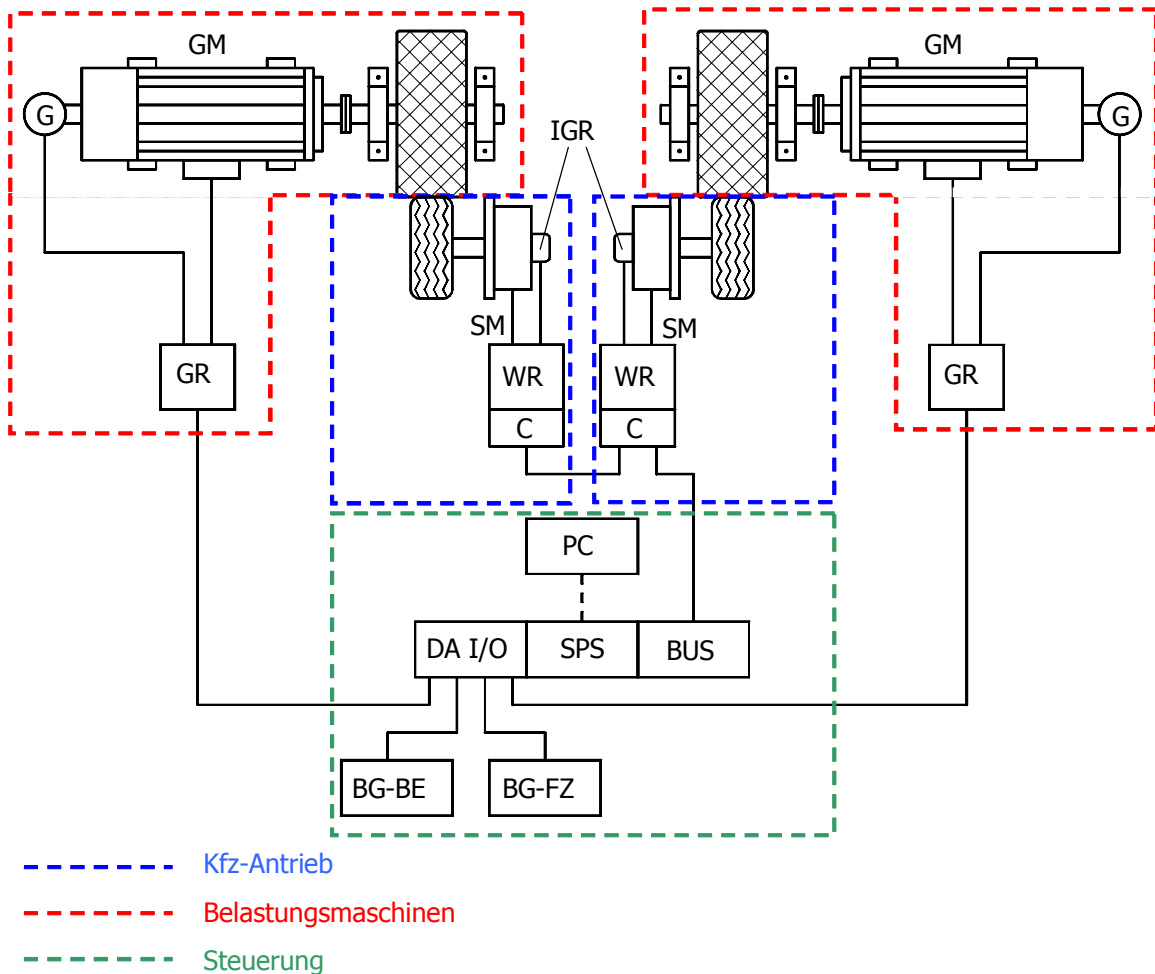
Um Flexibilität und Erweiterbarkeit zu gewähren, muss ein Hinzufügen bzw. Entfernen von Busteilnehmern (dies können Steuergeräte oder Funktionen sein) ohne ein Umkonfigurieren anderer Teilnehmer möglich sein. Auch die Fehlererkennung und das Aufspielen von Softwareupdates ist für einen effektiven Service zu berücksichtigen [52, 58].

Ein Bussystem der Zukunft ist Flexray, dabei handelt es sich um ein leistungsstarkes und fehlertolerantes Protokoll. Die Entwicklung wird durch ein Consortium, bestehend aus bedeutenden Automobil-, Halbleiter- und Elektronikherstellern, vorangetrieben. Einsatzgebiet sollen vor allem sicherheitsrelevante Anwendungen sein, Beispiele sind Bremsen und Lenken über den Flexray-Bus, ohne Hydraulik oder Mechanik. Dabei sollen Datenraten von bis zu 20 MBit/s über zwei Kanäle möglich sein. Ziel ist es, in den nächsten Jahren Flexray als Standard für x-by-wire Anwendungen zu etablieren [64].

### 3.3 Der Laborversuchsstand

#### 3.3.1 Aufbau

Bild 3-16 zeigt den bisherigen Aufbau des Versuchsstandes schematisch. Im oberen Teil (rot), bestehend aus zwei Gleichstrommotoren (GM) und Gleichrichtern (GR), ist die Belastungsmaschine dargestellt, diese treibt die Belastungswalzen an.



**Bild 3-16** schematischer Aufbau des Laborversuchsstandes

Blau umrandet ist der Kfz-Antrieb, bestehend aus zwei Axialflussmaschinen (SM) und den dazugehörigen Wechselrichtern (WR), zu sehen. Das steuerungstechnische System (grün) besteht aus einem Computer (PC), dieser dient der Programmierung der Steuerung (SPS) und zur Visualisierung. Über die Bedienelemente, erfolgt das Lenken und Beschleunigen des Kfz-Antriebs (BG-FZ) und das Vorgeben der Parameter für die Belastungsmaschine (BG-BE).



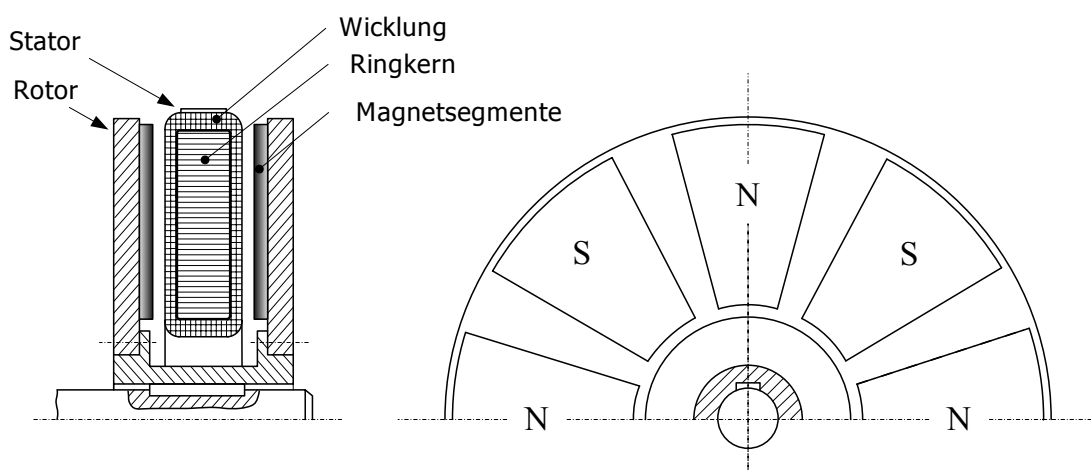
Bei der SPS handelt es sich um eine Siemens SIMATIC S7-300 mit einer PROFIBUS-Schnittstelle und mehreren digitalen und analogen Ein- und Ausgängen. Die Programmierung erfolgt über ein Programmiergerät mit der Software Step7 grafisch als Funktionsplan oder textbasiert als Anweisungsliste. Die Visualisierung erfolgt über das Programmiergerät und die Software WinCC der Firma Siemens [50].

### 3.3.1.1 Der Kfz-Antrieb

#### Die Axialflussmaschine

Wie oben beschrieben, wird als Antriebsmaschine jeweils eine permanent erregte Axialflussmaschine eingesetzt, auf deren Achse sich das Rad mit dem Reifen befindet. Durch die besonders kompakte Bauform dieses Motors wird, gegenüber dem bisherigen Aufbau von Kfz-Antrieben, ein völlig anderes Antriebskonzept ermöglicht. Der Einsatz eines elektrischen Mehrmotorenantriebssystems erlaubt den Verzicht auf mechanische Komponenten wie Getriebe und Differential. Des Weiteren ergeben sich neue Möglichkeiten der Drehmomentaufteilung auf einer Achse und der Umsetzung von Fahrsicherheitssystemen. Elektromotoren können sowohl Antriebs- als auch Bremsmomente bereitstellen.

Bedingt durch die Permanentenerregung und die Montage der Maschine direkt auf der Welle, es werden keine zusätzlichen Lager benötigt, sind die Gesamtverluste gering. Bild 3-17 zeigt den Aufbau einer achtpoligen Axialflussmaschine.



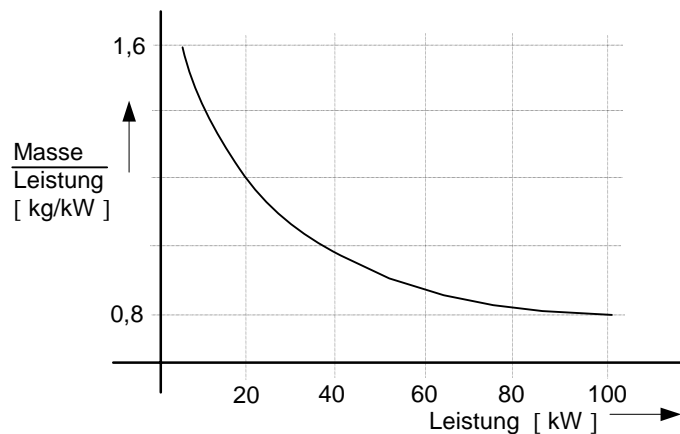
**Bild 3-17 Aufbau einer permanent erregten Axialflussmaschine**

Ein wichtiger Punkt ist die Luftkühlung, die Maschine kann in einem ausgedehnten Temperaturbereich betrieben werden (-40 °C bis 130 °C).

Die Axialflussmaschine arbeitet nach dem Prinzip einer Synchronmaschine als Elektronikmotor. Dabei handelt es sich um elektronisch kommutierte Gleichstrommotoren. Die zur Vorgabe der jeweiligen Bestromung notwendige Rotorlage und Drehzahl wird über inkrementelle Drehzahlgeber (IGR) direkt an der Maschine ermittelt [36, 50, 55].

Es sind Drehzahlen bis  $6000 \text{ min}^{-1}$  und Leistungen bis 100 kW realisierbar. Da die Maschine sowohl motorisch als auch generatorisch arbeiten kann ist die Rückspeisung von Energie während eines Bremsvorgangs denkbar.

Das Masse-Leistungs-Verhältnis ist von der Baugröße abhängig und liegt unterhalb vergleichbarer Elektromotoren, siehe Bild 3-18.



**Bild 3-18 Masse-Leistungsverhältnis von Axialflussmaschinen**

Eine Drehstromsynchronmaschine entsprechender Leistung besitzt eine zwei- bis dreimal so große Masse.

Bild 3-19 zeigt verschiedene Parameter der Axialflussmaschine in Abhängigkeit der Leistung.

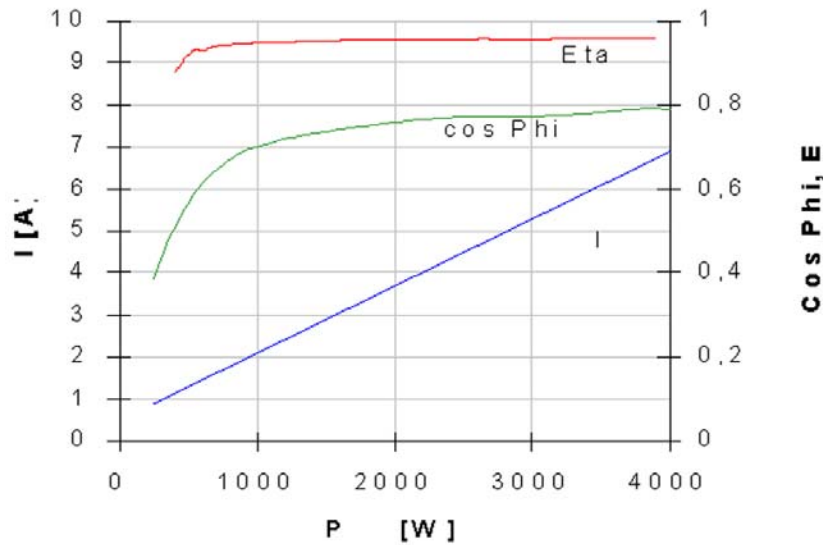


Bild 3-19 Kennlinien der Axialflussmaschine

Die Maschine arbeitet in weiten Bereichen mit einem Wirkungsgrad oberhalb von 95 % und einem  $\cos \varphi$  von 0,7 und besser. Für einen Einsatz im Kfz spricht auch die hohe Überlastbarkeit dieser Maschine und die dadurch erzielten sehr guten dynamischen Eigenschaften. In Bild 3-20 wird ein Drehzahlsprung von  $0 \text{ min}^{-1}$  auf  $3000 \text{ min}^{-1}$  dargestellt.

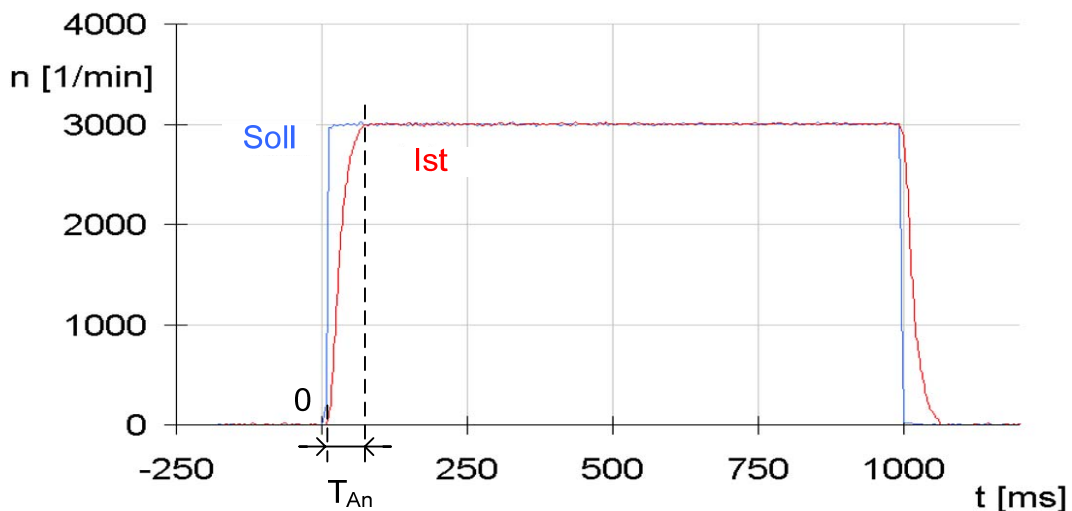


Bild 3-20 Drehzahlsprungfunktion einer Axialflussmaschine

Dabei ergibt sich eine Anregelzeit  $T_{An}$  von zirka 50 ms. Dies ist insbesondere bei der Umsetzung von Fahrsicherheitssysteme wichtig, die somit erreichbaren Reaktionszeiten liegen, da weder ein Eingriff in das hydraulische Bremssystem

noch in das Motormanagement erfolgen muss, weit unterhalb der von konventionellen Realisierungen.

### Umrichter und Steuerung

Gespeist werden die Maschinen über zwei Wechselrichter, Unidrive 2403, der Firma Control Techniques. Diese ermöglichen die im drehzahl- oder drehmomentengeregelten Betrieb erforderliche Stellung von Spannungsamplitude, Phasenlagen und Frequenz. Die Wechselrichter beziehen die benötigte Energie aus dem Drehstromnetz.

In dieser Arbeit soll die Energiebereitstellung nicht näher betrachtet werden, einige Möglichkeiten sind in Kapitel 2.3 aufgezeigt. Hinsichtlich der notwendigen Umrichter besteht, den Einsatz in einem Kfz betreffend, noch ein bedeutendes Entwicklungspotential. Kosten, Gewicht und Baugröße müssen noch erheblich verringert und an die Nutzung im realen Kfz angepasst werden.

Der Kfz-Antrieb wird in dem bereits realisierten Versuchsaufbau durch eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) angesteuert. Diese ist durch Ihre geringe Reaktionszeit ungeeignet und wird in dieser Arbeit mittels eines geeigneten steuerungstechnischen Systems ersetzt. Die Verbindung Wechselrichter - Steuerung erfolgt hier über den PROFIBUS.

Die Momentvorgabe der Antriebe erfolgt über ein Potentiometer (BG-FZ), dieses ist an eine Baugruppe mit analogen Eingängen an die SPS angeschlossen.

Die Verbindung der Umrichter mit der SPS erfolgt über eine Profibuschnittstelle. Dabei handelt es sich um ein serielles Bussystem, welches häufig im Bereich der Industrieautomation eingesetzt wird. In der hier eingesetzten Anlage betragen die Geschwindigkeiten bis zu 1,5 MBit/s, somit ergeben sich bei zwei Slaves Übertragungszeiten von zirka 2 ms. Die Schwachstelle des Systems ist die Steuerung, mit Zykluszeiten von ungefähr 20 ms. Deshalb muss die gesamte Reaktionszeit auf einen Wert kleiner als 10 ms gesenkt werden [50].

#### *3.3.1.2 Die Belastungsmaschine*

Beide Belastungswalzen werden durch fremderregte Gleichstromnebenschlussmaschinen (GNM) der Firma Elbtal, vom Typ MFD 100.2-FD 2 angetrieben, siehe Bild 3-16. Die Bestromung übernehmen zwei Gleichrichter der Firma Control

Techniques vom Typ Mentor II mit einer Leistung von 4 kW. Als Drehzahlgeber kommen hier Tachogeneratoren zum Einsatz.

Eine SPS übernimmt auch hier die Steuerung, im Gegensatz zu oben ergeben sich, bedingt durch die Trägheit der Belastungswalzen hinreichend kleine Verarbeitungs- und somit Reaktionszeiten. Die SPS setzt die in Kapitel 3.1.4 beschriebenen Steueralgorithmen zur Vorgabe definierter Belastungszustände, in Abhängigkeit verschiedener Reibwerte und sonstiger Umwelteinflüsse, um. Weiterhin werden durch sie die bei einem Kfz auftretenden Trägheiten bei Beschleunigungsvorgängen simuliert. Auf Grund des konstruktiven Aufbaus des Laborversuchsstands erfolgt die Umsetzung der Kreisfahrt, insbesondere die unterschiedlichen Drehzahlen der gelenkten Räder, durch die Belastungsmaschinen.

Über eine grafische Oberfläche können die Parameter der Belastungsalgorithmen verändert werden. Dabei kommt die Software WinCC der Firma Siemens zum Einsatz. Durch eine so genannte MPI Schnittstelle (Multi Point Interface) erfolgt die Anbindung an die SPS. Unter Verwendung eines Programmiergerätes kann hierüber direkt auf die Parameter der SPS zugegriffen werden.

Da die SPS die Steuerungsaufgabe nur ungenügend gut lösen kann, wird im Weiteren die Auslegung einer geeigneten Steuerung beschrieben.

### 3.3.2 Theoretische Betrachtungen zum Verhalten des Laborversuchsstandes

Durch den Begriff Fahrverhalten werden je nach Betrachter verschiedene Assoziationen ausgelöst, siehe auch 3.1.6. Meist wird darunter das spezifische Verhalten eines Fahrzeugs auf Aktionen des Fahrers verstanden, allerdings kann auch das Verhalten von Fahrer und Fahrzeug als ganzes darunter verstanden werden.

An dieser Stelle werden die theoretischen Grundlagen für das Verhalten der Antriebs- und Belastungsmaschinen des Laborversuchsstandes, auf die Vorgabe unterschiedlicher Antriebsmomente und Vorderradeinschlagwinkel, bei verschiedenen äußeren Einflüssen untersucht.

Zur Vereinfachung wird dabei der Vorderradeinschlagwinkel  $\delta_v$  als erstes auf Null gesetzt, die Geradeausfahrt. Danach werden verschiedene Werte vorgegeben, was der Kurvenfahrt entspricht [63]. Die Betrachtung der auftretenden Kräfte und Geschwindigkeiten erfolgt betragsmäßig.

### 3.3.2.1 Geradeausfahrt

Bei der beschleunigten Geradeausfahrt soll das grundlegende Verhalten des Versuchsstandes betrachtet werden. Es wird die Umsetzung des vorgegebenen Moments und der Einfluss verschiedener Belastungsparameter untersucht.

Als einfachster Fall wird von gleichen Fahrbahnverhältnissen für rechtes und linkes Rad ausgegangen. Somit vereinfacht sich die Vorgabe des Belastungsmoments auf einen Wert für beide Belastungswalzen, siehe 3.1.4.

Weitere Szenarien sind das Beschleunigen mit verschiedenen äußeren Einflüssen. Auch eine Geradeausfahrt mit unterschiedlichen Fahrbahnverhältnissen zwischen rechtem und linkem Rad ist möglich und wird an dieser Stelle betrachtet.

#### *Gleiche Fahrbahnverhältnisse zwischen linkem und rechtem Rad*

Durch Vorgabe äquivalenter Verhältnisse für rechtes und linkes Rad ergibt sich für das Belastungsmoment beider Belastungsrollen folgende Gleichung:

$$M_B = f_G \cdot \mu \cdot r_B \cdot \left[ (f_R + f_m \cdot \frac{a}{g}) \cdot m_{ref} \cdot \frac{g}{2} + m_{ref}^* \cdot f_L \cdot \frac{v_{res}^2}{2} \right] \quad (3-21)$$

Wobei alle vorhandenen Parameter mit gleichem Wert für beide Seiten vorgegeben werden, der Kurvenwiderstandsbeiwert  $f_k$  entfällt, da  $\delta_v = 0$  ist.

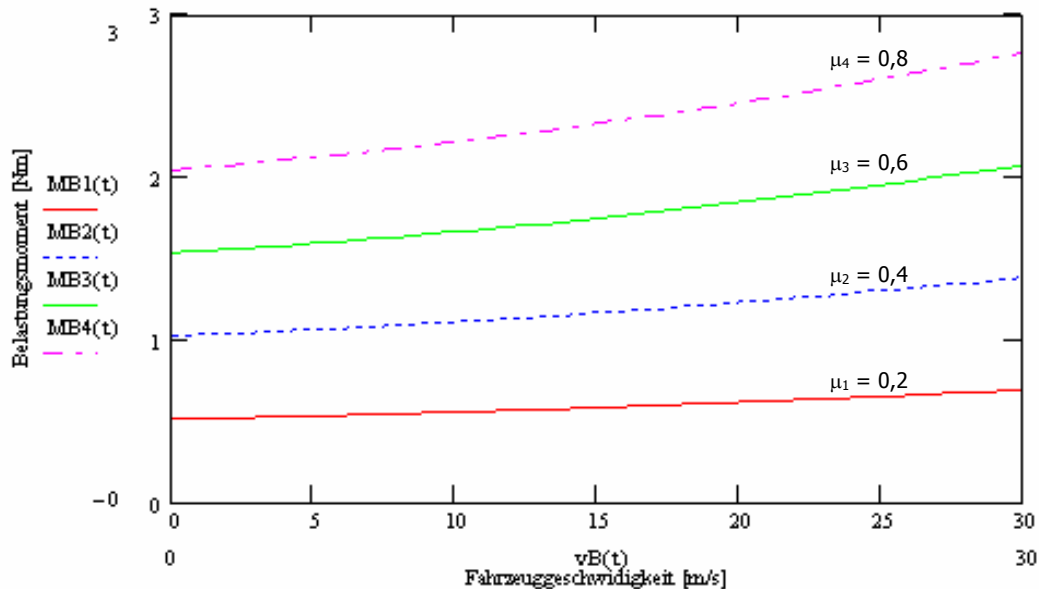
Die resultierende Anströmgeschwindigkeit  $v_{res}$  ergibt sich als vektorielle Summe von Windgeschwindigkeit und Fahrzeuggeschwindigkeit. Mit einer angenommenen Windgeschwindigkeit von Null wird hier nur die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs  $v_F$  benötigt. Diese wird aus Antriebsdrehzahl und dem dynamischen Reifenhalbmesser  $r_{F,dyn}$ , siehe Bild 3-3, nach Gleichung (3-22) ermittelt.

$$v_F = 2 \cdot \pi \cdot r_{dyn} \cdot n_F = v_{res} \quad (3-22)$$

Die Berechnung der Beschleunigung des Fahrzeugs erfolgt aus der Änderung der Geschwindigkeit  $\Delta v_F$  in einer vorgegebenen Zeitspanne  $\Delta t$  nach Gleichung (3-23).

$$a = \frac{\Delta v_F}{\Delta t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{dyn}} \cdot \Delta n_F}{\Delta t} \quad (3-23)$$

Im Diagramm in Bild 3-21 wird das Belastungsmoment  $M_B$  in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Fahrzeugs für verschiedene Kraftschlussbeanspruchungen  $\mu$  dargestellt.



**Bild 3-21 Belastungsmoment**

Dabei wird der Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit auf das zu überwindende Belastungsmoment sichtbar. Die Kraftschlussbeanspruchung geht direkt proportional in das Belastungsmoment ein.

#### *Unterschiedliche Fahrbahnverhältnisse zwischen linkem und rechtem Rad*

Unterschiedliche Fahrbahnverhältnisse zwischen linkem und rechtem Rad können bei abgeschalteten Fahrsicherheitssystemen unterschiedliche Drehzahlen bzw. einen unterschiedlichen Schlupf zwischen linkem und rechtem Rad bewirken. Somit kann es, je nach Größe und Vorzeichen des vorgegebenen Moments an den Kfz-Antrieben, zum Durchdrehen oder Blockieren eines oder beider Räder kommen. Bei eingeschalteten Fahrsicherheitssystemen (ASR und ABS) bewegt sich der Radschlupf, gegenüber den Belastungswalzen, innerhalb fest definierter Schlupfgrenzen. Ein vollständiges Durchdrehen oder Blockieren der Antriebsräder wird durch die übergeordnete Steuerung verhindert, siehe auch Kapitel 4.2.1.4.

Um ein Beschleunigen bzw. Verzögern zu ermöglichen, muss stets ein Schlupf zwischen Rad und Fahrbahn auftreten, einzig dessen Höhe hat Einfluss auf das Fahrverhalten.

Das jeweils an den Rädern angreifende Belastungsmoment ergibt sich nach den Gleichungen (3-16) und (3-17) mit unterschiedlichen Faktoren.

### 3.3.2.2 Stationäre Kreisfahrt

Beim Durchfahren einer Kurve wirken auf das Kfz, gegenüber der Geradeausfahrt, größere Kräfte. Ferner ergeben sich aus den unterschiedlichen Kurvenradien unterschiedliche Drehzahlen der beiden Antriebsräder [50, 63].

Die Betrachtung erfolgt durch eine Vereinfachung, die Einführung einer stationären Kreisfahrt in Verbindung mit dem Einspurmodell, eine kurze Beschreibung erfolgt in Kapitel 3.1.3., Bild 3-22 verdeutlicht die Kurvenradien der einzelnen Räder und deren Geschwindigkeitsvektoren  $\vec{v}_v$  und  $\vec{v}_h$ .

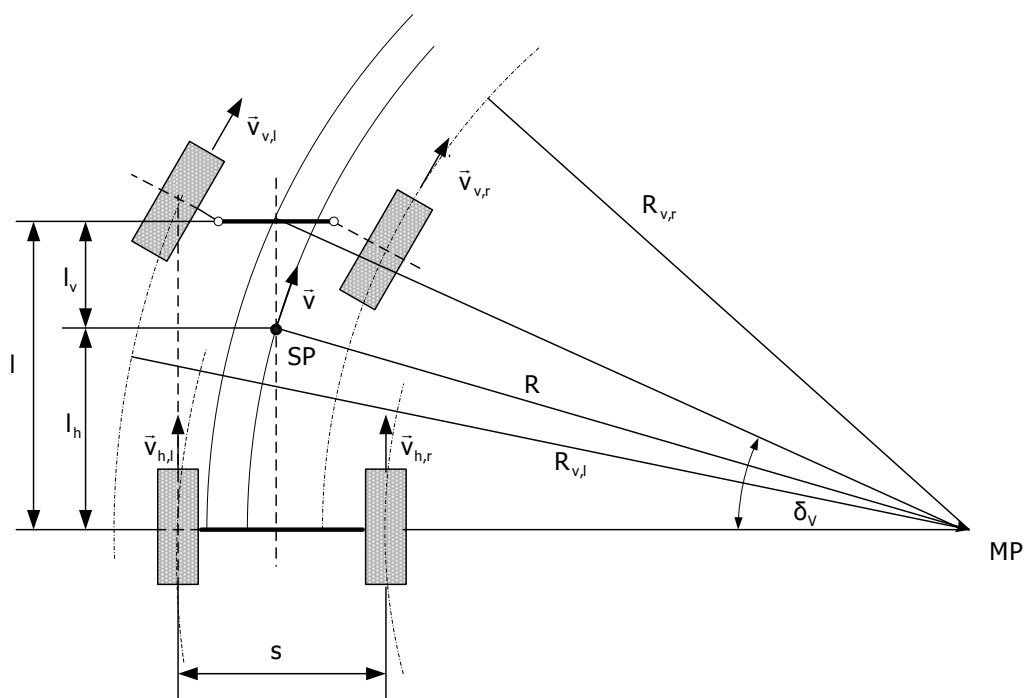


Bild 3-22 Kurvenradien und Geschwindigkeitsvektoren

In Abhängigkeit des Vorderradeinschlagwinkels  $\delta_v$ , des Radstandes  $s$  und der Spurweite  $I$  ergibt sich ein auf einen gedachten Mittelpunkt MP bezogener Kurvenradius  $R$ , für den Schwerpunkt SP des Fahrzeugs. Ausgehend von diesem



und der Fahrzeuggeschwindigkeit  $\vec{v}$  können die Beträge der Geschwindigkeiten der Vorderräder nach den Gleichungen (3-24) und (3-25) ermittelt werden.

$$v_{v,r} = (1 - f_{SP,1} \cdot \delta_v + f_{SP,2} \cdot \delta_v^2) \cdot v \quad (3-24)$$

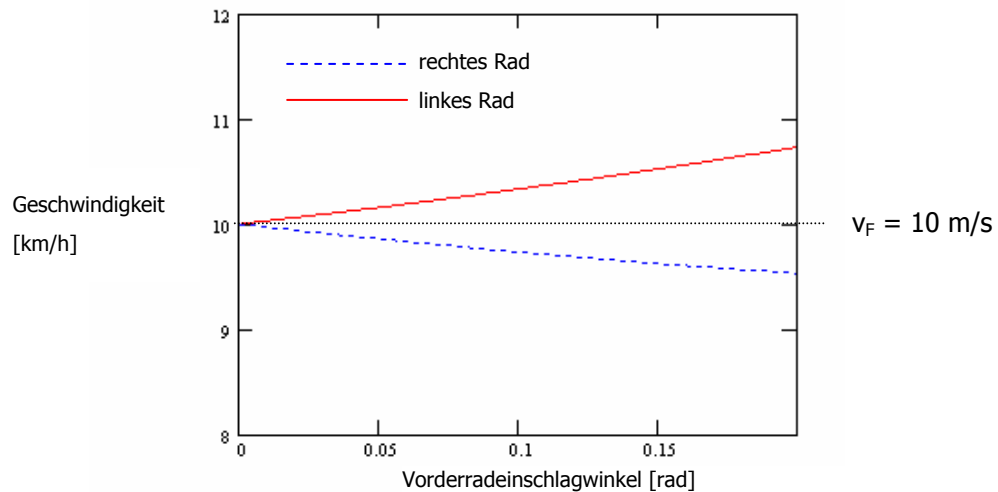
$$v_{v,l} = (1 + f_{SP,1} \cdot \delta_v + f_{SP,2} \cdot \delta_v^2) \cdot v \quad (3-25)$$

Die Schwerpunktfaktoren  $f_{SP,1}$  und  $f_{SP,2}$  können in der Praxis nicht genau bestimmt werden, für das theoretische Modell erfolgt die Bestimmung nach den Gleichungen (3-26) und (3-27). Das Verhalten des Versuchstandes kann, bei Variation der Parameter, in verschiedenen Versuchsreihen untersucht werden.

$$f_{SP,1} = \frac{s}{2 \cdot l} \quad (3-26)$$

$$f_{SP,2} = \frac{l_v}{l} \quad (3-27)$$

Bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit ( $a = 0 \text{ m/s}^2$ ) von  $v_F = 10 \text{ m/s}$  ergibt sich somit der in Bild 3-23 dargestellte Verlauf der Geschwindigkeiten von linkem und rechtem Rad in Abhängigkeit des Vorderradeinschlagwinkels.

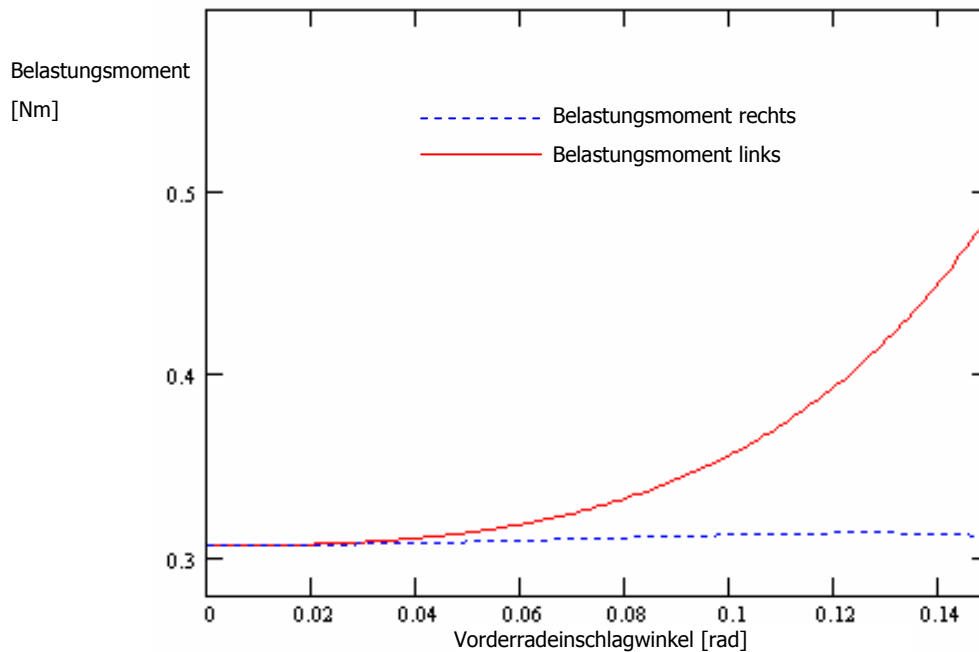


**Bild 3-23 Radgeschwindigkeit bei einer Referenzgeschwindigkeit von 10 m/s**

Der Schlupf der Antriebsräder ergibt sich dabei zu Null. Der dargestellte Verlauf entspricht einer rechts Kurve, das kurvenäußere Rad (links) dreht sich mit einer höheren Geschwindigkeit.

Die Belastungsmomente für das linke und rechte Rad ergeben sich in Abhängigkeit der seitlichen Kraftschlussbeanspruchung  $\mu_y$  und der Radgeschwindigkeiten. Bild 3-24 zeigt den Verlauf eines solchen Belastungsmoments bei einer

konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit von 10 m/s und einem Vorderradeinschlagwinkel von 0 rad bis 0,174 rad (0° bis 10°).



**Bild 3-24 Belastungsmoment in Abhängigkeit des Vorderradeinschlagwinkels**

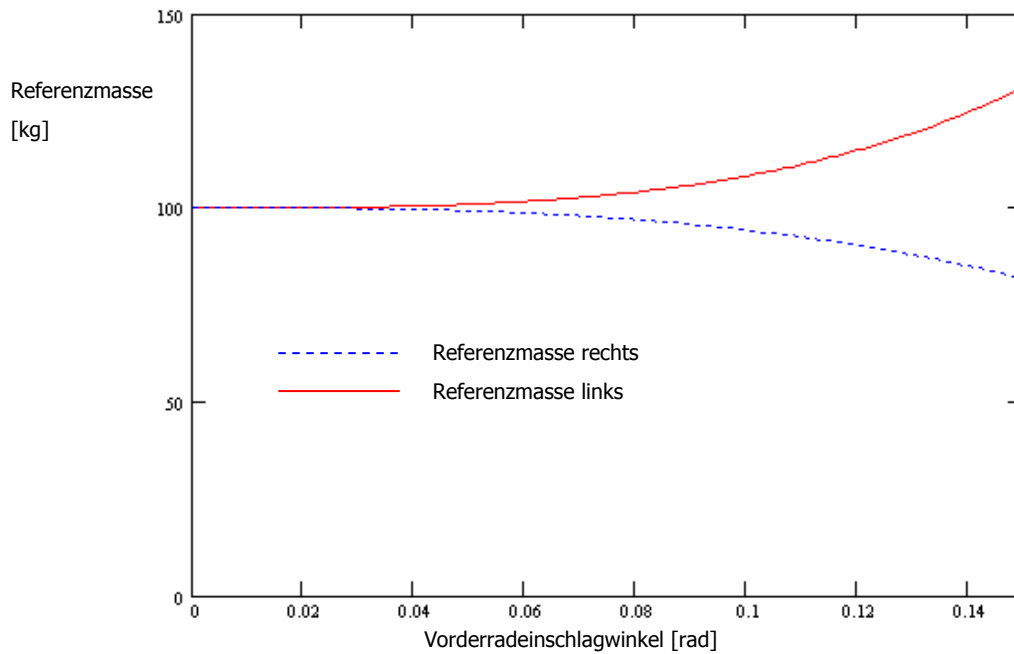
Durch die auftretenden Fliehkräfte kommt es zu unterschiedlichen Radlasten, das kurveninnere Rad (rechts) wird weniger belastet als das kurvenäußere Rad (links). Beim Überschreiten der Haftgrenze kann es zum Wegrutschen und Schleudern des Fahrzeugs kommen.

Diese ungleichen Belastungsmomente spiegeln sich insbesondere in den Referenzmassen der linken ( $m_{\text{ref},l}$ ) bzw. rechten ( $m_{\text{ref},r}$ ) Seite wieder, siehe Bild 3-25.

### *3.3.2.3 Einfluss der Fahrsicherheitssysteme ABS und ASR*

Der Einsatz der Fahrsicherheitssysteme ABS und ASR verhindert ein Blockieren bzw. Durchdrehen der Räder. Der Radschlupf variiert dabei in fest definierten Grenzen, siehe auch 3.1.5. Hierzu wird das vorgegebene Brems- bzw. Antriebsmoment nach festen Algorithmen modifiziert und so dem Blockieren bzw. Durchdrehen der Räder entgegengewirkt. Eine genaue Beschreibung der entsprechenden Algorithmen ist in 4.2.1.4 zu finden.

Im folgenden Kapitel werden der Laborversuchsstand und die realisierten steuerungstechnischen Komponenten vorgestellt. Auch der Aufbau der entwickelten Software wird ausführlich dargelegt.



**Bild 3-25 Referenzmasse in Abhängigkeit des Vorderradeinschlagwinkels**

## ***4 Steuerungstechnisches System***

Ein Hauptziel der Arbeit ist der systematische Entwurf eines steuerungstechnischen Systems für Mehrmotorenantriebe. Dieser soll beispielhaft an einem Laborversuchsstand erfolgen und allgemein auf andere Systeme übertragbar sein. Unter einem steuerungstechnischen System ist hier die Gesamtheit von Steuerung, zugehöriger Peripherie, Bussystem und implementierter Steuerungssoftware zu verstehen. Im Folgenden wird eine mögliche Strategie vorgestellt.

### ***4.1 Strategie für den systematischen Entwurf***

Bei dem Entwurf eines steuerungstechnischen Systems kann, je nach Einsatzgebiet, aus einer Vielzahl unterschiedlicher Steuerungen und zugehöriger Bussysteme ausgewählt werden. Um ein entsprechendes methodisches Vorgehen zu erreichen, soll an dieser Stelle eine allgemein anwendbare Strategie zur Auslegung eines steuerungstechnischen Systems vorgestellt werden. Bild 4-1 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen Auswahlverfahrens.

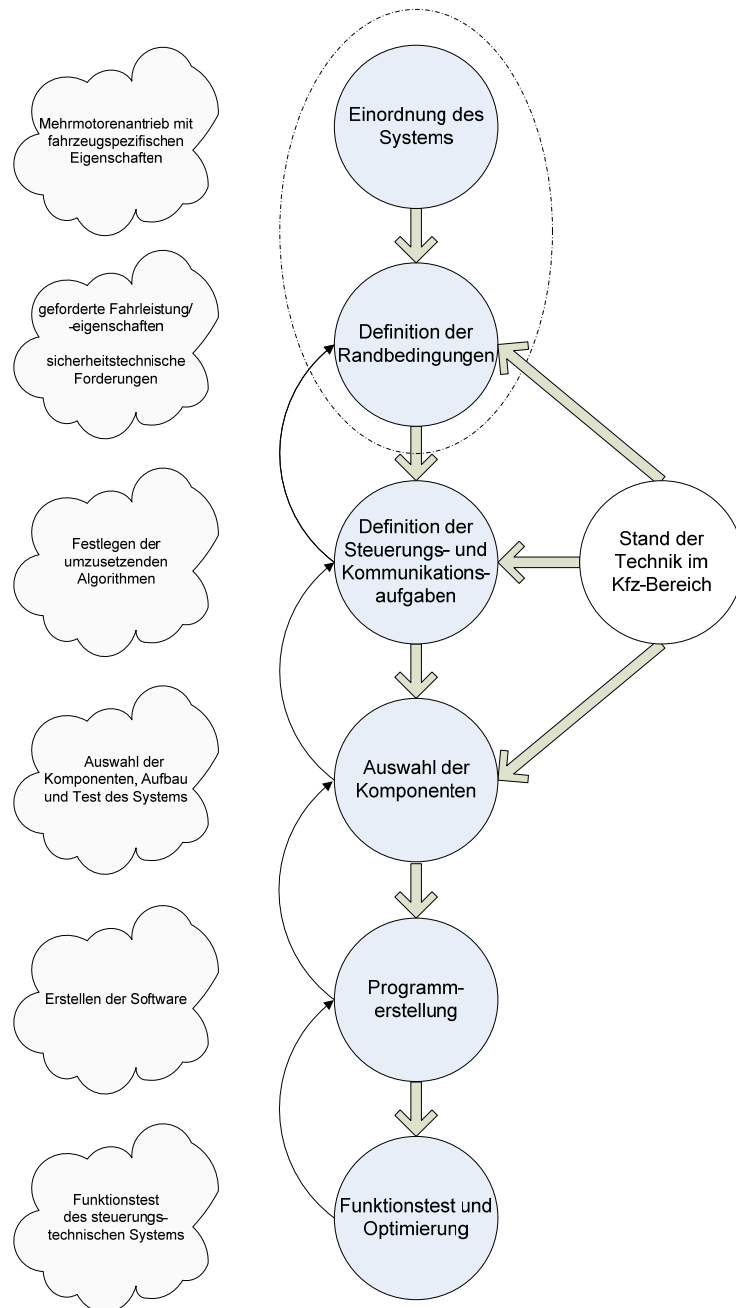
Dabei wird unter einer Entwicklungsmethodik eine systematische Arbeitsweise zur Entwicklung eines Systems verstanden. Eine Beschreibung erfolgt meist abstrakt und beinhaltet eine Anzahl von Schritten, die nacheinander durchlaufen werden.

In dieser Arbeit wird die Auslegung in fünf Schritten durchgeführt. Zu Anfang wird das auszulegende System definiert und die Randbedingungen werden festgelegt.

Der zweite Schritt legt die Aufgaben der Steuerung und der Kommunikation fest (Steueralgorithmen).

Danach erfolgt in einem dritten Schritt, in Abhängigkeit der definierten Steuerungs- und Kommunikationsaufgaben sowie aus einem Vergleich mit der aktuell eingesetzten Technik auf dem Einsatzgebiet, die Auswahl der zu verwendenden Komponenten, der Aufbau und der Test der Hardware des Systems.

Der vierte Schritt beinhaltet das Erstellen der Software anhand der oben festgelegten Aufgaben.



**Bild 4-1 Methodik zur Auslegung eines steuerungstechnischen Systems**

In einem letzten Schritt erfolgt ein Funktionstest des Gesamtsystems. Durch eine Rückkopplung auf den jeweils vorhergehenden Schritt kann eine Optimierung des Systems erreicht und es können Fehler behoben werden [6, 19, 56]. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte für den Anwendungsfall „Laborversuchsstand mit fahrzeugspezifischen Eigenschaften“ aufgezeigt und diskutiert.

#### 4.1.1 Einordnung und Definition der Randbedingungen des auszulegenden Systems

Zunächst ist es notwendig das auszulegende System entsprechend seinem Einsatzgebiet zu klassifizieren. Dies bildet neben den zu definierenden Randbedingungen die Grundlage der Auslegung. Speziell bei der Auswahl der einzelnen Hardwarekomponenten spielt diese Einordnung eine große Rolle. Ziel ist es, ein für den Anwendungsfall spezifisches steuerungstechnisches System zu entwerfen.

Insbesondere ist auf die technische und wirtschaftliche Durchführbarkeit zu achten. Zu diesem Zweck empfiehlt sich zu Anfang eine Machbarkeitsanalyse, auf diese hier bewusst verzichtet wird, da die Steuerung für ein vorhandenes System ausgelegt werden soll und deshalb von der Realisierbarkeit ausgegangen wird [6, 61].

##### *Einordnung des Systems*

Ein wichtiger Punkt ist das spezifische Einsatzgebiet des steuerungstechnischen Systems.

Bei dem zu realisierenden Laborversuchsstand spielen vor allem die Umsetzung der Fahreigenschaften und verschiedene Fahrsicherheitssysteme eine Rolle. Die Eigenschaften eines realen Fahrzeugs werden durch die Baugruppe Kfz-Antrieb möglichst detailgetreu nachgebildet. Eine genaue Beschreibung des Versuchstandes folgt in Kapitel 5.

Die Belastungsmaschinen haben die Aufgabe, auftretende Gegenkräfte zu simulieren. Ein wichtiger Punkt an dieser Stelle ist die Trennung der beiden Systeme. Eine Kopplung darf nur über die Kombination Antriebsrad - Belastungswalze erfolgen.

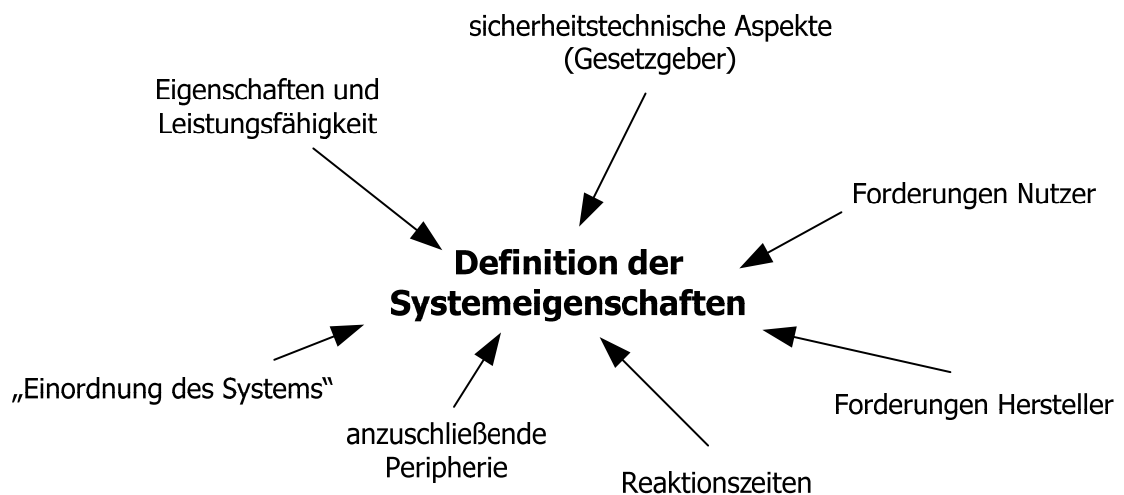
Vor allem die Eigenständigkeit der Steuerung der Kfz-Antriebe soll den Bezug zu einem realen Kfz gewährleisten. Dies soll sich auch in den auszulegenden Steuerungen widerspiegeln.

Das auszulegende steuerungstechnische System besteht somit aus zwei getrennten Steuerungen und den zugehörigen Bussystemen für Kfz-Antrieb und Belastungsmaschinen. Es ist ein Mehrmotorenantriebssystem mit fahrzeugspezifischen Eigenschaften zu entwerfen.

### *Randbedingungen des auszulegenden Systems*

Die Randbedingungen legen die Grenzwerte des steuerungstechnischen Systems fest und bilden eine Grundlage für die im Weiteren zu definierenden Steuerungs- und Kommunikationsaufgaben.

Basis bei der Festlegung der Randbedingungen sind im vorliegenden Fall unter anderem die Betrachtungen zu den Grundlagen der Fahrdynamik in Kapitel 3.1, sicherheitstechnische Aspekte in Bezug auf die umzusetzenden Fahrsicherheitssysteme und die Forderungen von Nutzer und „Hersteller“. Bild 4-2 zeigt wichtige Aspekte bei der Definition der Randbedingungen. Je nach Anwendungsfall ergeben sich abweichende Forderungen.



**Bild 4-2 Einflussfaktoren auf das auszulegende System**

Im Folgenden werden die einzelnen Unterpunkte in Bezug auf das auszulegende System betrachtet.

#### *sicherheitstechnische Aspekte*

Hierbei spielen unterschiedliche sicherheitstechnische Gesichtspunkte eine Rolle. Der Gesetzgeber verlangt für den Kfz-Bereich das Einhalten verschiedenster Sicherheitsvorschriften, beispielsweise die redundante Ausführung sicherheitsrelevanter Komponenten.

Da dieser Laborversuchsstand kein Fahrzeug darstellt, sondern lediglich der Untersuchung und der Umsetzung fahrzeugspezifischer Eigenschaften zu Simulationszwecken dient, werden die vorgenannten Sicherheitsvorschriften nicht voll-

ständig implementiert, wesentlich ist hier die Untersuchung des Funktionsprinzips.

Die entsprechenden Sicherheitsbestimmungen für den Bereich der elektrischen Antriebe werden durch die verwendeten Standardumrichter, siehe Kapitel 3.3, gewährleistet und sind nicht durch die zu entwerfenden Steuerungen zu realisieren. Die geforderte Umsetzung der Fahrsicherheitssysteme, beispielsweise ABS und ASR, wird in der Steuerung der Kfz-Antriebe implementiert, weiteres siehe unten.

#### *Eigenschaften und Leistungsfähigkeit*

Mit dem Laborversuchsstand soll die Möglichkeit der simulativen Untersuchung des Fahrverhaltens, insbesondere der Funktionsfähigkeit von Fahrsicherheitssystemen, von Kfz geschaffen werden. Fahreigenschaften werden in immer stärkeren Maße durch Fahrsicherheitssysteme geprägt, siehe Kapitel 3.1.5. Diese müssen zu Beginn der Auslegung bekannt sein, um entsprechend notwendige Sensoren und eine zu implementierende Peripherie vorzusehen. Alle Betrachtungen zu diesem Thema sind im Kapitel 3.1 behandelt und sollen an dieser Stelle nicht näher dargestellt werden.

#### *Interessen von Nutzer und Hersteller*

Bei der Definition des auszulegenden Systems müssen die Vorstellungen von Hersteller und Benutzer beachtet werden, in dem vorliegenden Fall sind beide identisch. Ziel ist es, ein möglichst einfach zu bedienendes System mit der Möglichkeit zur Modifikation der verwendeten Steueralgorithmen zu entwickeln.

Bei den folgenden Betrachtungen werden die Randbedingungen für den Laborversuchsstand in den Bereich Kfz-Antrieb und den Bereich Belastungsmaschine aufgeteilt.

#### *Reaktionszeiten*

Der Bereich der Reaktionszeiten der Steuerungen im Kfz reicht je nach Aufgabengebiet vom einstelligen bis in den dreistelligen Millisekundenbereich. Die hier zu realisierende Steuerung zählt in den Bereich Sicherheit und Antriebsstrang, siehe auch Kapitel 3.2.1. Daraus ergeben sich für die hier auszulegen-



den Steuerungen Verarbeitungszeiten im einstelligen Millisekundenbereich, die Kommunikation darf die Übertragungszeit nicht wesentlich vergrößern.

Die maximalen Reaktionszeiten der Belastungsmaschinen sind weniger relevant und liegen im Bereich von 10 bis 30 ms.

### *Peripherie*

Im vorliegenden Fall erfolgt die Vorgabe der Sollwerte des Kfz-Antriebs, für Antriebs- und Bremsmoment, über zwei Potentiometer. Parallel dazu kann eine fest definierte Sollwertquelle, beispielsweise einen Funktionsgenerator, die Sollwertvorgabe realisieren.

Die Kommunikation Steuerung - Umrichter kann über verschiedene Bussysteme erfolgen. Ein Datenaustausch mit der Steuerung der Belastungsmaschinen ist vorzusehen. Die Steuerung der Belastungsmaschinen benötigt die Drehzahlwerte der Kfz-Antriebe als Eingangssignal, weiterhin müssen verschiedene Parameter innerhalb der Steueralgorithmen veränderbar sein. Die Kommunikation Gleichrichter - Motor erfolgt über ein Bussystem.

Weitere relevante Systemeigenschaften können je nach Anwendungsgebiet und Zielstellung ergänzt werden.

An dieser Stelle folgt eine Zusammenfassung der grundlegenden umzusetzenden Systemeigenschaften:

### *Systemeigenschaften der Kfz-Antriebe:*

- Umsetzen der Momentvorgabe für die Kfz-Antriebe
- Realisieren der Fahrsicherheitssysteme (z. B. ABS, ASR)
- Reaktionszeiten unterhalb von 10 ms
- kompakter Aufbau, da möglicher Einsatz im Kfz
- Kommunikation Umrichter - Steuerung
- Datenübergabe an die Steuerung der Belastungsmaschinen

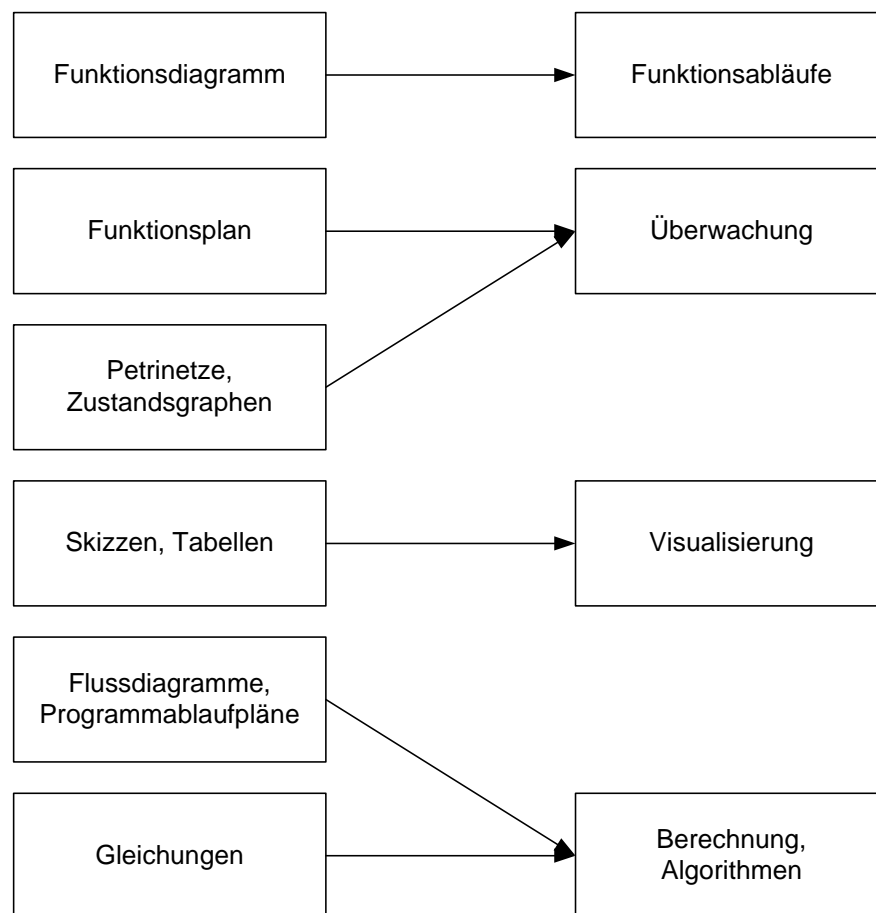
### *Systemeigenschaften der Belastungsmaschinen:*

- Vorgabe der Steueralgorithmen für die Belastungsmaschinen
- Reaktionszeiten im Millisekundenbereich
- einfache Änderung der Steueralgorithmen durch Nutzer
- Parameteränderung innerhalb der Steueralgorithmen durch den Nutzer
- Kommunikation Gleichrichter - Steuerung
- Datenempfang von der Steuerung der Antriebsmaschinen

#### 4.1.2 Definition der Steuerungs- und Kommunikationsaufgaben

Für die Definition der Steuerungsaufgaben stehen zahlreiche Methoden zur Verfügung, die Wahl hängt sowohl von der zu lösenden Steuerungsaufgabe als auch von den Erfahrungen des Konstrukteurs ab. Wichtige Verfahren sind Funktionsdiagramme, Funktionspläne, Zustandsgraphen, Petrinetze und Programmablaufpläne, auf die in dieser Arbeit zurückgegriffen wird.

Bei der Auswahl einer geeigneten Vorgehensweise ist besonders eine verständliche Beschreibung der Steuerungsaufgabe wichtig. Bild 4-3 zeigt die Eignung verschiedener Entwurfsmethoden für unterschiedliche Einsatzgebiete [20, 26]. Keine Methode kann dabei universell für den Entwurf aller steuerungstechnischen Aufgaben eingesetzt werden.



**Bild 4-3** Beschreibungsformen für steuerungstechnische Aufgaben und deren Eignung

Zur Umsetzung der vorhandenen Steueralgorithmen und der umfangreichen Berechnungen bietet sich eine bevorzugte Verwendung von Programmablauf-

plänen an, besonders dann, wenn Algorithmen schon als Programmablaufpläne vorhanden sind.

Nach DIN 66001 wird in einem Programmablaufplan die Reihenfolge der Datenverarbeitung innerhalb eines Programms dargestellt, ohne die einzelnen Daten dabei aufzuzeigen [13].

Anhang 1 zeigt den Steueralgorithmus der Belastungsmaschinen und Anhang 2 den Steueralgorithmus der Kfz-Antriebe, beide sind als Programmablaufplan ausgeführt. Bis auf kleine Modifikationen entsprechen diese den in [50] entwickelten Algorithmen, die Umsetzung wird in Kapitel 4 ausführlich erläutert.

### 4.1.3 Auswahl der Komponenten

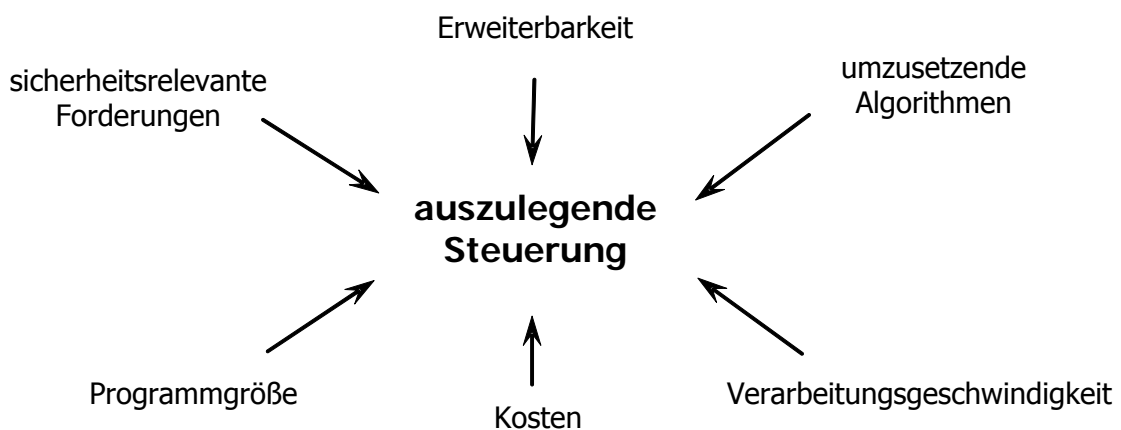
Unter Berücksichtigung der umzusetzenden Steuerungs- und Kommunikationsaufgaben und des Standes der Technik auf dem Einsatzgebiet des auszulegenden Systems, erfolgt an dieser Stelle die Auswahl der einzusetzenden Komponenten. Dazu gibt Kapitel 3.2 einen kurzen Einblick in den Stand der Technik auf dem Gebiet der Kfz-Steuerungen und der Bussysteme.

Die Komponentenauswahl gliedert sich in den Entwurf der Steuerung für die Kfz-Antriebe und die Steuerung für die Belastungsmaschinen. Weiterhin müssen die zu verwendenden Bussysteme definiert werden.

#### 4.1.3.1 Die Steuerungen

Bild 4-4 zeigt wichtige Kriterien, die bei der Auswahl einer Steuerung im allgemeinen berücksichtigt werden müssen.

Eine Übersicht zu typischen Steuerungen auf dem jeweiligen Einsatzgebiet geben Betrachtungen zum Stand der Technik. Weitere wichtige Punkte sind die Leistungsfähigkeit, die Möglichkeit der Erweiterung der Hard- bzw. Software und die anfallenden Kosten.



**Bild 4-4 Kriterien zur Auswahl der Steuerung**

Nachfolgend wird kurz die Auswahl der Steuerung und des Bussystems für den Laborversuchsstand aufgezeigt.

Da bei der Auslegung der Steuerungen großer Wert auf eine Trennung zwischen Antriebs- und Belastungsmaschine gelegt wird, werden diese auch einzeln behandelt.

### *Die Steuerung des Kfz-Antriebs*

Als Steuerungen im Kfz-Bereich kommen vorrangig dezentrale Steuerungen zum Einsatz, insbesondere Mikroprozessoren, siehe Kapitel 3.2.1. Die Reaktionszeiten liegen bei dem hier geforderten Einsatzgebiet unterhalb von 10 ms. Somit muss die Verarbeitungsgeschwindigkeit der einzusetzenden Steuerung dementsprechend niedriger sein, um unter Berücksichtigung der Übertragungszeiten auf die geforderte Latenzzeit zu kommen.

Ein Kfz beispielsweise legt bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h innerhalb von 10 ms einen Weg von ca. 0,3 m zurück. Die Totzeit eines Menschen ist sehr unterschiedlich und liegt zwischen 140 ms und 200 ms. Bei den oben angegebenen Reaktionszeiten einer Steuerung erfolgt eine Rückwirkung des Kfz für den Fahrer somit scheinbar sofort [35].

Die geforderten Parameter werden durch verschiedene Komponenten erreicht. Zur Auswahl stehen beispielsweise vorgefertigte Boards mit Mikroprozessoren oder digitalen Signalprozessoren (DSP), aber auch der Einsatz konventioneller Steuerungen wie der SPS ist denkbar. Wobei letztere, vor allem die Erweiterbarkeit und Programmierbarkeit betreffend, bestens geeignet ist. Nachteilig sind die Kosten mit denen dies erkaufte wird, auch der Einsatz im Kfz ist für diese Art der Steuerung unüblich.

Vorgefertigte Platinen mit Mikroprozessoren und DSPs eignen sich hinsichtlich fast aller Parameter bestens als Steuerung im Kfz-Bereich. Eine Erweiterung durch verschiedene Komponenten ist bei entsprechenden Kenntnissen einfach möglich und die Kosten liegen weit unter denen konventioneller Steuerungen. Eine spätere Umsetzung im Kfz, beispielsweise als ASIC, ist nach einer erfolgreichen Testphase möglich. Auch ein Vergleich mit dem Stand der Technik zeigt, dass hier der Einsatz zugeschnittener Mikroprozessorboards dominant ist. Die Wahl fiel aus diesem Grund auf ein DSP-Board der Firma Analog Devices, mehr dazu in 4.2.1.

### *Die Steuerung der Belastungsmaschinen*

Ein bedeutender Gesichtspunkt ist hier die Möglichkeit der einfachen Modifikation der Algorithmen und eine einfache Einbindung in das bestehende System. Aus diesem Grund ist der Einsatz einer konventionellen Steuerung vorzuziehen. Somit entfällt der Entwicklungsaufwand, eine Einarbeitung ist leicht und gut nachvollziehbar.

Auch hier stehen verschiedene Steuerungen zur Auswahl, z. B. leistungsfähige Speicherprogrammierbare Steuerungen oder PC-basierte Lösungen.

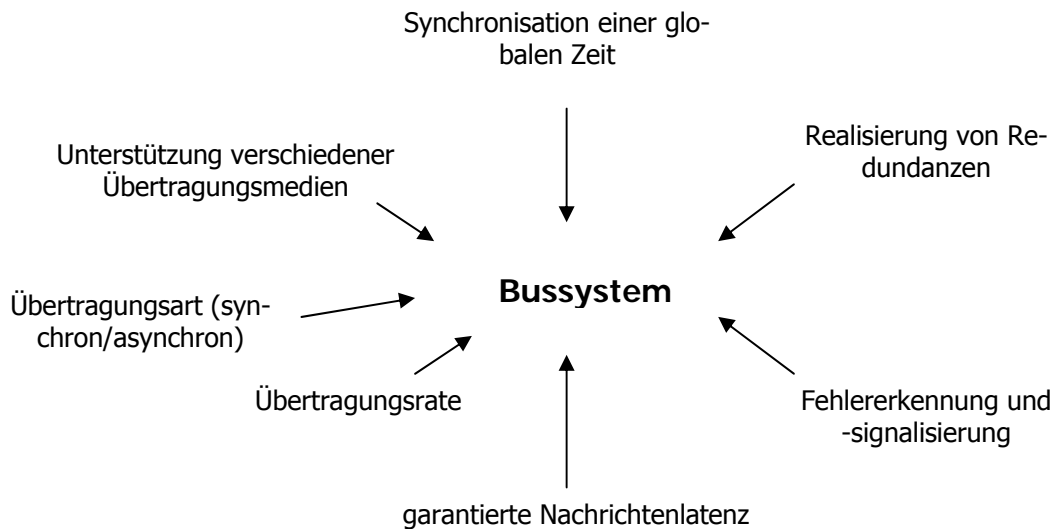
Eine kosteneffiziente Variante, auf die zurückgegriffen wird, ist die Verwendung einer reinen Softwarelösung, LabVIEW. Speziell die Modifikation der implementierten Steueralgorithmen ist durch diese Lösung einfach durchführbar.

Die Möglichkeit einer Hardwareerweiterung ist allerdings an die Peripherie des PC gekoppelt.

#### *4.1.3.2 Der Bus*

Wie aus Kapitel 3.2.2 ersichtlich wird, werden zur Vernetzung im Kfz meist Bussysteme eingesetzt, somit ist der Anschluss mehrerer Komponenten ohne Probleme möglich. Vorherrschend ist dabei der CAN-Bus. Bild 4-5 zeigt die Forderungen an ein Bussystem im Hinblick auf den Einsatz im Kfz. Dies und ein Vergleich mit dem Stand der Technik zeigen die verschiedenen Möglichkeiten für eine Realisierung auf. Um den heutigen Ansprüchen an Geschwindigkeit und Datenmenge zu entsprechen, erfolgt der parallele Einsatz mehrerer Bussysteme. Damit auch in Zukunft die steigenden Forderungen bewältigt werden, müssen immer leistungsfähigere Systeme entwickelt werden, Beispiele sind der weiter unten vorgestellte TTP-Bus und Flexray [52].

Bei dem zu realisierenden Bussystem spielen vor allem ein möglichst flexibles Übertragungsprotokoll, eine einfache Integration in das bestehende System und geringe Kosten eine Rolle. Für die eingesetzten Stromrichter gibt es Module für den PROFIBUS, CAN-Bus und für die RS485-basierte Kommunikation. Unter Beachtung der Kosten und des Entwicklungsaufwandes soll hier auf die RS485 zurückgegriffen werden. Die Implementierung eines Standardbusses ist jederzeit einfach möglich.



**Bild 4-5 Anforderungen an ein Bussystem**

### *Die RS485*

Bei der RS485 handelt es sich um eine hochperformante Schnittstelle zu einem seriellen Bus, eine genaue Beschreibung erfolgt in EIA RS-485. Die Übertragungsrate liegt bei einer maximalen Länge von 500 m bei bis zu 1 MBit/s, gleichzeitig ist der Anschluss von maximal 32 Teilnehmern möglich. Je nach Übertragungsart ist eine Verbindung über eine 2- oder 4-Draht-Leitung möglich [47].

Ein Vergleich zum CAN-Bus zeigt, dass bezüglich der Hardware kaum ein Unterschied besteht. Bei beiden handelt es sich um einen differentiellen Bus, Übertragungsgeschwindigkeit und maximale Teilnehmerzahl sind identisch. Der wesentliche Unterschied ist das Protokoll, im Gegensatz zum CAN-Bus definiert die RS485 nur die Hardware. Das zu verwendende Protokoll kann anwenderspezifisch erstellt werden. Dies ist auch der Hauptgrund für die Auswahl der RS485 als einzusetzender Bus [47].

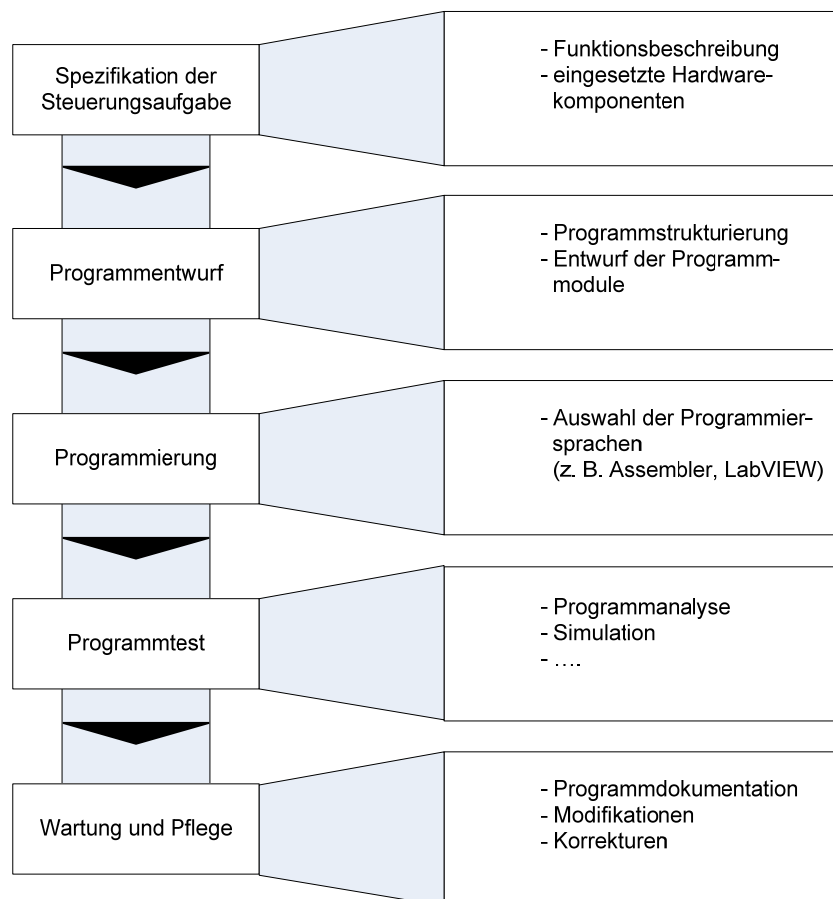
Nach der Auswahl der Hardware des steuerungstechnischen Systems wird im folgenden Kapitel kurz auf die Entwicklung und Dokumentation der Software eingegangen.

#### 4.1.4 Programmerstellung und Funktionstest

Wichtig in der Entwurfsphase ist eine gute Strukturierung und Dokumentation der zu entwickelnden Software, insbesondere durch eine Untergliederung in Module. Aus den vorhandenen Steueralgorithmen werden Programmablaufpläne abgeleitet, diese bilden die Grundlage der Programmentwicklung.

Die Umsetzung orientiert sich dabei am klassischen „Wasserfallmodell“ der Softwaretechnik ausgehend von den in 4.1.2 definierten Steuerungsaufgaben und der ausgewählten Steuerungshardware, siehe Bild 4-6.

Die verschiedenen Abschnitte der Softwareentwicklung können dabei niemals getrennt betrachtet werden, sie stellen lediglich idealisierte Einzelmodule dar. Eine iterative Verfeinerung der Softwarekomponenten kann durch mehrmaliges Durchlaufen einzelner Abschnitte erreicht werden [26, 37].



**Bild 4-6 Phasen der Programmentwicklung**

Abschließend erfolgt ein Funktionstest des Gesamtsystems, ein festdefiniertes Vorgehen ist wichtig, um eine Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Getestet wird das Einhalten der definierten Steuerungs- und Kommunikationsaufgaben



und die ordnungsgemäße Funktion der Hardware. Eventuell sind Korrekturen der Hard- bzw. Software notwendig.

Eine Möglichkeit ist der Test einzelner Komponenten in Form einer Hardware-in-the-loop Realisierung. Es werden elektronische oder mechanische Komponenten über eine Schnittstelle mit einer Computer-Simulation verbunden.

Beispielsweise können über einen PC Daten an eine zu testende Kommunikationsschnittstelle geschickt und so deren Funktion getestet werden.

Insbesondere die Komplexität der Entwicklungsaufgabe begründet diese Vorgehensweise. Vorteil sind reproduzierbare Testabläufe, die auch kritische Systemzustände enthalten können. Auch eine Optimierung des Gesamtsystems kann so bereits in einem frühen Entwicklungsstadium vorgenommen werden. Hierdurch werden Kosten für Prototypen gespart und die Entwicklungszeit kann verringert werden [32].

## ***4.2 Steuerungssystem des Laborversuchsstandes***

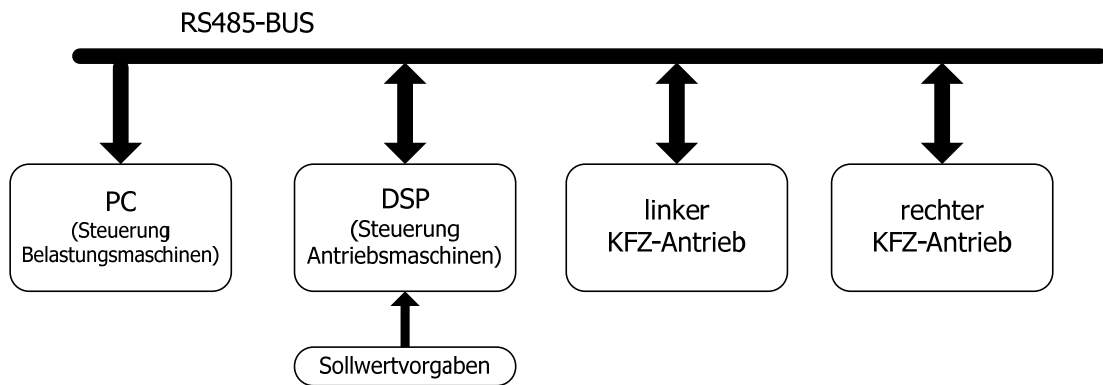
Ein Schwerpunkt der Arbeit ist die Auslegung der Steuerungen für die Antriebs- und die Belastungsmaschinen, die Auswahl und Implementierung der notwendigen Komponenten sowie die der zu verwendenden Kommunikationsschnittstellen. Grundlage bilden dabei die Ausführungen aus Kapitel 3. Im Folgenden werden zwei verschiedene Lösungsansätze aufgezeigt.

Im Gegensatz zum Einsatz von ASICs, siehe Kapitel 3.2.1, wird hier eine Standard-Testplatine eingesetzt, diese ermöglicht eine einfache Erweiterung des Versuchsaufbaus bei vergleichsweise niedrigen Kosten. Nach erfolgreicher Umsetzung ist die Implementierung als ASIC einfach möglich. Diese rechnet sich allerdings erst bei entsprechend hohen Stückzahlen, wie sie im Automobilbau erreicht werden.

Eine zweite Lösung basiert auf der Verwendung eines Standard-PC, die Software LabVIEW übernimmt die steuerungstechnischen Aufgaben. Die umgesetzten Algorithmen können einfach durch Änderung des LabVIEW-Programms erreicht werden. Bei dieser Lösung handelt es sich um eine Art Hardware-in-the-loop Realisierung, siehe auch Kapitel 4.1.4. Das Antriebssystem wird über eine Schnittstelle - im vorliegenden Fall die RS485 - mit einer Art Computer-Simulation der Steuerung - LabVIEW - verbunden. Somit erhält das Antriebssystem von der virtuellen Steuerung die Sollwertvorgaben. Die verwendete Schnittstelle zur Anbindung an das Antriebssystem ist eine RS485. Hierdurch kann das System auf einfache Weise optimiert und getestet werden.

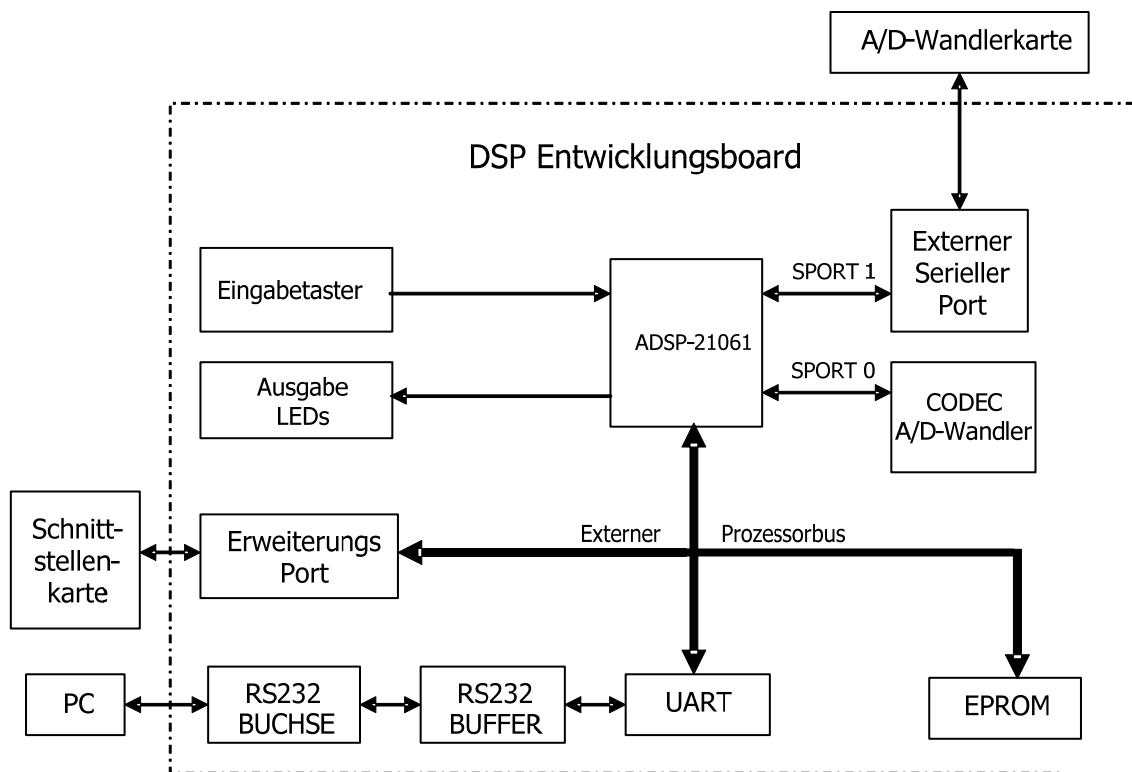
### ***4.2.1 Antriebssteuerung – Variante 1***

Der Profibus und die in 3.3 beschriebene SPS werden im Folgenden durch ein DSP-Entwicklungsboard der Firma Analog Devices mit entsprechender Peripherie und die RS485-Schnittstelle ersetzt, Bild 4-7 zeigt den schematischen Aufbau.



**Bild 4-7 Bussystem und Komponenten der Antriebsmaschinen**

Die Steuerung (DSP) besteht dabei aus dem DSP-Board, einer Schnittstellenkarte (RS485) und einer A/D-Wandlerkarte, siehe Bild 4-8.

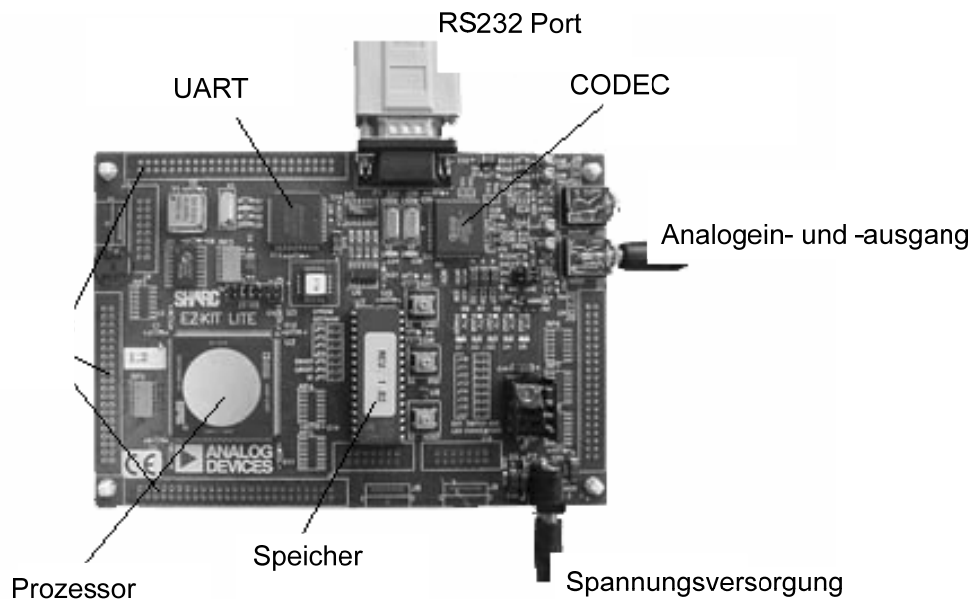


**Bild 4-8 Aufbau der Antriebssteuerung - Variante I**

#### 4.2.1.1 Das DSP-Board

Kernstück ist der digitale Signalprozessor SHARC ADSP-21061 mit einer Taktfrequenz von 40 MHz. SHARC steht hierbei für Super Harvard Architektur und beschreibt ein Schaltungskonzept für besonders schnelle Computer- und Signal-

prozessoren, nachfolgendes Bild zeigt das Board mit seinen einzelnen Komponenten [2, 3].

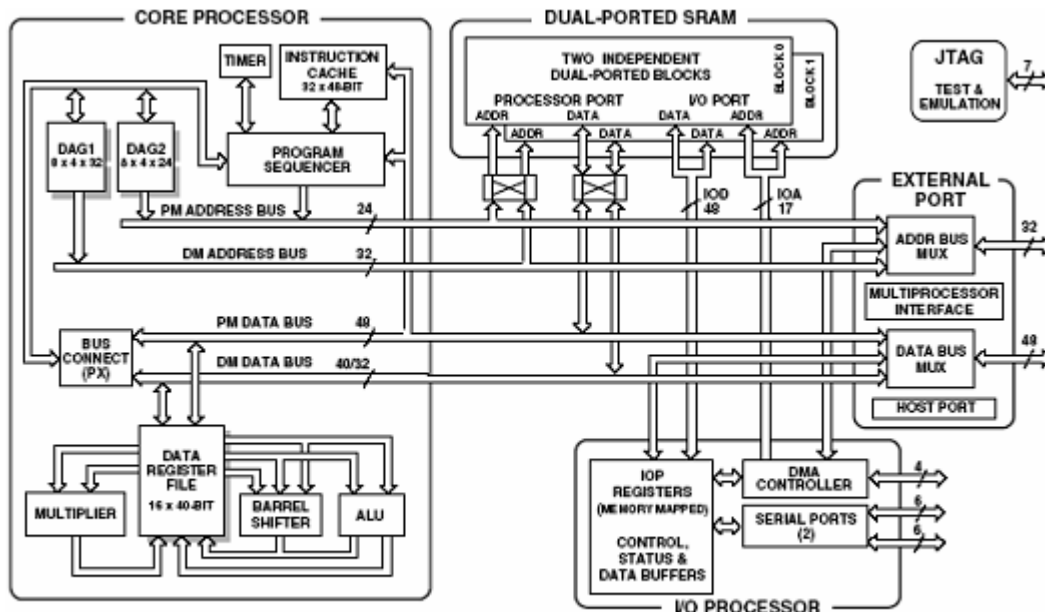


**Bild 4-9 Evaluationsboard ADDU-21061-EZLITE**

Der Programm- und Datenspeicher sind physikalisch getrennt, DUAL Port RAM ermöglicht den gleichzeitigen Zugriff auf beide Speichersegmente, in Bild 4-10 ist der Aufbau des ADSP-21061 schematisch dargestellt. Durch die Trennung von Daten-, Adress- und Programmbus ist das gleichzeitige Ausführen mehrerer Befehle, das so genannte Pipelining, möglich.

Ein wesentliches Merkmal für den Einsatzzweck ist die Fähigkeit des Prozessors, aufwendige Berechnungen wie Multiplikationen in einem Schritt auszuführen. Möglich wird dies durch ein eigens hierfür ausgeführtes Rechenwerk, den Multiplier.

Weitere Komponenten sind: das aus 16 Registern bestehende 40 Bit Speicherwerk (Data Register File) und der Adressgenerator (DAG1), welcher Adressierung des Datentransfers zwischen Speicher und Register File übernimmt. Die doppelte Ausführung gestattet das gleichzeitige Adressieren und Transferieren zweier Operanden.



**Bild 4-10** Blockschaltbild ADSP-21061

Eine Interruptverarbeitungseinheit für externe und interne Quellen stellt drei Eingänge zur Verfügung. Intern werden der Timer, die Multiprozessorsteuerung und die DMA-Kanäle interruptgesteuert. Außerdem führen Ringspeicherüberläufe, Division durch Null und der Stacküberlauf zu entsprechenden Interrupts.

Der intern ausgeführte DPRAM von 1 MBit Größe, ist in zwei Blöcke zu je 512 KBit aufgeteilt. Diese wiederum bestehen aus acht 16 Bit Spalten zu je 4 K pro Zeile. Eine flexible Speicherorganisation erlaubt den Applikationen verschiedene Zugriffsvarianten; 48, 40, 32 und 16 Bit. Durch den ADSP-21061 ist ein Adressraum von 4 GWords ansprechbar, intern von 2000h bis 7FFFh sowie im Bereich von 8 0000h bis 3F FFFFh als Multiprozessorinterface und als externer Speicherbereich von 40 0000h bis FFFF FFFFh. Innerhalb dieses Bereichs können Speichermodule, aber auch externe Peripherien angesprochen werden. Über den External Port werden der Adress- und Datenbus nach außen geführt. Ein als EPROM ausgeführter externer Speicher beinhaltet alle für den Bootvorgang notwendigen Daten, in diesen kann auch die Software der Steuerung abgelegt werden.

Der EXPANSION CONNECTOR, ein UART und ein PROM sind an diesen externen Prozessorbus angeschlossen. Der UART (16550) realisiert das RS232 Interface, welches das DSP-Board mit dem Host-PC verbindet. Über diese Schnittstelle

erfolgt die Programmierung mit der beigelegten Software VisualDSP++. Diese enthält Debugger, Compiler, Assembler, Linker, Bibliotheken, Simulationssoftware und Beispielprogramme [2, 3].

Durch den oben beschriebenen Aufbau, herausgeführte Bussysteme und Steuerleitungen ist eine einfache Implementierung weiterer Komponenten gewährleistet. Die Grundausstattung dieses DSP-Boards ist eine gute Basis für die Programmierung und beinhaltet erste Möglichkeiten zur Signalerfassung, Signalaufbereitung und -ausgabe. Ein weiteres Argument für die Auswahl ist das sehr gute Preis-Leistungs-Verhältnis.

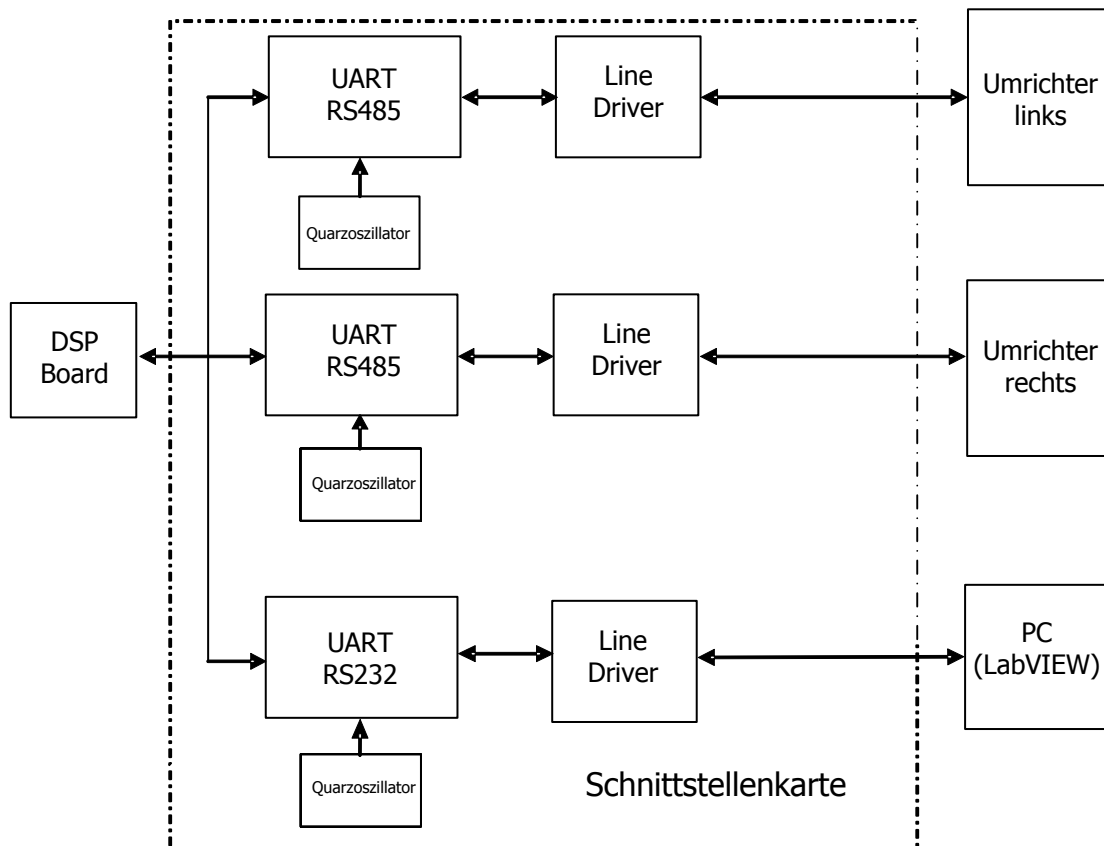
#### *4.2.1.2 Entwicklung der Schnittstelle Steuerung - Antriebe*

Wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben ist die Auswahl der Schnittstelle auf eine RS485 gefallen. Durch sie werden, unter Verwendung der eingesetzten Busmodule UD73 der Wechselrichter, Geschwindigkeiten von bis zu 250 kBit/s im sogenannten High-Speed-Modus erreicht. In Verbindung mit einem speziell entwickelten Busprotokoll werden Übertragungszeiten im einstelligen Millisekundenbereich erreicht ( $< 10$  ms).

Um die Ansteuerung der Umrichter möglichst flexibel zu gestalten, werden auf der Schnittstellenkarte zwei RS485-Schnittstellen implementiert, siehe Bild 4-11. Dies bietet die Möglichkeit die RS485 als Bussystem zu betreiben, siehe Bild 4-7. Gleichzeitig ist eine direkte Verbindung zwischen DSP und den einzelnen Umrichtern möglich. Dadurch können auch bei geringeren Bitraten der Schnittstelle Übertragungszeiten im unteren Millisekundenbereich erreicht werden.

Über eine ebenfalls implementierte RS232-Schnittstelle können Daten des DSPs an einen PC übertragen werden. Die RS232 ist als Standardschnittstelle Bestandteil eines jeden PC und ist bis auf die verwendeten Spannungspegel der RS485 sehr ähnlich. Jede dieser drei Schnittstellen besteht grundlegend aus einem UART, einem Quarzoszillator und einem Line Driver, siehe Bild 4-11.

Der Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) ist ein elektronischer Baustein, der die vom DSP parallel kommenden Daten in serielle Daten für die jeweilige Schnittstelle umwandelt bzw. die Umwandlung in der entgegengesetzten Richtung übernimmt.



**Bild 4-11 Aufbau der Schnittstellenkarte**

Der Quarzoszillator liefert die zur Einstellung der gewünschten Übertragungsrates notwendige Frequenz.

Abschließend bereitet ein so genannter Line Driver die Spannungspegel des Signals entsprechend der Schnittstellennorm und der erforderlichen Leistung für den Busbetrieb auf.

Die Anbindung des UARTs an den DSP erfolgt über Daten-, den Adressbus und Steuerleitungen. Somit kann der UART direkt über eine Speicheradresse des DSP angesprochen werden.

#### *Das anwenderspezifische Übertragungsprotokoll*

Der Vorteil eines anwenderspezifischen Datenprotokolls ist, dass dieses speziell auf die Anwendung zugeschnitten ist und dementsprechend ein möglichst geringer Datenoverhead erreicht werden kann. Das hier eingesetzte Protokoll wird in den durch UART und Übertragungsmodul der Umrichter vorgegebenen Datenrahmen einsortiert.

Dieser besteht, bei dem gewähltem Übertragungsmodus aus:

- 1 Startbit
- 8 Datenbits
- 1 Stopbit

Das eingesetzte Protokoll wird in diesen Byteweise einsortiert und sieht in der aktuellen Version wie folgt aus:

*Sendereihenfolge DSP → Umrichter*

- 1. Header (2 Byte)
- 2. Adresse des Umrichters (1 Byte)
- 3. Steuerwort des Umrichters (2 Byte)
- 4. Momentvorgabe des Umrichters (2 Byte)
- 5. Drehzahlgrenze des Umrichters (2 Byte)

*Sendereihenfolge Umrichter → DSP*

- 1. Header (2 Byte)
- 2. Adresse des Umrichters (1 Byte)
- 3. Statuswort des Umrichters (2 Byte)
- 4. Momentwert des Umrichters (2 Byte)
- 5. Drehzahlwert des Umrichters (2 Byte)

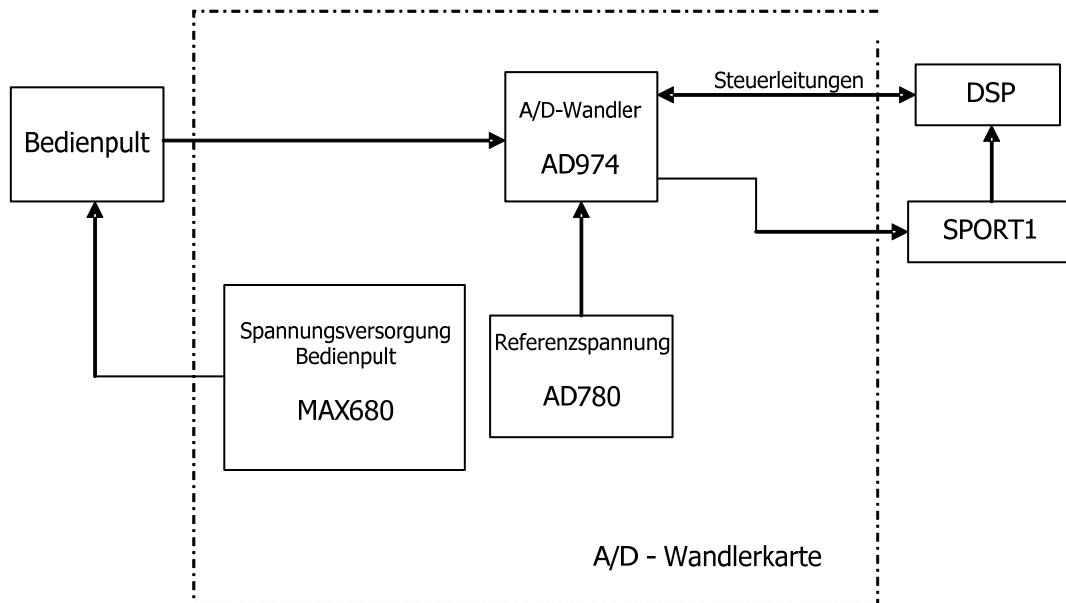
Der Header ermöglicht DSP und Umrichter eine eindeutige Zuordnung der übertragenen Werte. Im Umrichter übernimmt ein in das Übertragungsmodul implementiertes DPL-Programm (**Drive Programming Language**) die Zuordnung der übertragenen Werte zu den jeweiligen Parametern des Umrichters. Das Auslesen im DSP und die Zuordnung der übertragenen Parameter wird in 4.2.1.4 kurz erläutert.

*4.2.1.3 Die A/D-Wandlerkarte*

Zur Vorgabe eines Antriebs- bzw. Bremsmoments kann durch zwei Potentiometer ein dem gewünschten Moment entsprechender Spannungswert vorgegeben werden. Damit der DSP diese verarbeiten kann, müssen die Werte abgetastet und digitalisiert werden. Hierfür wurde eine A/D-Wandlerkarte entwickelt. We-



sentlicher Bestandteil ist der A/D-Wandler AD974 mit zugehöriger Referenzspannungsquelle AD780 und dem Spannungsversorgungsbaustein MAX680, der schematische Aufbau ist in Bild 2-1 zu sehen.



**Bild 4-12 Aufbau der A/D-Wandlerkarte**

Der AD974 ist ein in CMOS aufgebauter schneller A/D-Wandler der Firma Analog Devices. Durch einen Eingangsmultiplexer können vier Kanäle erfasst werden von denen alle ausgeführt sind, hier werden nur zwei verwendet.

Die Anbindung an den DSP erfolgt über dessen serielle Schnittstelle SPORT1, die speziell für den Anschluss externer Geräte konzipiert ist. Über verschiedene Steuerleitungen des DSP erfolgt die Ansteuerung des A/D-Wandlers.

Der eingesetzte A/D-Wandler gestattet eine Samplerate von 200 kS/s, woraus sich eine Konversionszeit von 5  $\mu$ s ergibt. Dies liegt weit unter der geforderten Reaktionszeit. Der A/D-Wandler hat eine Auflösung von 16 Bit, dadurch kann die eingelesene Spannung genauer erfasst werden, als die von den Umrichtern gelesenen Sollwertvorgaben dies benötigen.

#### 4.2.1.4 Das DSP-Programm

Innerhalb des Hauptprogramms werden im Wesentlichen keine Befehle abgearbeitet. Der DSP arbeitet größtenteils im Leerlauf (Low-Power-Zustand), d. h. er reagiert lediglich auf externe Ereignisse. Um reagieren zu können, ist der Prozessor mit einem Interruptsystem ausgestattet, somit kann er auf Ereignisse, die durch den Interruptcontroller erfasst werden, definierte Programmrouninen

starten. Solche Ereignisse kommen beispielsweise von der angeschlossenen Hardware. Ein UART meldet, dass er Daten empfangen hat.

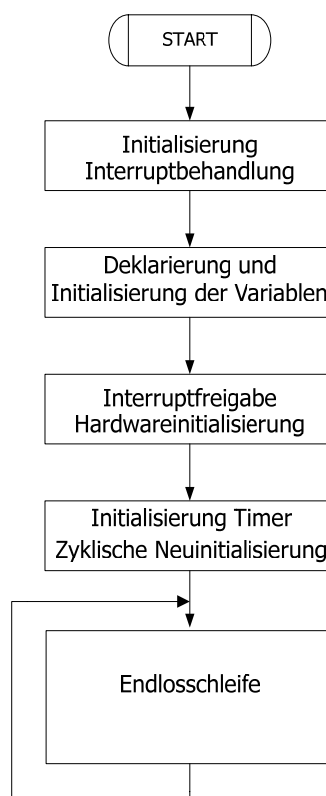
Im Falle eines solchen Interrupts wird ein entsprechender Programmablauf gestartet. Nach dessen Abarbeitung geht der DSP wieder in den vorherigen Low-Power-Zustand. In Assembler kann ein Hauptprogramm wie folgt aussehen:

**schleife:**

**idle;**

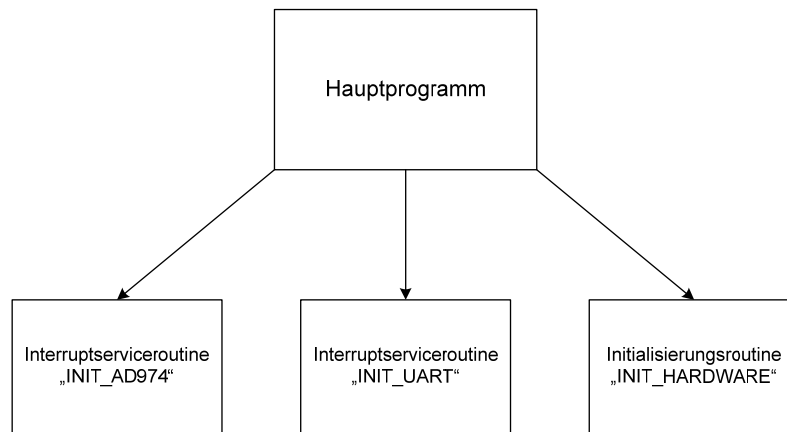
**jump schleife**

Der gesamte Aufbau des Programms ist in Bild 4-13 dargestellt.



**Bild 4-13 Programmablaufplan des Hauptprogramms**

Am Anfang stehen die Initialisierung der Interruptbehandlung, die Deklarierung der Konstanten und Variablen sowie die Initialisierung der angeschlossenen Peripheriegeräte. Innerhalb einer Endlosschleife ist das Hauptprogramm zu finden, siehe Bild 4-13. Das Hauptprogramm wartet auf einen Interrupt und springt nach einem solchen je nach Interruptquelle in eine vorgegebene Interruptserviceroutine. Der Ablauf der verschiedenen Routinen wird im Weiteren kurz vorgestellt. Bild 4-14 zeigt den Aufbau des Steuerungsprogramms schematisch.



*Unterprogramme*

Referenzdrehzahl  
Antriebs-Schlupf-Regelung  
Antiblockiersystem

**Bild 4-14 Ablauf des DSP-Programms**

### Interruptserviceroutine „INT\_AD974“

Ein vollständiger Programmablaufplan der Interruptserviceroutine ist im Anhang 6 zu finden.

Der Einsprung in diese Routine erfolgt durch einen vom A/D-Wandler ausgelösten Interrupt. In dieser Routine werden die Eingangsspannungen des A/D-Wandlers eingelesen, für die Weiterverarbeitung ausgewertet und normiert. Weiterhin erfolgt die Vorgabe der Antriebs- bzw. Belastungsmomente nach den Gleichungen (4-1) und (4-2).

$$M_A = M_{\max} \cdot \left( 1 - e^{-\left(\frac{x}{k}\right)} \right) \quad (4-1)$$

$$M_{Br} = (V_B \cdot x) + b \quad (4-2)$$

Das Antriebsmoment  $M_A$  bildet hier beispielhaft ein nichtlineares Verhalten der Kfz-Antriebe in Abhängigkeit von der Gaspedalstellung  $x$  nach.

Die Vorgabe eines Bremsmomentes  $M_{Br}$  wird als linearer Zusammenhang in Abhängigkeit von der Bremspedalstellung  $x$  und eines Verstärkungsfaktors  $V_B$  realisiert. Über den Faktor  $b$  wird ein Bremsspiel vorgegeben. Die hier aufgezeigten Formeln beziehen sich nur auf die angetriebene Achse des Fahrzeugs. Für die

zweite Achse eines Allradfahrzeugs gelten dieselben Formeln mit abweichenden Faktoren. Wichtig ist es, eine ausreichende Fahrstabilität zu erreichen [50].

Die unterschiedliche Interpretation der Gas-/Bremspedalstellung bietet die Möglichkeit einer Anpassung der übertragenen Momente an die aktuelle Geschwindigkeit oder erlaubt eine Reaktion auf das unterschiedliche Fahrverhalten verschiedener Personen. Außerdem kann dadurch Einfluss auf die Fahrsicherheitssysteme genommen werden.

Des Weiteren wird die zur Realisierung der Fahrsicherheitssysteme ABS und ASR benötigte Referenzdrehzahl berechnet.

Die Fahrsicherheitssysteme ABS und ASR werden auch innerhalb dieser Routine realisiert. Hierzu werden die entsprechenden Unterprogramme Antriebs-Schlupf-Regelung bzw. Antiblockiersystem aufgerufen und gegebenenfalls eine Korrektur des jeweiligen Moments vorgenommen.

#### *Unterprogramm Referenzdrehzahl*

Für die Realisierung von ASR und ABS wird eine so genannte Referenzdrehzahl  $n_{\text{ref}}$  benötigt, diese entspricht falls die Drehzahlen beider Antriebe innerhalb definierter Grenzen für die Beschleunigung bzw. Verzögerung liegen, dem Mittelwert beider Istdrehzahlen. Diese Beschleunigungsgrenzen sind im Initialisierungsteil des Programms definiert.

Die erforderliche aktuelle Winkelbeschleunigung  $\ddot{\alpha}$  kann nach Gleichung (4-3) aus den Drehzahlen beider Antriebe und der Zykluszeit  $T_z$  bestimmt werden.

$$\ddot{\alpha} = \frac{2\pi \cdot (n_1 - n_0)}{T_z} \quad (4-3)$$

Dabei entspricht die Zykluszeit der Konversionszeit des A/D-Wandlers, diese liegt bei 500  $\mu\text{s}$  und damit weit unterhalb der Übertragungszeit DSP - Umrichter.

#### *Unterprogramm Antriebs-Schlupf-Regelung*

Die Antriebs-Schlupf-Regelung verhindert, wie in 3.1.5.2 beschrieben, das Durchdrehen der Räder durch die Regelung des Radschlupfes. Dazu wird der Antriebsschlupf  $\lambda_{A,\text{Rad}}$  der einzelnen Räder gegenüber der Referenzdrehzahl  $n_{\text{ref}}$  ermittelt, siehe Kapitel 3.1.2.3. In Anhang 5 befindet sich ein ausführlicher Programmablaufplan.

Ein Vergleich mit einer vordefinierten Schlupfschwelle  $\lambda_{A,max}$  legt den weiteren Ablauf fest. Ist der ermittelte Schlupfwert oberhalb der Schlupfschwelle, wird das Antriebsmoment korrigiert. Bei einem Antriebsschlupf unterhalb der Schwelle kann das Unterprogramm ohne einen Eingriff in das übermittelte Moment verlassen werden.

#### *Unterprogramm Antiblockiersystem*

Durch die Regelung des Bremsvorganges wird die Fahrstabilität, insbesondere die Steuerbarkeit des Fahrzeugs verbessert, siehe 3.1.5.1. Ein genauer Programmablaufplan ist in Anhang 4 zu finden.

Dieses Unterprogramm wird aktiv, sobald ein Bremsmoment erkannt wird. Der Aufbau ist dem des Unterprogramms Antriebs-Schlupf-Regelung sehr ähnlich. Ein eventuell auftretender Bremsschlupf  $\lambda_{Br, Rad}$  aus der entsprechenden Rad-drehzahl  $n_{Rad}$  und der Referenzdrehzahl  $n_{ref}$  ermittelt, siehe Kapitel 3.1.2.3.

Dieser Bremsschlupf wird mit einer vorgegebenen Bremsschlupfschwelle verglichen, liegt der ermittelte Wert unterhalb der Schwelle kann das Programm ohne Korrektur verlassen werden. Bei einem ermittelten Bremsschlupfwert oberhalb der Schlupfschwelle muss das entsprechende Bremsmoment korrigiert werden [50].

#### Interruptserviceroutine „INT UART“

Im Falle eines Interrupts durch einen UART erfolgt der Aufruf dieser Interruptroutine. Dies geschieht, wenn ein UART Daten empfangen hat oder Daten senden möchte. Der genaue Programmablauf befindet sich in Anhang 7.

Zuerst wird die Interruptquelle ausgewertet. Danach erfolgt je nach Art des Interrupts, Lese- bzw. Schreibinterrupt, die Einordnung. Anschließend wird in die entsprechende Empfangs- bzw. Senderoutine gesprungen, wo die Daten eingelesen bzw. gesendet werden.

Werden Daten empfangen wird der gesamte Telegrammrahmen eingelesen. Die Nutzdaten werden durch die Auswertung des Empfangstelegramms selektiert.

Daten senden bedeutet eine Übergabe der einzelnen Bytes an das Senderegister des UART. Dabei wird der gesamte Telegrammrahmen inklusive Nutzdaten übergeben. Grundlage der Datenübertragung ist das in 4.2.1.2 vorgestellte Übertragungsprotokoll.

### Initialisierungsroutine „INIT HARDWARE“

An dieser Stelle erfolgt die Initialisierung des A/D-Wandlers und der UARTs über ein Beschreiben der Register des seriellen Ports. Der A/D-Wandler ist an den externen seriellen Port des DSP angeschlossen.

Die UARTs werden durch ein Beschreiben ihrer internen Register parametrieren. Dabei werden Baudrate, Wortlänge, Parität, Anzahl der Stopbits und die Behandlung der Interrupts eingestellt, Anhang 8 zeigt den Ablauf schematisch.

### 4.2.2 Die Antriebssteuerung – Variante 2

Die Umsetzung der Steuerung in Variante 2 erfolgt durch eine Softwarelösung der Firma National Instruments, LabVIEW.

LabVIEW ist eine grafische Programmiersprache, anstelle von Textzeilen werden Symbole verwendet, um Applikationen zu erstellen. LabVIEW-Programme werden auch als virtuelle Instrumente (VI) bezeichnet, da sie physische Instrumente nachbilden. Jedes VI kann Eingaben aus einer Benutzeroberfläche oder anderen Quellen, beispielsweise den seriellen Schnittstellen eines PCs, einlesen und verarbeiten. Wesentliche Teile sind die Benutzeroberfläche (Frontpanel) und der grafische Quellcode (Blockdiagramm). Das Frontpanel beherbergt Bedien- und Anzeigeelemente, diese bilden die Ein- und Ausgabeanschlüsse des Programms. Im Blockdiagramm erfolgt die Steuerung der Ein- und Ausgabegrößen unter Verwendung grafischer Funktionen.

LabVIEW erlaubt die Ansteuerung unterschiedlichster Hardware. Für den vorliegenden Fall, sind die seriellen Schnittstellen und ein USB-Messfassungssystem relevant, siehe 4.2.4.

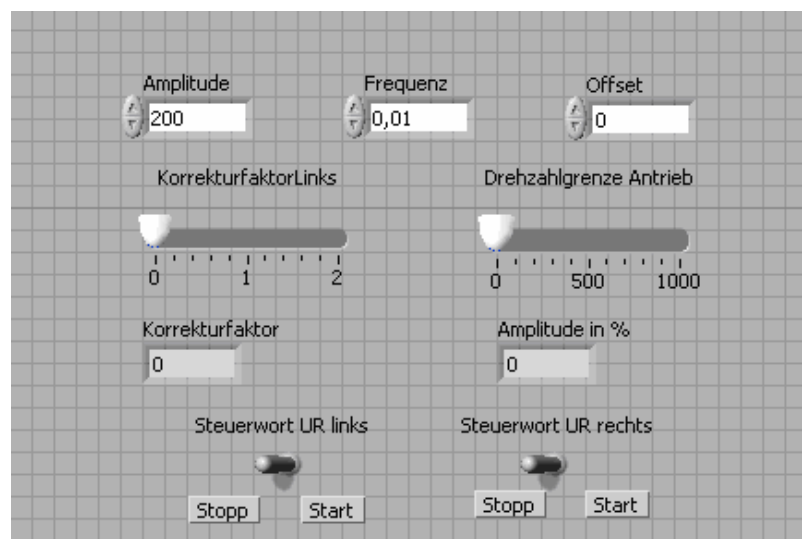
Die Realisierung einer Softwarelösung resultiert aus der Möglichkeit, Änderungen einfacher und übersichtlicher durchzuführen. Insbesondere in der Phase des Aufbaus eines Versuchsstandes werden immer wieder Änderungen in der Struktur der Steueralgorithmen bzw. der Steuerungshardware notwendig. Hierbei zeichnet sich LabVIEW insbesondere wegen seiner Kompatibilität zu verschiedensten Hardwarekomponenten bei einer gleichzeitig einfachen und nachvollziehbaren Programmstruktur aus.

### *Die Anbindung PC – Umrichter*

Die Kommunikation Umrichter – Steuerung erfolgt unter Verwendung des in 4.2.1.2 beschriebenen Telegramms über die RS232-Schnittstelle des PCs. Da es sich bei der Schnittstelle des Umrichters um eine RS485 handelt, ist ein Konverter zwischengeschaltet. Dabei unterstützt der PC eine ausreichend hohe Übertragungsgeschwindigkeit.

### *Das LabVIEW-Programm (Frontpanel und Blockdiagramm)*

Der für den Benutzer des Programms sichtbare Teil besteht aus dem so genannten Frontpanel und wird in Bild 4-15 gezeigt.

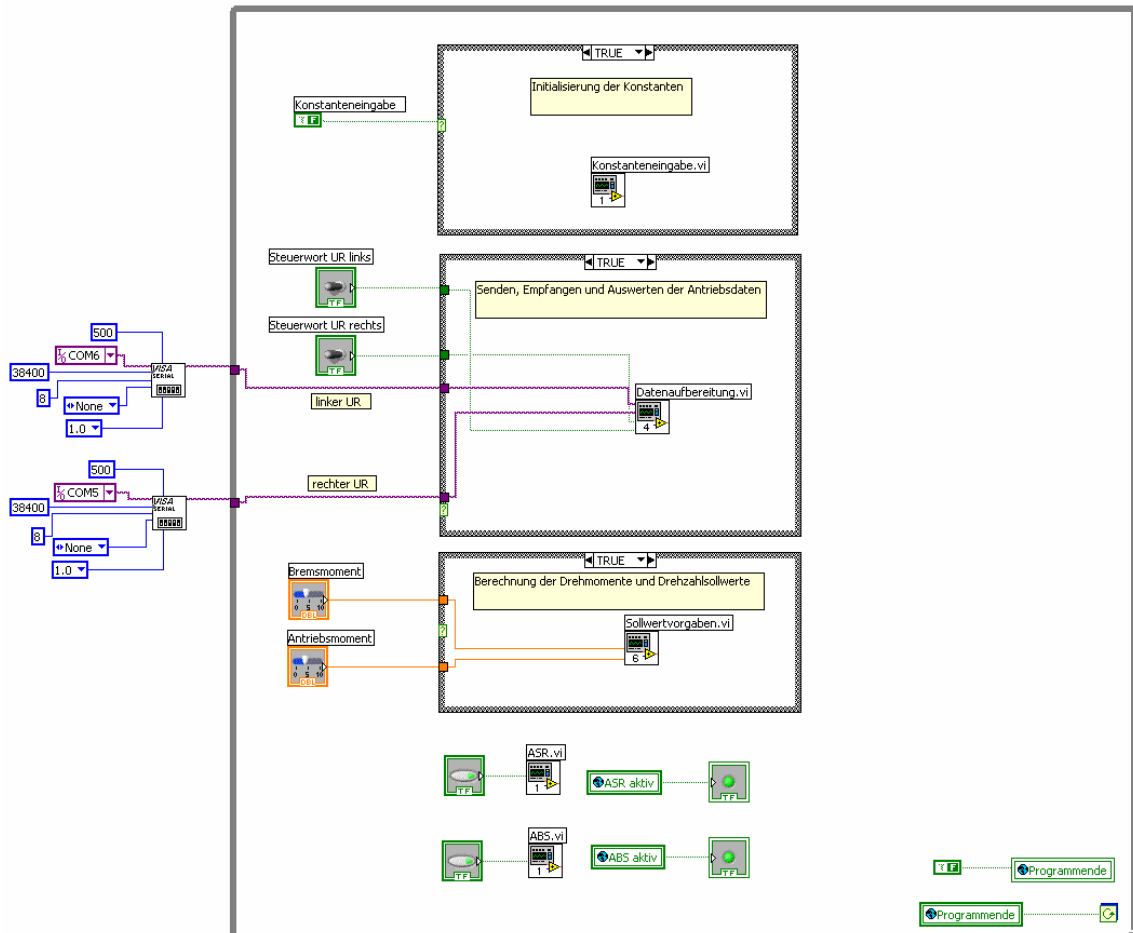


**Bild 4-15 Frontpanel mit Bedienelementen der Antriebssteuerung**

In dem gezeigten Beispiel erlauben die dargestellten Eingabefelder die Vorgabe eines definierten Sinussignals. Zusätzlich kann eine Drehzahlgrenze vorgegeben werden. Über einen Softwareschalter erfolgt die Freigabe der Umrichter, so dass diese die Momentvorgabe verarbeiten können. Zu Testzwecken wurde im aufgezeigten Beispiel die Möglichkeit einer Korrektur des Antriebsmoments implementiert.

Im Blockdiagramm findet die eigentliche Programmierung statt, Bild 4-16 zeigt ein schematisches Beispiel einer Umsetzung. Die Funktion entspricht dem in Anhang 2 gezeigten Steueralgorithmus.

Innerhalb einer While-Schleife erfolgt die Abarbeitung. Die Unterprogramme für die Konstanteneingabe, das Senden und Empfangen der Daten und die Berechnungen der Drehmomente und Drehzahlollwerte sind in SubVIs hinterlegt.



**Bild 4-16 Schematischer Aufbau des Blockdiagramms der Antriebssteuerung**

Durch diesen modularen Aufbau sind Änderungen oder das Austauschen einzelner Komponenten jederzeit einfach möglich.

Auch die Erstellung einzelner SubVIs durch verschiedene Entwickler wird durch eine klare Definition der Schnittstellen zwischen den Modulen möglich.

### 4.2.3 Die Belastungssteuerung

#### 4.2.3.1 *Der Steueralgorithmus*

Durch die Belastungswalzen wird für die Kfz-Antriebe ein definiertes Belastungsmoment bei einer von den Antriebsrädern abhängigen Drehzahl vorgegeben. Der umzusetzende Steueralgorithmus ist in Anhang 1 zu finden und wird im Folgenden kurz erläutert.

Begonnen wird mit der Definition verschiedener Fahrzeugparameter, diese variieren je nach Fahrzeugtyp und werden durch typische Größen vorgegeben [33, 50, 63]:



- Luftwiderstandsfaktor  $f_L$

$$f_L = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \quad (4-4)$$

$$f_L = 0,35 \cdot 2 \text{ m}^2 \cdot \frac{1,226 \text{ kg}}{2 \text{ m}^3} = 0,4291 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad (4-5)$$

- Fahrzeugmasse  $m$

$$m = 1000 \text{ kg}$$

- Drehmassenzuschlagsfaktor  $f_m$ , dieser berücksichtigt die Massenträgheit der rotierenden Bauteile

$$f_m = 1 + \frac{\sum_{i=1}^n J_{i,\text{red}}}{m \cdot r_{\text{dyn}}^2} = 1,05 \text{ bis } 1,5 \quad (4-6)$$

- Referenzmasse  $m_{\text{ref}}$

$$m_{\text{ref}} = 100 \text{ kg}$$

- Neigungsfaktor  $f_{v,l}$

$$f_{v,l} = 0,001 \text{ s}^2/\text{m}$$

- Radstand  $l$

$$l = 2,5 \text{ m}$$

- Wankparameter  $p$

$$p = 3$$

- vorderer Abstand zum Schwerpunkt  $l_v$

$$l_v = 0,825 \text{ m}$$

- Getriebefaktor  $f_G$

$$f_G = 0,1$$

- Spurweite  $s$

$$s = 1,5 \text{ m}$$

Daraus erfolgt die Berechnung des Kraftschlussbeanspruchungsfaktors  $f_{\mu}$ ,

$$f_{\mu} = g \cdot l = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2,5 \text{ m} = 24,52 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \quad (4-7)$$

der bezogenen Referenzmasse  $m_{\text{ref}}^*$ ,

$$m_{\text{ref}}^* = \frac{m_{\text{ref}}}{m} \quad (4-8)$$

und der Schwerpunktfaktoren  $f_{SP,1}$  und  $f_{SP,2}$  [50].

$$f_{SP,1} = \frac{s}{2 \cdot l} \quad (4-9)$$

$$f_{SP,2} = \frac{l_v}{l} \quad (4-10)$$

Nachfolgend werden die zur weiteren Berechnung notwendigen Parameter vorgegeben bzw. eingelesen. Daraus erfolgt die Berechnung der Referenzgeschwindigkeit  $v_{ref}$ ,

$$v_{ref} = 2\pi \cdot n_{ref} \cdot r_{dyn} \quad (4-11)$$

der resultierenden Anströmgeschwindigkeit  $v_{res}$ ,

$$v_{res} = v_{ref} + v_w \quad (4-12)$$

des Rollwiderstandsbeiwertes  $f_R$ ,

$$f_R = f_{R,0} + f_{R,1} \left( \frac{v}{100 \frac{km}{h}} \right) + f_{R,4} \left( \frac{v}{100 \frac{km}{h}} \right)^4 \quad (4-13)$$

der Beschleunigung  $a$ ,

$$a = \frac{2\pi \cdot (n_{ref1} - n_{ref0})}{T_z} \quad (4-14)$$

der seitlichen Kraftschlussbeanspruchung  $\mu_y$ ,

$$\mu_y = \frac{v^2}{R \cdot g} \quad (4-15)$$

des Kurvenwiderstandsbeiwertes  $f_K$

$$f_K = \frac{v^2}{g \cdot R} \cdot \sin \alpha \quad (4-16)$$

der Wankwinkelfaktoren  $f_{K,r}$  und  $f_{K,l}$ ,

$$f_{K,r} = 1 - \mu_y^p \quad (4-17)$$

$$f_{K,l} = 1 + \mu_y^p \quad (4-18)$$

des Nickwinkelfaktors  $f_v$

$$f_v = 1 - f_{v,1} \cdot a \quad (4-19)$$

und der Referenzmassen  $m_{\text{ref},l}$  und  $m_{\text{ref},r}$

$$m_{\text{ref,Rad}} = f_k \cdot f_v \cdot \frac{m_{\text{ref}}}{2} \quad (4-20)$$

Diese bilden die Grundlage für die Berechnung der Drehzahl- und Drehmomentvorgaben für die Belastungswalzen nach den Gleichungen (3-16) bis (3-19).

#### 4.2.3.2 Die Anbindung

Die verwendeten Gleichrichter ermöglichen die Anbindung über eine RS485-Schnittstelle an den PC. Da ein herkömmlicher PC standardmäßig nur die RS232-Schnittstelle implementiert hat, wird zur Anbindung eine RS485-Schnittstellenkarte verwendet.

#### 4.2.3.3 Das LabVIEW-Programm

Der Ablauf des erstellten LabVIEW-Programms orientiert sich am in Kapitel 4.2.3.1 beschriebenen Steueralgorithmus und gliedert sich im Wesentlichen in drei Abschnitte:

1. Eingabe benötigter Parameter
2. Berechnung der Ausgabewerte aus den Eingangsgrößen
3. Übergabe der Werte an den Gleichrichter

Zur Vorgabe der festen Parameter werden globale Variablen genutzt. Diese erlauben den Informationsaustausch zwischen verschiedenen VIs.

Das Einlesen der einstellbaren Größen erfolgt innerhalb des zyklisch ablaufenden Hauptprogramms.

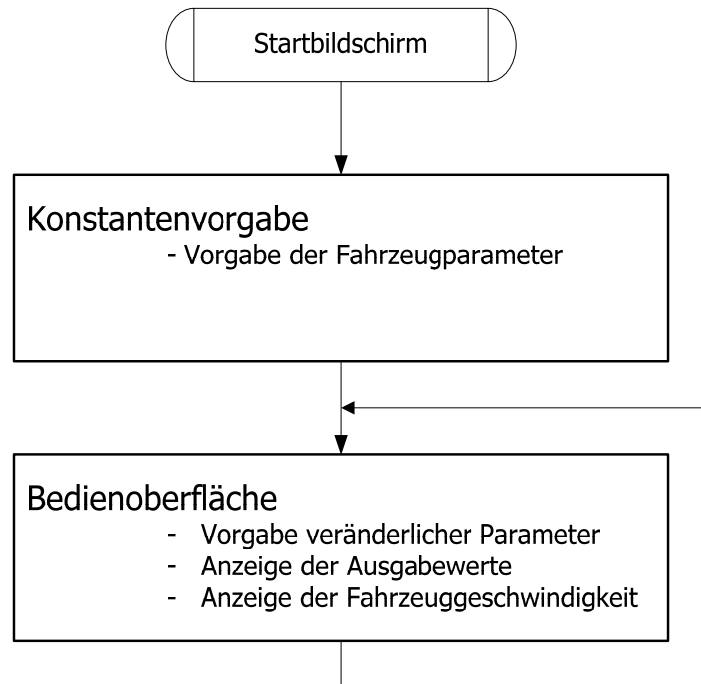
Die Berechnung der Drehzahlen und Drehmomente geschieht innerhalb einer Sequenzstruktur, an deren Ende der Datenaustausch mit den Umrichtern erfolgt. Die einzelnen Sequenzen werden zyklisch nacheinander abgearbeitet. Bei dem eingesetzten Rechner (Athlon XP 3000+, 512 MB RAM) haben sich Zykluszeiten zwischen ein und drei Millisekunden zuzüglich der Übertragungszeit zu den Gleichrichtern ergeben.

### *Die Visualisierung*

Wie schon in Kapitel 4.2.2 beschrieben wird in LabVIEW parallel zur im Blockdiagramm realisierten Steuerung im Frontpanel eine Bedienoberfläche erstellt.

Diese gliedert sich in Konstanteneingabe und Bedienoberfläche.

Bild 4-17 zeigt einen vereinfachten Programmablaufplan.



**Bild 4-17 Bedienoberfläche der Belastungssteuerung**

In der Bedienoberfläche können Parameter geändert werden, die einen sofortigen und direkten Einfluss auf die Ausgangsgrößen haben. Auch eine automatisierte Vorgabe der einzelnen Größen ist möglich.

Alle Werte können parallel dazu direkt aufgezeichnet werden. Die Messwertaufzeichnung erfolgt mit einem externen USB-Messaufzeichnungssystem und wird im folgenden Kapitel kurz vorgestellt.

#### 4.2.4 Messwerterfassung und -auswertung

Zur Messwerterfassung wird das USB-Messfassungssystem MultiChoice der Firma Goldammer eingesetzt, siehe Bild 4-18.



**Bild 4-18 Multichoice USB**

Es ermöglicht die Erfassung von bis zu 16 analogen Eingangssignalen mit einer Summenabtastrate von maximal 500 kHz. Somit können die relevanten Werte aller vier Antriebe gleichzeitig mit einer ausreichenden Abtastrate erfasst werden. Die Auflösung beträgt 16 Bit bei einer Spannung von  $\pm 10$  V, damit wird eine Genauigkeit von  $\pm 305 \mu\text{V}$  erreicht. Dies ist weitaus genauer als die von den Stromrichtern bereitgestellten Werte. Des Weiteren stehen diese Werte zur elektronischen Weiterverarbeitung in einer Datei bereit [65].

Um die hier aufgenommenen Datenmengen zu verarbeiten, wird auf die Software Diadem zurückgegriffen. Im Gegensatz zur häufig verwendeten Standardsoftware MS Excel können Datenfiles mit über 100 Milliarden Messwerten verarbeitet werden [68]. Gleichzeitig erlaubt das Programm eine Weiterverarbeitung der Messwerte, es stehen beispielsweise verschiedene mathematische Funktionen und Filterfunktionen zur Verfügung. Die Erfassung der Messwerte erfolgt direkt über die analogen Ausgänge der Stromrichter.

Die Messwerte werden durch die Umrichter bzw. Gleichrichter, über deren Analogausgänge bereitgestellt. Bild 4-19 zeigt den Versuchsaufbau schematisch und die Anordnung der einzelnen Komponenten zur Messwerterfassung.

Insbesondere die Drehmomentistwerte werden unter der Annahme einer direkten Proportionalität zwischen dem Moment und dem Stromistwert durch die Umrichter ausgegeben. Auftretende Reibmomente sind somit in den Momenten

enthalten, was zu einer entsprechenden Ungenauigkeit bei dem durch die Belastungsmaschinen aufgebrauchten Belastungsmoment führt.

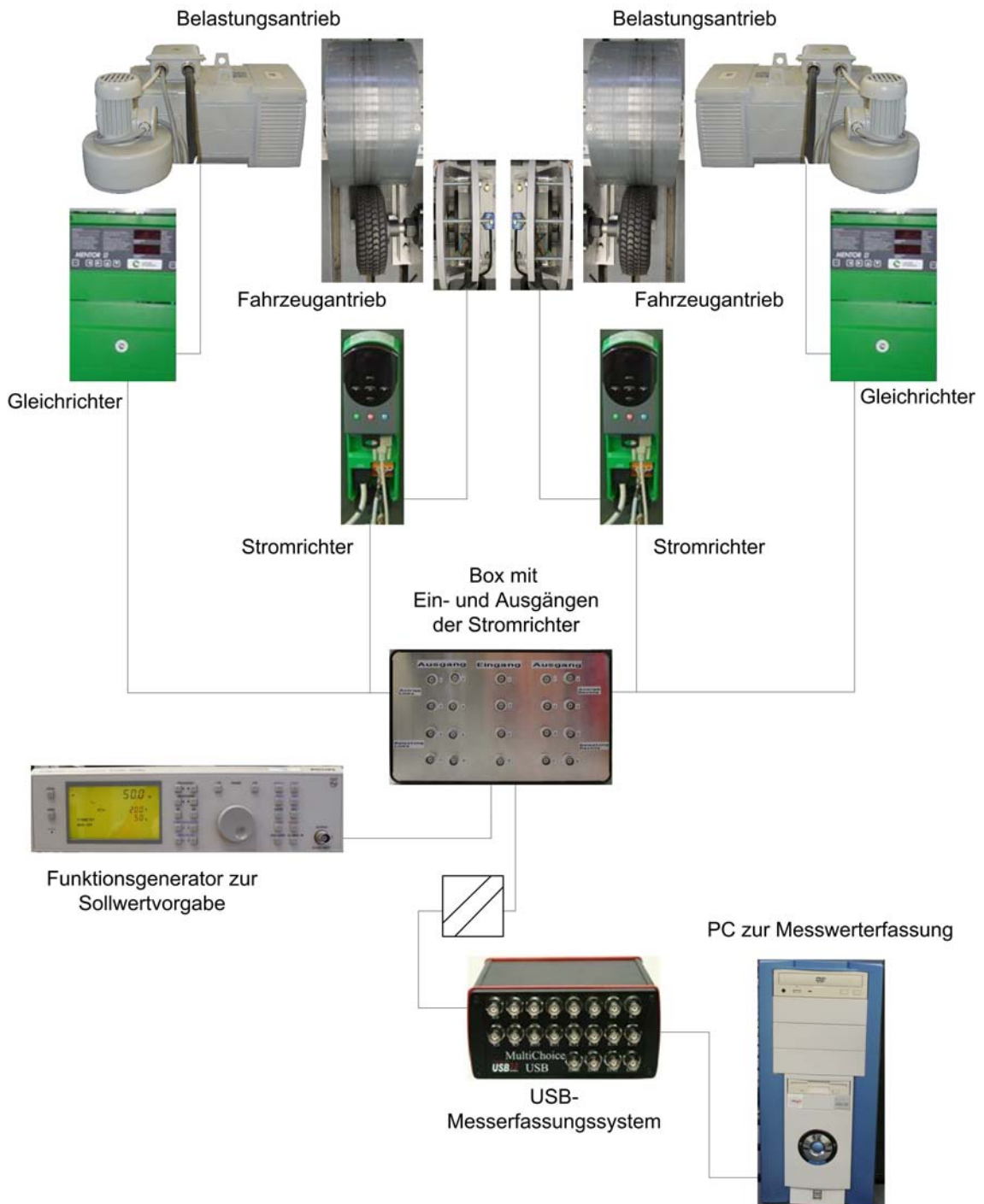


Bild 4-19 Versuchsaufbau

## ***5 Experimentelle Untersuchung und Funktionsnachweis des Laborversuchsstandes***

Ein wichtiger Punkt im Anschluss an die Umsetzung eines steuerungstechnischen Systems ist ein Funktionstest. Hierbei werden relevante Eigenschaften unter den verschiedensten Bedingungen getestet und mit den theoretischen Vorgaben verglichen. Von großer Bedeutung dabei ist die Reproduzierbarkeit dieser Tests.

### ***5.1 Untersuchung verschiedener Kenngrößen des Laborversuchsstandes***

Zum besseren Verständnis der Versuchsabläufe werden an dieser Stelle kurz wichtige Parameter, die das dynamische Verhalten des Laborversuchsstandes beschreiben, ermittelt. Diese Größen definieren die Grenzen der Dynamik des Versuchsstandes, beispielsweise wird hier die maximale Beschleunigung der Antriebsmaschinen ermittelt.

Dynamische Vorgänge treten nach Laständerungen auf, ein neuer stationärer Betriebszustand stellt sich erst nach einer bestimmten Übergangszeit ein. Dazwischen liegen Ausgleichsvorgänge im elektrischen und mechanischen Bereich, die das dynamische Verhalten der Maschinen kennzeichnen.

Wichtige Kenngrößen, die in diesem Zusammenhang betrachtet werden, sind das Trägheitsmoment, das Anlaufmoment, das Reibmoment, die (maximale) Beschleunigung und die Reaktionszeit [15, 36, 38, 55].

Hierfür werden der Auslaufversuch sowie der Hochlaufversuch durchgeführt und beispielhaft für die Reaktion auf ein Testsignal, eine Sprungantwort aufgenommen.

Die Sollwertvorgabe erfolgt hier direkt über die Analogeingänge der Stromrichter, somit spielen die Übertragungszeiten der Bussysteme keine Rolle. An den Analogausgängen der Stromrichter werden die Messwerte, wie in 4.2.4 beschrieben, erfasst.

Auftretende Verzögerungen sind nur von den Wandlungszeiten der A/D- bzw. D/A-Wandler und den Verarbeitungszeiten der Stromrichter abhängig.

### 5.1.1 Der Auslaufversuch

Der Auslaufversuch dient der Ermittlung des Trägheitsmomentes  $J$ , dieses beschreibt die Trägheit eines Körpers bei Rotationsbewegungen.

Um das Trägheitsmoment zu bestimmen, wird die laufende Maschine abgeschaltet und der zeitliche Verlauf der auslaufenden Drehzahl wird aufgenommen. Es entsteht die Auslaufkurve  $n = f(t)$ .

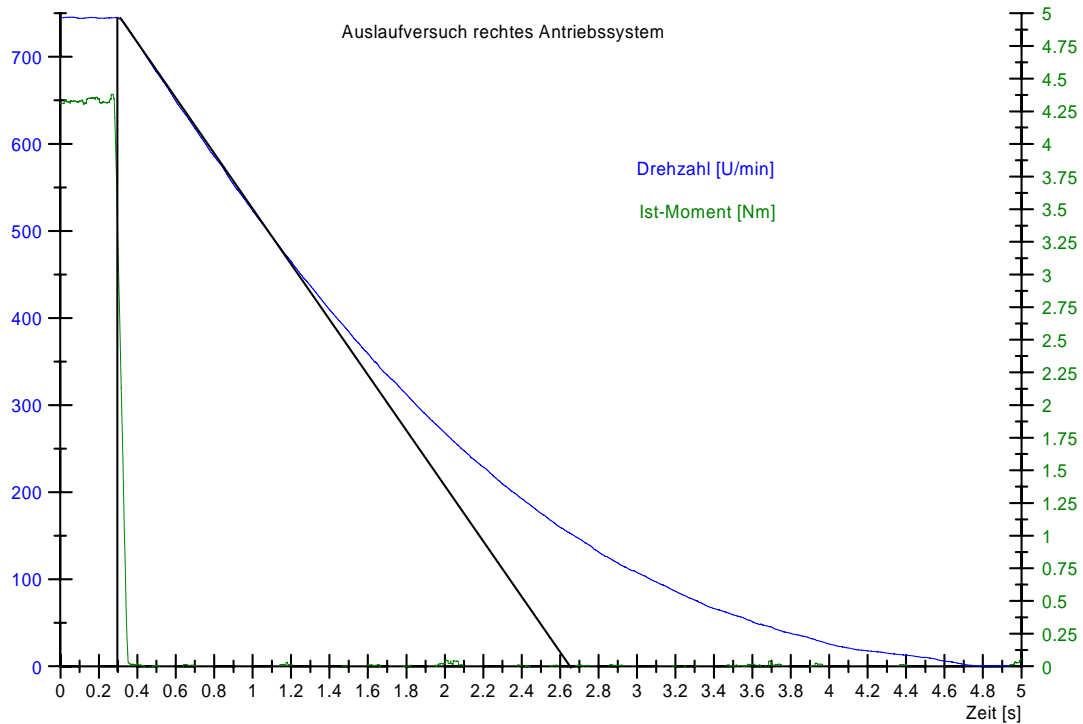
Das gewählte Antriebsmoment sollte zu einer Geschwindigkeit führen, die 10 bis 20 % über der Nenndrehzahl liegt. Die Verringerung der Drehzahl beim Auslauf entsteht durch die bremsenden Drehmomente, die die Reibung und mögliche weitere Verluste hervorrufen [30, 38, 55].

Aus Sicherheitsgründen erfolgt der Auslaufversuch am Laborversuchsstand bei einer Drehzahl von  $700 \text{ min}^{-1}$  bis  $800 \text{ min}^{-1}$ , das dabei bestimmte Trägheitsmoment  $J$  besitzt eine hinreichende Genauigkeit. Zur exakteren Bestimmung müssen die einzelnen Maschinen, wie oben beschrieben, im Bereich der Nenndrehzahl betrieben werden. Ein Test muss im ausgebauten Zustand in einem Prüffeld durchgeführt werden.

Nachdem die Axialflussmaschine, durch ein vorgegebenes Moment, eine konstante Drehzahl erreicht hat, wurde das Moment weggenommen.

Bild 5-1 zeigt den typischen Auslauf der Axialflussmaschine und das dazugehörige anliegende Moment.





**Bild 5-1 Auslaufversuch der Antriebsmaschine**

Das Trägheitsmoment kann nach:

$$J_A = \frac{T_{a,r}}{2\pi \cdot n_A} \cdot M_{dyn,A} \quad (5-1)$$

bestimmt werden.

Bei einer Drehzahl von  $n_{A,r} = 745 \text{ min}^{-1}$ , zu Beginn des Versuchs, lag das Moment bei  $M_{dyn,A,r} = 4,3 \text{ Nm}$ . Somit ergibt sich unter Annahme eines vereinfachten linearen Verlaufs ein Trägheitsmoment von  $J_{A,r} = 0,13 \text{ kgm}^2$  für den rechten Antrieb.

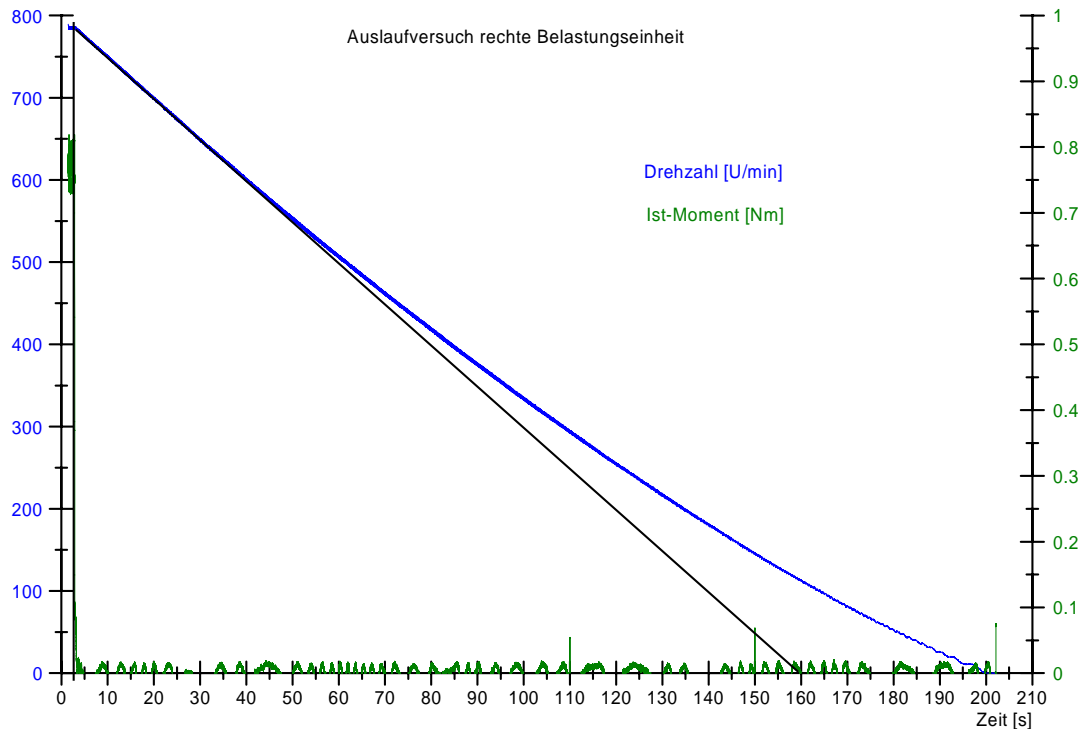
Nach identischem Vorgehen werden das Trägheitsmoment des linken Antriebs und das der Belastungsmaschinen mit folgenden Werten bestimmt:

$$J_{A,l} = 0,14 \text{ kgm}^2$$

$$J_{B,r} = 1,47 \text{ kgm}^2$$

$$J_{B,l} = 1,4 \text{ kgm}^2.$$

Bild 5-2 zeigt einen charakteristischen Verlauf des Auslaufversuches der rechten Belastungsmaschine.



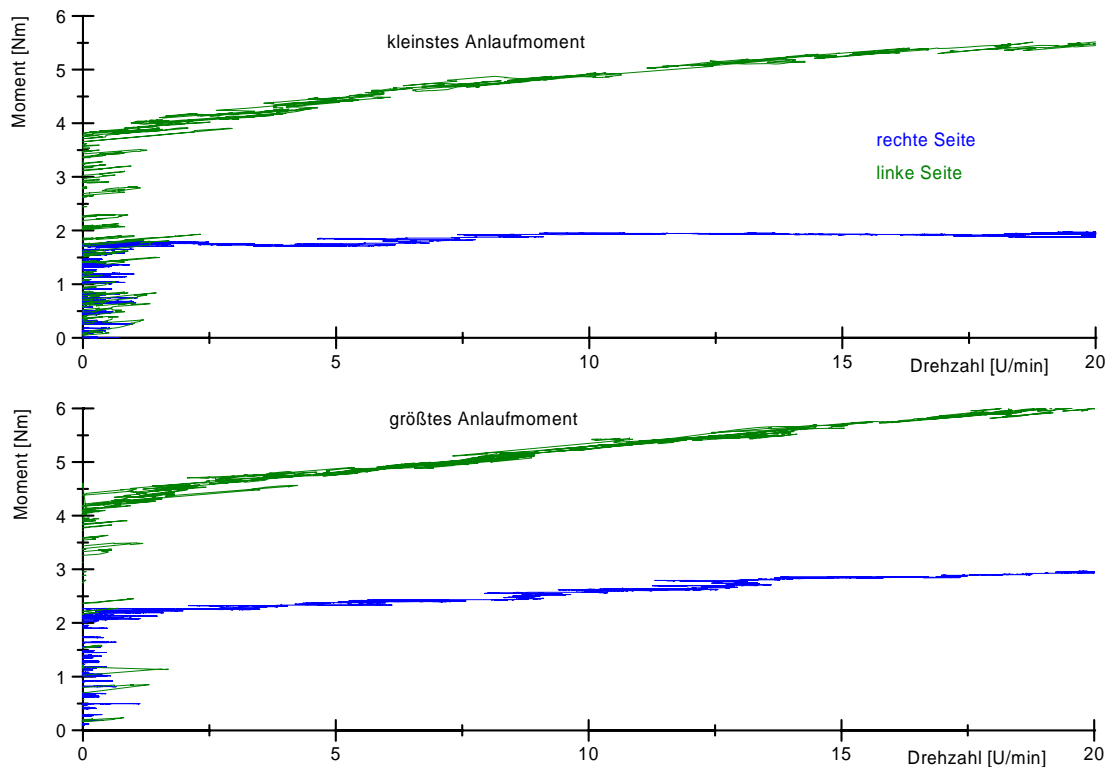
**Bild 5-2 Auslaufversuch der rechten Belastungsmaschine**

Die Größenverhältnisse zwischen den Trägheitsmomenten der Antriebs- und Belastungsmaschinen spiegeln die Massenverteilung des Aufbaus gut wieder. Die Axialflussmaschinen besitzen ein charakteristisch kleines Trägheitsmoment. Das Trägheitsmoment der Gleichstrommaschinen mit den angekoppelten Belastungswalzen ist entsprechend größer.

### 5.1.2 Der Hochlaufversuch

Beim Hochlaufversuch wird der Motor aus dem Stillstand heraus auf eine definierte Drehzahl beschleunigt. Dabei ist zu beachten, dass jedes Antriebssystem, um vom Stillstand in Bewegung versetzt zu werden, ein Anlaufmoment bzw. Losbrechmoment  $M_{Anl}$  überwinden muss. Dieses kann bei einigen Maschinen höher liegen als ein erforderliches Moment zur Überwindung von Belastungen im Betrieb. Es ist durch die Haftreibung bestimmt [38, 55].

Begonnen wurde mit der Bestimmung des Losbrechmoments, hierzu wird das Sollmoment als dreieckförmiges Signal vorgegeben und die Drehzahlen werden erfasst. Die Kopplung der Antriebs- und Belastungsmaschinen über Räder und Walze bleibt erhalten, die dabei aufgenommenen Losbrechmomente sind in Bild 5-3 dargestellt.



**Bild 5-3 Anlaufmoment der Antriebsmaschinen**

Dabei ergeben sich, je nach Startposition der Antriebsräder, verschieden große Momente. Sie sind durch eine nicht vollkommene Ausrichtung der Wellen und vorhandene Unwuchten zu erklären. Bei entkoppelter Prüfung ergeben sich für das Losbrechmoment der einzelnen Antriebs- bzw. Belastungsantriebe folgende Werte:

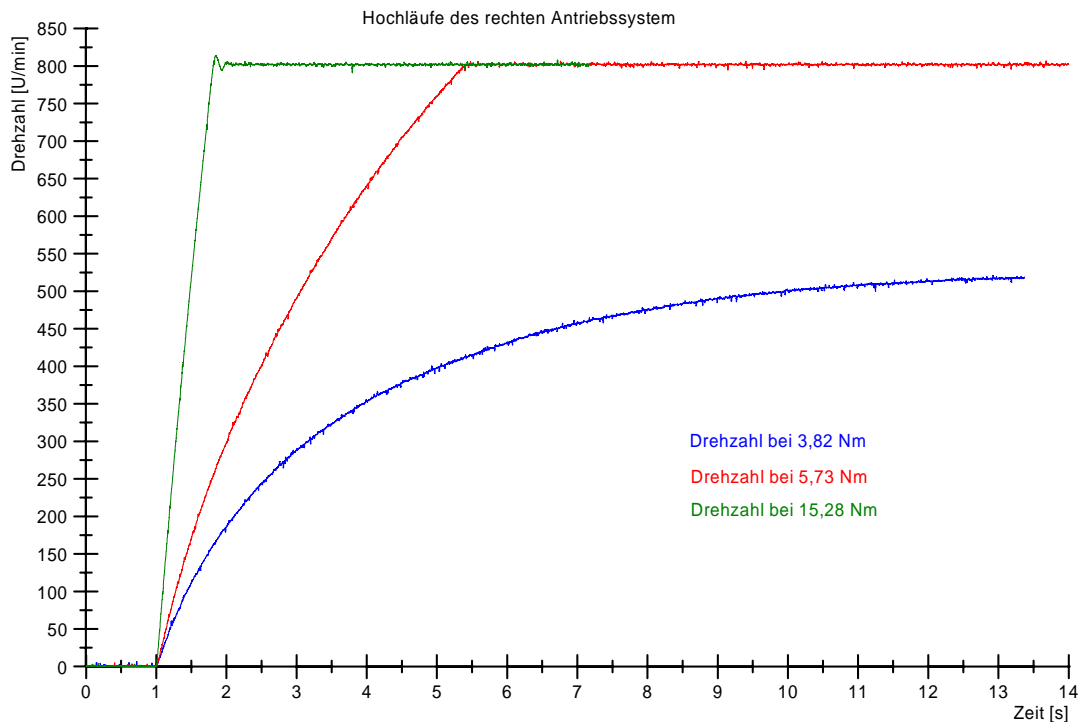
rechte Antriebsmaschine	$0,68 \text{ Nm} \leq M_{\text{Anl,A,r}} \leq 0,95 \text{ Nm}$
linke Antriebsmaschine	$0,71 \text{ Nm} \leq M_{\text{Anl,A,l}} \leq 1,19 \text{ Nm}$
rechte Belastungsmaschine	$0,55 \text{ Nm} \leq M_{\text{Anl,B,r}} \leq 0,75 \text{ Nm}$
linke Belastungsmaschine	$0,76 \text{ Nm} \leq M_{\text{Anl,B,l}} \leq 1,12 \text{ Nm}$

Im gekoppelten Zustand ergibt sich gegenüber der Summation der Einzelanlaufmomente ein größerer Wert, da hier die Haftreibung zwischen Walze und Rad als zusätzlicher Faktor hinzukommt.

Der Hochlaufversuch wurde für die Maschinen einzeln bis zu einer definierten Drehzahlgrenze mit verschiedenen Drehmomentsollwerten durchgeführt. Aus den Verläufen der Kennlinien können später Rückschlüsse auf das Übertragungsverhalten der Regelstrecke gemacht werden. Des Weiteren kann die ma-

ximale Beschleunigung der jeweiligen Antriebe bestimmt werden, die durch den maximalen Strom begrenzt wird.

Der Hochlaufversuch wird für jeden Antrieb einzeln und für das gekoppelte System bei abgeschalteten Belastungsmaschinen durchgeführt, dabei werden verschiedene Momentvorgaben verwendet. Bild 5-4 zeigt beispielhaft den Hochlauf der rechten Antriebsmaschine bei verschiedenen Momentsollwerten.



**Bild 5-4 Hochlaufversuche mit verschiedenen Momentvorgaben**

Durch die Wechselrichter wird das maximale Antriebsmoment über die Stromgrenze auf 175 % des Nennmomentes festgelegt, welches einem Moment von 33,4 Nm entspricht. Daraus resultiert für die Antriebssysteme rechnerisch eine maximale Winkelbeschleunigung von:

$$\alpha_{\max, A, r} = \frac{M}{J_{A, r}} = \frac{33,4 \text{ Nm}}{0,13 \text{ kgm}^2} = 256,8 \frac{1}{\text{s}^2} \quad (5-4)$$

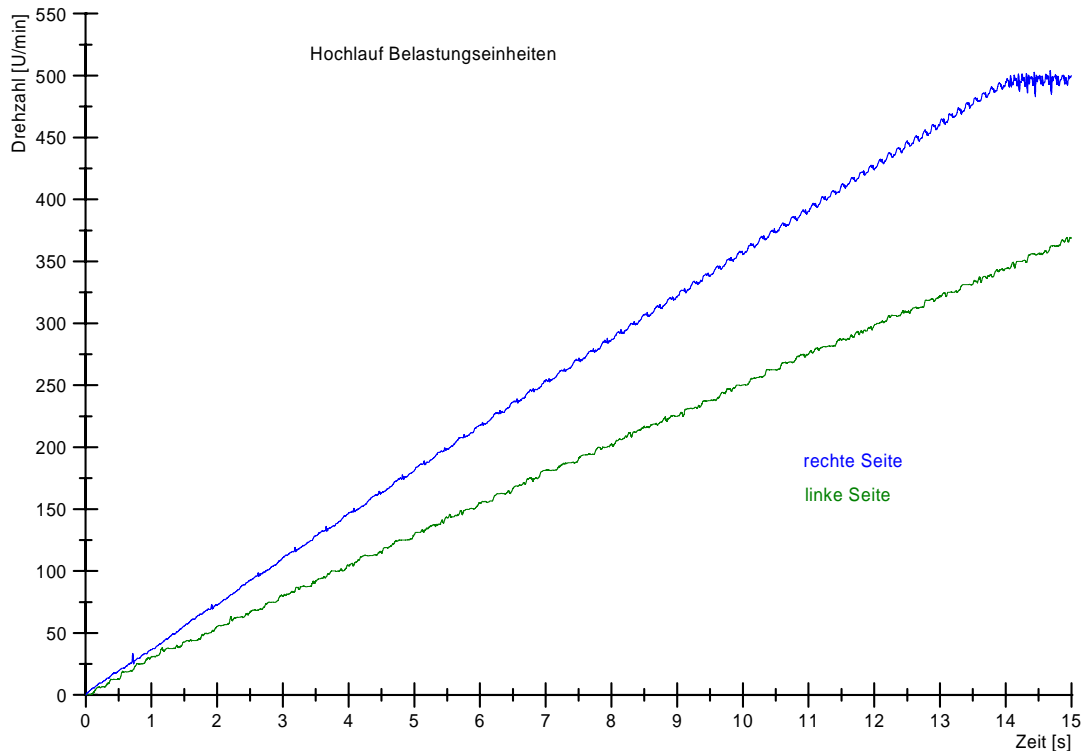
$$\alpha_{\max, A, l} = \frac{M}{J_{A, l}} = \frac{33,4 \text{ Nm}}{0,14 \text{ kgm}^2} = 240,7 \frac{1}{\text{s}^2} \quad (5-5)$$

Dies entspricht einer maximalen Beschleunigung von

$$\alpha_{\max, A, r} = \alpha_{\max, A, r} \cdot r_{\text{dyn}} = 32,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (5-6)$$

$$\alpha_{\max, A, l} = \alpha_{\max, A, l} \cdot r_{\text{dyn}} = 30,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (5-7)$$

Bei der Realisierung der Fahrsicherheitssysteme spielen diese Größen unter anderem eine Rolle. Nahezu linear erfolgt der Hochlauf der Belastungsmaschinen. Über das vorgegebene Moment wird dabei der Anstieg bestimmt, siehe Bild 5-5.

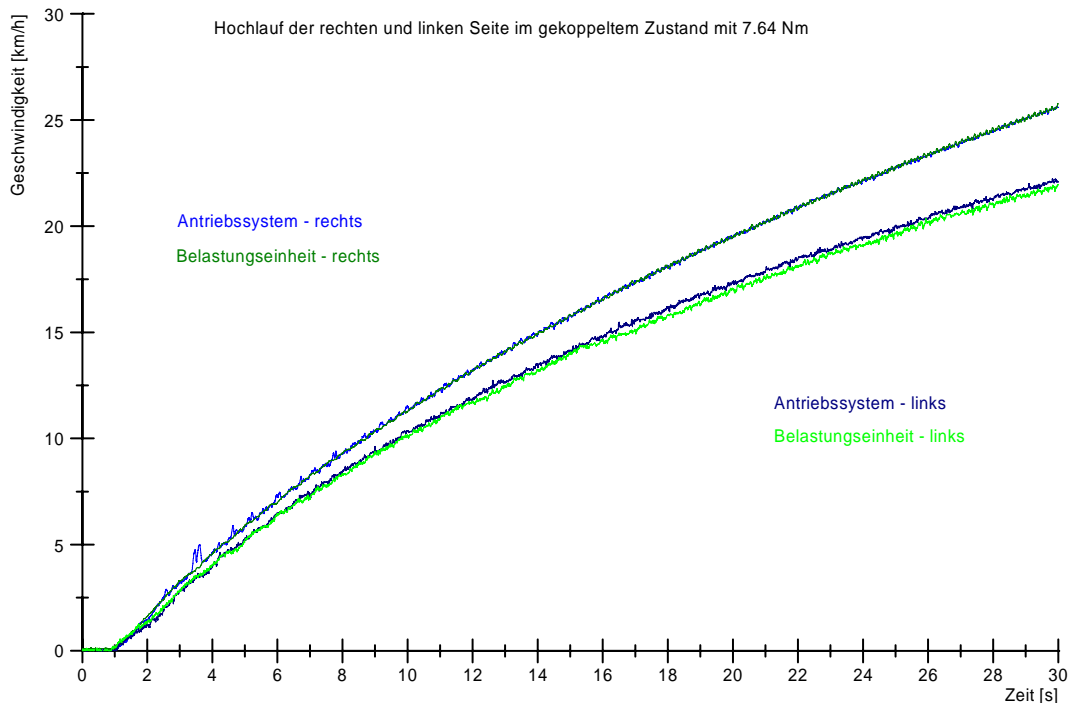


**Bild 5-5 Hochlauf der Belastungsmaschinen**

Die maximale Beschleunigung der Belastungsmaschinen beträgt für die rechte Seite  $a_{\max, B, r} = 3,74 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  und  $a_{\max, B, l} = 2,56 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  für die linke Seite. Die Unterschiede ergeben sich hier durch verschiedene Maschinenkonstanten  $c_\phi$  und verschiedene Reibmomente. Diese Maximalwerte begrenzen den Arbeitsbereich des Laborversuchsstandes. Eine Korrektur der Maschinenkonstante ist durch eine proportionale Anpassung des Erregerstroms möglich. Da beide Maschinen vom gleichen Typ sind und der Aufbau der rechten und linken Seite gleich ist, wird so eine gute Übereinstimmung der Hochläufe erreicht.

Der Hochlauf im gekoppelten Zustand ergibt sich aus einer Überlagerung der einzelnen Kennlinien. Die Antriebsmaschinen treiben die abgeschalteten Belastungswalzen an. Das unterschiedliche Hochlaufverhalten ist durch die unterschiedliche Reibung der Maschinen und die unterschiedliche Reibung zwischen

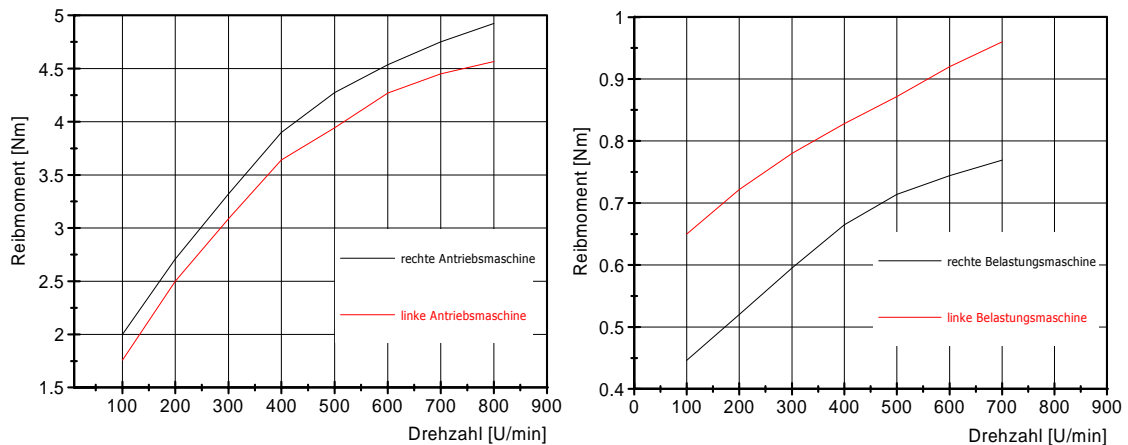
Rad und Walze zu begründen. Diese Reibung muss von den Kfz-Antrieben des Versuchsstandes, unabhängig von einem vorzugebenden Belastungsmoment, mindestens überwunden werden.



**Bild 5-6 Hochlauf im gekoppeltem Zustand**

An dieser Stelle kann hinreichend genau das Reibmoment der einzelnen Maschinen bestimmt werden. Hierzu werden die Maschinen bis zu einer Drehzahlgrenze hochgefahren und das zum Halten dieser Drehzahl notwendige Moment wird unter Verwendung der Umrichter bestimmt. Eine genauere Bestimmung kann im ausgebauten Zustand, einzeln für jede Maschine, innerhalb eines Prüfstandes erfolgen.

Dabei ergeben sich die in Bild 5-7 dargestellten Verläufe der Reibung für die einzelnen Systeme.



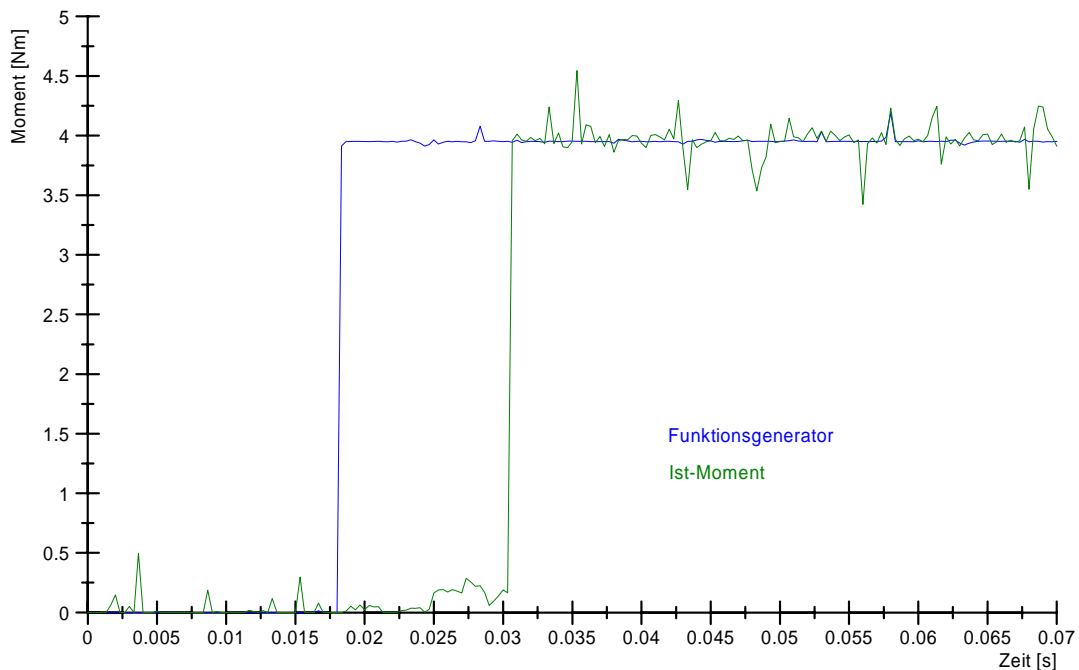
**Bild 5-7 Reibmomente der Antriebs- bzw. Belastungsmaschinen**

### 5.1.3 Aufnahme einer Sprungantwort

Lineare Übertragungsglieder können durch ihre Reaktion auf so genannte Testsignale beschrieben werden, Ergebnisse sind beispielsweise Sprungantwort, Impulsantwort und Anstiegsantwort.

Die Aufnahme einer Sprungantwort ist ein weiterer wichtiger Versuch bei der Untersuchung des dynamischen Verhaltens, der an dieser Stelle durchgeführt wird. Das Eingangssignal (Sollwert des Antriebsmoments)  $x_e$  wird vom Ruhezustand oder während eines stationären Zustandes sprunghaft um einen bestimmten Wert verändert und das Ausgangssignal (anliegende Moment an der Maschine)  $x_a$  aufgenommen. Sprunghaft bedeutet in der Theorie, dass es in einem nicht messbar kleinen Zeitraum geschieht. In der Praxis ist es ausreichend, wenn die Änderung des Eingangssignals wesentlich schneller erfolgt als das Antriebssystem reagieren kann [8, 30, 31, 38]. Dabei muss beachtet werden, dass die Randparameter eingehalten werden. Der Sprung darf nicht so groß ausfallen, dass die Antriebe des Laborversuchsstandes in ihre Begrenzung gefahren werden.

Bild 5-8 zeigt die Sprungantwort des rechten Antriebssystems. Als Ergebnis können die Totzeiten  $T_{\text{tot}}$  der Übertragungselemente und die Ausgleichzeit  $T_a$ , welche die Umrichter benötigen, um das vorgegebene Moment umzusetzen, ermittelt werden.



**Bild 5-8 Sprungantwort des rechten Antriebssystems**

Die Totzeit spiegelt die Verarbeitungszeit, die der Umrichter benötigt um das vorgegebene Signal vollständig umzusetzen und die Größe über die Analogenausgänge auszugeben, wider.

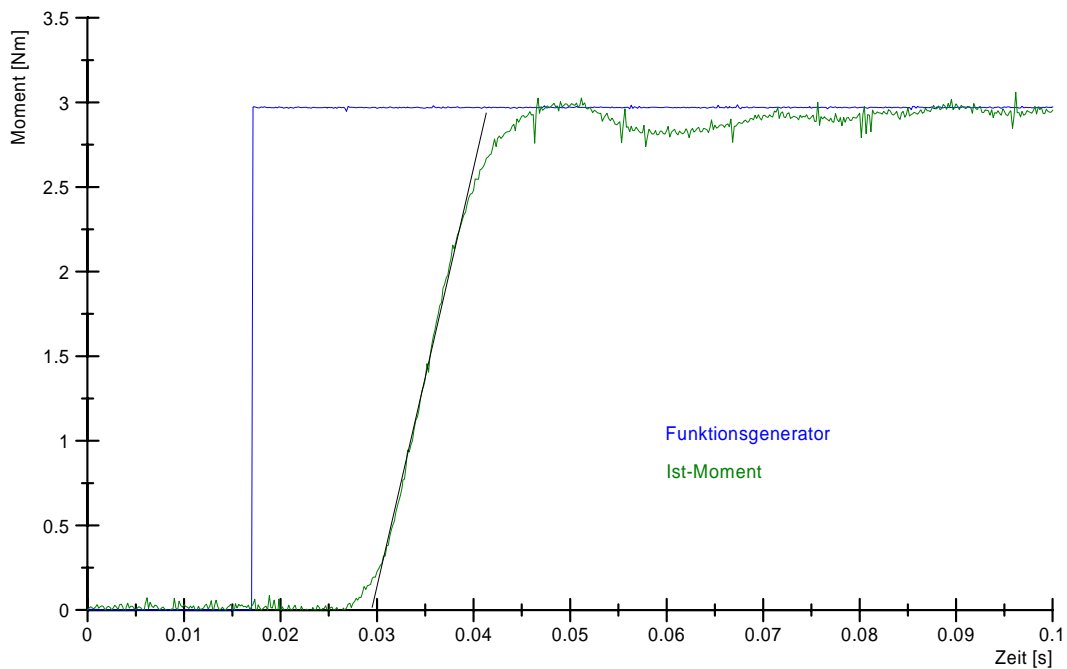
Durch den Umrichter werden die Eingangssignale alle 5 ms erfasst und die Ausgangssignale alle 8 ms aktualisiert. Nach der Auswertung mehrerer Sprungantworten lag die sich hier ergebende Totzeit bei zirka 12 ms, die Ausgleichzeit ist vernachlässigbar klein.

Zur Vereinfachung der Übertragungsfunktion kann näherungsweise die Approximation durch eine Totzeit und eine Funktion mit Verzögerung erster Ordnung verwendet werden. Dazu wird eine so genannte Ersatztotzeit, die Verzugszeit  $T_u$ , bestimmt. Diese ist durch ihre Bestimmungsmethode definiert. Durch das Vorhandensein von mehreren Verzögerungselementen tritt bei der Sprungantwortfunktion ein Wendepunkt auf, an dieser Stelle hat die Steigung ihr Maximum. Durch diesen kann die Verzugs- und die Ausgleichzeit bestimmt werden [14, 31].



Bei den Gleichrichtern der Belastungsmaschinen ergibt sich als Summe von Totzeit und Verzugszeit ein Wert von 12 ms, allerdings tritt eine Ausgleichszeit von zirka 11,5 ms auf, siehe Bild 5-9. Diese entspricht der Zeit, die der Antrieb benötigt, um das geforderte Moment umzusetzen.

Die Totzeiten, die sich durch Übertragungszeiten ergeben, können hier auf Grund des Versuchsaufbaus vernachlässigt werden.



**Bild 5-9 Sprungantwort der Belastungsmaschinen**

## 5.2 Experimentelle Untersuchung der umgesetzten Steueralgorithmen

Im Weiteren finden die experimentelle Untersuchung des umgesetzten steuerungstechnischen Systems und eine Wertung der Steueralgorithmen statt.

Die Aufnahme der erforderlichen Messwerte erfolgt unter Verwendung einer USB-Messwerterfassung, siehe 4.2.4. Um eine gute Nachvollziehbarkeit zu erreichen, werden festdefinierte Abläufe verwendet. Die Vorgabe der Parameter erfolgt mit Hilfe eines mit LabVIEW erstellten Programms, siehe Kapitel 4.2.3.3.

### 5.2.1 Die Geradeausfahrt

Für den Nachweis der Eigenschaften des Laborversuchsstandes wird als einfachster Fall eine beschleunigte Bewegung mit einem konstanten Antriebsmoment angenommen. Weiterhin wird von gleichen Fahrbahneigenschaften beider Räder und konstanten Gegenkräften ausgegangen. Hierbei ergeben sich folgende Kennlinien.

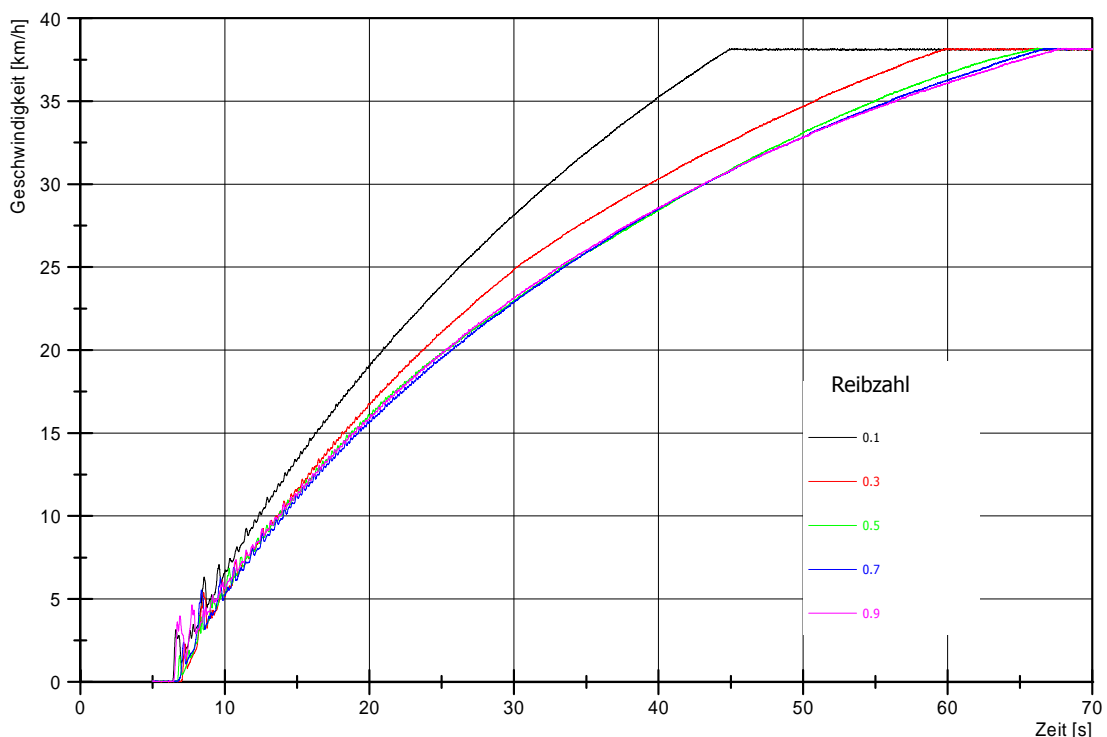
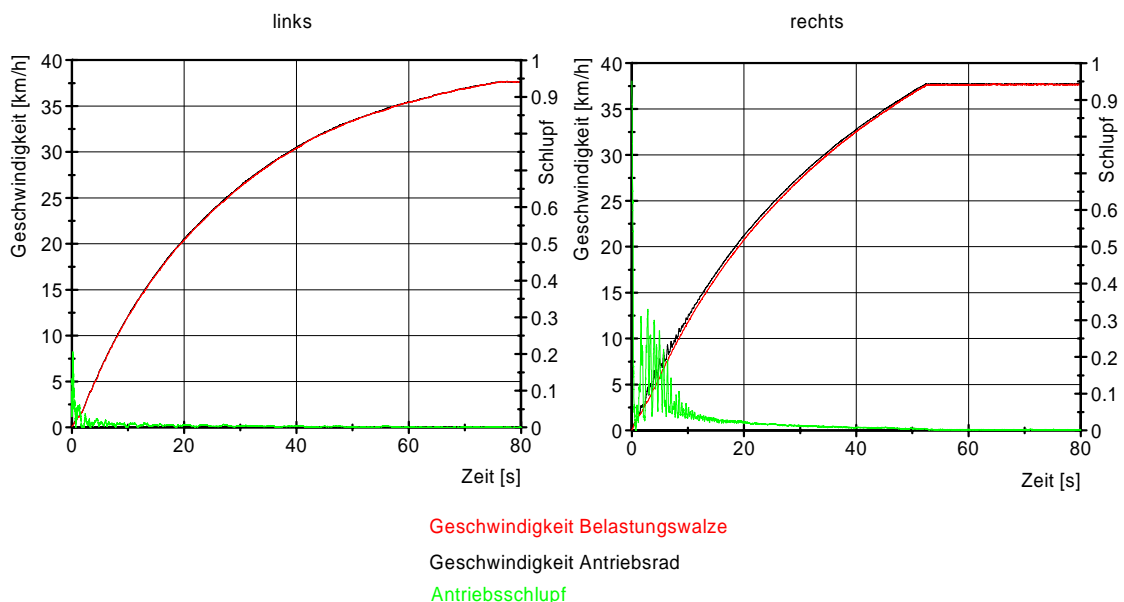


Bild 5-10 Hochlauf des rechten Antriebs bei verschiedenen Reibzahlen

Bild 5-10 zeigt das Verhalten bei unterschiedlichen Kraftschlussbeanspruchungen und daraus folgend bei unterschiedlichen Belastungen der Antriebsräder, hier dargestellt ist beispielhaft die rechte Antriebsseite.

Das vorgegebene Antriebsmoment wurde dabei mit 9,6 Nm konstant gehalten. Die Fahrsicherheitssysteme sind abgeschaltet, das Durchdrehen des Rades erfolgt in Abhängigkeit von der Reibung zwischen Rad und Walze. Direkt proportional zur Kraftschlussbeanspruchung erhöht sich das Gegenmoment. Der Einfluss wird durch längere Hochlaufzeiten wiedergegeben.

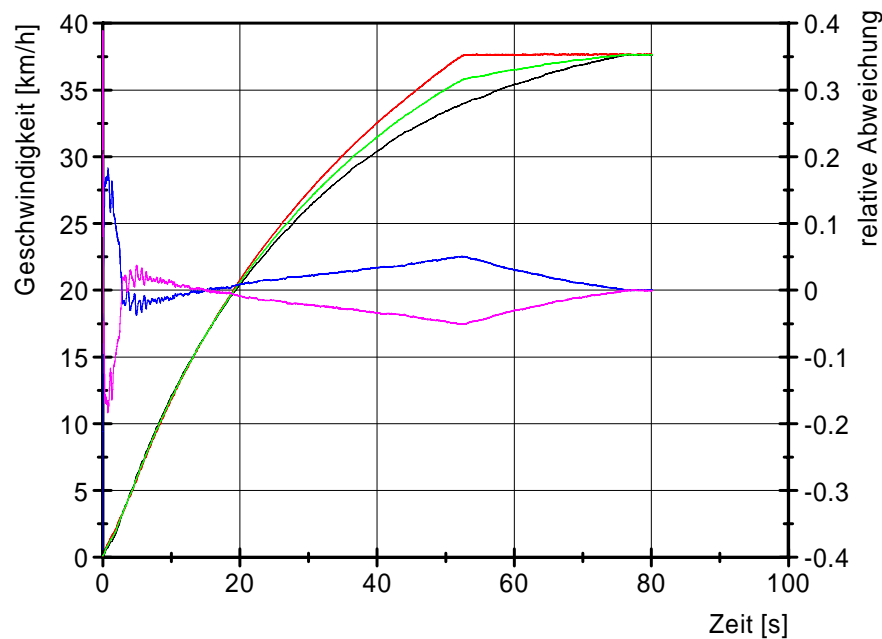
Bild 5-11 stellt den Hochlauf und den auftretenden Schlupf für die linke und rechte Seite dar, die ASR ist dabei deaktiviert. Erkennbar ist das Durchdrehen insbesondere der rechten Seite, bedingt durch eine niedrigere Reibung, siehe 5.1.



**Bild 5-11 Antriebsschlupf**

Die Abweichung der Geschwindigkeiten der rechten und linken Belastungswalzen, bezogen auf eine Referenzgeschwindigkeit, für den Hochlauf werden in Bild 5-12 dargestellt.

Infolge des Hochlaufs gegen eine Drehzahlgrenze, geht die Abweichung zum Ende gegen Null. Ohne vorgegebene Drehzahlgrenze ist die Geschwindigkeit der Walzen nur von den zu überwindenden Momenten abhängig und läuft weiter auseinander.



Geschwindigkeit rechte Belastungswalze

Abweichung rechte Belastungswalze

Geschwindigkeit linke Belastungswalze

Abweichung linke Belastungswalze

Referenzgeschwindigkeit

**Bild 5-12 Geschwindigkeitsvergleich der Belastungswalzen**

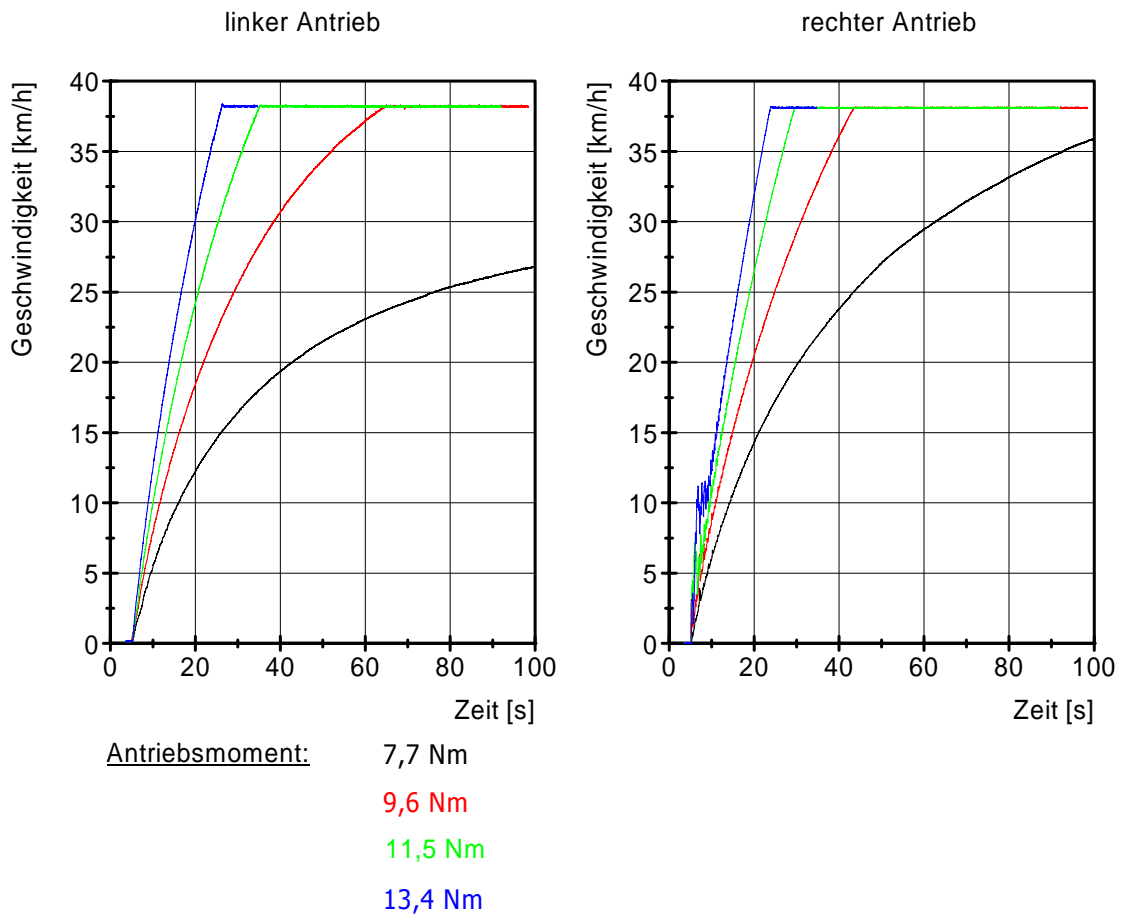
Bild 5-13 gibt den Hochlauf der Antriebsmaschinen bei für beide Seiten konstanten Parametern der Belastungsmaschinen wieder. Variiert wurde hier das Antriebsmoment.

Aufgrund der geringeren Reibung zwischen Rad und Walze kommt es bei höheren Antriebsmomenten auf der rechten Seite zum Durchdrehen der Räder im unteren Drehzahlbereich. Links wird dies durch die höhere Reibung zwischen Rad und Walze verhindert. Ein höheres Antriebsmoment bewirkt ein entsprechend schnelleren Hochlauf. Qualitativ entspricht der Verlauf den theoretischen Werten nach Kapitel 4.

### 5.2.2 Kurvenfahrt

Bedingt durch den Aufbau des Laborversuchsstandes und die verwendeten Belastungsalgorithmen ist die Simulation einer Kurvenfahrt nicht möglich. Die Algorithmen lassen nur die Simulation von den am Fahrzeug auftretenden Gegenmomenten zu. Dies führt bei verschiedenen Vorderradeinschlagwinkeln zu

unterschiedlichen Hochlaufkurven, entsprechend dem zu überwindenden Belastungsmoment.



**Bild 5-13 Hochlauf der Antriebe mit verschiedenen Momentvorgaben**

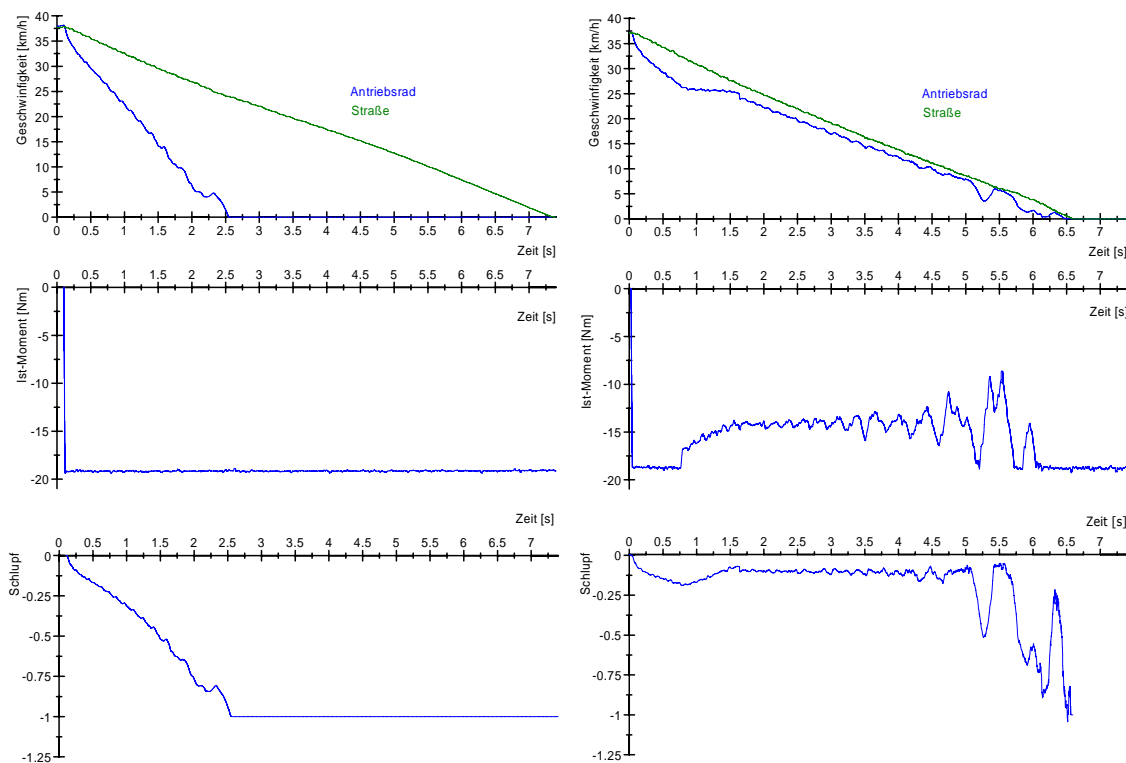
Ein Zwangslauf der Drehzahlen, bei gleichzeitig fester Momentvorgabe, ist nicht möglich. Die Drehzahlen des rechten und linken Rades sind von den zu überwindenden Belastungsmomenten abhängig. Ein möglicher Lösungsansatz zur Umsetzung der Kurvenfahrt ist in Kapitel 5.2.4 zu finden.

### 5.2.3 Funktion der Fahrsicherheitssysteme ABS und ASR

Zum Nachweis der Funktion der Fahrsicherheitssysteme erfolgt eine Gegenüberstellung des Verhaltens mit deaktiviertem und aktiviertem ABS bzw. ASR.

#### ABS

Bei einer Geschwindigkeit von ca. 38 km/h findet ein Bremsvorgang mit maximalem Bremsmoment statt. Hierbei wird, wie in Bild 5-14 dargestellt, links der Vorgang ohne und rechts mit ABS abgebildet.



**Bild 5-14 Funktionsnachweis ABS**

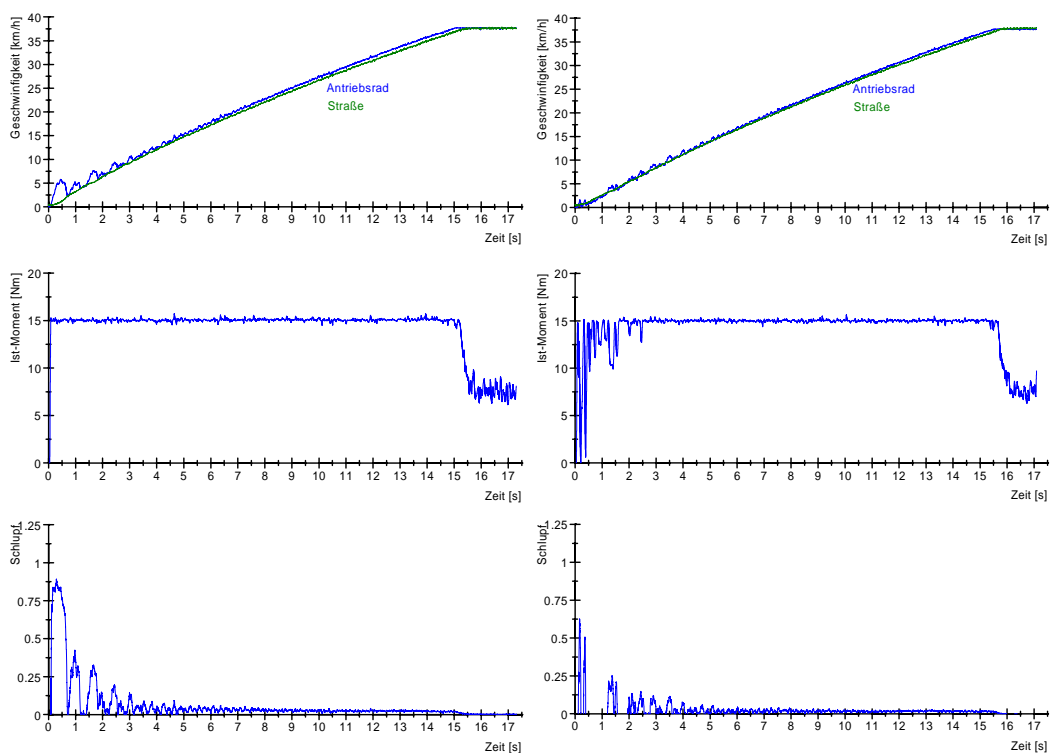
Wichtigster Punkt für den Funktionsnachweis ist das Einhalten einer oberen Bremsschlupfgrenze. Bei Überschreiten greift das ABS ein und verringert das Antriebsmoment bis die Schlupfschwelle wieder unterschritten wird. Im unteren Geschwindigkeitsbereich, ab ca. 2 km/h, kann das ABS deaktiviert werden.

Genau dieses Verhalten zeigt sich in Bild 5-14. Die Gegenüberstellung der Geschwindigkeiten von Antriebsrad und Belastungswalze und der daraus errechnete Bremsschlupf zeigt, dass der vorgegebene Schlupfgrenzwert von -0,1 und von -0,2 eingehalten wird. Dazu wird, wie zu sehen ist, das Antriebsmoment reduziert. Bei Unterschreiten einer Geschwindigkeit von ca. 2 km/h wird ABS abgeschaltet und der Schlupf erhöht sich, kurz danach stehen die Räder still.

Ein Vergleich der Bremswege ergibt hier eine Verringerung beim Bremsen mit ABS von 5 m gegenüber dem Bremsen ohne ABS.

### ASR

Auch für den Funktionsnachweis der Antriebsschlupfregelung, siehe Bild 5-15, wird eine Gegenüberstellung des Hochlaufs ohne (links) und mit (rechts) ASR gewählt. Die obersten Diagramme zeigen die Geschwindigkeitsverläufe der Antriebsräder und der Belastungswalzen. Ohne ASR sind Geschwindigkeitssprünge des Antriebsrades zu erkennen, mit ASR sind diese verringert.



**Bild 5-15 Funktionsnachweis ASR**

In der zweiten Reihe ist das Ist-Moment der Antriebsräder aufgezeigt. Bei aktiviertem ASR ist eine Verringerung des Moments bei einer Neigung zum Durchdrehen zu erkennen. Nach Erreichen einer eingestellten Drehzahlgrenze wird das Moment in beiden Fällen verringert.

Die unterste Reihe stellt, als Vergleichsparameter, den Schlupf zwischen Antriebsrad und Belastungswalze dar. Beim Anfahren ohne ASR ist ein Durchdrehen der Antriebsräder in den ersten zwei Sekunden zu erkennen. Sobald ASR aktiv ist, ergibt sich eine deutliche Verringerung dieser Neigung, dies wird durch die im vorigen Abschnitt beschriebene Momentverringerng erreicht.

Die Funktion von ABS und ASR ist somit entsprechend den Vorgaben gegeben. Durch eine Verfeinerung der Regelfunktionen können die Fahrsicherheitssysteme, mit Hilfe des Laborversuchsstandes, weiter optimiert werden.

#### 5.2.4 Wertung der umgesetzten Steueralgorithmen

Um die Güte der umgesetzten Steueralgorithmen für Antriebs- und Belastungsmaschine zu bewerten, ist ein Vergleich mit realen Messwerten, die direkt an einem Kfz bestimmt wurden, notwendig. Dazu müssen alle Parameter miteinander vergleichbar gestaltet werden. Eine weitere Möglichkeit ist der Vergleich mit einem noch zu erstellenden Simulationsmodell.

Nachfolgend wird eine Wertung zu den umgesetzten Steueralgorithmen und den Grenzen des Versuchsstandes gegeben.

#### Antriebssystem

Die Antriebsmaschinen werden moment geregelt betrieben und setzen ein vorgegebenes Antriebsmoment, je nach Belastungsmoment und eingestellter Drehzahlgrenze, in eine „Fahrzeuggeschwindigkeit“ um. Ein frei gewählter Sicherheitsfaktor für den Laborversuchsstand ist die gewählte Drehzahlgrenze.

Bei einem Beschleunigungsvorgang ergibt sich gegenüber den Belastungswalzen ein Schlupf der Antriebsräder. An dieser Stelle ist zwischen einer beschleunigten und verzögerten Bewegung zu unterscheiden.

Werden die implementierten Fahrsicherheitssysteme ABS und ASR hinzugenommen, wird der zulässige Schlupf für jedes Rad innerhalb der definierten Grenzen eingehalten, siehe 5.2.3. Durch Ändern der Schlupfgrenzwerte ist eine Anpassung der Fahrsicherheitssysteme erreichbar. Somit kann zum Beispiel ein optimaler Bremsschlupf bzw. Antriebsschlupf gewährleistet werden.

Die eingesetzten Steuerungen erlauben durch den modularen Aufbau der Steuerungssoftware die Implementierung und den Test weiterer Fahrsicherheitssysteme.

Infolge der hohen Komplexität bei der Berücksichtigung aller am Fahrzeug auftretenden Kräfte bietet sich hierbei der direkte Vergleich mit einem realen Kfz oder einem noch zu erstellenden Simulationsmodell an. Insbesondere Aussagen über die Auswirkung von Fahrsicherheitssystemen auf die Fahrstabilität können so mit größerer Sicherheit erfolgen.



Reaktionen, die durch auftretende Seitenkräfte hervorgerufen werden, können durch den starren Aufbau des Laborversuchsstandes nicht direkt nachgewiesen werden. Nur eine Umrechnung in die Längsrichtung ist möglich.

### Belastungssystem

Die Belastungsmaschinen werden momentgeregelt betrieben. Hierdurch wird die Übertragung des vorher errechneten Belastungsmomentes sichergestellt.

Um den Zwanglauf der Drehzahlen der Belastungsmaschine zu erreichen, muss auf ein anderes Konzept zurückgegriffen werden. Beispielsweise wird dies durch eine als Masterantrieb definierte Belastungsmaschine erreicht, diese läuft momentgeregelt. Ihr Drehzahlwert wird der anderen Belastungsmaschine, die drehzahlgeregelt läuft, als Drehzahlsollwert vorgegeben und somit ist der Zwanglauf der Drehzahlen bei vorgegebenem Belastungsmoment sichergestellt. An dieser Stelle muss, zur Realisierung der Kurvenfahrt, der Vorderradeinschlagwinkel berücksichtigt werden.

Die Haftreibung zwischen Rad und Fahrbahn hängt nur von den verwendeten Reifen, der Reifenaufstandskraft und der Oberflächenbeschaffenheit der Belastungswalzen ab. Bei einer Integration in den Belastungsalgorithmus werden nur die hervorgerufenen Belastungsmomente berücksichtigt. Verschiedene Fahrbahnverhältnisse können durch verschiedene Oberflächen oder durch einen unterschiedlichen Anpressdruck der Reifen simuliert werden. Dazu muss eine entsprechende Einzelradaufhängung implementiert werden.

Bei kleinen Belastungsmomenten kommt es zu Abweichungen gegenüber den theoretisch erwarteten Werten. Ursache ist die nicht berücksichtigte Reibung der Belastungsmaschinen. Abhilfe schafft die direkte Erfassung der Momente an den Wellen, diese könnten Grundlage der Momentvorgabe sein. Da die verwendeten Algorithmen die Kräfte direkt am Rad betrachten, kann hierdurch eine qualitative Verbesserung erreicht werden.

## ***6 Zusammenfassung und Ausblicke***

Der verwirklichte Laborversuchsstand erlaubt umfassende Tests mit verschiedenen Steueralgorithmen für Antriebs- und Belastungsmaschine. Insbesondere die Umsetzung mit LabVIEW gestattet, durch die einfachen Möglichkeiten des Austauschens und Modifizierens implementierter Softwaremodule, eine sehr flexible und einfache Realisierung.

Weiterhin bietet der Laborversuchsstand die Chance einzelne Komponenten unter fest definierten Bedingungen zu testen, beispielsweise ein vorgegebenes Lastspiel für einen Fahrzeugantrieb. Auch der Austausch einzelner Hardwarekomponenten ist realisierbar.

### ***6.1 Der Laborversuchsstand***

Der Laborversuchsstand gestattet die explizite Vorgabe spezifischer Belastungsmomente für den rechten und linken Kfz-Antrieb. Diese werden in Abhängigkeit verschiedener fahrzeugspezifischer Parameter ermittelt und über die Belastungswalzen übertragen.

Bei einer Geradeausfahrt stellt sich dabei in Abhängigkeit der durch die Belastungswalzen vorgegebenen Belastungsmomente sowie der Oberflächenbeschaffenheit der Belastungsrollen, der Reifenbeschaffenheit und des Reibmoments des Antriebes eine entsprechende Geschwindigkeit ein.

Gegenüber einer Referenzgeschwindigkeit, die sich aus dem Mittelwert der Geschwindigkeiten der Belastungswalzen bilden lässt, ergibt sich bei  $a \neq 0$  ein Schlupf der Antriebsräder.

Die Umsetzung der Kurvenfahrt, insbesondere der Zwanglauf der Drehzahlen der Belastungsmaschinen, kann nicht mit den gewählten Algorithmen erreicht werden. Eine Möglichkeit der Realisierung ist, eine Belastungsmaschine als Masterantrieb laufen zu lassen und über diese ein entsprechendes Belastungsmoment vorzugeben. Der Drehzahlwert dieses Masterantriebes wird der anderen Belastungsmaschine, je nach Vorderradeinschlagwinkel, als Drehzahlsollwert zugeführt. Diese läuft drehzahl geregelt und setzt somit die vorgegebene Drehzahl entsprechend um. Die Antriebsmaschinen laufen hierbei mit den vorgegebenen Drehzahlen, je nach Haftreibung und Beschleunigung kann ein Schlupf auftreten.

## ***6.2 Schlussfolgerungen für den Steuerungsentwurf***

Die Auslegung von Steuerung und Datenbus eines Mehrmotorenantriebssystems kann in Anlehnung an das Beispiel dieser Arbeit methodisch erfolgen. Je nach Einsatzgebiet ergeben sich abweichende Randbedingungen. Ausgehend von den Steuerungs- und Kommunikationsaufgaben und einem Vergleich mit dem Stand der Technik, auf dem jeweiligen Anwendungsgebiet, kann eine geeignete Steuerung ausgewählt bzw. entwickelt werden. Insbesondere das strukturierte Entwerfen und die Auswahl der geeigneten Werkzeuge ist ein wichtiger Punkt, hier ist beispielsweise der Programmablaufplan zu nennen.

Durch einen modularisierten Aufbau von Steuerung und Software wird die Entwicklung vereinfacht und kann, bei klarer Definition der Schnittstellen, leicht in einzelne Bearbeitungskomplexe gegliedert werden.

Ein Aspekt ist die Möglichkeit der Weiterentwicklung des umgesetzten Systems und, im Falle eines Laborversuchsstandes, die Möglichkeit des Testens verschiedener Steueralgorithmen bzw. Hardwarekomponenten durch das Austauschen einzelner Module. Insbesondere bei der Auslegung von Versuchsständen bietet sich der Einsatz softwarebasierter Steuerungslösungen, wie LabVIEW, an. Eine grafische Programmieroberfläche unterstützt dabei die Möglichkeiten des einfachen Modifizierens der Steueralgorithmen. Einen großen Vorteil stellt die parallel zur Programmierung der Steueralgorithmen bereitgestellte Visualisierung dar.

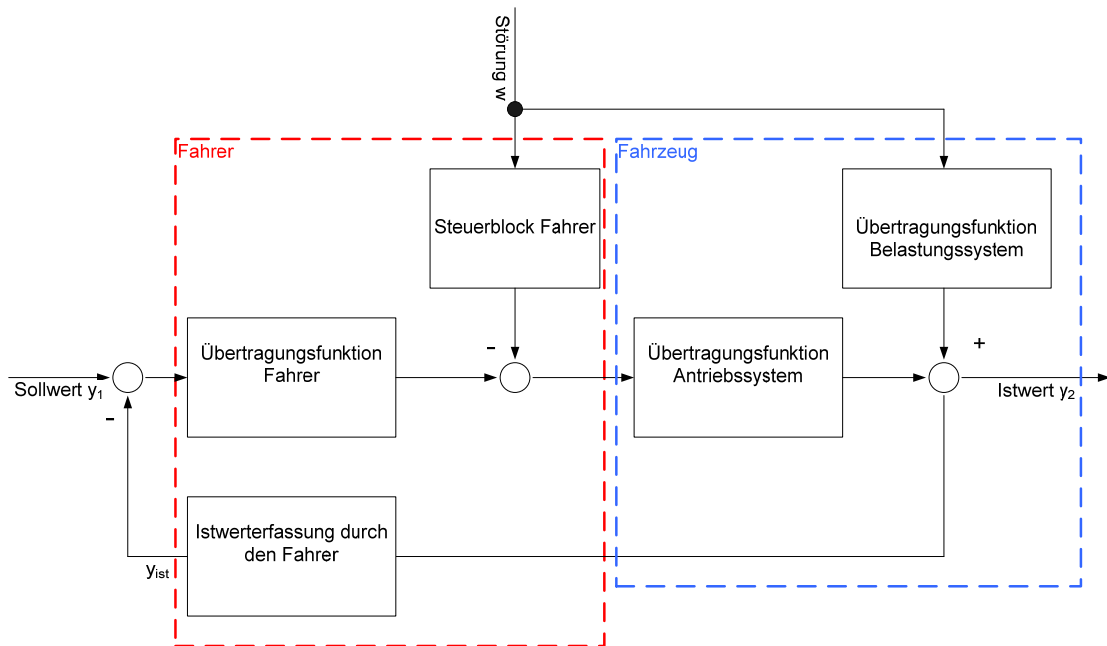
## ***6.3 Erstellen eines regelungstechnischen Modells des Laborversuchsstandes***

Im weiteren Verlauf der Arbeit am Laborversuchsstand ist es erforderlich, dessen dynamisches Verhalten tiefgründig zu untersuchen. Ziel sollte die theoretische Charakterisierung des Systems, eine genaue mathematische Beschreibung des gesamten Regelkreises und das Erstellen eines theoretischen Modells sein. Speziell die Erstellung eines Modells für die Vorgabe der verschiedenen Belastungsparameter ist problematisch, da die einzelnen Parameter nicht genau zu bestimmen sind.

Als Ergebnis sollte ein Regelkreis aus verschiedenen Einzelsystemen entstehen, der das Verhalten des Laborversuchsstandes möglichst genau nachbildet. Bild

6-1 zeigt eine vereinfachte Darstellung eines solchen regelungstechnischen Systems [14, 35].

Das Eingangssignal  $y_1$  ist beispielhaft ein vorgegebenes Geschwindigkeitsprofil, das durch den Fahrer umzusetzen ist. Eine Reaktion erfolgt durch das Betätigen von Gas- oder Bremspedal. In Abhängigkeit der Übertragungsfunktion des Antriebssystems erfolgt die Umsetzung und eine entsprechende Reaktion. Durch verschiedene Versuche, siehe Kapitel 5.1, kann die Übertragungsfunktion näherungsweise bestimmt werden.



**Bild 6-1 Regelkreis Fahrer - Fahrzeug**

Parallel dazu wirkt eine Störung  $w$  über eine noch zu bestimmende Übertragungsfunktion des Belastungssystems auf das Antriebssystem. Diese wird durch die dynamischen Eigenschaften des Belastungssystems in Verbindung mit den implementierten Steueralgorithmus bestimmt.

Die sich daraus ergebende Geschwindigkeit des Fahrzeugs  $y_2$  wird durch den Fahrer visuell erfasst. Er bildet hieraus, über den Block „Istwerterfassung durch den Fahrer“, eine für ihn maßgebende Abweichung  $y_{ist}$  vom Sollwert.

Über den „Steuerblock Fahrer“ wird nach Ausregelung einer Störung ein Offset zum Kompensieren einer weiterhin bestehenden Störung vorgegeben.

Die Übertragungsfunktion des Fahrers kann, nach McRuer, durch die Gleichung (6-1) in stark vereinfachter Form dargestellt werden [35]. Die Übertragungs-

funktion  $M(s)$  des Menschen (Fahrer) setzt sich dabei aus folgenden Größen zusammen:

- $K_M$  ist der Verstärkungsfaktor
- $T_V$  und  $T_S$  die Vorhalt- und die Verzögerungszeit
- $\tau$  die Totzeit des Menschen

$$M(s) = K_M \frac{1 + sT_V}{1 + sT_S} e^{-s\tau} \quad (6-1)$$

Das zu erstellende Modell kann im Weiteren mit dem Verhalten eines realen Kfz verglichen werden und an dieses optimal angepasst.

#### ***6.4 Weiterentwicklung der Komponenten des Laborversuchsstandes***

Im Weiteren sind umfassende Untersuchungen der dynamischen Eigenschaften und Anpassungen der verwendeten Axialflussmaschinen erforderlich. Diese müssen für einen Einsatz als Radnabenmotor im Kfz bezüglich Baugröße, Gewicht und Drehmoment optimiert werden. Ein möglichst geringes Gewicht ist wegen des Einsatzes in der ungedämpften Radnabe unabdingbar.

Um am Laborversuchsstand variable Radlasten, die insbesondere während einer Kurvenfahrt auftreten, zu berücksichtigen, muss die starre Befestigung der Räder durch eine flexible Radaufhängung ersetzt werden.

Ein weiterer Schritt ist die Entwicklung spezieller Stromrichter für die Ansteuerung der Antriebsmotoren des Laborversuchsstandes. Da der Kfz-Antrieb möglichst genau nachgebildet werden soll, müssen Umrichter gemäß dem Einsatz im Kfz entwickelt werden. Hierbei geht es weniger um Umwelteinflüsse und Baugröße, als vielmehr um die leistungs- und kommunikationstechnischen Parameter. Wegen ihrer Kommunikations- und Reaktionszeiten ist eine Anpassung an die Steuerung notwendig. Diese erlaubt Übertragungsgeschwindigkeiten von bis zu 1 MBit/s, dadurch wird eine für alle Fälle ausreichende Übertragungszeit unterhalb von einer Millisekunde gewährleistet.

Auch eine Dezentralisierung der Steuerung, die Fahrsicherheitssysteme betreffend, sollte an dieser Stelle experimentell untersucht werden. Hierdurch können notwendige Sicherheitsaspekte besser implementiert werden. Ein Weg ist, in Zusammenarbeit mit einem Kfz-Hersteller, die Integration der Stromrichter und der dazugehörigen Intelligenz direkt in die Radnabe, siehe auch Kapitel 2.2.

Der Einfluss der Reibung zwischen Rad und Fahrbahn kann nur über das Material der Reifen, der Reifenaufstandskraft und die Fahrbahnbeschaffenheit nachgebildet werden. Dementsprechend muss eine Möglichkeit zum Austausch der Oberflächen der Belastungswalzen geschaffen werden.

## **7 Literaturverzeichnis**

- [1] Adler, U.  
Kraftfahrtechnisches Taschenbuch  
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991
- [2] Analog Devices  
ADSP-21061 EZ-KIT Lite: Reference Manual  
Revision 2.0, Mai 2001
- [3] ADSP-2106x SHARC™ User´s Manual (Second Edition), Norwood /USA  
(May 1997)
- [4] Beiker, S.  
Verbesserungsmöglichkeiten des Fahrverhaltens von Pkw durch zusammenwirkende Regelsysteme  
VDI Verlag, Düsseldorf, 2000
- [5] Beikirch, H.  
Automotive network technology  
In: Embedded World 2004, Design & Elektronik, Poing, 2004
- [6] Benz, St.  
Dissertation: Eine Entwicklungsmethodik für sicherheitsrelevante Elektroniksysteme im Automobil  
Universität Friedericiana Karlsruhe, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2004
- [7] Robert Bosch GmbH  
Fahrsicherheitssysteme  
Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, Wiesbaden, 1998
- [8] Böther, K., Breckwoldt, H., Siedler, H.-J., Wieting, R.  
Elektronik IV B, Meß- und Regelungstechnik  
Plaum Verlag, München, 1991
- [9] Brachmann, Th.  
Honda Civic Hybrid  
In: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge, Naunin, D., 2004

- 
- [10] Cyr, J.-M., Lambert, G.  
Regelung elektrischer Antriebe  
Springer Verlag Berlin, 2000
- [11] Daimler Chrysler  
Hybrid im Optimum  
In: High-Tech-Report, Heft 1, 2005, Seite 24 - 28
- [12] Dilger, E.  
Konferenz-Einzelbericht: Aktive Systeme zur Fahrzeugsicherheit, EURO-  
FORUM Konferenz  
Bosch, Stuttgart, 1999
- [13] DIN 66001  
Informationsverarbeitung: Sinnbilder und ihre Anwendung
- [14] Dörrscheidt, F., Latzel, W.  
Grundlagen der Regelungstechnik  
B. G. Teubner Stuttgart, 1993
- [15] Fischer, R.  
Elektrische Maschinen  
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2000
- [16] Flaig, A.  
Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Kraftfahr-  
zeuge mittels Simulation  
2002
- [17] Flotow, P.; Steger, U.  
Die Brennstoffzelle – Ende des Verbrennungsmotors?  
Verlag Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, 2000.
- [18] Fried, O.  
Dissertation: Betriebsstrategie für einen Minimalhybrid-Antriebsstrang  
Shaker Verlag, Aachen, 2004



- 
- [19] Harbolla, B.  
Schriftenreihe Automobiltechnik  
Dissertation: Entwicklung eines Bewertungsverfahrens zur Auswahl von Pkw-Hybridantrieben und Realisierung eines seriennahen Antriebskonzeptes  
Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen mbH (fka), 1993
- [20] Heinrich, B. (Hrsg.)  
Messen – Steuern – Regeln: Elemente der Automatisierungstechnik  
Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 2003
- [21] Hirschl, B., Hoffmann E.  
Zukunftstechnologie Brennstoffzelle?  
IÖW gGmbH, Berlin, 2003
- [22] 22, I.  
Electric and Hybrid Vehicles: design fundamentals  
CRC Press LLC, 2003
- [23] Jacobsen, B.  
Potential of electric wheel motors as new chassis actuators for vehicle manoeuvring  
Journal of Automobile Engineering, Band 216, Heft 8, Seite 631 - 640,  
Göteborg, 2002
- [24] Johnston, D.  
TM4 Motor-Wheel Drive and Control System: Performance, Benefits and Advantages  
EVS-17, 17<sup>th</sup> International Electric Vehicle Symposium,  
Montreal, 2000
- [25] Iies-Klumpner D.  
Permanent Magnet Synchronous Motor Solutions for Automotive Applications including X-by-Wire Systems  
In: Proceedings of PCIM 2004, Nürnberg, 2004, Seite 486 - 491

- 
- [26] Kohring, A.  
Systematisches Projektieren und Testen von Steuerungssoftware für  
Werkzeugmaschinen  
RWTH Aachen, Verlag Shaker Aachen, 1993
- [27] Kötz, R., Dietrich, Ph., Hahn, M., Büchi, F.  
Supercaps – Eigenschaften und Fahrzeuganwendungen  
In: VDI Berichte 1874, Düsseldorf, 2005, Seite 175 - 188
- [28] Kuschel, J., Michel, H., Staib, B.  
Ultracap-Module, leistungsfähige Energiespeicher für Hybridfahrzeuge  
In: Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, Braunschweig, 2004, Seite 55 - 59
- [29] Laeuffer, J.  
Hybrid Vehicles  
In: Proceedings of PCIM 2004, Nürnberg, 2004, Seite 184 - 189
- [30] Leonhard, W.  
Regelung elektrischer Antriebe  
Springer Verlag, Berlin, 2000
- [31] Lutz, H.  
Taschenbuch der Regelungstechnik  
Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2003
- [32] Marco, J., Ball, R. Jones, R.P., Roxburgh, A.  
The design and hardware-in-the-loop simulation test of a parallel hybrid  
transmission control system  
In: International journal of vehicle design, Genf, 2002, Band 30, Heft 4,  
S. 362 - 385
- [33] Mitschke, M.  
Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band A  
Springer Verlag Berlin, 1995
- [34] Mitschke, M.  
Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band B  
Springer Verlag Berlin, 1997

- 
- [35] Mitschke, M.  
Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band C  
Springer Verlag Berlin, 1997
- [36] Müller, G.  
Grundlagen elektrischer Maschinen  
VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1994
- [37] Nagl, M. (Hrsg.)  
Building Tightly Integrated Software Development Environments: The  
IPSEN Approach  
Springer-Verlag, Berlin, 1996
- [38] Nürnberg, W., Hantisch, R.  
Die Prüfung elektrischer Maschinen  
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1987
- [39] Pehnt, M.  
Energierevolution Brennstoffzelle? – Perspektiven, Fakten, Anwendun-  
gen  
WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002
- [40] PRAXIS Profiline  
Controller Area Network: CAN in Automation (CiA)  
Vogel Verlag, Würzburg, 1998
- [41] Quissek, F., Lück, P., Köhle, S.  
Rahmenbedingungen und Zukunft des E-Mobils aus der Sicht eines Her-  
stellers  
In: VDI Berichte 1378, Düsseldorf, 1998, Seite 1 - 6
- [42] Reichel, H.-R.  
Elektronische Bremssysteme: Vom ABS zum Brake-by-Wire  
Expert Verlag Renningen, 2003
- [43] Reimpell, J.  
Fahrwerktechnik: Radschlupf-Regelsysteme  
Vogel Verlag, Würzburg, 1993

- 
- [44] Rieth, P.  
Elektronisches Stabilitätsprogramm: die Bremse die lenkt  
Verlag Moderne Industrie, 2001
- [45] Rucha, B., Teepe, G.  
LIN – Local Interconnect Network  
Elektronik Automotive 01/2003
- [46] Schmitz, C.  
Neue Batteriesysteme und Batterie Management für Hybridfahrzeuge  
In: Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, Braunschweig, 2004, Seite 55 - 59
- [47] Schummy, Ohl  
Handbuch digitaler Schnittstellen, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1994
- [48] Schwaben, M.  
Dissertation: Mehrphasige elektronisch kommutierte Synchronmaschine  
als Komponente zur Realisierung eines Kfz-Hybridantriebs  
VDI Verlag GmbH Düsseldorf, 2003
- [49] Hrsg.: U. Steyer  
Die Brennstoffzelle – Ende des Verbrennungsmotors?  
Verlag Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, 2000
- [50] Uhlig, R.  
Dissertation: Beitrag zur Erarbeitung von Steueralgorithmien eines Elektrischen Mehrmotorenantriebes für Fahrzeuge an einem Laborversuchsstand  
BTU Cottbus, Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebstechnik, 2001
- [51] VDI Berichte 1374  
Systemengineering in der Kfz-Entwicklung: X-By-Wire: Design von verteilten, fehlertoleranten und sicherheitskritischen Anwendungen in modernen Kraftfahrzeugen, Seite 427 - 442  
VDI Verlag, Düsseldorf, 1997

- 
- [52] VDI Berichte 1547  
Elektronik im Kraftfahrzeug: Anforderungen an ein zukünftiges Bussystem für fehlertolerante Anwendungen aus Sicht Kfz-Hersteller, Seite 23 - 41  
VDI Verlag, Düsseldorf, 2000
- [53] VDI Berichte 1565  
Innovative Power Train Systems  
VDI Verlag, Düsseldorf, 2000
- [54] VDI Berichte 1646  
Elektronik im Kraftfahrzeug  
VDI Verlag, Düsseldorf, 2001
- [55] Vogel, J.  
Elektrische Antriebstechnik  
Hüthig Verlag, Heidelberg, 1998
- [56] Vollmer, Th.  
Dissertation: Methodik zur Entwicklung einer Fahrstrategie für Fahrzeuge, ausgeführt am Beispiel des Autarken Hybrids  
TU München, Lehrstuhl für Maschinenelemente, 1998
- [57] Wallentowitz, H.  
Vertikal- / Querdynamik von Kraftfahrzeugen  
Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen mbH, 1997
- [58] G. Walliser und 44 Mitautoren  
Elektronik im Kraftfahrzeugwesen, expert Verlag, Renningen, 2002
- [59] Walter, M., Gröter, H.-P., Rechberger K., Kustosch, M., Endres, J.  
Komponenten und Systemlösungen für Hybridfahrzeuge  
In: Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2004, Seite 1217 - 1226
- [60] Weider, M., Metzner, A., Rammler, St.  
Das Brennstoffzellen-Rennen  
Discussion Paper SP III 2004-101, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, 2004

- [61] Wieczorrek, H.W., Mertens, P.  
Management von IT-Projekten  
Springer - Verlag, Berlin, 2005
- [62] Zoelch, U.  
Dissertation: Ein Beitrag zu optimaler Auslegung und Betrieb von Hybrid-  
fahrzeugen  
TU München, Lehrstuhl Elektrische Antriebstechnik, 1998
- [63] Zomotor, A.  
Fahrwerktechnik: Fahrverhalten  
Vogel Verlag, Würzburg, 1987

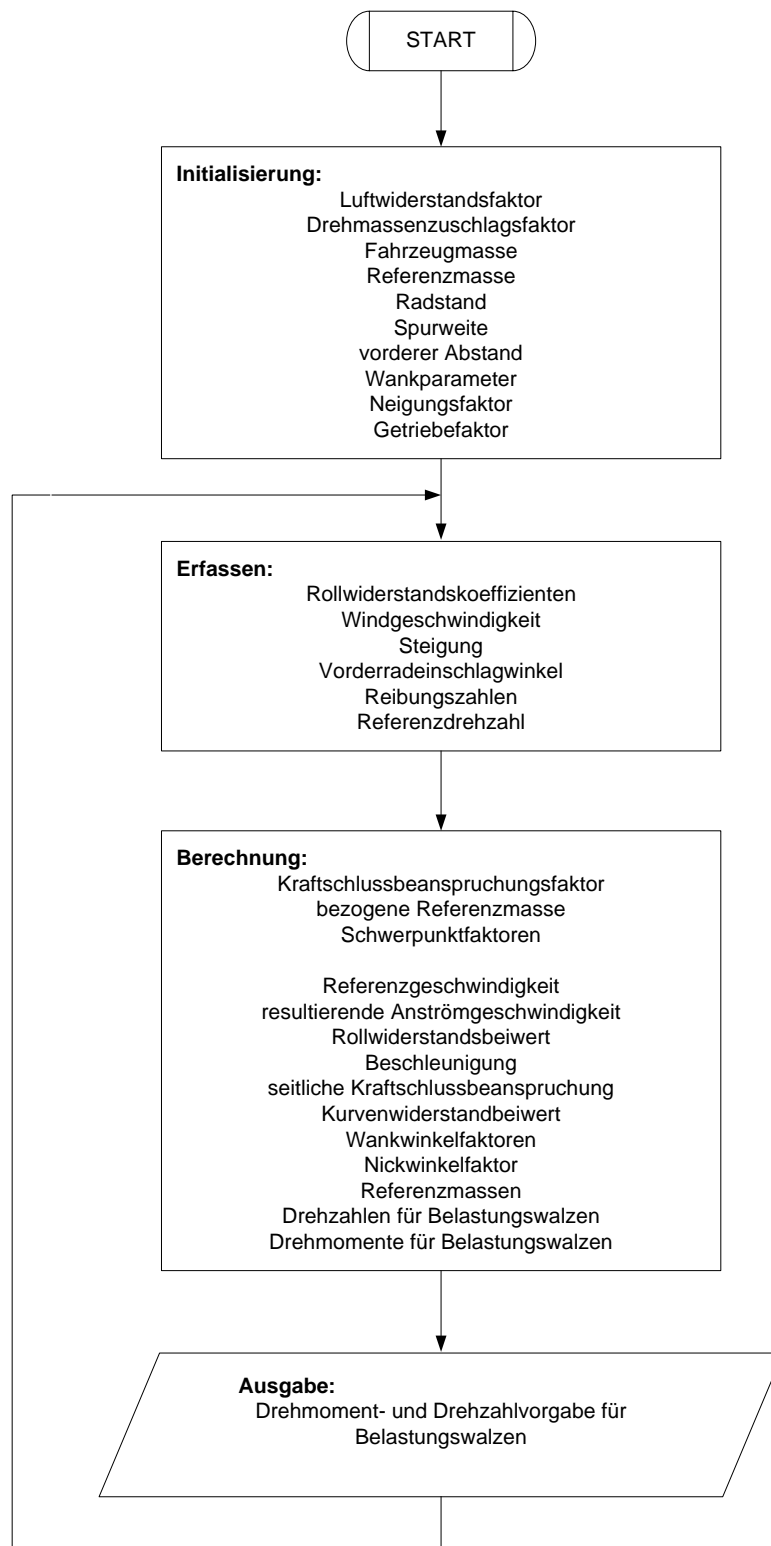
### **Internetquellen**

- [64] <http://www.flexray.com> (08.11.2005)
- [65] <http://www.goldammer.de> (16.05.2005)
- [66] <http://www.lin-subbus.org> (08.11.2005)
- [67] <http://www.mostnet.de> (08.11.2005)
- [68] <http://www.ni.com> (16.05.2005)
- [69] <http://www.positivenews.de/benz.htm> (08.01.2003)
- [70] <http://www.sae.org> (11.07.2005)
- [71] <http://www.semiconductors.bosch.de/> (08.11.2005)
- [72] <http://www.soundlabsgroup.com.au/canbus/> (04.05.2005)
- [73] <http://www.tttech.com> (14.06.2004)

---

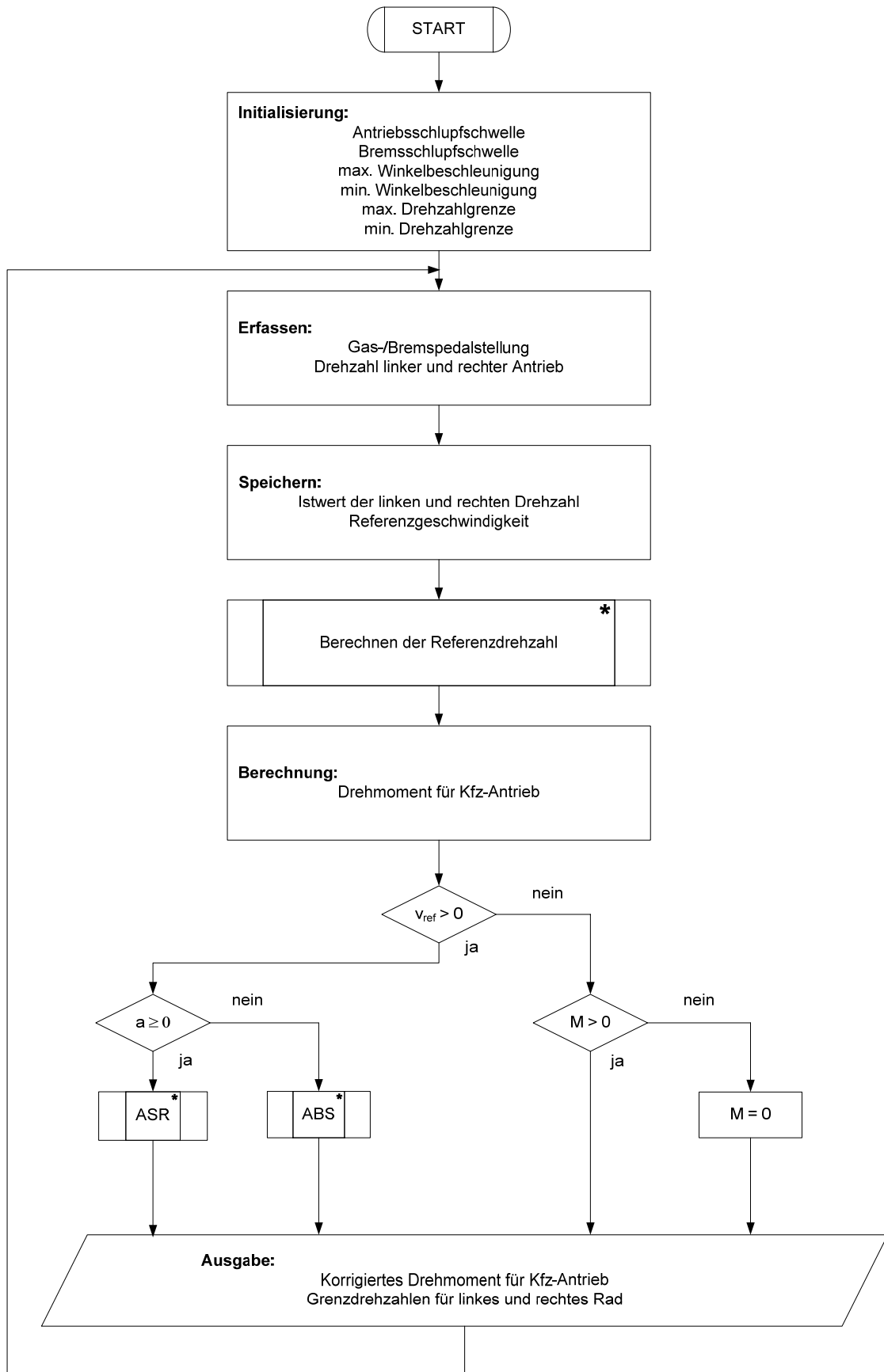
## ***8 Anhang***

Anhang 1: Steueralgorithmus der Belastungseinrichtung.....	122
Anhang 2: Steueralgorithmus „Kfz-Antrieb“ .....	123
Anhang 3: Programmablaufplan „Referenzdrehzahl“ .....	124
Anhang 4: Programmablaufplan „Antiblockiersystem“ .....	125
Anhang 5: Programmablaufplan „Antriebs-Schlupf-Regelung“ .....	126
Anhang 6: Programmablaufplan Interruptserviceroutine „INT_AD974“ .....	127
Anhang 7: Programmablaufplan Interruptserviceroutine „INT_UART“ .....	128
Anhang 8: Programmablaufplan „INIT_HARDWARE“ .....	129

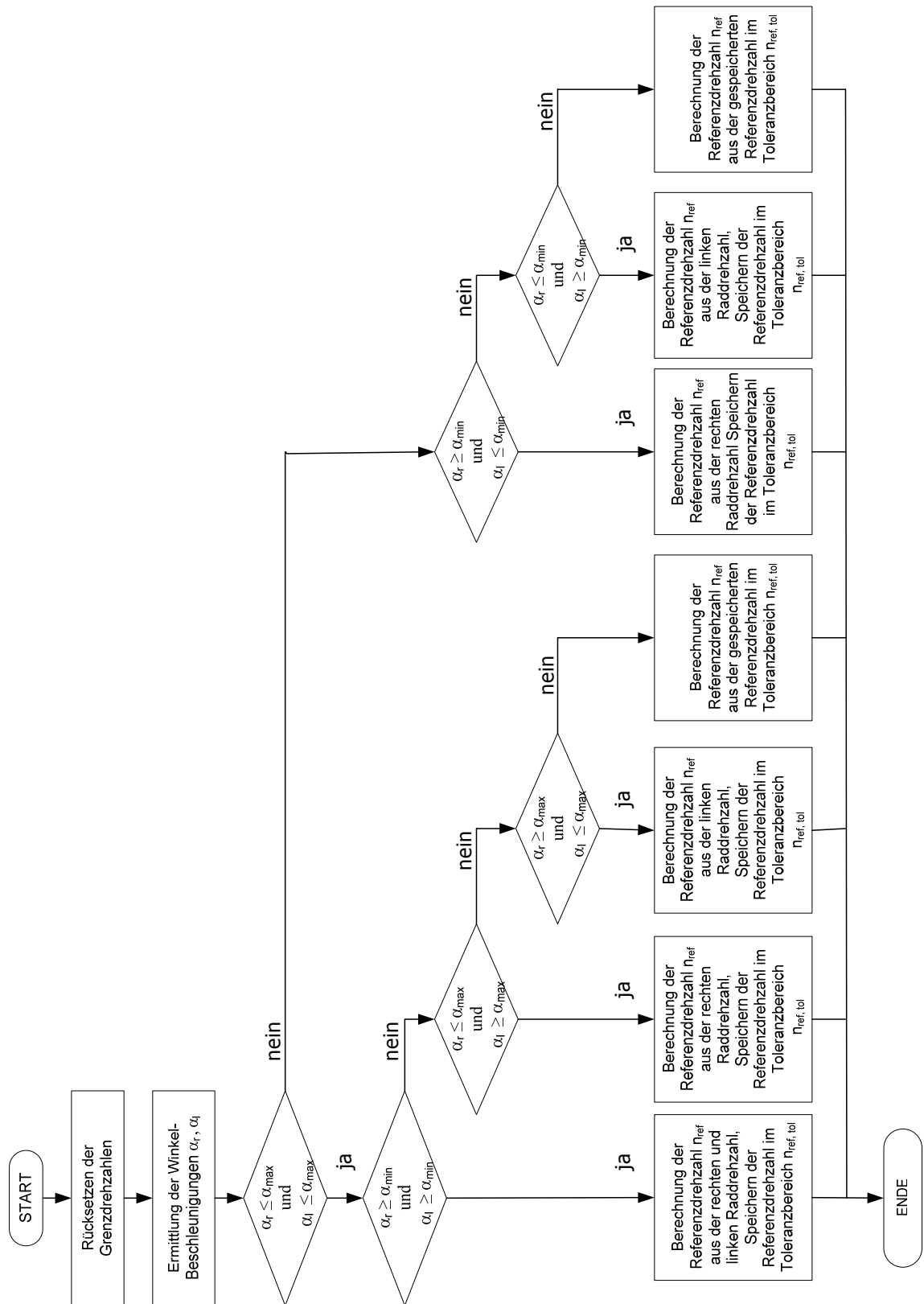
**Anhang 1: Steueralgorithmus der Belastungseinrichtung**



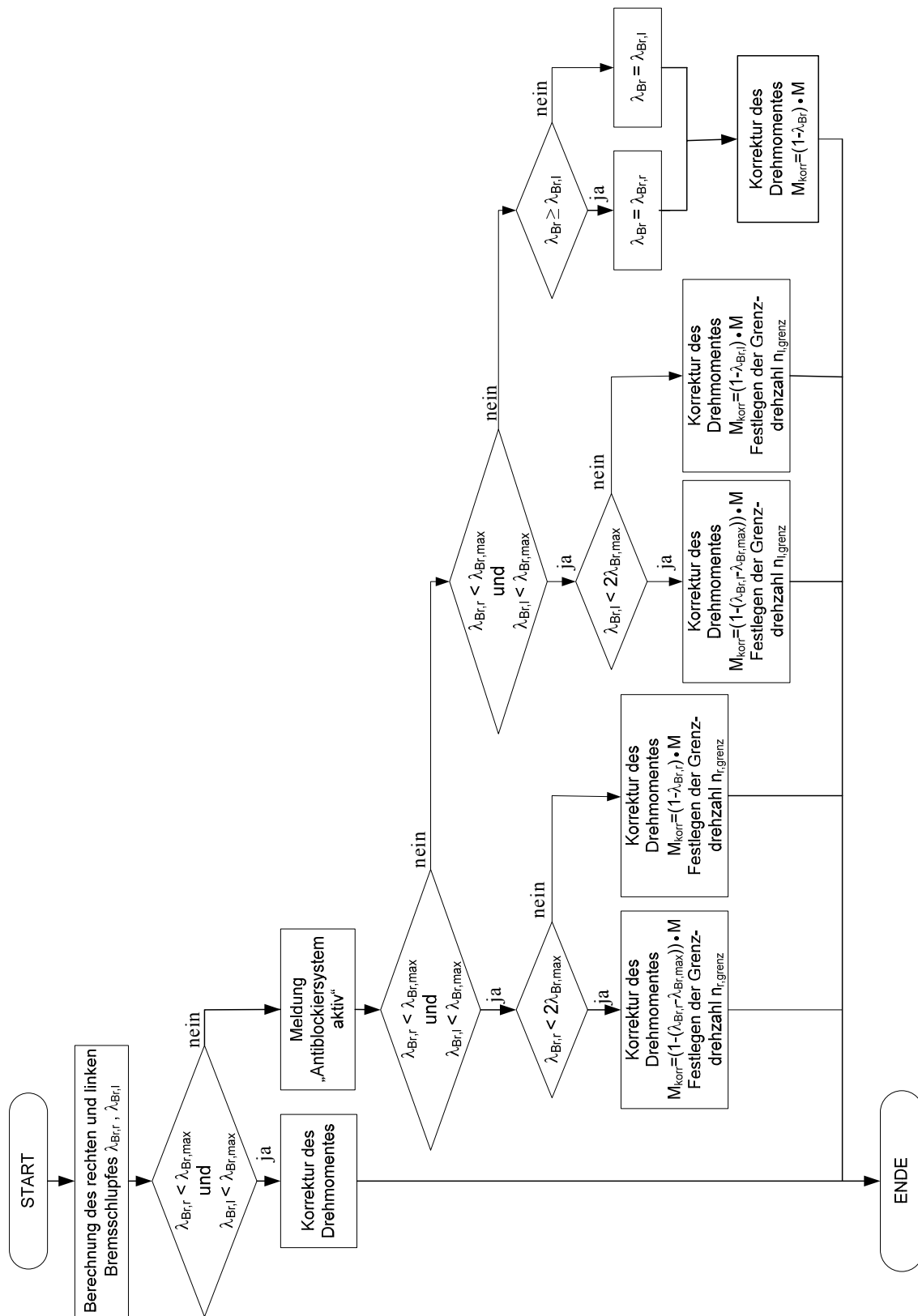
## Anhang 2: Steueralgorithmus „Kfz-Antrieb“



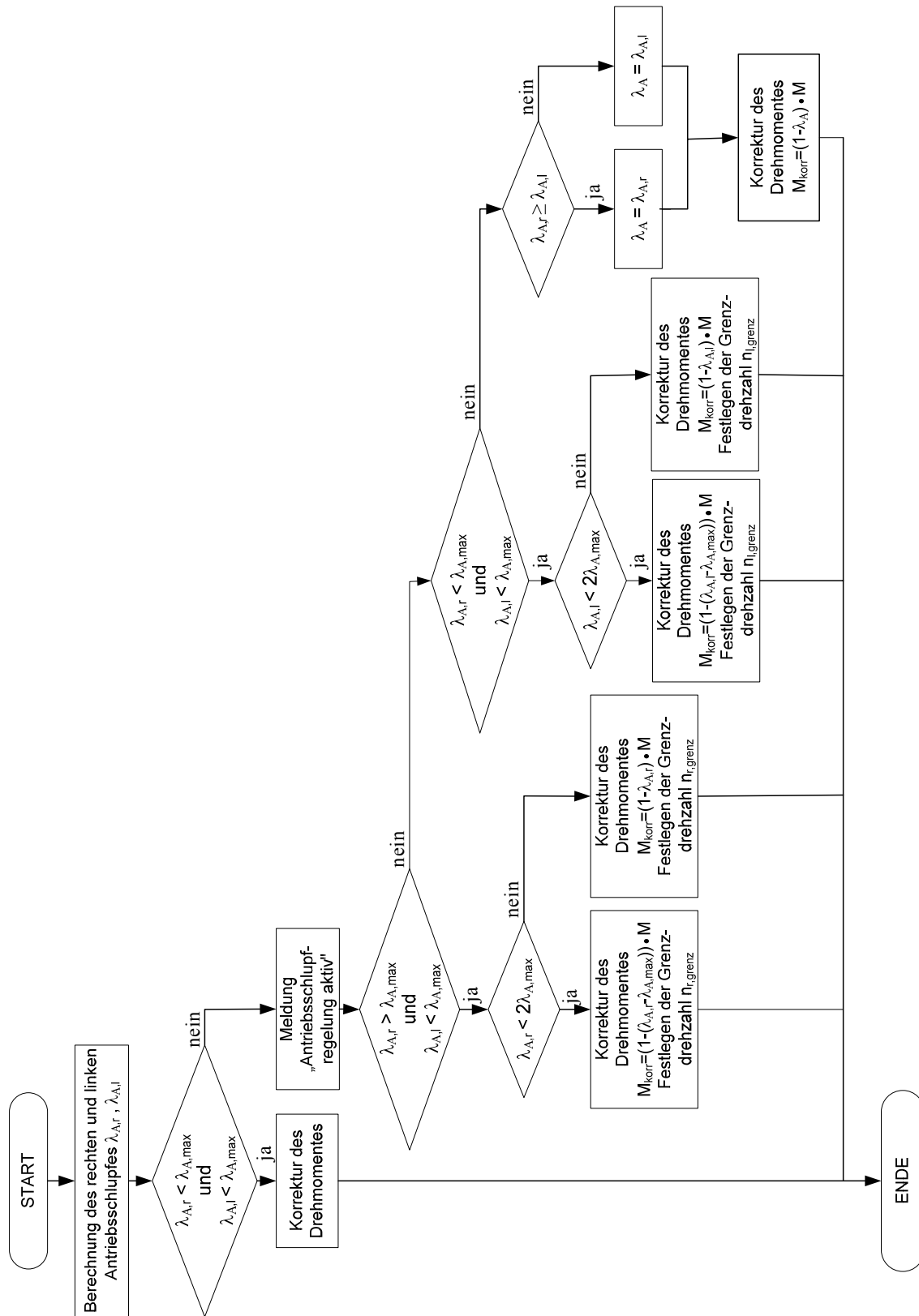
Anhang 3: Programmablaufplan „Referenzdrehzahl“

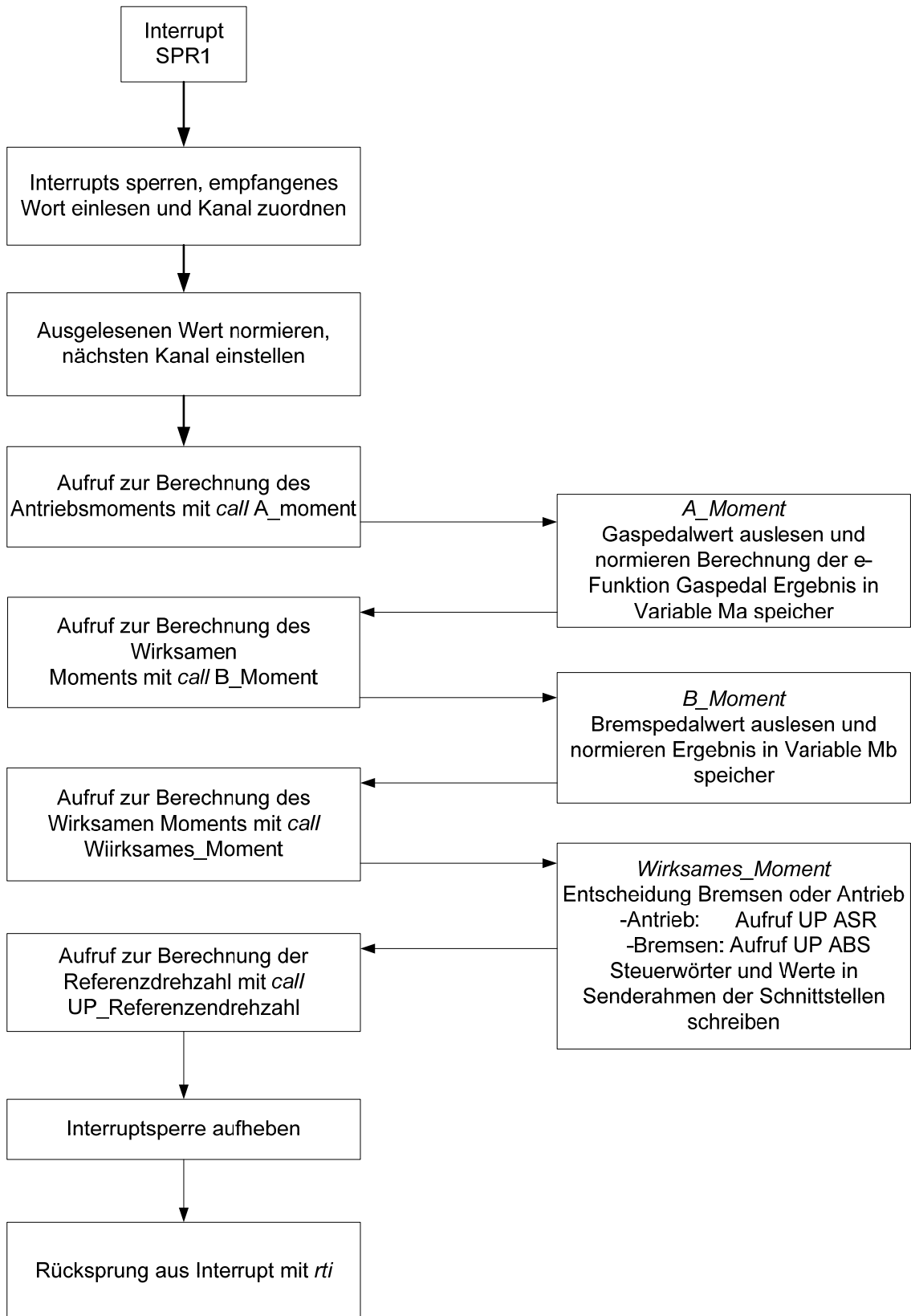


Anhang 4: Programmablaufplan „Antiblockiersystem“

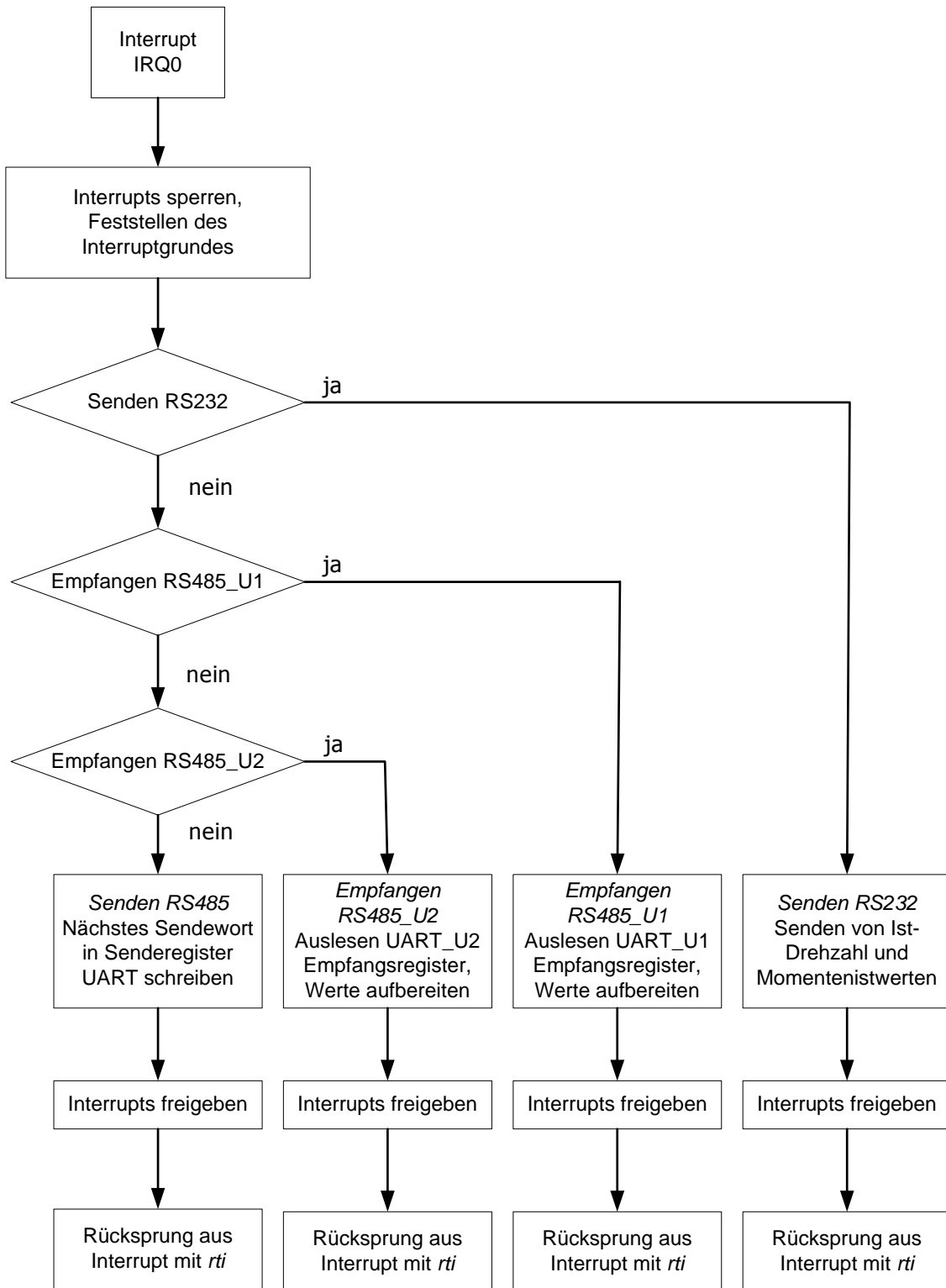


Anhang 5: Programmablaufplan „Antriebs-Schlupf-Regelung“



**Anhang 6: Programmablaufplan Interruptserviceroutine „INT\_AD974“**

## Anhang 7: Programmablaufplan Interruptserviceroutine „INT\_UART“



**Anhang 8: Programmablaufplan „INIT\_HARDWARE“**