

Energieeinsparmaßnahmen am Methanol-Brennstoffzellen-Fahrzeug

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule
Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Dirk Spaniel
aus
Marburg an der Lahn

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. H. Wallentowitz
 Universitätsprofessor Dr.-Ing. D. Stolten

Tag der mündlichen Prüfung: 11.Juli 2003

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

D 82 (Dissertation RWTH Aachen)

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Henning Wallentowitz
Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika) RWTH Aachen
Steinbachstraße 7, D-52074 Aachen

Telefon (0241) 80-25600 **Fax** (0241) 80-22147

e-mail office@ika.rwth-aachen.de

internet <http://www.ika.rwth-aachen.de>

Druck

Büro- und Servicemanagement

Medienservice

DaimlerChrysler AG

70546 Stuttgart

internet <http://www.daimlerchrysler.com>

Nachdruck, photomechanische und elektronische
Wiedergabe / Bearbeitung und Übersetzung vorbehalten.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit beruht auf Untersuchungen, die ich von 1997 bis 2000 während meiner Tätigkeit als Doktorand im Projekthaus Brennstoffzelle der DaimlerChrysler AG in Kirchheim/Teck-Nabern durchgeführt habe. Die hochschulseitige Betreuung erfolgte durch das Institut für Kraftfahrwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Wallentowitz (RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrwesen), Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Panik, Herrn Dr.-Ing. J. Friedrich, Herrn Dipl.-Ing. W. Baumgärtner und dem leider verstorbenen Dr. rer. nat. R. Krauss (alle DaimlerChrysler AG), die die Durchführung der Arbeit ermöglichten und sie wissenschaftlich betreuten.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Stolten (RWTH Aachen, Lehrstuhl für Brennstoffzellen) danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Ein besonderer Dank geht auch an meine Freundin, Fr. Dipl.-Übersetzerin Sabine Perlitius sowie an Herrn Dipl.-Ing. Achim Ott sowie an meine Eltern, die alle durch ihre mentale Unterstützung und zahlreiche Rücksprachen einen großen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hatten.

Desweiteren möchte ich auch meinen jetzigen Vorgesetzten Herrn Dipl.-Ing. P. Gavranovic, Dipl.-Ing. H. Struck und Herrn Dr.-Ing. R. Rutz danken für das Verständnis das Sie aufbrachten um diese Arbeit auch nach meiner Zeit im Projekthaus Brennstoffzelle fertigzustellen.

Stuttgart, Juli 2003

Dirk Spaniel

Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	12
1.1. Definition und Sinn von Brennstoffzellen-Fahrzeugen	12
1.2. Zielsetzung der Arbeit	13
1.3. Vorgehensweise	15
2 Antriebskonzepte für Brennstoffzellen-Fahrzeuge	16
2.1. Klassifizierung von Antriebskonzepten für Brennstoffzellen-Fahrzeuge	16
2.2. Lean-Brennstoffzellen-Fahrzeug	17
2.3. Hybrid-Brennstoffzellen-Fahrzeug	18
2.3.1 Serieller Hybrid	19
2.3.2 Parallel-Hybrid	21
2.3.3 Kombinations-Hybrid	22
2.3.4 Leistungsverzweigter Hybrid	24
2.3.5 Vergleich der vorgestellten BZ-Antriebskonzepte	25
3 Stand der Technik	28
3.1. Ausführungsformen von Brennstoffzellensystemen (BZS)	28
3.1.1 BZS mit selektiver Oxidation als Gasreinigung (Basis-BZS)	30
3.1.2 BZS mit Membran-Gasreinigung	31
3.1.3 Umgebungsdruck-BZS	32
3.2. Entwicklungsstand der wesentlichen Antriebsstrangkomponenten	34
3.2.1 Gaserzeugungssysteme	34
3.2.2 Brennstoffzellen	35
3.2.3 Nebenaggregate im BZS	36
3.2.4 Elektrischer Antrieb	40
3.2.5 Elektrische Speichermedien	41
3.3. Definition des Basis-Fahrzeugs	41
4 Simulationstechnische Beschreibung eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs	42
4.1. Modellierung eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs	42
4.1.1 Regelungsstruktur eines BZ-Fahrzeugs	42
4.1.2 Strukturen von Simulationsmodellen	44
4.2. Modellierung der Komponenten und Eingabedaten der Simulation	46
4.2.1 Abbildung des Brennstoffzellensystems	48
4.2.2 Stationäre Abbildung der Gaserzeugung	50
4.2.3 Beschreibung der Brennstoffzelle	60
4.2.4 Beschreibung der Nebenaggregate	65
4.2.5 Elektrischer Antrieb	78
4.2.6 Getriebe	81

4.2.7	Fahrzeug_____	83
5	Validierung des Simulationsmodells _____	87
5.1.	Vorgehensweise _____	87
5.2.	Validierung der Fahrwiderstandskraft und Fahrenergie _____	89
5.3.	Validierung des elektrischen Antriebs _____	90
5.4.	Validierung der Gaserzeugung _____	91
5.4.1	Validierung des stationären Verhaltens _____	91
5.4.2	Validierung des dynamischen Verhaltens _____	92
5.5.	Validierung der Brennstoffzelle _____	94
5.5.1	Open-Loop-Validierung _____	94
5.5.2	Closed-Loop-Validierung _____	98
5.6.	Validierung der Nebenaggregate _____	99
5.7.	Validierung des BZS _____	99
6	Simulationstechnische Untersuchung zu Antriebskonzepten _____	103
6.1.	Simulationsergebnisse Basisfahrzeug _____	104
6.1.1	Fahrwiderstand _____	104
6.1.2	Elektrischer Antrieb _____	106
6.1.3	Brennstoffzellensystem _____	108
6.1.4	Brennstoffzelle _____	109
6.1.5	Gaserzeugung _____	110
6.1.6	Gesamtfahrzeug _____	111
6.2.	Möglichkeiten zur Reduktion des Energieverbrauchs _____	112
6.2.1	Modifikation des Fahrzeugs _____	113
6.2.2	Modifikation des Getriebes _____	114
6.2.3	Modifikation des elektrischen Antriebs _____	115
6.2.4	Hybrid-BZ-Antriebskonzepte _____	117
6.2.5	Modifikationen der Gasreinigung und des Druckniveaus des BZS _____	124
6.2.6	Modifikation am Luftmodul _____	129
6.2.7	Gaszwischenlagerung _____	132
6.2.8	BZS-Abschaltung mit Bordnetzmodifikation _____	134
6.2.9	Vergrößerte Lastspreizung der Gaserzeugung _____	136
6.2.10	Auslegungs-Modifikationen an der Brennstoffzelle _____	138
6.3.	Vergleich verbrauchsreduzierender Maßnahmen _____	142
6.4.	Wechselwirkungen der verschiedenen BZS-Modifikationen _____	143
6.5.	Synthese eines verbrauchsoptimierten BZ-Fahrzeugs _____	147
6.6.	Ergebnisse der Untersuchungen _____	151
7	Zusammenfassung _____	153

Anhang A: Beschreibungen Prüfstandstechnik und elektrischer Antrieb	155
Anhang A.1: Berechnung Fahrwiderstand am Rollenprüfstand	155
Anhang A.2: Einfluss der Größen-Skalierungseffekte bei elektrischen Antrieben	156
Anhang A.3: Verwendete Motor- und Getriebesteuerung	157
Anhang B: Chemische und thermodynamische Beziehungen	159
Anhang B.1: Chemische Reaktionsgleichungen	159
Anhang B.2: Thermodynamische Beziehungen	160
Anhang C: Auslegungsdaten zum Brennstoffzellensystem	161
Anhang C.1: Systembeschreibung Brennstoffzellensysteme	161
Anhang C.2: Kennlinien und Tabellen	162
Anhang D: Ergänzende Simulationsergebnisse	171
Anhang D.1: Simulationsergebnisse aus US-Fahrzyklen	171
Anhang D.2: Simulationsergebnisse eines optimierten BZ-Konzepts	176
Anhang D.3: Simulationsergebnisse von Fahrleistungsberechnungen	176
Anhang E: Ergänzende Struktogramme zum Simulationsmodell	177
Anhang F: Normen, Regelungen und Fahrzyklen	180
Literaturverzeichnis	182

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen

A_{CK}	= effektive Fläche des Zusatzkühlers	E_{Rad}	= Fahrenergie aus Fahrwiderständen
A_{Fzg}	= Querschnittsfläche des Fahrzeugs	EURO 4	= Abgasnorm EU
A_{HK}	= effektive Fläche des Hauptkühlers	F	= Faraday-Konstante
AS	= Asynchron-Elektromotor	F_{Aero}	= Luftwiderstandskraft
AWT	= Abgaswärmetauscher	F_{RR}	= Rollreibungswiderstandskraft
a_x	= Längsbeschleunigung	F_{St}	= Steigungswiderstandskraft
A_{Zelle}	= Zellfläche in der BZ	FTP 75	= Federal Test Procedure (US-Stadt-Fahrzyklus)
BZ	= Brennstoffzelle	F_{WD}	= Gesamtfahrwiderstandskraft
BZ-Fahrzeug	= Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug	$F_{WD,Rolle}$	= Fahrwiderstandskraft am Rollenprüfstand
BZS	= Brennstoffzellensystem	F_x	= Zugkraft
BZ-Stack	= Brennstoffzellenverbund (engl.)	g	= Erdbeschleunigung
C_p	= spezifische Wärmekapazität	GES	= Gaserzeugungssystem
C_{RR}	= Rollreibungskoeffizient	H_R	= Reaktionsenthalpie
C_W	= Luftwiderstandskoeffizient	H_U	= Unterer Heizwert
DC/DC-Wandler	= Gleichspannungswandler	h_s	= Höhe des Fahrzeugschwerpunkts
E_{ax}	= Beschleunigungsanteil an der Fahrenergie	i	= Getriebeübersetzung
$E_{CH_3OH, Verd}$	= Energieverbrauch an Methanol im Verdampfer	I_{Bat}	= Batterie-Stromstärke
$E_{el, Antr}$	= elektrische Energieaufnahme des Elektromotors	I_{BZ}	= BZ-Stromstärke
$E_{el, Antr, BN}$	= elektrische Energieaufnahme des Elektromotors inklusive des Bordnetzes	I	= Radstand
$E_{el, BN}$	= elektrische Energieaufnahme des Bordnetzes	I_h	= Schwerpunktsabstand zur Hinterachse
$E_{el, Brems}$	= elektrische Energieabgabe des Elektromotors beim Bremsen	Masse _{Fzg, ff, ECE}	= Fahrzeuggewicht im fahrfertigen Zustand (nach ECE)
$E_{el, BZ}$	= elektrische Energie der BZ	M_{Antr}	= Drehmoment des elektr. Antriebs
$E_{el, Komp}$	= elektrische Energieaufnahme des Luftmoduls	$\dot{m}_{CH_3OH, Verd}$	= Massenstrom des eingespritzten Methanols
$E_{el, KS}$	= elektrische Energieaufnahme der Kühlaggregate	$\dot{m}_{O_2, KB, aus}$	= Massenstrom CO ₂ am Ausgang des katalytischen Brenners
$E_{el, NA}$	= elektrische Energieaufnahme der Nebenaggregate	M_{EA}	= Maximalmoment des elektr. Antriebs ohne Momentenbegrenzung durch BZS
$E_{H_2, BZ}$	= Energieverbrauch an Wasserstoff in der BZ	MeOH	= Kurzform für Methanol
		\dot{m}_{Exp}	= Massenstrom am Luftmodul-Ausgang
		m_{Fzg}	= Fahrzeugmasse
		M_{Getr}	= Drehmoment des Antriebsstrangs (am Getriebeausgang)
		$\dot{m}_{H_2, BZ}$	= in der BZ elektrochemisch umgesetzter Wasserstoffstrom

• $m_{H_2,KB}$	= im katalytischen Brenner verbrannter Wasserstoffstrom	n_{O_2}	= stöchiometrisches Verhältnis auf der Kathoden-seite der BZ (O_2 -ist zu O_2 -soll)
• $m_{H_2O,BZ,Kath,ein}$	= Massenstrom H_2O am BZ-Eingang (Kathode)	$n_{O_2-H_2}$	= Stöchiometrisches Verhältnis (O_2 zu H_2) der Knallgasreaktion
• $m_{H_2O,Gasr,Luft,ein}$	= Massenstrom H_2O im Luftstrom am Eingang der Gasreinigung	n_{Ref}	= Stöchiometrisches Verhältnis (H_2O zu CH_3OH) im Reformer
• $m_{H_2O,KB,aus}$	= Massenstrom H_2O am Ausgang des katalytischen Brenners	p	= Druck
• $m_{H_2O,Kond}$	= Massenstrom H_2O am Kondensator-Eingang	p^*	= Partial-Dampfdruck
• $m_{H_2O,Kond,fl}$	= Kondensat am Kondensator-Ausgang	P_{CH_3OH}	= chemische Eingangsleistung in das BZS (Methanol)
• $m_{H_2O,Verd}$	= Wassermassenstrom am Eintritt des Verdampfers	$P_{el,Antr}$	= elektrische Leistungsaufnahme des Elektromotors
• m_{Komp}	= Massenstrom am Luftmodul-Eingang	$P_{el,BN}$	= elektrische Leistungsaufnahme des Bordnetzes
MM	= Molare Masse	$P_{el,Brems}$	= elektrische Leistungsabgabe des Elektromotors beim Bremsen
• $m_{N_2,Gasr,ein}$	= Massenstrom N_2 am Eingang der Gasreinigung	$P_{el,BZ}$	= elektrische Leistung der BZ
• $m_{N_2,KB,aus}$	= Massenstrom N_2 am Ausgang des katalytischen Brenners	$P_{el,Komp}$	= elektrische Leistungsaufnahme des Luftmoduls
• $m_{O_2,BZ,ein}$	= Massenstrom O_2 am BZ-Eingang	$P_{el,KS}$	= elektrische Leistungsaufnahme der Kühlaggregate
• $m_{O_2,Gasr,ein}$	= Massenstrom O_2 am Eingang der Gasreinigung	$P_{el,NA}$	= elektrische Leistungsaufnahme der Nebenaggregate
• $m_{O_2,KB,aus}$	= Massenstrom O_2 am Ausgang des katalytischen Brenners	$P_{el,Virtuell}$	= elektrische Leistung des virtuellen Elektromotors (Vorsteuerung)
n	= Anzahl der Zellen in der BZ	$P_{is,Exp}$	= isotherme Expanderleistung des Luftmoduls
n_{Achse}	= Drehzahl der Achse (Rad)	$P_{is,Verd}$	= isotherme Verdichterleistung des Luftmoduls
NEBUS	= New Electric Bus (BZ-Omnibus-Prototyp der DaimlerChrysler AG)	PM	= permanenterregter Elektromotor
NECAR	= New Electric Car (BZ-Fahrzeug-Prototyp der DaimlerChrysler AG, NECAR I, II, 3-5)	p_s	= Sättigungs-Dampfdruck
NEFZ	= Neuer Europäischer Fahrzyklus	ψ	= Druckverhältnis
n_{Getr}	= Drehzahl des Getriebes/ elektr. Antriebs	$P_{Soll,BZS}$	= elektrische Leistungsanforderung an BZS
$n_{H_2O-CH_3OH}$	= stöchiometrisches Verhältnis (H_2O zu CH_3OH) der Methanolverbrennung	• Q_{HK}	= abgeführter Wärmestrom aus Hauptkühler
$n_{H_2O-H_2}$	= Stöchiometrisches Verhältnis (H_2O zu H_2) der Knallgasreaktion	• Q_{HK}	= abgeführter Wärmestrom aus Zusatzkühler
		• Q_{KB}	= abgeführter Wärmestrom des katalytischen Brenners
		• Q_{kond}	= abgeführter Wärmestrom des Kondensators

\dot{Q}_{verlust}	= Verlust-Wärmestrom in der Gaserzeugung	x_{KB}	= Steuergröße des Bypassventils zum Zusatzkühler
R	= allgemeine Gaskonstante	x_{Last}	= Lastspreizung der Gaserzeugung
R_{abgas}	= spezifische Gaskonstante für Expander-Abgas	$x_{\text{Lüfter}}$	= Steuergröße des Lüfters
R_{Dyn}	= dynamischer Radhalbmesser	x_{Offgas}	= Offgasanteil des Wasserstoffs
R_{luft}	= spezifische Gaskonstante für Luft	x_{Ref}	= Umsatzrate (CH_3OH) im Reformer
$S_{i,j}$	= Wert bzw. Grad der Schwärzung eines Segmentes mit den Koordinaten i und j	x_{Steigung}	= Steigungskoeffizient (d. Fahrbahn)
S_{max}	= max. Wert bzw. Grad der Schwärzung eines Segmentes innerhalb eines Diagramms	x_{Th}	= Steuergröße des Thermostatventils
SMK	= Schwungmassenklasse	x_{Wapu}	= Steuergröße der Wasserpumpe
SOC	= State of Charge (Ladezustand)	z	= Anzahl der übertragenen Elektronen in der elektrochemischen Reaktion von H_2 nach H^+
SR	= geschalteter Reluktanz-Elektromotor	ZEV	= Zero Emission Vehicle (Abgasnorm USA)
SULEV	= Super Ultra Low Emission Vehicle (Abgasnorm USA)	<u>Griechische Formelzeichen</u>	
T_{abgas}	= Abgastemperatur aus BZS	ΔH_{Verd}	= Verdampfungsenthalpie
T_{KB}	= Gastemperatur am Austritt des katalytischen Brenners	$\Theta_{\text{EA\&Getr}}$	= Trägheitsmoment des Antriebsstrangs
T_{Kond}	= Kühlwassertemperatur am Kondensatoraustritt	ε	= Kondensatorwirkungsgrad
T_{Ref}	= Temperatur im Reformer	η_{Bat}	= Wirkungsgrad der Hybridbatterie
T_{S}	= Siedetemperatur	η_{BZ}	= Wirkungsgrad der BZ
T_{Th}	= Kühlwassertemperatur am Thermostatventil	η_{BZS}	= Wirkungsgrad des BZS
T_{Umg}	= Umgebungstemperatur	$\eta_{\text{BZS,BN}}$	= Wirkungsgrad des BZS ohne Bordnetz
T_{Verd}	= Temperatur im Verdampfer	η_{EA}	= Wirkungsgrad des elektr. Antriebs
U_{bat}	= Batterie-Spannung	η_{el}	= Wirkungsgrad des elektr. Kompressor-Antriebs
U_{BZ}	= BZ-Spannung	$\eta_{\text{el,Antr}}$	= Wirkungsgrad des elektr. Antriebs (nur Antriebsmodus)
U_{char}	= simulierte BZ-Spannung aus charakteristischer U/I-Kennlinie	$\eta_{\text{el,Antr,BN}}$	= Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs inklusive Bordnetz (nur Antriebsmodus)
$U_{\text{char,korr}}$	= simulierte BZ-Spannung aus der charakteristischen U/I-Kennlinie, korrigiert nach dem Betriebspunkt der BZ (aus Stationärpkt.)	η_{GES}	= Wirkungsgrad der Gaserzeugung
U_{ist}	= gemessene BZ-Spannung	η_{Getr}	= Wirkungsgrad des Getriebes
U_{Zelle}	= Zellspannung in der BZ	η_{is}	= isentroper Wirkungsgrad
v_{Fzg}	= Fahrzeuggeschwindigkeit		
$x_{\text{CO,Ref}}$	= CO-Anteil im Reformat		
x_{Gasr}	= Verlustfaktor des Wasserstoffs in der Gasreinigung		

η_{Kette}	= Wirkungsgrad der Kraftstoffherstellung und -verteilung	Lastspreiz- ung+	= Variante des Simulationsmodells mit größerer Lastspreizung im GES
η_{Strang}	= Wirkungsgrad des Antriebsstrangs	Membran	= Variante des Simulationsmodells mit Membran-Gasreinigung
v_{HK}	= Strömungsgeschwindigkeit durch Hauptkühler	SMK 1360	= Variante des Simulationsmodells mit entspr. SMK-Einteilung
ρ	= Dichte (des Gases)	Umg. druck	= Variante des Simulationsmodells mit Umgebungsdruck-BZS
ψ , psi	= Druckverhältnis		

Simulationsmodell-Varianten

LP	= leicht phlegmatisierte Betriebsstrategie
ST	= Stationärpunktbetrieb
SP	= stark phlegmatisierte Betriebsstrategie
2-Gang	= Variante des Simulationsmodells mit autom. 2-Gang-Getriebe
2-Komp	= Variante des Simulationsmodells mit 2fach-Luftmodul (Kompressor)
2-Motor	= Variante des Simulationsmodells mit elektrischem 2fach-Antrieb
Abschaltung	= Variante des Simulationsmodells mit BZS-Abschaltung im Leerlauf
BZ-A _{Zelle} ⁺	= Variante des Simulationsmodells mit erhöhter BZ-Zellfläche
BZ-Zellen ⁺	= Variante des Simulationsmodells mit erhöhter BZ-Zellenzahl
Gasspeicher	= Variante des Simulationsmodells mit Reformat/H ₂ -Gasspeicher
Hybrid-K	= Kombinationshybrid (Typ eines Hybridfahrzeugs)
Hybrid-LVB	= Leistungsverzweigter Hybrid mit bidirektionalem DC/DC-Wandler (Typ eines Hybridfahrzeugs)
Hybrid-LVU	= Leistungsverzweigter Hybrid mit unidirektionalem DC/DC-Wandler (Typ eines Hybridfahrzeugs)

1 Einleitung

1.1. Definition und Sinn von Brennstoffzellen-Fahrzeugen

Weltweit besteht ein zunehmendes Interesse an ökologisch und ökonomisch verträglicher Energieerzeugung und Energiewandlung. Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Motorisierung der Weltbevölkerung ist eine deutliche Energieeinsparung insbesondere auf dem Verkehrssektor anzustreben. Die heute allgemein verwendete Antriebsquelle im Kraftfahrzeug, der Verbrennungsmotor nach dem Diesel- oder dem Otto-Prinzip, hat hinsichtlich der Schadstoffemissionsoptimierung und Verbrauchssenkung einen hohen Entwicklungsstand erreicht. Aufgrund der Verschärfung bestehender gesetzlicher Vorgaben (Kalifornien: SULEV, ZEV, Europa: Euro 4) stellt sich die grundsätzliche Frage, ob langfristig die bestehenden und zu erwartenden Herausforderungen mit konventionellen Techniken gelöst werden können. Vor diesem Hintergrund haben einige Autohersteller (DaimlerChrysler, Ford, Toyota, General Motors) die strategische Entscheidung getroffen, neben einer Optimierung konventioneller (verbrennungsmotorischer) Technik, die Serienentwicklung eines Fahrzeugantriebes mit einem völlig anderen Prinzip der Primärenergiewandlung zu verfolgen. Dieses neue Prinzip eines Fahrzeugantriebes ist der Brennstoffzellen-Antrieb (BZ-Antrieb).

Das Prinzip der Energieerzeugung in einer Brennstoffzelle (BZ) ist bereits seit 1839 (Erfindung der BZ durch Sir William Grove) [1] bekannt. Eine Anwendung dieser Technik erfolgte allerdings erst in jüngerer Vergangenheit, und zwar sowohl in stationären als auch in mobilen Energiewandlungsanlagen.

Die Bezeichnung BZ-Antrieb stellt einen Sammelbegriff dar, der sehr unterschiedliche Ausführungsformen umfasst. Allen gemeinsam ist die grundsätzliche Funktionsweise. Aus einem Energieträger (Treibstoff in gasförmiger oder flüssiger Form) wird durch Energiewandlung in einem elektrochemischen Prozess elektrische Energie gewonnen. Dem elektrochemischen Prozess kann eine chemische Umwandlung des Energieträgers in Wasserstoff vorausgehen. Die gewonnene elektrische Energie treibt dann einen Elektromotor an. Vielversprechend an diesem Prinzip ist die Tatsache, dass dabei keine Umwandlung von einer niederwertigen Energieform (Wärmeenergie) in eine höherwertige Energieform (Strom, mechanische Energie) stattfindet. Damit fallen Wärmeverluste, die auch bei reversiblen Umwandlungsprozessen (beispielsweise: Carnot-Prozess [2]) entstehen, nicht an.

Ein BZ-Antrieb besteht aus einer Stromerzeugungseinheit und einem elektrischen Antrieb. Im Hinblick auf sein Verhalten unter Last zeigt ein BZ-Antrieb einen grundsätzlichen Unterschied zu einem konventionellen Antrieb mit Verbrennungsmotor. Im Teillastbereich ist der Wirkungsgrad von Brennstoffzellen hoch. Bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen zeigt sich ein gegenteiliger Effekt [3]. Da in typischen Fahrzyklen (NEFZ, FTP 75, Highway, s. Anhang) im niedrigen Teillastbereich gefahren wird, soll durch die Verwendung von BZ-Antrieben eine erhebliche Wirkungsgradverbesserung und damit auch eine Energieeinsparung erreicht werden.

Die Betrachtung von BZ-Antrieben wird in dieser Arbeit auf Methanol als Treibstoff beschränkt, da nach den Aussagen von [4] für Pkw-Anwendungen ein bei Umgebungsbedingun-

gen flüssiger Energieträger sinnvoller ist als Wasserstoff. Die Verteilung und Lagerung eines gasförmigen Stoffes ist erheblich aufwendiger als für einen flüssigen. Innerhalb der flüssigen Treibstoffe erscheint Methanol als geeignet, da es zum einen eine hohe Wasserstoffdichte hat und zum anderen aus fossilen Treibstoffen und regenerativ herstellbar ist.

1.2. Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es zu untersuchen, ob mit einem Methanol-BZ-Fahrzeug ein niedrigerer Energieverbrauch erzielt werden kann als mit vergleichbaren konventionellen Antrieben.

Insbesondere vor dem Hintergrund des bei der Verwendung von Methanol deutlich ungünstigeren Wirkungsgrades der Kraftstoffherstellung und -verteilung wird der niedrigere Energieverbrauch eines Methanol-BZ-Fahrzeugs in der Literatur in Frage gestellt [5, 6].

Um das mit einem Methanol-BZ-Fahrzeug zu erreichende Verbrauchsziel zu quantifizieren, werden aus vergleichbaren konventionellen Antrieben zukünftige Energieverbräuche bestimmt. Die Daten zur Kraftstoffherstellung und -aufbereitung entstammen dabei [7]. Es werden nur fossile Brennstoffe (Erdöl und Erdgas) als Primärenergie verwendet. Als Vergleichsfahrzeuge mit konventionellem Antrieb dienen eine Mercedes A-Klasse mit 1,4-Liter-Ottomotor (A140) und eine mit 1,7-Liter-Dieselmotor sowohl mit Ladeluftkühlung (A170 CDI) als auch ohne Ladeluftkühlung (A160 CDI). Die Variante mit 1,7-Liter-Dieselmotor ohne Ladeluftkühlung ist nur mit Handschaltgetriebe lieferbar und wird daher als solche betrachtet. Zur Betrachtung der beiden anderen Fahrzeuge wird ein automatisches Getriebe herangezogen, um einen mit einem Methanol-BZ-Fahrzeug vergleichbaren Schaltkomfort zu gewährleisten. Die über Energieinhalt und Dichte [8] errechneten Verbräuche in Dieseläquivalenten sind in Tabelle 1.1 dargestellt.

Der Zielverbrauch für ein Methanol-BZ-Fahrzeug ergibt sich aus der Forderung, mit der neuen Technik unter Berücksichtigung der Kraftstoffherstellung und -aufbereitung maximal den gleichen Verbrauch zu erzielen wie mit der konventionellen Technik. Berücksichtigt man eine ca. 12,5%ige Verbrauchsreduktion bei den konventionellen Antrieben in einem Zeitraum von 7,5 Jahren^A [9], so reduziert sich der Referenz-Verbrauch des sparsamsten konventionellen Fahrzeugs (A 160 CDI [10]) zum Einführungszeitpunkt^B des BZ-Fahrzeugs entsprechend Tabelle 1.2. Der im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen (Diesel, Benzin) geringere Wirkungsgrad bei der Kraftstoffherstellung und Verteilung von Methanol ($\eta_{\text{Kette,CH}_3\text{OH}} = 0,63$, $\eta_{\text{Kette,konv}} = 0,88$) erhöht den Energieverbrauch inklusive der vorgelagerten Energie bei methanolbetriebenen Fahrzeugen (Tabelle 1.2).

Für die Berechnung des Zielverbrauchs wird der auf das Jahr 2005 prognostizierte minimale Verbrauch eines konventionellen Antriebes (d.h. 3,9 l/100 km Dieseläquivalent) herangezogen.

^A bezogen auf das Jahr 1998

^B Einführung für das Jahr 2005 geplant

	Verbrauch Diesel /-äquivalent [l/100km] [10]	Dichte Kraftstoff [l/kg] [8]	Energieinhalt [kJ/kg] [8]
A 140	6,5	0,74	41500
A 170 CDI	5,8	0,84	42500
A 160 CDI	4,5	0,84	42500

Tabelle 1.1: Verbrauch im NEFZ in 1998

	Verbrauchs- reduktion [%] [9]	Diesel /- äquivalent (2005) [l/100 km]	η Kraftstoff- herstellung [7]	Diesel /- äquivalent inkl. Herst. [l/100 km]
A 140	12,5	5,7	0,88	6,5
A 170 CDI	12,5	5,1	0,88	5,8
A 160 CDI	12,5	3,9	0,88	4,5

Tabelle 1.2: Prognostizierter Verbrauch im NEFZ in 2005

Der geforderte Zielverbrauch des Methanol-BZ-Fahrzeugs kann mit folgender Gleichung errechnet werden:

$$V_{\text{Diesel, Ziel}} \leq 2,8 \frac{l}{100\text{km}} = \frac{(1 - f_{\text{opt}}) V_{\text{Diesel, konv}} \eta_{\text{Kette, CH}_3\text{OH}}}{\eta_{\text{Kette, konv}}} \quad (1-1)$$

f_{opt} = zu erwartende Verbrauchsoptimierung bis 2005 (0,125)

$V_{\text{Diesel, konv}}$ = Verbrauch konventionelles Fahrzeug heute (Dieseläquivalent)

$V_{\text{Diesel, Ziel}}$ = (maximaler) Zielverbrauch Methanol-BZ-Fahrzeug (Dieseläquivalent)

$\eta_{\text{Kette, konv}}$ = vorgelagerter Wirkungsgrad zur Kraftstoffherstellung für Benzin/Diesel

$\eta_{\text{Kette, CH}_3\text{OH}}$ = vorgelagerter Wirkungsgrad zur Kraftstoffherstellung für Methanol

Mit Gleichung (1-1) ermittelt man einen Verbrauch (Dieseläquivalent) im NEFZ von ca. 2,8 l/100 km. Dieser Verbrauch wird als Verbrauchsziel für ein optimiertes BZ-Fahrzeug postuliert.

Das Verbrauchsziel ist mit den zum heutigen Zeitpunkt zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten zu erreichen. Die von dem Methanol-BZ-Fahrzeug zu erreichenden Fahrleistungen, insbesondere die Höchstgeschwindigkeit, sollen mit dem entsprechenden konventionellen Fahrzeug vergleichbar sein (Anhang D, Tabelle D.4).

1.3. Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den verschiedenen Ausführungsformen für methanolbetriebene BZ-Fahrzeuge und deren energieverbrauchssenkenden Potentialen.

In Kapitel 2 werden die verschiedenen Begriffsdefinitionen der Antriebskonzepte für BZ-Fahrzeuge erläutert. Der Stand der Technik wird in Kapitel 3 dargestellt. Im weiteren Verlauf (Kapitel 4) erfolgt die Beschreibung der mathematischen Abbildung eines BZ-Antriebes. Eine neu entwickelte Modellierung eines BZ-Antriebes soll die existierenden Einschränkungen bei der Abbildung beseitigen. Eine detaillierte, weitgehend dynamische Systemmodellierung soll Aussagen über das Dynamikverhalten des BZ-Antriebes und dessen Einfluss auf den Energieverbrauch sowie über die Auslegung verschiedener Brennstoffzellensysteme ermöglichen.

Die Validierung des Simulationsmodells erfolgt in Kapitel 5 mit Hilfe von experimentell ermittelten Daten. Die stationären und dynamischen Messungen an zur Verfügung stehenden Prototypen (Fahrzeug, elektrischer Antrieb, Brennstoffzellensystem) werden mit Simulationsergebnissen verglichen.

In Kapitel 6 wird auf die Verbesserungspotentiale zur Wirkungsgradsteigerung in Fahrzyklen eingegangen. Die Modifikationen beziehen sich auf Veränderungen am Brennstoffzellensystem und auf eine Schaltung von Brennstoffzellensystem, Speicher und Antrieb zu unterschiedlichen Hybridkonzepten. Die durch Verwendung eines Hybrid-BZ-Konzeptes entstehenden Freiheitsgrade und die daraus resultierenden Möglichkeiten hinsichtlich der Betriebsstrategie von BZ-Antrieben werden diskutiert. Kapitel 6 behandelt darüber hinaus die Ergebnisse der rechnerischen Untersuchungen. Mit dem Ziel, die Energieeinsparpotentiale der verschiedenen Antriebskonzepte und Auslegungen zu ermitteln, werden Modifikationen des elektrischen Antriebs, des Brennstoffzellensystems und der Hybrid-BZ-Konzepte betrachtet. Die Wechselwirkungen der Maßnahmen untereinander sowie der Einfluss verschiedener Fahrzyklen auf den Verbrauch werden diskutiert. Aus den vorgestellten Maßnahmen wird eine Variante entwickelt, mit der eine maximale Energieeinsparung gegenüber der Basisvariante erzielt werden kann.

Das siebte Kapitel fasst die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse zusammen.

2 Antriebskonzepte für Brennstoffzellen-Fahrzeuge

Die Ziele und Inhalte dieses Kapitels sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Ziel	Erläuterungen wesentlicher Begriffe, Vorstellung verschiedener Antriebskonzepte, Auswahl geeigneter Antriebskonzepte
Inhalt	<ul style="list-style-type: none"> • Begriffsdefinition • Beschreibung eines Lean-Brennstoffzellen-Antriebskonzeptes (Abschnitt 2.1) • Beschreibung verschiedener Hybrid-Brennstoffzellen-Antriebskonzepte, Erläuterung der Funktionsweise, Auswahl geeigneter Konzepte (Abschnitt 2.2)

Tabelle 2.1: Ziele und Inhalte des Kapitels

Die wesentlichen Komponenten eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs (BZ-Fahrzeug) sind Gaserzeugung, Brennstoffzelle, Nebenaggregate und elektrischer Antrieb (inklusive Getriebe). Ein hybridisiertes BZ-Fahrzeug erhält man unter zusätzlicher Verwendung eines Speichers (z.B. elektrischer Speicher). Aufgrund der unterschiedlichen Möglichkeiten, die obigen Komponenten anzuordnen und/oder zu schalten, ergeben sich verschiedene Antriebskonzepte.

Bei einigen Herstellern werden Gaserzeugung und Brennstoffzelle inklusive aller zum Betrieb erforderlichen Nebenaggregate unter der Bezeichnung Stromerzeugungssystem (SES) zusammengefasst, andere verwenden den Begriff Brennstoffzellensystem (BZS). Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff BZS verwendet. Ein BZS ist Teil eines Antriebskonzeptes.

2.1. Klassifizierung von Antriebskonzepten für Brennstoffzellen-Fahrzeuge

In Abbildung 2.1 werden Antriebskonzepte ohne Energiespeicher als Lean-BZ-Fahrzeuge und solche mit Energiespeicher als Hybrid-BZ-Fahrzeuge bezeichnet. Grundsätzlich ist eine Unterscheidung zwischen internen und externen Speichern vorzunehmen. Interne Speicher, d.h. Gasspeicher o.ä., die primär zur Dynamikverbesserung des Gaserzeugungssystems dienen [11], werden zu einem späteren Zeitpunkt berücksichtigt. Externe Speicher (z. B. Batterien) dienen der Unterscheidung zwischen Lean-BZ-Fahrzeugen und Hybrid-BZ-Fahrzeugen.

Bei den Speicherbauformen mit vorgegebener Spannungslage (Kondensator und Batterie) unterscheidet man zwischen verschiedenen möglichen Schaltungsvarianten (seriell, parallel etc.) von BZS und Speicher. Bei einer Hybridbauform mit Schwungradspeicher ist eine solche Differenzierung nicht erforderlich, da die Spannungslage zur Stromabgabe/-aufnahme über den elektrischen Umrichter am Schwungradeingang theoretisch frei wählbar ist. In der Funktion entspricht eine beliebige Leistungsabgabe/-aufnahme des Speichers einem leistungsverzweigten Hybrid.

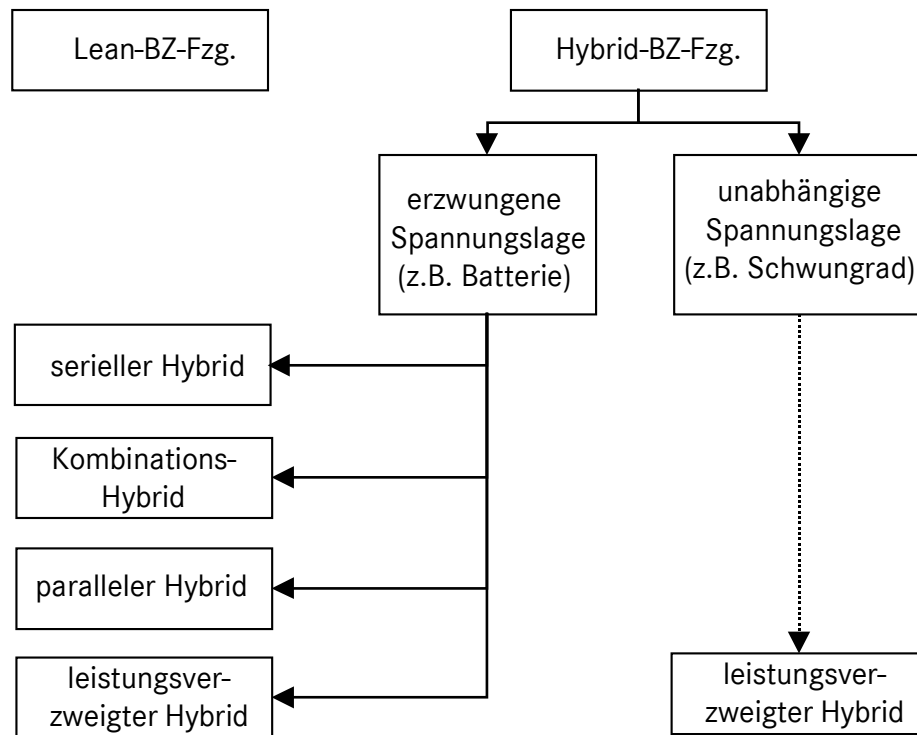


Abbildung 2.1: Ausführungsformen von BZ-Fahrzeugen

Speicher, die Energie nicht in elektrischer Form abgeben können (z.B. mechanische Schwungräder oder Hydraulikspeicher) spielen für den Einsatz in BZ-Fahrzeugen derzeit keine Rolle.

Bei verbrennungsmotorisch betriebenen Hybrid-Fahrzeugen kann aufgrund der Dimensionierung von Speicher und Verbrennungsmotor eine Unterscheidung zwischen sogenannten Range-Extender-Systemen und Kleinspeicher-Hybridfahrzeugen vorgenommen werden [3]. Diese Unterscheidung kann auf Hybrid-BZ-Fahrzeuge übertragen werden. Eine Ausführung eines Range-Extender-Systems ist gekennzeichnet durch ein BZS mit geringer Leistung und einen Speicher mit hohem Energieinhalt. Das andere Extrem stellt ein Kleinspeicher-Hybridfahrzeug dar, in welchem ein BZS mit hoher Leistung und ein Speicher mit geringem Energiegehalt kombiniert werden. Innerhalb dieser extremen Auslegungen sind nahezu beliebige Zwischenlösungen hinsichtlich der Dimensionierung von Speicher und BZS denkbar.

2.2. Lean-Brennstoffzellen-Fahrzeug

Abbildung 2.2 zeigt die elektrische Schaltung (Prinzipbild) eines Lean-BZ-Fahrzeugs. Der von der BZ erzeugte Strom wird zum Teil zur Stromversorgung der zum Betrieb der BZ erforderlichen Komponenten genutzt (Nebenverbraucher).

Der verbleibende Strom steht dem elektrischen Antrieb zur Verfügung. Der elektrische Antrieb ist über ein Getriebe mit den Antriebsrädern verbunden. Als Getriebe können alle im Fahrzeugbau üblichen Varianten eingesetzt werden.

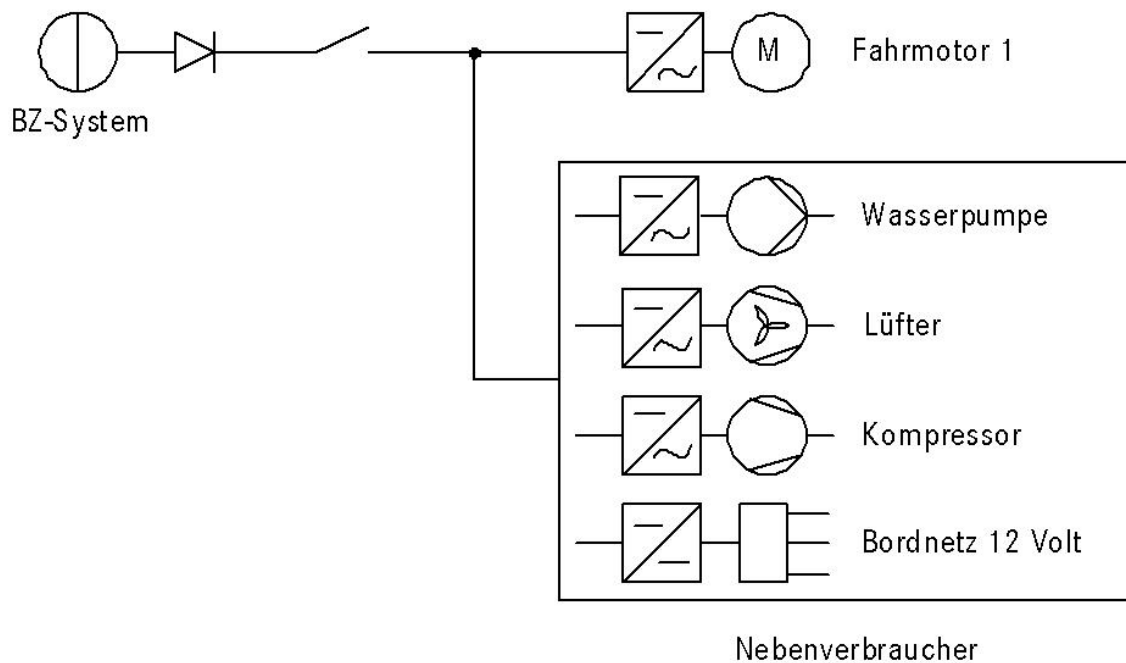


Abbildung 2.2 Lean-BZ-Fahrzeug

Aufgrund des hohen Anfahrmomentes von elektrischen Antrieben sind auch Festübersetzungen möglich. Bremsenergie kann mit der im Lean-BZ-Fahrzeug realisierten Schaltung nur für den Betrieb von den Komponenten genutzt werden, die zum Betrieb der BZ erforderlich sind. Zum Zeitpunkt des Bremsvorgangs ist die Leistungsaufnahme dieser Komponenten allerdings nur gering.

Damit elektrisches Bremsen zur Entlastung der Bremsanlage möglich ist (Elektromotoren haben kein oder nur ein sehr geringes Schleppmoment), wird bei einigen BZ-Fahrzeugen (z. B. NECAR I - 4) die generatorisch erzeugte Energie in einem Bremswiderstand in Wärme umgewandelt. Diese Wärme wird über den Fahrzeug-Kühlkreislauf abgeführt.

Das Lean-BZ-Antriebskonzept stellt zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit die vorhandene technologische Basis dar.

2.3. Hybrid-Brennstoffzellen-Fahrzeug

Bei Hybrid-BZ-Fahrzeugen soll der Speicher als Energiequelle (zum Fahren) während der Kaltstartphasen und bei hohen angeforderten Beschleunigungsleistungen dienen. Sowohl Kondensatoren als auch Schwungräder haben nach dem heutigen Stand der Technik [12,13] für diese Anwendung ein deutlich zu geringes Energiespeichervermögen. Da es das Ziel dieser Arbeit ist, die Machbarkeit eines BZ-Fahrzeugs auf Basis heute zur Verfügung stehender Technologie zu untersuchen, wird daher auf eine Betrachtung von Ausführungen mit Kondensatoren und Schwungrädern verzichtet. Es werden nur Speichermedien mit heute verfügbarer Batterietechnologie (NiMH oder Li-Ion) betrachtet.

Zunächst werden die verschiedenen Hybrid-BZ-Fahrzeuge beschrieben. Im Anschluss folgt in Abschnitt 2.3.5 ein abschließender Vergleich.

2.3.1 Serieller Hybrid

Eine als seriell Hybrid-BZ-Konzept bezeichnete Schaltung ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Bei verbrennungsmotorisch betriebenen seriellen Hybriden erfolgt die Energiewandlung mechanisch-elektrisch in einem Generator (mit nachfolgender Addition von elektrischer Energie aus Speicher und Generator). Ersetzt man diese Motor-/Generator-Einheit durch ein BZS, so erhält man das gezeigte Konzept.

Dieses Konzept wird von Toyota [14] dargestellt. Es ist abweichend von der hier vorgestellten Lösung als Range-Extender-Hybrid konzipiert (max. BZ-Leistung ca. 20 kW).

Bei einem seriellen Hybrid-BZ-Antrieb sind die BZ und die Batterie direkt elektrisch miteinander verbunden (durch elektrische Parallelschaltung). Aufgrund der Schaltung liegt im Stromkreis überall die gleiche Spannung an.

Die Strom-Spannungskennlinie der BZ und der Batterie^A sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Negative Ströme bedeuten Stromaufnahme, z.B. beim Laden der Batterie. Für das Zusammenwirken von BZ und Batterie gilt, dass ein Betriebszustand der BZ (und damit des BZS) einem Betriebszustand der Batterie zugeordnet ist.

Unter Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit vom Ladezustand kann formuliert werden:

$$U_{BZ} = f(I_{Bat}, SOC_{Bat}) \quad (2-1)$$

SOC, State of Charge (Ladezustand der Batterie)

Das Zusammenspiel von Batterie und BZ wird an zwei Betriebspunkten verdeutlicht (Abbildung 2.4).

- **Betriebspunkt 1** (BZS bei niedriger Last, die Batterie soll geladen werden)

Dem Betriebspunkt BP 1 des BZS ist der Betriebspunkt BP 1* der Batterie zugeordnet, was einer Ladestromstärke der Batterie von ca. 65 A entspricht. Das BZS liefert aber nur einen Strom von 25 A. Demzufolge wird die Batterie mit der Spannung von BP 1 geladen, notwendig ist aber nur die Spannung von BP 1°. Die Spannungsdifferenz ΔU_1 wird demnach unnötig aufgebracht und verschlechtert den Wirkungsgrad des BZS beim Ladevorgang.

^A Die maximale Anzahl der Batteriezellen ergibt sich mit der Forderung, dass auch bei 95% SOC ein Laden der Batterie durch das BZS noch möglich sein soll. Die Anzahl der Zellen sollte so hoch wie möglich sein, um maximale Abgabeleistungen zu realisieren.

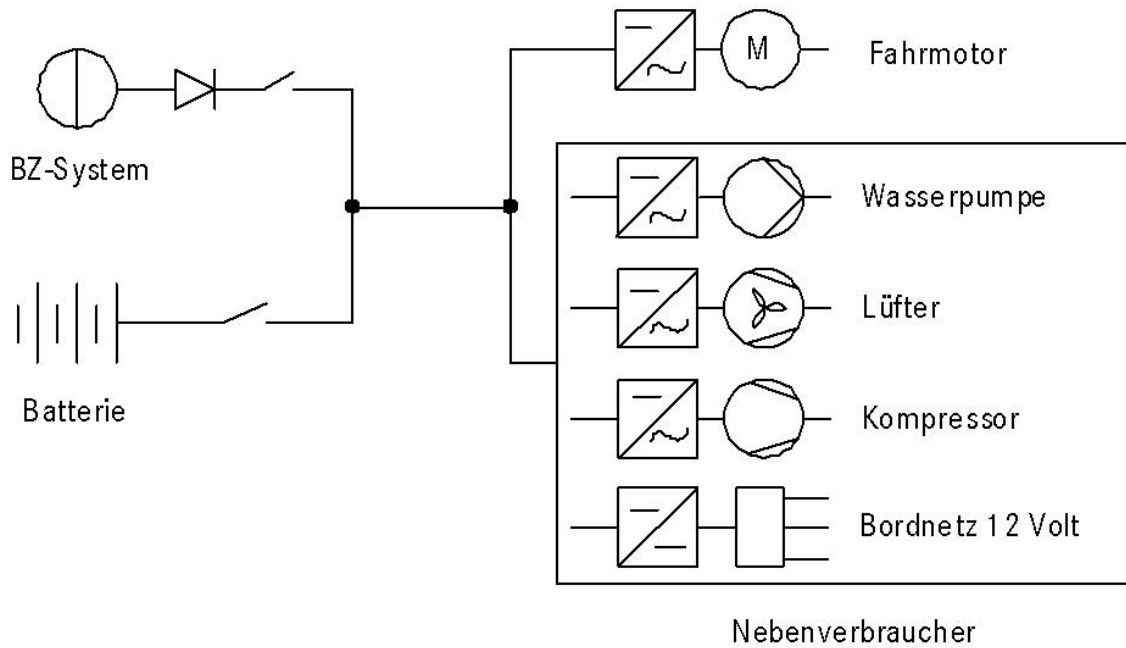


Abbildung 2.3: Serielles Hybrid-BZ-Konzept

- **Betriebspunkt 2** (BZS bei mittlerer Last, die Batterie soll maximal entladen werden)

Es liegt eine maximale Stromanforderung des elektrischen Antriebs von 340 A vor (Vollastbeschleunigung). Das BZS befindet sich im Betriebspunkt BP 2 und liefert nur einen Strom von ca. 60 A. Demzufolge wird die Batterie mit einem Strom von 280 A entladen. Die diesem Strom der Batterie zugeordnete Spannung kann in BP 2° abgelesen werden. Aufgrund der Parallelschaltung im System wird die BZS-Spannung auf diesen Wert zusammenbrechen. Die Spannungsdifferenz ΔU_2 verschlechtert dabei den Wirkungsgrad der BZ bei Vollastbeschleunigungen unter Ausnutzung von hohen Entladeströmen der Batterie.

Die Probleme bei der Verwendung von seriellen Hybrid-BZ-Konzepten werden wie folgt zusammengefasst:

- Die Abgabeleistung (bzw. der Entladestrom) der Batterie kann nicht unabhängig vom Betriebspunkt des BZS gewählt werden, sofern man Wirkungsgradverluste vermeiden will.
- Aufgrund der Spannungsverhältnisse kann die Batterie im Fahrbetrieb nicht schnell und gezielt geladen werden, ohne das regerativ gebremst wird.

Wie oben erläutert, ist das Zusammenspiel von BZS und Batterie abhängig vom Verlauf der beiden Spannungs-kennlinien. Diese sind ihrerseits von einigen nicht oder nur gering beeinflussbaren Größen wie Alterung und Temperatur abhängig. Eine Vorhersagbarkeit des Zusammenspiels ist damit nur bedingt möglich.

Strom-Spannungskennlinien BZS und Batterie

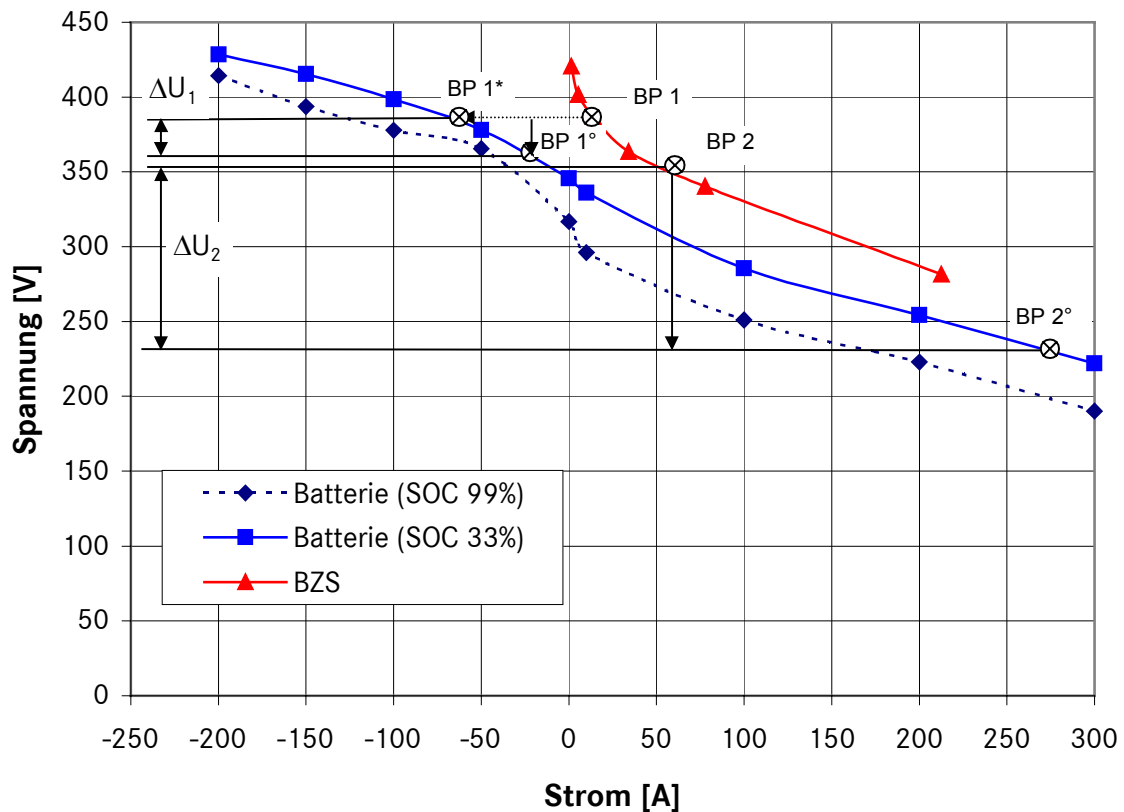


Abbildung 2.4: Spannung und Leistung von Brennstoffzelle und Batterie

Im Folgenden wird dieses Konzept aus oben genannten Gründen nicht weiter verfolgt.

2.3.2 Parallel-Hybrid

Sind BZS und Batterie elektrisch getrennt, erfolgt nach [15] die Klassifizierung als Parallel-Hybrid.

Es wird vorausgesetzt, dass zwei elektrisch voneinander unabhängige Motoren vorhanden sind. Wenn zusätzlich zu Fahrmotor 2 auch mit Fahrmotor 1 generatorisch gebremst werden soll (z.B. um die Nebenaggregate zu betreiben), so ist zum Schutz der BZ eine Diode vorzusehen. Bei einachsigen Antrieb kann eine Momentenaddition der Fahrmotoren durch ein Summationsgetriebe erfolgen, oder beide Fahrmotoren können auf einer Welle dargestellt werden. Alternativ kann bei Verteilung der Fahrmotoren auf zwei Achsen ein (temporärer) Allradantrieb realisiert werden. Eine Prinzipschaltskizze zeigt Abbildung 2.5.

Dieses Konzept erlaubt einen unabhängigen Betrieb des BZS und der Batterie. Wenn die Lastanforderung des elektrischen Antriebes die aktuelle BZS-Abgabeleistung des BZS überschreitet, wird der restliche Leistungsbedarf durch die Batterie abgedeckt. Bei gleichzeitigem Betrieb beider Fahrmotoren kann ein Allradantrieb realisiert werden, sofern die Antriebe auf zwei Achsen verteilt sind. Dieser Allradantrieb ist durch den endlichen Energieinhalt der Batterie begrenzt.

Da keine elektrische Verbindung zwischen BZ und Batterie gegeben ist, kann die Batterie nur durch generatorischen Betrieb von Fahrmotor 2 geladen werden. Ist die Rekuperationsenergie nicht ausreichend, kann während der Fahrt mit dem Fahrmotor im Batteriestromkreis gebremst werden. Der so entstandene zusätzliche Fahrwiderstand wird vom Antrieb (Fahrmotor 1) im BZ-Stromkreis übernommen. So kann der Speicher schnell aufgeladen werden. Allerdings ist dieser Aufladevorgang der Batterie sehr verlustbehaftet^A. Elektrische Energie wird in mechanische umgewandelt (Fahrmotor 1), übertragen und in elektrische (Fahrmotor 2) zurückgewandelt. Das Aufladen der Batterie im Stillstand ist nur mit zusätzlichem DC/DC-Wandler (Spannungswandler) möglich.

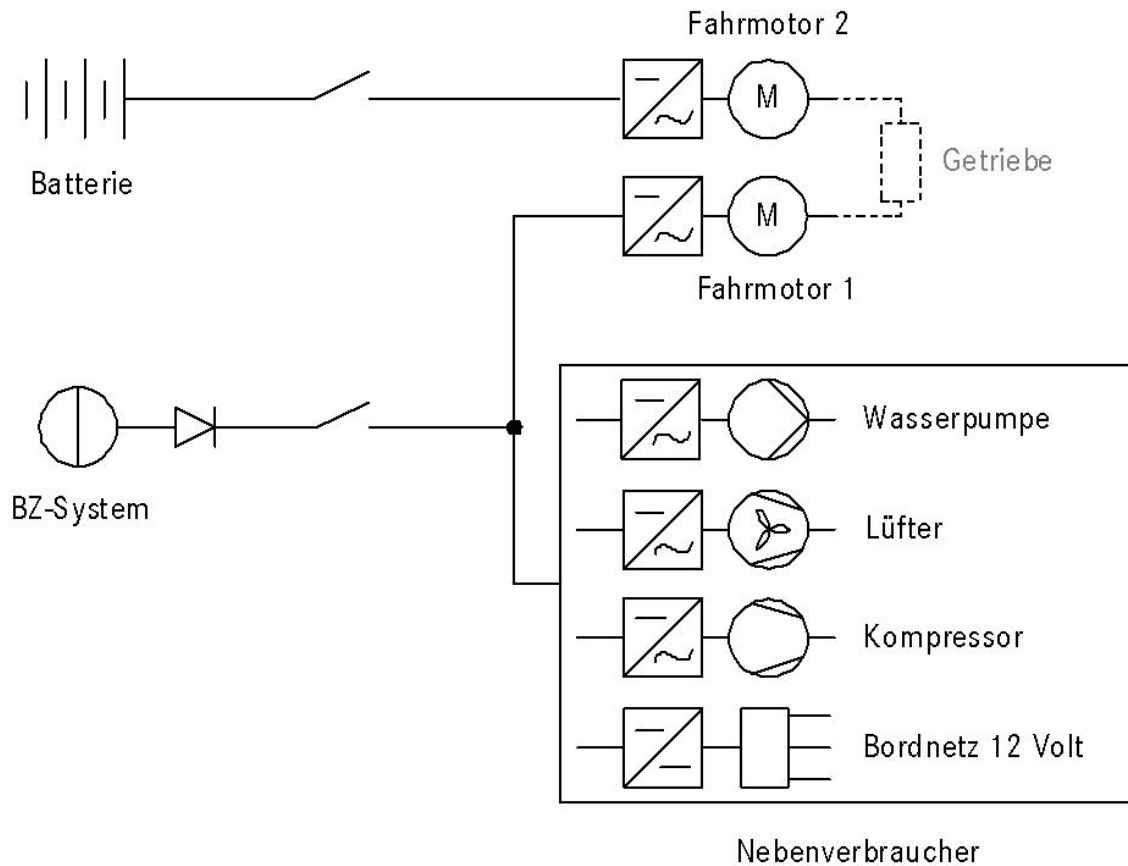


Abbildung 2.5: Paralleles Hybrid-BZ-Konzept

2.3.3 Kombinations-Hybrid

Sollen ein Leistungssplitting des elektrischen Antriebes, eine von der aktuellen Fahrleistungsanforderung weitgehend unabhängige Abgabeleistung des BZS und ein zeitlich unbeschränkter Allradantrieb realisiert werden, so führt das zu einer Erweiterung des parallelen Hybrid-BZ-Konzeptes. Eine Prinzipschaltung dieses Konzeptes zeigt Abbildung 2.6.

Im Unterschied zu einem parallelen Hybrid-BZ-Konzept übernimmt ein Schalter (Schalter 2) die Aufgabe der Zuweisung der Energiequelle für den zweiten Antrieb. Kerngedanke dieses Hybridkonzeptes ist es, ähnlich wie bei einem seriellen Hybrid-BZ-Konzept, bei Bedarf eine

^A Wirkungsgrad BZS → Batterie $\approx \eta_{\text{Antr}} \eta_{\text{Antr}} = 0,64$ | $\eta_{\text{Antr}} = 0,8$ (im NEFZ)

Zusammenschaltung von BZS und Batterie zu ermöglichen. Nebenverbraucher und Fahr-antriebe können entweder aus der Batterie, aus der BZ oder aus beiden gemeinsam versorgt werden. Eine permanente Berücksichtigung der unterschiedlichen Spannungsniveaus wie bei seriellen Hybrid-BZFahrzeugen ist hier nicht erforderlich.

Im Normalbetrieb liegt eine elektrische Trennung der Antriebsstränge vor. Nach [15] entspricht dieser Betriebszustand damit einem parallelen Hybridkonzept (Momentenaddition im mechanischen Antriebsstrang).

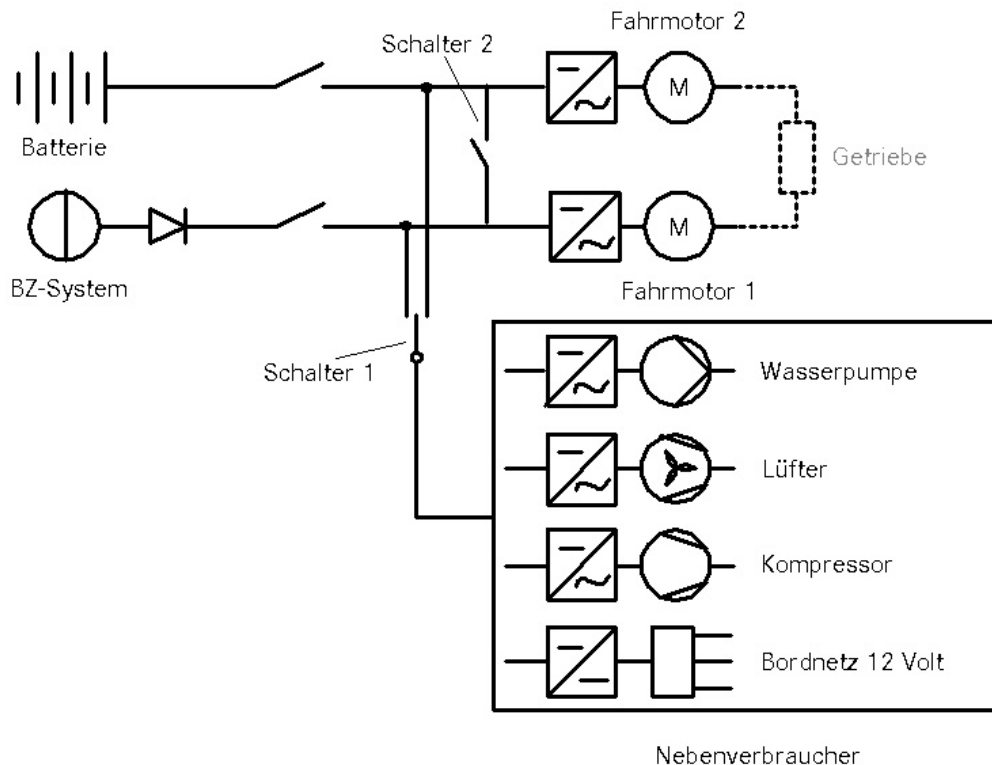


Abbildung 2.6: Kombinations-Hybrid-BZ-Konzept

Der Standard-Betriebszustand des Fahrzeugs sieht vor, dass eine Leistungsanforderung des elektrischen Antriebes (Fahrmotor 1) vom BZS abgedeckt wird. Die Funktionsweise ist daher identisch mit einem Lean-BZ-Fahrzeug. Bei einer sprunghörmig erhöhten Leistungsanforderung des elektrischen Antriebes wird die Batterie zugeschaltet, welche nun den zweiten elektrischen Antrieb (Fahrmotor 2) betreibt. Durch diese Betriebsweise werden Spitzen in der Leistungsanforderung des BZS verhindert.

Bei einem Bremsvorgang kann die Bremsenergie direkt in den Speicher fließen (ohne dabei das Spannungsniveau der BZ zu berücksichtigen). Alternativ können auch die Nebenaggregate (über Schalter 1) betrieben werden.

Unter der Voraussetzung, dass Batterie und BZ hinsichtlich der Spannungslage aufeinander abgestimmt sind (beschrieben unter 2.3.1), kann bei sehr niedrigen Leistungsanforderungen des elektrischen Antriebes die Batterie geladen werden (Schalter 2 geschlossen). Durch die Vermeidung des Leerlaufs kann einerseits der Ladezustand der Batterie ausgeglichen werden,

andererseits wird der ungünstige Betriebsbereich nahe der Leerlaufleistung vermieden. Dieser Betriebszustand entspricht einem seriellen Hybrid-BZ-Konzept.

Bei mittleren bis hohen Lasten werden BZ und Batterie getrennt (Schalter 2 offen). Damit wird ein unabhängiger Betrieb der beiden Spannungsquellen realisiert. Dieser Betriebszustand entspricht einem parallelen Hybrid-BZ-Konzept. Die Batterie wird in diesem Zustand nicht geladen. Analog zur Schnellladung bei parallelen Hybrid-BZ-Konzepten kann durch einen gezielten Generatorbetrieb von Fahrmotor 2 der Speicher aufgeladen werden. Die Ladeenergie wird dabei vom BZS über den Fahrmotor 1 als zusätzliche Antriebsleistung aufgebracht. Auch hier gilt wie bei einem parallelen Hybrid-BZ-Konzept, dass dieser Schnellladezustand sehr verlustbehaftet ist und im Rahmen einer energiesparenden Betriebsstrategie vermieden werden sollte.

Da das in Abbildung 2.6 dargestellte Hybridkonzept entweder als serieller oder als paralleler Hybrid betrieben werden kann, nicht jedoch die Leistung beliebig verteilt werden kann (leistungsverzweigtes Hybrid-BZ-Konzept), erfolgt die Klassifizierung gemäß [15] als Kombinations-Hybrid.

2.3.4 Leistungsverzweigter Hybrid

Diese Bauform ist dadurch gekennzeichnet, dass BZ und Batterie über einen Spannungswandler verbunden sind. Eine Prinzipschaltskizze zeigt Abbildung 2.7.

Abstrahiert man die Definition eines leistungsverzweigten Hybridkonzeptes [15] zu der uneingeschränkten Addition zweier Energiequellen, so kann man das in Abbildung 2.7 dargestellte Konzept als solches klassifizieren. Im Unterschied zum seriellen BZ-Hybrid ist der Betrieb der Energiequellen (Speicher und BZS) unabhängig voneinander und das Verhältnis von BZS-Leistung zu Batterie-Abgabeleistung im Rahmen der Leistungsgrenzen beliebig einstellbar.

Dieses Konzept erlaubt einen nahezu stationären Betrieb des BZS, da die jeweils nicht vom Fahrmotor angeforderte Leistung in die Batterie gespeist wird. Wenn die Lastanforderungen des elektrischen Antriebes die aktuelle BZS-Leistung überschreiten, wird der restliche Leistungsbedarf durch die Batterie abgedeckt. Die Spannungslage im Antriebsstromkreis entspricht somit jeweils der aktuellen Batteriespannung. Beim Bremsen ist eine Einschränkung vorhanden, sofern man jederzeit die in der BZ erzeugte Energie nutzen möchte. Sobald das Fahrzeug bremst, wird die Batterie geladen. Liegt jetzt noch eine BZS-Leistung an, z.B. aufgrund der Systemträgheit, so muss die Batterie sowohl diese als auch die Leistung des Generators aufnehmen können. Will man diese Energie nutzen, bedingt dieses Konzept eine sehr leistungsfähige Batterie. Der im BZ-Antriebsstrang integrierte unidirektionale DC/DC-Wandler führt durch die in der Leistungselektronik auftretenden Verluste zu einer Verschlechterung des Antriebsstrangwirkungsgrades. Der Wirkungsgrad von DC/DC-Wandlern bei hohen Lasten kann allerdings mehr als 95 % betragen. Bei niedrigen Lasten und hohen Spannungsdifferenzen kann sich dieser Wirkungsgrad auf ca. 85% reduzieren. Ein Wirkungsgradkennfeld des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten DC/DC-Wandlers ist im Anhang C, Tabelle C.3 dargestellt.

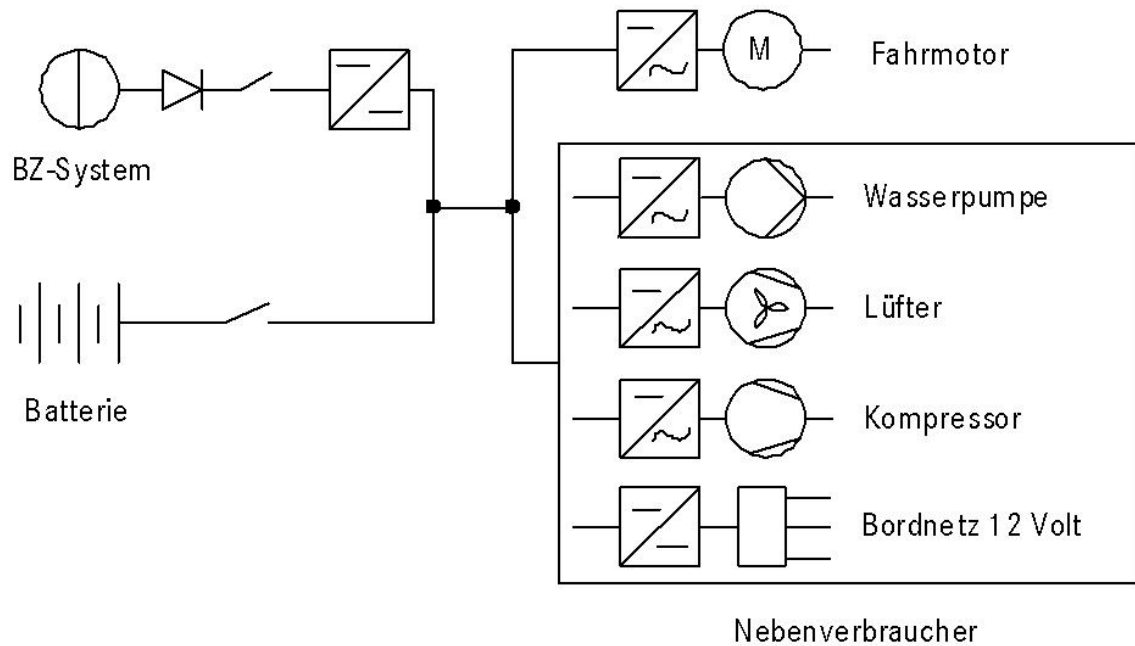


Abbildung 2.7: Leistungsverzweigter Hybrid [16]

Als Alternative zur obigen Variante, in welcher ein unidirektionaler Spannungswandler zwischen BZS und Elektroantrieb eingebaut ist, ist ein Einbau zwischen Batterie und Elektroantrieb denkbar. Bei einer derartigen Schaltung ist im Lean-Modus (zum Beispiel bei Konstantfahrt, Speicher ausgeschaltet) ein verlustfreier Betrieb des Fahrzeugs (d.h. ohne Spannungswandlerverluste) möglich. Verluste fallen nur bei Batteriebetrieb an. Als nachteilig ist aufzuführen, dass der Wirkungsgrad des (jetzt bidirektionalen) Spannungswandlers quadratisch in die Verlustleistung des Speichers eingeht (bei Lade- und Entladevorgängen). Die Effizienz beider Konzepte wird zu einem späteren Zeitpunkt abgeschätzt, da dies stark von einer konkreten Auslegung abhängt.

2.3.5 Vergleich der vorgestellten BZ-Antriebskonzepte

Die Eigenschaften der vorgestellten Antriebskonzepte werden in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Lean-BZ-Konzept

Das Lean-BZ-Konzept ist Ausgangsbasis aller nachfolgenden Betrachtungen. Eine Betriebsstrategie kann aufgrund des fehlenden Speichers ebenso wenig realisiert werden wie die Rückgewinnung von Bremsenergie. Ein weiterer Nachteil zu den nachfolgend beschriebenen Hybrid-BZ-Konzepten ist die zu erwartende geringere Beschleunigungsleistung des Lean-BZ-Fahrzeugs.

Seriellles Hybrid-BZ-Konzept

Grundsätzlich stellt dieses Konzept die einfachste Lösung dar. Kaltstart und Phlegmatisierung können bei relativ niedrigem Gewicht und vermutlich auch geringen Kosten erfüllt werden, da außer der Batterie keine Komponenten anfallen. Bezüglich der Betriebsstrategie sind erhebli-

che Einschränkungen gegeben. Insgesamt ist für dieses Konzept ein höherer Energieverbrauch als bei den anderen Konzepten zu erwarten. Aufgrund der funktionalen Schwierigkeiten (siehe 2.3.1) wird dieses Konzept nicht weiter untersucht.

Paralleles Hybrid-BZ-Konzept

Im Vergleich zu einem seriellen treten bei einem parallelen Hybrid-BZ-Konzept weniger funktionale Schwierigkeiten auf. Als Zusatznutzen ist ein temporärer Allradantrieb realisierbar. Eventuell kann durch den doppelten elektrischen Antrieb eine Wirkungsgradverbesserung erreicht werden. Nachteilig bei einem parallelen Hybrid-BZ-Konzept ist der technische Aufwand, bedingt durch die Verteilung der Antriebsleistung auf zwei elektrische Maschinen und eventuell auf zwei Achsen. Zusätzlich kann auch bei einem parallelen Hybrid-BZ-Konzept nur bedingt ein von der Fahrleistung unabhängiger Betrieb des BZS realisiert werden. Ein Hauptnachteil dieses Konzeptes ist die fehlende Auflademöglichkeit der Batterie im Fahrbetrieb. Ein paralleles Hybrid-BZ-Konzept wird aus diesem Grund im weiteren Verlauf nicht weiter berücksichtigt.

Kombiniertes Hybrid-BZ-Konzept

Die wesentlichen Nachteile eines parallelen Hybrid-BZ-Konzeptes, d.h. die verlustbehaftete Nachlademöglichkeit der Batterie sofern man nicht rekuperiert, ein temporär begrenzter Allradantrieb sowie die Einschränkung hinsichtlich der Möglichkeiten des Leistungssplittings der beiden Elektroantriebe können durch ein kombiniertes Hybrid-BZ-Konzept beseitigt werden. Dem gegenüber steht der zusätzliche Aufwand eines Umschalters.

Leistungsverzweigtes Hybrid-BZ-Konzept

Eine weitere, technisch aufwendige Lösung ist ein leistungverzweigtes Hybrid-BZ-Konzept. Wenn optimales Ansprechverhalten und maximale Freiheit hinsichtlich der Betriebsstrategie im Vordergrund stehen, bietet diese Variante die beste Lösung. Aussagen bezüglich der Effizienz sind schwierig. Anders als bei obigen Konzepten ist hier eine zusätzliche verlustbehaftete Komponente (Spannungswandler) im Antriebsstrang vorhanden (leistungverzweigter Hybrid mit unidirektionalem DC/DC-Wandler, Hybrid LVU) bzw. dem Speicher vorgeschaltet ((leistungverzweigter Hybrid mit bidirektionalem DC/DC-Wandler, Hybrid LVB). Im weiteren Verlauf (Kapitel 7) wird untersucht, ob dieser Nachteil durch eine geeignete Betriebsstrategie kompensiert werden kann.

Aus den obig vorgestellten Hybridkonzepten werden zwei Varianten ausgewählt, die im weiteren Verlauf der Arbeit näher betrachtet werden:

- kombiniertes Hybrid-BZ-Konzept (Hybrid K)
- leistungverzweigtes Hybrid-BZ-Konzept (Hybrid LVU und Hybrid LVB)

Auf die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten der beiden Hybridkonzepte und mögliche Betriebsstrategien wird in Kapitel 6 eingegangen.

	Schwächen	Stärken
Lean-BZ	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Rückgewinnung von Bremsenergie möglich • Keine Betriebsstrategie des BZS möglich • Niedrige Beschleunigungsfahrleistung 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Zusatzkomponente erforderlich
serieller Hybrid	<ul style="list-style-type: none"> • Ein kontrolliertes schnelles Vollladen der Batterie ist nur bei wenigen Fahrzuständen möglich. • Ein phlegmatisierter Betrieb des BZ-Antriebs kann nur innerhalb gewisser Leistungsgrenzen und unter Wirkungsgradeinbußen dargestellt werden. • Das Zusammenspiel von Batterie und BZS ist wesentlich von der Auslegung (Spannungslage) abhängig und kann im Betrieb nur gering beeinflusst werden 	<ul style="list-style-type: none"> • einfache elektrische Schaltung • nur eine Zusatzkomponente (Speicher) erforderlich
paralleler Hybrid	<ul style="list-style-type: none"> • Batterie und zwei E-Antriebe (teurer, größer und schwerer als ein E-Antrieb gleicher Leistung) sind erforderlich. • Aufladen der Batterie ist nur durch generatorischen Betrieb des zweiten Antriebs möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Schnelllademöglichkeit im Fahrbetrieb • unabhängige Steuerung (und Auslegung bzgl. Spannungslage) von BZ und Batterie. • temporärer Allradantrieb
leistungsverzweigter Hybrid (Hybrid LVU/LVB)	<ul style="list-style-type: none"> • Batterie und Spannungswandler sind erforderlich. • Abhängig von der Positionierung des Spannungswandlers wird der Antriebsstrangwirkungsgrad oder der Batterie-wirkungsgrad verschlechtert. 	<ul style="list-style-type: none"> • Schnelllademöglichkeit im Fahrbetrieb und im Stand • unabhängige Steuerung (und Auslegung bzgl. Spannungslage) von BZ und Batterie
kombinierter Hybrid (Hybrid K)	<ul style="list-style-type: none"> • Batterie und zwei E-Antriebe (teurer, größer und schwerer als ein E-Antrieb gleicher Leistung) sowie (Um-) Schalter sind erforderlich. 	<ul style="list-style-type: none"> • im Fahrbetrieb, verlustarme Auflademöglichkeit im Stand und bei niedrigen Lasten • unabhängige Steuerung (und Auslegung bzgl. Spannungslage) von BZ und Batterie • permanenter Allradantrieb möglich

Tabelle 2.2: BZ-Antriebskonzepte im Vergleich

3 Stand der Technik

Die Ziele und Inhalte dieses Kapitels sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Ziel	Vorstellung des Stands der Technik und Definition eines Basis-Fahrzeugs, das die Grundlage für alle weiteren Betrachtungen darstellt
Inhalt	<ul style="list-style-type: none"> • Ausführungsformen von BZS, Vorstellung der Alternativen zu dem ausgewählten Methanol-Reformer-BZS (Abschnitt 3.1) • Vorstellung verschiedener Methanol-BZS-Konzepte auf Basis der Methanolreformierung, Beschreibung der Funktionsweise (Abschnitt 3.2) • Definition des Basis-Fahrzeugs (Abschnitt 3.3)

Tabelle 3.1: Ziele und Inhalte des Kapitels

Grundsätzlich steht die Wasserstoff-BZ-Technologie im Fahrzeug für hohen Antriebskomfort (aufgrund des elektrischen Antriebs), sehr geringe bzw. keine Emissionen und für geringen Energiebedarf, wie verschiedene Prototypen (z.B. NECAR I^A und NEBUS) zeigen. Mit der Einführung der Methanol-Reformer-Technologie in einem Prototypen (NECAR 3) zeigen sich einige konzeptbedingte Herausforderungen, welche bis zur Serienreife zu lösen sind. Anhand von Strukturen verschiedener BZS und einer Analyse der einzelnen Komponenten (Gaserzeugung, Brennstoffzelle, elektrischer Antrieb, Nebenaggregate des BZS) wird der Entwicklungsstand beschrieben. Dieser Entwicklungsstand wird als Basis (Basis-BZS) definiert.

3.1. Ausführungsformen von Brennstoffzellensystemen (BZS)

Eine Darstellung über die möglichen Ausführungen von BZS gibt Abbildung 3.1.

Die einfachste Ausführungsform eines BZS stellt eine mit gasförmigem Wasserstoff betriebene Variante dar (z.B. NECAR I und II). Daneben ist es auch möglich, Wasserstoff in flüssiger Form in einem Tiefkühltank zu speichern und den verdampften Wasserstoff in einer BZ zu verwenden (z.B. NECAR 4). Bei einem flüssigen Energieträger/Treibstoff ist eine Umwandlung in den in der BZ verwendeten Brennstoff (Wasserstoff) erforderlich (z.B. NECAR 3). Eine weitere Möglichkeit, einen bei Umgebungsbedingungen flüssigen Treibstoff (z.B. Methanol oder Ethanol) zu verwenden, bietet eine Direkt-BZ.

Mit Hinblick auf die Aussagen von [4] wird die nachfolgende Betrachtung auf ein BZS mit Methanol-Gaserzeugung beschränkt. Methanol-Gaserzeugungssysteme können durch verschiedene Kombinationen von Gaserzeugung, Gasreinigung und BZ aufgebaut werden. Einen Überblick zeigt Abbildung 3.2. Die unterschiedlichen Verfahren der Methanol-Erzeugung sind Reformierung, Partielle Oxidation und Methanol-Spaltung. Partielle Oxidation und Methanol-Spaltung sind aufgrund der schlechten Produktgasqualität (zuviel CO) für die Verwendung in Methanol-BZ nicht geeignet [17].

^A NECAR (New Electric Car) und NEBUS (New Electric Bus) sind Prototypenbezeichnungen der DaimlerChrysler AG.

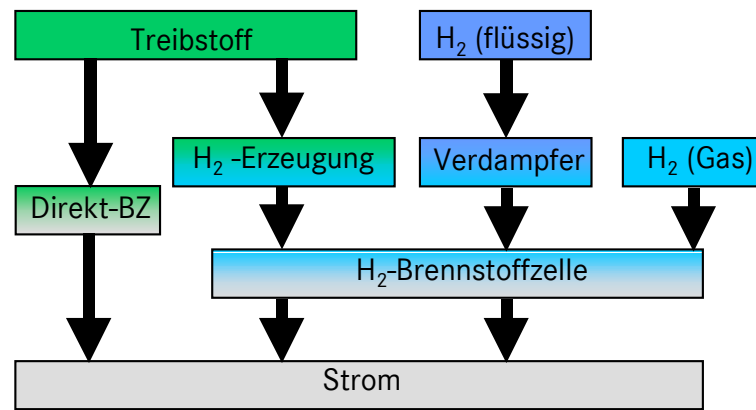


Abbildung 3.1: Ausführungsformen von BZS

Einige Hersteller versuchen aber trotzdem, die Partielle Oxidation durch Modifikation von Reaktorkomponenten und geeigneter Gasreinigungen als Methanol-Gaserzeugungsverfahren für BZ-Fahrzeuge zu etablieren [18]. Zu den Vorteilen einer auf Partieller Oxidation basierenden Gaserzeugung gehört nach [18, 28] das günstige Kaltstartverhalten und die erwartete hohe Dynamik. Neben der schlechten Produktgasqualität zeigen realisierte Gaserzeugungen mit Partieller Oxidation aber einen vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrad [17].

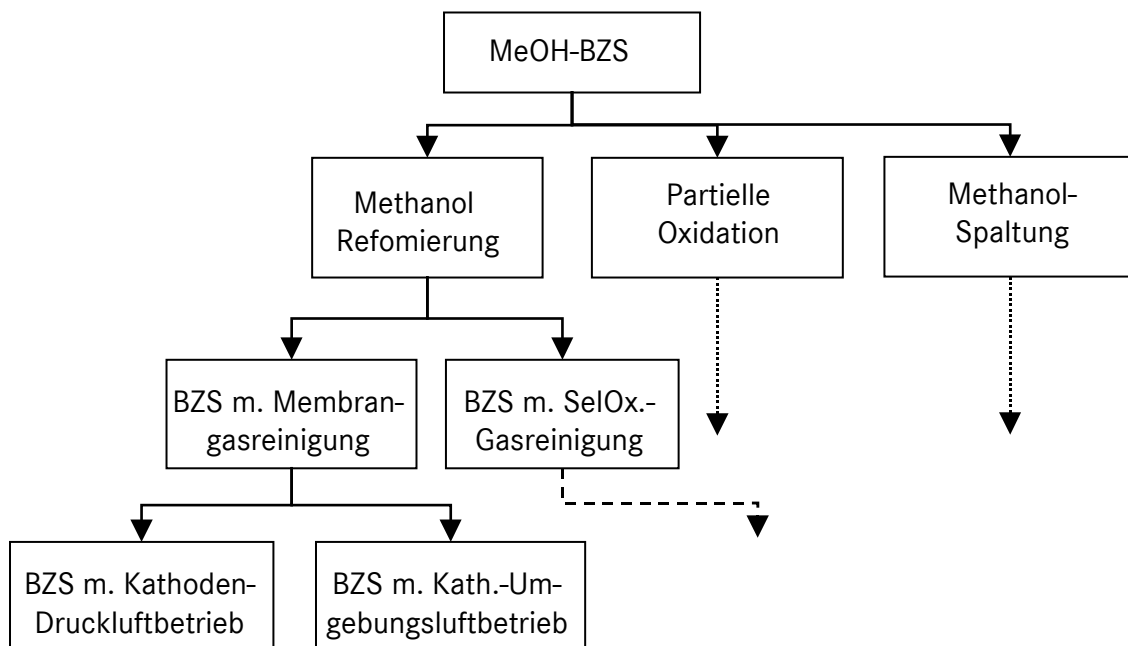


Abbildung 3.2: Ausführungsformen von Methanol-BZS

Im Rahmen dieser Arbeit wird von einer Gaserzeugung auf Basis der Methanol-Reformierung ausgegangen.

Auch bei BZS mit Methanol-Reformierung ist eine Gasreinigung erforderlich, da selbst geringe CO-Anteile im Reformat zu Beeinträchtigungen der Brennstoffzelle bis hin zur Zerstörung führen können [19]. Die Gasreinigung kann mittels einer PdAg-Membran oder mittels verschiedener Oxidationsstufen (selektive Oxidation, „SelOx.“-Gasreinigung) erreicht werden. Zwischen beiden Systemen gibt es gravierende Konzeptunterschiede. Im Folgenden wird

zunächst das als Basis-BZS verwendete System mit einer Gasreinigung auf Basis der selektiven Oxidation vorgestellt.

Eine Systembeschreibung mit relevanten Stoff- und Wärmeströmen, Temperaturen, Drücken und weiteren Kennwerten für die folgenden Systeme befindet sich im Anhang C.

3.1.1 BZS mit selektiver Oxidation als Gasreinigung (Basis-BZS)

Ein System mit selektiver Oxidation als Gasreinigung zeigt Abbildung 3.3. Dieses System wird als Ausgangsbasis für alle weiteren Betrachtungen verwendet und kommt in dem später als Basis-Fahrzeug bezeichneten Antriebskonzept zum Einsatz.

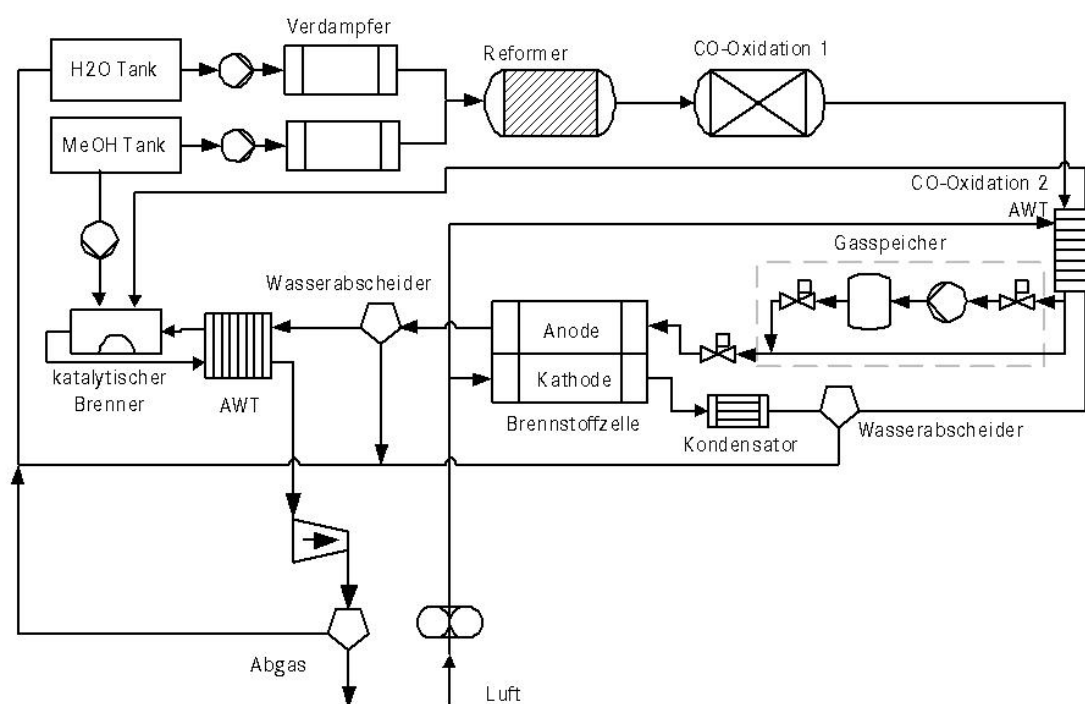


Abbildung 3.3: Methanol-BZS mit selektiver Oxidation

Zunächst werden Wasser und Methanol aus getrennten Tanks gefördert und verdampft. Im Reformer findet die Umwandlung von Methanol zu Wasserstoff statt. Die zur Reformierung und Verdampfung erforderliche Wärme wird über einen katalytischen Brenner im Abgas erzeugt.

Danach wird das Reformat mittels selektiver Oxidation [20] von CO-Resten gereinigt und durch die BZ geleitet. Vor dem Eintritt in die BZ wird das Reformat in einem (Abgas-) Wärmetauscher (AWT) heruntergekühlt. Aus dem aus der BZ austretenden Gas wird in einem Wasserabscheider Wasser zurückgewonnen. Dieses Wasser wird dem für Reformierung und Befeuchtung verwendeten Wasserkreislauf zugeführt. Vor dem Eintritt in den katalytischen Brenner wird das Abgas erwärmt. Im katalytischen Brenner wird das anodenseitige Abgas der BZ mit dem kathodenseitigen zusammengeführt.

Um den Luftstrom auf der Kathodenseite der BZ zu erzeugen, wird Umgebungsluft in einem Kompressor auf einen Druck von maximal 3 bar (abhängig vom Massenstrom, Kurve des Druckverlaufs im Anhang, Abbildung C.2) verdichtet. Nach dem Durchströmen der BZ wird das kathodenseitige Gas im katalytischen Brenner mit dem anodenseitigen Gas zusammengeführt, verbrannt und entspannt. Die Druckverluste im System bis zu 0,7 bar [21] (Kompressor bis Expander). Nach der Entspannung wird das Gas kondensiert, und die im BZS benötigte Menge Wasser wird zurückgewonnen.

Der Reformatbetrieb der BZ führt im Vergleich zu einem Betrieb mit reinem Wasserstoff zu Wirkungsgradverschlechterungen in der BZ [25, 22]. Dieses BZS entspricht im Wesentlichen dem im NECAR 5 verbauten System. Auch in der Literatur werden BZS mit einem prinzipiell ähnlichen Schaltungsbild der Komponenten dargestellt [23, 24]. Abweichend von [23, 24] werden bei dem in Abbildung 3.3 dargestellten BZS der dem katalytischen Brenner zugeführte Wasserstoff- und Sauerstoffstrom durch die BZ geleitet. Durch diese Maßnahme kann auf einen zusätzlichen Kompressor verzichtet werden. Gleichzeitig ist der dem System zugeführte Luftmassenstrom insgesamt geringer^A. Die zur Refomierung und Verdampfung erforderliche Wärme wird über CO-Oxidation und einen katalytischen Brenner im Abgas erzeugt.

3.1.2 BZS mit Membran-Gasreinigung

Ein System mit Membran-Gasreinigung zeigt Abbildung 3.4. Wasser und Methanol werden aus getrennten Tanks gefördert und verdampft. Im Reformer findet die Umwandlung von Methanol zu Wasserstoff statt. Die zur Refomierung und Verdampfung erforderliche Wärme wird über einen katalytischen Brenner im Abgas erzeugt. Bei diesem System wird das entstandene Reformat mittels PdAg-Membran von CO-Resten gereinigt. Das Verhältnis des durch die Membran in die BZ durchgeleiteten Wasserstoffs im Verhältnis zu dem im abgetrennten Reformat enthaltenen Wasserstoff wird als Membranwirkungsgrad bezeichnet. Der nicht durch die Membran geleitete Wasserstoff wird nach Abbildung 3.4 im katalytischen Brenner verbrannt. Ein Wirkungsgrad von 0,9 wird von [11] als realisierbar angegeben und durch [21] bestätigt. Dieser Wert wird für spätere Untersuchungen übernommen.

Im Unterschied zu einem BZS mit selektiver Oxidation wird ausschließlich Wasserstoff durch die BZ geleitet.

Vor dem Eintritt in die BZ wird der Wasserstoff in einem Wärmetauscher (AWT) heruntergekühlt. Aus dem aus der BZ austretenden Gas wird in einem Wasserabscheider Wasser zurückgewonnen. Dieses Wasser wird dem für Reformierung und Befeuchtung verwendeten Wasserkreislauf zugeführt. Vor dem Eintritt in den katalytischen Brenner wird das Abgas erwärmt. Im katalytischen Brenner wird das bei der Gasreinigung abgetrennte CO- und CO₂-haltige Gas mit dem anodenseitigen und kathodenseitigen Abgas der BZ zusammengeführt.

^A Die BZ wird mit einem Luftverhältnis von 1,8, d.h. 80% Luftüberschuss betrieben. Ohne die Verwendung im katalytischen Brenner würde der Luftüberschuss chemisch ungenutzt das System verlassen.

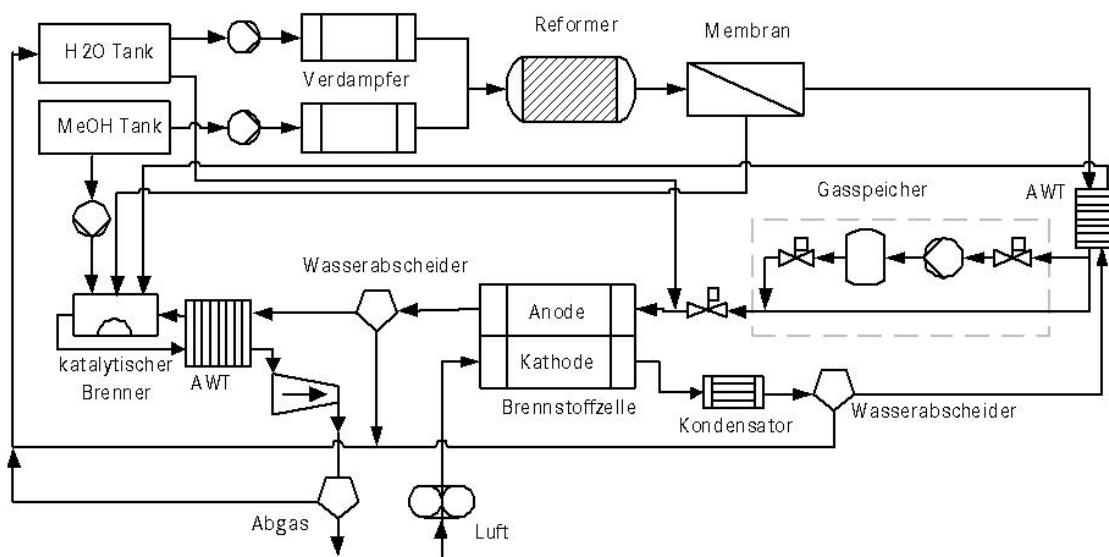


Abbildung 3.4: Methanol-BZS mit Membran-Gasreinigung

CO wird dabei katalytisch zu CO_2 verbrannt. Zusätzlich kann im katalytischen Brenner Methanol direkt verbrannt werden. Dieses ist beim Kaltstart erforderlich, um das System zu erwärmen. Darüber hinaus kann so ein zusätzlicher Wärmebedarf in Verdampfer und Reformer abgedeckt werden, sofern der im katalytischen Brenner verbrannte Wasserstoff nicht ausreicht. Beim Austritt aus dem katalytischen Brenner wird das unter Druck stehende Abgas entspannt.

Die kathodenseitige Gasführung dieses BZS ist identisch mit dem BZS in Abbildung 3.3.

Dieses System wird mit leichten Modifikationen auch in der Literatur verwendet [25,11]. Teilweise kommt ein Gasspeicher mit separatem Kompressor vor der Brennstoffzelle [11] zur Anwendung. Hiermit soll die Dynamik verbessert werden. Nach Aussage von [25] ist das nicht erforderlich, da in der Entwicklung befindliche BZS eine ausreichende Dynamik besitzen.

3.1.3 Umgebungsdruck-BZS

Eine weitere Konzeptvariante eines BZS stellt ein (Kathoden-) Umgebungsdrucksystem für die BZ dar (englische Bezeichnung: Ambient Air). Ein solches System ist in Abbildung 3.5 abgebildet. Grundsätzlich ist dieses System auch mit Membran-Gasreinigung darstellbar, im Folgenden wird aber von einer selektiven Oxidation als Gasreinigung ausgegangen.

Bei diesem BZS wird nur so viel Überdruck am Eingang des BZS erzeugt, wie aufgrund der Strömungsverluste erforderlich ist. Nach [21] sind die Strömungsverluste vergleichbar mit

den Verlusten bei der Basisvariante (bis zu 0,7 bar)^A. Damit ergibt sich der Absolutdruck am Eintritt der BZ zu maximal 1,7 bar. Mit dieser Druckreduktion kann die elektrische Leistung des Luftkompressors drastisch reduziert werden. Aufgrund des nun nicht mehr vorhandenen Expanders am Systemaustritt wird dort keine Energie zurückgewonnen. Ein solches System wird unter anderem von [22] vorgeschlagen.

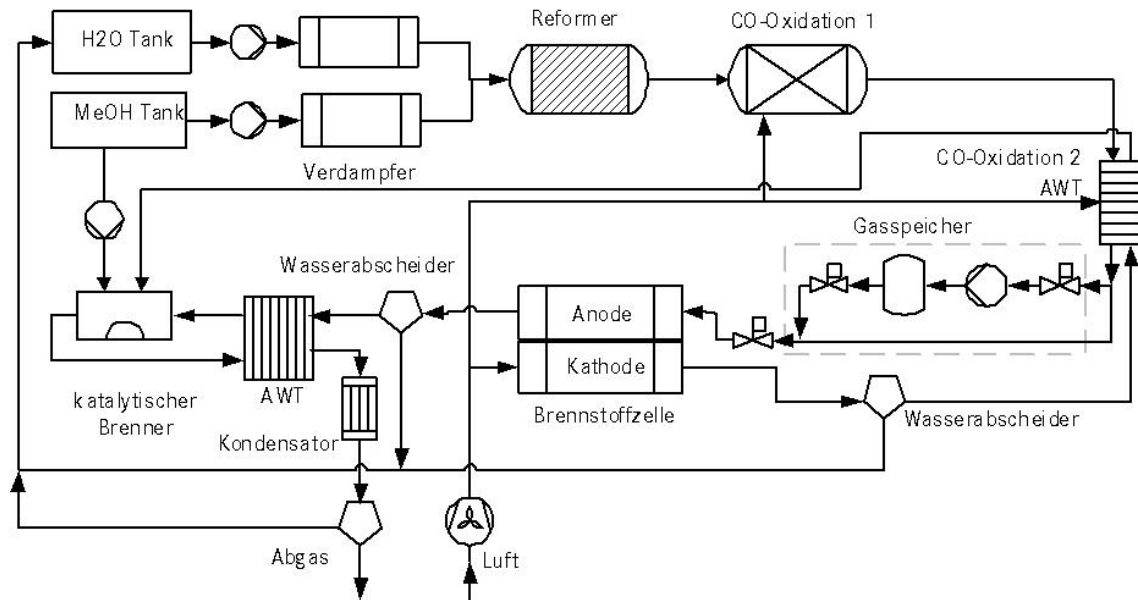


Abbildung 3.5: Umgebungsdruck-BZS

Die Verringerung des Druckniveaus führt nicht zu einer Veränderung der Strömungsgeschwindigkeiten und damit der Druckverluste innerhalb der BZ, da diese nur von der (unveränderten) Druckdifferenz abhängig sind. Die geringen Drücke auf beiden Seiten der Membran führen aber zu einer Verringerung des Wirkungsgrades der BZ [22].

Zusätzlich ist ein Ansteigen der Verluste mit der Stromstärke zu erwarten [26]. Experimentelle Untersuchungen an Reformat-BZ-Stacks [22] zeigen, dass die auftretenden Verluste maximal ca. sieben Prozent bei 1000 mA/cm² betragen.

Bei Umgebungsdruck-BZS ist das Erreichen einer ausgeglichenen Wasserbilanz im Vergleich zu druckbeaufschlagten BZS deutlich schwieriger. Bei vergleichbarer Stoffzusammensetzung am Austritt der BZ bleibt der Sättigungsdruck des Wassers konstant. Der Partialdruck des Wassers sinkt aber aufgrund des nun niedrigeren Absolutdrucks. Das im BZ-Abgas vorhandene Wasser liegt vollständig gasförmig vor. Eine Auskondensation des Abgases nach der Verbrennung des Wasserstoffs (und der Reaktion zu Wasser) ist aufgrund des fehlenden

^A Die Strömungsverluste sind im Wesentlichen geometrieabhängig. Die Strömungsgeschwindigkeit bleibt gleich, der Massenstrom wird über vergrößerte Querschnitte realisiert.

Expanders erforderlich. Der Kondensator ist demzufolge nach dem katalytischen Brenner eingebaut. Auch bei diesem BZS ist der Einsatz eines Gasspeichers möglich.

3.2. Entwicklungsstand der wesentlichen Antriebsstrangkomponenten

3.2.1 Gaserzeugungssysteme

Ein Gaserzeugungssystem dient der Brenngaserzeugung (Wasserstoff) für die Brennstoffzelle. Anschließend ist dieses Gas zu reinigen, so dass am BZ-Eintritt reiner Wasserstoff bzw. bei Systemen ohne Membran-Gasreinigung H_2 und CO_2 (Reformat) vorliegen. Eine Beschreibung der Gaserzeugung kann nur in Verbindung mit der Gasreinigung und dem katalytischen Brenner erfolgen.

Der in der Gasreinigung verbrannte Wasserstoff und seine thermische Nutzung müssen bei der Wirkungsgradbetrachtung der Gaserzeugung berücksichtigt werden. Zu viel thermische Verwertung des Wasserstoffs reduziert den Wirkungsgrad der Gasreinigung, während sehr geringe Wasserstoffverluste in der Gasreinigung von unter zehn Prozent keine deutlichen Vorteile bringen, da aufgrund der nun fehlenden thermischen Wärmezufuhr (vgl. Gl. 4-27) im katalytischen Brenner Methanol eingespritzt werden muss.

Obige Betrachtung gilt sowohl für Systeme mit selektiver Oxidation als auch für Systeme mit einer Membran-Gasreinigung. Der im Folgenden dargestellte Wirkungsgrad der Gaserzeugung erlaubt eine Definition für einen Betriebspunkt. Bei einer Betrachtung über einen Fahrzyklus sind Ergänzungen notwendig. Üblicherweise wird der Wirkungsgrad in Abhängigkeit zur Systemleistung, d.h. betriebspunktabhängig angegeben [11, 36, 27]. Die Betriebspunkt-Wirkungsgrad-Definition ergibt sich zu:

$$\eta_{GES} \equiv \frac{\dot{m}_{H_2,BZ} H_{U,H_2}}{\dot{m}_{CH_3OH,Verd} H_{U,MeOH}} \quad (3-1)$$

$\dot{m}_{H_2,BZ}$ = Massenstrom des in der Brennstoffzelle zur Stromerzeugung umgesetzten Wasserstoffs

$\dot{m}_{CH_3OH,Verd}$ = Massenstrom des der Gaserzeugung (genauer: dem Verdampfer) zugeführten Methanols

Die sich mit dieser Definition ergebenden Wirkungsgrade sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Da die Umsatzrate des Methanols im Reformers maßgeblich den Wirkungsgrad beeinflusst, wird dieser Wert ebenfalls aufgeführt.

Auffällig ist die von [28] angegebene niedrige Umsatzrate des Methanols. Bei einem realisierten Fahrzeug (NECAR 3) beträgt diese 98%. Dieser Wert wird auch für das Basis-BZS übernommen. Die Volllastwirkungsgrade der Gaserzeugung differieren sehr stark. Die niedrige Umsatzrate an Methanol führt bei [28] zu einem Wirkungsgrad von lediglich 62%. Andere [11] geben für ein Gaserzeugungssystem mit 73% einen deutlich höheren Wirkungsgrad an. Der bei NECAR 3 gemessene Wirkungsgrad liegt bei 71% (im Labor) bis 74% (im Fahrzeug). Auf-

grund von verringerten Wärmeverlusten zwischen katalytischem Brenner und Verdampfer sowie effizienterer Gasreinigung wird bei dem Basis-BZS ein Wirkungsgrad von 81% erreicht.

	[11]	[17]	[28]	NECAR 3	BZS-Basis
η_{GES} (Reformer inkl. Gasreinigung bei Volllast)	0,73	k. A.	0,62	0,71	0,78
Umsatzrate MeOH (Volllast)	0,99	0,95	0,8	0,98	0,98
Zeitkonstante des Ansprechverhaltens [s]		k. A.	5	ca. 1	ca. 1

Tabelle 3.2: Kenndaten verschiedener Gaserzeugungen

Zur Beschreibung der Systemdynamik wird hier ein fiktives Verzögerungsverhalten erster Ordnung angesetzt [29]. Mittels der so definierten Zeitkonstante ist ein direkter Vergleich des Ansprechverhaltens verschiedener Systeme möglich. Während [28] und [11] von sehr trägen Systemen ausgehen, wurde mit NECAR 3 bewiesen, dass eine Zeitkonstante von ca. 1s erreichbar ist. Als Konsequenz kann NECAR 3 ohne die die Systemdynamik verbessernden Komponenten wie Gaszwischenpeicher (bei [11]) und Hybridbatterie (bei [28]), betrieben werden. Optimistische Annahmen [25] gehen davon aus, dass die Zeitkonstante noch deutlich weiter, d.h. bis auf ca. 0,1s - 0,3s gesenkt werden kann. Der Entwicklungsstand wird mit einer Zeitkonstante von 1s dargestellt.

3.2.2 Brennstoffzellen

Die Brennstoffzelle ist der chemisch-elektrische Energiewandler im BZS. Hier wird aus Wasserstoff Strom erzeugt (s. Anhang, Gleichung B-5). Da die Funktionsweise der BZ bereits ausführlich beschrieben worden ist [1, 11, 20], beschränkt sich diese Arbeit auf die Beschreibung des Entwicklungsstandes.

Entscheidend bei Brennstoffzellen ist die Zellspannung. Diese wird üblicherweise in Abhängigkeit der Stromstärke angegeben. Die maximale Zellspannung ergibt sich aus dem theoretischen Potential der Nernst'schen Gleichung und kann abhängig von der Konzentration der reagierenden Gase sowie Druck und Temperatur angegeben werden (s. Anhang B). Übliche Werte für die im Fahrzeug vorliegenden Bedingungen^A liegen bei ca. 1,18 V pro Zelle.

Eine Darstellung verschiedener Brennstoffzellenkennlinien zeigt Abbildung 3.6. Die im Diagramm dargestellte Kennlinie für das NECAR 3-BZS bezieht sich auf Reformatbetrieb der

^A T_{BZ} ca. 60 - 85°C, p ca. 3 bar, Wasserstoffüberschuss in der BZ ca. 40%, d.h. n_{H_2} ca. 1,4, Sauerstoffüberschuss in der BZ ca. 80%, d.h. n_{O_2} ca. 1,8

Brennstoffzelle. Die von [11] angegebene Kennlinie bezieht sich auf Wasserstoffbetrieb. Zur besseren Vergleichbarkeit ist eine Kennlinie für reinen Wasserstoffbetrieb des NECAR 3 (NECAR 3 (H₂)) hinzugefügt. Eine noch höhere Stromdichte kann mit einer Reformat-BZ (10 ppm CO) nach [19] erzielt werden. Der Spannungsverlauf ist hier vergleichbar mit dem bei reinem Wasserstoffbetrieb der BZ des NECAR 3.

Deutlich zu erkennen ist der abfallende Wirkungsgrad bei steigender Stromstärke. Diese Verluste sind in der Literatur [26, 30] umfassend dokumentiert. Der Abfall der Spannung und damit des Wirkungsgrades ist bei keinem der beiden neueren BZ-Typen (NECAR 3, [19]) so deutlich wie bei der von [11] verwendeten BZ. Der Einfluss der Verunreinigung ist stark von der Konzentration der Verunreinigung abhängig [22]. Der Spannungsverlust von 60 mV [28] wird mit ca. 66 mV (Reformatbetrieb des NECAR 3 im Vergleich zu H₂-Betrieb) bei 0,6 A/cm² bestätigt. Als Entwicklungsstand für Reformat-BZ wird eine Strom-Spannungskennlinie (Basis-BZS) angegeben, die nur eine geringfügig höhere Spannung zeigt als die von [19] gezeigte Kurve.

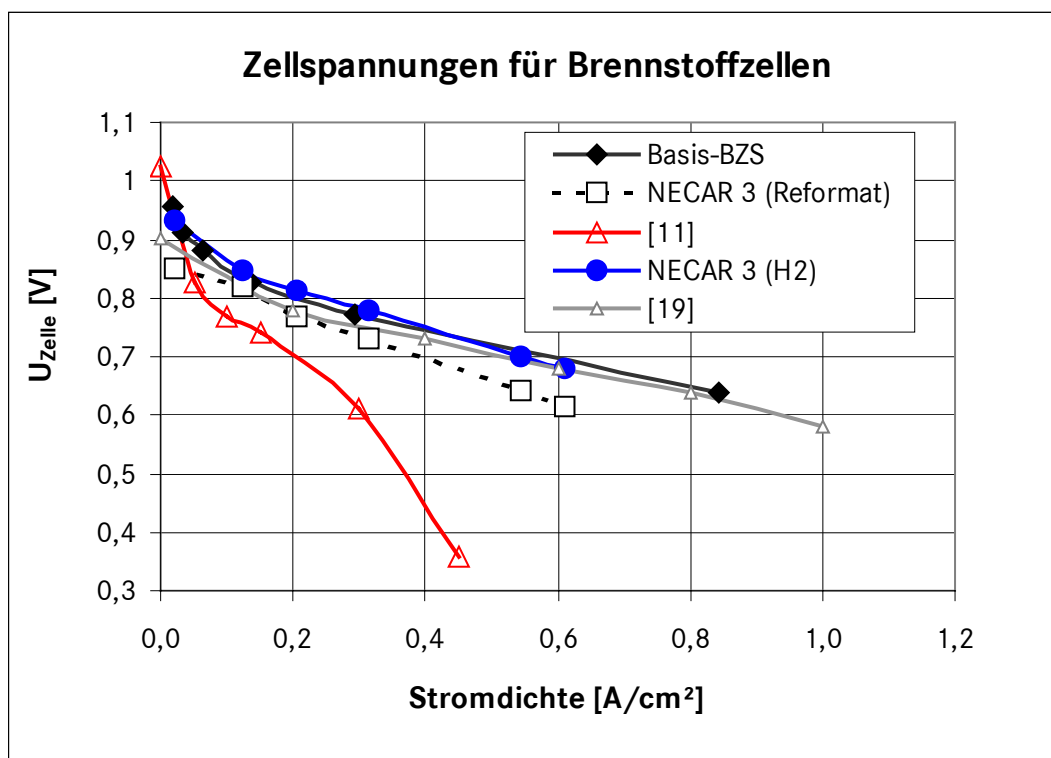


Abbildung 3.6: Strom-Spannungskennlinien verschiedener Brennstoffzellen

3.2.3 Nebenaggregate im BZS

Mit Nebenaggregaten werden die elektrischen Verbraucher bezeichnet, welche zum Betrieb des BZS im Fahrzeug erforderlich sind. Diese sind:

- Kompressor/Expander (Luftmodul)
- Kühlaggregate (Wasserpumpe und Lüfter)
- Bordnetz

Kompressor/Expander (Luftmodul)

Eine wesentliche Komponente ist hier die als Luftmodul bezeichnete Einheit aus Kompressor und Expander (sofern vorhanden), welche an der Kathode einen Überdruck erzeugt. Einige Wirkungsgrade für Kompressor-/Expander für BZS sind in Abbildung 3.7 in Abhängigkeit von dem jeweiligen maximalen Auslegungsmassenstrom der Aggregate dargestellt (relativer Massenstrom). Die von [31] dargestellten Wirkungsgrade sind deutlich höher als die vom NECAR 3 erreichten Werte. Bei dem im NECAR 3 verwendeten Kompressor handelt es sich um einen Wankelverdichter mit mechanisch angekoppeltem Expander. Das von [31] verwendete Aggregat ist ein Schrauben-Verdichter. Die bei NECAR 3 vermessenen Wirkungsgrade werden für das Basis-BZS als Entwicklungsstand übernommen.

Einige Verdichter-Aufnahmeleistungen sind in Abbildung 3.8 dargestellt. Der erreichte Systemdruck am Kathodeneintritt beträgt bei den dargestellten Systemen ca. 3 bar, was einem typischen BZS mit Überdruck entspricht [11, 25]. Hier wird der Kompressor üblicherweise mit einem Expander gekoppelt, so dass ein Teil der Verdichtungsenergie zurückgewonnen werden kann. Bei Umgebungsdruck-BZS liegt der Druck deutlich niedriger [22]. Ein Expander ist hier nicht einsetzbar, da die Strömungsverluste im System den vom Kompressor erzeugten Überdruck aufbrauchen.

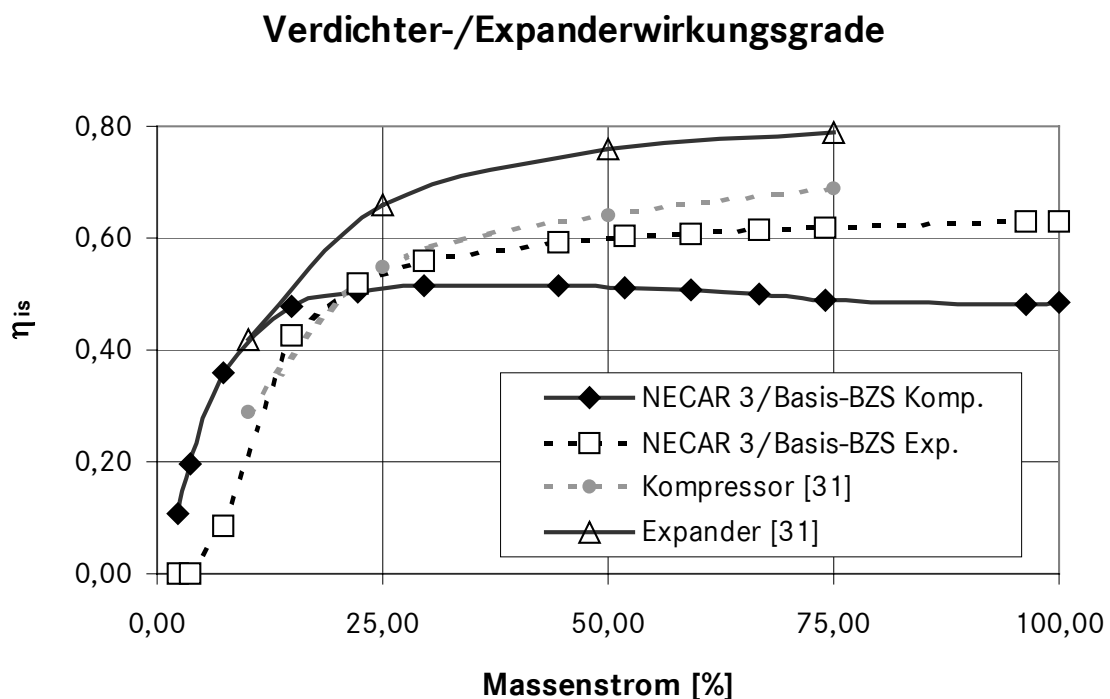


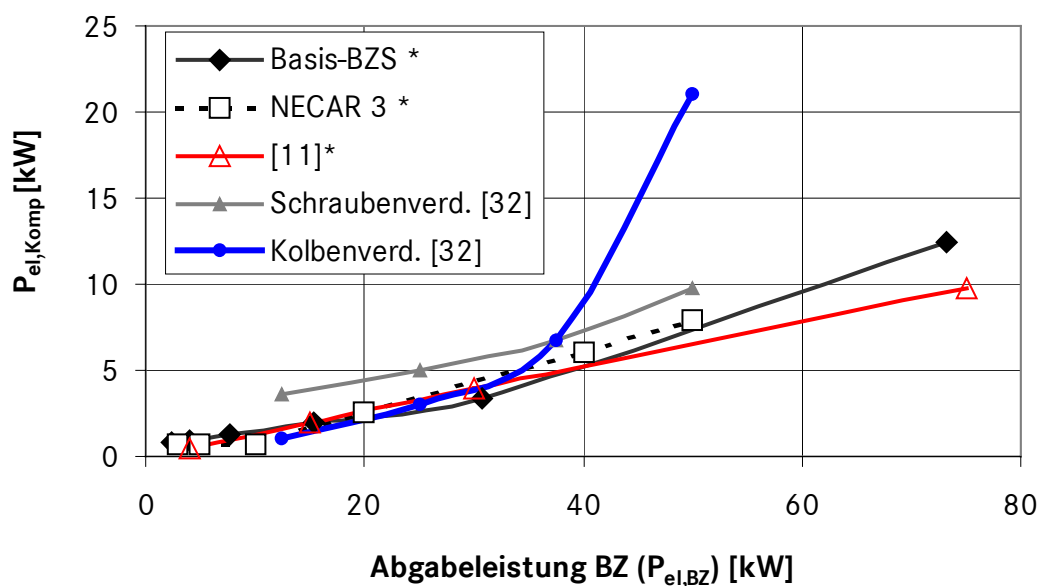
Abbildung 3.7: Verdichter- und Expanderwirkungsgrade

Die von [11] angenommene lineare Abhängigkeit der Kompressorleistung von der BZ-Leistung zeigt bei niedrigen Leistungen eine gute Übereinstimmung mit den in NECAR 3 vermessenen Werten. Bei höheren Leistungen ist diese Abschätzung jedoch zu optimistisch. Zusätzlich sind in Abbildung 3.8 noch zwei weitere Kurven [32] dargestellt, die ausschließlich Kompressoren beschreiben. Hier ist es interessant, den Unterschied zwischen einem Schrauben- und Kolbenverdichter zu beobachten. Der Schraubenverdichter zeigt bei niedrigen Volumenströmen

eine höhere Aufnahmeleistung. Der Kolbenverdichter zeigt einen steilen Leistungsanstieg bei ca. 70% der maximalen Stackleistung (d.h. der maximalen Luftmenge). Für den Einsatz in BZS wäre eine Kombination aus beiden Verdichtern optimal. Der Entwicklungsstand (Basis-BZS) entspricht dem NECAR 3-Luftmodul. Abweichungen von der NECAR 3-Kurve sind hier bedingt durch die aufgetragene Stackleistung, welche aufgrund der unterschiedlichen Polarisationskurve der BZ von NECAR 3 abweicht.

Neben einem Individualantrieb des Kompressors (eigener Elektroantrieb) ist auch ein Zentralantrieb des Kompressors über den elektrischen Fahrtrieb mit entsprechender Getriebeübersetzung denkbar. Im Folgenden wird nur der Individualantrieb betrachtet.

Aufnahmeleistung Luftmodul



*Kompressor inklusive Expansionsmaschine

Abbildung 3.8: Kompressor-Aufnahmeleistung (elektrisch)

Kühlaggregate (Wasserpumpe und Lüfter)

In der Literatur wird zunehmend das Kühlsystem für ein Brennstoffzellenfahrzeug [33] betrachtet. Eine BZ stellt für das Fahrzeugkühlsystem eine große Herausforderung dar. Die BZ-spezifische Problematik, im Vergleich zu verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen, kann in vier Punkten beschrieben werden:

- Bei dem für die Kühlsystemauslegung relevanten Betriebspunkt (Volllast) hat eine BZ einen vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrad ($\eta_{BZ} = \text{ca. } 53\%$).
- Aufgrund der niedrigen Abgastemperatur der BZ (ca. 85°C) ist die durch Abgas abgeführte Wärme gering.
- Die Betriebstemperatur der BZ bestimmt die Kühlwassertemperatur. Am Austritt aus der BZ kann die Kühlwassertemperatur maximal den Wert der Betriebstemperatur erreichen.

Aufgrund des niedrigen Temperaturgefälles zur Außentemperatur (BZ-Kühlsystem: ΔT ca. 50°C , konventionelles Kühlsystem ΔT ca. 85°C) ist der abführbare Wärmestrom geringer. Für den (Haupt-)Fahrzeugkühler gilt:

$$\dot{Q}_{\text{HK}} = kA(T_{\text{KW}} - T_{\text{Umg}}) \quad (3-2)$$

kA = Wärmedurchgangsfaktor

T_{Umg} = Umgebungslufttemperatur

T_{KW} = Kühlwassertemperatur am Fahrzeugkühlereingang/Thermostat

Damit ist der abführbare Wärmestrom \dot{Q}_{HK} um ca. 42% geringer als bei Kühlsystemen für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

- Zusätzlich zur Abfuhr von Verlustwärme ist bei BZS die Abfuhr von prozessbedingter Kondensationswärme erforderlich. Diese entsteht bei der Kondensation des aus dem BZ-Abgas zurückgewonnenen Wassers. Bei BZS mit geschlossenem Wasserkreislauf, d.h. ohne separaten Wasservorratsbehälter an Bord, ist dieser Schritt erforderlich, um den Wasserbedarf bei der Methanolreformierung zu decken.

Diese Punkte werden bei der Auslegung des Kühlsystems berücksichtigt. Bei dem in Abbildung 3.9 dargestellten System ist die Möglichkeit zur deutlichen Temperaturabsenkung des Kühlwassers am Kondensatoreintritt hervorzuheben. Damit kann eine maximale Wasserrückgewinnung erzielt werden.

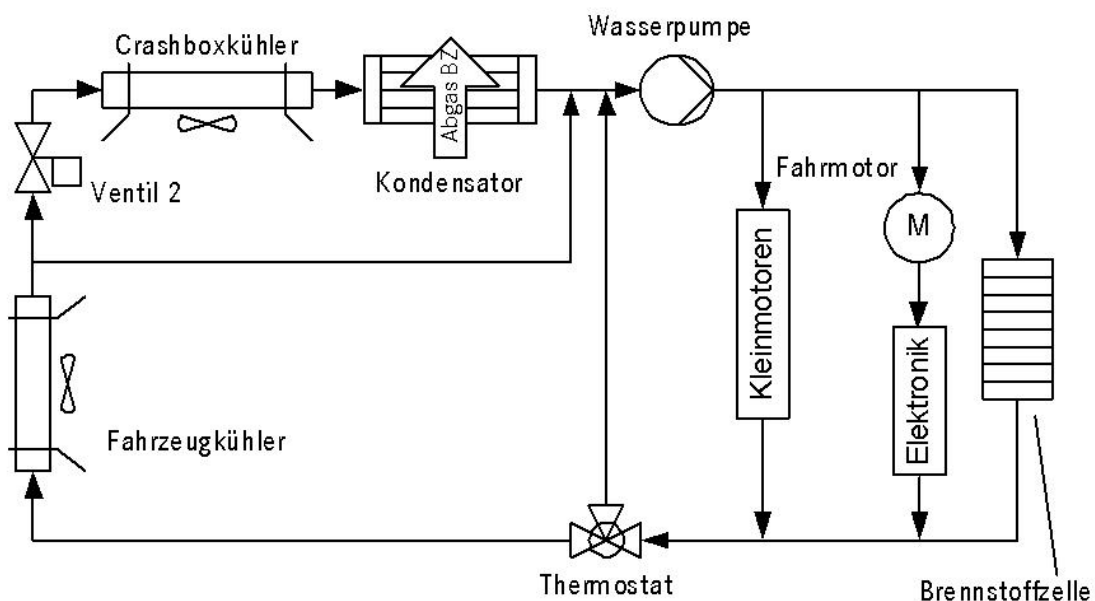


Abbildung 3.9: Kühlsystem mit Zusatzkühler (Crashboxkühler) und seriell geschaltetem Kondensator

Die durch BZ, Elektronik, Fahrwegmotor (elektrischer Antrieb) und Kleinmotoren (Luftmodul) zugeführte Wärme wird, sobald das stufenlos regelbare Thermostatventil öffnet, in den Fahrzeugkühler abgeführt. Mit dem ebenfalls stufenlos regelbaren Ventil 2 kann der Kühlwasser-

strom durch den Zusatzkühler (Crashboxkühler^A) und den Kondensator beeinflusst werden. Durch einen geringen Wasserstrom kann eine sehr niedrige Abgas-Eintrittstemperatur am Kondensator erzielt werden.

3.2.4 Elektrischer Antrieb

Elektrische Antriebe haben einen hohen Entwicklungsstand erreicht. Aufgrund der zurückliegenden Entwicklungsarbeiten für Batterie- und Hybridfahrzeuge steht mit dem elektrischen Fahren ein weitgehend entwickelter Elektromotor zur Verfügung. Einige Kenndaten heutiger Antriebe sind in Tabelle 3.3 dargestellt. Als Antriebsprinzip kommt bei [17] und [34] ein permanenterregter Antrieb zum Einsatz. Diese Antriebe zeichnen sich durch sehr hohe Wirkungsgrade und Leistungsdichten aus. Wenig dokumentiert ist der Einfluss der Schleppmomentenkurve. Permanenterregte Antriebe (PM) erzeugen abgeschaltet ein elektrisches Feld, welches zu einem Bremsmoment führt. Das erhöht den Rollwiderstand beim Fahren ohne Antriebsmoment (Rollen). Daneben sprechen auch Kostengründe [34] gegen einen baldigen Einsatz von PM-Antrieben in Fahrzeugen. Geschaltete Reluktanz-Motoren (SR) weisen nach [34] ein deutlich größeres Potential auf, um sowohl akzeptable Kosten als auch hohe Wirkungsgrade und Leistungsdichten zu realisieren.

	[17]	[28]	[34]	NECAR 3	BZS-Basis
Prinzip Antrieb	PM	k. A.	PM/SR	AS	AS
Prinzip Getriebe	k. A.	k. A.	k. A.	Festüber- setzung	Festüber- setzung
Überlastfaktor	k. A.	k. A.	>1,3	1,7	1,2
Wirkungsgrade*	0,9	0,77	0,9	0,89	0,9
Leistungsdichte [kW/kg]	0,75	0,5	>0,67	0,35	0,5
Nennleistung [kW]	45	k. A.	k. A.	33	55

*Spitzen-Wirkungsgrade, Ausnahme: [28] gibt einen Fahrzyklus-Wirkungsgrad an
Tabelle 3.3: Kenndaten elektrischer Antriebe

Ein Vergleich der Spitzen-Wirkungsgrade zeigt allerdings keine signifikanten Vorteile hinsichtlich des Wirkungsgrades für PM- oder SR-Antriebe. Der im NECAR 3 verwendete Asynchron-Antrieb erreicht einen nahezu identischen Wirkungsgrad. Für das Fahrzeug, welches den Entwicklungsstand repräsentieren soll, kommt ein Asynchronantrieb entsprechend dem aus Necar 3 zum Einsatz. Dieser wird nach den Vergrößerungsgesetzen [35] in der Elektrotechnik entsprechend der höheren Leistung modifiziert.

^A Der Name bezieht sich auf den Einbauort im Fahrzeug. Der Kühler ist vor dem Hauptkühler, unmittelbar hinter der Crashbox angeordnet (vgl. Anhang C, **Abbildung C. 7**).

3.2.5 Elektrische Speichermedien

Aufgrund der jahrelangen Entwicklungsaktivität für Batterie- und Hybridfahrzeuge profitieren Batterien analog zu den elektrischen Antrieben ebenfalls von den Entwicklungsfortschritten. Kennwerte heutiger Batterien können der Literatur entnommen werden [3, 25, 34]. Die hier verwendete Hybridbatterie basiert auf einer typischen NiMH-Batterie (Kennfeld im Anhang C, Abbildung C.8). Als Leistungsabgabe der Batterie werden 60 kW angenommen. Diese kurzfristig zur Verfügung stehende Leistung entspricht einem angenommenen Batteriegewicht von 100 kg und 240 Zellen (weitere Batterie-Daten siehe Tabelle 6.15). Bei Verwendung eines anderen Zelltyps sind gleiche Leistungen auch bei Gewichten von ca. 60 kg realisierbar. In letzterem Fall ist die Speichermenge allerdings deutlich geringer. Für die untersuchten Fahrzyklen ist die Unterscheidung bezüglich der Speichergröße der Batterien nicht relevant.

3.3. Definition des Basis-Fahrzeugs

Im Folgenden wird der Stand der Technik in Form einer Konfiguration von oben beschriebenen Komponenten, die den jeweiligen Stand der Technik repräsentieren sollen, dargestellt. Diese Konfiguration wird als Basis-Fahrzeug bzw. soweit es nur das BZS betrifft als Basis-BZS bezeichnet.

	Beschreibung
Antriebs-konzept	BZ-Lean-Fahrzeug
Fahrzeug	Mercedes-Benz A-Klasse
Getriebe	Festübersetzung, i [-]
Elektrischer Antrieb	eine Asynchronmaschine, entsprechend Tab. 3.3
BZS	BZS mit selektiver Oxidation, Reformat-Betrieb in BZ, Hochdruck-BZ
Luftmodul	Hochdruck-Kompressor mit Expander entsprechend Abb. 3.7 und 3.8
GES	BZS mit Methanol-Reformer entsprechend Tab. 3.2
BZ	Reformat-BZ, Stromdichte/Spannungskennlinie entsprechend Abb. 3.6

Tabelle 3.4: Konfiguration des Basis-Fahrzeuges

4 Simulationstechnische Beschreibung eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs

Die Ziele und Inhalte dieses Kapitels sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Ziel	Beschreibung der Struktur und Funktionsweise des Simulationsmodells
Inhalt	<ul style="list-style-type: none"> Beschreibung der spezifischen Problematik bei der rechnerischen Abbildung von BZ-Fahrzeugen, Vorstellung einer geeigneten Simulationsstruktur (Abschnitt 4.1) Detaillierte Beschreibung der Komponenten des Simulationsmodells mathematische Herleitung der Zusammenhänge, Vorstellung der Eingabedaten der Simulation (Abschnitt 4.2)

Tabelle 4.1: Ziele und Inhalte des Kapitels

Aufgabe der Simulationstechnik ist es nicht nur, bestehende Systeme mathematisch korrekt zu beschreiben, sondern vielmehr Aussagen über zukünftige Entwicklungen zu ermöglichen. Diese virtuellen Prototypen können anhand von Teilmodellen untersucht werden. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge kann nicht immer mit Hilfe von theoretischen, meistens linearisierten oder vereinfachten Gleichungen gerechnet werden. Die Simulationstechnik stützt sich in diesen Fällen auf Messdaten. Die Beschreibung des Betriebszustandes eines Fahrzeugantriebes erfolgt im Hinblick auf Energieverbrauch und Funktionsweise. Für die physikalische Beschreibung des Fahrzeugs bedeutet dies, dass quer- und vertikaldynamische Effekte vernachlässigt werden können.

4.1. Modellierung eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs

Im Folgenden wird zunächst die Regelungsstruktur eines realen Lean-BZ-Fahrzeugs (NECAR 3) beschrieben. Darauf aufbauend werden mögliche Strukturen von Simulationsmodellen diskutiert und eine geeignete ausgewählt. Es folgt zunächst eine Beschreibung der dynamischen Modellierung des BZS. Im Anschluss daran werden die Massen- und Wärmeströme in der Gaserzeugung und der Brennstoffzelle sowie in den Nebenaggregaten detailliert beschrieben. Abschließend wird die Modellierung des elektrischen Antriebs und des Getriebes sowie des Fahrzeugmodells mit den Fahrwiderständen erläutert.

4.1.1 Regelungsstruktur eines BZ-Fahrzeugs

Die Regelungsstruktur eines BZ-Fahrzeugs ist am Beispiel eines Lean-BZ-Fahrzeugs^A in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt. Ausgehend von der Differenz zwischen Soll- und Ist-Fahrgeschwindigkeit generiert der Fahrer ein Fahrpedalsignal. Dieses wird in der Regelung des elektrischen Antriebs in eine Soll-Antriebsleistung umgerechnet. Aufgrund der verfügbaren Spannung, Drehzahl und weiterer Parameter (thermische Belastung etc.) wird diese Leistungsanforderung des elektrischen Antriebs iterativ reduziert, bis diese Leistung vom elektrischen Antrieb bei optimaler Stromversorgung realisierbar ist. Die korrigierte Leistungsanfor-

^A DaimlerChrysler NECAR 3

derung ist Eingangsgröße für die Steuerung des elektrischen Antriebs. Gleichzeitig wird die elektrische Leistungsanforderung an die Regelung des BZS übergeben. Dort wird eine BZS-Soll-Leistung berechnet, die einen entsprechenden, zeitverzögerten^A Methanolstrom im BZS zur Folge hat.

Bei nicht ausreichender chemischer Antriebsleistung wird die Soll-Antriebsleistung am elektrischen Antrieb entsprechend reduziert. Ohne diese Leistungsbegrenzung entzieht der elektrische Antrieb bei zu niedriger Spannung der BZ zunehmend Strom, was zu Unterspannungen in der Brennstoffzelle und damit zu Beschädigungen führen kann.

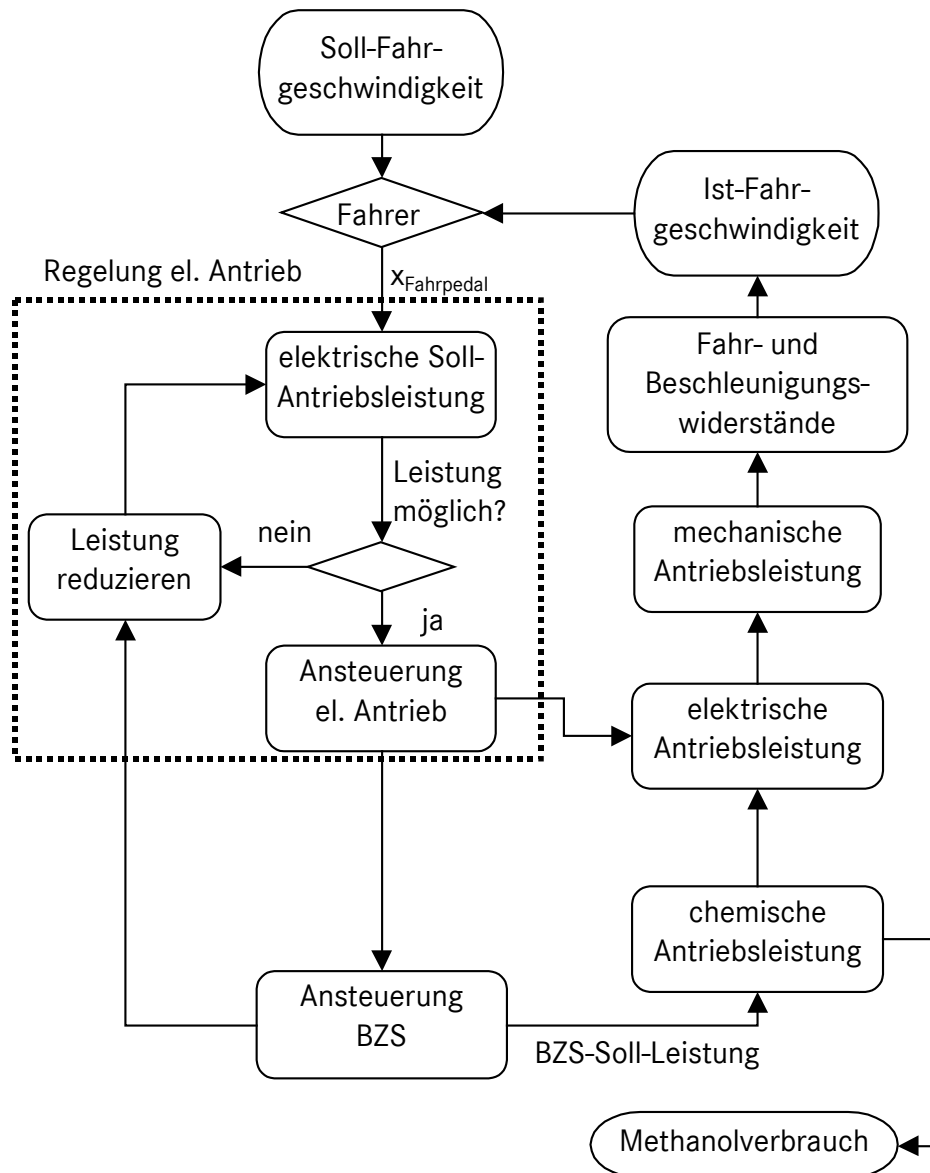


Abbildung 4.1: Regelungsstruktur eines realisierten Brennstoffzellenfahrzeugs (schematisch)

Bei der in Abbildung 4.1 dargestellten vorwärtsgerichteten Regelungsstruktur zeigt sich ein Problem des Lean-BZ-Fahrzeugs. Bei maximaler Beschleunigung befindet sich der elektrische Antrieb an einer Leistungshyperbel im Drehmomente-Drehzahl-Diagramm (vgl. Anhang C,

^A bedingt durch die Trägheit des BZS

Abbildung C.9). Die elektrische (Ist-)Antriebsleistung ist nach Abbildung 4.1 von der zur Verfügung stehenden chemischen (Ist-)Antriebsleistung abhängig und kann aus diesem Grund nicht gesteigert werden. Die Führungsgröße des BZS (BZS-Soll-Leistung, $P_{\text{Soll,BZS}}$), mit welcher die chemische Ist-Antriebsleistung gesteigert werden kann, ist ihrerseits durch die elektrische Ist-Antriebsleistung begrenzt. Damit ist diese Regelung schwierig bzw. nicht sinnvoll. In der Praxis wird dieses Problem durch experimentell ermittelte zeitabhängige Kennfelder mit Verhältnissen von BZS-Soll-Leistung zu elektrischer Soll-Antriebsleistung gelöst. Für die Simulation soll eine analytische Lösung gefunden werden.

4.1.2 Strukturen von Simulationsmodellen

Unter der Vielzahl der Möglichkeiten, ein Simulationsmodell für Kraftfahrzeuge zu erstellen, können zwei grundsätzliche Strukturvarianten unterschieden werden.

- vorwärtsgerichtete Simulationsmodelle
- rückwärtsgerichtete Simulationsmodelle

Kennzeichnend für die rückwärtsgerichtete Regelungsstruktur ist die Berechnung aller Leistungen ausgehend von der Radleistung. Bei einer rückwärtsgerichteten Simulation [36, 37] existieren algebraische Gleichungen. Diese beschreiben das Verhalten des Systems zu jedem Zeitpunkt. Bei elektrisch oder verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen erfolgt eine rückwärtsgerichtete, längsdynamische Antriebsstrangsimulation dadurch, dass ein Fahrzeug in Form von Motorkennfeldern (Verbrauchs- und Emissionskennfelder), Getriebekennfeldern (Wirkungsgradkennfelder) und einer mechanischen Abbildung des Fahrzeugs durch ein Fahrzeugmodell mit Fahrwiderstandsgleichungen simuliert wird. Die Abbildung einer rückwärtsgerichteten Simulation eines Methanol-BZ-Fahrzeugs zeigt Abbildung 4.2.

Einer Geschwindigkeit ist immer ein Methanolstrom zugeordnet. Die rückwärtsgerichtete Abbildung eines Fahrzeugantriebes ist die einfachste Form der Darstellung eines Zusammenhangs zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Betriebszustand des Antriebssystems. Wie man [36] entnehmen kann, ist eine Voraussetzung dieser Modellierung, dass die vorgegebene Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt tatsächlich erreicht wird. Das setzt voraus, dass die geforderte Soll-Antriebsleistung sofort zur Verfügung steht. Ein transienter Zustand im Antriebsstrang, beispielsweise eine Ist-Antriebsleistung, die sich verzögert aufbaut, kann nicht berücksichtigt werden.

Eine rückwärtsgerichtete Simulation ist daher ungeeignet für die Beschreibung eines Methanol-BZ-Fahrzeugs unter Berücksichtigung dynamischer Effekte.

Mit vorwärtsgerichteten Simulationen kann eine dynamische Betriebsstrategie [38] (Sollwertstrategie) dargestellt werden. Die Leistung wird dabei nicht vom Rad zurückgerechnet, sondern im Antrieb erzeugt und mit entsprechenden Verlusten zum Rad weitergeleitet. Auf diese Art können Verzögerungen und Leistungsbegrenzungen im Antriebsstrang berücksichtigt werden.

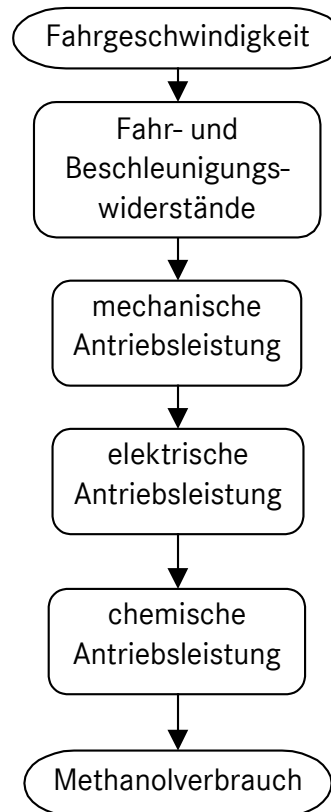


Abbildung 4.2: rückwärtsgerichtetes Simulationsmodell

Im Gegensatz zu einer rückwärtsgerichteten Abbildung besteht hier kein direkter Zusammenhang zwischen vorgegebener Geschwindigkeit und tatsächlicher Geschwindigkeit. Ein Regler (z.B. ein PID-Regler), welcher den Fahrer abbildet, vergleicht Ist- und Sollgeschwindigkeit und steuert mit einem Signal ($x_{\text{Fahrpedal}}$) den Fahrtrieb an (Abbildung 4.1 bzw. Abbildung 4.3).

Die oben erläuterten Schwierigkeiten bei einer vorwärtsgerichteten Regelungsstruktur werden im hier verwendeten Simulationsmodell durch eine weitgehende Entkopplung der Regelungen von Fahrtrieb und BZS beseitigt. Das wird möglich, wenn mit der Fahrpedalanforderung ein virtueller elektrischer Antrieb beaufschlagt wird (Vorsteuerung des BZS). Anhand des virtuellen Drehmomentes wird mit der aktuellen (Ist-) Drehzahl entsprechend der Fahrpedalstellung eine elektrische Wunschleistung generiert. Dabei spielt die Leistungsbegrenzung durch ein BZS keine Rolle. Im Folgenden wird diese virtuelle Leistung als Führungsgröße für das BZS (BZS-Soll-Leistung, $P_{\text{Soll,BZS}}$) verwendet.

$$P_{\text{Soll,BZS}} = P_{\text{el,virtuell}} \quad (4-1)$$

$P_{\text{el,virtuell}}$ = Leistungsanforderung des virtuellen elektrischen Antriebs

Die in dieser Arbeit verwendete Simulationsstruktur ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Die oben diskutierte vorwärtsgerichtete Regelungsstruktur mit Vorsteuerung des BZS wird durch einen virtuellen elektrischen Antrieb realisiert. Der chemisch-elektrische Antriebsstrang ist in die Subsysteme BZS, elektrischer Antrieb, Getriebe und Fahrzeug unterteilt. Die Geschwindig-

keitsvorgabe erfolgt durch ein zeitabhängiges Geschwindigkeitsprofil. Zusätzlich kann dem Geschwindigkeitsprofil eine Steigung der Fahrbahn zugeordnet werden. Neben der Steuerung durch ein Fahrpedalsignal kann der Fahrerregler das Fahrzeug auch abbrem sen, um die Soll-Geschwindigkeit zu erreichen.

Die Wirkungsgraddefinition der Gaserzeugung folgt aus der elektrischen Ausgangsleistung ($P_{el,BZS}$) und aus dem Produkt des zugeführten Methanols und dessen Heizwert (chemische Eingangsleistung, P_{CH_3OH}) am Eintritt des BZS.

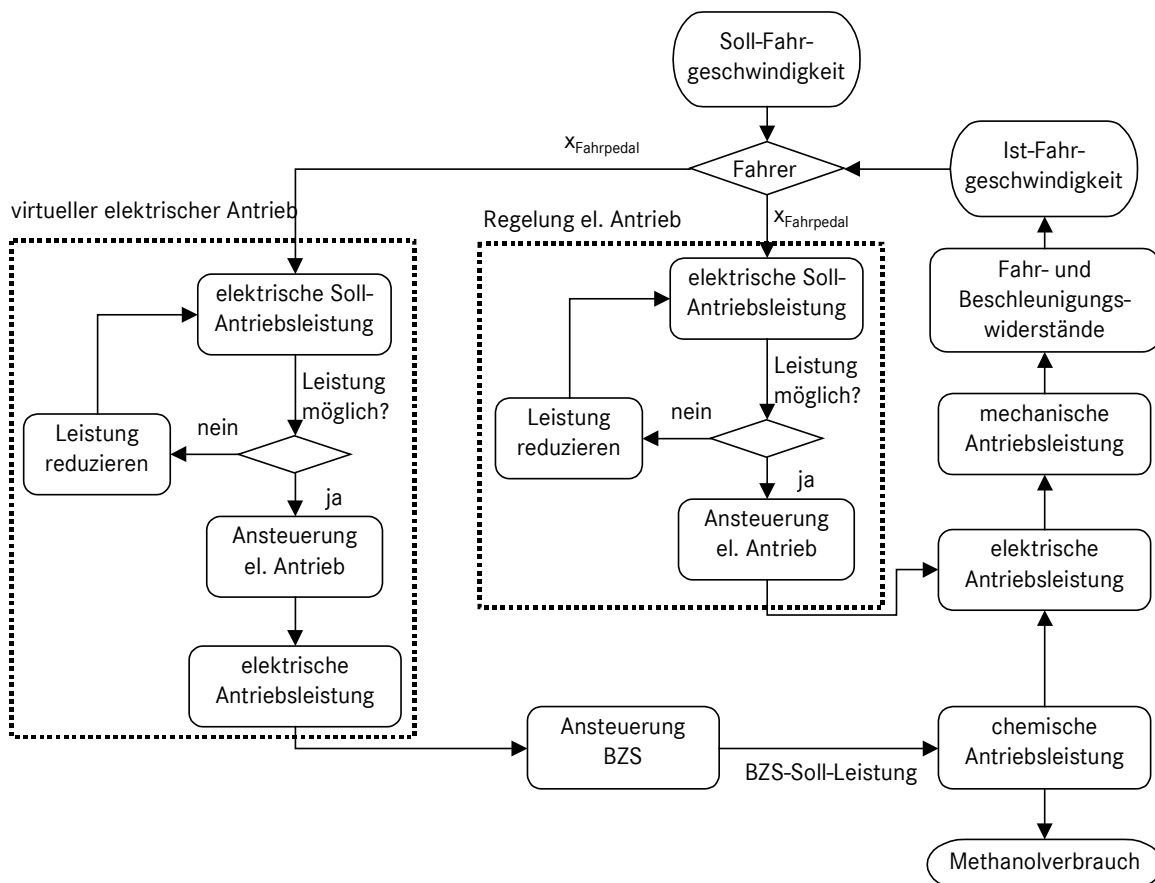


Abbildung 4.3: vorwärtsgerichtetes Simulationsmodell

4.2. Modellierung der Komponenten und Eingabedaten der Simulation

Der Detaillierungsgrad der Modellierung richtet sich nach den zu beantwortenden Fragestellungen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die zur Verbrauchsberechnung relevanten Parameter eines BZ-Fahrzeugs ermittelt und betrachtet. Während das stationäre Verhalten Nichtlinearitäten berücksichtigt, wird das dynamische Verhalten des BZS durch zeitlich lineare Verzögerungsfunktionen abgebildet. Alle nachfolgenden Erläuterungen des Simulationsmodells werden am Beispiel des Lean-BZ-Fahrzeugs mit der in Tabelle 3.4 beschriebenen Basis-Konfiguration durchgeführt. Das in dieser Arbeit verwendete Simulationsmodell ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

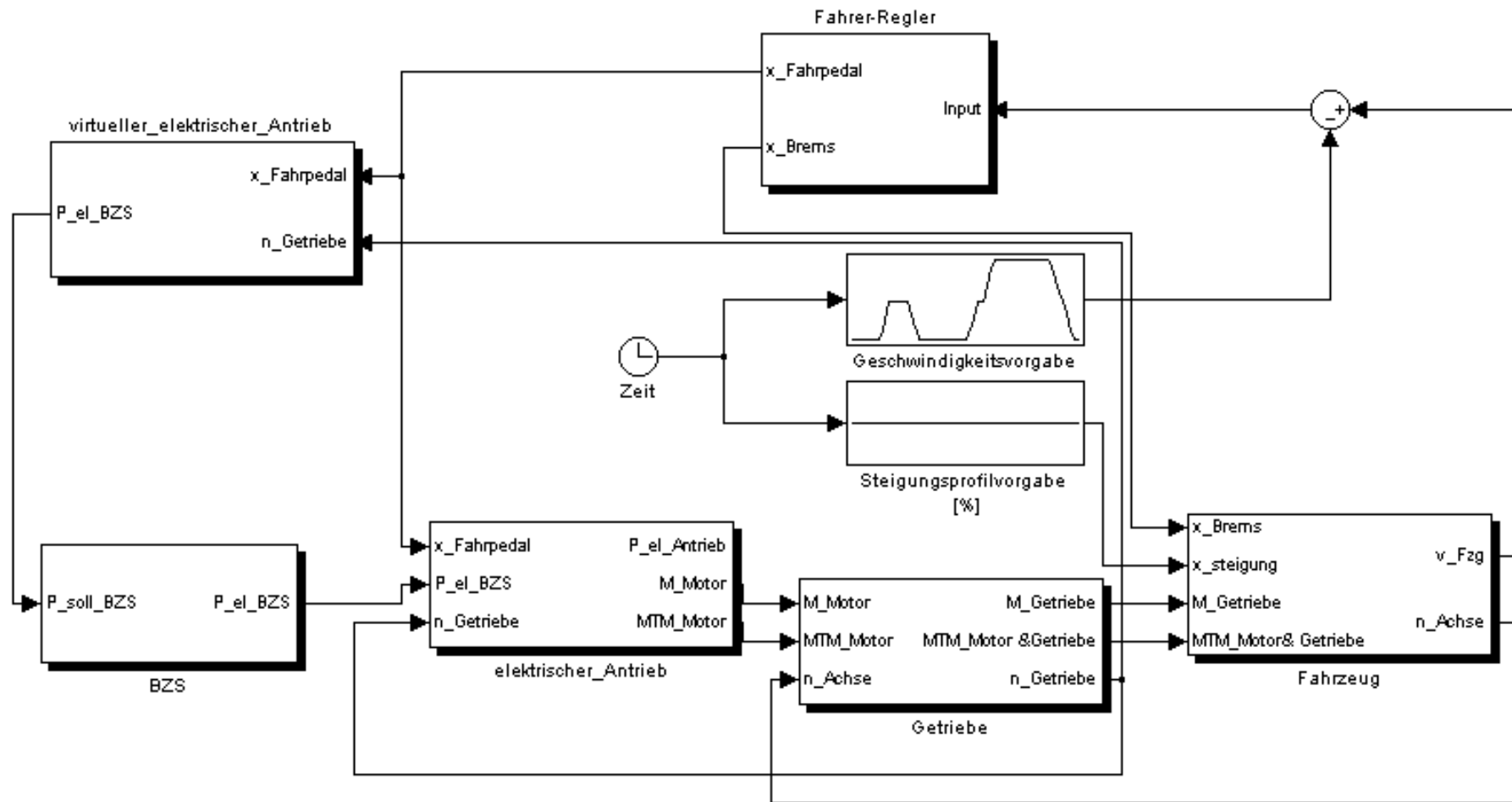


Abbildung 4.4: Simulationsmodell des Brennstoffzellen-Fahrzeugs

4.2.1 Abbildung des Brennstoffzellensystems

Eine Darstellung des Simulationsmodells des BZS zeigt Abbildung 4.5. Aus der Differenz der beiden Eingangsgrößen $P_{el,BZS}$ (elektrische Abgabeleistung des Brennstoffzellensystems) und $P_{soll,BZS}$ (BZS-Soll-Leistung, elektrische Leistungsanforderung) wird in einem PID-Regler ein Steuersignal für den Methanolstrom vorgegeben (vgl. Abbildung 4.3).

Ausgehend von der Vorgabe des BZS-Reglers wird ein Methanolstrom generiert. Durch die Übertragungsfunktion höherer Ordnung wird ein Verzögerungsverhalten zwischen dem Massenstrom des dosierten Methanols und dem Massenstrom des dem Verdampfer zugeführten Methanols abgebildet. In einer nachfolgenden stationären Umrechnung wird dem Verdampfer-Methanolstrom ein Wasserstoffstrom zugeordnet. Der Wasserstoffstrom entspricht dabei dem in der Brennstoffzelle elektrochemisch umgesetzten Wasserstoff ($\dot{m}_{H_2,BZ}$).

Die elektrische Ausgangsleistung des BZS ergibt sich aus der Differenz der elektrischen Leistung der BZ und dem Leistungsverbrauch der Nebenaggregate.

$$P_{el,BZS} = P_{el,BZ} - P_{el,NA} \quad (4-2)$$

Die elektrische Ausgangsleistung des BZS wird zum Eingang des BZS-Reglers zurückgeführt. Da die Wasserstofferzeugung deutlich langsamer ist als das Verzögerungsverhalten der Luftversorgung (Drehzahlانpassung des Kompressors) und ebenfalls deutlich langsamer als das Verzögerungsverhalten der Brennstoffzelle, wird die Geschwindigkeit der elektrischen Leistungsbereitstellung des BZS durch den Teilschritt der Wasserstofferzeugung beschrieben.

Da eine Bestimmung des Wasserstoffstroms $\dot{m}_{H_2,BZ}$ an im Fahrzeug verbauten BZS^A nicht möglich ist, wird das Verzögerungsverhalten auf den elektrischen Strom der Brennstoffzelle bezogen. Dies ist möglich, da zwischen Wasserstoffstrom (vor der BZ, $\dot{m}_{H_2,BZ}$) und elektrischem Strom I_{BZ} eine algebraische Modellierung ohne Verzögerungsverhalten abgebildet ist (s. Tabelle 4.4, vgl. Gleichung 4-35). Das Übertragungsverhalten im Simulationsmodell ergibt sich damit zu:

$$G(s) = \frac{\dot{m}_{H_2,BZ}}{\dot{m}_{CH_3OH,Verd}} \sim \frac{I_{BZ}}{\dot{m}_{CH_3OH,Verd}} \quad (4-3)$$

$\dot{m}_{H_2,BZ}$ = in der BZ elektrochemisch genutzter Wasserstoffstrom

$\dot{m}_{CH_3OH,Verd}$ = zur Gaserzeugung in den Verdampfer eingespritzter Methanolstrom

Das stationäre Verhalten des BZS wird im Folgenden detailliert beschrieben. Einige stationäre Auslegungsdaten des BZS sind in Tabelle 4.2 dargestellt. In der Darstellung der Leistungsaufnahme der Nebenaggregate in Tabelle 4.2 ist das Kühlsystem nicht berücksichtigt, da seine Leistungsaufnahme nicht in Abhängigkeit zum BZS-Betriebspunkt darstellbar ist (vgl. Abschnitt 4.2.4 Beschreibung der Nebenaggregate, Kühlsystem).

^A Für quantitative Aussagen sind keine ausreichend genauen Wasserstoffsensoren vorhanden. Um eine spätere Validierung des Simulationsmodells zu ermöglichen, wird dies hier berücksichtigt.

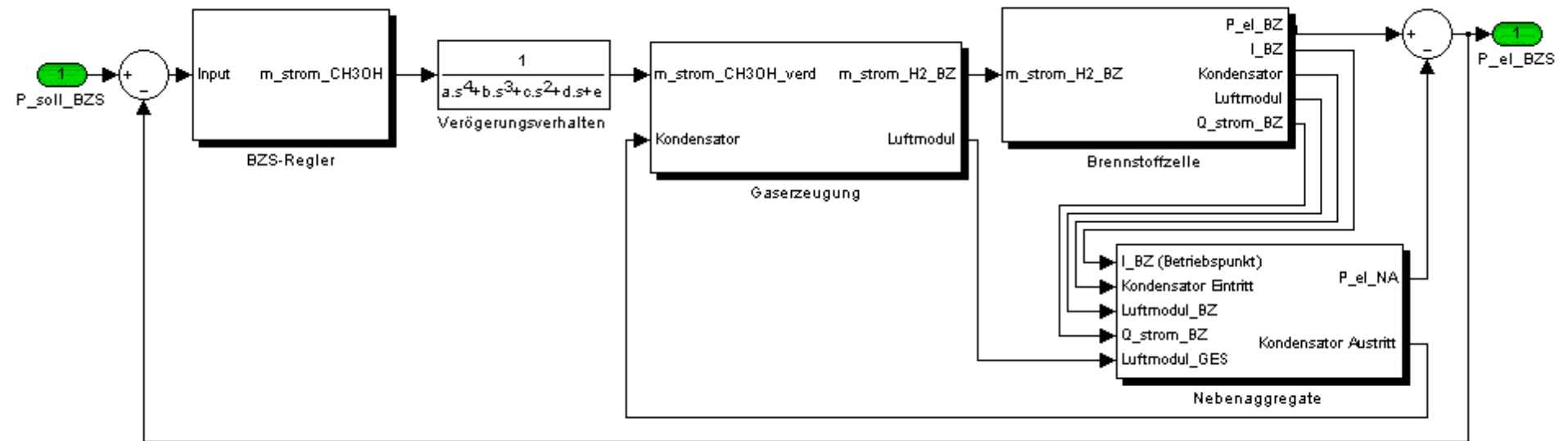


Abbildung 4.5: Simulationsmodell des BZS

Wie Tabelle 4.2 entnommen werden kann, wird im Teillastbereich (bei ca. 41 A Stromstärke bzw. 15,3 kW Abgabeleistung der BZ) mit $\eta_{\text{BZS}}=0,45$ der maximale Wirkungsgrad erreicht. Somit lässt sich die bereits getätigte Aussage hinsichtlich des optimalen Wirkungsgrades im Teillastbereich untermauern.

$$\eta_{\text{BZS}} \equiv \frac{P_{\text{el,BZS}}}{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}} H_{\text{U,CH}_3\text{OH}}} \quad (4-4)$$

$H_{\text{U,CH}_3\text{OH}}$ = unterer Heizwert Methanol

Brennstoffzellensystem						
Betriebspunkt/ Stromstärke BZ [A]	0	10	19	41	88	253
$P_{\text{el,BZ}}$ [KW]	2,65	4,12	7,69	15,32	30,84	73,29
$P_{\text{el,NA}}^*$ [KW]	1,23	1,37	1,70	2,35	3,76	12,79
$P_{\text{el,BZS}}^*$ [KW]	1,43	2,75	5,99	12,96	27,07	60,50
η_{BZS}^*	0,32	0,39	0,44	0,45	0,44	0,34

*ohne Kühlaggregate

Tabelle 4.2: Stationäre Auslegungsdaten des BZS

4.2.2 Stationäre Abbildung der Gaserzeugung

Im Folgenden wird der stationäre Gaserzeugungsprozess des Wasserstoffs beschrieben. Die Schaltung der Komponenten entspricht dabei dem bereits in 3.1.1 vorgestellten BZS mit selektiver Gasreinigung. Für die Umgebungsbedingungen werden folgende Annahmen getroffen:

- Temperatur: 20°C
- Druck: 1 bar
- relative Luftfeuchte: 30%

Das Modell der Gaserzeugung ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Die unten stehenden Bauteile werden in der Reihenfolge ihrer Durchströmung erläutert.

- Verdampfer
- Reformer
- Gasreinigung
- Katalytischer Brenner

Neben einer Betrachtung der relevanten Stoffströme am Ein- und Austritt der jeweiligen Komponente wird zusätzlich auf die Wärmeströme bzw. die Wärmebilanz der Gaserzeugung eingegangen. Abschließend erfolgt eine Gesamtbetrachtung der Gaserzeugung mit einer Herleitung der relevanten Auslegungskenngrößen.

Verdampfer

Im Verdampfer werden die Stoffströme nicht verändert, sondern lediglich erhitzt und verdampft. Es muss Wärme zugeführt werden.

Der Methanolstrom $\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}}$ wird durch Pumpen aus einem Tank befördert. Danach wird das Methanol in einem Verdampfer und Überhitzer auf die zur Reformierung erforderliche Temperatur von 300°C gebracht. Parallel dazu wird ein Wasserstrom ebenfalls im Verdampfer verdampft und überhitzt. Das Stöchiometrieverhältnis im Verdampfer wird von den Reformer-Betriebsdaten vorgegeben. Nach [11,17,21] kann mit einem Stöchiometrieverhältnis im Reformer von $n_{\text{Ref}} = 1,5$ (Wasser zu Methanol) ein Maximum an Methanolausbeute, niedrigem CO-Gehalt und niedrigem Wasserverbrauch erreicht werden. Der Wasser-Massensstrom in den Verdampfer berechnet sich wie folgt:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O, Verd}} = \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}} \cdot \frac{\text{MM}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{MM}_{\text{CH}_3\text{OH}}} n_{\text{Ref}} \quad (4-5)$$

MM = molare Masse

n_{Ref} = Stöchiometrisches Verhältnis H_2O zu CH_3OH (s. Anhang B.1)

Die zur Verdampfung erforderliche Wärme wird mit den Wärmekapazitäten und der Verdampfungsenthalpie aus Gleichung 4-6 berechnet.

$$\dot{Q}_{\text{Verd}} = \left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_{\text{H}_2\text{O, Verd}} \cdot \left(\begin{array}{l} \frac{1}{\text{MM}_{\text{H}_2\text{O}}} \Delta H_{\text{Verd, H}_2\text{O}} \\ + c_{p, \text{H}_2\text{O, l}} \cdot (T_{\text{Verd, H}_2\text{O}} - T_{\text{Umg}}) \\ + c_{p, \text{H}_2\text{O, g}} \cdot (T_{\text{Ref}} - T_{\text{Verd, H}_2\text{O}}) \end{array} \right) + \\ \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}} \cdot \left(\begin{array}{l} \frac{1}{\text{MM}_{\text{CH}_3\text{OH}}} \Delta H_{\text{Verd, CH}_3\text{OH}} \\ + c_{p, \text{CH}_3\text{OH, l}} \cdot (T_{\text{Verd, CH}_3\text{OH}} - T_{\text{Umg}}) \\ + c_{p, \text{CH}_3\text{OH, g}} \cdot (T_{\text{Ref}} - T_{\text{Verd, CH}_3\text{OH}}) \end{array} \right) \end{array} \right\} \quad (4-6)$$

ΔH_{Verd} = molare Verdampfungsenthalpie

$c_{p, l}$ = mittlere spez. Wärmekapazität (flüssige Phase)

$c_{p, g}$ = mittlere spez. Wärmekapazität (gasförmige Phase)

T_{Umg} = Umgebungstemperatur

T_{Verd} = Siedepunkttemperatur bei 3 bar

T_{Ref} = Temperatur im Reformer

Die aus dem Verdampfer austretenden Massenströme werden dem Reformer zugeführt.

Reformer

Im Reformer wird Wasserstoff aus Methanol und Wasser erzeugt. Für den Reformierungsprozess wird Wärmezufuhr benötigt.

Am Eingang des Reformers liegen die Austrittsströme des Verdampfers vor. Mit dem in Tabelle 3.2 als Stand der Entwicklung angenommenen Umsatzfaktor von 98% des Methanols kann der Wasserstoffstrom wie folgt berechnet werden:

$$\dot{m}_{\text{H}_2, \text{Ref}, \text{aus}} = \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}, \text{Verd}} \cdot x_{\text{Ref}} \frac{MM_{\text{H}_2}}{MM_{\text{CH}_3\text{OH}}} n_{\text{H}_2 - \text{CH}_3\text{OH}} \quad (4-7)$$

x_{Ref} = Umsatzrate Methanol (0,98)

$n_{\text{H}_2 - \text{CH}_3\text{OH}}$ = stöchiometrisches Verhältnis H_2 zu CH_3OH aus der Wasserdampfreformierung

$n_{\text{H}_2 - \text{CH}_3\text{OH}} = 3$ (s. Anhang B.1, Gleichung B-1)

$$\dot{m}_{\text{CO}_2, \text{Ref}, \text{aus}} = \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}, \text{Verd}} \cdot x_{\text{Ref}} \frac{MM_{\text{CO}_2}}{MM_{\text{CH}_3\text{OH}}} \quad (4-8)$$

Die Austrittsströme an Methanol und Wasser berechnen sich ebenfalls mit den Umsatzraten und Stöchiometrien.

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}, \text{Ref}, \text{aus}} = \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}, \text{Verd}} \cdot (1 - x_{\text{Ref}}) \quad (4-9)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}, \text{Ref}, \text{aus}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}, \text{Verd}} \cdot \left(1 - \frac{x_{\text{Ref}}}{n_{\text{Ref}}} \right) \quad (4-10)$$

Beim Reformierungsprozess wird nur ein Teil des zugeführten Wassers verbraucht. Der Rest verlässt den Reformer. Das austretende Wasser kann, unter Vernachlässigung des CO-Einflusses (s. unten), wie folgt ermittelt werden.

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}, \text{Ref}, \text{aus}} = \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}, \text{Verd}} \cdot (n_{\text{Ref}} - x_{\text{Ref}}) \frac{MM_{\text{H}_2}}{MM_{\text{CH}_3\text{OH}}} \quad (4-11)$$

Zusätzlich zu Wasserstoff und CO_2 entsteht im Reformer CO. Der CO-Anteil für das hier abgebildete System wird nach [21] mit 20000 ppm ($x_{\text{CO}, \text{Ref}}$) angegeben. Der Massenstrom an CO am Reformeraustritt wird aus den Molströmen und dem CO-Anteil berechnet.

$$\dot{m}_{\text{CO,Ref,aus}} = \frac{x_{\text{CO,Ref}}}{1 - x_{\text{CO,Ref}}} \left(\frac{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH,Ref,aus}}}{\text{MM}_{\text{CH}_3\text{OH}}} + \frac{\dot{m}_{\text{CO}_2,\text{Ref,aus}}}{\text{MM}_{\text{CO}_2}} + \frac{\dot{m}_{\text{H}_2,\text{Ref,aus}}}{\text{MM}_{\text{H}_2}} + \frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,Ref,aus}}}{\text{MM}_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \cdot \text{MM}_{\text{CO}} \quad (4-12)$$

Die erforderliche Wärmezufuhr im Reformer kann mit der Reaktionsenthalpie aus der Reaktionsgleichung der Wasserdampfpreformierung (s. Anhang B, Gleichung B-1) ermittelt werden.

$$\dot{Q}_{\text{Ref}} = \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH,Verd}} \cdot x_{\text{Ref}} \frac{1}{\text{MM}_{\text{CH}_3\text{OH}}} \Delta H_{\text{R}} \quad (4-13)$$

ΔH_{R} = Reaktionsenthalpie der Wasserdampfpreformierung

Die aus dem Reformer austretenden Stoffströme werden der Gasreinigung zugeführt.

Gasreinigung

In der Gasreinigung wird das für den elektrochemischen Prozess in der BZ erforderliche, von Kohlenmonoxid (CO) gereinigte Brenngas erzeugt. In der Gasreinigung wird Wärme frei.

Das Reformat wird in der Gasreinigung mittels Luftzufuhr, d.h. durch selektive Oxidation (s. Anhang B, Gleichung B-2) von CO-Resten gereinigt. Untersuchungen von [21] zeigen, dass ca. zehn Prozent des erzeugten Wasserstoffs oxidiert werden müssen, um eine für den dynamischen Betrieb^A der BZ ausreichende CO-Reinigung zu erzielen. Der zugeführte Luftstrom stammt aus dem Kompressor. Die trockene Stoffzusammensetzung kann wie folgt beschrieben werden:

$$\dot{m}_{\text{O}_2,\text{Gasr,ein}} = \dot{m}_{\text{H}_2,\text{Ref,aus}} \cdot x_{\text{Gasr}} \frac{\text{MM}_{\text{O}_2}}{\text{MM}_{\text{H}_2}} n_{\text{O}_2-\text{H}_2} \quad (4-14)$$

x_{Gasr} = Verlustfaktor des Wasserstoffs in der Gasreinigung (0,89)

$n_{\text{O}_2-\text{H}_2}$ = stöchiometrisches Verhältnis O_2 zu H_2 aus der Knallgasreaktion (s. Anhang B, Gleichung B-4)

$$\dot{m}_{\text{N}_2,\text{Gasr}} = \dot{m}_{\text{O}_2,\text{Gasr,ein}} \cdot \xi_{\text{O}_2,\text{Luft}} \quad (4-15)$$

$\xi_{\text{O}_2,\text{Luft}}$ = Massenverhältnis O_2 zu N_2 in trockener Luft [7]

^A Um eine CO-Vergiftung der BZ bei bevorstehenden schnellen Lastsprüngen zu vermeiden, kann der Verlustfaktor x_{Gasr} auch bei stationären Betriebspunkten nicht reduziert werden.

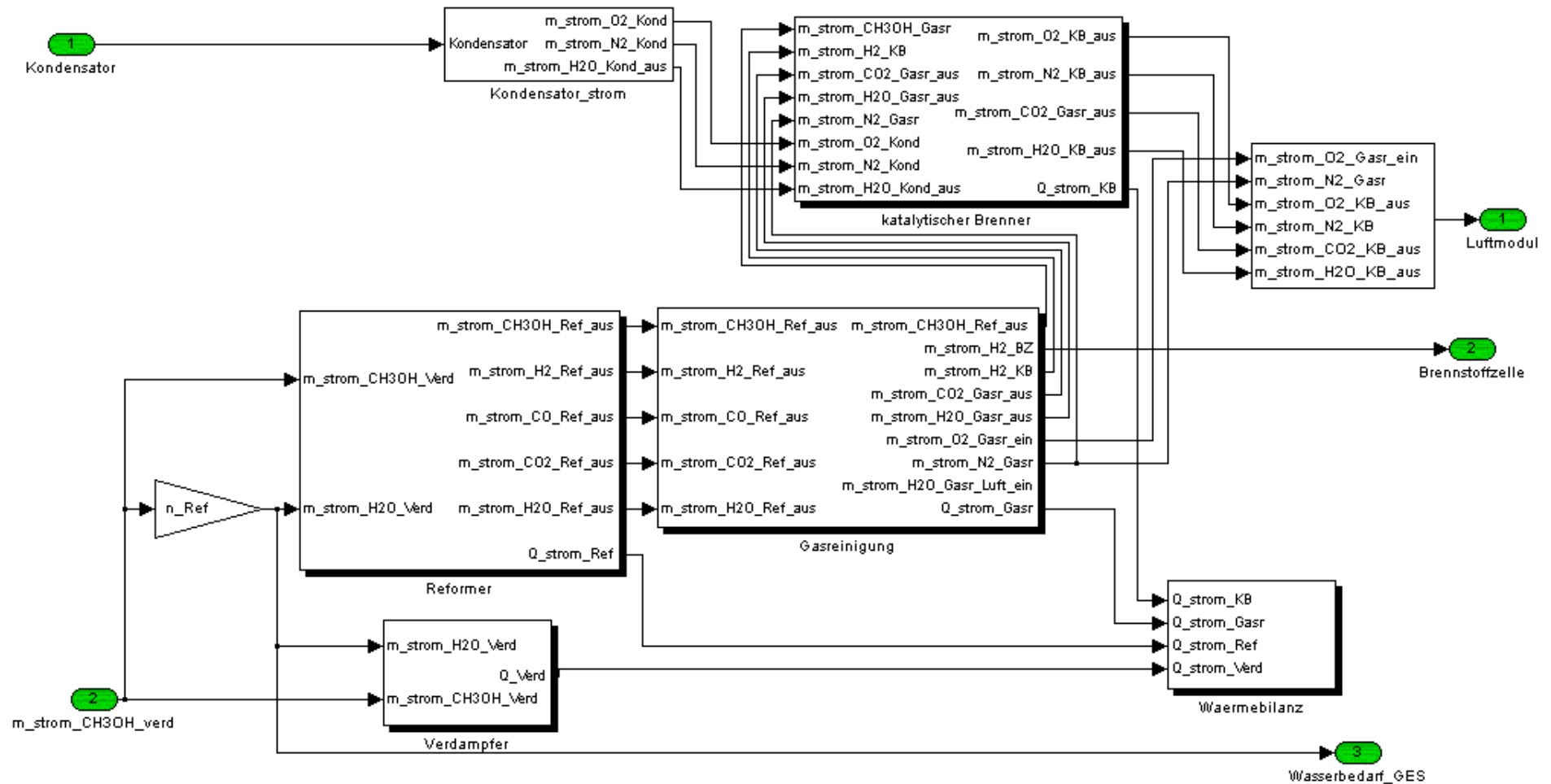


Abbildung 4.6: Simulationsmodell der Gaserzeugung

Bei dem durch die Luft (Luftfeuchte 30%, s. o.) zugeführten Wassermassenstrom ist zu beachten, dass der Absolutdruck dem Umgebungsdruck entspricht.

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,Gasr,Luft,ein}} = (\dot{m}_{\text{N}_2,\text{Gasr}} + \dot{m}_{\text{O}_2,\text{Gasr,ein}}) \cdot \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^*}{p} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^*}{p}\right)} \cdot \text{MM}_{\text{H}_2\text{O}} \quad (4-16)$$

$p_{\text{H}_2\text{O}}^*$ = Partialdampfdruck des Wassers (Berechnung s. Anhang B, Gleichung B-8)

p = Absolutdruck

Das am Austritt der Gasreinigung vorliegende Reformat setzt sich zusammen aus CH_3OH , N_2 , H_2O , CO_2 und H_2 . Der austretende Methanolstrom $\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH,Ref,aus}}$ entspricht dem nicht umgesetzten Methanol aus der Reformierung. Der Stickstoffstrom entspricht dem durch die Luft zugeführten Massenstrom $\dot{m}_{\text{N}_2,\text{Gasr}}$. Der am Austritt aus der Gasreinigung vorliegende Wasserstrom setzt sich aus dem überschüssigen Wasser am Reformerausstritt, dem durch die Luftfeuchte der verwendeten Luft zugeführten Wasser und dem Reaktionswasser des oxidierten Wasserstoffs zusammen.

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,Gasr,aus}} = \underbrace{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,Ref,aus}}}_{\text{aus Reformier}} + \underbrace{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,Gasr,Luft,ein}}}_{\text{durch Luftfeuchte zugeführt}} + \underbrace{\dot{m}_{\text{H}_2,\text{Ref,aus}} \left(1 - x_{\text{Gasr}}\right) \frac{\text{MM}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{MM}_{\text{H}_2}}}_{\text{Reaktionswasser aus der Oxidation von H}_2} \quad (4-17)$$

Der CO_2 -Strom am Austritt der Gasreinigung lässt sich aus dem CO_2 am Reformerausstritt und dem in der Gasreinigung oxidierten CO berechnen:

$$\dot{m}_{\text{CO}_2,\text{Gasr,aus}} = \dot{m}_{\text{CO}_2,\text{Ref,aus}} + \dot{m}_{\text{CO,Ref,aus}} \frac{\text{MM}_{\text{CO}_2}}{\text{MM}_{\text{CO}}} \quad (4-18)$$

Der Wasserstoffstrom im Reformat kann mit dem Verlustfaktor der Gasreinigung bestimmt werden. Für die elektrochemische Reaktion in der BZ steht dabei nur ein Teil des Wasserstoffs zur Verfügung. Der andere Teil, das sogenannte Offgas, wird im katalytischen Brenner verbrannt. Der Offgasanteil (x_{Offgas}) beträgt bei der hier gewählten Auslegung der Gaserzeugung ca. 23%^A des gesamten Wasserstoffs.

$$\dot{m}_{\text{H}_2,\text{BZ}} = \dot{m}_{\text{H}_2,\text{Ref,aus}} \cdot x_{\text{Gasr}} (1 - x_{\text{Offgas}}) \quad (4-19)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2,\text{KB}} = \dot{m}_{\text{H}_2,\text{Ref}} \cdot x_{\text{Gasr}} x_{\text{Offgas}} \quad (4-20)$$

Die in der Gasreinigung erzeugte Wärme setzt sich aus der Enthalpie der Oxidation von CO zu CO_2 ΔH_R (s. Anhang B, Gleichung B-2) und der Verbrennungsenthalpie des oxidierten Wasserstoffs zusammen.

^A Die Berechnung des Offgasanteils erfolgt bei der Gesamtbetrachtung der Gaserzeugung.

$$\dot{Q}_{\text{Gasr}} = \dot{m}_{\text{CO,Ref,aus}} \frac{\Delta H_R}{MM_{\text{CO}}} - \dot{m}_{\text{H}_2,\text{Ref,aus}} (1 - x_{\text{Gasr}}) H_{u_{\text{H}_2}} \quad (4-21)$$

Die aus der Gasreinigung austretenden Stoffströme werden der Brennstoffzelle auf der Anodenseite zugeführt.

Katalytischer Brenner

Im katalytischen Brenner werden die anoden- und kathodenseitigen Abgase der BZ zusammengeführt und katalytisch verbrannt. Im katalytischen Brenner wird Wärme frei.

Ein Teil der Anodeneintrittsgase der BZ reagiert nicht in der BZ. Diese in den katalytischen Brenner eintretenden Massenströme ($\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH,Ref,aus}}, \dot{m}_{\text{H}_2,\text{KB}}, \dot{m}_{\text{H}_2\text{O,Gasr,aus}}, \dot{m}_{\text{CO}_2,\text{Gasr,aus}}, \dot{m}_{\text{N}_2,\text{Gasr}}$) werden in der Simulation direkt aus der Gaserzeugung übernommen. Aus dem Kathodenabgas ist ein Teil des Wassers im Kühlsystem auskondensiert und entfernt worden. Am Austritt des katalytischen Brenners liegen die Produkte aus der Verbrennung des Methanols und des Wasserstoffs sowie die zugeführten inerten Massenströme vor. Mit den Reaktionsgleichungen der Methanolverbrennung (s. Anhang B, Gleichung B-3) und dem aus dem Anodenabgas der BZ resultierenden Anteil lässt sich der austretende CO_2 -Massenstrom berechnen.

$$\dot{m}_{\text{CO}_2,\text{KB,aus}} = \dot{m}_{\text{CO}_2,\text{Gasr,aus}} + \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH,Ref,aus}} \frac{MM_{\text{CO}_2}}{MM_{\text{CH}_3\text{OH}}} \quad (4-22)$$

Der austretende Massenstrom des Stickstoffs ergibt sich aus der Summe der eintretenden Ströme.

$$\dot{m}_{\text{N}_2,\text{KB,aus}} = \underbrace{\dot{m}_{\text{N}_2,\text{Gasr}} + \dot{m}_{\text{N}_2,\text{Ref}}}_{\text{aus Anodenabgas der BZ}} + \underbrace{\dot{m}_{\text{N}_2,\text{BZ}}}_{\text{aus Kathodenabgas der BZ}} \quad (4-23)$$

Der austretende Massenstrom an Sauerstoff berechnet sich aus der Differenz des Sauerstoffs im Kathodenabgas der BZ und des im katalytischen Brenner für die Oxidation verbrannten Sauerstoffs.

$$\dot{m}_{\text{O}_2,\text{KB,aus}} = \underbrace{\dot{m}_{\text{O}_2,\text{Kond}}}_{\text{aus Kondensator}} - \underbrace{\dot{m}_{\text{H}_2,\text{KB}} \cdot n_{\text{O}_2-\text{H}_2} \frac{MM_{\text{O}_2}}{MM_{\text{H}_2}}}_{\text{Anteil aus der Oxidation von H}_2} - \underbrace{\frac{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH,Gasr,aus}} \cdot n_{\text{O}_2-\text{CH}_3\text{OH}}}{MM_{\text{CH}_3\text{OH}}} MM_{\text{O}_2}}_{\text{Anteil aus der Oxidation von CH}_3\text{OH}} \quad (4-24)$$

$\dot{m}_{\text{O}_2,\text{Kond}}$ = Sauerstoff am Austritt des Kondensators (Kathodenabgas der BZ)

$n_{\text{O}_2-\text{CH}_3\text{OH}}$ = stöchiometrisches Verhältnis O_2 zu CH_3OH aus der Methanolverbrennung

(s. Anhang B, Gleichung B-3)

Der Massenstrom an Wasser setzt sich zusammen aus dem Anodenabgas der BZ, dem Wassermassenstrom am Austritt des Kondensators und dem im katalytischen Brenner durch Wasserstoff- und Methanolverbrennung erzeugten Wassermassenstrom.

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O},\text{KB},\text{aus}} = \left\{ \begin{array}{l} \overbrace{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O},\text{Kond}} - \dot{m}_{\text{H}_2\text{O},\text{Kond},\text{fl}}}^{\text{aus Kondensator}} + \overbrace{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O},\text{Gasr},\text{aus}}}^{\text{aus Anodenabgas}} + \overbrace{\dot{m}_{\text{H}_2,\text{KB}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2} \frac{\text{MM}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{MM}_{\text{H}_2}}}^{\text{aus der Oxidation von H}_2} \\ + \underbrace{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH},\text{Gasr},\text{aus}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_3\text{OH}} \frac{\text{MM}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{MM}_{\text{CH}_3\text{OH}}}}_{\text{aus der Oxidation von CH}_3\text{OH}} \end{array} \right\} \quad (4-25)$$

$n_{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2}$ = stöchiometrisches Verhältnis H_2O zu H_2 aus der Knallgasreaktion (s. Anhang B, Gleichung B-4)

$n_{\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_3\text{OH}}$ = stöchiometrisches Verhältnis H_2O zu CH_3OH aus der Methanolverbrennung (s. Anhang B, Gleichung B-3)

Die im katalytischen Brenner entstehende Wärme wird zur Wärmebilanzierung benötigt. Der Wärmestrom kann aus den Massenströmen des Wasserstoffs und des Methanols mittels deren Heizwerten errechnet werden.

$$\dot{Q}_{\text{KB}} = \dot{m}_{\text{H}_2,\text{KB}} \cdot \text{Hu}_{\text{H}_2} + \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH},\text{Gasr},\text{aus}} \cdot \text{Hu}_{\text{CH}_3\text{OH}} \quad (4-26)$$

Die aus dem katalytischen Brenner austretenden Massenströme werden durch den Expander (sofern vorhanden) in die Umgebung geleitet.

Gesamtbetrachtung der Gaserzeugung

Die Gaserzeugung ist ein endothermer Prozess mit dem Ziel der Wasserstofferzeugung. Endotherme Prozesse bedingen eine Wärmezufuhr. Bei nicht ausreichender Wärmezufuhr fällt die Temperatur im Reformier ab bzw. kann die Verdampfung der zugeführten Stoffströme (Wasser und Methanol) nicht sichergestellt werden. Zur Wasserstofferzeugung ist damit eine ausgeglichene Wärmebilanz in der Gaserzeugung erforderlich.

Die Wärmestrombilanz der Gaserzeugung kann wie folgt aufgestellt werden:

$$\sum \dot{Q} = 0 = \dot{Q}_{\text{Verd}} + \dot{Q}_{\text{Ref}} + \dot{Q}_{\text{Gasr}} + \dot{Q}_{\text{KB}} - \dot{Q}_{\text{Verlust}} \quad (4-27)$$

Der Verlustwärmestrom \dot{Q}_{Verlust} entsteht durch Auskühl- und Übergangsverluste zwischen den einzelnen Komponenten (abgeführte Wärme, negatives Vorzeichen). Nach [21] kann das Verhalten der Gaserzeugung und damit auch das Verhältnis des Verlustwärmestroms über dem dosierten Methanolstrom über den gesamten Betriebsbereich als linear angenommen werden.

$$\dot{q}_{\text{verlust}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Verlust}}}{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH},\text{Verd}}} = \text{const.} \quad (4-28)$$

Auch die übrigen Wärmeströme aus Gleichung 4-27 können auf den dosierten Methanolstrom bezogen werden. Nach Gleichung 4-6 und 4-7 ist der im Verdampfer zugeführte, auf den

dosierten Methanolstrom bezogene Wärmestrom abhängig vom Wasser/Methanol-Stöchiometrieverhältnis und der Reformertemperatur.

$$\frac{\dot{Q}_{\text{Verd}}}{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}}} = f(n_{\text{Ref}}, T_{\text{Ref}}) \quad (4-29)$$

Den dem Reformer zugeführten Wärmestrom, bezogen auf den dosierten Methanolstrom, kann man nach Gleichung 4-13 als Funktion der Umsatzrate im Reformer beschreiben.

$$\frac{\dot{Q}_{\text{Ref}}}{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}}} = f(x_{\text{Ref}}) \quad (4-30)$$

Der in der Gasreinigung entstehende, auf den dosierten Methanolstrom bezogene Wärmestrom ist, wie oben beschrieben, abhängig von der Umsatzrate im Reformer, dem CO-Anteil im Reformat, dem Stöchiometrieverhältnis des dosierten Wassers zu Methanol und dem Verlustfaktor in der Gasreinigung.

$$\frac{\dot{Q}_{\text{Gasr}}}{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}}} = f(x_{\text{Ref}}, x_{\text{CO, Ref}}, n_{\text{Ref}}, x_{\text{Gasr}}) \quad (4-31)$$

Bei dem Wärmestrom aus dem katalytischen Brenner ist zunächst keine direkte Abhängigkeit des Wärmestroms von den Faktoren x_{Ref} , x_{Gasr} und $x_{\text{CO, Ref}}$ zu erkennen. Während x_{Ref} , x_{Gasr} und $x_{\text{CO, Ref}}$ sich aus den verfahrenstechnischen Bedingungen im Reformer und in der Gasreinigung ergeben, erscheint der Offgasanteil x_{Offgas} frei wählbar. Fasst man Gleichung 4-28 bis 4-31 zusammen, setzt diese in Gleichung 4-27 ein und stellt nach dem Offgasanteil x_{Offgas} um, so erhält man:

$$x_{\text{Offgas}} = \left(\frac{\dot{Q}_{\text{Verlust}} - f(n_{\text{Ref}}, T_{\text{Ref}}) - f(x_{\text{Ref}}) - f(x_{\text{Ref}}, x_{\text{CO, Ref}}, n_{\text{Ref}}, x_{\text{Gasr}})}{\frac{\dot{m}_{\text{H}_2, \text{Ref}} \cdot x_{\text{Gasr}} \cdot H_{\text{uH}_2}}{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}}}} - \frac{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH, Gasr}} \cdot H_{\text{uCH}_3\text{OH}}}{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}}} \right) \quad (4-32)$$

Aus obiger Gleichung folgt, dass der für eine ausgeglichene Wärmestrombilanz erforderliche Offgasanteil von den verfahrenstechnischen Bedingungen, den chemischen Stöchiometrien und physikalischen Eigenschaften abhängt.

Für die energetische Gesamtbetrachtung der Gaserzeugung ist das Verhältnis des für die elektrochemische Reaktion in der BZ zur Verfügung stehenden Wasserstoffs zum dosierten Methanol entscheidend. Mit den entsprechenden Heizwerten kann das Verhältnis der chemischen Leistungen aufgestellt werden (Gleichung 3-1). Dieses Verhältnis stellt den Wirkungsgrad der Gaserzeugung in einem stationären Betriebspunkt dar.

$$\eta_{\text{GES}} \equiv \frac{\dot{m}_{\text{H}_2, \text{BZ}} \text{Hu}_{\text{H}_2}}{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}, \text{Verd}} \text{Hu}_{\text{CH}_3\text{OH}}} = \frac{x_{\text{Ref}} x_{\text{Gasr}} (1 - x_{\text{Offgas}}) \frac{\text{MM}_{\text{H}_2}}{\text{MM}_{\text{CH}_3\text{OH}}} \text{Hu}_{\text{H}_2} n_{\text{H}_2 - \text{CH}_3\text{OH}}}{\text{Hu}_{\text{CH}_3\text{OH}}} \quad (4-33)$$

Aus den vorangegangenen Betrachtungen folgt, dass der Wirkungsgrad einer Gaserzeugung von den verfahrenstechnischen Bedingungen, den chemischen Stöchiometrien und den physikalischen Eigenschaften abhängt.

Bedingt durch die Auslegung der Reaktoren (Reformer, Gasreinigung und kat. Brenner) gibt es einen minimalen und einen maximalen Massenstrom an Methanol [11]. Das Verhältnis der beiden wird als Lastspreizung bezeichnet. Aus Untersuchungen von [21] geht hervor, dass eine Lastspreizung (x_{Last}) von 40 in der Gaserzeugung erzielt werden kann.

$$x_{\text{Last}} = \frac{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}, \text{Verd}, \text{min}}}{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}, \text{Verd}, \text{max}}} \quad (4-34)$$

Die für die Auslegung der Gaserzeugung relevanten Faktoren sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Für die Auslegung der Gaserzeugung relevante Stoff- und Wärmeströme sind in Tabelle 4.4 aufgeführt. Zur Charakterisierung des Betriebspunktes wird die elektrische Stromstärke der BZ verwendet^A.

Faktoren zur Auslegung der Gaserzeugung	
Umsatzrate im Reformer (x_{Ref})	0,98
CO-Anteil im Reformat ($x_{\text{CO,Ref}}$)	0,02
Wasser/Methanol-Stöchiometrieverhältnis im Reformer (n_{Ref})	1,50
H ₂ -Verlustfaktor in der Gasreinigung Reformat (x_{Gasr})	0,90
Offgasanteil (x_{Offgas})	0,23
Lastspreizung (x_{Last})	40

Tabelle 4.3: Relevante Faktoren zur Auslegung der Gaserzeugung (Basis BZS)

^A Bei der Auslegung des BZS hat sich in der DaimlerChrysler-Forschung die Stromstärke der BZ als charakteristische Größe etabliert.

Auslegungsdaten Gaserzeugung						
Betriebspunkt/ Stromstärke BZ [A]	6	10	19	41	88	253
$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH,Verd}}$ [g/s]	0,23	0,36	0,69	1,47	3,16	9,07
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,Verd}}$ [g/s]	0,19	0,30	0,58	1,24	2,66	7,65
$\dot{m}_{\text{H}_2,\text{BZ}}$ [g/s]	0,03	0,04	0,09	0,18	0,40	1,14
\dot{Q}_{Verd} [kW]	1,0	1,5	2,9	6,2	13,4	38,6
\dot{Q}_{Ref} [kW]	0,3	0,5	1,1	2,3	4,9	13,9
\dot{Q}_{Gasr} [kW]	-0,6	-0,9	-1,7	-3,6	-7,8	-22,4
\dot{Q}_{KB} [kW]	-1,0	-1,6	-3,1	-6,6	-14,3	-41,0
\dot{Q}_{Verlust} [kW]	-0,3	-0,4	-0,8	-1,8	-3,8	-10,9
η_{GES}	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78

Tabelle 4.4: Stationäre Betriebspunktdata der Gaserzeugung (Basis BZS)

4.2.3 Beschreibung der Brennstoffzelle

Die BZ dient der Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie. Die BZ wird, analog zur Gaserzeugung, als Teilsystem in Abbildung 4.7 dargestellt.

Am Eingang der Brennstoffzelle liegt das aus der Gasreinigung stammende Reformat vor. Für die Modellierung der Brennstoffzelle ist dabei nur der elektrochemisch nutzbare Wasserstoff ($\dot{m}_{\text{H}_2,\text{BZ}}$) relevant. Dieser Wasserstoff kann bei konstanten Stöchiometrien und Betriebsbedingungen einem elektrischen Strom zugeordnet werden. Mittels der Faradaykonstante F [39] und der Anzahl der Zellen kann der elektrische Strom berechnet werden.

$$I_{\text{BZ}} = \frac{zF}{MM_{\text{H}_2} n} \cdot \dot{m}_{\text{H}_2,\text{BZ}} \quad (4-35)$$

I_{BZ} = Stromstärke in der BZ

F = Faradaykonstante (96485 C/mol)

n = Anzahl der Zellen in der BZ

z = Anzahl der bei der elektrochemischen Reaktion übertragenen Elektronen (2)

MM_{H_2} = Molmasse von Wasserstoff (2 g/mol)

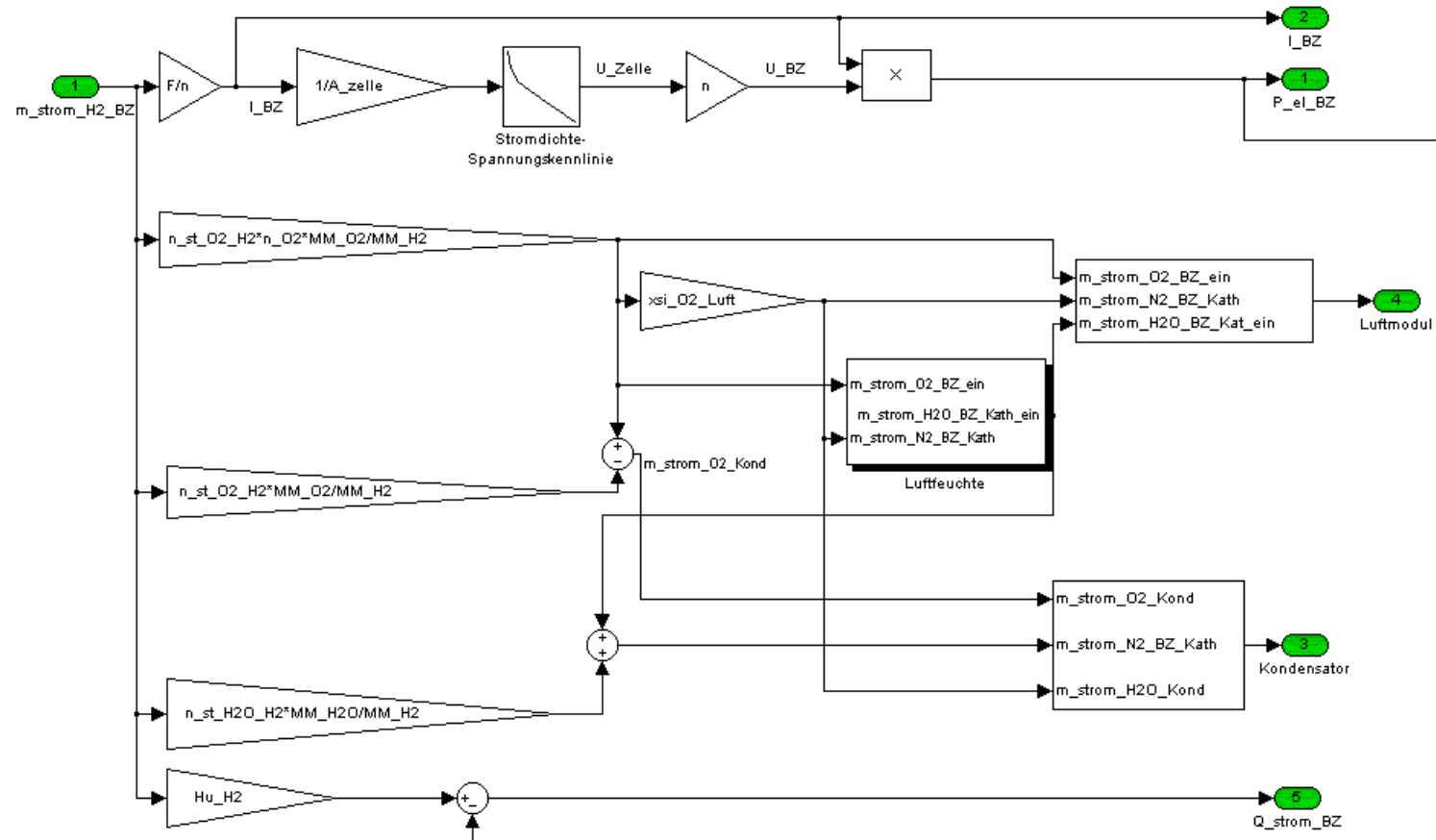


Abbildung 4.7: Simulationsmodell der Brennstoffzelle

Die Spannung in der Brennstoffzelle wird aus der Stromdichte (Strom pro Zellfläche) ermittelt. In dem vorliegenden Simulationsmodell wird von einer Zellfläche (A_{Zelle}) von 300 cm^2 ausgegangen. Für das in dieser Modellbetrachtung vorliegende Reformat und bei den angenommenen Stöchiometrien (23% Wasserstoffüberschuss (x_{Offgas}), 80% Sauerstoffüberschuss (n_{O_2}) und Drücken (s. Beschreibung Kompressor) wird die in Abbildung 3.6 dargestellte Stromdichte/Spannungskennlinie der Brennstoffzelle ermittelt. Zellfläche und Anzahl der Zellen in der Simulation wurden aus einem vermessenen BZS übernommen. Mit der Anzahl der Zellen errechnet sich die Gesamtspannung U_{BZ}^A .

$$U_{\text{BZ}} = n \cdot U_{\text{Zelle}} \quad (4-36)$$

Mit dem Produkt aus Stromstärke und Spannung kann die elektrische Leistung der Brennstoffzelle bestimmt werden.

$$P_{\text{el,BZ}} = U_{\text{BZ}} \cdot I_{\text{BZ}} \quad (4-37)$$

Für die elektrochemische Reaktion ist Luftzufuhr erforderlich. Der auf der Kathodenseite der BZ benötigte Luftmassenstrom aus dem Luftmodul wird aus dem Stöchiometrieverhältnis des umgesetzten Wasserstoffs zu dem entsprechenden Sauerstoff berechnet. Das Stöchiometrieverhältnis wird zusätzlich durch einem Faktor von $n_{\text{O}_2} = 1,8$ [21] bestimmt. Bei dem zugeführten Wassermassenstrom ist zu beachten, dass der Absolutdruck dem Umgebungsdruck (1 bar) entspricht. Die zugeführten Stoffströme auf der Kathodenseite der BZ lassen sich wie folgt berechnen:

$$\dot{m}_{\text{O}_2, \text{BZ}, \text{ein}} = \dot{m}_{\text{H}_2, \text{BZ}} \cdot n_{\text{O}_2-\text{H}_2} \cdot n_{\text{O}_2} \frac{MM_{\text{O}_2}}{MM_{\text{H}_2}} \quad (4-38)$$

$n_{\text{O}_2-\text{H}_2}$ = stöchiometrisches Verhältnis O_2 zu H_2 aus der elektrochemischen Reaktion (s. Anhang B, Gleichung B-5)

Stickstoff und Wasserstoff werden der BZ über Kathode und Anode zugeführt. Auf der Anodenseite werden die Stoffe über die Gasreinigung zugeführt (vgl. Gl. 4-15, $\dot{m}_{\text{N}_2, \text{Gasr}}$ und Gl. 4-17, $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}, \text{Gasr}, \text{aus}}$).

$$\dot{m}_{\text{N}_2, \text{BZ}, \text{Kath}} = \dot{m}_{\text{O}_2, \text{BZ}} \cdot \xi_{\text{O}_2, \text{Luft}} \quad (4-39)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}, \text{BZ}, \text{Kath}, \text{ein}} = (\dot{m}_{\text{N}_2, \text{BZ}} + \dot{m}_{\text{O}_2, \text{BZ}}) \cdot \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^*}{p} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^*}{p}\right)} MM_{\text{H}_2\text{O}} \quad (4-40)$$

$p_{\text{H}_2\text{O}}^*$ = Partialdampfdruck des Wassers = f (rel. Luftfeuchte, Berechnung s. Anhang B, Gleichung B-8)

p = Absolutdruck

^A Bei der vorliegenden BZ sind alle Zellen elektrisch in Reihe geschaltet.

Die Austrittsgase auf der Anodenseite der BZ ($\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH,Gasr,aus}}, \dot{m}_{\text{CO}_2,\text{Gasr,aus}}, \dot{m}_{\text{H}_2\text{O,Gasr,aus}}, \dot{m}_{\text{N}_2,\text{Gasr}}$) entsprechen dem gereinigten Reformat aus der Gasreinigung, mit Ausnahme des Wasserstoffs. Am Austritt auf der Anodenseite der BZ liegt nur noch der Wasserstoffstrom $\dot{m}_{\text{H}_2,\text{KB}}$ vor. Der zu Wasser reagierte Wasserstoff ($\dot{m}_{\text{H}_2,\text{BZ}}$) befindet sich nun auf der Kathodenseite. Nach der BZ entzieht ein Wasserabscheider auf der Anodenseite dem Reformat das flüssige Wasser.

Auf der Kathodenseite der BZ reagiert ein Teil des durch den Kompressor zugeführten Sauerstoffs mit Wasserstoff zu Wasser. Die kathodenseitigen Abgase der BZ werden in den Kondensator geleitet. Die kathodenseitigen Abgase berechnen sich wie folgt:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,Kond}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O,BZ,Kath,ein}} + \dot{m}_{\text{H}_2,\text{BZ}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O-H}_2} \frac{\text{MM}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{MM}_{\text{H}_2}} \quad (4-41)$$

$$\dot{m}_{\text{O}_2,\text{Kond,ein}} = \dot{m}_{\text{O}_2,\text{BZ,ein}} - \dot{m}_{\text{H}_2,\text{BZ}} \cdot n_{\text{O}_2-\text{H}_2} \frac{\text{MM}_{\text{O}_2}}{\text{MM}_{\text{H}_2}} \quad (4-42)$$

Der Stickstoffmassenstrom $\dot{m}_{\text{N}_2,\text{BZ,Kath}}$ aus der Luftzufuhr liegt am kathodenseitigen Austritt der BZ unverändert vor.

Durch die elektrochemische Reaktion in der BZ entsteht neben elektrischer Leistung auch Verlustwärme. Aufgrund der niedrigen Abgastemperatur der BZ (max. ca. 85°C) kann die über das Abgas abgeführte Verlustwärme vernachlässigt werden. Der in der BZ anfallende Verlustwärmestrom wird vollständig in das Kühlwasser eingeleitet.

$$\dot{Q}_{\text{BZ}} = \dot{m}_{\text{H}_2,\text{BZ}} \cdot \text{Hu}_{\text{H}_2} - P_{\text{el,BZ}} \quad (4-43)$$

Die Definition des Wirkungsgrads der BZ erlaubt mehrere verschiedene Bilanzierungen. Unter Betriebsbedingungen bietet sich die Definition des praktischen Wirkungsgrades [40] an, da dort die tatsächlich erzeugte elektrische Leistung auf das theoretisch zur Verfügung stehende Potential (bei Standardbedingungen) bezogen wird.

$$\eta_{\text{BZ}} = \frac{U_{\text{Zelle}}}{\left(U_{0,\text{rev}} - T \left(\frac{dU_{0,\text{rev}}}{dT} \right) \right)} = \frac{U_{\text{Zelle}} I_{\text{BZ}} n}{\dot{m}_{\text{H}_2,\text{BZ}} \text{Hu}_{\text{H}_2}} = \frac{P_{\text{el,BZ}}}{\dot{m}_{\text{H}_2,\text{BZ}} \text{Hu}_{\text{H}_2}} \quad (4-44)$$

U_{Zelle} = Spannung an Elektroden

$U_{0,\text{rev}}$ = elektrochemisches Potential (bei Standardbedingungen)

T = Temperatur

Zu berücksichtigen ist, dass $\dot{m}_{\text{H}_2,\text{BZ}}$ dabei nur den in der BZ verbrauchten Wasserstoffmassenstrom darstellt. Für energetische Betrachtungen der BZ spielt der überschüssige Wasserstoff keine Rolle. Der Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle ist proportional zu der elektrischen Spannung einer Zelle.

$$\eta_{BZ} \sim U_{Zelle} \quad (4-45)$$

Die Zellspannung ist wiederum eine Funktion der Stromdichte (vgl. Abbildung 3.6).

$$U_{Zelle} = f\left(\frac{I_{BZ}}{A_{Zelle}}\right) \quad (4-46)$$

A_{Zelle} = Zellfläche in der BZ

Mit der Forderung nach einem mindest erforderlichen Wirkungsgrad erhält man bei gegebener Zellfläche^A eine minimale Spannung. Gleichzeitig folgt aus der minimalen Spannung eine maximale Stromstärke (vgl. Abbildung 3.6).

$$\eta_{BZ,min} \Rightarrow U_{Zelle,min} \Rightarrow I_{BZ,max} \quad (4-47)$$

Mit der angestrebten elektrischen Leistung der Brennstoffzelle errechnet sich damit die Anzahl der erforderlichen Zellen.

$$n = \frac{P_{el,BZ}}{U_{Zelle} I_{BZ}} \quad (4-48)$$

Die relevanten Auslegungsdaten der verwendeten Brennstoffzelle sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst. Zusätzlich sind in Tabelle 4.6 stationäre Betriebspunktdata der Brennstoffzelle aufgeführt.

Faktoren zur Auslegung der Brennstoffzelle	
Anoden-Stöchiometrie (n_{H_2})	1,23
Kathoden-Stöchiometrie (n_{O_2})	1,8
Zellfläche [cm²]	300
Anzahl der Zellen n	440

Tabelle 4.5: Auslegungsdaten der Brennstoffzelle (Basis-BZS)

^A Die Zellfläche ergibt sich aus den Eckdaten der BZ-Auslegung (Zellenzahl, maximale Stromdichte, minimale Spannung, maximale elektrische Leistung). In der Betrachtung des Basis-BZS wird eine durch [21] als günstig ermittelte Zellfläche verwendet.

Auslegungsdaten Brennstoffzelle						
Betriebspunkt/ Stromstärke BZ [A]	6	10	19	41	88	253
U_{BZ} [V]	421	401	387	363	340	282
$P_{el,BZ}$ [kW]	2,7	4,0	7,5	14,9	30,0	71,2
\dot{Q}_{BZ} [kW]	0,8	1,4	3,0	7,3	17,7	67,0
η_{BZ}	0,78	0,74	0,72	0,67	0,63	0,52

Tabelle 4.6: Stationäre Betriebspunktdata der Brennstoffzelle (Basis-BZS)

4.2.4 Beschreibung der Nebenaggregate

Die Nebenaggregate stellen neben Gaserzeugung und BZ das dritte Subsystem innerhalb des Brennstoffzellensystems dar. Mit dem Begriff Nebenaggregate werden alle elektrischen Verbraucher und Systeme bezeichnet, die zum Betrieb des BZS erforderlich sind. Die Leistungsaufnahme der Nebenaggregate setzt sich aus der Leistungsaufnahme des Luftmoduls $P_{el,Komp}$, des 12 V-Bordnetzes $P_{el,BN}$ und der Kühlaggregate (Lüfter und Wasserpumpe) $P_{el,KS}$ zusammen.

$$P_{el,NA} = P_{el,Komp} + P_{el,BN} + P_{el,KS} \quad (4-49)$$

Die Modellierung der Nebenaggregate ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

Das Bordnetz wird in der Basisvariante nicht separat beschrieben, sondern als konstante Leistungsaufnahme mit 400 W abgebildet.

Luftmodul

Das Luftmodul (neben einem Kompressor ist auch ein Expander vorhanden) ist der größte elektrische Verbraucher des BZS. Das Simulationsmodell des Luftmoduls ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Die Aufnahmeleistung soll in Abhängigkeit des zu fördernden Luftmassenstroms abgebildet werden. Der Luftmassenstrom am Eintritt des Kompressors setzt sich wie folgt zusammen:

$$\dot{m}_{Komp} = \dot{m}_{O_2,Gasr,ein} + \dot{m}_{O_2,BZ,ein} + \dot{m}_{N_2,Gasr,ein} + \dot{m}_{N_2,BZ,ein} + \dot{m}_{H_2O,Gasr,ein} + \dot{m}_{H_2O,BZ,ein} \quad (4-50)$$

Mit dem Druckverlauf der spezifischen Gaskonstante ($R_{Luft,Verd}$) und der Eintrittstemperatur (T_{Umg}) kann die isotherme Verdichterleistung berechnet werden. Der Druckverlauf eines untersuchten Verdichters wird als Funktion des Massenstroms abgebildet (s. Anhang C, Abbildung C.2). Die spezifische Gaskonstante wird aus den Massenströmen berechnet.

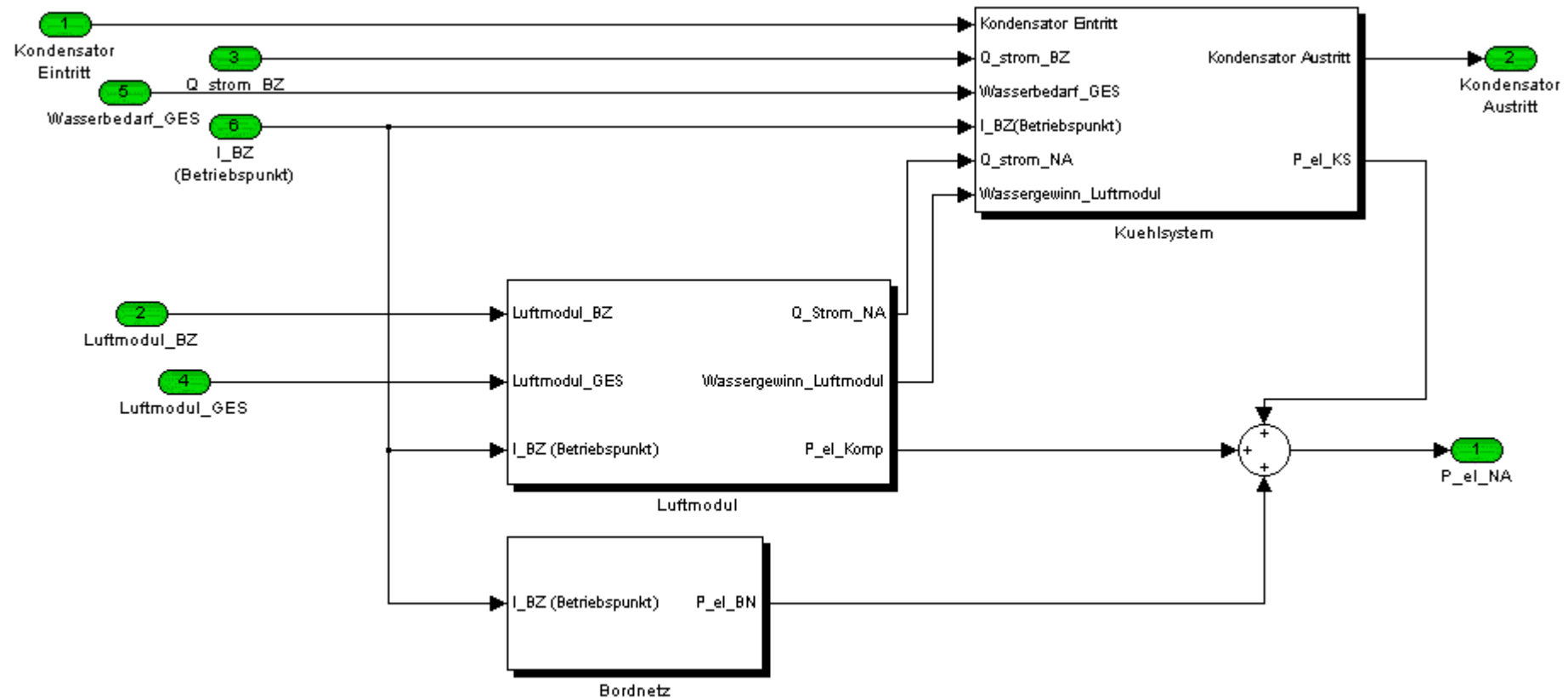


Abbildung 4.8: Simulationsmodell der Nebenaggregate

$$\psi_{\text{Verd}} = f(\dot{m}_{\text{Komp}}) \quad (4-51)$$

$$R_{\text{Luft,Verd}} = \left(\frac{\frac{\dot{m}_{\text{O}_2,\text{Gasr,ein}} + \dot{m}_{\text{O}_2,\text{BZ,ein}}}{MM_{\text{O}_2}} + \frac{\dot{m}_{\text{N}_2,\text{Gasr}} + \dot{m}_{\text{N}_2,\text{BZ,ein}}}{MM_{\text{N}_2}} + \frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,Gasr,Luft,ein}} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O,BZ,Kath,ein}}}{MM_{\text{H}_2\text{O}}}}{\dot{m}_{\text{Komp}}} \right) \cdot R \quad (4-52)$$

$$P_{\text{is,Verd}} = \dot{m}_{\text{Komp}} \cdot R_{\text{Luft,Verd}} T_{\text{Umg}} \ln(\psi_{\text{Verd}}) \quad (4-53)$$

Der isotherme Wirkungsgrad ist in Abbildung 3.7 als Funktion des Massenstroms dargestellt. Mittels eines typischen mechanischen Wirkungsgrades von 0,9 [41] wird die mechanische Verdichterleistung berechnet:

$$P_{\text{mech,Verd}} = \frac{P_{\text{is,Verd}}}{\eta_{\text{is,Verd}} \eta_{\text{mech}}} \quad (4-54)$$

Die Berechnung des Massenstromes durch den Expander erfolgt mit den Massenströmen aus dem katalytischen Brenner.

$$\dot{m}_{\text{Exp}} = \dot{m}_{\text{O}_2,\text{KB,aus}} + \dot{m}_{\text{N}_2,\text{KB,aus}} + \dot{m}_{\text{CO}_2,\text{KB,aus}} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O,KB,aus}} \quad (4-55)$$

Analog zum Verdichter wird mit ψ_{Exp} (s. Anhang C, Abbildung C.2), der Austrittstemperatur aus dem katalytischen Brenner ($T_{\text{KB}} = 300^\circ \text{C}$) und einer Gaskonstanten eine isotherme Expanderleistung bestimmt. Der Betriebspunkt eines BZS wird, wie in vorangegangenen Tabellen (z. B. Tabelle 4.6), in Abhängigkeit des Stroms I_{BZ} angegeben.

$$\psi_{\text{Exp}} = f(\dot{m}_{\text{Exp}}) \quad (4-56)$$

$$R_{\text{Abgas}} = \left(\frac{\frac{\dot{m}_{\text{O}_2,\text{KB,aus}}}{MM_{\text{O}_2}} + \frac{\dot{m}_{\text{N}_2,\text{KB,aus}}}{MM_{\text{N}_2}} + \frac{\dot{m}_{\text{CO}_2,\text{KB,aus}}}{MM_{\text{H}_2\text{O}}} + \frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,KB,aus}}}{MM_{\text{H}_2\text{O}}}}{\dot{m}_{\text{Komp}}} \right) \cdot R \quad (4-57)$$

$$P_{\text{is,Exp}} = \dot{m} \cdot R_{\text{Abgas}} T_{\text{KB}} \ln(\psi_{\text{Exp}}) \quad (4-58)$$

Bei der Berechnung der mechanischen Expanderleistung wird die Verdampfungsenthalpie des kondensierten Wassers vereinfacht mit einem aus Messdaten ermittelten isothermen Wirkungsgrad $\eta_{\text{is,Exp}}$ (vgl. Abbildung 3.7) berücksichtigt^A. In Verbindung mit einem mechanischen Wirkungsgrad von 0,9 ergibt sich die mechanische Expanderleistung.

^A Nach [21] kann die spezifische Arbeit bei quasistationärer Expansion unter Berücksichtigung der Verdampfungsenthalpie des Wassers ca. 15% größer ausfallen. Bei einem realen Prozess (nicht quasistationär) ist die spezifische Arbeit geringer.

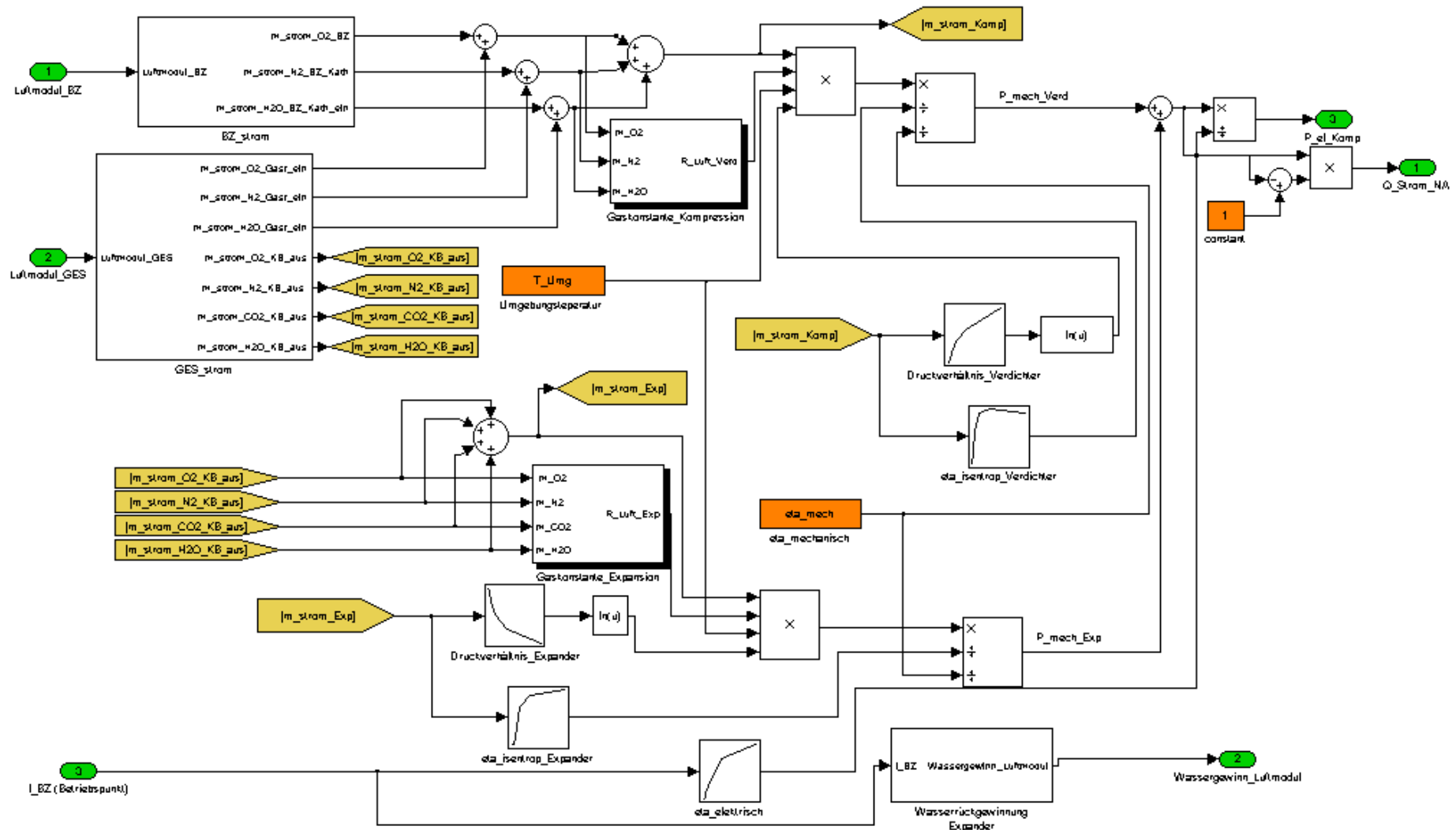


Abbildung 4.9: Simulationsmodell des Luftmoduls

$$P_{\text{mech,Exp}} = \frac{\dot{m}_{\text{Exp}} \cdot R_{\text{Abgas}} \cdot T_{\text{Abgas}} \cdot \ln(\psi_{\text{Exp}})}{\eta_{\text{is,Exp}} \eta_{\text{mech}}} \quad (4-59)$$

Verdichter und Expander sitzen auf einer Welle und werden von einem Elektromotor angetrieben. Mit den beiden mechanischen Leistungen wird die mechanische Leistung zum Antrieb der Welle bestimmt.

$$P_{\text{mech,Welle}} = P_{\text{mech,Verd}} + P_{\text{mech,Exp}} \quad (4-60)$$

Anders als bei einem Fahrtrieb wird der elektrische Antrieb des Luftmoduls auf einer Kennlinie betrieben. Der Wirkungsgrad der elektrischen Maschine wird aus der Kennlinie eines vermessenen Antriebs bestimmt. Die Kennlinie des elektrischen Luftmodulantriebs (s. Anhang C, Abbildung C.1) liefert den elektrischen Wirkungsgrad in Abhängigkeit des maximalen Massenstromes der durch den Kompressor geförderten Luft. Aufgrund der Proportionalität des geförderten Luftmassenstromes zum elektrischen Strom (vgl. 4.2.3), kann die elektrische Aufnahmeleistung in Abhängigkeit zum elektrischen Strom bzw. BZS-Betriebspunkt angegeben werden.

$$\eta_{\text{el}} = f(\dot{m}_{\text{Komp}}) \quad (4-61)$$

$$P_{\text{el,Komp}} = P_{\text{mech,Welle}} \frac{1}{\eta_{\text{el}}} \quad (4-62)$$

$$P_{\text{el,Komp}} = f(I_{\text{BZ}}) \quad (4-63)$$

Aus dem Wirkungsgrad und der elektrischen Aufnahmeleistung wird der Abwärmestrom des Luftmoduls berechnet. Da das Luftmodul den einzigen wassergekühlten Antrieb in der Gruppe der Nebenaggregate hat, wird der Abwärmestrom des Luftmoduls als Abwärmestrom der Nebenaggregate bezeichnet.

$$\dot{Q}_{\text{NA}} = P_{\text{el,Komp}} (1 - \eta_{\text{el}}) \quad (4-64)$$

Neben der elektrischen Aufnahmeleistung und der Abwärme wird im Luftmodul ein für die Wasserbilanzierung des BZS relevanter Kondensatmassenstrom am Austritt des Expanders berechnet (Subsystem „Wasserrückgewinnung Expander“, detaillierte Abbildung im Anhang E, Abbildung E.3). Der Druck am Austritt entspricht dem Umgebungsdruck, die Temperatur der Abgastemperatur. Mit dem minimalen Wert aus Sättigungsdruck und Partialdruck (Berechnung s. Anhang B, Gleichung B-8 und Gleichung B-9) wird der gasförmige Anteil des Wassers am trockenen Gesamtstoffstrom ($n_{\text{H}_2\text{O}} / n_{\text{ges}}$) berechnet. Der (molare) Anteil des Wassers dient zur Bestimmung des in flüssiger Form vorliegenden Wasserstroms (Kondensat).

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,Exp,aus,fl}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O,KB,aus}} - \left(1 - \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{ges}}} \frac{1}{1 - \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{ges}}}} \text{MM}_{\text{H}_2\text{O}} \right) \cdot \dot{m}_{\text{H}_2\text{O,KB,aus}} \quad (4-65)$$

Der Kondensatwasserstrom am Austritt des Expanders wird dem Wasserausgleichsbehälter zugeführt. Dieser Wasserstrom trägt dazu bei, dass der Zustand einer ausgeglichenen Wasserbilanz im BZS erreicht wird. Im Normalfall wird auf diesen Wasserstrom verzichtet, da er mehr Verunreinigungen enthalten kann als der Kondensatstrom aus dem kathodischen Abgaskondensat der BZ (vgl. Beschreibung Kondensator). Bei außergewöhnlichen Betriebsbedingungen^A, in denen der Kondensator keinen ausreichenden Wasserstrom zur Verfügung stellen kann, wird der Kondensatstrom am Austritt des Expanders zur Wasserrückgewinnung verwendet. Einige Auslegungsdaten des Luftmoduls sind in Tabelle 4.7 dargestellt.

Auslegungsdaten Luftmodul						
Betriebspunkt/ Stromstärke BZ [A]	6	10	19	41	88	253
$\dot{m}_{\text{Komp}} [\text{g/s}]$	1,94	2,97	5,91	12,54	26,97	77,42
$\dot{m}_{\text{Exp}} [\text{g/s}]$	2,18	3,44	6,67	14,13	30,39	87,23
$P_{\text{el,Komp}} [\text{KW}]$	0,91	1,04	1,37	1,90	3,69	12,65
$\eta_{\text{is, Verd}}$	0,15	0,20	0,36	0,50	0,54	0,53
Ψ_{Verd}	1,47	1,52	1,65	1,89	2,29	3,01
$T_{\text{Abgas}} [^{\circ}\text{C}]$	50	52	57	60	60	60

Tabelle 4.7: Stationäre Betriebspunktdata des Luftmoduls (Basis-BZS)

Kühlsystem

Für Auslegungsberechnungen des Brennstoffzellensystems ist eine Modellierung des Kühlsystems wichtig, um die Wasserrückgewinnung zu überprüfen. Bei Verbrauchsberechnungen kann die elektrische Aufnahmeenergie von Kühlerlüfter und Wasserpumpe (zusammen maximal ca 4,3 kW) einen Einfluss auf den Energieverbrauch des Fahrzeugs haben. Da die Kühlaggregate in Abhängigkeit von der Kühlwassertemperatur und der Wasserbilanz und unabhängig von der BZS-Leistung angesteuert werden, ist sowohl für Auslegungs- als auch für Verbrauchsberechnungen eine Modellierung des Kühlsystems erforderlich.

Das modellierte Kühlsystem ist in Abbildung 4.11 und in Abbildung 4.12 dargestellt. Die Darstellung entspricht dem in Abbildung 3.9 gezeigten Prinzipbild des Kühlsystems. Auf die Funktion des Kühlsystems wird in Abschnitt 3.2.3 eingegangen. Die Einbausituation der Kühler im Fahrzeug ist in Anhang C, Abbildung C.7 dargestellt.

^A Eine heiße und trockene Umgebung, geringe Fahrgeschwindigkeit und Bergfahrt können das Kühlsystem z.B. so stark belasten, dass keine ausreichende Wasserrückgewinnung über den Kondensator möglich ist.

Regelung des Kühlsystems

Ziel der Regelung des Kühlsystems ist es, einen ausreichenden Wasservorrat im Ausgleichsbehälter sicherzustellen und gleichzeitig die Temperatur in der BZ nicht über den zulässigen Maximalwert (85°C) hinaus ansteigen zu lassen. Eingangsgrößen der Regelung sind die Kühlwasseraustrittstemperatur (Ist-Temperatur) aus der Brennstoffzelle als Indikator für die Bauteiltemperatur der BZ und der Wasservorrat im Ausgleichsbehälter (Ist-Wasservorrat). Stellgrößen sind die Wasserpumpen- und Lüfterdrehzahl (x_{Wapu} , $x_{\text{Lüfter}}$) sowie die Stellungen des Thermostatventils (x_{Th}) und des Kondensators und Zusatzkühler-Bypass-Ventils (x_{KB}). Beide Ventile sind als Proportionalventile ausgeführt.

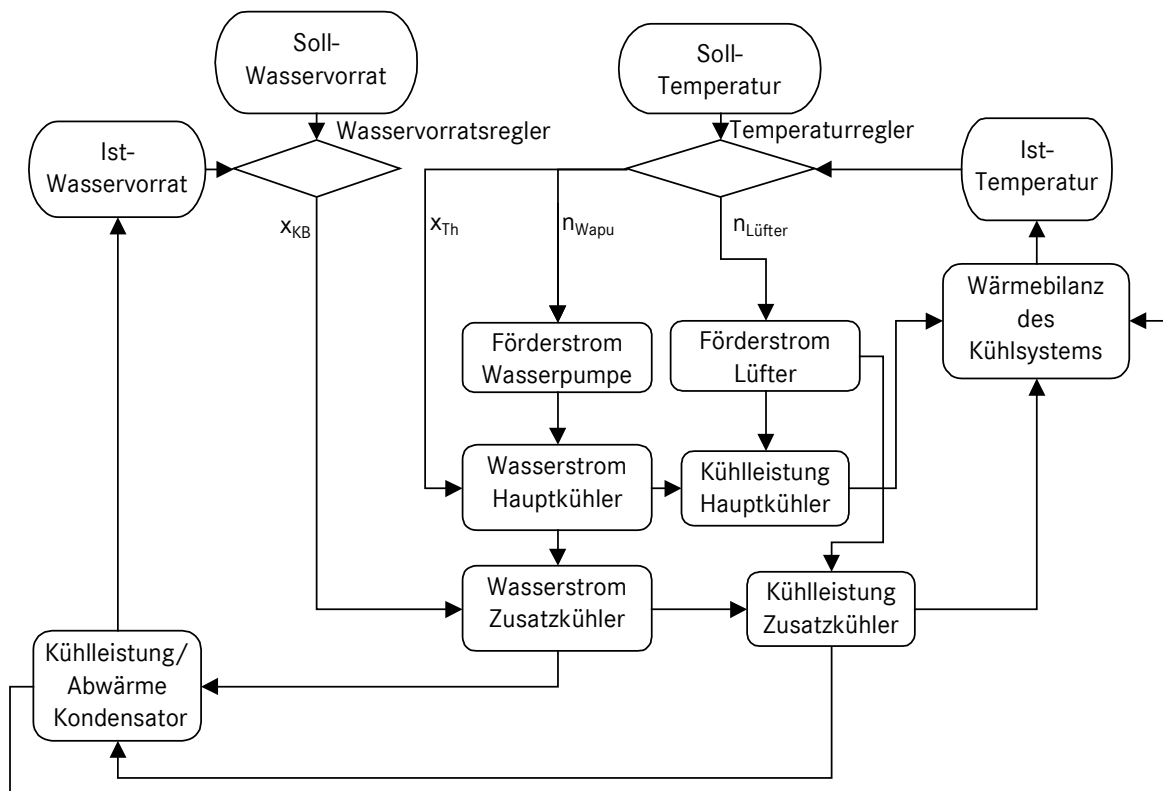


Abbildung 4.10: Regelung des Kühlsystems

Modellierung des Kühlsystems

Das Ziel der nachfolgenden Berechnungen ist es, die Kühlwassertemperatur am Ausgang der BZ in Abhängigkeit zu den Eingangsgrößen in das Kühlsystem zu beschreiben. Das zentrale Element des modellierten Kühlsystems ist die Wärmebilanz. Hier werden die zu- und abgeführten Wärmeströme addiert. Die Wärmebilanz des Kühlsystems wird wie folgt formuliert:

$$\dot{Q}_{\text{Res}} = \dot{Q}_{\text{BZ}} + \dot{Q}_{\text{Kond}} + \dot{Q}_{\text{NA}} + \dot{Q}_{\text{EA}} - \dot{Q}_{\text{HK}} - \dot{Q}_{\text{CK}} \quad (4-66)$$

\dot{Q}_{Res} entspricht dem resultierenden Wärmestrom der Wärmebilanz und führt zur Aufheizung bzw. Abkühlung des Kühlsystems. Die zugeführten Wärmeströme aus der Brennstoffzelle

(\dot{Q}_{BZ}), dem Kondensator (\dot{Q}_{Kond}) und dem elektrischen Fährantrieb (\dot{Q}_{EA}) werden in den jeweiligen Subsystemen berechnet. Der von den Nebenaggregaten erzeugte Wärmestrom (\dot{Q}_{NA}) entspricht der Verlustwärme des Kompressorantriebs und wird als Funktion der Stromstärke der BZ (Betriebspunkt des BZS) abgebildet.

$$\dot{Q}_{\text{NA}} = f(I_{\text{BZ}}) \quad (4-67)$$

Der im Fahrzeugkühler abgeführte Wärmestrom (\dot{Q}_{HK}) berechnet sich mit der Temperaturdifferenz zur Umgebung und bauteilspezifischen Größen.

$$\dot{Q}_{\text{HK}} = k_{\text{HK}} A_{\text{HK}} (T_{\text{KW}} - T_{\text{Umg}}) \quad (4-68)$$

A_{HK} = Übertragungsfläche Hauptkühler (Fahrzeugkühler)

k_{HK} = Wärmedurchgangskoeffizient, hängt von zahlreichen Größen ab [42]

T_{KW} = Kühlwassertemperatur am Fahrzeugkühlereingang/Thermostatventil (entspricht T_{Th})

T_{Umg} = Lufttemperatur am Fahrzeugkühlereingang

Der Wärmedurchgangskoeffizient k_{HK} wird durch ein Kennfeld in Abhängigkeit von Kühlwasserstrom ($\dot{m}_{\text{KW,HK}}$) und Luftmassenstrom ($\dot{m}_{\text{Luft,HK}}$) durch den Fahrzeugkühler abgebildet (s. Anhang C, Abbildung C.6). Der Luftmassenstrom ($\dot{m}_{\text{Luft,HK}}$) wird mittels eines Staudruckmodells nach [43] aus der Fahrgeschwindigkeit und der Lüfterdrehzahl bestimmt (s. Anhang C, Abbildung C.5).

$$\dot{m}_{\text{Luft,HK}} = \rho v_{\text{HK}} A_{\text{HK}} \quad (4-69)$$

v_{HK} = Strömungsgeschwindigkeit der Luft durch Hauptkühler

Die Strömungsgeschwindigkeit ist abhängig von Strömungsverhältnissen, Temperaturen und ganz entscheidend von Fahrzeuggeschwindigkeit und Lüfterdrehzahl. Die Druckverluste und Druckzugewinne (durch Lüfter und Staudruck) werden addiert und können in einer Gleichung zusammengefasst werden.

Die Berechnung kann nach [43] formuliert werden zu:

$$v_{\text{HK}} = \frac{\sqrt{v_0^2 F + \frac{T_{\text{Umg}}}{T_{\text{HK}}} \Delta p_{\text{L}}}}{\sqrt{\zeta_{\text{G}} + \zeta_{\text{HK}} + \frac{T_{\text{HK}}}{T_{\text{Umg}}} (\zeta_{\text{M}} + \zeta_{\text{a}})}} \quad (4-70)$$

v_0 = Anströmgeschwindigkeit an Fzg.-Front (gleich Fahrzeuggeschwindigkeit)

F = Staudrucknutzungsfaktor

T_{Umg} = Umgebungstemperatur

T_{HK} = Austrittstemperatur aus Hauptkühler

Δp_{L} = Druckgefälle/-anstieg über Kühlerlüfter ($f(n_{\text{Lüfter}}, v_{\text{K}})$)

$\zeta_{\text{G}}, \zeta_{\text{HK}}, \zeta_{\text{M}}$ = Verlustglieder (Grill, Kühler, Motorraum)

Der Kühlwassermassenstrom durch den Hauptkühler ($\dot{m}_{KW, HK}$) wird aus dem Förderstrom der Wasserpumpe und die Stellung des (Proportional-) Thermostatventils (x_{Th} , Abbildung 3.9 und Abbildung 4.11) bestimmt. Der Förderstrom der Wasserpumpe ist als Kennlinie in Abhängigkeit zur Pumpendrehzahl abgebildet (s. Anhang C, Abbildung C.4).

$$\dot{m}_{KW} = f(n_{WAPU}) \quad (4-71)$$

$$\dot{m}_{KW, HK} = x_{Th} \cdot \dot{m}_{KW} \quad (4-72)$$

Neben dem Hauptkühler ist ein zweiter Kühler („Crashbox-Kühler“) in Abbildung 3.9 und Abbildung 4.11 abgebildet. Analog zu dem Wärmestrom des Fahrzeugkühlers wird der Wärmestrom des Zusatzkühlers bestimmt.

$$\dot{Q}_{CK} = k_{CK} A_{CK} (T_{HK} - T_{Umg}) \quad (4-73)$$

A_{CK} = Übertragungsfläche Zusatzkühler („Crashbox-Kühler“)

k_{CK} = Wärmedurchgangskoeffizient, hängt von zahlreichen Größen ab [42]

T_{HK} = Kühlwassertemperatur am Zusatzkühlereingang/Hauptkühlerausgang

T_{Umg} = Lufttemperatur am Zusatzkühlereingang

Aus dem resultierenden Wärmestrom der Wärmebilanz (\dot{Q}_{Res}) in Gleichung 4-66 wird die Temperatur am Thermostatventil^A bestimmt. Dabei wird auch die zu Betriebsbeginn im System (Kühlsystem inkl. Brennstoffzelle) vorhandene Wärme ($\dot{Q}_{Start, KW}$) berücksichtigt.

$$T_{Th} = \frac{\int \dot{Q}_{Res} dt + Q_{Start, KW}}{c_{p, KW} m_{KW} + c_{p, Sys} m_{Sys, eff}} + T_{Umg} \quad (4-74)$$

T_{Th} = Kühlwassertemperatur am Thermostatventil

$c_{p, KW}$ = spez. Wärmekapazität des Kühlwassers

m_{KW} = Masse des Kühlwassers im Kühlsystem

$c_{p, Sys, eff}$ = Wärmekapazität des trockenen Kühlsystems inkl. (BZ, Kondensator)

Mit der Temperatur am Thermostatventil kann die zu regelnde Kühlwassertemperatur am Ausgang der Brennstoffzelle bestimmt werden. Dazu wird zunächst die Kühlwassertemperatur am Eintritt der Brennstoffzelle bzw. an der Kühlwasserpumpe (Abbildung 4.12, Blockname: Mischtemp_WAPU) berechnet.

$$T_{BZ, Ein} = \frac{\dot{m}_{KW, bp} \cdot T_{Th} + \dot{m}_{KW, Kond, bp} \cdot T_{HK} + \dot{m}_{KW, Kond} \cdot T_{Kond}}{\dot{m}_{KW}} \quad (4-75)$$

T_{Kond} = Kühlwassertemperatur am Ausgang Kondensator

$\dot{m}_{KW, bp}$ = Bypass-Massenstrom des Hauptkühlers, des Zusatzkühlers und des Kondensators

$\dot{m}_{KW, Kond, bp}$ = Bypass-Massenstrom des Kondensator und des Zusatzkühlers

$\dot{m}_{KW, Kond}$ = Massenstrom des Kühlwassers durch Kondensator und Zusatzkühler

^A Die Temperatur kann an einer beliebigen Stelle bestimmt werden. Das Thermostatventil ist besonders geeignet, da es an zentraler Stelle im Kühlkreislauf angeordnet ist.

Die einzelnen Kühlwasserströme können durch die Ventilstellungen und die Drehzahl der Wasserpumpe verändert werden. Der von der Wasserpumpe umgewälzte Wasserstrom wird als \dot{m}_{KW} bezeichnet. Der durch den Kondensator geleitete Strom und der vorbeigeleitete Strom ergeben sich mit der Stellung des Thermostatventils (x_{Th}) und der Stellung des Kondensator-Bypassventils (x_{KB}).

$$\dot{m}_{KW,bp} = (1 - x_{Th}) \dot{m}_{KW} \quad (4-76)$$

$$\dot{m}_{KW,Kond} = (1 - x_{KB}) x_{Th} \dot{m}_{KW} \quad (4-77)$$

$$\dot{m}_{KW,Kond,bp} = x_{KB} x_{Th} \dot{m}_{KW} \quad (4-78)$$

Die Kühlwasser-Austrittstemperatur am Fahrzeugkühler (T_{HK}) kann mit dem übertragenen Wärmestrom und dem Kühlwasserstrom berechnet werden.

$$T_{HK} = T_{Th} - \frac{\dot{Q}_{HK}}{c_{p,KW} x_{Th} \dot{m}_{KW}} \quad (4-79)$$

Die Kühlwasser-Austrittstemperatur am Kondensator ergibt sich unter Berücksichtigung der im Zusatzkühler abgeführten und im Kondensator zugeführten Wärme.

$$T_{Kond} = T_{HK} - \frac{\dot{Q}_{CK} + \dot{Q}_{Kond}}{c_{p,KW} x_{KB} x_{Th} \dot{m}_{KW}} \quad (4-80)$$

Das Ziel der obigen Berechnungen, die Kühlwassertemperatur am Ausgang der BZ zu ermitteln, hängt nun nur noch von der der BZ zugeführten Wärme ab. Damit kann eine der beiden Regelungsgrößen des Kühlsystems ($T_{BZ,Aus}$) bestimmt werden.

$$T_{BZ,Aus} = T_{BZ,Ein} + \frac{\dot{Q}_{BZ}}{c_{p,KW} \dot{m}_{KW}} \quad (4-81)$$

Die elektrische Leistungsaufnahme des Kühlsystems setzt sich zusammen aus der Druck- und drehzahlabhängigen Leistungsaufnahme des Fahrzeuglüfters und der drehzahlabhängigen Leistungsaufnahme der Wasserpumpe (Kennfelder s. Anhang).

$$P_{el,KS} = P_{el,Wapu} + P_{el,Lüfter} \quad (4-82)$$

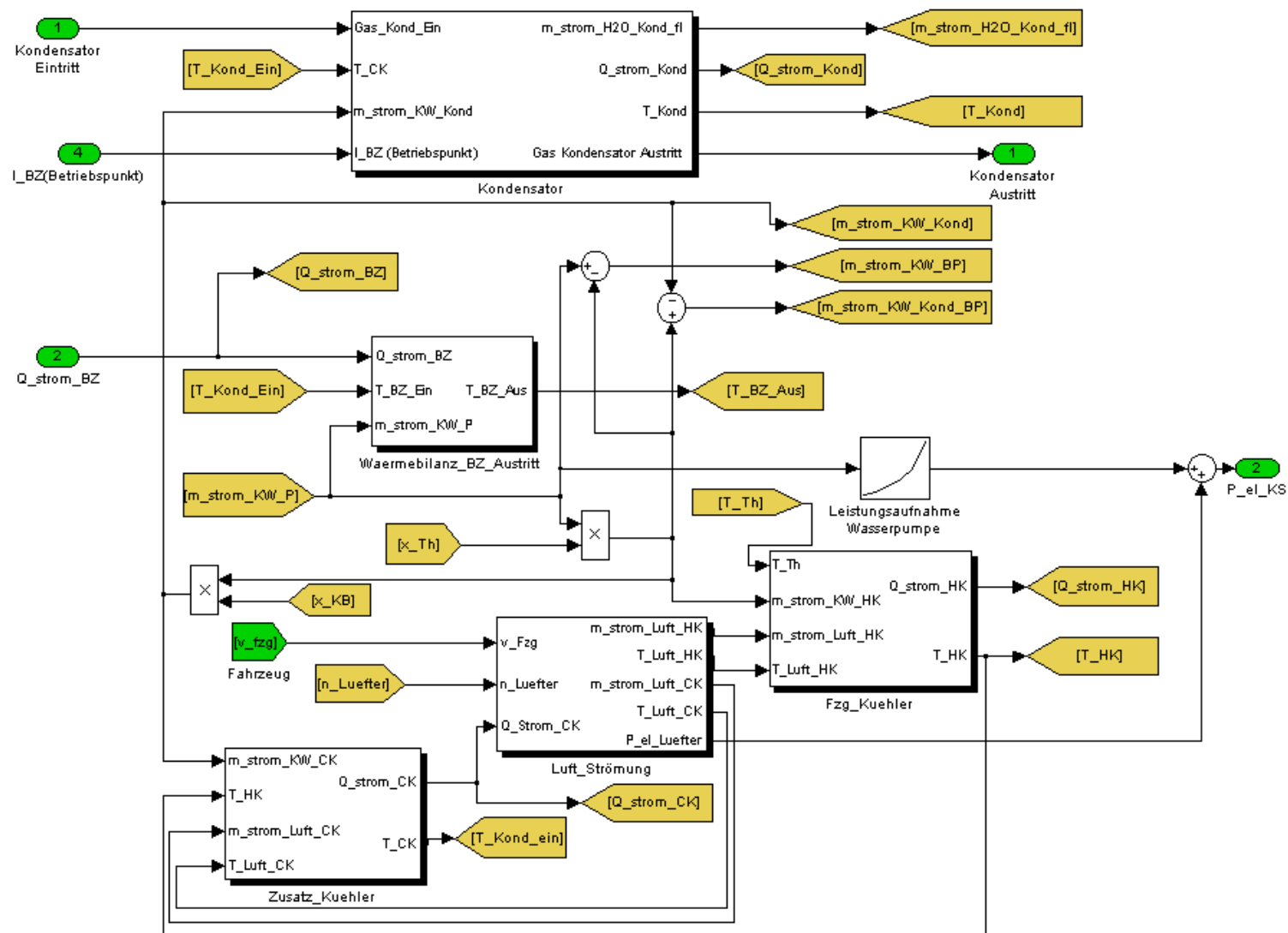


Abbildung 4.11: Simulationsmodell des Kühlsystems (Teil 1)

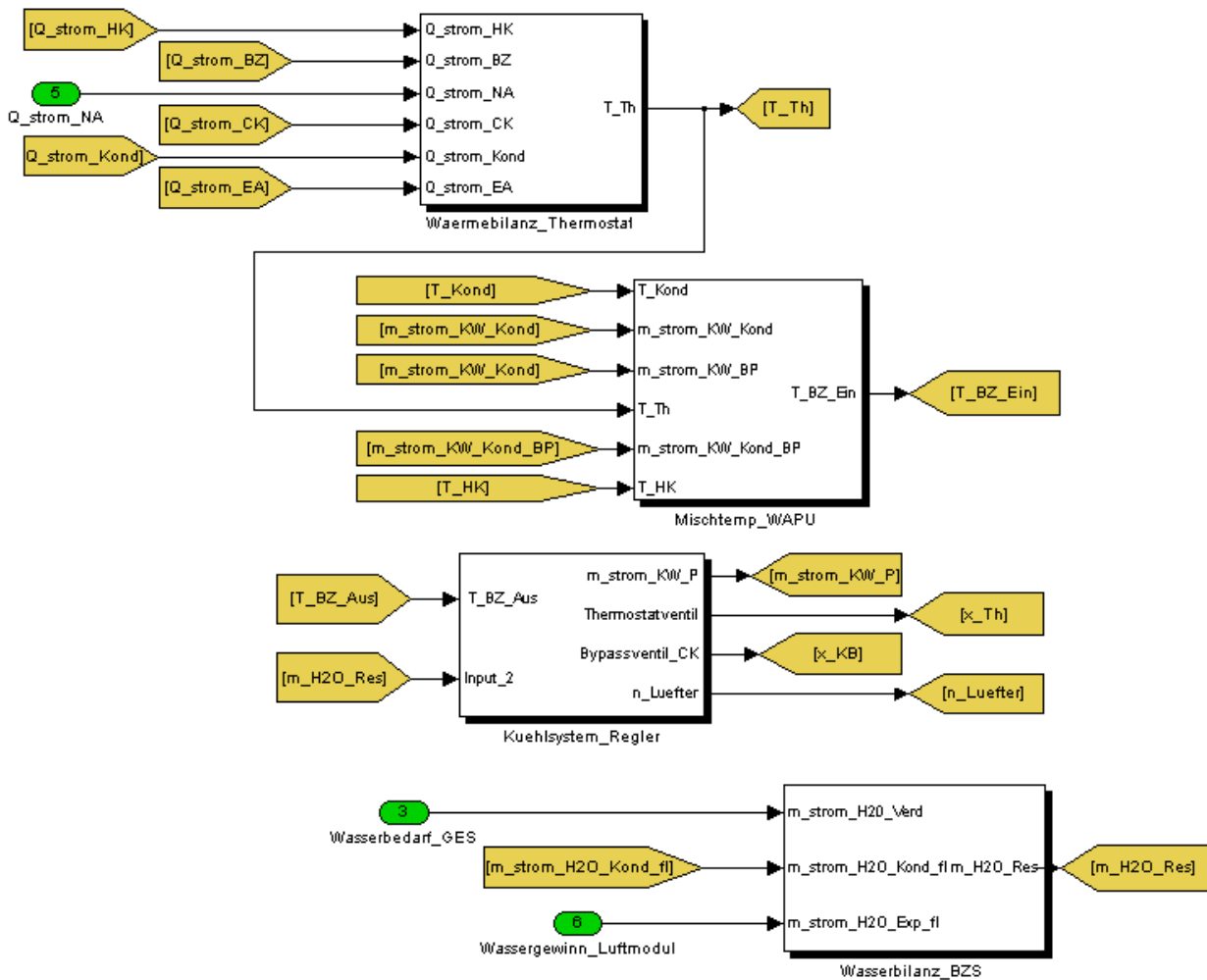


Abbildung 4.12: Simulationsmodell des Kühlsystems (Teil 2)

Einige auslegungsrelevante Daten des Kühlsystems sind in Tabelle 4.8 zusammengefasst. Bei den dargestellten stationären Betriebspunkten wird von einer ausgeglichenen Wasserbilanz (d.h. die momentane Wasserrückgewinnung entspricht dem momentanen Wasserverbrauch) ausgegangen. Die Wasserrückgewinnung erfolgt ausschließlich durch den Kondensator. Als BZS wird das Basis-BZS in Verbindung mit dem Basis-Fahrzeug angenommen. Die Auslegung des Kühlsystems erfolgt dabei so, dass bei einer Umgebungstemperatur von 20°C die volle Höchstgeschwindigkeit (160 km/h) in der Ebene mit ausreichender Wasserrückgewinnung stattfinden kann. Bei einer Umgebungstemperatur von 35°C kann vollständige Wasserrückgewinnung nur unter Zuhilfenahme des Kondensatstroms am Austritt des Expanders (siehe Beschreibung Luftmodul) realisiert werden. Der Verzicht auf den Kondensatstrom des Expanders erfordert eine reduzierte BZ-Leistung, die sich in einer reduzierten Höchstgeschwindigkeit auswirkt (155 statt 160 km/h). Bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h spielt die Außentemperatur eine vernachlässigbare Rolle. Die elektrische Leistungsaufnahme des Kühlsystems ist hier mit $0,2\text{ kW}$ gering.

	$T_{\text{Umg}}=20^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{Umg}}=20^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{Umg}}=35^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{Umg}}=35^{\circ}\text{C}$
$I_{\text{BZ}}[\text{A}]$	21	263	21	229
$V_{\text{Fzg}}[\text{km/h}]$	60	160,0	60	155
$P_{\text{el,KS}}[\text{kW}]$	0,2	4,2	0,2	4,2
zugeführte Wärmeströme [kW]	6,1	93	6,1	79,9
$\dot{Q}_{\text{BZ}}[\text{kW}]$	3	65,0	3	55
$\dot{Q}_{\text{Kond}}[\text{kW}]$	0,9	17,6	0,9	15,5
$\dot{Q}_{\text{EA}}[\text{kW}]$	1,61	8,8	1,61	7,8
$\dot{Q}_{\text{NA}}[\text{kW}]$	0,59	1,6	0,59	1,6
abgeführte Wärmeströme [kW]	6,2	93,1	6,2	79,6
$\dot{Q}_{\text{HK}}[\text{kW}]$	6	80,8	5,4	67,2
$\dot{Q}_{\text{CK}}[\text{kW}]$	0,15	12,3	0,77	12,4

Tabelle 4.8: Auslegungsdaten des Kühlsystems

Kondensator

Wie schon bei der Beschreibung des Kühlsystems ausgeführt, ist eine Abbildung der Wasserrückgewinnung zum Überprüfen der Wasserbilanz und zur Bestimmung der elektrischen Energieaufnahme des Kühlerlüfters und der Wasserpumpe erforderlich. Der Kondensator ist das zentrale Element bei der Wasserrückgewinnung. Eine Darstellung des Simulationsmodells des Kondensators befindet sich im Anhang E, Abbildung E.1.

Eingangsgrößen in den Kondensator sind die Stoffströme aus dem Kathodenabgas der BZ sowie Kühlwasserstrom und -temperatur. Im Kondensator integriert ist ein Kondensatabscheider, der die flüssige Phase aus dem Abgas entfernt und einem Wasservorratsbehälter zur Speisung des Verdampfers zuführt. Die Ausgangsstoffströme entsprechen den Eingangswerten mit Ausnahme des Wasserstroms, der um das abgeschiedene Kondensat reduziert wird.

Der für den gasförmigen Wasseranteil relevante Sättigungsdruck ist bei gegebenem Druck und konstanten Stöchiometrieverhältnissen von der Abgastemperatur abhängig.

$$p_{s,H_2O} = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta H_{\text{Verd},H_2O}}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{Abgas,BZ}}} - \frac{1}{T_s}\right)\right) \quad (4-83)$$

p_s = Sättigungsdruck

T_s = Siedetemperatur bei gegebenen Druck p_0 (z.B: 135°C bei 3 bar für H_2O)

$\Delta H_{\text{Verd},H_2O}$ = molare Verdampfungsenthalpie von Wasser

Der Sättigungsdruck wird mit dem Partialdruck verglichen, und aus dem Minimum beider Werte wird der molare Anteil $n_{H_2O} / n_{\text{ges}}$ des gasförmigen Wassers im Abgas bestimmt. Dieser Wert dient der Berechnung des tatsächlich in flüssiger Form vorliegenden Wasserstroms (Kondensat, $\dot{m}_{H_2O,Kond,fl}$).

$$\dot{m}_{H_2O,Kond,fl} = \dot{m}_{H_2O,Kond} - \left(1 - \frac{n_{H_2O}}{n_{\text{ges}}} \frac{1}{1 - \frac{n_{H_2O}}{n_{\text{ges}}}} MM_{H_2O}\right) \cdot \dot{m}_{H_2O,Kond} \quad (4-84)$$

Mit der Abgastemperatur am Austritt aus dem Kondensator kann so der rückgewonnene Wasserstrom beeinflusst werden. Die Abgastemperatur wird durch die übertragene Kühlleistung des Kondensators (\dot{Q}_{Kond}) bestimmt.

$$T_{\text{Abgas,Kond,aus}} = T_{\text{Abgas}} - \frac{\dot{Q}_{\text{Kond}} + \frac{\dot{m}_{H_2O,Kond,fl}}{MM_{H_2O}} \Delta H_{\text{Verd},H_2O}}{\dot{m}_{\text{ges}} c_{p,\text{ges}}} \quad (4-85)$$

$\dot{m}_{\text{ges}} c_{p,\text{ges}}$ = Wärmekapazität des Abgasstroms

Die übertragene Kühlleistung des Kondensators kann bei dem hier vorliegenden Kreuzstrom-Kondensator nach [42] wie folgt errechnet werden:

$$\dot{Q}_{\text{Kond}} = (T_{\text{CK}} - T_{\text{Abgas}}) \cdot \varepsilon \cdot \dot{m}_{\text{KW,Kond}} c_{p,\text{KW}} \quad (4-86)$$

T_{CK} = Eintrittstemperatur des kalten Mediums (Austrittstemperatur des Kühlwassers aus Zusatzkühler)

T_{Abgas} = Eintrittstemperatur des warmen Mediums (Austrittstemperatur des Abgases aus BZ)

ε = Wirkungsgrad des Kondensators [42] ($\varepsilon = 0,95$)

4.2.5 Elektrischer Antrieb

Die Modellierung des elektrischen Antriebs ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Eingangsgrößen in den elektrischen Antrieb sind das Fahrpedalsignal, die momentan verfügbare elektrische

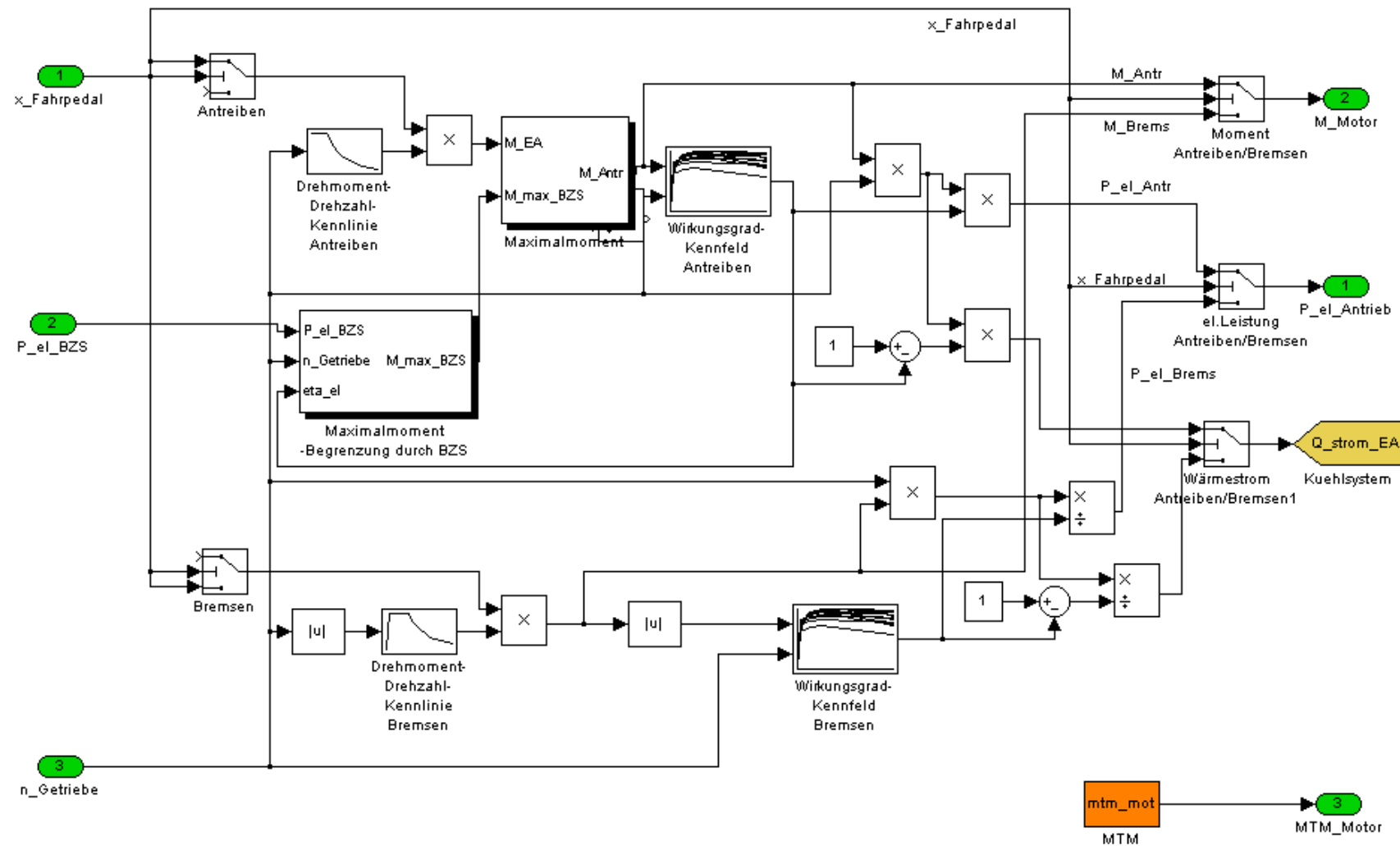


Abbildung 4.13: Simulationsmodell des elektrischen Antriebs

Leistung und die aktuelle Drehzahl des Getriebes. Mit dem Fahrpedalsignal wird ein maximales Moment aus der maximalen Drehmoment-Kennlinie (s. Anhang C, Abbildung C.9) in Abhängigkeit der Drehzahl des Antriebs bestimmt.

$$M_{EA} = x_{\text{Fahrpedal}} M_{\text{Max,Antr}}(n) \quad (4-87)$$

Das so ermittelte Drehmoment wird auf das durch die maximal verfügbare elektrische Leistung des BZS ermittelte Drehmoment begrenzt. Das resultierende Drehmoment ist das Antriebsmoment M_{Antr} .

$$M_{\text{Antr}} = M_{EA} \leq M_{\text{Max,BZS}} \quad (4-88)$$

Das BZS-seitig maximal zur Verfügung stehende Drehmoment wird aus der maximal verfügbaren elektrischen Leistung am Eingang des elektrischen Antriebs ($P_{\text{el,BZS}}$), der aktuellen Drehzahl des Getriebes (n_{Getr}) und des momentan vorhandenen elektrischen Wirkungsgrades des Antriebs bestimmt ($\eta_{\text{el,Antr}}$).

$$M_{\text{Max,BZS}} = \frac{P_{\text{el,BZS}}}{n_{\text{Getr}}} \eta_{\text{el,Antr}}(M_{\text{Antr}}, n_{\text{Getr}}) \quad (4-89)$$

Der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs wird aus einem Kennfeld eines elektrischen Antriebs (s. Anhang C, Abbildung C.9) bestimmt. Die Parameter zur Ermittlung des Wirkungsgrades sind die aktuelle Drehzahl des Getriebes und das resultierende Antriebsmoment M_{Antr} . Wie aus Abbildung 4.13 erkennbar ist, erfolgt die Ermittlung des Wirkungsgrades iterativ.

Die elektrische Aufnahmeleistung wird errechnet aus Wirkungsgrad, Drehzahl und resultierendem Antriebsmoment.

$$P_{\text{el,Antr}} = M_{\text{Antr}} n_{\text{Getr}} \frac{1}{\eta_{\text{el,EA,Antr}}(M_{\text{Antr}}, n_{\text{Getr}})} \quad (4-90)$$

Die im Antrieb anfallende Verlustleistung wird als Wärmestrom ausgegeben.

$$\dot{Q}_{\text{EA,Antr}} = M_{\text{Antr}} n_{\text{Getr}} (1 - \eta_{\text{el,EA,Antr}}(M_{\text{Antr}}, n_{\text{Getr}})) \quad (4-91)$$

Im Betriebszustand Bremsen erfolgt die Ermittlung des Bremsmomentes analog zum Antriebsmodus mit dem (jetzt negativen) Fahrpedalsignal und einer maximalen Bremsmomentenkennlinie.

$$M_{\text{Brems}} = x_{\text{Fahrpedal}} M_{\text{Max,Brems}}(n) \quad (4-92)$$

Die elektrische Abgabeleistung im Bremsmodus wird aus Wirkungsgrad, Drehzahl und resultierendem Antriebsmoment errechnet. Der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs im Bremsmodus wird analog zum Antriebsmodus aus einem Kennfeld eines elektrischen Antriebs (s. Anhang C, Abbildung C.9) bestimmt. Bei dem vorliegenden Antrieb wird zur Ermittlung des Wirkungsgrades beim Bremsen das gleiche Kennfeld wie beim Antreiben verwendet.

$$P_{el,Brems} = M_{Brems} n_{Getr} \eta_{el,EA,Brems} (M_{Brems}, n_{Getr}) \quad (4-93)$$

Auch im Bremsmodus fällt eine Verlustleistung an. Der Wärmestrom wird analog zum Antriebsmodus berechnet.

$$\dot{Q}_{EA,Brems} = M_{Brems} n_{Getr} (1 - \eta_{el,EA,Brems} (M_{Brems}, n_{Getr})) \quad (4-94)$$

Die Ausgangsgrößen Drehmoment, elektrische Leistung und thermische Verlustleistung werden nach Antreiben und Bremsen unterschieden. Außerhalb des elektrischen Antriebs entfällt die Unterscheidung nach Antriebs- und Bremsmodus. Die Ausgangsgrößen Drehmoment und rotatorisches Trägheitsmoment führen zum Getriebe. Die Ausgangsgröße elektrische Leistung wird zur energetischen Bilanzierung verwendet. Die vierte Ausgangsgröße, die thermische Verlustleistung, wird dem Kühlsystem zugeführt.

4.2.6 Getriebe

Als Eingangsgrößen in das Getriebe werden das Antriebs-/Bremsmoment des elektrischen Antriebs sowie die aus dem Fahrzeugmodell ermittelte Drehzahl der Achse verwendet. Mit der Festübersetzung des Getriebes i^A wird die Drehzahl der Achse (n_{Achse}) umgerechnet in die Drehzahl des elektrischen Antriebs (n_{Getr}).

$$n_{Getr} = i \cdot n_{Achse} \quad (4-95)$$

Im Betriebszustand Antreiben wird der Getriebewirkungsgrad aus einem Kennfeld eines vermessenen Getriebes ermittelt. Die Parameter zur Ermittlung des Wirkungsgrades sind die aktuelle Drehzahl des Getriebes und das resultierende Drehmoment M des elektrischen Antriebs. Letzteres wird dabei innerhalb des Getriebes unterschieden nach Antriebs- (M_{Antr}) und Bremsmoment (M_{Brems}).

$$M_{Getr,Antr} = M_{Antr} \cdot i \cdot \eta_{Getr,Antr} (M, n_{Getr}) \quad (4-96)$$

Im Betriebszustand Bremsen wird der Getriebewirkungsgrad aus einem Kennfeld eines vermessenen Getriebes ermittelt. Bei dem vorliegenden Getriebe wird zur Ermittlung des Wirkungsgrades beim Bremsen das gleiche Kennfeld wie beim Antreiben verwendet. Die Parameter zur Ermittlung des Wirkungsgrades sind die aktuelle Drehzahl des Getriebes und das Drehmoment M_{Brems} des elektrischen Antriebs.

$$M_{Getr,Brems} = M_{Brems} \cdot i \cdot \frac{1}{\eta_{Getr,Brems} (M, n_{Getr})} \quad (4-97)$$

Das rotatorische Trägheitsmoment am Getriebeausgang wird aus dem auf den Getriebeausgang reduzierten Motor-Trägheitsmoment und dem Getriebe-Trägheitsmoment zusammengesetzt.

$$\Theta_{EA\&Getr} = \Theta_{EA} i^2 + \Theta_{Getr} \quad (4-98)$$

^A Die Übersetzung i entspricht der Gesamtübersetzung inklusive der Achsübersetzung.

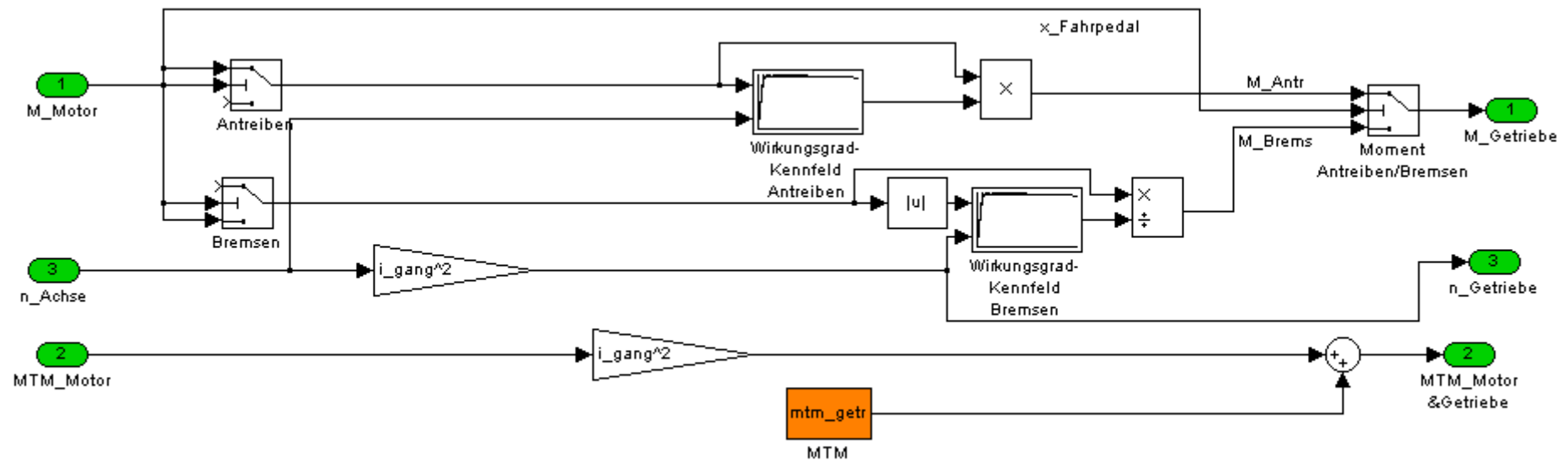


Abbildung 4.14: Simulationsmodell des Getriebes

Außerhalb des Getriebs wird nicht unterschieden zwischen Antriebs- und Bremsmodus. Es wird nur noch ein Antriebsstrang-Drehmoment (M_{Getr}) betrachtet. Die Ausgangsgrößen Antriebsstrang-Drehmoment und rotatorisches Antriebsstrang-Trägheitsmoment führen zum Fahrzeugmodell. Die dritte Ausgangsgröße, die Drehzahl des Getriebes, wird dem Simulationsblock elektrischer Antrieb zugeführt.

4.2.7 Fahrzeug

Das Fahrzeug selbst wird durch ein zweidimensionales Fahrzeugmodell beschrieben. Somit können die Einflüsse von dynamischer Radlastverteilung, Steigungsprofil und Antriebskonzept (Front-/Standard- oder Allradantrieb) berücksichtigt werden. Mit den Eingangsgrößen Steigungsprofil und Fahrgeschwindigkeit wird die Fahrwiderstandskraft ermittelt.

$$F_{\text{WD}} = F_{\text{RR}} + F_{\text{Aero}} + F_{\text{St}} \quad (4-99)$$

Die geschwindigkeitsabhängige Rollreibungskraft F_{RR} wird aus Ausrollversuchen ermittelt. Aus der Rollreibungskraft wird ein geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandskoeffizient bestimmt (Kennlinie im Anhang C, Abbildung C.12). Die aerodynamische Widerstandskraft wird nach üblichen Ansätzen in der Literatur [44] aus Stirnfläche A_{Fzg} , Widerstandsbeiwert c_w , Dichte der Luft und Fahrgeschwindigkeit bestimmt. Die Steigungswiderstandskraft wird aus der prozentualen Steigung (x_{Steigung}) ermittelt.

$$F_{\text{RR}} = c_{\text{RR}}(v_{\text{Fzg}}) m_{\text{Fzg}} g \quad (4-100)$$

$$F_{\text{Aero}} = \frac{\rho}{2} c_w A_{\text{Fzg}} v_{\text{Fzg}}^2 \quad (4-101)$$

$$F_{\text{St}} = \sin\left(\arcsin\left(\frac{x_{\text{Steigung}}}{100\%}\right)\right) m_{\text{Fzg}} g \quad (4-102)$$

c_{RR} = Rollwiderstandskoeffizient

Die Zugkraft F_x wird auf die maximal übertragbare Zugkraft $F_{x,\text{max}}$ beschränkt, welche aus der aktuellen Beschleunigung und der Steigung ermittelt wird. Dabei wird das Antriebskonzept berücksichtigt. Im Folgenden wird das Basisfahrzeug mit Frontantrieb beschrieben.

$$F_{x,\text{max}} = \mu \left(\underbrace{\cos\left(\arcsin\left(\frac{x_{\text{Steigung}}}{100\%}\right)\right)}_{\text{Achslastreduktion durch Steigung}} \frac{l_h}{l} m_{\text{Fzg}} - \underbrace{a_x \frac{h_s}{l}}_{\text{dyn. Achslastverschiebung}} \right) \quad (4-103)$$

l = Radstand des Fahrzeugs

l_h = Schwerpunktsabstand zur Hinterachse

h_s = Schwerpunktshöhe (über der Straße)

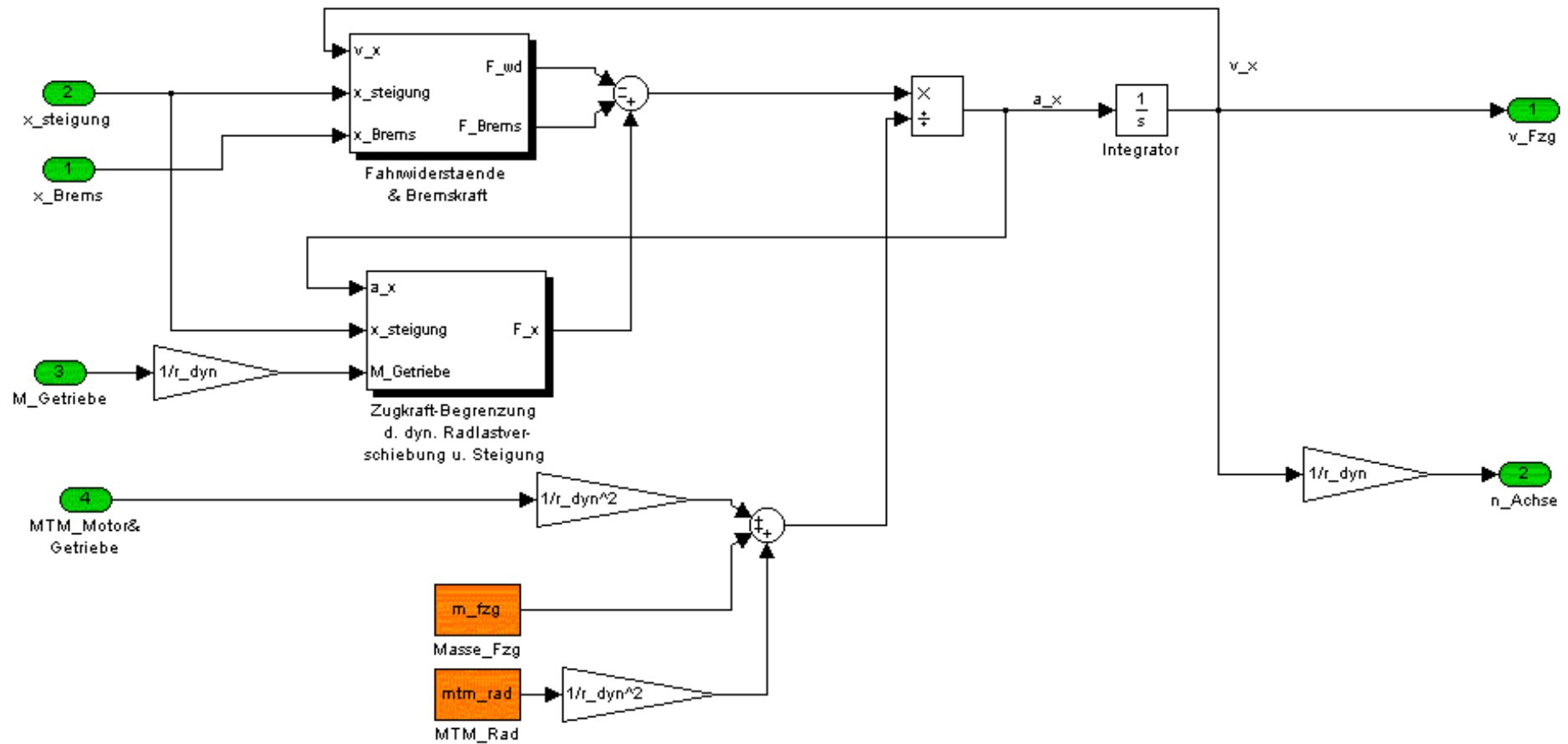


Abbildung 4.15: Bilanzierung am Fahrzeug

Die Zugkraft des Fahrzeugs wird ermittelt aus dem Antriebsstrang-Drehmoment des Getriebes (M_{Getr}).

$$F_x = \frac{M_{\text{Getr}}}{r_{\text{dyn}}} \leq F_{x,\text{max}} \quad (4-104)$$

r_{dyn} = dynamischer Radhalbmesser

Die Bremskraft F_{Brems} wird aus einer angenommenen maximalen Bremskraft $F_{\text{Brems,max}}$ von 15000 N^A und der Bremspedalstellung x_{Brems} gebildet. Die Bremspedalstellung entspricht dabei einer Fahrpedalstellung kleiner als minus eins (Der Bereich $-1 \leq x_{\text{Fahrpedal}} \leq 1$ wird vom elektrischen Antrieb abgedeckt^B).

$$x_{\text{Brems}} = x_{\text{Fahrpedal}} + 1 \leq 0 \quad (4-105)$$

$$F_{\text{Brems}} = x_{\text{Brems}} \cdot F_{\text{Brems,max}} \quad (4-106)$$

Mit der Zugkraft des Fahrzeugs, der Bremskraft und den Widerstandskräften für Steigung und Fahrwiderstand wird über die Bewegungsdifferentialgleichung die Längsbeschleunigung ermittelt.

$$a_x = \frac{F_x - F_{\text{WD}} - F_{\text{Brems}}}{\frac{\Theta_{\text{EA\&Getr}} + \Theta_{\text{Räder}}}{2} + m_{\text{Fzg}}} \quad (4-107)$$

$\ddot{\varphi}$ = Winkelbeschleunigung der Antriebsräder

$\Theta_{\text{Räder}}$ = rotatorische Trägheiten der Räder

Die Ausgangsgrößen des Simulationsblocks Fahrzeug sind die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Drehzahl der Achse. Die Längsbeschleunigung führt durch Integration zur Fahrzeuggeschwindigkeit.

$$v_{\text{Fzg}} = \int a_x dt \quad (4-108)$$

Mit der Fahrzeuggeschwindigkeit und dem dynamischen Radhalbmesser kann die Drehzahl der Achse bestimmt werden.

^A In üblichen Fahrzyklen (NEFZ, FTP 75) werden keine Verzögerungen von mehr als 8 m/s² erreicht. Mit der angenommen Bremskraft könnte dieser Wert noch überschritten werden (m_{Fzg} ca. 1590 kg).

^B Bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten kann der elektrische Antrieb nicht genügend Bremsmoment erzeugen. Zur Kompensation wird dort die Bremspedalstellung auch bei Fahrpedalstellungen oberhalb minus eins eingesetzt.

$$n_{\text{Achse}} = \frac{v_{\text{Fzg}}}{r_{\text{dyn}}} \quad (4-109)$$

Die Fahrzeuggeschwindigkeit wird dem Fahrer-Regler zugeführt, die Drehzahl der Achse wird zum Getriebeeingang zurückgeführt (vgl. Abbildung 4.4).

Die Zugkraft des Fahrzeugs wird auch zur Berechnung des Antriebsstrangwirkungsgrades verwendet. Negative Zugkräfte, z.B. rekuperatives Bremsen, werden in der Wirkungsgradberechnung nicht berücksichtigt. Das Produkt aus Zugkraft und Geschwindigkeit stellt die zum Vortrieb genutzte Antriebsleistung des Fahrzeugs dar. Setzt man diese in Relation zu der dem BZS zugeführten chemischen Leistung ($\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}} \cdot \text{Hu}_{\text{CH}_3\text{OH}}$) erhält man den Antriebsstrangwirkungsgrad.

$$\eta_{\text{Strang}} = \frac{F_x \cdot v_{\text{Fzg}}}{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}} \cdot \text{Hu}_{\text{CH}_3\text{OH}}} \Big|_{F_x \geq 0} \quad (4-110)$$

Einige fahrzeugseitige Kenndaten sind in Tabelle 4.9 zusammengefasst:

	A-Klasse BZ BASIS
$c_W \times A_{\text{Fzg}}$	0,739
Rollwiderstands- koeffizient (c_{RR})	0,07 - 0,09 ($f(v_{\text{Fzg}})$)
$h_s[\text{m}]$	0,45
$l_h[\text{m}]$	1,265
$l[\text{m}]$	2,3
$r_{\text{dyn}}[\text{m}]$	0,296
m_{Fzg} (Masse_{ff,ECE}) [kg]	1540
SMK [kg]	1590

Tabelle 4.9: Fahrzeug-Kennwerte des Basis-Fahrzeugs

5 Validierung des Simulationsmodells

Die Ziele und Inhalte dieses Kapitels sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Ziel	Absicherung des Simulationsmodells hinsichtlich des stationären und dynamischen Verhaltens.
Inhalt	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung der Vorgehensweise bei der Messung, Definition der Schnittstellen (Abschnitt 5.1) • Vergleich des an den Schnittstellen errechneten Energieverbrauches mit den gemessenen Werten, Diskussion von möglichen Ursachen für Abweichungen zwischen Messung und Simulation (Abschnitt 5.2 bis 5.7)

Tabelle 5.1: Ziele und Inhalte des Kapitels

Eine Validierung ist die Absicherung eines Simulationsmodells durch Messungen. Mit der nachfolgenden Validierung wird das Verhalten der Teilsysteme und des Gesamtsystems unter stationären und/oder dynamischen Bedingungen betrachtet. Die Validierung des dynamisch betriebenen Brennstoffzellensystems führt zu einer Unterteilung in drei Subsysteme (Gaserzeugung, Brennstoffzelle sowie Nebenaggregate inklusive Kühlung). Abschließend wird das Brennstoffzellensystem als Ganzes betrachtet.

Die untersuchten Systeme sind:

- Elektrischer Antrieb
- Gaserzeugung
- Brennstoffzelle
- Nebenaggregate
- Brennstoffzellensystem

Alle Messungen beziehen sich auf einen existierenden Prototypen (NECAR 3). Einzelne Teilsysteme und Komponenten zukünftiger Methanol-BZ-Prototypen waren bei der Erstellung dieser Arbeit bereits vorhanden. Eine Verifikation des Gesamtsystems anhand von Rollenprüfstandsmessungen war aber noch nicht möglich.

5.1. Vorgehensweise

Die Vermessung des Fahrzeugs erfolgt auf einem dynamischen Rollenprüfstand. Das Messprogramm umfasst verschiedene Stationärpunktmessungen und die Vermessung eines Fahrzyklus (NEFZ).

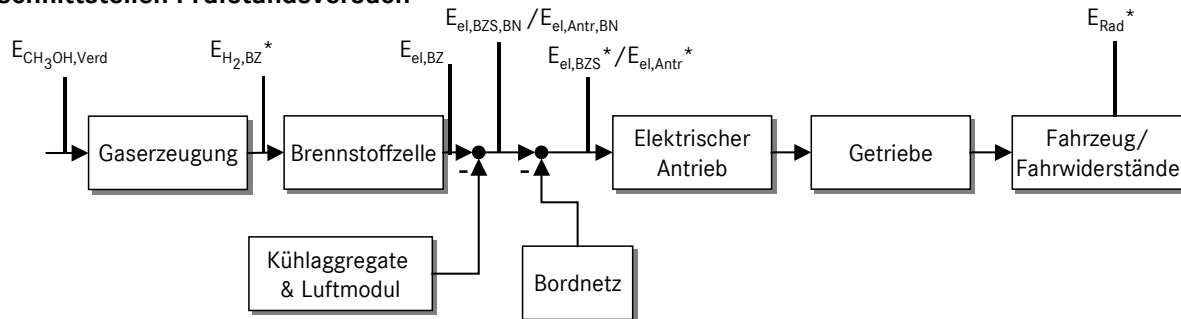
Die Validierung des Simulationsmodells erfolgt über eine Energiebilanzierung. Dabei werden Energien an definierten Schnittstellen in Simulation und Messung verglichen. Die Energiebi-

lanzierung orientiert sich an der Zugänglichkeit der Schnittstellen. Die hier gewählte Schnittstelleneinteilung zeigt Abbildung 5.1.

Eine zwingend erforderliche Eingangsgröße zur Bestimmung des Fahrzeugwirkungsgrades ist die Fahrenergie E_{Rad} . Diese Größe ist am Rollenprüfstand nicht direkt messbar und muss durch Umrechnung gemessener Größen ermittelt werden (s. Anhang A.1).

Eine Differenzierung zwischen elektrischem Fährantrieb und Getriebe ist wünschenswert. Die hierzu erforderliche Vermessung der mechanischen Energie an der Motorwelle ist im eingebauten Zustand problematisch. Die entsprechend nächste unproblematisch messbare Schnittstelle im Fahrzeug ist die elektrische Aufnahmeenergie des Antriebs. Strom und Spannung des Antriebs können gemessen werden. Aus diesem Grund werden Motor und Getriebe als eine Einheit betrachtet. Aus messtechnischen Gründen wird das 12V-Bordnetz dem elektrischen Antrieb zugeordnet ($E_{\text{el,Antr,BN}}$).

Schnittstellen Prüfstandsversuch



*errechnete Werte

Schnittstellen Simulationsmodell

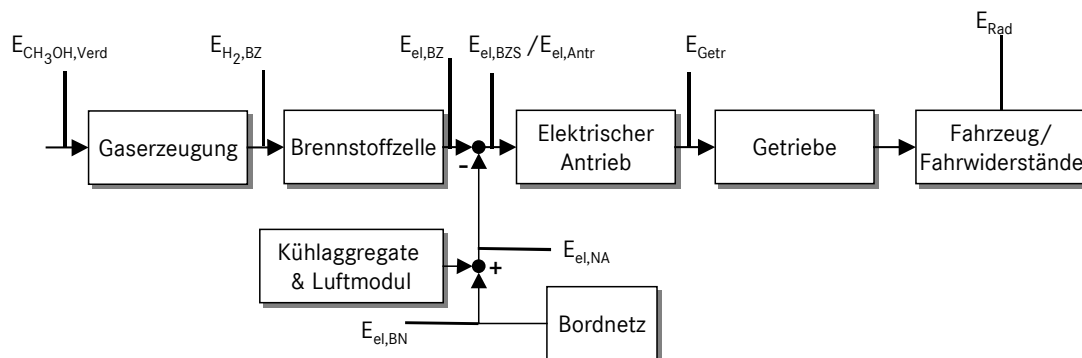


Abbildung 5.1: Schnittstellen zur Energiebilanzierung

Strom und Spannung der Brennstoffzelle können gemessen werden (Schnittstelle Ausgang BZ). Damit kann die elektrische Energie am Austritt der BZ ($E_{\text{el,BZ}}$) gemessen werden. Die Vermessung des Wasserstoffstroms als Schnittstelle Eingang BZ/Ausgang Gaserzeugung ist jedoch schwierig. Eine Rückrechnung auf den Wasserstoffstrom, ausgehend vom Strom der Brennstoffzelle, ist mit einfachen Beziehungen möglich, so dass diese Schnittstelle ($E_{\text{H}_2,\text{BZ}}$) beschrieben werden kann.

Die Eingangsgröße des Gaserzeugungssystems ($E_{\text{CH}_3\text{OH,Verd}}$) ist wiederum leicht messbar. Der Gesamtverbrauch an Methanol kann durch Wiegen des Tanks und durch Abgasanalyse bestimmt werden.

Die im Folgenden aufgeführte Variante „Messung“ entspricht einem Simulationsmodell, das an allen vermessenen Schnittstellen mit zeitabhängigen Daten aus der Messung beaufschlagt wird. Die Variante „Simulation“ repräsentiert ein Modell mit den aus Stationärpunktmessungen und Kennfeldern ermittelten Daten zu NECAR 3. Es gelten die in Abbildung 5.1 zum Simulationsmodell aufgeführten Schnittstellen.

Die Vermessung von BZ-Systemen ist in hohem Maße vom Closed-Loop-Verhalten (d.h. vom Einfluss des Fahrers) abhängig. Die Reglerabstimmung im Simulationsmodell entspricht einem PID-Regler mit „weichem“ Ansprechverhalten. Damit soll ein „träger“ Fahrer dargestellt werden.

5.2. Validierung der Fahrwiderstandskraft und Fahrenergie

Eine Herleitung der Fahrwiderstandskraft am Rollenprüfstand erfolgt im Anhang A. Die aus der Fahrwiderstandskraft errechnete Zugkraft am Rad ergibt sich zu:

$$F_x = F_{\text{WD,Rolle}} + (\Theta_{\text{EA\&Getr}} + \Theta_{\text{Räder}}) \ddot{\varphi} + \frac{1}{2} (v_{\text{Fzg}} A_1 + A_0) \quad (5-1)$$

$F_{\text{WD,Rolle}}$ = gemessener Fahrwiderstand am Rollenprüfstand (s. Anhang A)

A_1, A_0 = Fahrwiderstandskoeffizienten am Rollenprüfstand (s. Anhang A)

$\Theta_{\text{EA\&Getr}}$ = rotatorische Trägheit des elektrischen Antriebs und des Getriebes (reduziert auf die Antriebswelle, vgl. Gl. 4-98)

$\Theta_{\text{Räder}}$ = rotatorische Trägheit der Räder

$\ddot{\varphi}$ = Winkelbeschleunigung am Rad

Die am Rad eingesetzte Energie kann aus dem Verlauf der korrigierten Zugkraft und der Fahrzeuggeschwindigkeit ermittelt werden.

$$E_{\text{Rad}} = \int v_{\text{Fzg}} F_x dt \quad (5-2)$$

Die messtechnisch ermittelte korrigierte Fahrenergie wird mit der simulationstechnisch ermittelten verglichen. Die in der Simulation verwendete Zugkraft wird errechnet aus (4-104).

	Messung	Simulation	Abweichung [%]
E_{Rad} [kWh]	1,828	1,813	0,8

Tabelle 5.2: Vergleich der Fahrenergien

Wie aus Tabelle 5.2 zu entnehmen ist, weicht die durch Simulation ermittelte Energie (im NEFZ) nur gering (0,8%) von der gemessenen Energie ab.

5.3. Validierung des elektrischen Antriebs

Die Ein- und Ausgangswerte (Leistungen) des Antriebsstrangs von der Zugkraft (am Rad) bis zur elektrischen Aufnahmeleistung des Umrichters sind nach Abbildung 5.1 definiert. Die Schnittstelle Motor/Getriebe wird im eingebauten Zustand (d.h. im Fahrzeug) nicht vermessen. Die elektrische Aufnahmeleistung des Antriebs ($P_{el, Antr}$) ist ein Produkt aus der Spannung der Brennstoffzelle und der Stromaufnahme des Elektro-Antriebs (I_{Antr}).

$$P_{el, Antr} = U_{BZ} I_{Antr} \quad (5-3)$$

Im realen Fahrzeug ist der 12V-DC/DC-Wandler zur Bordnetzstromversorgung an die Leistungselektronik des Fahrtriebs gekoppelt. Der vermessene Leistungsbedarf des elektrischen Antriebs enthält damit die Leistung zur Versorgung des 12V-Netzes. Aus Stationärpunktmessungen kann die elektrische Leistung des 12V-Netzes ermittelt werden. Dieser Wert wird für das Simulationsmodell übernommen.

Die elektrische Leistung kann integriert werden und stellt die aufgenommene elektrische Energie des Antriebs dar. Die Energien und Wirkungsgrade des elektrischen Antriebs für den NEFZ sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Die aus der Simulation ermittelte Energie wird zum Vergleich mit der gemessenen Energie um den Anteil der Bordnetzstromversorgung E_{BN} erhöht.

$$E_{el, Antr, BN} = \underbrace{\int P_{el, Antr}}_{E_{el, Antr}} + E_{el, BN} \quad (5-4)$$

Die Aufnahmeenergie des elektrischen Antriebs inklusive des Bordnetzes hat eine Abweichung zur tatsächlich vermessenen von 1,3%.

	Messung	Simulation	Abweichung [%]
$E_{el, Antr}$ [kWh]		2,260	
$E_{el, BN}$ [kWh]	0,184*	0,184	
$E_{el, Antr, BN}$ (inkl. Bordnetz) [kWh]	2,476	2,444	1,3

*ermittelt aus Stationärpunktmessungen

Tabelle 5.3: Aufnahmeenergien des elektrischen Antriebs

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Abbildung des elektrischen Antriebsstranges und der Fahrwiderstände des Fahrzeugs in der Simulation mit hoher Genauigkeit erfolgt.

5.4. Validierung der Gaserzeugung

Die Wirkungsgrade der Gaserzeugung können ermittelt werden durch Bezug des im Verdampfer verbrauchten Methanols (Einspritzmenge) zum in der Brennstoffzelle umgesetzten Wasserstoff (Gleichung 3-1). Der Wasserstoffstrom kann zwar gemessen werden, die im Fahrzeug eingebaute Sensorik ermöglicht aber keine hinreichende Genauigkeit. Der Wasserstoffstrom kann alternativ aus dem elektrischen Strom (I_{BZ}) errechnet werden (Gleichung 4-35). Die chemische Energie des Wasserstoffs wird aus der Integration des Wasserstoffstroms und dem unteren Heizwert von Wasserstoff errechnet.

$$E_{H_2,BZ} = Hu_{H_2} \int \underbrace{\frac{I_{BZ} n}{F}}_{\dot{m}_{H_2,BZ}} dt \quad (5-5)$$

5.4.1 Validierung des stationären Verhaltens

Die eingespritzte Menge an Methanol kann im Fahrzeug über die Pumpendrehzahlen der Dosierpumpen für Reformier und Katbrenner geschätzt werden. Deutlich zuverlässiger ist eine gravimetrische Messung des verbrauchten Methanols. Letzteres kann durch Stationärpunktmessungen erreicht werden. Dabei wird über einen hinreichend langen Zeitraum eine konstante Geschwindigkeit gefahren, bis alle Temperaturen einen stationären Zustand erreicht haben. Die Energie des Methanols wird dabei aus der Integration des in den Verdampfer eingespritzten Methanols ermittelt.

$$E_{CH_3OH,Verd} = Hu_{CH_3OH} \int \dot{m}_{CH_3OH,Verd} dt \quad (5-6)$$

Bei der Gaserzeugung wird als Validierungsparameter der durchschnittliche Wirkungsgrad über einen bestimmten Zeitraum (z. B. Fahrzyklus) herangezogen.

$$\eta_{GES} = \frac{E_{H_2,BZ}}{E_{CH_3OH,Verd}} \quad (5-7)$$

Der in stationären Betriebszuständen ermittelte durchschnittliche Wirkungsgrad $\eta_{GES}(stat)$ der Gaserzeugung und der nach der stationären Systemauslegung berechnete Wirkungsgrad ($\eta_{GES}(simu)$, vgl. Gleichung 4-33) des untersuchten NECAR 3-BZS sind in Abbildung 5.2 dargestellt.

Der aus der dynamischen Messung ermittelte Wirkungsgrad ($\eta_{GES}(dyn)$, berechnet nach Gleichung 3-1) wird ebenfalls in Abbildung 5.2 dargestellt. Der dynamisch ermittelte Wirkungsgrad weicht teilweise deutlich von den stationär gemessenen Werten ab. Diese Abweichung wird auf Überdosierung der Gaserzeugung zurückgeführt und wird bei der Validierung des dynamischen Verhaltens berücksichtigt. Für das stationäre Verhalten der simulierten Gaserzeugung wird der aus der stationären Messung ermittelte Wirkungsgrad $\eta_{GES}(stat)$ verwendet.

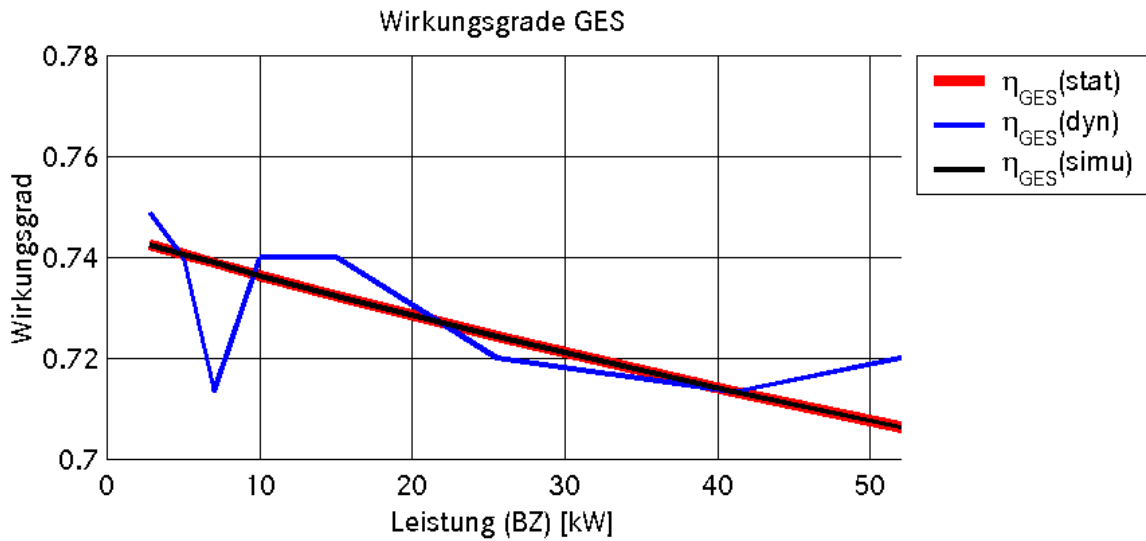


Abbildung 5.2: Wirkungsgrade der Gaserzeugung (NECAR 3)

5.4.2 Validierung des dynamischen Verhaltens

Um die Einflüsse des Ansprechverhaltens auf den Wirkungsgrad und damit auf den Methanolverbrauch in der Simulation abzubilden, wird neben einer stationären Kennlinie auch eine dynamische Validierung der Gaserzeugung durchgeführt. Das Verzögerungsverhalten der Gaserzeugung wird durch Messungen identifiziert. Dabei wird ein Sprungsignal der Leistungsanforderung auf den Eingang des BZS gegeben ($P_{\text{Soll,BZS}}$, vgl. Abbildung 4.5). Aus verschiedenen Sprunghöhen wird ein lineares Übertragungsverhalten ($G(s)$) identifiziert.

$$G(s) = \frac{1}{x_n s^n + \dots + x_1 s + 1} \quad (5-8)$$

Die Koeffizienten x_1 bis x_n werden dabei aus einer linearen Optimierung mit der Methode der kleinsten Quadrate [45] ermittelt:

$$\min_x \frac{1}{2} \|F(x, \text{xdata}) - \text{ydata}\|_2^2 = \min_x \frac{1}{2} \sum_i (F(x, \text{xdata}_i) - \text{ydata}_i)^2 \quad (5-9)$$

x = Zeitvektor

xdata = beobachteter Stromverlauf (I_{Ist})

ydata = simulierter Stromverlauf (I_{BZ} , PT1 bis PT5-Verhalten)

Die Systemträgheit der Gaserzeugung wird durch das Verzögerungsverhalten zwischen der Umwandlung des Methanolstroms ($\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH,Verd}}$) zum Wasserstoffstrom ($\dot{m}_{\text{H}_2,\text{BZ}}$) repräsentiert. Der Wasserstoffstrom ist nicht direkt messbar. Alternativ wird der elektrische Strom in der BZ als Indikator verwendet.

$$I_{\text{Ist}} = \frac{\dot{m}_{\text{H}_2, \text{BZ}}}{n_{\text{Zellen}}} F \quad (5-10)$$

Als Bezugsgröße für die Sollleistung des BZS $P_{\text{Soll,BZS}}$ wird der elektrische Soll-Strom in der BZ verwendet.

$$I_{\text{Soll}} = \frac{P_{\text{Soll,BZS}}}{U_{\text{Soll,BZ}}} \quad (5-11)$$

Die Spannung $U_{\text{Soll,BZ}}$ entspricht dabei der Spannung der BZ in dem angestrebten Betriebspunkt (entsprechend der stationären Strom-/Spannungskennlinie). Wie in Abbildung 5.3 zu erkennen ist, kann das Systemverhalten mit einem Verzögerungsglied erster Ordnung (PT1) nicht ausreichend erfasst werden. Insbesondere im wichtigen Bereich unmittelbar nach dem Sprungsignal (bei $t=86$ s) reagiert ein PT1-Glied im Vergleich zu dem gemessenen Signal zu schnell. Das tatsächliche Verhalten kann mit einem PT4-Glied (einem Verzögerungsglied vierter Ordnung) erheblich besser dargestellt werden. Bei Verzögerungsgliedern höherer Ordnung (PT5) wird keine Verbesserung der Abbildungsgenauigkeit mehr erzielt.

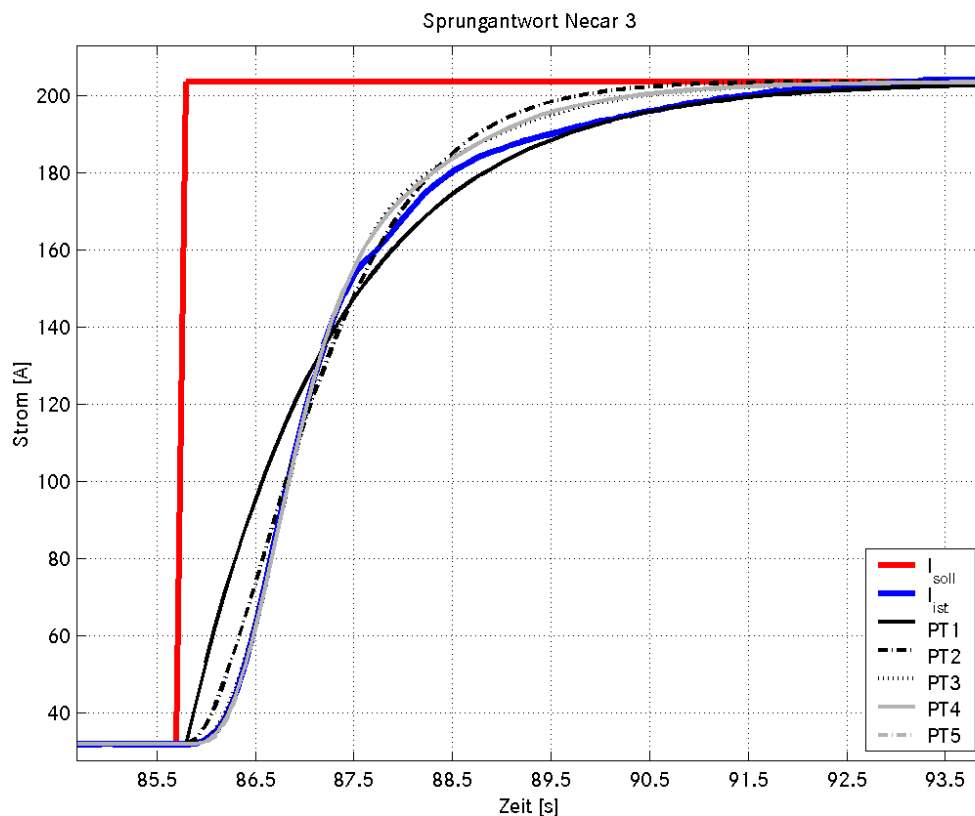


Abbildung 5.3: Sprungantwort eines BZS (NECAR 3)

Das mit einem Verzögerungsglied vierter Ordnung und mit dem aus Stationärpunktmessungen ermittelten Wirkungsgrad (siehe Abbildung 5.2) abgestimmte Simulationsmodell wird mit den Messergebnissen aus dem NEFZ verglichen.

Die ermittelten Wirkungsgrade im Fahrzyklus (NEFZ) der Gaserzeugung und der gravimetrisch ermittelte Energieverbrauch an Methanol sind in Tabelle 5.4 dargestellt. Erwähnenswert ist, dass dieses Ergebnis auf einer Closed-Loop-Validierung unter Berücksichtigung des Fahrereinflusses resultiert. Die gute Übereinstimmung der chemischen Energie des Wasserstoffs und des Methanols zwischen Simulation und Messung zeigt, dass mit der gewählten Modellierung die Realität gut abgebildet wird.

	Messung	Simulation	Abweichung [%]
$E_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}}$ [kWh]	8,608	8,64	-0,4
$E_{\text{H}_2, \text{BZ}}$ [kWh]	5,87	5,87	0,0
η_{GES}	0,68	0,68	0,4

Tabelle 5.4: Wirkungsgrade der Gaserzeugung im Vergleich (NECAR 3)

5.5. Validierung der Brennstoffzelle

Im Unterschied zur Validierung der Gaserzeugung kann bei der Brennstoffzelle eine Open-Loop-Validierung vorgenommen werden. Bei einer Closed-Loop-Simulation ist die BZ in das Gesamtfahrzeug eingebunden. Die Eingangsdaten sind hier abhängig von der Modellierung der umgebenden Systeme (Nebenaggregate, Gaserzeugung, elektrischer Antrieb). Zur Abstimmung möglicher Korrekturfaktoren in der Simulation wird die Open-Loop-Validierung mit identischen Eingangsdaten bei Simulation und Messung verwendet. Die nachfolgende Closed-Loop-Betrachtung dient einerseits zur Überprüfung der Validierung, andererseits wird die aus der chemischen Energie des Wasserstoffs resultierende elektrische Energie der BZ ermittelt.

5.5.1 Open-Loop-Validierung

Eingangsgröße (umgesetzter Wasserstoff) und Ausgangsgröße (elektrische Leistung, d.h. Strom und Spannung) können aus den vorliegenden Messdaten entnommen oder errechnet (vgl. Gleichung 5-10) werden.

Zum Vergleich zwischen Messung und Simulation werden die folgenden möglichen Ursachen für unterschiedliche Spannungen am Simulationsmodell untersucht.

- Betriebspunktabhängige Spannungskorrektur
Korrektur der stationär ermittelten Polarisationskurve in Abhängigkeit des BZ-Betriebspunktes
- Druck- und stöchiometrieabhängige Spannungskorrektur
Der Einfluss der Luftstöchiometrie und des Luftdrucks auf die Spannung in der BZ wird berücksichtigt [19, 25, 30].

- Temperaturabhängige Spannungskorrektur
Der Einfluss der Temperatur der Brennstoffzelle auf die Spannung wird berücksichtigt [30].

Betriebspunktabhängige Spannungskorrektur

Der prozentuale Spannungsunterschied $\Delta U_{P,el,BZ}$ über der gemessenen elektrischen Leistung der BZ ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

Verwendet wird dabei der im NEFZ ermittelte Spannungsunterschied ($\Delta U_{P,el,BZ}$) zwischen einem Simulationsmodell mit der charakteristischen Spannung (U_{char}) aus Abbildung 3.6 und den Messdaten (U_{BZ}).

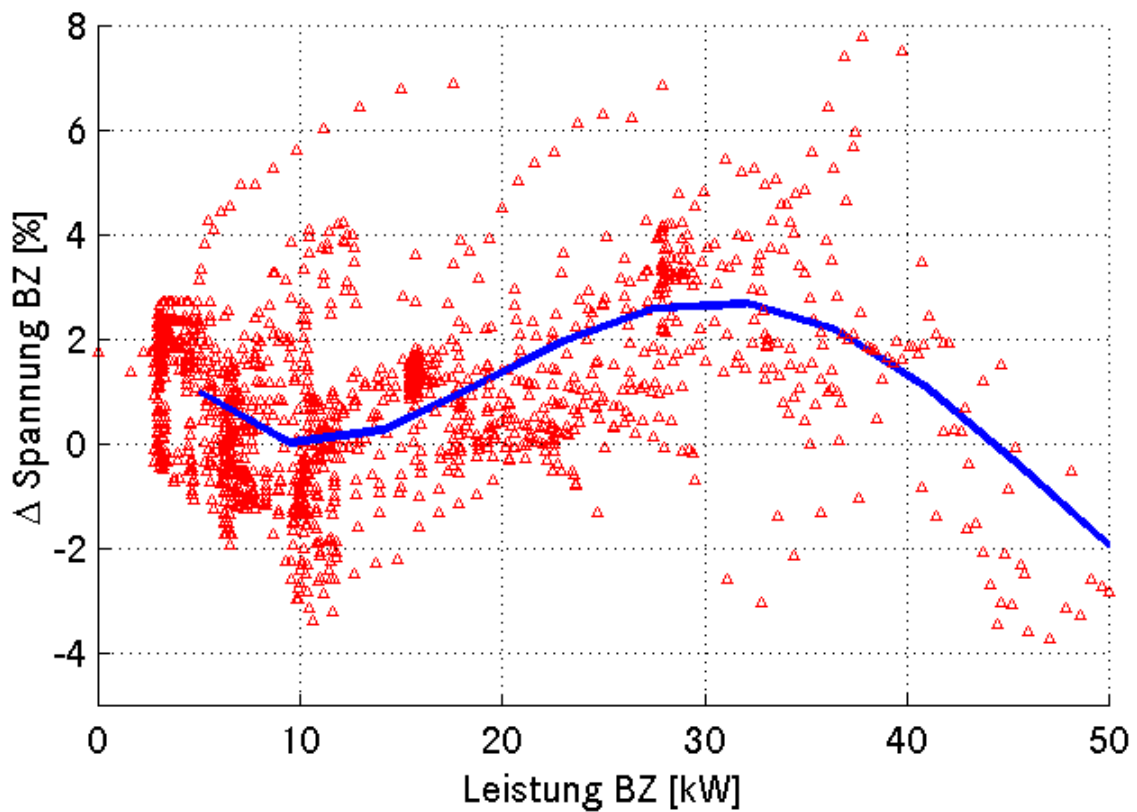


Abbildung 5.4 Betriebspunktabhängige Spannungsabweichung

$$\Delta U_{P,el,BZ} [\%] = \frac{U_{char}(t) - U_{BZ}(t)}{U_{BZ}(t)} \cdot 100\% \quad (5-12)$$

Eine mögliche Ursache können Ungenauigkeiten bei der Berechnung des charakteristischen Polynoms bei der stationären Messung sein. Die prozentuale Spannungsabweichung $\Delta U_{P,el,BZ}$ kann als Funktion eines von der BZ-Leistung abhängigen Korrekturfaktors (k_{korrr}) dargestellt werden.

$$\Delta U_{P,el,BZ} = k_{korrr}(P_{el,BZ}) \cdot U_{char,stat}(P_{el,BZ}) \quad (5-13)$$

Die ursprüngliche charakteristische Spannungskurve in Abhängigkeit der elektrischen Leistung der BZ wird korrigiert. Die korrigierte Spannung wird als $U_{\text{char,korr}}$ bezeichnet.

$$U_{\text{char,korr}} = U_{\text{char}} + \Delta U_{\text{P,el,BZ}} \quad (5-14)$$

Druck- und stöchiometrieabhängige Spannungskorrektur

Bei der hier verwendeten Rotationskolbenmaschine (Wankelverdichter) ist die Drehzahl nahezu proportional zur geförderten Luftmasse. Die Soll-Kathodenstöchiometrie, d.h. das Verhältnis von zugeführter Luft zu benötigter Luft, ist vorgegeben (hier $n_{\text{O}_2}=2$). Das Verhältnis der Ist- zur Soll- Kathodenstöchiometrie wird durch das Verhältnis von der Ist- (n_{ist}) zur Soll-Drehzahl (n_{soll}) des Kompressors widerspiegelt.

$$\Delta n = \frac{n_{\text{soll}} - n_{\text{ist}}}{n_{\text{ist}}} \quad (5-15)$$

Die nach der Abweichung der Ist- zur Soll-Drehzahl aufgetragenen Spannungsabweichungen zur korrigierten charakteristischen Spannung zeigt Abbildung 5.5.

$$\Delta U_n [\%] = \frac{U_{\text{char,korr}}(t) - U_{\text{BZ}}(t)}{U_{\text{BZ}}(t)} \cdot 100\% \quad (5-16)$$

Mit einem Regressionsverfahren (vgl. Gleichung 5-9) wird eine Abhängigkeit der Spannung von der Differenz der Ist- zur Soll-Drehzahl des Kompressors dargestellt.

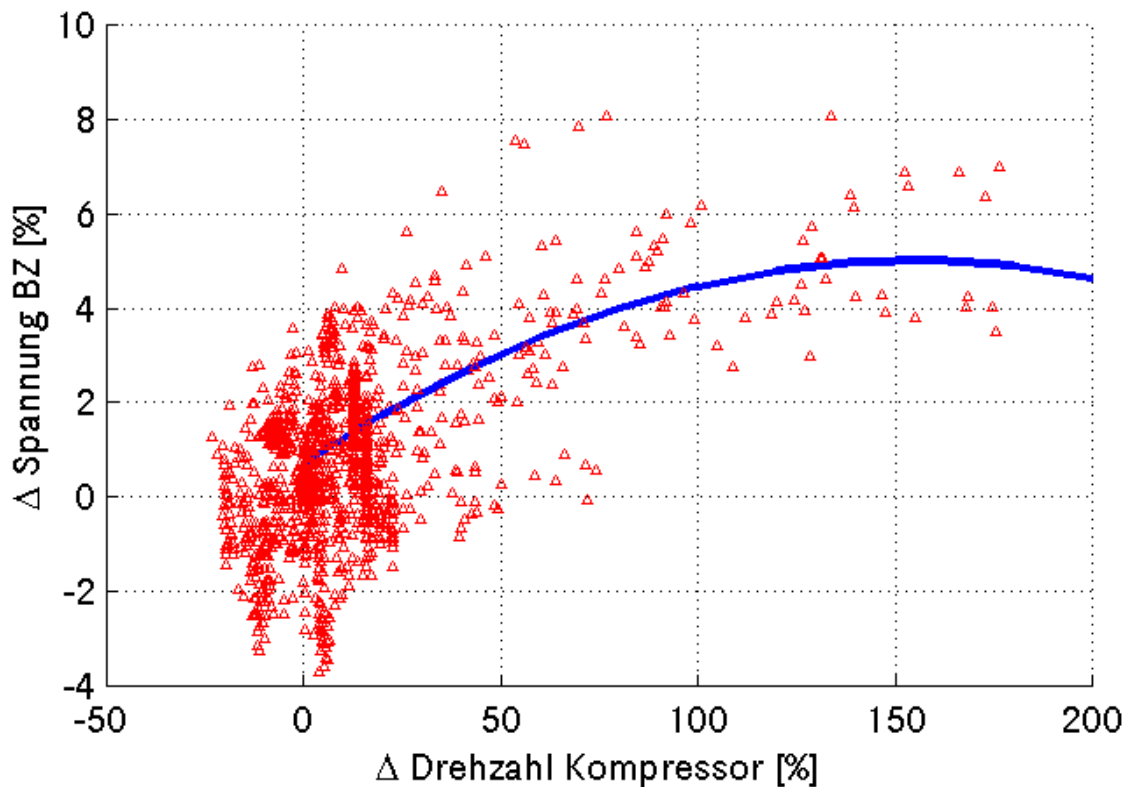


Abbildung 5.5: Druck- und stöchiometrieabhängige Spannungsdifferenz

Temperaturabhängige Spannungskorrektur

Als dritte Ursache der Unterschiede zwischen Stationärpunktmessungen und dynamischen Messungen im Fahrzeug werden die Temperaturunterschiede der BZ untersucht. Als charakteristische Temperatur wird hier die bei Stationärpunktmessungen vorliegende Temperatur herangezogen. Abbildung 5.6 zeigt die Spannungsabweichung in Abhängigkeit zur Temperaturabweichung.

Angesichts der nicht klar erkennbaren Abhängigkeit der Spannung von der Temperatur im beobachteten Bereich wird der Temperatureinfluss auf die Polarisationskurve vernachlässigt.

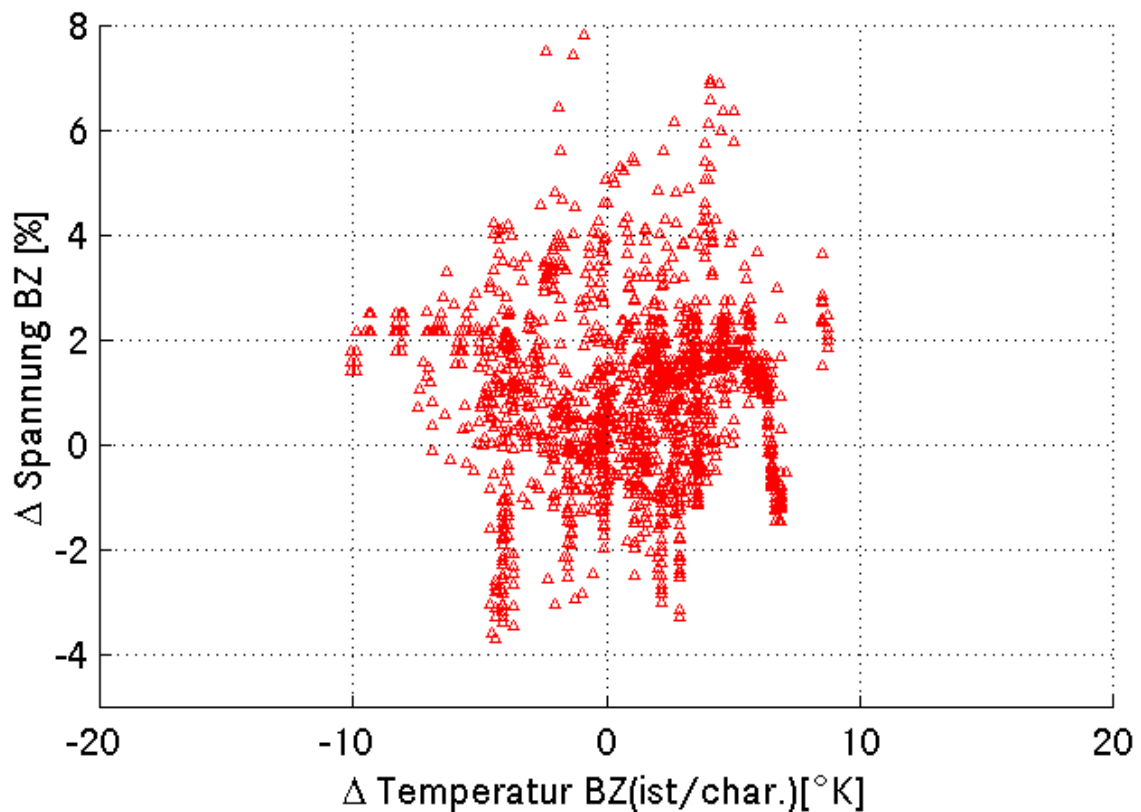


Abbildung 5.6: Spannungsabhängigkeit von der Temperaturdifferenz der Brennstoffzelle

Zusammenfassung der Open-Loop Spannungskorrekturen

Die gewonnenen Erkenntnisse führen zu einer korrigierten charakteristischen Polarisationskurve. Die charakteristische Spannung U_{char} kann aus der stationär ermittelten Polarisationskurve, einem leistungsbezogenen Korrekturfaktor k_{korrr} (Gleichung 5-13) und mittels einer partiellen Ableitung aus der Drehzahl des Kompressors errechnet werden:

$$U_{\text{char}} = U_{\text{char,korr}} + \frac{\overbrace{\Delta n_{\text{ist}} \frac{\partial U}{\partial n_{\text{soll}}}}^{\Delta U_n}}{\frac{\Delta n_{\text{ist}}}{n_{\text{soll}}}} \quad (5-17)$$

In Abbildung 5.7 ist der Verlauf von vier Spannungen in einem Teil des NEFZ dargestellt. Neben der vermessenen Spannung U_{ist} ist die ursprüngliche charakteristische Spannung $U_{\text{char,stat}}$, die nach dem BZ-Betriebspunkt korrigierte Spannung $U_{\text{char,korr}}$ und die nach BZ-Betriebspunkt und nach Stöchiometrie/Druck korrigierte Spannung U_{char} dargestellt. Eine vollständige Übereinstimmung mit der gemessenen Spannung kann von keiner der drei simulierten Spannungen erreicht werden. Abbildung 5.7 zeigt allerdings eine deutlich bessere Übereinstimmung der nach BZ-Betriebspunkt und nach Stöchiometrie/Druck korrigierten Spannung zur gemessenen Spannung (U_{ist}) als bei der ursprünglichen charakteristischen Spannung $U_{\text{char,stat}}$.

Die Spannungskorrektur mit zusätzlichem Druck- und Stöchiometrieinfluss (U_{char}) bildet hier die Realität (U_{ist}) unwesentlich exakter ab als die vereinfachte Spannungskorrektur $U_{\text{char,korr}}$. Bei hochdynamischen Lastwechseln (Bremsmanöver am Ende des Fahrzyklus) zeigen sich nur minimale Unterschiede zwischen U_{char} und $U_{\text{char,korr}}$. Auf die drehzahlabhängige Spannungskorrektur U_{char} wird daher verzichtet.

Im Folgenden wird die nur betriebspunktabhängige Spannungskorrektur $U_{\text{char,korr}}$ berücksichtigt.

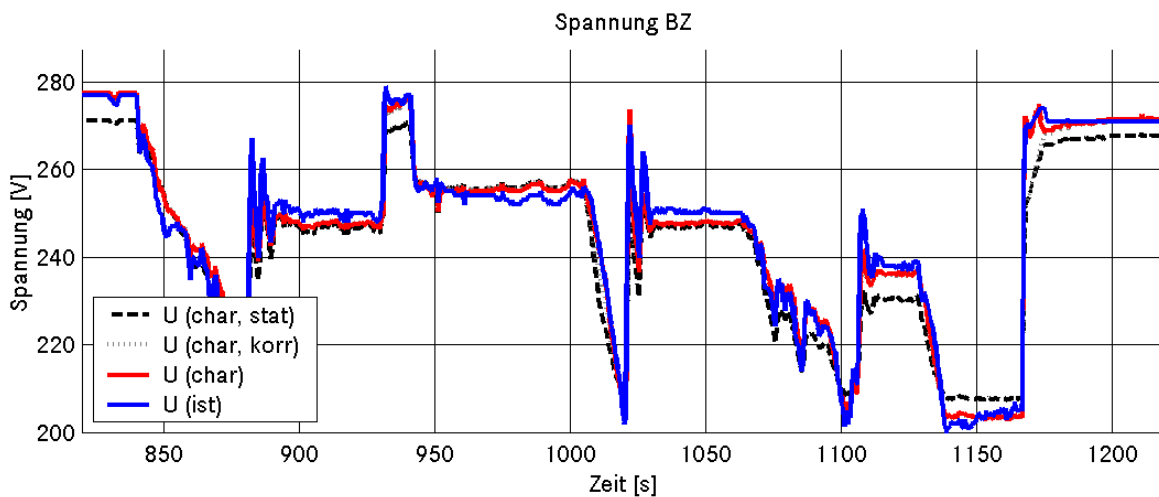


Abbildung 5.7: Verschiedene simulierte Spannungen im Vergleich zur vermessenen Spannung

5.5.2 Closed-Loop-Validierung

Die obigen Open-Loop-Validierungen der Brennstoffzelle gehen von der gemessenen elektrischen Leistung aus. Im Unterschied dazu wird bei der Closed-Loop-Validierung die elektrische Leistung aus dem Wasserstoffstrom bzw. der chemischen Leistung am Eintritt der BZ bestimmt. Mit der charakteristischen Polarisationskurve aus Stationärpunktmessungen und der

oben beschriebenen, Betriebspunktabhängigen Spannungskorrektur ergeben sich für den NEFZ der in Tabelle 5.5 dargestellte Wirkungsgrad und Energieverbrauch.

	Messung	Simulation	Abweichung [%]
$E_{el,BZ}$ [kWh]	3,60	3,58	0,6
$E_{H_2,BZ}$ [kWh]	5,87	5,87	0,0
η_{BZ}	0,613	0,610	0,6

Tabelle 5.5: Energieverbräuche und Wirkungsgrade der Brennstoffzelle im Vergleich

Insgesamt ergibt sich für die BZ ein Wirkungsgrad der nahe an dem vermessenen Wirkungsgrad liegt. Der Unterschied zur Messung ist auch in der elektrischen Energieabgabe sehr gering.

5.6. Validierung der Nebenaggregate

Die simulierten Nebenaggregate werden gemäß der Schnittstellendefinition für die Simulation in Abbildung 5.1 bilanziert. Die Differenz zwischen der vom Antrieb verwendeten und der von der Brennstoffzelle erzeugten Energie wird den Nebenaggregaten zugerechnet.

$$E_{el,NA} = E_{el,BZ} - E_{el,Antr} \quad (5-18)$$

Der so errechnete Energieverbrauch der Nebenaggregate ist in Tabelle 5.6 dargestellt. Die Leistungsaufnahmen in der Simulation entstammen Kennlinien bzw. Kennfeldern der Pumpen und Lüfterantriebe zu NECAR 3. Die Abweichung der Simulation von der Fahrzyklus-Messung (NEFZ) im Energieverbrauch der Nebenaggregate beträgt 1,1% bzw. 20 Wh.

	Messung	Simulation	Abweichung [%]
$E_{el,NA}$ [kWh]	1,12	1,14	-1,1

Tabelle 5.6: Energieverbrauch der Nebenaggregate

5.7. Validierung des BZS

Wie aus den vorangegangenen Abschnitten hervorgeht, zeigen die mit der Simulation ermittelten Energieverbräuche und Wirkungsgrade der Teilsysteme eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Entscheidend für die Beurteilung eines Simulationsmodells ist dennoch eine Betrachtung des Gesamtsystems. Dazu ist zu analysieren, in welchen Betriebsbereichen Energie umgesetzt wird. Das Verhalten des BZS im Fahrzyklus (NEFZ) kann zu einer dreidimensionalen Darstellung wie in Abbildung 5.8 zusammengefasst werden. Auf der Abszisse ist die elektrische BZ-Leistung ($P_{el,BZ}$) als Indikator für den BZS-Betriebspunkt und

auf der Ordinate der momentane BZS-Wirkungsgrad $\eta_{\text{BZS,BN}}$ (errechnet ohne die Bordnetz-Energieaufnahme E_{BN}) aufgetragen.

$$\eta_{\text{BZS,BN}} = \frac{P_{\text{el,Antr,BN}}}{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH,Verd}} \text{Hu}_{\text{CH}_3\text{OH}}} = \frac{P_{\text{el,Antr,BN}}}{P_{\text{CH}_3\text{OH}}} \quad (5-19)$$

Abzisse (Index i) und Ordinate (Index j) werden unterteilt. Die Segmente $s_{i,j}$ der entstehenden Gitterstruktur des Diagramms haben eine Schwärzung, die sich aus der in diesem Segment umgesetzten Energie errechnet. Die dritte Dimension wird durch den Schwärzungsgrad dargestellt. Die Schwärzung wird in der Darstellung auf die maximal umgesetzte Energie pro Segment s_{max} innerhalb des Diagramms bezogen.

$$s_{i,j} = \int P_{\text{CH}_3\text{OH}}(P_{\text{el,BZ,i}}, \eta_{\text{BZS,BN,j}}) dt = E_{\text{CH}_3\text{OH,i,j}}(P_{\text{el,BZ,i}}, \eta_{\text{BZS,BN,j}}) \quad (5-20)$$

Im Unterschied zu einer Darstellung mit einer Häufigkeitsverteilung erhalten die Bereiche eine nach dem Energieumsatz gewichtete Bedeutung. Innerhalb jedes Segments der Abzisse kann der momentane Wirkungsgrad des BZS (ohne die Bordnetz-Energieaufnahme) ermittelt werden. Fügt man diese Segmente zusammen, so entsteht eine Wirkungsgradkurve.

$$\eta_{\text{BZS,BN,i}} = \frac{P_{\text{el,Antr,BN}}(P_{\text{el,BZ,i}})}{P_{\text{CH}_3\text{OH}}(P_{\text{el,BZ,i}})} \quad (5-21)$$

In Abbildung 5.9 ist die Energieverteilung für das zur Validierung verwendete Simulationsmodell dargestellt. Die Wirkungsgradberechnung erfolgt hier inklusive der Leistungsaufnahme des Bordnetzes, analog zu Gleichung 4-4 und abweichend von Gleichung 5-19.

$$\eta_{\text{BZS}} = \frac{P_{\text{el,Antr}}}{P_{\text{CH}_3\text{OH}}} \quad (5-22)$$

Der mögliche Wirkungsgradbereich^A ($\eta_{\text{BZS,max}}, \eta_{\text{BZS,min}}$) innerhalb eines Betriebspunktes $P_{\text{el,BZ,i}}$ wird bei dem Simulationsmodell bestimmt durch die Leistungsaufnahme der betriebspunkt-unabhängigen Nebenaggregate (z.B. Kühlaggregate).

Ein Vergleich der Energieverteilung zwischen Messung (Abbildung 5.8) und Simulation (Abbildung 5.9) zeigt, dass die Wirkungsgrade des simulierten BZS bis ca. 15 kW etwas niedriger sind als bei der Messung. Die höheren Wirkungsgrade des vermessenen BZS im unteren Leistungsbereich resultieren auch aus der messtechnisch bedingten unterschiedlichen Bilanzierung. Während das Simulationsmodell das Bordnetz dem BZS zurechnet, wird diese bei dem vermessenen BZS dem Antrieb zugerechnet. Bei den tabellarischen Validierungen in Tabelle 5.7 wird dieser Umstand korrigiert. Die qualitative Charakteristik der Verteilung in Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9 wird davon nicht beeinflusst.

^A Bei dynamischem Betrieb des BZS sind kurzfristig auch niedrigere/höhere Momentan-Wirkungsgrade möglich, da durch das Verzögerungsverhalten des GES ein Phasenverzug zwischen den Bezugsgrößen der Wirkungsgradberechnung entsteht.

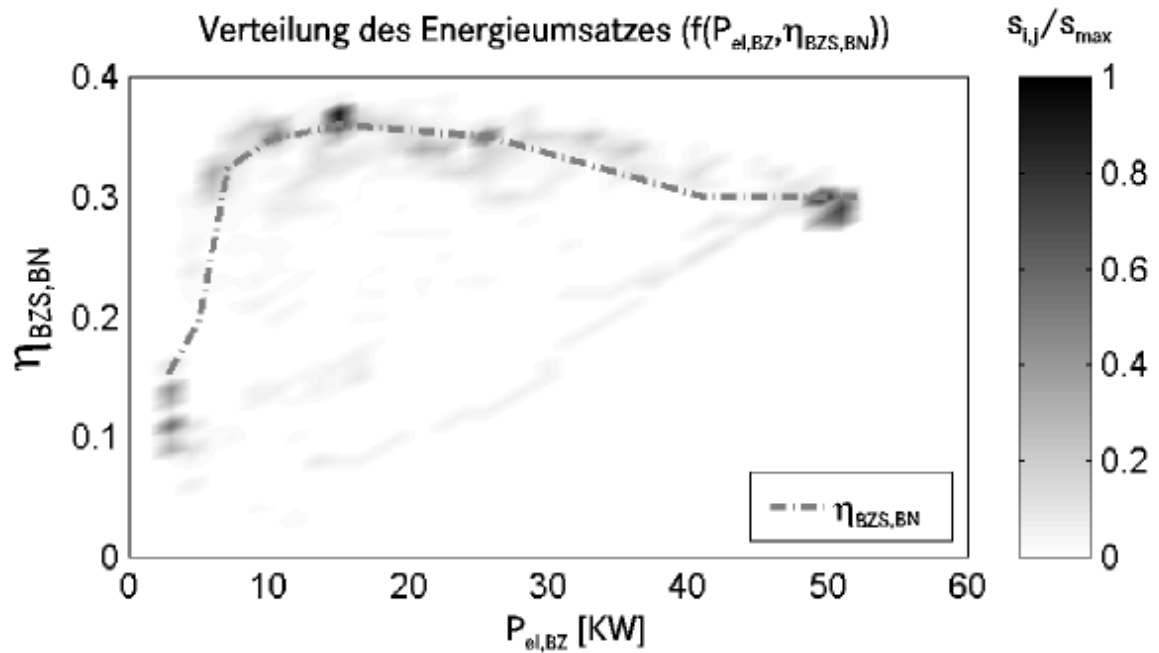


Abbildung 5.8: Wirkungsgrad und Energieverteilung des BZS (Messung)

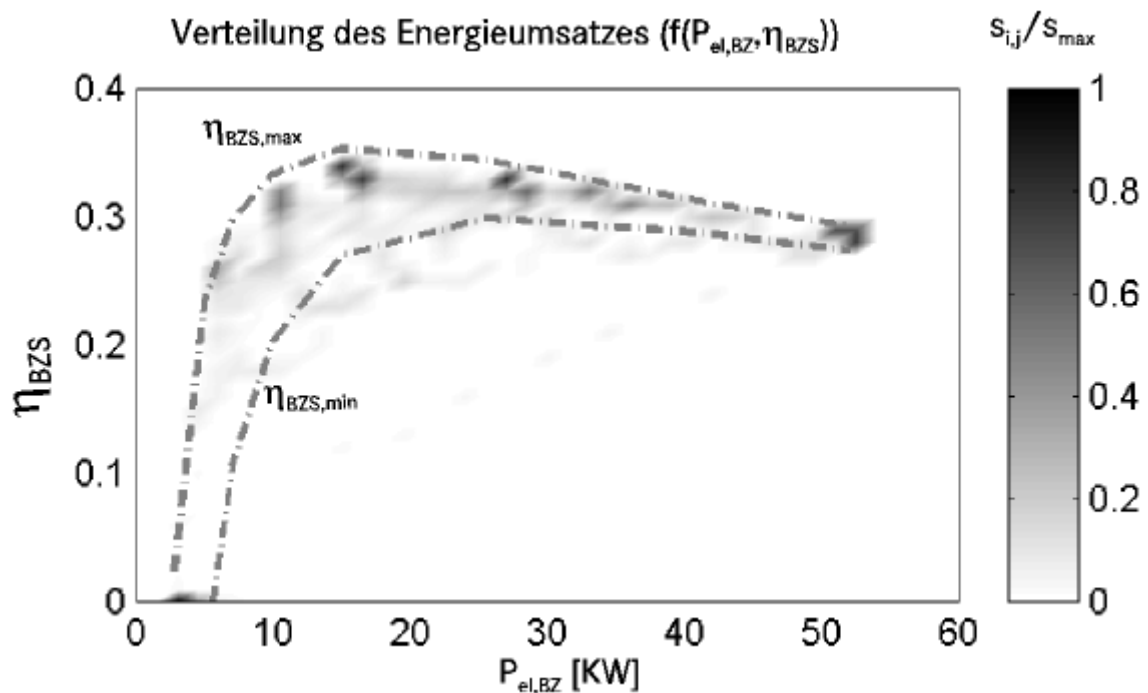


Abbildung 5.9: Wirkungsgrad und Energieverteilung des BZS (Simulation)

Wie man aus Abbildung 5.8 entnehmen kann, wird bei der Messung im Volllastbetrieb und bei ca. 15 kW Leistung ($P_{el,BZ}$) am meisten Energie umgesetzt. Weitere relevante Energieumsätze treten bei ca. 11 kW und bei ca. 26 kW elektrischer BZ-Leistung auf. Eine ähnliche Energieverteilung zeigt auch die Analyse der Simulation (Abbildung 5.9) Bei Volllast (50 kW $P_{el,BZ}$) und einer elektrischen BZ-Leistung von ca. 15 kW treten die größten Energieumsätze auf (vgl. Abbildung 5.8).

Weitere Maxima des Energieumsatzes treten bei. ca. 11 kW und bei ca. 27 kW elektrischer BZ-Leistung auf. Insgesamt zeigt das Simulationsmodell auch als Gesamtsystem eine ähnliche Charakteristik der Energieverteilung wie der vermessene Prototyp.

Das simulierte BZS wird analog zu den Teilsystemen im Hinblick auf den Energieverbrauch und den Wirkungsgrad bilanziert und mit dem vermessenen System verglichen. Die Werte sind in Tabelle 5.7 dargestellt. Analog zur Darstellung in Tabelle 5.3 wird auch hier die Bordnetzenergie dem Antrieb zugerechnet. Bei der Betrachtung des Wirkungsgrades erkennt man einen in der Simulation um 1,4% geringeren Wirkungsgrad des BZS.

	Messung	Simulation	Abweichung [%]
$E_{el,Antr}$ [kWh]	2,292*	2,260	1,4
$E_{el,Antr,BN}$ (inkl. Bordnetz) [kWh]	2,476	2,444	1,3
E_{CH_3OH} [kWh]	8,608	8,640	-0,4
η_{BZS}	0,27*	0,26	
$\eta_{BZS,BN}$ (exkl. Bordnetz)	0,29	0,28	1,7

*errechnete Werte mit der korrigierten Bilanzierung des 12V-Bordnetz-Energieverbrauchs

Tabelle 5.7: Vergleich der BZS-Wirkungsgrade bei Messung und Simulation

6 Simulationstechnische Untersuchung zu Antriebskonzepten

Die Ziele und Inhalte dieses Kapitels sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Ziel	Identifikation von Massnahmen zur Darstellung eines verbrauchsoptimierten BZ-Fahrzeugs
Inhalt	<ul style="list-style-type: none"> • Simulation des Basis-Fahrzeugs, Analyse der Simulationsergebnisse und Identifikation zu optimierender Schwachstellen (Abschnitt 6.1) • Entwicklung verbrauchsenkender Massnahmen, Vergleich der Simulationsergebnisse (Abschnitt 6.2) • Beschreibung des Zusammenwirkens verschiedener verbrauchsenkender Massnahmen, Ermittlung günstiger Kombinationen (Abschnitt 6.3) • Schrittweise Synthese eines verbrauchsoptimierten BZ-Fahrzeugs (Abschnitt 6.4)

Tabelle 6.1: Ziele und Inhalte des Kapitels

Zunächst wird die Basis-Konfiguration des BZ-Fahrzeugs im NEFZ analysiert. Im Anschluss daran werden verbrauchssenkende Maßnahmen entwickelt und im NEFZ untersucht. Um eine Aussage zur Übertragbarkeit der im NEFZ gewonnenen Ergebnisse zu gewinnen, werden die verbrauchssenkenden Maßnahmen auch in US-amerikanischen Fahrzyklen untersucht (im Anhang D).

Aus den gewonnen Erkenntnissen werden dann Aussagen über die Wechselwirkungen verschiedener verbrauchssenkender Maßnahmen gewonnen und Empfehlungen für günstige Kombinationen entwickelt.

Das Ziel dieser Arbeit, ein verbrauchsoptimiertes BZ-Fahrzeug mit dem bereits in Abschnitt 1.2 definierten Zielverbrauchs von 2,8 l/100 km Dieseläquivalent im NEFZ zu entwickeln, wird anhand einer schrittweisen Optimierung des Fahrzeugkonzeptes mit sinnvollen verbrauchssenkenden Maßnahmen erreicht.

Alle nachfolgenden Betrachtungen werden ausgehend von einer Basis-Konfiguration eines BZ-Fahrzeugs durchgeführt. Dieses Fahrzeug stellt hinsichtlich der erzielten Wirkungsgrade, Gewichte und Antriebsleistungen den Stand der Technik dar. Die wesentlichen Eigenschaften dieses bereits in vorangegangenen Kapiteln als Basis-Fahrzeug bezeichneten Referenzmodells sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

	Beschreibung	Wert
Fahrzeug	Mercedes-Benz A-Klasse BZ, SMK (ECE) [kg]	1590
Getriebe	Festübersetzung, i [-]	6,48
El. Antrieb	eine Asynchronmaschine, $P_{\text{mech,max}}$ [KW]	55/64*
Antriebskonzept	BZ-Lean-Fahrzeug	
BZS	BZS mit selektiver Oxidation, Reformat-Betrieb in BZ, Hochdruck-BZ	
Luftmodul	Hochdruck-Kompressor mit Expander	
GES	Lastspreizung	40
BZ	max. Stromdichte (I/A) [A/cm ²]	0,843
	max. Leistung $P_{\text{el,BZ}}$ [KW]	73,3
	Zellen	440
	Fläche pro Zelle A_{Zelle} [cm ²]	300

*kurzfristige Spitzenleistung

Tabelle 6.2: Kenndaten des Basis-Simulationsmodells

6.1. Simulationsergebnisse Basisfahrzeug

Für die nachfolgenden Betrachtungen gelten die in Abbildung 5.1 gezeigten Schnittstellen für ein Simulationsmodell. Bei der Betrachtung der mechanischen Energie des Getriebes und bei der Antriebsenergie des elektrischen Antriebs werden nur positive Drehmomente und der elektrische Energiebedarf berücksichtigt. Bremsmomente und rekuperativ gewonnene Energie werden nicht integriert. Die entsprechenden Größen $E_{\text{Getr,Antr}}$ und $E_{\text{el,Antr}}$ sind daher mit den Indizes „Antr“ für Antriebsmodus versehen (vgl. Gl 4-104)^A.

6.1.1 Fahrwiderstand

Das Basis-Fahrzeug wird im NEFZ untersucht. Der Energieverbrauch an den Schnittstellen des Gesamtfahrzeugs (vgl. Abbildung 5.1) ist in Tabelle 6.3 dargestellt. Die am Rad anfallende Energie E_{Rad} wird aus der positiven Zugkraft^B und der Fahrgeschwindigkeit ermittelt. Die Zugkraft setzt sich nach Gl. 4-104 aus Rollwiderstandskraft (F_{RR}), aerodynamischen Widerstand (F_{Aero}) und Beschleunigungswiderstand^C (vgl. Gl. 4-107) zusammen.

^A Auch bei einem BZ-Lean-Fahrzeug wird zur Entlastung der Bremsanlage ggf. elektrisch gebremst. Die Energie wird über einen Widerstand in das Kühlsystem eingeleitet.

^B Bremskräfte werden nicht integriert.

^C Im NEFZ und in den US-City- bzw. Highway-Fahrzyklen ist der Steigungswiderstand gleich null.

Variante	E_{Rad} [kWh]	$E_{\text{Getr,Antr}}$ [kWh]	$E_{\text{el,Antr}}/E_{\text{el,BZs}}$ [kWh]	$E_{\text{el,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{H2,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{CH3OH,Verd}}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
Basis	1,31	1,38	1,75	2,40	3,57	5,13	4,71

Tabelle 6.3: Energieverbrauch Basis-Fahrzeug

$$F_x = a_x \underbrace{\left(m_{\text{Fzg}} + \frac{\Theta_{\text{EA\&Getr}} + \Theta_{\text{Räder}}}{r_{\text{Dyn}}^2} \right)}_{\text{Beschleunigungswiderstand}} + F_{\text{Aero}} + F_{\text{RR}} \quad (6-1)$$

Die Aufteilung der Fahrwiderstandsenergie in die drei Teilbeträge Rollwiderstand, Aerodynamikanteil und Beschleunigungswiderstand ist in Tabelle 6.4 dargestellt.

	E_{RR}	E_{Aero}	E_{ax}	E_{Rad}
Energie [kWh]	0,39	0,48	0,44	1,31
in %	30,0	36,6	33,5	

Tabelle 6.4: Aufteilung der Fahrwiderstandsenergie

Beachtenswert ist der hohe Aerodynamikanteil E_{Aero} an der Fahrwiderstandsenergie. Das für den Luftwiderstand maßgebliche Produkt $c_w A$ beträgt im Falle des hier gewählten Fahrzeugs der Kompaktklasse $0,739 \text{ m}^2$ ($c_w = 0,316^A$, $A = 2,34 \text{ m}^2$). Damit übertrifft das hier betrachtete Fahrzeug übliche Werte für Fahrzeuge der Luxusklasse (Mercedes-Benz S600: $c_w A = 0,644 \text{ m}^2$). In anderen Verbrauchsszenarien für BZ-Fahrzeuge der Kompaktklasse [17] wird von $c_w A = 0,615 \text{ m}^2$ ausgegangen.

Bei gegebener Aerodynamik kann der Energieverbrauch über einen geringeren Rollwiderstand und über ein geringeres Fahrzeuggewicht gesenkt werden. Der Rollwiderstandskoeffizient ist mit durchschnittlich (über den NEFZ) $0,008$ vergleichsweise gering. In anderen Szenarien [17] für Fahrzeuge der Kompaktklasse wird von Rollwiderstandskoeffizienten von $0,013$ ausgegangen. Eine andere Möglichkeit, den Rollwiderstand zu reduzieren, ist nach Gleichung 4-100 eine Gewichtsreduktion.

$$F_{\text{RR}} = c_{\text{RR}} (v_{\text{Fzg}}) m_{\text{Fzg}} g \quad (6-2)$$

Ein geringeres Fahrzeuggewicht senkt nach Gleichung 4-107 auch den Beschleunigungswiderstand. Der Beschleunigungswiderstand E_{ax} beträgt ca. 33% der Fahrenergie. Durch Verluste im Getriebe ergibt sich die mechanische Energie am Getriebeeingang ($E_{\text{Getr,Antr}}$).

$$E_{\text{Getr,Antr}} = \int M_{\text{Getr,Antr}} n_{\text{Getr}} dt \quad (6-3)$$

^A Dieser Wert gilt nur für das BZ-Fahrzeug mit der BZ-typischen Kühlluftführung.

Der Getriebewirkungsgrad im Fahrzyklus errechnet sich aus dem Verhältnis der aufgewendeten Energien.

$$\eta_{\text{Getr}} = \frac{E_{\text{Rad}}}{E_{\text{Getr,Antr}}} \quad (6-4)$$

Der Getriebewirkungsgrad und verschiedene andere Wirkungsgrade (im Fahrzyklus) sind in Tabelle 6.5 dargestellt.

Variante	η_{Getr}	η_{EA}	η_{BZS}	η_{BZ}	η_{GES}	η_{Strang}
Basis	0,95	0,79	0,34	0,67	0,70	0,26

Tabelle 6.5: Wirkungsgrade des Basisfahrzeugs

Wie aus Tabelle 6.5 ersichtlich wird, arbeitet das Getriebe bei sehr hohen Wirkungsgraden. Das Wirkungsgrad-Kennfeld ist im Anhang C, Abbildung C.13 dargestellt. Aus dem homogenen Wirkungsgrad-Kennfeld wird ersichtlich, dass eine verlustarme Drehzahl-/Drehmomentwandlung auch bei niedrigen Drehmomenten realisiert wird. Drehzahlen unter 1000/min und sehr niedrige Drehmomente führen zu geringeren Wirkungsgraden (minimal $\eta_{\text{Getr}} = 0,91$).

6.1.2 Elektrischer Antrieb

Bei dem elektrischen Antrieb wird im Fahrzyklus ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von $\eta_{\text{el,Antr}} = 0,79$ ermittelt.

$$\eta_{\text{el,Antr}} = \frac{E_{\text{Getr,Antr}}}{E_{\text{el,Antr}}} \quad (6-5)$$

Der ermittelte Wirkungsgrad erscheint gemessen an einem Bestpunkt-Wirkungsgrad von 0,9 gering. Eine Analyse des Energieumsatzes soll zeigen, warum sich der ermittelte Wirkungsgrad einstellt. Das Verhalten des elektrischen Antriebs im Fahrzyklus (NEFZ) kann zu einer dreidimensionalen Darstellung wie in Abbildung 6.1 zusammengefasst werden (vgl. Kap. 5, Abbildung 5.8). Auf der Abszisse ist die Drehzahl (Index i) und auf der Ordinate das Drehmoment (Index j) des Antriebs aufgetragen. Die Segmente $s_{i,j}$ der entstehenden Gitterstruktur des Diagramms haben eine Schwärzung, die sich aus der in diesem Segment umgesetzten mechanischen Energie errechnet. Die dritte Dimension wird durch den Schwärzungsgrad dargestellt. Die Schwärzung wird in der Darstellung auf die maximale umgesetzte Energie pro Segment s_{max} innerhalb des Diagramms bezogen.

$$s_{i,j} = \int M_{\text{Antr},j} n_{\text{Getr},i} dt \quad (6-6)$$

Für den Fall des generatorischen Bremsens errechnet sich die Schwärzung aus dem Bremsmoment und der Drehzahl.

$$s_{i,j} = \int M_{\text{Brems},j} n_{\text{Getr},i} dt \quad (6-7)$$

Im Unterschied zu einer Darstellung mit einer Häufigkeitsverteilung erhalten die Segmente eine nach dem Energieumsatz gewichtete Bedeutung. Im unteren Teil der Abbildung ist das Kennfeld des elektrischen Antriebs mit Leistungshyperbeln und den Höhenlinien des elektrischen Wirkungsgrades dargestellt.

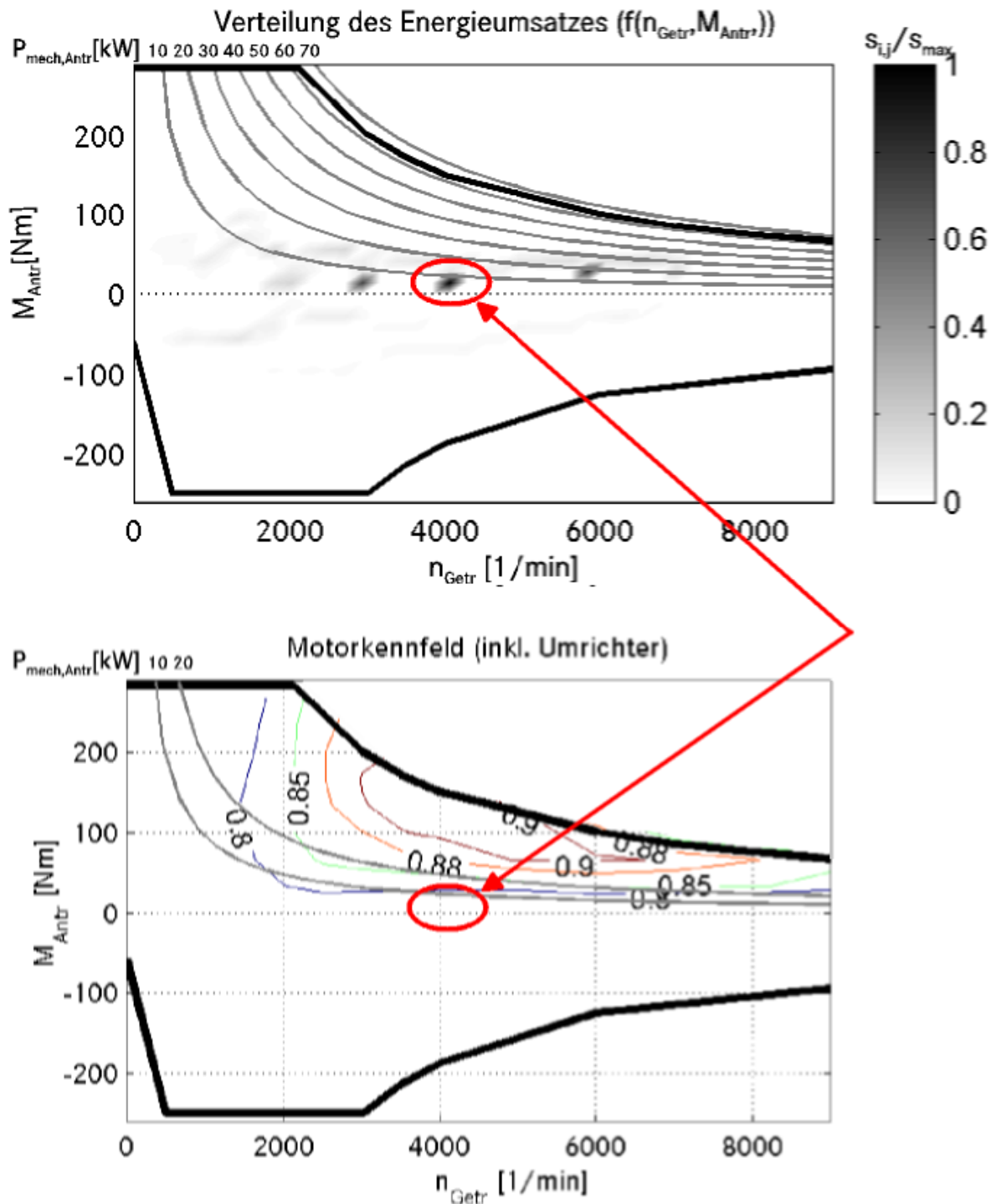


Abbildung 6.1: Verteilung des Energieumsatzes des elektrischen Antriebs

Wie aus den rot markierten Bereichen in Abbildung 6.1 zu entnehmen ist, wird ein wesentlicher Anteil der Energie bei mittleren Drehzahlen (ca. 4000 1/min) und bei sehr niedrigen mechanischen Leistungen kleiner 10 kW umgesetzt. Wie aus dem unteren Teil der Abbildung zu entnehmen ist, beträgt der Wirkungsgrad hier weniger als 0,8 (genauer: $\eta_{\text{el,Antr}} = 0,70$ bis

0,78). Auch in den übrigen Betriebspunkten mit hohem Energieumsatz (bei 3000 1/min und bei 6000 1/min) befindet sich der elektrische Antrieb aufgrund zu niedriger Drehmomente außerhalb seines optimalen Betriebsbereiches.

6.1.3 Brennstoffzellensystem

Wie aus Tabelle 6.3 hervorgeht, wird die elektrische Energie des BZS vollständig in die elektrische Energie des Fährantriebs umgesetzt. Der Wirkungsgrad des BZS ist aus Tabelle 6.5 zu entnehmen. Mit einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von $\eta_{\text{BZS}} = 0,34$ im NEFZ ist das hier dargestellte BZS deutlich schlechter als vergleichbare BZS in veröffentlichten Studien ([11] $\eta_{\text{BZS}} = 0,54$, [6]^A $\eta_{\text{BZS}} = 0,44$). Der Spitzenwirkungsgrad des hier untersuchten BZS liegt bei ca. 0,45. Analog zum elektrischen Antrieb soll eine Analyse des Energieumsatzes zeigen, warum der ermittelte Wirkungsgrad im Fahrzyklus so deutlich von dem Spitzenwirkungsgrad abweicht. Das Verhalten des BZS im Fahrzyklus wird in einer dreidimensionalen Darstellung zusammengefasst (vgl. Kap. 5, Abbildung 5.8). Auf der Abszisse ist die elektrische Leistung der Brennstoffzelle als Indikator für den Betriebspunkt (Index i) und auf der Ordinate ist der BZS-Wirkungsgrad (Index j) aufgetragen. Die dritte Dimension wird durch den Schwärzungsgrad dargestellt. Die Schwärzung der Segmente $s_{i,j}$ errechnet sich aus der in diesem Segment umgesetzten chemischen Energie des Methanols.

$$s_{i,j} = \int P_{\text{CH}_3\text{OH}}(P_{\text{el,BZ},i}, \eta_{\text{BZS},j}) dt = E_{\text{CH}_3\text{OH},i,j}(P_{\text{el,BZ},i}, \eta_{\text{BZS},j}) \quad (6-8)$$

Zur besseren Darstellung von Bereichen niedrigen Energieumsatzes wird die Skalierung der Schwärzung auf 30% der maximal umgesetzten Energie pro Segment s_{max} innerhalb des Diagramms bezogen. Die dargestellte Wirkungsgradkennlinie stellt den bestmöglichen stationär erreichbaren Wirkungsgrad des BZS dar^B.

Ein nennenswerter Energieumsatz findet bei Wirkungsgraden deutlich unterhalb der stationären Kennlinie statt. Auffällig ist ein deutlicher Energieumsatz bei einem Wirkungsgrad von null (Leerlauf des BZS).

Die Energieaufnahme der Nebenaggregate im Fahrzyklus ist in Tabelle 6.6 dargestellt.

Variante	$E_{\text{el,Komp}}$ [kWh]	$E_{\text{el,KS}}$ [kWh]	$E_{\text{el,BN}}$ [kWh]	$E_{\text{el,NA}}$ [kWh]
Basis	0,45	0,07	0,13	0,64

Tabelle 6.6: Energieaufnahme der Nebenaggregate (Basis)

Bemerkenswert ist hier der Energieverbrauch der Kühlaggregate (Wasserpumpe und Kühlerlüfter). Mit 0,07 kWh bzw. einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme von ca. 220 W benötigt das Kühlsystem nur unwesentlich mehr Leistung (bzw. Energie) als im Leerlauf (200 W). Die Betriebsstrategie des Kühlsystems ist so ausgelegt, dass die Kühlaggregate bis

^A nur ECE-Stadt

^B Aufgrund der Gitterstruktur (i Zeilen, j Spalten) kann die Segmentgrenze geringfügig von der exakten x-y-Koordinate der Wirkungsgradkennlinie abweichen.

zur maximal zulässigen Betriebstemperatur der BZ mit minimaler Leistung betrieben werden. Die Kühlaggregate werden nicht im Hinblick auf eine ausgeglichene Wasserbilanz betrieben. Im Fahrzyklus werden temporäre Wasserdefizite durch einen Ausgleichsbehälter abgedeckt. Der Pegelstand am Ende des Fahrzyklus kann dabei vom Ausgangszustand leicht abweichen. Da der Energieverbrauch mit dieser Betriebsstrategie im NEFZ und den US-Fahrzyklen nicht mehr signifikant reduziert werden kann (Einsparpotential 20 W, s. oben) wird für weitere energetische Betrachtungen zur Optimierung des Energieverbrauchs die Betriebsstrategie des Kühlsystems nicht weiter optimiert.

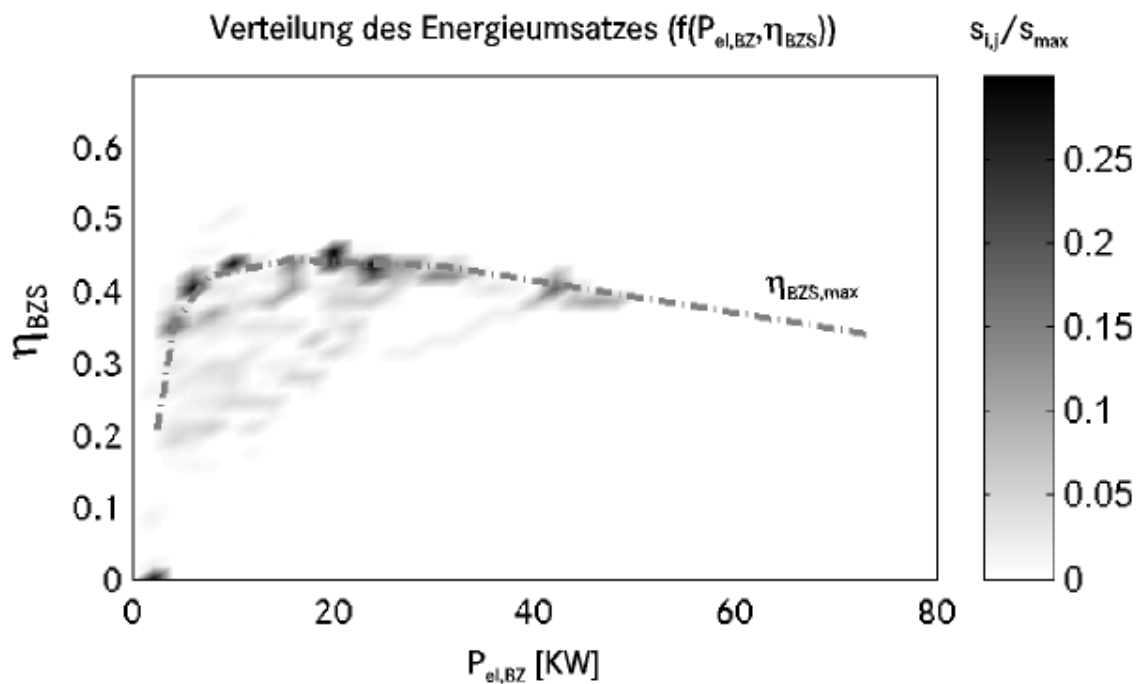


Abbildung 6.2: Verteilung des Energieumsatzes des BZS

Einen deutlich größeren Energieverbrauch als das Kühlsystem zeigt das Luftmodul. Mit 0,44 kWh beträgt der Energieverbrauch des Luftmoduls ca. 25% der für den elektrischen Fahrentrieb benötigten Energie. Die übrige Energie der Nebenverbraucher, die nicht dem Luftmodul oder dem Kühlsystem zugeordnet werden kann, wird vom 12V-Bordnetz verbraucht. Damit zeigt sich, dass auch der Energieverbrauch des Bordnetzes (mit ca. 0,13 kWh doppelt so hoch wie der des Kühlsystems) eine nennenswerte Rolle bei der energetischen Betrachtung des BZS spielt.

6.1.4 Brennstoffzelle

Mit einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 0,67 (Tabelle 6.5) befindet sich die hier simulierte Brennstoffzelle deutlich oberhalb ihres ungünstigsten Betriebspunktes (Bei Vollast: $\eta_{BZ} = 0,53$, vgl. Tabelle 4.5). Die häufig gebrauchte Aussage [4, 11, 25], dass Brennstoffzellen hohe Wirkungsgrade in üblichen Fahrzyklen erzielen, wird hier bestätigt.

6.1.5 Gaserzeugung

Der Wirkungsgrad der Gaserzeugung wird nach Gleichung 5-7 aus dem in der Brennstoffzelle elektrochemisch umgesetzten Wasserstoff und dem der Gaserzeugung zugeführten Methanol errechnet. Für den stationären Betriebszustand wird über alle Betriebspunkte ein konstanter Wirkungsgrad von 0,78 ermittelt (vgl. Tabelle 4.4). Der im Fahrzyklus ermittelte Wert liegt mit $\eta_{\text{GES}} = 0,7$ (Tabelle 6.5) deutlich niedriger. Eine Analyse des Energieumsatzes zeigt, warum der ermittelte Wirkungsgrad im Fahrzyklus so deutlich von dem stationären Wert abweicht. Das Verhalten der Gaserzeugung im Fahrzyklus wird zu einer dreidimensionalen Darstellung zusammengefasst. Auf der Abszisse ist die elektrische Leistung der Brennstoffzelle als Indikator für den Betriebspunkt (Index i) und auf der Ordinate ist der Wirkungsgrad der Gaserzeugung (Index j) aufgetragen. Die dritte Dimension wird durch den Schwärzungsgrad dargestellt. Die Schwärzung der Segmente $s_{i,j}$ errechnet sich aus der in diesem Segment umgesetzten chemischen Energie des Methanols.

$$s_{i,j} = \int P_{\text{CH}_3\text{OH}}(P_{\text{el,BZ},i}, \eta_{\text{GES},j}) dt = E_{\text{CH}_3\text{OH},i,j}(P_{\text{el,BZ},i}, \eta_{\text{GES},j}) \quad (6-9)$$

Um Bereiche niedrigeren Energieumsatzes deutlicher darzustellen, wird die Skalierung der Schwärzung auf 30% der maximal umgesetzten Energie pro Segment s_{max} innerhalb des Diagramms bezogen. Die dargestellte Wirkungsgradkennlinie stellt den stationären Wirkungsgrad der Gaserzeugung dar.

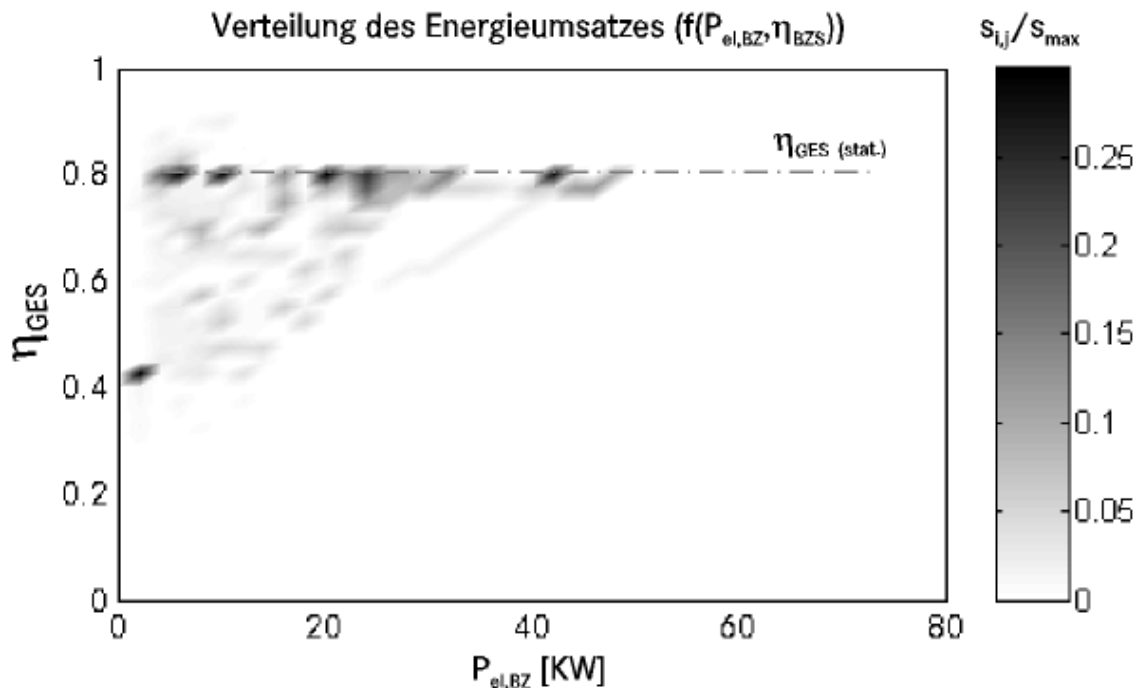


Abbildung 6.3: Verteilung des Energieumsatzes der Gaserzeugung

Wie in Abbildung 6.3 zu erkennen ist, findet ein nennenswerter Energieumsatz bei Wirkungsgraden deutlich unterhalb der stationären Kennlinie statt. Auffällig ist auch ein deutlicher Energieumsatz bei einem Wirkungsgrad von ca. 0,41 bei gleichzeitig geringer elektrischer Leistung. Der Energieumsatz bei Wirkungsgraden unterhalb der stationären Kennlinie ist

durch Überdosierungen im dynamischen Betrieb der Gaserzeugung zu erklären. Bei schnellen Lastwechseln kann die Gaserzeugung die Produktion von Wasserstoff nicht so schnell reduzieren, wie dies erforderlich wäre. Der Energieumsatz mit dem Wirkungsgrad von 0,42 bei einer elektrischen Leistung von ca. 1,4 kW erklärt sich durch den Leerlaufzustand. Im Leerlauf benötigt das BZS eine elektrische Leistung von ca. 1,4 kW. Da keine Leistung vom Fahrantrieb gefordert wird, beträgt die in der BZ erzeugte elektrische Leistung ebenfalls ca. 1,4 kW. Der hierfür benötigte Wasserstoff am Eintritt der BZ beträgt ca. 1,8 kW. Die von der Gaserzeugung im Leerlauf produzierte Menge an Wasserstoff wird durch die Lastspreizung bestimmt. Es kann eine minimale Wasserstoffmenge erzeugt werden, die einer chemischen Leistung von ca. 3,5 kW entspricht. Die überschüssigen 1,7 kW werden nicht elektrisch genutzt und müssen im katalytischen Brenner verbrannt werden.^A

Der Wirkungsgrad der Gaserzeugung im Leerlauf ($\eta_{\text{GES,LL}}$) errechnet sich daher mit der minimal erzeugbaren Leistung der Gaserzeugung zu ca. 0,41, wie auch Abbildung 6.3 zu entnehmen ist.

$$\eta_{\text{GES,LL}} = \frac{\int P_{\text{H}_2, \text{BZ}} dt}{\int P_{\text{CH}_3\text{OH, min}} dt} \quad (6-10)$$

6.1.6 Gesamtfahrzeug

Der Antriebsstrangwirkungsgrad beschreibt das Gesamtfahrzeugverhalten. Er ist für den Momentan-Betriebspunkt durch Gleichung 4-110 beschrieben. Für den Fahrzyklus wird der Antriebsstrangwirkungsgrad mit den in Tabelle 6.3 enthaltenen Energien aus Zugkraft (E_{Rad}) und Methanolverbrauch ($E_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}}$) berechnet.

$$\eta_{\text{Strang}} = \frac{E_{\text{Rad}}}{E_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}}} \quad (6-11)$$

Der Antriebsstrangwirkungsgrad für das Basisfahrzeug ist in Tabelle 6.5 dargestellt. Der für das Basis-Fahrzeug ermittelte Wert für η_{Strang} liegt bei 0,26. Die Schwankungsbreite des Antriebsstrangwirkungsgrades in vergleichbaren Studien reicht von 0,19 - 0,21[17]^B bis 0,31 [11]. Der simulierte Verbrauch des Dieseläquivalents ist in Tabelle 6.3 angegeben. Mit 4,67 l/100 km liegt der erzielte Wert deutlich über dem in Abschnitt 1.2 bestimmten Verbrauchsziel von 2,8 l/100 km.

Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten zur Reduktion des Energieverbrauchs und deren Auswirkung vorgestellt.

^A Langfristig bzw. stationär kann so der Offgasanteil etwas reduziert werden. Dieser Effekt wird in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

^B im ECE-Zyklus, Hybrid-BZ-Fahrzeug

6.2. Möglichkeiten zur Reduktion des Energieverbrauchs

In der untenstehenden Tabelle werden die zur Reduktion des Energieverbrauchs untersuchten Maßnahmen im Überblick dargestellt. In der Spalte Basis ist die Konfiguration des Basisfahrzeugs beschrieben. In den Spalten Alternative 1-3 sind alternative Varianten dargestellt. So wird beispielsweise in der Kategorie Fahrzeug nur eine Variante mit reduziertem Gewicht und einer SMK-Einteilung von 1360 kg betrachtet.

	Basis	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3
Fahrzeug	SMK 1590	reduziertes Gewicht (SMK 1360)		
Getriebe	Festüber- setzung	2-Gang-Getriebe (2-Gang)		
elektrischer Antrieb	1 E-Motor	2 E-Motoren (2-Motor)		
Antriebskonzept				
Prinzip	Lean-BZ	leistungsverzweigter Hybrid (Hybrid LV)	kombinierter Hybrid (Hybrid K)	
DC/DC-Wandlung	-	unidirektionaler DC/DC-Wandler (Hybrid LVU)	bidirektionaler DC/DC-Wandler (Hybrid LVB)	
Betriebsstrategie	-	leicht phlegmatisiert (Hybrid LVU-LP ,	stark phlegmatisiert (Hybrid LVU-SP ,	stationärer Betrieb (Hybrid LVU-ST , Hybrid LVB-ST)
BZS-Konzept				
Gasreinigung	BZS mit selektiver Oxidation	BZS mit PdAg- Membran- Gasreinigung (Membran)		
Druckniveau	BZS mit Hochdruck-BZ	BZS mit Umge- bungsdruck-BZ (Umg.dr.-BZS)		
Luftversorgung	Luftmodul mit Kompressor und Expander	Luftmodul mit 2 Kompressoren und Expandern (2-Komp.)		
Gaszwischenspeicherung	-	Gasspeicher mit el. Kompressor (Gasspeicher)		
Bordnetzmodifikation Betriebsstrategie	-	BZS-Abschaltung im Leerlauf mit Batterie- Ladestrategie (Abschaltung)		
BZS-Auslegung				
Lastspreizung der Gaserzeugung	Lastspreizung von 1:40	Lastspreizung von 1:60 (Lastspreizung+)		
BZ-Auslegung	max. Stromdichte 0,843 A/cm ² , 440 Zellen in BZ	max. Stromdichte 0,39 A/cm ² , 770 Zellen in BZ (BZ-Zellen+)	max. Stromdichte 0,39 A/cm ² , 440 Zellen in BZ (BZ-A_{Zelle}+)	

Tabelle 6.7: Übersicht der untersuchten Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion

Ein Schwerpunkt der Simulationsuntersuchungen liegt bei den Antriebs- bzw. Hybridkonzepten. Hier werden zwei alternative Antriebskonzepte, zwei alternative DC/DC-Wandlungen und drei alternative Betriebsstrategien untersucht. Die im Folgenden verwendete Bezeichnung der Maßnahme ist dabei fett gedruckt (z.B: **SMK 1360**).

Zunächst wird eine Reduktion der Fahrwiderstände betrachtet. Nachfolgend werden Modifikationen des Getriebes, am elektrischen Antrieb sowie Antriebskonzepte für BZ-Fahrzeuge mit unterschiedlichen Hybridstrategien betrachtet. Im Anschluss daran werden Modifikationen am BZS untersucht. Hierbei werden zunächst Konzeptmodifikationen und danach Auslegungsmodifikationen der Gaserzeugung und der BZ betrachtet.

6.2.1 Modifikation des Fahrzeugs

Modifikations-Index
Fahrzeug
Getriebe
elektrischer Antrieb
Antriebskonzept
BZS-Konzept
BZS-Auslegung

Das Ziel dieser Modifikation ist es, den Energiebedarf am Rad (E_{Rad}) zu reduzieren. Hierzu wird eine Gewichtsreduktion^A angenommen, da hiermit sowohl die Beschleunigungs- als auch die Rollwiderstände reduziert werden. Das angenommene Fahrzeuggewicht wird als ECE-Gewicht inklusive BZS und elektrischem Antrieb angegeben. Um den Einfluss des Fahrzeuggewichts auf den Verbrauch zu untersuchen, wird eine signifikante Gewichtsreduktion von 220 kg angenommen. Aus heutiger Sicht stellt diese Reduktion auf absehbare Zeit (geplante Markteinführung des Methanol-BZ-Fahrzeugs für 2005 vorgesehen) die Obergrenze des Machbaren dar. Dieser Wert entspricht einer Reduktion um zwei Schwungmassenklassen [48]. Die Basis-Variante und die Variante mit reduziertem Fahrzeuggewicht sind in Tabelle 6.8 dargestellt. Der Rollwiderstandskoeffizient bleibt unverändert. Das fahrfertige Leergewicht ($\text{Gewicht}_{\text{ff}}$) wird nach ECE-Norm [48] berechnet. Aus diesem Gewicht wird die für Verbrauchsberechnungen relevante Schwungmassenklasse (SMK) ermittelt (s. Anhang F).

	A-Klasse BZ BASIS	A-Klasse BZ SMK 1360
Rollwiderstands- koeffizient (c_{RR})	0,007 - 0,09 ($f(v_{\text{Fzg}})$)	
m_{Fzg} (Gewicht_{ff} ECE) [kg]	1540	1320
SMK [kg]	1590	1360

Tabelle 6.8: Fahrzeugvarianten

Wie aus Tabelle 6.9 entnommen werden kann, sinkt die Fahrenergie um zehn Prozent. Aufgrund der geringeren Auslastungen des elektrischen Antriebs und des BZS sinken deren Wirkungsgrade, was dazu führt, dass der Verbrauch an Dieseläquivalent nur um sieben Prozent auf 4,38 l/100 km sinkt. Der Antriebsstrangwirkungsgrad sinkt im Vergleich zur Basis von 0,26 auf 0,25.

^A Eine Verbesserung der Aerodynamik wird nicht betrachtet.

Variante	E_{Rad} [kWh]	$E_{\text{Getr,Antr}}$ [kWh]	$E_{\text{el,Antr}}/E_{\text{el,BZS}}$ [kWh]	$E_{\text{el,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{H2,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{CH3OH,Verd}}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
Basis	1,31	1,38	1,75	2,40	3,57	5,13	4,71
SMK 1360	1,19	1,25	1,61	2,24	3,30	4,77	4,38
Veränderung zur Basis [%]	-10%	-9%	-8%	-7%	-8%	-7%	-7%

Tabelle 6.9: Energie an verschiedenen Schnittstellen im Vergleich der Basis zur Variante mit reduziertem Gewicht

6.2.2 Modifikation des Getriebes

Modifikations-Index

Fahrzeug

Getriebe

elektrischer Antrieb

Antriebskonzept

BZS-Konzept

BZS-Auslegung

Ziel der Modifikation des Getriebes ist nicht eine Optimierung des Betriebsbereiches des bereits mit einem hohen Wirkungsgrad arbeitenden Getriebes (vgl. Tabelle 6.5), sondern eine Optimierung der Auslastung des elektrischen Antriebs. Wie aus Abbildung 6.1 entnommen werden kann, ist ein Betrieb des elektrischen Antriebs bei mittlerer Auslastung und bei niedrigen bis mittleren Drehzahlen anzustreben. Durch eine Spreizung des Getriebes über ein größeres Übersetzungsverhältnis wird der Betriebsbereich des elektrischen Antriebs zu mittleren Drehmomenten verschoben. Zusätzlich wird die elektrische Maschine jetzt auch mit weniger Drehmoment ausgelegt, was die relative Auslastung erhöht. Ein mit der Basisvariante vergleichbares, maximales Anfahrtdrehmoment (am Rad) wird durch eine größere Übersetzung realisiert. Die Übersetzungsverhältnisse und Kennwerte des elektrischen Antriebs sind in Tabelle 6.10 dargestellt.

	Getriebe	
Basis	Festübersetzung, i [-]	6,48
2-Gang	Zwei-Gang-Automat, i_1/i_2 [-]	11/6,48

Tabelle 6.10: Übersetzungsverhältnisse und Kennwerte bei Modifikation des Getriebes

Durch eine Spreizung der Momentenachse von 0 bis zum neu ermittelten Maximalmoment wird das Wirkungsgrad-Kennfeld des elektrischen Antriebs neu skaliert. Der Abfall des Wirkungsgrades bei niedrigeren Drehmomenten wird weiter zu noch niedrigeren Drehmomenten verschoben. Gleichzeitig entsteht ein Freiheitsgrad innerhalb bestimmter Betriebsbereiche, da der Antrieb bei einem Fahrzustand nun zwei Betriebspunkte (erster oder zweiter Gang) zur Auswahl hat.

Wie Tabelle 6.11 zu entnehmen ist, wird der Verbrauch des Fahrzeugs durch ein 2-Gang-Automat-Getriebe mit einer auf den Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs optimierten

Schaltstrategie (s. Anhang A.3) nicht verringert, sondern erhöht. Zwar wird der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs durch das Getriebe und die Schaltstrategie von 0,79 auf 0,8 erhöht, gleichzeitig sinkt aber der Wirkungsgrad im Getriebe von 0,95 auf 0,93 (Kupplungsverluste, ungünstiger Drehzahlbereich). Zusätzlich wird der Energiebedarf an Fahrenergie durch die erhöhte rotatorische Trägheit beim Beschleunigen im ersten Gang (i jetzt 11, vorher 6,48, vgl. Gl. 4-105) erhöht. Diese Änderungen wirken sich auf die Leistungsaufnahme des elektrischen Antriebs aus. Die (geringen) Unterschiede in der Gaserzeugung beruhen auf den jetzt zusätzlichen Verlusten durch Überdosierungen beim Gangwechsel.

Variante	E_{Rad} [kWh]	$E_{\text{Getr.,Antr}}$ [kWh]	$E_{\text{el,Antr}}/E_{\text{el,BZS}}$ [kWh]	$E_{\text{el,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{H2,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{CH3OH,Verd}}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
Basis	1,31	1,38	1,75	2,40	3,57	5,13	4,71
2-Gang	1,33	1,44	1,78	2,44	3,63	5,34	4,91
Veränderung zur Basis [%]	2%	4%	2%	2%	2%	4%	4%

Tabelle 6.11: Energie an verschiedenen Schnittstellen im Vergleich der Basis zur Variante mit 2-Gang-Getriebe

6.2.3 Modifikation des elektrischen Antriebs

Modifikations-Index

Fahrzeug

Getriebe

elektrischer Antrieb

Antriebskonzept

BZS-Konzept

BZS-Auslegung

Bei der Betrachtung von elektrischen Antrieben wird das Funktionsprinzip (Drehstrom-Asynchronantrieb) beibehalten. Die Vor- und Nachteile anderer Bauformen (permanenterrregte Antriebe oder geschaltete Reluktanzantriebe) werden hier nicht diskutiert.

Durch eine Splittung des elektrischen Antriebes kann eine Wirkungsgradverbesserung erzielt werden [3, 35]. Abweichend von [35] wird keine Einzelradansteuerung der Maschinen (Radnabenmotoren) vorgesehen. Die Überlegenheit von gesplitteten Antrieben soll nach [35] auf der Tatsache beruhen, dass die einzelnen Motoren kleiner dimensioniert sind und daher häufiger in günstigen Betriebsbereichen arbeiten. Dieser Überlegung steht das Argument entgegen, dass elektrische Maschinen mit zunehmender Leistung einen besseren Wirkungsgrad erzielen (s. Anhang A.2).

Die Zusammenschaltung der beiden Antriebe erfolgt nach Abbildung 6.4. Zwei Motoren werden auf eine Welle geschaltet. Dieser Welle sind ein Getriebe (Festübersetzung oder 2-Gang-Getriebe) und ein Differential nachgeschaltet. Wie aus Abbildung 6.4 hervorgeht, sind separate Umrichter (TIM=Traction Inverter Module) für beide Maschinen vorgesehen.

Die Steuerung und Betriebsstrategie eines solchen Antriebs wird in Anhang A.3 dargestellt.

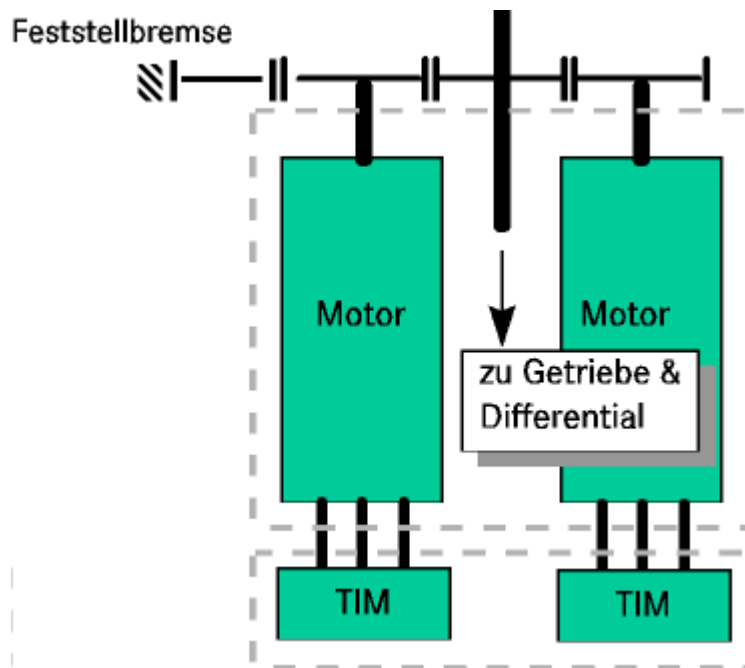


Abbildung 6.4: Schematische Darstellung eines elektrischen Zwei-Motoren-Antriebes

Varianten des elektrischen Antriebs

Ausgangsbasis für die Untersuchungen ist dabei ein vorgegebener vermessener Antrieb (s. Anhang C, Abbildung C.9 und Abbildung C.10). Es ergeben sich die folgenden Konfigurationen:

	Beschreibung	$P_{\text{mech,max}}$ [KW]	$M_{\text{Antr,max}}$ [Nm]	$\Theta_{\text{EA\&Getriebe}}$ [kgm ²]
Basis	eine Asynchronmaschine	55/64*	247/284*	0,088
2-Motor	zwei Asynchronmaschinen	27,5/32*	124/143*	0,038

*kurzzeitiger Spitzenwert^A

Tabelle 6.12: untersuchte Kombinationen

Die Berechnung der Massenträgheitsmomente erfolgt dabei basierend auf den bei [35] gemachten Aussagen, wonach die Verhältnisse der Hauptabmessungen und der Ausnutzungsfaktoren in einem proportionalen Verhältnis zu den Massenträgheiten stehen (vgl. Anhang A.2 und [35]). Die Massenträgheit eines vermessenen Getriebes (0,012 kgm²) wird jeweils addiert. Alle Trägheitsmomente sind auf die Motorabtriebswelle (Getriebeeingang) reduziert.

Aufgrund der von 64 kW auf 32 kW reduzierten Leistung bei Verwendung von zwei Asynchronmaschinen statt einer wird das ursprüngliche Kennfeld des vermessenen Antriebs entsprechend [35] mit einem Reduktionsfaktor ($\frac{\eta_i}{\eta_{\text{Basis}}}$, vgl. Anhang A, Gl. A-8) für den Wirkungs-

^A Der elektrische Antrieb verfügt über eine 15%ige-Überlastfähigkeit.

grad multipliziert. Damit wird die Verschlechterung des Wirkungsgrades durch die reduzierte Leistung zum Ausdruck gebracht. Gleichzeitig wird die Momentenachse des Wirkungsgrad-Kennfeldes entsprechend dem Verhältnis der Leistungen neu skaliert.

Die mit dem elektrischen Doppel-Antrieb errechneten Energien an den verschiedenen Schnittstellen (vgl. Abbildung 5.1) sind in Tabelle 6.13 aufgeführt.

Variante	E_{Red} [KWh]	$E_{\text{Getr,Antr}}$ [KWh]	$E_{\text{el,Antr}}/E_{\text{el,BZS}}$ [KWh]	$E_{\text{el,BZ}}$ [KWh]	$E_{\text{H2,BZ}}$ [KWh]	$E_{\text{CH3OH,Verd}}$ [KWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
Basis	1,31	1,38	1,75	2,40	3,57	5,13	4,71
2-Motor	1,31	1,37	1,66	2,31	3,43	4,97	4,57
Veränderung zur Basis [%]	0%	-1%	-5%	-4%	-4%	-3%	-3%

Tabelle 6.13: Energie an verschiedenen Schnittstellen von der Basis zur Variante mit Doppel-Antrieb

Die Fahrenergie bleibt unverändert. Wie erwartet, kann die Auslastung des elektrischen Doppel-Antriebes durch den Betrieb von nur einer Maschine erhöht werden. Der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebes steigt von 0,79 (Basis) auf 0,83 an. Im Verbrauch an Dieseläquivalent führt die Optimierung des elektrischen Antriebs zu einer dreiprozentigen Einsparung.

6.2.4 Hybrid-BZ-Antriebskonzepte

Modifikations-Index

Fahrzeug
Getriebe
elektrischer Antrieb

Antriebskonzept

BZS-Konzept
BZS-Auslegung

Zur Reduktion des Energieverbrauchs werden Hybrid-BZ-Antriebskonzepte mit verschiedenen Betriebsstrategien untersucht. Eine Übersicht der untersuchten Varianten liefert Tabelle 6.14. Die dort aufgeführten Konzepte werden in Kapitel 2 beschrieben. Ein Hybridkonzept benötigt, wie in Kapitel 2 erläutert, einen elektrischen Speicher. Stellvertretend für heutige Batteriespeicher kommt dabei eine typische NiMH-Batterie (s. Anhang C, Abbildung C.8)

zur Anwendung. Da alle Hybridkonzepte das Prinzip eines Kleinspeicher-Hybrids [3] verfolgen, wird die Batterie als Hochleistungsbatterie mit relativ geringer Speicherenergie ausgeführt. Die Kenndaten der Batterie sind in Tabelle 6.15 aufgeführt. Das Mehrgewicht des Speichers wird bei der Betrachtung des Gesamtfahrzeugs nicht berücksichtigt, da der Gewichtseinfluss auf den Verbrauch/Wirkungsgrad in 6.2.1 gesondert betrachtet worden ist.

Bezeichnung	Antriebskonzept	Betriebsstrategie
Basis (vgl. Kap. 2.2)	Lean-BZ-Fahrzeug	Kühlaggregate verbrauchsoptimiert
Hybrid-K (vgl. Kap. 2.3.3)	Kombinations-Hybrid, zwei Asynchronmaschinen	wie Basis, $P_{\text{soll,BZS}}$ leicht phlegmatisiert
Hybrid LVU-LP (vgl. Kap. 2.3.4)	Leistungsverzweigter Hybrid, unidirektionaler DC/DC-Wandler	wie Basis, $P_{\text{soll,BZS}}$ leicht phlegmatisiert
Hybrid LVU-SP (vgl. Kap. 2.3.4)		wie Basis, $P_{\text{soll,BZS}}$ stark phlegmatisiert
Hybrid LVU-ST (vgl. Kap. 2.3.4)		wie Basis, $P_{\text{soll,BZS}}$ stationär, ggf. Abschaltung des BZS
Hybrid LVB-LP (vgl. Kap. 2.3.4)	Leistungsverzweigter Hybrid, bidirektionaler DC/DC-Wandler	wie Basis, $P_{\text{soll,BZS}}$ leicht phlegmatisiert
Hybrid LVB-SP (vgl. Kap. 2.3.4)		wie Basis, $P_{\text{soll,BZS}}$ stark phlegmatisiert
Hybrid LVB-ST (vgl. Kap. 2.3.4)		wie Basis, $P_{\text{soll,BZS}}$ stationär, ggf. Abschaltung des BZS

Tabelle 6.14: Untersuchte Antriebskonzepte und Betriebsstrategien

Bezeichnung	Wert
Kapazität (Zelle) [Ah]	10
Energieinhalt Batterie [kWh]	3
$P_{\text{luden,max}}/P_{\text{entladen,max}}$ [kW]	80/60
max. Entladestrom [A]	300
Gewicht [kg]	ca. 90

Tabelle 6.15: Kenndaten der Batterie

Betriebsstrategie

Bei einem Hybrid-BZ-Fahrzeug ist es möglich, die Leistungsanforderung an das BZS unabhängig von der Leistungsanforderung des elektrischen Antriebes zu steuern. Die Differenz wird durch die Abgabe-/Aufnahmeleistung der Batterie ausgeglichen (vgl. Kap. 4, Gleichung 4-1).

$$P_{\text{soll,BZS}} = P_{\text{el,virtuell}} + P_{\text{Bat}} \quad (6-12)$$

Um den entstandenen Freiheitsgrad optimal für Energieeinsparungen, etwa durch konsequenten Bestpunktbetrieb des BZS zu nutzen, werden verschiedene Betriebsstrategien für Hybridfahrzeuge betrachtet. Im Wesentlichen werden die Betriebsstrategien und deren Bezeichnung

gen aus dem Bereich von verbrennungsmotorisch betriebenen Hybridfahrzeugen übernommen [3]. Ein phlegmatisierter Betrieb [3] bedeutet ein trüges/langsames Nachfahren des Stromerzeugungssystems auf Leistungsanforderungen des Fahrentriebs. Sprungförmige Änderungen der Leistungsanforderung werden durch Leistungsentnahme aus einem Zwischenspeicher abgedeckt.

Um das Zusammenwirken der Komponenten im Antriebsstrang darzustellen, werden die Leistungsabgabe/-aufnahme am Eingang des elektrischen Antriebs, die Leistungsabgabe des BZS und die Leistungsabgabe/-aufnahme der Batterie betrachtet. Dabei wird versucht, den Ladezustand der Batterie (SOC) in einem Zielkorridor ($SOC_{Ziel,Max}, SOC_{Ziel,min}$) zu halten. In Tabelle 6.16 ist die Beschreibung einer phlegmatisierten Betriebsstrategie zusammengefasst. Abbildung 6.5 zeigt eine solche Betriebsstrategie in einem Ausschnitt eines NEFZ-Fahrzyklus.

Ladezustand der Batterie	Antreiben $P_{el,BZS} < P_{el,Antr}$	Antreiben $P_{el,BZS} > P_{el,Antr}$	Bremsen
$SOC > SOC_{Ziel,max}$	Leistungsaufnahme des el. Antriebs ($P_{el, Antr} > 0$), $P_{el,BZS}$ wird hochgefahren, Leistungsabgabe der Batterie ($P_{Bat} < 0$)	Leistungsaufnahme des el. Antriebs ($P_{el, Antr} > 0$), $P_{el,BZS}$ wird runtergefahren, keine Leistungsaufnahme der Batterie ($P_{Bat} = 0$)	Leistungsabgabe* des el. Antriebs ($P_{el, Antr} < 0$), $P_{el,BZS}$ auf Leerlauf, keine Leistungsaufnahme der Batterie ($P_{Bat} = 0$)
$SOC_{Ziel,max} > SOC > SOC_{Ziel,min}$	wie oben	Leistungsaufnahme des el. Antriebs ($P_{el, Antr} > 0$), $P_{el,BZS}$ wird runtergefahren, Leistungsaufnahme der Batterie ($P_{Bat} > 0$)	Leistungsabgabe des el. Antriebs ($P_{el, Antr} < 0$), $P_{el,BZS}$ auf Leerlauf, Leistungsaufnahme der Batterie ($P_{Bat} > 0$)
$SOC < SOC_{Ziel,min}$	Leistungsaufnahme des el. Antriebs ($P_{el, Antr} > 0$), $P_{el,BZS}$ wird hochgefahren, keine Leistungsabgabe der Batterie ($P_{Bat} = 0$)	Leistungsaufnahme des el. Antriebs ($P_{el, Antr} > 0$), $P_{el,BZS}$ wird runtergefahren, Leistungsaufnahme der Batterie ($P_{Bat} > 0$)	wie oben

* zur besseren grafischen Darstellung in Abbildung 6.5 wird die Leistungsabgabe hier als $P_{el, Antr}$ bezeichnet (genauer: $P_{el,Brems}$, vgl. Abschnitt 3.2.4)

Tabelle 6.16: Beschreibung einer phlegmatisierten Betriebsstrategie

Die maximal denkbare Phlegmatisierung liegt vor, wenn die gesamte vom BZS erzeugte Energie zwischengespeichert wird. Der Fahrzyklus wird elektrisch aus dem Speicher betrieben, und der Speicher wird im Stillstand vom BZS geladen. Umgekehrt liegt die minimal denkbare Phlegmatisierung vor, wenn die gesamte vom BZS erzeugte Energie direkt vom Fahrentrieb verwendet wird (ohne Zwischenspeicherung).

Ein stationärer Betrieb ist eine Sonderform bzw. Extremform des phlegmatisierten Betriebs. Eine stationäre Leistungsabgabe des BZS dient der Sicherstellung eines durchschnittlichen Ladezustandes der Batterie. Sinnvollerweise wird das BZS möglichst nahe an seinem optimalen Wirkungsgrad betrieben. Alle Leistungsanforderungen des elektrischen Antriebes oberhalb der vom BZS erzeugten Leistung ($P_{el,BZS,stat}$) werden durch Leistungsentnahme aus der

Batterie abgedeckt. Bei Leistungsanforderungen unterhalb der vom BZS erzeugten Leistung wird die Batterie mit der Differenz der Leistungen gemäß Gleichung 6-12 geladen.

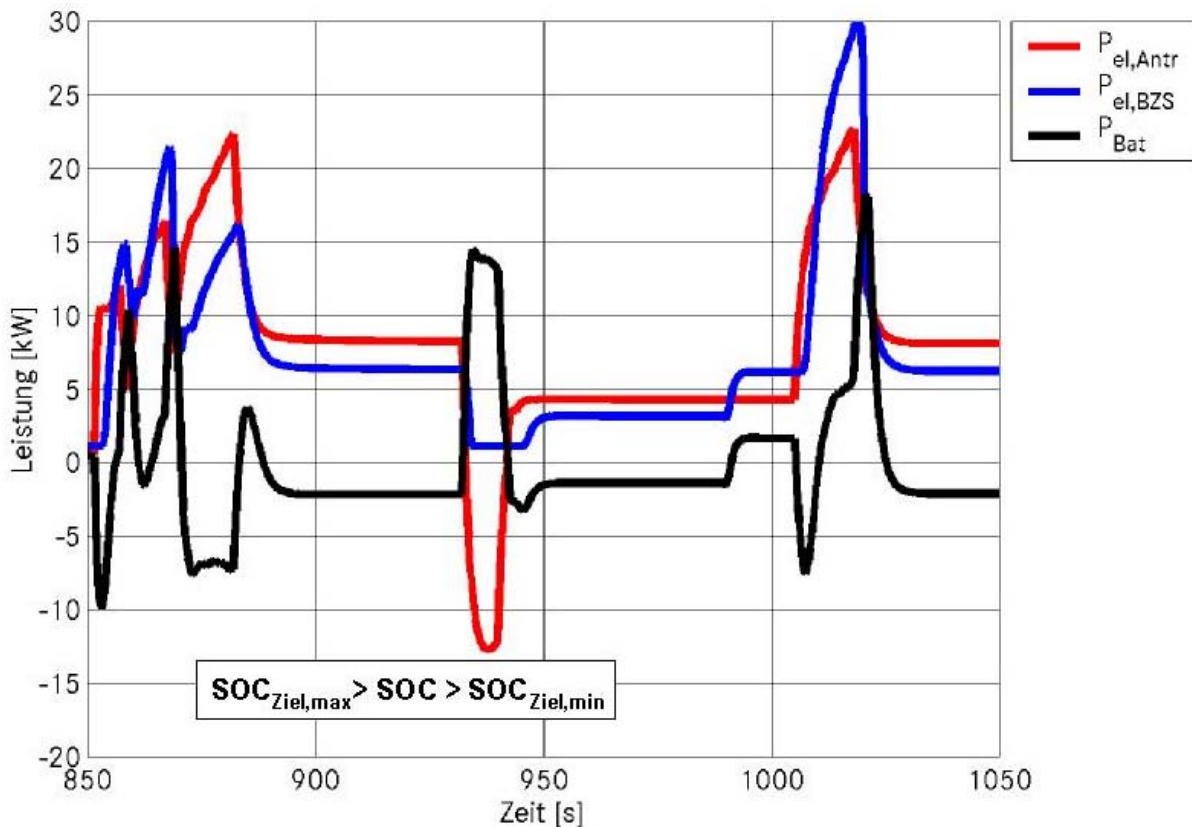


Abbildung 6.5: Phlegmatisierter Betrieb eines Stromerzeugungssystems

In Tabelle 6.17 ist die Beschreibung einer stationären Betriebsstrategie zusammengefasst.

Ladezustand der Batterie	$P_{el,BZS,stat} < P_{el,Antr}$	$P_{el,BZS,stat} > P_{el,Antr}$	Bremsen
$SOC > SOC_{Ziel,max}$	Leistungsaufnahme des el. Antriebs ($P_{el,Antr} > 0$), $P_{el,BZS}$ wird hochgefahren, Leistungsabgabe der Batterie ($P_{Bat} < 0$)	Leistungsaufnahme des el. Antriebs ($P_{el,Antr} > 0$), $P_{el,BZS}$ wird auf Leerlauf reduziert, Leistungsabgabe der Batterie ($P_{Bat} < 0$)	Leistungsabgabe* des el. Antriebs ($P_{el,Antr} < 0$), $P_{el,BZS}$ auf Leerlauf, keine Leistungsaufnahme der Batterie ($P_{Bat} = 0$)
$SOC_{Ziel,max} > SOC > SOC_{Ziel,min}$	Leistungsaufnahme des el. Antriebs ($P_{el,Antr} > 0$), $P_{el,BZS}$ auf Stationärpunkt, Leistungsabgabe der Batterie ($P_{Bat} < 0$)	Leistungsaufnahme des el. Antriebs ($P_{el,Antr} > 0$), $P_{el,BZS}$ auf Stationärpunkt, Leistungsaufnahme der Batterie ($P_{Bat} > 0$)	Leistungsabgabe des el. Antriebs ($P_{el,Antr} < 0$), $P_{el,BZS}$ auf Stationärpunkt, Leistungsaufnahme der Batterie ($P_{Bat} > 0$)
$SOC < SOC_{Ziel,min}$	Leistungsaufnahme des el. Antriebs ($P_{el,Antr} > 0$), $P_{el,BZS}$ wird hochgefahren, keine Leistungsabgabe der Batterie ($P_{Bat} = 0$)	Leistungsaufnahme des el. Antriebs ($P_{el,Antr} > 0$), $P_{el,BZS}$ auf Stationärpunkt, Leistungsaufnahme der Batterie ($P_{Bat} > 0$)	wie oben

* zur besseren grafischen Darstellung in Abbildung 6.6 wird die Leistungsabgabe hier als $P_{el,Antr}$ bezeichnet (genauer: $P_{el,Brems}$, vgl. Abschnitt 3.2.4)

Tabelle 6.17: Beschreibung einer stationären Betriebsstrategie

Abbildung 6.6 zeigt eine solche Betriebsstrategie in einem Ausschnitt eines NEFZ-Fahrzyklus. Es ist zu erkennen, dass bei Überschreiten des Ladezustands-Zielkorridors ($SOC > SOC_{Ziel,Max}$) das BZS auf Leerlaufleistung heruntergefahren wird. Durch diese Betriebsstrategie sollen drastische Ladezustandsschwankungen der Batterie vermieden werden.

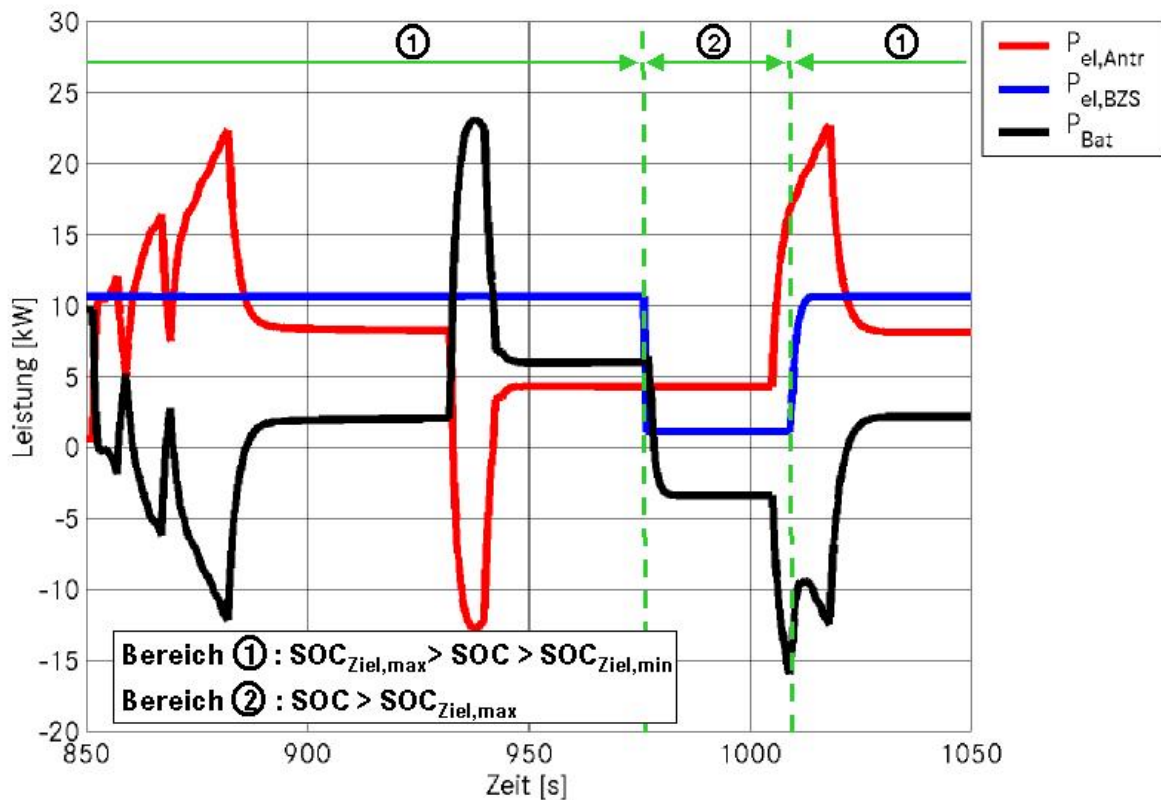


Abbildung 6.6: Stationärer Betrieb eines Stromerzeugungssystems

Eine phlegmatisierte Betriebsstrategie kann von einem kombinierten Hybrid-BZ-Konzept nur bis zur halben installierten elektrischen Antriebsleistung realisiert werden, da einer der beiden elektrischen Antriebe aus der Batterie versorgt werden muss.

Eine stationäre Betriebsstrategie erfordert einen unabhängigen Betrieb des BZS von den aktuellen Fahrleistungsanforderungen ($P_{el,virtuell}$). Mit einem kombinierten Hybrid-BZ-Konzept kann zwar eine Unterstützung des BZS durch die Batterie realisiert werden. Eine vollständige Entkopplung von der Fahrleistungsanforderung ist zumindest beim Bremsen nicht möglich. Im Stillstand verhindert der Batterieladezustand und die damit verbundene Spannungslage einen Bestpunkt-Betrieb des BZS (vgl. Abschnitt 2.3.3, Funktionsweise des kombinierten Hybrid-BZ-Konzepts).

Simulationsergebnisse

Bei der Betrachtung von Hybridkonzepten wird ein autarkes Hybrid-Fahrzeug betrachtet. Eine Energiedifferenz im Ladezustand der Batterie am Ende des Fahrzyklus zu dem Ausgangszustand wird in der Berechnung des Methanol-Energiebedarfs berücksichtigt. Da diese Energie mit einem Batterie-Nutzungsgrad (η_{Bat}) dem elektrischen Antrieb zur Verfügung gestellt wird, muss dieser ebenfalls berücksichtigt werden.

Die Definition des Batterie-Nutzungsgrades erfolgt durch eine Fallunterscheidung nach Ladevorgang und Entladevorgang. Bei der Nutzungsgradbetrachtung entspricht die Spannung U_0 der Leerlaufspannung des Speichers im aktuellen Ladezustand. Der so ermittelte Nutzungsgrad bezieht sich auf den Spannungshub.

$$\eta_{\text{Bat}} = \frac{\int_{t=0}^{t_{\text{Entladen}}} U_{\text{Bat}} I_{\text{Bat}} dt + \int_{t=0}^{t_{\text{Laden}}} U_{0,\text{Bat}} I_{\text{Bat}} dt}{\int_{t=0}^{t_{\text{Entladen}}} U_{0,\text{Bat}} I_{\text{Bat}} dt + \int_{t=0}^{t_{\text{Laden}}} U_{\text{Bat}} I_{\text{Bat}} dt} \quad (6-13)$$

Für die Berechnung der Ersatzenergie an Methanol wird der Herstellungswirkungsgrad der elektrischen Energie aus dem Methanol (hier η_{BZS}^*) nach Gleichung 4-4 berücksichtigt. Der Gesamtenergiebedarf an Methanol eines Hybridantriebskonzeptes errechnet sich damit wie folgt:

$$E_{\text{CH}_3\text{OH}} = E_{\text{CH}_3\text{OH,Verd}} + \underbrace{\frac{(E_{\text{speicher}} - E_{\text{Speicher},0}) \eta_{\text{Bat}}}{\eta_{\text{BZS}}^*}}_{E_{\text{CH}_3\text{OH,Ersatz}}} \quad (6-14)$$

E_{speicher} = Energieinhalt des Speichers am Ende des Fahrzyklus

$E_{\text{Speicher},0}$ = Energieinhalt des Speichers zu Beginn des Fahrzyklus

Die Bestimmung des BZS-Wirkungsgrades für Hybrid-BZ-Fahrzeuge erfolgt unter Berücksichtigung des tatsächlich verbrauchten Methanols $E_{\text{CH}_3\text{OH,Verd}}$ und der Ersatzenergie aus dem Inhalt des elektrischen Speichers (s. o.).

$$\eta_{\text{BZS}} = \frac{E_{\text{el,BZS}}}{E_{\text{CH}_3\text{OH}}} = \frac{E_{\text{el,BZS}}}{E_{\text{CH}_3\text{OH,Verd}} + \frac{(E_{\text{speicher}} - E_{\text{Speicher},0}) \eta_{\text{Bat}}}{\eta_{\text{BZS}}^*}} \quad (6-15)$$

Der Energieverbrauch für die unterschiedlichen Hybridkonzepte an den Schnittstellen des Gesamtfahrzeugs (vgl. Abbildung 5.1) ist in Tabelle 6.18 dargestellt.

Bei der Betrachtung des Energiebedarfs am Getriebe und am elektrischen Antrieb fällt auf, dass das kombinierte Hybrid-BZ-Konzept (Hybrid-K) niedrigere Werte aufweist. Dies ist auf den bei diesem Konzept integrierten Doppel-Antrieb zurückzuführen (vgl. 6.2.3).

Bei allen Hybridkonzepten ist die erzeugte Energie des BZS geringer als die im elektrischen Antrieb verbrauchte Energie. Die Differenz wird aus der Rekuperation gewonnen.

Mit steigender Phlegmatisierung des BZS wird eine Zunahme des Methanol-Energiebedarfs beobachtet. So zeigt beispielsweise ein als Extremform der Phlegmatisierung stationär betriebenes, leistungsverzweigtes Hybrid-BZ-Konzept mit unidirektionalem DC/DC-Wandler einen Verbrauch von 4,28 kWh Methanol im Fahrzyklus, während das gleiche Hybridkonzept mit leicht phlegmatisierter Betriebsstrategie nur 3,98 kWh Methanol benötigt.

Variante	E_{Rad} [kWh]	$E_{\text{Getr,Antr}}$ [kWh]	$E_{\text{el,Antr}/E_{\text{el,BZS}}}$ [kWh]	$E_{\text{el,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{H2,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{CH3OH,Verd}}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
Basis	1,31	1,38	1,75	2,40	3,57	5,13	4,71
Hybrid K	1,31	1,36	1,65	1,93	2,92	4,16	3,81
Hybrid LVU-LP	1,31	1,37	1,74	2,00	2,74	3,98	3,66
Hybrid LVU-SP	1,31	1,37	1,74	2,01	2,82	4,05	3,72
Hybrid LVU-ST	1,31	1,37	1,74	2,03	3,31	4,28	3,93
Hybrid LVB-LP	1,31	1,37	1,74	2,01	2,78	4,03	3,71
Hybrid LVB-SP	1,31	1,37	1,74	2,01	2,85	4,07	3,74
Hybrid LVB-ST	1,31	1,37	1,74	2,04	3,51	4,51	4,14

Tabelle 6.18: Energie an verschiedenen Schnittstellen im Vergleich der Basis zu verschiedenen Hybridkonzepten

Diese Tendenz entsteht mit den zunehmenden Lade- und Entladeverlusten des Speichers. Die Lade- und Entladeverluste sowie die durchschnittlichen Nutzungsgrade der Batterie sind in Tabelle 6.19 dargestellt.

Hybrid-Konzept	Betriebsstrategie	$E_{\text{Verlust, Bat}}$ [kWh]	η_{Bat}
Hybrid K	leicht phlegmatisiert	0,067	0,910
Hybrid LVU-LP	leicht phlegmatisiert	0,067	0,940
Hybrid LVU-SP	stark phlegmatisiert	0,076	0,930
Hybrid LVU-ST	stationär	0,177	0,910
Hybrid LVB-LP	leicht phlegmatisiert	0,069	0,940
Hybrid LVB-SP	stark phlegmatisiert	0,074	0,930
Hybrid LVB-ST	stationär	0,187	0,910

Tabelle 6.19: Lade- und Entladeverluste sowie Nutzungsgrade des Speichers für unterschiedliche Hybridkonzepte im NEFZ

Gleichzeitig steigt mit zunehmender Phlegmatisierung der Wirkungsgrad der Gaserzeugung. Der Wirkungsgrad der Gaserzeugung bei dem Basis-BZS beträgt beispielsweise 0,7, während beim einem stationär betriebenen Hybridkonzept (Hybrid LVU-ST) mit $\eta_{\text{GES}} = 0,77$ nur noch geringe Abweichungen vom stationären Wirkungsgrad ($\eta_{\text{GES}} = 0,78$) auftreten.

Es gelingt den stationär betriebenen Hybridkonzepten aber nicht, diesen Vorteil in einen niedrigeren Verbrauch an Methanol umzusetzen. Beide Konzepte zeigen den höchsten Energieverbrauch unter den Hybridkonzepten. Eine Ursache ist, dass die mittlere Leistung des BZS im NEFZ unterhalb der Leistung im Bestpunkt (des BZS) liegt. Bei einem konsequenten Bestpunkt-Betrieb wird der Speicher am Ende des Fahrzyklus mehr Energie beinhalten als zu Beginn. Die Umrechnung dieser großen Energiemenge in einen Methanolverbrauch erfolgt mit einem vergleichsweise niedrigen (Tabelle 6.19) Nutzungsgrad der Batterie, da aufgrund der starken Phlegmatisierung hohe Lade- und Entladeverluste auftreten. Insgesamt entsteht so ein hoher Methanolverbrauch trotz eines guten BZS-Wirkungsgrads.

Den nach Tabelle 6.18 niedrigsten Energieverbrauch zeigen Hybridkonzepte mit leichter Phlegmatisierung. Hier werden Überdosierungen der Gaserzeugungen weitgehend vermieden. Gleichzeitig sind die anfallenden Verluste im Speicher gering. Innerhalb dieser Konzepte zeigt sich ein kombiniertes Hybrid-BZ-Konzept den Varianten mit DC/DC-Wandler unterlegen. Bei den leistungsverzweigten, schwach phlegmatisierten Hybridkonzepten ist der Energieverbrauch bei der Variante mit unidirektionalem DC/DC-Wandler am geringsten. Damit sind für die hier betrachtete Konfiguration permanente Wirkungsgradeinbußen durch den unidirektionalen DC/DC-Wandler zwischen Brennstoffzelle und Batterie günstiger zu bewerten als DC/DC-Wanderverluste, die beim Laden und Entladen der Batterie anfallen.

Insgesamt zeigt sich, dass mit einem Hybridkonzept der Energieverbrauch an Dieseläquivalent im NEFZ im Vergleich zur Basis sehr deutlich reduziert werden kann (bis zu 1,05 l/100 km). Es wird deutlich, dass sich eine starke Phlegmatisierung ungünstig auf den Verbrauch auswirkt.

Im Vergleich zu den übrigen Hybridkonzepten und Betriebsstrategien kann mit einem leistungsverzweigten, schwach phlegmatisierten Hybrid-BZ-Konzept mit unidirektionalem DC/DC-Wandler (Hybrid LVU-LP) der niedrigste Energieverbrauch erzielt werden.

6.2.5 Modifikationen der Gasreinigung und des Druckniveaus des BZS

Modifikations-Index

Fahrzeug
Getriebe
elektrischer Antrieb
Antriebskonzept
BZS-Konzept
Gasreinigung
Druckniveau
Luftversorgung
GaszwischenSpeicherung
Bordnetzmodifikation/
Betriebsstrategie
BZS-Auslegung

Im Folgenden werden zwei bereits in Abschnitt 3.1 beschriebene BZS-Konzepte mit dem Basis-BZS verglichen. Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale sind in Tabelle 6.20 zusammengefasst

	BZS-Konzept
Basis (vgl. Kap. 3.1.1)	BZS mit selektiver Oxidation, Reformat-Betrieb in BZ, Hochdruck-BZ
Membran (vgl. Kap. 3.1.2)	Gasreinigung mit PdAg-Membran, Wasserstoff-Betrieb in BZ, Hochdruck-BZ
Umgedr. (vgl. Kap. 3.1.3)	Gasreinigung mit selektiver Oxidation, Reformat-Betrieb BZ, Umgebungsdruck-BZ

Tabelle 6.20: Vergleich verschiedener BZS-Konzepte

Auswirkungen im Bereich der BZ

Durch den Umgebungsdruck-Betrieb sinkt der Wirkungsgrad in der BZ [22]. Die thermodynamisch errechnete, zweiprozentige Verringerung des Wirkungsgrades kann mittels der Nernst'schen Gleichung (Anhang B, Gleichung B-6) bestimmt werden (s. Anhang B). Die thermodynamisch errechnete Verringerung des Wirkungsgrades ($k_p=0,98$) wird in der Literatur bestätigt [30].

Zusätzlich werden steigende Verluste mit der Stromstärke beobachtet [46]. Experimentelle Untersuchungen an Reformat-BZ-Stacks [22] zeigen, dass bei 1000 mA/cm² stromstärkeabhängige Verluste bis zu sieben Prozent betragen ($k_i=0,07$). Aus der Wirkungsgradkennlinie der Basis-BZ $\eta_{\text{Basis,BZ}}$ wird damit die Spannung des Umgebungsdruck-BZS mit einem Umrechnungsfaktor errechnet.

$$\eta_{\text{Umgebung,BZ}} = \eta_{\text{Basis,BZ}} \cdot \left(k_p - \frac{I_{\text{BZ}}}{A_{\text{Zelle}}} k_i \right) \quad (6-16)$$

Bisherige Umgebungsdrucksysteme werden mit Luftstöchiometrien^A von mindestens zwei (Basis-BZS: $n_{\text{O}_2} = 1,8$, vgl. Gl. 4-42 und Tabelle 4.5) betrieben. Der Wirkungsgradverlauf der BZ für Umgebungsdruck und $n_{\text{O}_2} = 2$ ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

Bei einer Membran-Gasreinigung wird die Brennstoffzelle anodenseitig mit reinem Wasserstoff betrieben. Für den reinen Wasserstoffbetrieb liegt eine vermessene Kennlinie vor (Stöchiometrien und Druck wie bei Basis-BZ). Die Wirkungsgradkennlinie für Wasserstoffbetrieb ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

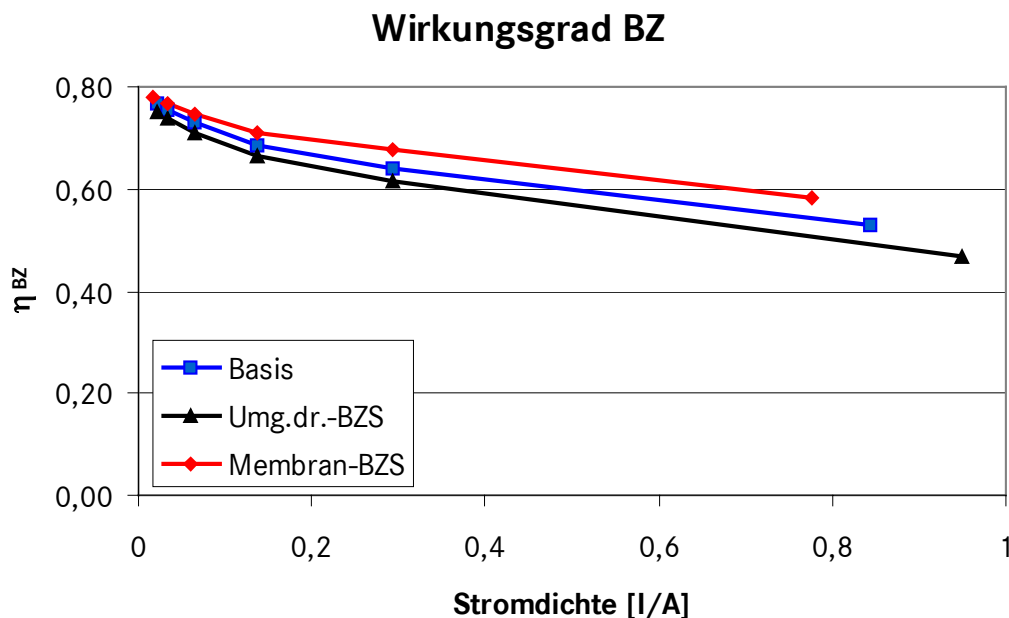


Abbildung 6.7: Wirkungsgradverlauf der BZ für verschiedene BZS-Konzepte

^A Luftstöchiometrie: tatsächlicher Luftstrom im Verhältnis zum chemisch benötigten Luftstrom

Auswirkungen im Bereich des Luftmoduls

Die Leistungsaufnahme des Umgebungsdruck-BZS-Luftmoduls wird nach den Beziehungen in Abschnitt 4.2.4 errechnet. Als Wirkungsgradkennlinie des Verdichters wird der bei dem Basis-BZS ermittelte Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Massenstromes (Luft) übernommen (s. Abbildung 3.7). Das Druckverhältnis des Verdichters entspricht dem bei dem Basis-BZS ermittelten Druckverlust in Abhängigkeit des Luft-Massenstromes. Der Massenstrom bei dem Umgebungsdruck BZS wird nach Gleichung 4-50 mit dem größeren Luftbedarf ermittelt.

Die Leistungsaufnahme des Luftmoduls in Abhängigkeit des Luft-Massenstromes (\dot{m}_{Komp}) ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Durch den reduzierten Druck sinkt die Leistungsaufnahme des Luftmoduls im Vergleich zum Basis-BZS bei gleichen Massenströmen. Mit zunehmendem Massenstrom und Druck reduziert sich der Vorteil des Umgebungsdruck-BZS. Dieser Effekt ist auf den fehlenden Expander zurückzuführen (s. Anhang C, Abbildung C.2). Die Leistungsaufnahme des Luftmoduls in Abhängigkeit des Luft-Massenstromes beim Membran-BZS entspricht dem Basis-Luftmodul.

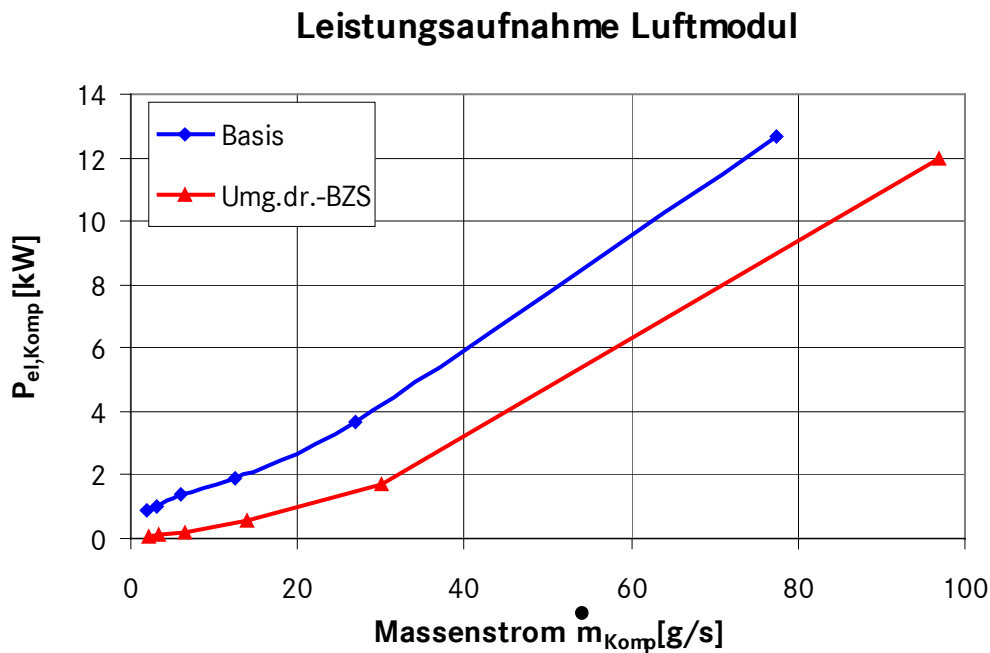


Abbildung 6.8: Leistungsaufnahme Luftmodul

Auswirkungen auf die stationäre Systemauslegung des BZS

Die stationäre Auslegung des BZS soll sicherstellen, dass zu vergleichende Systeme eine vergleichbare elektrische Nettoleistung ($P_{\text{el,BZS}}$) erreichen. Die Berechnungen in der Gaserzeugung werden Kapitel 4 entnommen (für Basis-BZS). Auf Abweichungen für Membran-BZS wird in Anhang C eingegangen. Der Wirkungsgrad der Gaserzeugung ist für alle drei Systeme identisch. Relevante Auslegungsdaten der drei BZS-Konzepte für den Volllast-Betriebspunkt sind in Tabelle 6.21 zusammengefasst.

Wie sich zeigt, entspricht die Aufnahmeleistung des Luftmoduls bei dem Umgebungsdruck-BZS aufgrund des höheren Luftmassenstromes dem Wert des Basis-BZS (vgl. Abbildung 6.8). Etwas weniger Leistung benötigt das Luftmodul des BZS mit Membran-Gasreinigung. Hier macht sich der höhere Wirkungsgrad der Brennstoffzelle bemerkbar. Ein höherer Wirkungsgrad bedeutet eine höhere Spannung (vgl. Gleichung 4-44).

BZS-Konzept	Basis	Membran-BZS	Umg.dr.-BZS
$P_{el,BZS}$ [kW]	55,8	56,3	55,8
$P_{el,BN}$ [kW]	0,4		
$P_{el,KS}$ [kW]	4,2		
$P_{el,Komp}$ [kW]	13	11	12
$P_{el,BZ}$ [kW]	73	72	73
$P_{H_2,BZ}$ [kW]	138	124	156
$P_{CH_3OH,Verd}$ [kW]	177	158	199

Tabelle 6.21: Volllast-Auslegungsdaten für Basis-BZS, Membran-BZS und Umgebungsdruck-BZS

Dieses führt dazu, dass im Vergleich zur Basis mit weniger Strom die gleiche elektrische Leistung in der BZ erzielt werden kann. Der geringe Strom führt zu einem geringeren Wasserstoffverbrauch und damit zu einem reduzierten Luftbedarf (vgl. Gleichung 4-35), was in geringerer Aufnahmeleistung des Luftmoduls resultiert.

Bei dem Umgebungsdruck BZS bewirkt der niedrige Wirkungsgrad der BZ neben dem höheren Stöchiometrieverhältnis einen zusätzlichen Luftbedarf durch den im Vergleich zur Basis höheren Strom. Der höhere Strom wirkt sich in einem vergleichsweise hohen Methanolverbrauch aus.

Die Volllastauslegungsdaten beeinflussen auch den Leerlaufverbrauch des BZS. Bedingt durch die bei allen drei BZS identische Lastspreizung von 40 (vgl. Kap. 4, Gleichung 4-34) ergibt sich für das Membran-BZS der niedrigste und für das Umgebungsdruck-BZS der höchste Leerlaufverbrauch an Methanol.

BZS-Konzept	Basis	Membran-BZS	Umg.dr.-BZS
$\dot{m}_{CH_3OH,min}$ [g/s]	0,22666	0,20306	0,25538
$P_{CH_3OH,min}$ [kW]	4,4	4,0	5,0

Tabelle 6.22: Leerlaufverbrauch an Methanol

Der mit diesen drei Systemen nach Gleichung 4-4 errechnete maximale BZS-Wirkungsgrad^A ist über der BZS-Abgabeleistung in Abbildung 6.9 aufgetragen.

^A Kühlaggregate mit minimaler Leistungsaufnahme (200 W)

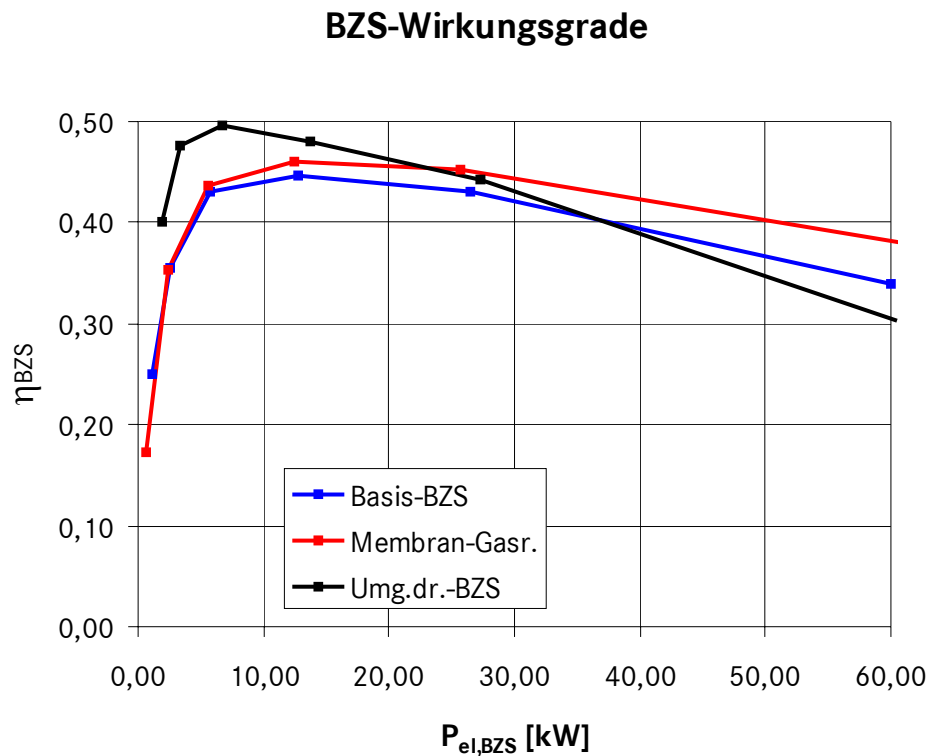


Abbildung 6.9: Wirkungsgrade verschiedener BZS

Simulationsergebnisse

Die im NEFZ an relevanten Schnittstellen ermittelte Energie für die zwei BZS-Konzepte im Vergleich zur Basis sind in Tabelle 6.23 dargestellt. Mit Ausnahme der in Tabelle 6.20 aufgeführten Änderungen werden die Fahrzeug- und Antriebsstrangdaten aus Tabelle 6.2 für die beiden anderen BZS-Konzepte übernommen.

Variante	E_{Rad} [kWh]	$E_{Getr-Antr}$ [kWh]	$E_{el,Antr}/E_{el,BZS}$ [kWh]	$E_{el,BZ}$ [kWh]	$E_{H2,BZ}$ [kWh]	$E_{CH3OH,Verd}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
Basis	1,31	1,38	1,75	2,40	3,57	5,13	4,71
Membran	1,31	1,38	1,75	2,40	3,44	4,87	4,47
Umg.druck	1,31	1,38	1,75	2,07	3,19	4,85	4,46

Tabelle 6.23: Energieverbrauch an verschiedenen Schnittstellen im Vergleich der Basis zu verschiedenen BZS-Konzepten

Während die Energieabgabe des BZS ($E_{el,BZS}$) bei allen drei BZS-Konzepten identisch ist, zeigt das BZS mit Umgebungsdruck einen deutlich niedrigeren Energieverbrauch an elektrischer Energie am BZ-Ausgang ($E_{el,BZ}$). Die reduzierte Leistungsaufnahme durch das Luftmodul beträgt hier im Vergleich zur Basis 0,34 kWh, was einer Reduktion der Energieaufnahme der Nebenaggregate um mehr als 50% entspricht.

Die Effizienzverbesserung der Nebenaggregate drückt sich auch in einem höheren BZS-Wirkungsgrad von 0,36 (Basis: 0,34) aus. Auffällig ist der niedrige Wirkungsgrad der Gaserzeugung bei dem Umgebungsdruck-BZS. Der mit $\eta_{\text{GES}}=0,65$ deutlich geringere Wert als beim Basis-BZS ist auf den höheren Leerlaufverbrauch (5 kW statt 4,4 kW, vgl. Tabelle 6.22) im Vergleich zum Basis-BZS zurückzuführen.

Mit einer Membran-Gasreinigung wird die Energieaufnahme der Nebenaggregate im Vergleich zur Basis nur um 0,1 kWh gesenkt. Das Membran-Gasreinigungs-BZS-Konzept erzielt mit 0,36 dennoch den gleichen BZS-Wirkungsgrad (Tabelle 6.24) wie das Umgebungsdruck-BZS. Der BZ-Wirkungsgrad des Membran-Gasreinigungs-BZS ist mit 0,71 am höchsten.

Variante	η_{Getr}	η_{EA}	η_{BZS}	η_{BZ}	η_{GES}	η_{Strang}
Basis	0,95	0,79	0,34	0,67	0,70	0,26
Membran	0,95	0,79	0,36	0,70	0,71	0,27
Umg.druck	0,95	0,79	0,36	0,65	0,66	0,27

Tabelle 6.24: Wirkungsgrade im NEFZ

Insgesamt zeigt sich, dass ein BZS mit einer Membran-Gasreinigung im NEFZ und ein Umgebungsdruck-BZS deutlich weniger Energie verbrauchen als das Basis-BZS. Die Energieeinsparung an elektrischer Energie im BZS, insbesondere beim Umgebungsdruck-BZS, kann ohne eine Reduktion des Leerlaufverbrauchs der Gaserzeugung nicht wirkungsvoll umgesetzt werden.

6.2.6 Modifikation am Luftmodul

Modifikations-Index

Fahrzeug
Getriebe
elektrischer Antrieb
Antriebskonzept

BZS-Konzept

Gasreinigung
Druckniveau

Luftversorgung

Gaszwischenspeicherung
Bordnetzmodifikation/
Betriebsstrategie
BZS-Auslegung

Um den Wirkungsgrad des BZS im Teillastbereich zu erhöhen, kann die Leistungsaufnahme der Luftversorgung reduziert werden. Druck und Stöchiometrie in der BZ entsprechen dem Basis-BZS.

Durch zwei parallel betriebene Verdichter mit separaten Elektro-Antrieben und Expandern soll eine Kompressorabschaltung bei Teillast realisiert werden. Bei dem kleiner dimensionierten Verdichter und Expander steigt die Auslastung im Teillastbereich an, was den Wirkungsgrad des Antriebs erhöht. Gleichzeitig steigt auch der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs an. Für den isothermen Wirkungsgradverlauf von Verdichter und Expander wird der auf den relativen Massenstrom bezogene Verlauf des Basis-Luftmoduls übernommen. Die elektrischen Antriebe werden

nach Gesetzmäßigkeiten für die Verkleinerung von elektrischen Maschinen (s. Anhang A.2) modifiziert. Insgesamt ergibt sich der nach den Beziehungen aus Abschnitt 4.2.4 berechnete, in Abbildung 6.10 dargestellte Verlauf der Leistungsaufnahme für das Luftmodul.

Wie zu erkennen ist, kann die Leistungsaufnahme im Teillastbereich reduziert werden. Im Leerlauf des BZS beträgt die Leistungsaufnahme des Zweifach-Kompressors ca. 0,5 kW (Basis: $P_{el,Komp} = 0,9$ kW). Die Energieeinsparung durch reduzierte Nebenverbraucherleistung des optimierten Luftmoduls tritt aber erst oberhalb des Leerlaufbereiches ($P_{el,BZS} > P_{el,BZS,LL}$) ein.

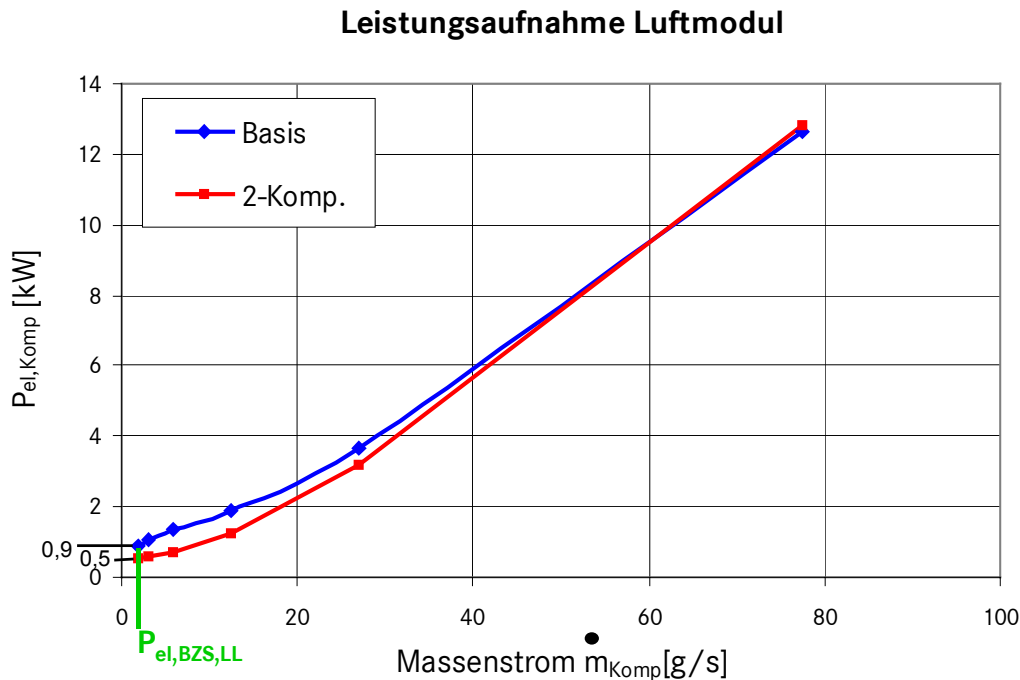


Abbildung 6.10: Leistungsaufnahme Luftmodul bei Zweifach-Kompressor (2-Komp.) im Vergleich zur Basis

Die im Leerlaufbetrieb des BZS, d.h. ohne Leistungsanforderung des elektrischen Antriebs, zur Verfügung stehenden bzw. benötigten Leistungen im BZS sind in Tabelle 6.25 zusammengefasst.

Variante	Basis	2-Komp.
$P_{el,BZS,LL}$ [kW]	1,1	1,6
$P_{el,BN}$ [kW]	0,4	0,4
$P_{el,KS}$ [kW]	0,2	0,2
$P_{el,Komp}$ [kW]	0,9	0,5
$P_{el,BZ}$ [kW]	2,7	2,7
$P_{H2,BZ}$ [kW]	3,5	3,5
P_{CH3OH} [kW]	4,4	4,4

Tabelle 6.25: Leistungsaufnahmen/-abgaben im Leerlauf des BZS an verschiedenen Schnittstellen

Die im Leerlauf benötigte elektrische Leistung aller Nebenaggregate ($P_{el,NA,LL}$) beträgt 1,5 kW (nach Gl. 4-49).

Die zum Betrieb der Nebenverbraucher im Leerlauf mindestens zur Verfügung stehende elektrische Leistung ($P_{el,BZ}$, errechnet aus der Mindestdurchflussmenge an Methanol $\dot{m}_{CH_3OH,min}$) beträgt 2,7 kW. Damit errechnet sich nach Gleichung 4-2 eine überschüssige Leerlaufleistung des BZS ($P_{el,BZS,LL}$) von 1,2 kW^A. Der Leerlaufverbrauch an Methanol wird daher nicht von der elektrischen Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher, sondern durch die Mindestdurchflussmenge an Methanol beeinflusst.

Eine Verringerung der Leistungsaufnahme der Nebenaggregate durch Optimierung des Luftmoduls, dargestellt durch die Variante 2-Komp. in Tabelle 6.25, führt zu einer Vergrößerung der Leerlaufleistung, ohne den Methanolverbrauch im Leerlauf zu reduzieren.

Simulationsergebnisse

Die ermittelte Energie an relevanten Schnittstellen (NEFZ) für die Variante mit dem Zweifach-Kompressor mit Abschaltung ist in Tabelle 6.14 im Vergleich zur Basis dargestellt. Durch den Zweifach-Kompressor kann der Energieverbrauch der Brennstoffzelle bei gleicher Energieabgabe des BZS um sieben Prozent bzw. 0,18 kWh gesenkt werden. Diese Energieeinsparung kann aber aufgrund der unveränderten Leerlaufleistung der Gaserzeugung nicht vollständig in einen reduzierten Methanolverbrauch umgesetzt werden. Die Einsparung an Dieselequivalent beträgt gegenüber der Basis demzufolge nur ca. vier Prozent bzw. 0,17 l/100 km.

Wie auch schon bei der Betrachtung der BZS-Konzepte zeigt sich hier, dass eine Optimierung des Energieverbrauchs der Nebenaggregate im Leerlauf und niedrigen Teillastbereich ohne eine Reduktion des minimalen Methanolstroms keinen signifikanten Einfluss auf den Verbrauch hat.

Variante	E_{Rad} [kWh]	$E_{Getr,Antr}$ [kWh]	$E_{el,Antr}/E_{el,BZS}$ [kWh]	$E_{el,BZ}$ [kWh]	$E_{H_2,BZ}$ [kWh]	$E_{CH_3OH,Verd}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
Basis	1,31	1,38	1,75	2,40	3,57	5,13	4,71
2-Komp.	1,31	1,38	1,75	2,22	3,32	4,94	4,54
Veränderung zur Basis [%]	0%	0%	0%	-7%	-7%	-4%	-4%

Tabelle 6.26: Energieverbrauch an verschiedenen Schnittstellen im Vergleich der Basis zu einem Luftmodul mit Zweifach-Kompressor (2-Komp.)

^A Wird $P_{el,BZS,LL}$ nicht genutzt, so wird der entsprechende Energiebetrag an Wasserstoff im katalytischen Brenner verbrannt.

6.2.7 Gaszwischenspeicherung

Modifikations-Index

Fahrzeug
Getriebe
elektrischer Antrieb
Antriebskonzept

BZS-Konzept

Gasreinigung
Druckniveau
Luftversorgung

Gaszwischenspeicherung

Bordnetzmodifikation/
Betriebsstrategie

BZS-Auslegung

Bisherige Betrachtungen zeigten, dass der Leerlaufverbrauch an Methanol einen entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch im Fahrzyklus hat. Zusätzlich wird durch die Vermeidung von Überdosierungen^A in der Gaserzeugung eine Verbrauchseinsparung erfolgen. Im Folgenden (Tabelle 6.27) wird eine Modifikation vorgestellt, die sowohl den Leerlaufverbrauch optimieren, als auch Überdosierungen in der Gaserzeugung vermeiden soll.

	BZS-Konzept
Basis (vgl. Kap. 3.1.1)	BZS mit selektiver Oxidation, Reformat-Betrieb in BZ, Hochdruck-BZ
Gasspeicher (vgl. Kap. 3.1.1)	wie Basis, zus. Gasspeicher mit Kompressor vor der BZ

Tabelle 6.27: Vergleich eines BZS mit Gasspeicher zum Basis-BZS

Ein BZS mit Gaszwischenspeicher ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Ein Gaszwischenspeicher mit eigenem Kompressor kann überschüssiges Reformat^B aufnehmen und bei Bedarf abgeben. Um einen nennenswerten Energieinhalt von ca. 100 Wh an Reformat (3 g H₂ entsprechen ca. 48,4 g Reformat) speichern zu können, wird ein Druckgasspeicher mit maximal 8 bar Druck vorgesehen. Die elektrische Leistungsaufnahme wird entsprechend den Annahmen zur Kompressorleistung (vgl. Abschnitt 4.2.4) berechnet. Dabei spielt das Druckverhältnis ψ (in Kapitel 4 als ψ bezeichnet) zwischen Austritt Gasreinigung (ca. 3 bar) und Gasspeicher eine wichtige Rolle. Wie Abbildung 6.11 zu entnehmen ist, steigt die Aufnahmeleistung des Kompressors mit zunehmender Füllung des Gasspeichers deutlich an.

Aufnahmeleistung Kompressor

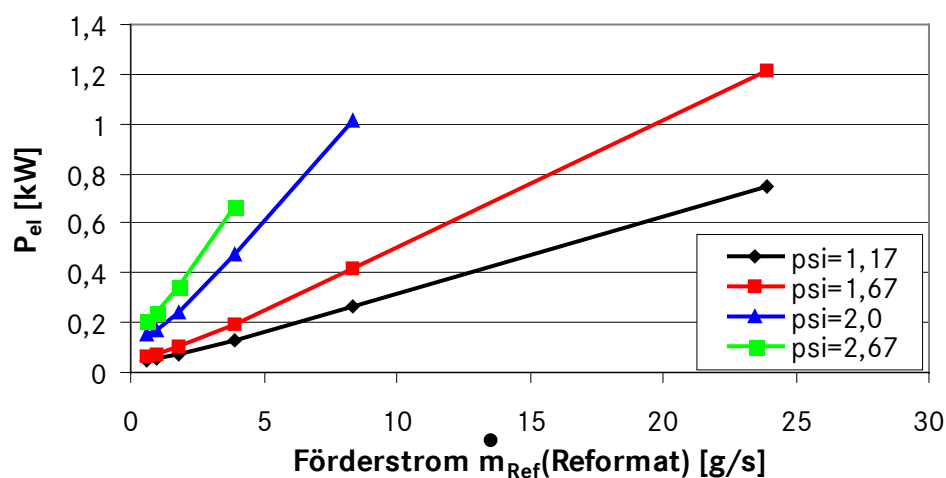


Abbildung 6.11: Aufnahmeleistung des Gasspeicher-Kompressors

^A Im Leerlauf und bei plötzlicher Gaswegnahme kann es, wie oben erläutert, zu Überdosierungen kommen.

^B bzw. Wasserstoff statt Reformat bei BZS mit Membran-Gasreinigung.

Die Kenndaten des Gasspeichers sind in Tabelle 6.28 zusammengefasst. Bedingt durch die begrenzte Förderleistung des Kompressors kann mit zunehmender Füllung des Gasspeichers nicht mehr der maximale Gasstrom an Reformat gefördert werden. Bei vollem Speicher (8 bar, psi = 2,67) sind es noch 3,86 g/s. Der Massenstrom an Reformat entspricht einem elektrischen Strom in der BZ von 41 Ampere (s. Betriebspunkt BZS, Tabelle 4.2).

	Beschreibung
m_{\max, H_2} [g]	3
$m_{\max, \text{Reformat}}$ [g]	48,42
V_{Speicher} [l]	2,1
$\dot{m}_{\text{Ref,LL}}$ [g/s]	3,87
$\dot{m}_{\text{Ref,max}}$ [g/s]	23,93
$P_{\text{el,GS-Komp,max}}$ [kW]	1

Tabelle 6.28: Kenndaten des Gasspeichers

Einen Überblick über die Leistungsbilanz des BZS im Leerlauf gibt Tabelle 6.25. $P_{\text{el,BZS,LL}}$ entspricht dabei der minimalen BZS-Leistung, die ohne Leistungsanforderung des elektrischen Antriebs zur Verfügung steht. Bei der Verwendung eines Gasspeichers kann die Leerlaufleistung des BZS ($P_{\text{el,BZS,LL}}$) durch die Leistungsaufnahme des Kompressors $P_{\text{el,GS-Komp}}$ zum Laden des Gasspeichers teilweise verbraucht werden.

Simulationsergebnisse

Um die am Ende des Fahrzyklus im Gasspeicher vorhandene, eventuell vom Ausgangszustand abweichende Energie korrekt zu bilanzieren, wird diese mit einem Herstellungswirkungsgrad^A des gespeicherten Wasserstoffs aus dem Methanol berücksichtigt ($\eta_{\text{GES}}^* = 0,78$). Der Gesamtenergiebedarf an Methanol eines Brennstoffzellensystems mit Gaszwischenpeicher errechnet sich damit wie folgt:

$$E_{\text{CH}_3\text{OH}} = \int P_{\text{CH}_3\text{OH}} dt + \underbrace{\frac{(E_{\text{Speicher}} - E_{\text{Speicher},0})}{\eta_{\text{GES}}^*}}_{E_{\text{CH}_3\text{OH,Ersatz}}} \quad (6-17)$$

E_{Speicher} = Energieinhalt (Reformat) des Speichers am Ende des Fahrzyklus

$E_{\text{Speicher},0}$ = Energieinhalt (Reformat) des Speichers zu Beginn des Fahrzyklus

Der Energieinhalt des Gasspeichers wird auch auf den Wasserstoffverbrauch der Brennstoffzelle umgerechnet. Der in Tabelle 6.29 dargestellte Energieverbrauch an Wasserstoff errechnet sich direkt aus dem im Speicher vorhandenen Reformat.

^A Für die Bestimmung des Herstellungswirkungsgrades wird der stationäre Wirkungsgrad der Gaserzeugung verwendet (s. Tabelle 4.4).

$$E_{H_2, BZ} = \int P_{H_2, BZ} dt + E_{\text{Speicher}} - E_{\text{Speicher}, 0} \quad (6-18)$$

Der Energieverbrauch für die BZS-Variante mit Gasspeicher ist in Tabelle 6.29 im Vergleich zur Basis dargestellt.

Eine Bilanzierung der 12 V-Bord-Batterie bei einer BZS-Abschaltung ist nicht erforderlich, da mit einer ladezustandsabhängigen Regelung der Zusatzleistung im NEFZ ein Ladezustand von ca. 50% SOC mit einer Schwankungsbreite von +/- ein Prozent SOC gehalten wird.

Variante	E_{Rad} [kWh]	$E_{\text{Getr, Antr}}$ [kWh]	$E_{\text{el, Antr}} / E_{\text{el, BZS}}$ [kWh]	$E_{\text{el, BZ}}$ [kWh]	$E_{H_2, BZ}$ [kWh]	$E_{CH_3OH, Verd}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
Basis	1,31	1,38	1,75	2,40	3,57	5,13	4,71
Gasspeicher	1,31	1,38	1,74	2,44	3,51	4,95	4,55
Veränderung zur Basis [%]	0%	0%	0%	2%	-2%	-3%	-3%

Tabelle 6.29: Energie an verschiedenen Schnittstellen im Vergleich der Basis zu einem BZS mit Gasspeicher

Die durch die Verwendung eines Gasspeichers erzielte Reduktion des Methanolverbrauchs im NEFZ beträgt ca. 3,5% im Vergleich zur Basis. Der Energieaufwand zur Kompression des Reformats ist dabei mit 0,04 kWh im Vergleich zur Energieaufnahme der übrigen Nebenverbraucher ($E_{\text{el, NA}} = 0,68$ kWh) gering. Die Verbrauchseinsparung resultiert neben dem optimierten Leerlaufverhalten auch aus einem optimierten dynamischen Verhalten. Überdosierungen der Gaserzeugung werden jetzt verhindert (vgl. Abbildung 6.3) bzw. das Reformat wird im Gasspeicher aufgefangen.

6.2.8 BZS-Abschaltung mit Bordnetzmodifikation

Modifikations-Index

Fahrzeug
Getriebe
elektrischer Antrieb
Antriebskonzept
BZS-Konzept
Gasreinigung
Druckniveau
Luftversorgung
Gaszwischenspeicherung
Bordnetzmodifikation/ Betriebsstrategie
BZS-Auslegung

Als abschließende Konzept-Modifikation des BZS wird eine Abschaltung des BZS im Leerlauf vorgesehen. Die elektrische Leistung der Nebenverbraucher wird auf den 12 V-Anteil und die zum Betrieb der Kühlwasserpumpen benötigte Leistung (200 W) reduziert. Letzteres dient als Sicherheitsmaßnahme, um eventuelle Überhitzungen durch verzögerte Wärmeströme zu vermeiden. Bei Lean-BZ-Fahrzeugen wird die benötigte elektrische Energie im Leerlauf der Bordbatterie entnommen, bei Hybrid-BZ-Fahrzeugen wird die Hybridbatterie entladen. Zum Ausgleich der Ladebilanz wird bei Lean-BZ-Fahrzeugen die Bordbatterie in anderen Betriebspunkten aufgeladen. Hierzu wird die Soll-Leistung des BZS

um den benötigten Betrag erhöht. Um die Aufnahmeleistung der 12V-Batterie zur Erhöhung der Lebensdauer zu begrenzen, beträgt die Zusatzleistung $P_{\text{el,BN,laden}}$ maximal 2 kW.

$$P_{\text{soll,BZS}} = P_{\text{el,virtuell}} + P_{\text{el,BN,laden}} \quad (6-19)$$

Zusätzlich wird bei dieser Variante generatorisch gebremst. Die Energie wird zum Betrieb der Nebenaggregate verwendet, zusätzlich wird die Bordbatterie in Bremsphasen mit bis zu 2 kW geladen.

Einen Überblick über die Leistungsaufnahmen im Leerlauf gibt Tabelle 6.30. $P_{\text{el,BZS,LL}}$ entspricht dabei der minimalen BZS-Leistung, die ohne Leistungsanforderung des elektrischen Antriebs zur Verfügung steht^A. Dieser Wert sollte möglichst gering sein, da diese Leistung nicht genutzt werden kann. Durch eine BZS-Abschaltung sinkt die elektrische Leistungsaufnahme der Nebenaggregate auf 0,6 kW. Die chemische Leistungsaufnahme des BZS im Leerlauf kann durch Abschaltung sogar um 4,4 kW reduziert werden.

Variante	Basis	Abschaltung
$P_{\text{el,BZS,LL}}$ [kW]	1,1	0,0
$P_{\text{el,BN}}$ [kW]	0,4	0,4
$P_{\text{el,KS}}$ [kW]	0,2	0,2
$P_{\text{el,Komp}}$ [kW]	0,9	0,0
$P_{\text{el,BZ}}$ [kW]	2,7	0,0
$P_{\text{H}_2,\text{BZ}}$ [kW]	3,5	0,0
$P_{\text{CH}_3\text{OH}}$ [kW]	4,4	0,0

Tabelle 6.30: Leistungsaufnahmen/-abgaben im Leerlauf des BZS an verschiedenen Schnittstellen

Simulationsergebnisse

Eine Bilanzierung der 12V-Bord-Batterie bei einer BZS-Abschaltung, analog zur Bilanzierung einer Hybridbatterie (vgl. Gleichung 6-14), ist nicht erforderlich, da mit einer ladezustandsabhängigen Regelung der Zusatzleistung im NEFZ gemäß Gleichung 6-19 und durch regeneratives Bremsen ein Ladezustand von ca. 50% SOC mit einer Schwankungsbreite von +/- ein Prozent SOC eingehalten wird.

Der Energieverbrauch an verschiedenen Schnittstellen ist im Vergleich zur Basis in Tabelle 6.31 dargestellt.

Die Variante mit BZS-Abschaltung zeigt analog zu den Hybridkonzepten (vgl. Tabelle 6.18) den Einfluss von rekuperativ gewonnener Energie. Die Abgabeenergie des BZS wird so um 60 Wh gegenüber der Basis reduziert, da die Energie dem BZS bzw. dem Bordnetz zugeführt wird.

^A Wird $P_{\text{el,BZS,LL}}$ nicht genutzt, so wird der entsprechende Energiebetrag an Wasserstoff im katalytischen Brenner verbrannt.

Variante	E_{Rad} [kWh]	$E_{\text{Getr,Antr}}$ [kWh]	$E_{\text{el,Antr}}/E_{\text{el,BZS}}$ [kWh]	$E_{\text{el,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{H2,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{CH3OH,Verd}}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
Basis	1,31	1,38	1,75	2,40	3,57	5,13	4,71
Abschaltung	1,31	1,38	1,75	2,12	3,19	4,42	4,06
Veränderung zur Basis [%]	0%	0%	0%	-11%	-11%	-14%	-14%

Tabelle 6.31: Energie an verschiedenen Schnittstellen im Vergleich der Basis zu einem BZS mit Abschaltung im Leerlauf

Diese Variante zeigt gegenüber der Basis eine Reduktion der elektrischen Energieabgabe der BZ um zwölf Prozent. Der Energieverbrauch der Nebenverbraucher wird sogar um 33% auf 0,44 kWh reduziert. Diese hohe Energieeinsparung schlägt sich in einem gegenüber der Basis um 14% reduzierten Methanolverbrauch nieder. Die große Energieeinsparung beruht bei der BZS-Abschaltung darauf, dass im Leerlauf ca. 4,4 kW chemische Leistung Methanol eingespart werden. Gleichzeitig wird die elektrische Leistungsabgabe der Nebenaggregate deutlich minimiert (um 900 W, s. Tabelle 6.25), so dass dem Bordnetz nur wenig Energie entzogen wird. Ergänzend kommt hinzu, wenn auch nur in sehr geringem Umfang, dass rekuperativ gewonnene Energie genutzt wird.

6.2.9 Vergrösserte Lastspreizung der Gaserzeugung

Modifikations-Index

Fahrzeug
Getriebe
elektrischer Antrieb
Antriebskonzept
BZS-Konzept

BZS-Auslegung

Lastspreizung der
Gaserzeugung

BZ-Auslegung

Als Maßnahme zur Reduktion der Leerlaufverluste wird eine Erhöhung der Lastspreizung der Gaserzeugung auf 1:60 untersucht. Gleichzeitig wird die minimale elektrische Leistung des Kompressors gemäß der nun reduzierten Luftmenge ebenfalls verringert. Aufgrund der reduzierten Leerlaufleistung wird im Leerlauf deutlich weniger Methanol (0,15 g/s statt 2,2 g/s) verbraucht. Das so beschriebene BZS ist im Vergleich zur Basis in Tabelle 6.32 dargestellt.

	BZS-Konzept
Basis (vgl. Kap. 3.1.1)	BZS mit selektiver Oxidation, Reformat-Betrieb in BZ, Hochdruck-BZ, Lastspreizung der Gaserzeugung 1:40
Lastspreizung+	wie Basis, abw. Lastspreizung der Gaserzeugung 1:60

Tabelle 6.32: Vergleich eines BZS mit vergrößerter Lastspreizung zum Basis-BZS

Einen Überblick über die Leistungsaufnahmen im Leerlauf gibt Tabelle 6.33. $P_{el,BZS,LL}$ entspricht dabei der minimalen BZS-Leistung, die ohne Leistungsanforderung des elektrischen Antriebs zur Verfügung steht. Dieser Wert sollte möglichst gering sein, da diese Leistung nicht genutzt werden kann. Durch eine vergrößerte Lastspreizung sinkt die chemische Leistungsaufnahme des BZS auf 2,9 kW. Zusätzlich kann auch die elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors um 0,2 kW gesenkt werden, da im Vergleich zur Basis weniger Luft im Leerlauf benötigt wird.

Variante	Basis	Lastspreizung+
$P_{el,BZS,LL}$ [kW]	1,1	0,3
$P_{el,BN}$ [kW]	0,4	0,4
$P_{el,KS}$ [kW]	0,2	0,2
$P_{el,Komp}$ [kW]	0,9	0,7
$P_{el,BZ}$ [kW]	2,7	1,6
$P_{H_2,BZ}$ [kW]	3,5	2,1
P_{CH_3OH} [kW]	4,4	2,9

Tabelle 6.33: Leistungsaufnahmen/-abgaben im Leerlauf des BZS an verschiedenen Schnittstelle

Simulationsergebnisse

In Tabelle 6.34 ist der Energieverbrauch an verschiedenen Schnittstellen im Vergleich zur Basis dargestellt. Die Variante mit erhöhter Lastspreizung führt zu einer reduzierten elektrischen Energieaufnahme der Nebenaggregate (im Leerlauf des BZS), was sich in einer gegenüber der Basis um 20 Wh reduzierten BZ-Abgabeenergie widerspiegelt. Der Methanolverbrauch wird bei dieser Variante um 4 Prozent reduziert.

Variante	E_{Rad} [kWh]	$E_{Getr,Antr}$ [kWh]	$E_{el,Antr}/E_{el,BZS}$ [kWh]	$E_{el,BZ}$ [kWh]	$E_{H_2,BZ}$ [kWh]	$E_{CH_3OH,Verd}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
Basis	1,31	1,38	1,75	2,40	3,57	5,13	4,71
Lastspreizung+	1,31	1,38	1,75	2,38	3,55	4,93	4,53
Veränderung zur Basis [%]	0%	0%	0%	-1%	-1%	-4%	-4%

Tabelle 6.34: Energie an verschiedenen Schnittstellen im Vergleich der Basis zu einem BZS mit erhöhter Lastspreizung im Leerlauf

6.2.10 Auslegungs-Modifikationen an der Brennstoffzelle

Modifikations-Index

Fahrzeug
Getriebe
elektrischer Antrieb
Antriebskonzept
BZS-Konzept

BZS-Auslegung

Lastspreizung der
Gaserzeugung

BZ-Auslegung

Im Folgenden wird eine deutliche Wirkungsgradsteigerung der Brennstoffzelle untersucht. Die Wirkungsgradsteigerung wird durch eine erhebliche Reduktion der Stromdichte realisiert. Diese kann entweder durch eine Erhöhung der Zellenzahl oder eine Vergrößerung der Zellfläche herbeigeführt werden.

Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale der Brennstoffzellenvarianten sind in Tabelle 6.35 zusammengefasst.

Bei einer Erhöhung der Zellenzahl (BZ-Zellen+) wird die Anzahl der Zellen von 440 (Basis-BZS) auf 770 erhöht. Die Zellfläche pro Zelle bleibt unverändert. Als charakteristisches Merkmal dieser Variante steigt die Spannung des BZS gegenüber dem Basis-BZS um ca. 7/4 an. Bei einer Veränderung der Zellfläche (BZ- A_{Zelle} +) bleibt die ursprüngliche Spannungslage von 250 V – 450 V (Basis-BZS) erhalten. Der Wirkungsgrad über der Stromdichte ist bei allen drei Varianten identisch (s. Abbildung 6.7, Basis-BZS).

	BZ	Wert
Basis	max. Stromdichte (I/A) [A/cm^2]	0,843
	Zellen	440
	Fläche pro Zelle (A_{Zelle}) [cm^2]	300
BZ-Zellen+	max. Stromdichte (I/A) [A/cm^2]	0,39
	Zellen	770
	Fläche pro Zelle (A_{Zelle}) [cm^2]	300
BZ-A_{Zelle}+	max. Stromdichte (I/A) [A/cm^2]	0,39
	Zellen	440
	Fläche pro Zelle (A_{Zelle}) [cm^2]	525

Tabelle 6.35: Unterscheidungsmerkmale der Brennstoffzellenvarianten

Der Spannungsverlauf über der elektrischen Leistung der BZ ist in Abbildung 6.12 aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist der erhebliche Spannungsunterschied zwischen der Basisvariante und der BZ mit 770 Zellen. Der Spannungsabfall der BZ mit mehr Zellfläche ist deutlich geringer als bei der Basis-BZ.

Auswirkungen auf das Luftmodul

Die Aufnahmeleistung des Luftmoduls wird bei der Variante mit der gestiegenen Zellenzahl dem jetzt um 7/4 höheren Luft-Massenstrom pro erzeugtem Ampere elektrischen Stromes angepasst (vgl. Gleichung 4-35). Der Druckverlauf über dem relativen Massenstrom wird von dem Basis-Luftmodul übernommen (s. Anhang C, Abbildung C.2). Der Auslegungspunkt^A wird

^A Druck- und Wirkungsgradcharakteristik werden über dem relativen Massenstrom dargestellt. Der maximale Luftmassenstrom und damit die Skalierung des Druck- und Wirkungsgradverlaufs werden neu bestimmt.

auf den neu berechneten maximalen Luftmassenstrom festgelegt. Die Bestimmung des maximalen Luftmassenstroms erfolgt durch Gleichung 4-35 und Gleichung 4-38 mit dem maximalen elektrischen Strom.

BZ-Spannungscharakteristik

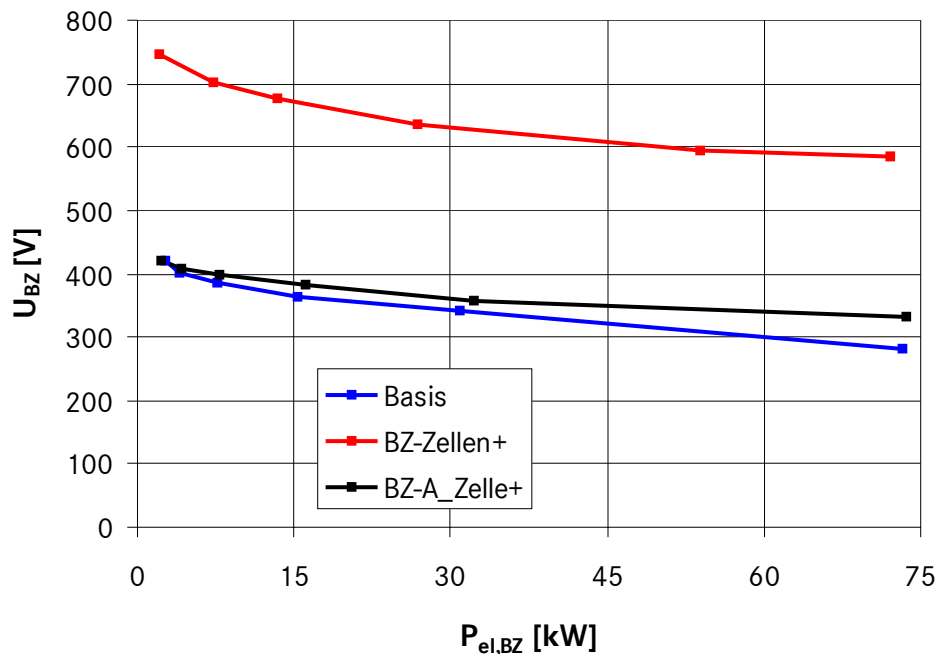


Abbildung 6.12: Spannungsverlauf für BZ mit reduzierter Stromstärke im Vergleich zur Basis

Bei der Variante mit erhöhter Zellfläche bleibt das Verhältnis des erzeugten Stromes aus umgesetztem Wasserstoff gleich (Gleichung 4-35). Durch die größere Zellfläche werden die Kanallängen in der BZ um $7/4$ länger, was den Druckverlust in der BZ um $7/4$ erhöht. Um vergleichbare thermodynamische Bedingungen zum Basis-BZ zu erzeugen, wird der Druck am BZ-Eintritt um die Hälfte des Druckverlustes erhöht. Die andere Hälfte des Druckverlustes wird von dem Eintrittsdruck am Expander abgezogen. Die neue elektrische Aufnahmeleistung errechnet sich nach Gleichung 4-53 ff. aus den gestiegenen Druckverlusten. Der Massenstrom bleibt unverändert.

Die mit den in Abschnitt 4.2.3 vorgestellten Beziehungen errechneten Aufnahmeleistungen der beiden BZ-Varianten sind in Abbildung 6.13 im Vergleich zur Basis dargestellt.

Auswirkungen auf stationäre Auslegungsdaten des BZS

Die stationäre Auslegung des BZS soll sicherstellen, dass zu vergleichende Systeme eine vergleichbare, elektrische Abgabeleistung ($P_{el,BZS}$) erreichen. Hierzu wird die maximale Stromstärke für jede BZ-Variante bestimmt. Zur Berechnung der Gaserzeugung werden die für alle drei Systeme identischen Basis-BZS-Daten aus Kapitel 4 verwendet. Relevante Auslegungsdaten der drei BZ-Varianten für den Volllast-Betriebspunkt sind in Tabelle 6.36 zusammengefasst.

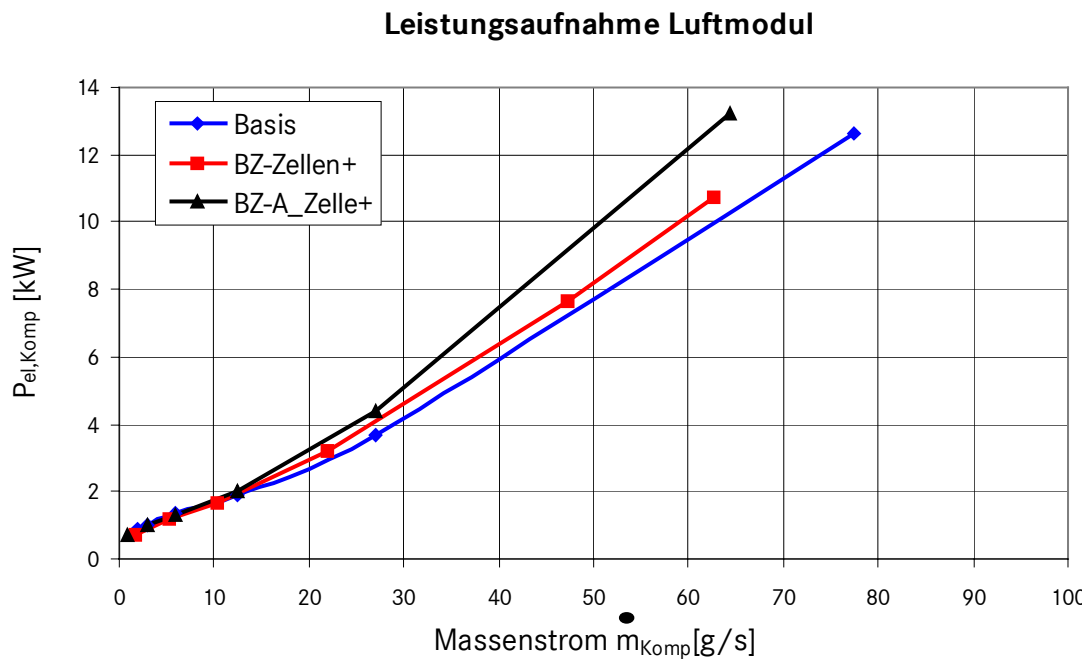


Abbildung 6.13: Leistungsaufnahme Luftmodul bei BZ-Varianten im Vergleich zur Basis

Wie sich zeigt, ist die Aufnahmeleistung des Luftmoduls bei der Variante mit der erhöhten Zellenzahl (BZ-Zellen+) am geringsten. Bei der Basis-Variante ist der Wert aufgrund des höheren Luftmassenstromes höher (vgl. Abbildung 6.8). Trotz geringerem Luftmassenstrom aber aufgrund des höheren Verdichter- und geringeren Expansionsdruckes ist die Aufnahmeleistung des Luftmoduls bei der Variante mit der erhöhten Zellenfläche (BZ-A_{Zelle}+) am größten^A. Der deutlich niedrigere Strombedarf bei den Varianten mit der niedrigen Stromdichte führt zu erheblich niedrigeren chemischen Leistungen an Wasserstoff und Methanol (ca. 17% geringer). Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Varianten mit niedriger Stromdichte ist nicht zu erkennen.

BZ-Variante	Basis	Zellen+	A _{Zelle} +
$P_{el,BZS}$ [kW]	55,9	56,3	55,3
$P_{el,BN}$ [kW]	0,4		
$P_{el,KS}$ [kW]	4,2		
$P_{el,Komp}$ [kW]	13	11	14
$P_{el,BZ}$ [kW]	73	72	74
$P_{H_2,BZ}$ [kW]	138	115	118
P_{CH_3OH} [kW]	177	147	150

Tabelle 6.36: Volllast-Auslegungsdaten für BZ-Varianten im Vergleich zur Basis

Die Volllastauslegung beeinflusst, analog zu den BZS-Konzepten (vgl. Tabelle 6.22), den Leerlaufverbrauch des BZS. Bedingt durch die bei allen drei BZS identische Lastspreizung von 40 ergibt sich für das BZS mit der erhöhten Zellenzahl der niedrigste Leerlaufverbrauch an

^A Die Leistungsaufnahme eines Verdichters für eine polytropne Zustandsänderung ist proportional dem Massenstrom, Druckverluste gehen aber logarithmisch ein (vgl. Gl. 4-53)

Methanol (17% geringer als bei Basis-BZS). Bei der Variante mit erhöhter Zellfläche wird der Leerlauf-Verbrauch an Methanol im Vergleich zur Basis um 15% reduziert.

BZ-Variante	Basis	Zellen+	$A_{\text{Zelle}+}$
$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH},\text{min}}$ [g/s]	0,227	0,188	0,193
$P_{\text{CH}_3\text{OH},\text{min}}$ [kW]	4,4	3,7	3,8

Tabelle 6.37: Leerlaufverbrauch an Methanol

Der mit diesen drei Systemen nach Gleichung 4-4 errechnete maximale BZS-Wirkungsgrad^A ist über der BZS-Abgabeleistung in Abbildung 6.14 aufgetragen.

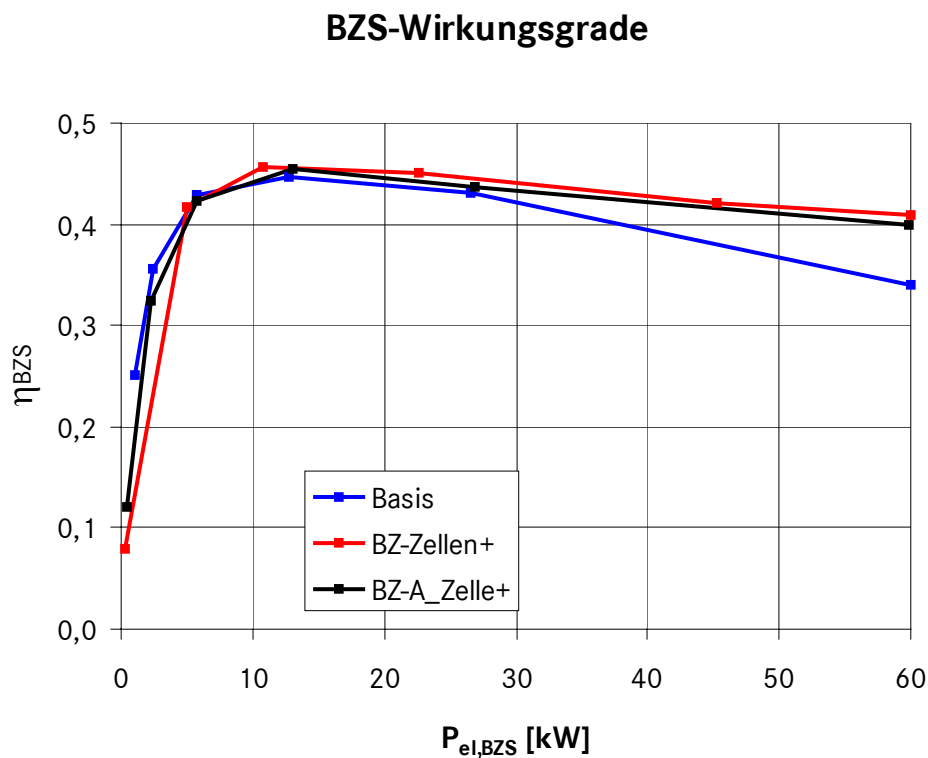


Abbildung 6.14: Stationäre BZS-Wirkungsgrade für verschiedene BZ-Konzepte

Wie in Abbildung 6.14 zu erkennen ist, spiegelt sich die reduzierte Stromstärke erst bei mittleren bis hohen BZS-Abgabeleistungen (über 30 kW) in einem höheren Wirkungsgrad des BZS wider. Im Teillastbereich, welcher für den Fahrzyklus (NEFZ) wesentlich relevanter ist, zeigen sich nahezu keine Unterschiede zwischen den drei Systemen.

Simulationsergebnisse

Die im NEFZ errechnete Energie an relevanten Schnittstellen (NEFZ) für die drei Varianten ist in Tabelle 6.14 im Vergleich zur Basis dargestellt.

Die elektrische Aufnahmeenergie der Nebenverbraucher unterscheidet sich bei den drei Systemen nur marginal. Die elektrische Abgabeenergie der BZ ist demzufolge bei allen drei Vari-

^A Kühlaggregate mit minimaler Leistungsaufnahme (200 W)

anten nahezu identisch. Der Wasserstoffbedarf der BZ ist bei der Variante mit erhöhter Zellenzahl um fünf Prozent geringer als bei der Basis-Variante. Bei der Variante mit erhöhter Zellfläche sind es im Vergleich zur Basis 3,5% weniger Energiebedarf.

Variante	E_{Rad} [kWh]	$E_{\text{Getr,Antr}}$ [kWh]	$E_{\text{el,Antr}}/E_{\text{el,BZS}}$ [kWh]	$E_{\text{el,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{H}_2,\text{BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{CH}_3\text{OH,Verd}}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
Basis	1,31	1,38	1,75	2,40	3,57	5,13	4,71
BZ-Zellen+	1,31	1,38	1,75	2,38	3,39	4,85	4,46
BZ-A_{Zelle}⁺	1,31	1,38	1,75	2,40	3,44	4,87	4,47

Tabelle 6.38: Energieverbrauch an verschiedenen Schnittstellen im Vergleich der Basis zu verschiedenen BZ-Varianten

Der um 17% reduzierte Methanolverbrauch im Leerlauf erhöht die Energieeinsparung bei der BZ-Variante mit mehr Zellen im Vergleich zur Basis von fünf Prozent ($E_{\text{H}_2,\text{BZ}}$) auf 5,5% ($E_{\text{CH}_3\text{OH,Verd}}$). Die BZ-Variante mit erhöhter Zellfläche erreicht, aufgrund der um 15% reduzierten Mindestmenge an Methanol, eine fünfprozentige Energieeinsparung des Methanolverbrauchs im Vergleich zur Basis.

Insgesamt zeigt sich, dass eine signifikante Wirkungsgradverbesserung der BZ auch mit Systemen mit deutlich reduzierter Stromdichte im NEFZ nicht erzielt wird. Entscheidend für die Verbrauchseinsparung gegenüber der Basisvariante ist die aus der BZS-Auslegung resultierende Methanolleistung im Leerlauf.

6.3. Vergleich verbrauchsreduzierender Maßnahmen

Im Folgenden werden die oben beschriebenen Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion im NEFZ miteinander verglichen. Danach werden die Wechselwirkungen der Modifikationen bei gleichzeitiger Anwendung in einem Fahrzeug betrachtet. Abschließend wird ein optimiertes BZ-Fahrzeug-Konzept entwickelt und hinsichtlich seines Verbrauchspotentiales bewertet.

Ein Vergleich der im NEFZ untersuchten Varianten mit den erzielten Energieeinsparungen an Dieseläquivalent (im Vergleich zur Basis) ist in Abbildung 6.15 dargestellt.

Mit Ausnahme eines automatisierten Zwei-Gang-Getriebes (2-Gang) kann mit jeder Modifikation eine Einsparung erzielt werden. Die überwiegende Mehrzahl der Varianten führt zu einer Verbrauchsreduktion von ca. fünf Prozent. Signifikante Verbrauchsreduktionen von 14% bzw. 22% können nur mit einer BZS-Abschaltung (Abschaltung) bzw. einem Hybrid-Antriebskonzept (Hybrid-LVU LP) realisiert werden. Der Einfluss der Gewichtsreduktion um 210 kg (SMK) auf den Verbrauch ist mit ca. sieben Prozent Energieeinsparung bei weitem nicht so entscheidend wie der Einfluss einer BZS-Abschaltung. Auch andere teilweise gravierende Änderungen des Brennstoffzellensystems, wie z.B. eine Vergrößerung der BZ um 75% (BZ-Zellen+ und BZ-

A_{Zelle}), haben mit ca. sechs Prozent nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den Dieseläquivalent-Verbrauch im NEFZ.

Verbrauchsveränderung relativ zur Basis im NEFZ

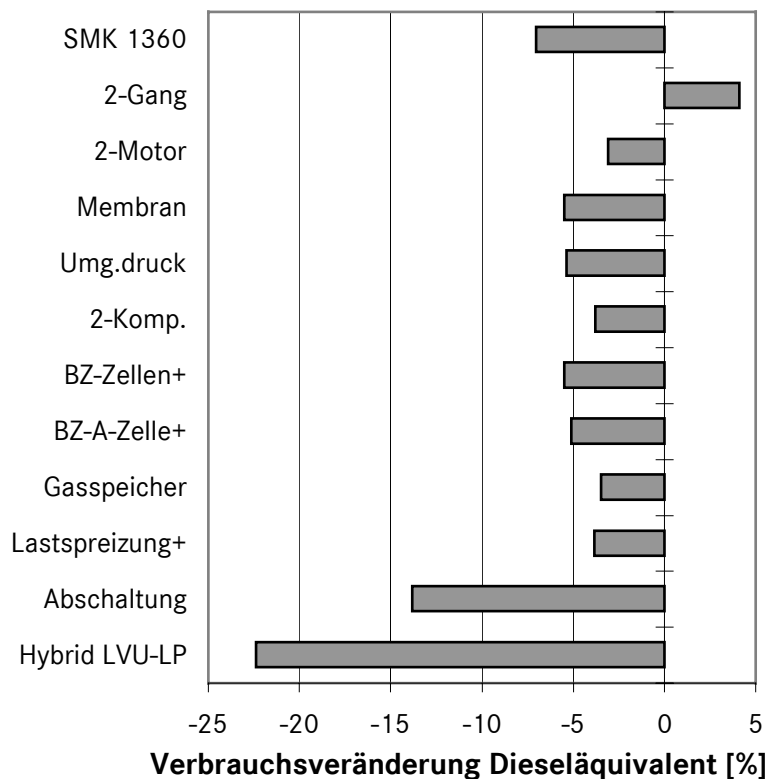


Abbildung 6.15: Einfluss verbrauchssenkender Maßnahmen im NEFZ

Insgesamt zeigt sich, dass eine erhebliche Reduktion der Methanol-Leerlaufverluste (ca. 4,4 kW Methanol bei Basis-BZS) eine deutliche Verbrauchseinsparung bewirkt. Einen alternativen Weg kann man durch die Verwendung eines Hybridkonzepts beschreiten. Hier wird Bremsenergie genutzt, und durch Phlegmatisierung werden Überdosierungen des BZS minimiert. Ferner kann hier Energie im Leerlauf-Betriebszustand zwischengespeichert werden.

Zusätzlich zu einer Untersuchung der Modifikationen im NEFZ werden diese auch in den US-Fahrzyklen FTP 75 und Highway untersucht. Die Ergebnisse sind dargestellt im Anhang D.

6.4. Wechselwirkungen der verschiedenen BZS-Modifikationen

Mit keiner der oben vorgestellten Modifikationen kann das angestrebte Verbrauchsziel (vgl. Kap. 4) von 2,8 l/100 km Dieseläquivalent im NEFZ erreicht werden. Im Folgenden soll nun untersucht werden, ob es durch sinnvolles Kombinieren der Modifikationen möglich ist, dieses Ziel zu erreichen. Um eine sinnvolle Kombination zu ermitteln, werden die Maßnahmen paarweise kombiniert und simuliert. Einerseits sollen so Verstärkungseffekte durch nicht lineares^A Verhalten [47] der verbrauchssenkenden Maßnahmen optimal genutzt werden. Andererseits sollen Abschwächung bzw. Wegfall der Verbrauchseinsparung zweier Maßnahmen in

^A Lineares Verhalten bedeutet, dass das Superpositionsprinzip der Überlagerung von zwei Maßnahmen gilt.

der Kombination verhindert werden. Im Folgenden werden diese Verstärkungseffekte ermittelt.

Zunächst wird ein Verbrauchsreduktionsfaktor f_i für eine einzelne untersuchte Modifikation definiert:

$$f_i = \frac{V_i}{V_{\text{Bas}}} \quad (6-20)$$

v_{Bas} = Verbrauch der Basisvariante

v_i = Verbrauch der modifizierten Variante

Analog wird mit einem Verbrauch v_j ein Verbrauchsreduktionsfaktor f_j für eine Modifikation j ermittelt. Anschließend werden beide Modifikationen in ein Simulationsmodell eingebaut und simuliert. Das Ergebnis führt zu einem Verbrauch v_{ji} . Jetzt kann ein Verstärkungsfaktor f_{ij} definiert werden.

$$f_{ij} = \frac{v_{ij}}{v_{\text{bas}}} \frac{1}{f_i} \frac{1}{f_j} \quad (6-21)$$

v_{ji} = simulierter Verbrauch bei zwei Modifikationen

Der Verstärkungsfaktor f_{ij} ist ein Maß dafür, inwieweit sich die beiden Maßnahmen gegenseitig verstärken oder abschwächen. Ist der Verstärkungsfaktor gleich eins, so ergibt die Simulation beider Maßnahmen eine Verbrauchsreduktion, die dem Produkt der Verbrauchsreduktionen jeder einzelnen Maßnahme entspricht (Superpositionsprinzip [47]).

$$v_{ij} = v_{\text{bas}} f_i f_j \quad (6-22)$$

Um die Zweckmäßigkeit einer Kombination von zwei Modifikationen zu bewerten, wird der Kopplungsfaktor in drei Bereiche (Tabelle 6.39) eingeteilt. Ist der Verstärkungsfaktor kleiner eins, dann ist der in der Kombination zweier Maßnahmen ermittelte Verbrauch niedriger als der durch Superposition nach Gleichung 6-21 ermittelte. Ist der Verstärkungsfaktor größer eins, heben sich die verbrauchsreduzierenden Maßnahmen teilweise oder vollständig auf. Der simulierte Verbrauch der Kombination beider Maßnahmen ist höher als der durch Superposition ermittelte.

Die Einteilung in Tabelle 6.39 ist dabei so gewählt, dass der Wegfall einer mehr als dreiprozentigen Verbrauchseinsparung (im Vergleich zur Basis, vgl. Abbildung 6.15) als negative Verstärkung gewertet wird. Analog entspricht eine positive Verstärkung einer mehr als dreiprozentigen Verbrauchseinsparung. Verstärkungsfaktoren im Bereich von 0,97 bis 1,03 bedeuten, dass zwei Modifikationen sich nur gering beeinflussen.

Symbol	Wertebereich Verstärkungsfaktor	Beschreibung
+	$f_{ij} < 0,97$	positive Verstärkung der Energieeinsparung zweier Modifikationen
o	$1,03 > f_{ij} > 0,97$	geringe Verstärkung der Energieeinsparung zweier Modifikationen, nahezu unabhängiges Verhalten
-	$f_{ij} > 1,03$	negative Verstärkung bzw. Abschwächung der Energieeinsparung zweier Modifikationen

Tabelle 6.39: Einteilung des Verstärkungsfaktors

Für die untersuchten Kombinationen ist der Verstärkungsfaktor in Tabelle 6.40 dargestellt. Eine Untersuchung der Verbrauchsreduktion durch eine Reduktion der Fahrwiderstände (SMK 1360) wird keine bzw. nur eine geringe Rückkopplung^A auf eine andere verbrauchsreduzierende Maßnahme haben. Das Gleiche gilt für eine Optimierung des elektrischen Antriebs und des Getriebes (2-Gang, 2-Motor). Diese Modifikationen werden daher in der nachfolgender Betrachtung der gegenseitigen Beeinflussung von Modifikationen nicht aufgeführt.

Zwei Kombinationen werden nicht betrachtet: Zum einen ist dieses eine Kombination aus Umgebungsdrucksystem (Umg.druck) und zwei Kompressoren (2-Komp.). Durch ein Umgebungsdrucksystem wird die Leerlauf-/Teillastenergieaufnahme des Luftmoduls deutlich reduziert. Eine weitere Reduktion der Leistungsaufnahme durch eine Splittung in zwei Kompressoren kann keinen signifikanten Einfluss haben (s. Abbildung 6.13) und ist daher nicht sinnvoll. Zum anderen wird eine Erhöhung der Zellenzahl (Zellen+) bei gleichzeitiger Vergrößerung der Zellfläche ($A_{\text{Zelle}+}$) ebenfalls nicht untersucht, da insgesamt eine Vergrößerung der Brennstoffzelle um den Faktor drei entstehen würde, was nicht angestrebt wird.

Wie in Tabelle 6.40 zu erkennen ist, ist eine Kombination von einer höheren Zellenzahl der BZ (Zellen+) und Umgebungsdruck-BZS anzustreben. Durch die niedrige Stromdichte wird ein für Umgebungsdruck-BZS typisches starkes Abfallen des BZ-Wirkungsgrades bei hohen Stromdichten verhindert. Der gleiche Effekt zeigt sich auch, wenn hohe Stromstärken bei Umgebungsdruck-BZS durch eine höhere Zellenzahl der BZ (Zellen+) vermieden werden. Eine größere Zellfläche ($A_{\text{Zelle}+}$) wirkt sich nicht so positiv aus, da die Energieeinsparung eines Umgebungsdruck-BZS mit steigendem Druckniveau am Eintritt der BZ abnimmt. Das sich ein Umgebungsdruck BZS in Kombination mit einer vergrößerten Lastspreizung (Lastspreizung+) positiv auswirkt, ist durch die hohe überschüssige Leerlaufleistung an Methanol bei dem Umgebungsdruck-BZS zu erklären. Durch eine vergrößerte Lastspreizung wird diese gesenkt, der niedrige Strombedarf des Umgebungsdruck-BZS im Leerlauf kann somit besser genutzt werden.

^A Die absolute Verbrauchseinsparung durch ein Hybridkonzept verringert sich bei sinkendem Fahrzeuggewicht.

		Umg.druck	2-Komp.	BZ-Zellen+	BZ-A _{Zelle} +	Gasspeicher	Lastspreizung+	Abschaltung	Hybrid LVU-LP
Membran	o	o	o	o	o	o	-	o	
Umg.druck		n.u.	+	o	o	+	o	o	
2-Komp.			o	o	o	o	o	o	
BZ-Zellen+				n.u.	o	o	-	o	
BZ-A _{Zelle} +					o	o	-	o	
Gasspeicher						o	o	-	
Lastspreizung+							-	-	
Abschaltung								-	

Tabelle 6.40: Bewertung der Kombinationen von BZS-Modifikationen

Eine vergrößerte Lastspreizung und eine BZS-Abschaltung haben bei gemeinsamer Anwendung eine teilweise gegenseitige Aufhebung der Verbrauchseinsparung zur Folge, da diese Systeme den Leerlauf-Betriebszustand des BZS optimieren. Kombiniert man Gasspeicher mit einer BZS-Abschaltung oder einer vergrößerten Lastspreizung, so findet nur eine teilweise Aufhebung der Verbrauchseinsparung statt (kleiner drei Prozent). Ein Teil der Verbrauchseinsparung durch den Gasspeicher wird, unabhängig vom Leerlaufverhalten, durch eine Reduktion der Überdosierungsverluste der Gaserzeugung bei hochdynamischem Betrieb erzielt.

In Verbindung mit einem Hybridkonzept ist ein Gasspeicher jedoch in Bezug auf die Verbrauchseinsparung keine sinnvolle Kombination. Dieses kann damit begründet werden, dass bei einem Hybridkonzept mit (leicht) phlegmatisierter Betriebsstrategie keine signifikanten Überdosierungen der Gaserzeugung erfolgen. Zusätzlich treten Leerlaufverluste des BZS (elektrischer Leistungsüberschuss von ca. 1 kW bei Basis-BZS) bei einem Hybridkonzept nicht auf, da diese Energie zum Aufladen der Batterie genutzt werden kann. Diese Eigenschaft des Hybridkonzepts führt dazu, dass auch andere Maßnahmen, die nahezu ausschließlich Leerlaufverluste reduzieren, wie z.B. eine vergrößerte Lastspreizung oder eine BZS-Abschaltung, in Verbindung mit einem Hybridkonzept keine zusätzliche signifikante Verbrauchseinsparung zum Hybridkonzept erzielen.

Insgesamt wird aus Tabelle 6.40 ersichtlich, dass viele der verbrauchssenkenden Maßnahmen nur geringe bzw. keine gegenseitigen Wechselwirkungen zeigen. Als Konsequenz können diese miteinander kombiniert werden, ohne dass mit Abschwächungen oder gar gegenseitiger Aufhebung zu rechnen ist. Die Ausnahmen davon wurden oben diskutiert.

6.5. Synthese eines verbrauchsoptimierten BZ-Fahrzeugs

Im Folgenden wird, ausgehend von dem in Tabelle 6.2 aufgeführten Basis-Fahrzeug und den in Abschnitt 6.2 vorgestellten Modifikationen, ein verbrauchsoptimiertes BZ-Antriebskonzept entwickelt. Dabei werden die in 6.4 gewonnenen Erkenntnisse über die Wechselwirkungen der Modifikationen berücksichtigt. Die Synthese des verbrauchsoptimierten Fahrzeugs bezieht sich im Wesentlichen auf die im NEFZ gewonnenen Erkenntnisse.

Die verwendeten Modifikationen werden entsprechend den mit ihnen erzielten Einsparungen an Energie im NEFZ ausgewählt (vgl. Abbildung 6.15). Als die vielversprechendste Modifikation wird ein Hybridkonzept eingesetzt. Unter den Hybridkonzepten wird ein leistungsverzweigter Hybrid mit unidirektionalem DC/DC-Wandler und leicht phlegmatisierter Betriebsstrategie aufgrund des niedrigsten Verbrauchs im NEFZ ausgewählt (vgl. Tabelle 6.18).

Die abgesehen von dem Hybridkonzept vielversprechendste Energieeinsparmaßnahme nach Abbildung 6.15 ist eine BZS-Abschaltung. Aufgrund der Wechselwirkungen mit einem Hybridkonzept (vgl. Tabelle 6.40) wird nicht davon ausgegangen, dass mit dieser Maßnahme eine zusätzliche Einsparung erzielt werden kann. Für ein verbrauchsoptimiertes Antriebskonzept kommt diese Maßnahme daher nicht in Frage.

Als weitere Modifikationen, von denen nur geringe Wechselwirkungen mit Hybridkonzepten erwartet werden, stehen nach Abbildung 6.15 eine Membran-Gasreinigung (Membran), eine niedrige Stromdichte (BZ-Zellen+, BZ- A_{Zelle} +) und ein Umgebungsdruck-BZS zur Verfügung. Da eine Kombination dieser Konzepte angestrebt wird, sollte nach Tabelle 6.40 entweder auf ein Umgebungsdruck-BZS oder eine niedrige Stromdichte mit größerer Zellfläche (BZ- A_{Zelle} +) verzichtet werden. Wird auf eine niedrige Stromdichte mit größerer Zellfläche verzichtet, so kann ein Umgebungsdruck-BZS nur mit einer niedrigen Stromdichte mit erhöhter Zellenzahl (BZ-Zellen+) kombiniert werden. Im Folgenden wird zunächst eine Membran-Gasreinigung eingebaut. Die im NEFZ erzielten Energieverbräuche sind im Vergleich zu dem als Ausgangsvariante benutzten Hybridkonzept in Tabelle 6.41 dargestellt.

		Hybrid LVU-LP	Membran	E_{Rad} [kWh]	$E_{\text{el,Antr}}/E_{\text{el,BZS}}$ [kWh]	$E_{\text{el,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{H}_2\text{BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
x		1,31	1,74	1,91	2,74	3,98	3,66		
x	x	1,31	1,74	2,02	2,71	3,89	3,57		
Einsparung [%]		0%	0%	6%	-1%	-2%	-2%		

Tabelle 6.41: Energieverbrauch für Hybridkonzept mit und ohne Membran-Gasreinigung

Wie aus Tabelle 6.41 zu erkennen ist, wird der chemische Energieverbrauch an der BZ durch die durch Wasserstoffbetrieb erzielte Wirkungsgradverbesserung um 30 Wh minimiert. Als

Konsequenz sinkt der Methanolenergiebedarf der Gasreinigung, was sich in einem um 0,09 l/100 km reduzierten Verbrauch an Dieseläquivalent niederschlägt.

Wird das um eine Membran-Gasreinigung erweiterte Hybridkonzept jetzt mit größerer Zellenzahl dargestellt, so werden die in Tabelle 6.42 dargestellten Energieverbräuche ermittelt.

Hybrid LVU-LP			Membran		BZ-Zellen+		E_{Rad} [kWh]		$E_{\text{el,Antr}}/E_{\text{el,BZS}}$ [kWh]		$E_{\text{el,BZ}}$ [kWh]		$E_{\text{H2,BZ}}$ [kWh]		$E_{\text{CH3OH,Verd}}$ [kWh]		V_{Diesel} [l/100 km]	
x	x		1,31	1,74	2,02	2,71	3,89	3,57										
x	x	x	1,31	1,74	1,99	2,63	3,80	3,49										
Einsparung [%]			0%	0%	-1%	-3%	-2%	-2%										

Tabelle 6.42: Energieverbrauch für optimiertes Hybridkonzept mit und ohne niedrige Stromdichte

Wie in Tabelle 6.42 zu erkennen ist, kann die Leistungsaufnahme der Nebenaggregate um 30 Wh reduziert werden. Gleichzeitig wird der Wirkungsgrad der BZ nochmals verbessert (η_{BZ} steigt von 0,705 auf 0,722). Zusammen ergibt sich ein um drei Prozent reduzierter Wasserstoffverbrauch am BZ-Eintritt. Dieser kann von der unverändert übernommenen Gaserzeugung nicht vollständig in einen entsprechend niedrigeren Methanolverbrauch umgesetzt werden. Der in Tabelle 6.42 dargestellte Methanolverbrauch basiert aber auf dem nach Gleichung 6-14 bilanzierten Methanolverbrauch. Bei dem bilanzierten Methanolverbrauch wird der Ladezustand der Hybridbatterie berücksichtigt. Da die Betriebsstrategie des Hybridkonzeptes unverändert von der Ausgangsvariante übernommen wurde, befindet sich die Batterie aufgrund des geringeren Strombedarfs und der anderen Wirkungsgradverteilung des BZS in einem geringfügig veränderten Ladezustand (52% SOC statt 51%). In Verbindung mit einem leicht veränderten Herstellungswirkungsgrad des elektrischen Stroms (andere Wirkungsgradverteilung) wird durch die Bilanzierung der Batterie der Verbrauchsvorteil durch die niedrigere Stromdichte teilweise egalisiert. Insgesamt ist dieser Einfluss so gering, dass auf eine Anpassung der Betriebsstrategie verzichtet wird.

Als weitere Modifikation zur Verbrauchsreduktion wird ein Umgebungsdruck-BZS vorgesehen. Die sich in Verbindung mit diesem BZS ergebenden Energieverbräuche an verschiedenen Schnittstellen sind im Vergleich zum vorgehend betrachteten System in Tabelle 6.43 dargestellt. Die Werte aus Tabelle 6.43 zeigen eine deutliche Energieeinsparung (0,31 kWh) bei der Leistungsaufnahme der Nebenaggregate. Eine Aufschlüsselung der Leistungsaufnahme der Nebenaggregate geht aus Tabelle 6.44 hervor. Durch die Bilanzierung mit der durch Rekuperation zurückgewonnenen Energie (0,33 kWh) ist die von der BZ erzeugte elektrische Energie niedriger als die vom Fahrtrieb benötigte.

	Hybrid LVU-LP	Membran	BZ-Zellen+	Umg.druck	E_{Rad} [kWh]	$E_{\text{el,Antr}}/E_{\text{el,BZS}}$ [kWh]	$E_{\text{el,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{H2,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{CH3OH,Verd}}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
x	x	x		1,31	1,74	1,99	2,63	3,80	3,49	
x	x	x	x	1,31	1,74	1,68	2,22	3,44	3,16	
Einsparung [%]				0%	0%	-16%	-16%	-9%	-9%	

Tabelle 6.43: Energieverbrauch für optimiertes Hybridkonzept mit und ohne Umgebungsdruck-BZS

Bemerkenswert ist zudem, dass der Wirkungsgrad der BZ, anders als bei der Betrachtung des Umgebungsdruck-BZS mit dem Basis-BZS (vgl. Tabelle 6.24), hier nicht erkennbar abfällt. Dieser Effekt ist auf die niedrige Stromstärke zurückzuführen. Die erheblichen Energieeinsparungen können nicht vollständig auf die Gaserzeugung übertragen werden. Den Verbesserungen sind hier bedingt durch das dynamische Verhalten^A und den konstanten Leerlaufverbrauch Grenzen gesetzt, so dass Verbesserungen im elektrischen System nicht vollständig in Methanolreduktion umgesetzt werden können.

	Hybrid LVU-LP	Membran	BZ-Zellen+	Umg.druck	$E_{\text{el,Komp}}$ [kWh]	$E_{\text{el,KS}}$ [kWh]	$E_{\text{el,BN}}$ [kWh]	$E_{\text{el,NA}}$ [kWh]
x	x	x		0,39	0,07	0,13	0,58	
x	x	x	x	0,08	0,07	0,13	0,27	
Einsparung [%]				-0,80	0,00	0,00	-0,53	

Tabelle 6.44: Energieaufnahme der Nebenaggregate

Eine Untersuchung des mit Membran-Gasreinigung, erhöhter Zellenzahl, Umgebungsdruck ausgerüsteten BZS mit Gasspeicher und vergrößerter Lastspreizung brachte keine signifikante Verbrauchsverbesserung (s. Anhang D, Tabelle D.3).

Das hier dargestellte Umgebungsdruck-BZS mit Membran-Gasreinigung und erhöhter Zellenzahl wird daher in Verbindung mit einem leistungsverzweigten, leicht phlegmatisierten Hybrid-Antriebskonzept als optimales BZS-Konzept bezeichnet.

Eine weitere Verbrauchsverbesserung kann durch Verbesserung der Effizienz des elektrischen Antriebs und einer Reduktion der Fahrwiderstände erzielt werden. Zunächst wird der Einfluss eines elektrischen Doppel-Antriebs (2-Motor) betrachtet. Der im NEFZ ermittelte Energieverbrauch für ein solches Fahrzeug ist in Tabelle 6.45 dargestellt.

^A Das dynamische Verhalten der Gaserzeugung ist in 6.1.5 beschrieben.

Hybrid LVU-LP	Membran	BZ-Zellen+	Umg.druck	2-Motor	E_{Rad} [kWh]	$E_{\text{el,Antr}}/E_{\text{el,BZS}}$ [kWh]	$E_{\text{el,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{H2,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{CH3OH,Verd}}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
x	x	x	x		1,31	1,74	1,68	2,22	3,44	3,16
x	x	x	x	x	1,31	1,66	1,60	2,10	3,29	3,02
Einsparung [%]					0%	-5%	-5%	-5%	-4%	-4%

Tabelle 6.45: Energieverbrauch für optimiertes Hybridkonzept mit und ohne elektrischen Doppel-Antrieb (2-Motor)

Wie aus Tabelle 6.45 ersichtlich wird, kann der elektrische Energieverbrauch des Antriebs um fünf Prozent gesenkt werden. Diese Verbrauchseinsparung wirkt sich in vollem Umfang auf den Stromverbrauch der BZ und den Wasserstoffbedarf aus. Ähnlich wie bei der Verbesserung des durch das Umgebungsdruck-BZS kann aber auch hier der Verbrauchsvorteil aus oben genannten Gründen nicht vollständig in einen reduzierten Methanolverbrauch umgesetzt werden.

Als letzte Maßnahme wird eine Reduktion der Fahrwiderstände betrachtet. Hierzu wird das Fahrzeuggewicht so reduziert (um 220 kg), dass eine Reduktion um zwei Schwungmassenklassen stattfindet. Die errechneten Energieverbräuche für ein so optimiertes Fahrzeug (SMK 1360) sind in Tabelle 6.46 dargestellt.

Hybrid LVU-LP	Membran	BZ-Zellen+	Umg.druck	2-Motor	SMK 1360	E_{Rad} [kWh]	$E_{\text{el,Antr}}/E_{\text{el,BZS}}$ [kWh]	$E_{\text{el,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{H2,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{CH3OH,Verd}}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
x	x	x	x	x		1,31	1,66	1,60	2,10	3,29	3,02
x	x	x	x	x	x	1,19	1,50	1,51	1,93	3,05	2,81
Einsparung [%]						-10%	-9%	-6%	-8%	-7%	-7%

Tabelle 6.46: Energieverbrauch für optimiertes Hybridkonzept mit und ohne Gewichtsreduktion um zwei Schwungmassenklassen (SMK 1360)

Der Bedarf an mechanischer Energie kann zwar um zehn Prozent gesenkt werden, bedingt durch die sinkende Auslastung des elektrischen Antriebs reduziert sich die Einsparung am Austritt des BZS aber zu neun Prozent. Da mit sinkendem Fahrzeuggewicht auch die regenerativ gewinnbare elektrische Energie sinkt (vgl. Gleichung 6-1), reduziert sich die Einsparung an elektrischer Energie am Austritt der BZ auf sechs Prozent. In Verbindung mit den geringeren Fahrwiderständen sinkt aber auch die Auslastung der BZ, was deren Wirkungsgrad verbessert und die Einsparung an Wasserstoff auf acht Prozent erhöht. Wie schon bei vorherigen Modifikationen (s.o.) kann auch hier diese Einsparung nicht vollständig in einen geringeren Methanolverbrauch umgesetzt werden.

6.6. Ergebnisse der Untersuchungen

Abschließend wird das optimierte BZ-Fahrzeug mit dem Basis-Fahrzeug verglichen. Die errechneten Energieverbräuche für ein optimiertes Fahrzeug (SMK 1360) sind im Vergleich zum Basis-Fahrzeug in Tabelle 6.47 dargestellt. Die Auslegungsdaten der beiden Fahrzeuge sind in Tabelle 6.48 zusammengefasst.

Variante	E_{Rad} [kWh]	$E_{\text{Getr,Antr}}$ [kWh]	$E_{\text{el,Antr}/E_{\text{el,BZS}}}$ [kWh]	$E_{\text{el,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{H}_2,\text{BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{CH}_3\text{OH},\text{Verd}}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
Basis	1,31	1,38	1,75	2,40	3,57	5,13	4,71
optimiertes Antriebskonzept	1,19	1,23	1,50	1,51	1,93	3,05	2,81
Veränderung zur Basis [%]	-10%	-10%	-14%	-37%	-46%	-40%	-40%

Tabelle 6.47: Energieverbrauch für optimiertes Hybridkonzept im Vergleich zur Basis

Um das Verbrauchsziel zu erreichen, sind neben einem Hybridantriebskonzept Modifikationen des BZS und des elektrischen Antriebs sowie eine erhebliche Gewichtsreduktion erforderlich. Nur mit der Schwungmassenklasseneinteilung von 1360 kg wird der Zielverbrauch erreicht.

Das in Kapitel 1 formulierte Ziel eines Dieseläquivalentverbrauchs im NEFZ von 2,8 l/100 km wird erreicht.

Gegenüber der Basis bedeutet dies eine Energieeinsparung von 40%. Die Reduktion der Fahrwiderstände ist in diesem Zusammenhang wichtig, aber auch mit einem Gewicht von 1590 kg wird ein Verbrauch von 3 l/100 km Dieseläquivalent im NEFZ erreicht, was einer Energieeinsparung im NEFZ gegenüber dem Basisfahrzeug von ca. 36% (vgl. Tabelle 6.46), entspricht.

Entgegen den Aussagen von [5,6] kann damit eine Überlegenheit der BZ-Technologie gegenüber konventioneller Antriebstechnik aufgezeigt werden. Ein vergleichbares Fahrzeug mit optimiertem konventionellen Antrieb erreicht zum Zeitpunkt der Einführung der BZ-Technologie im Jahr 2005 voraussichtlich einen Verbrauch von ca. 3,9 l/100 km Dieseläquivalent (Tabelle 1.2). Damit kann in der Gesamtenergiebilanz sogar der erhebliche Gewichts-nachteil der BZ-Fahrzeuge und eine für Methanol ungünstige Betrachtung des vorgelagerten Energieverbrauchs (Erzeugung und Transport) egalisiert werden.

	Beschreibung	Wert	Beschreibung	Wert
	Basis		optimiertes BZ-Konzept	
Fahrzeug	Mercedes-Benz A-Klasse BZ, SMK (ECE) [kg]	1590	Mercedes-Benz A-Klasse BZ, SMK (ECE) [kg]	1360
Getriebe	Festübersetzung, i [-]	6,48	Festübersetzung, i [-]	6,48
El. Antrieb	eine Asynchronmaschine, $P_{\text{mech,max}}$ [KW]	55/64*	zwei Asynchronmaschinen, je $P_{\text{mech,max}}$ [KW]	27,5/32,5*
Antriebskonzept	BZ-Lean-Fahrzeug		Leistungsverzweigter Hybrid, unidirektionaler DC/DC-Wandler, $P_{\text{soll,BZS}}$ leicht phlegmatisiert	
BZS	BZS mit selektiver Oxidation, Reformat-Betrieb in BZ, Hochdruck-BZ		Gasreinigung mit PdAg-Membran, Wasserstoff-Betrieb in BZ, Umgebungsdruck-BZ	
Luftmodul	Hochdruck-Kompressor mit Expander		Niederdruck-Kompressor	
GES	Lastspreizung	40	Lastspreizung	40
BZ	max. Stromdichte (I/A) [A/cm ²]	0,843	max. Stromdichte (I/A) [A/cm ²]	0,39
	max. Leistung $P_{\text{el,BZ}}$ [KW]	73,3	max. Leistung $P_{\text{el,BZ}}$ [KW]	69
	Zellen	440	Zellen	770
	Fläche pro Zelle A_{Zelle} [cm ²]	300	Fläche pro Zelle A_{Zelle} [cm ²]	300

Tabelle 6.48: Vergleich Basis-Fahrzeug und optimiertes BZ-Fahrzeug-Konzept

Die erhebliche Einsparung kann durch eine sinnvolle Kombination der zur Verfügung stehenden Modifikationen erreicht werden. Die angenommenen Wirkungsgradveränderungen basieren entweder auf Komponenten-Messungen oder folgen Gesetzen der Thermodynamik.

Alle Auswirkungen der vorgestellten Maßnahmen an BZS und am elektrischem Antrieb basieren dabei nicht auf der Prognose von Verbesserungspotentialen, sondern sind getrennt voneinander in der Literatur untersucht und nachgewiesen worden. Abgesehen von der Gewichtsreduktion ist auch die Realisierbarkeit der vorgestellten Maßnahmen bereits zum jetzigen Zeitpunkt (1998) gegeben. Eine Berechnung der Kühlsystemauslegung inklusive der Wasserbilanzierung führt ebenfalls zu einem realisierbaren Kühlsystem (vgl. Anhang C, Tabelle C.4). Im Vergleich zum Basis-Fahrzeug kann die Wärmebilanz deutlich verbessert werden.

Die Aussagen über die Wirksamkeit der verbrauchssenkenden Modifikationen sind im Wesentlichen auch in den US-Fahrzyklen gültig (s. Anhang D).

7 Zusammenfassung

Methanol-Brennstoffzellenantriebe für Kraftfahrzeuge werden von führenden Fahrzeugherstellern als eine der Alternativen zu optimierten konventionellen Antrieben favorisiert, um der durch den weltweit zunehmenden Verkehr bedingten Verknappung fossiler Brennstoffe entgegenzuwirken. In verschiedenen Studien [5, 6] wird der Sinn eines Methanol-Brennstoffzellenantriebs in Frage gestellt, da dieser Antrieb in der Gesamtenergiebilanz (inklusive Kraftstoffherstellung) ungünstiger bewertet wird als optimierte konventionelle Antriebe.

Das Ziel dieser Arbeit ist es zu untersuchen, ob ein Methanol-BZ-Antrieb soweit optimiert werden kann, dass er im Vergleich zu konventionellen Antrieben in der Gesamtenergiebilanz günstiger ist. Dabei sollen nur bereits untersuchte und dem aktuellen Stand der Technik entsprechende Modifikationen berücksichtigt werden.

Eine Realisierung in Form von Prototypen ist aufgrund der Bandbreite der Kombinationsmöglichkeiten und Dimensionierung, sowie aufgrund der Verfügbarkeit von Komponenten nur schwer möglich. Simulationsrechnungen zur Absicherung und Bewertung der Konzeptuntersuchungen sind daher erforderlich.

Es zeigt sich, dass aus der Simulationstechnik von konventionellen Fahrzeugen entwickelte Simulationsmodelle nicht geeignet sind, BZ-Fahrzeuge abzubilden. Ein für die Simulation von BZ-Fahrzeugen geeignetes Simulationsmodell wird entwickelt. Dabei werden die Abbildung der BZS-Dynamik sowie die Abbildung verschiedener Schaltungen von BZS, elektrischen Antrieben und Speicher (Hybridkonzepte) berücksichtigt.

Anhand von Messdaten eines Prototypen wird eine Teil- und Gesamtsystemvalidierung des Simulationsmodells vorgenommen. Dabei zeigt sich, dass mit dem entwickelten Simulationsmodell die Realität mit hoher Genauigkeit abgebildet werden kann.

Anhand von Simulationsrechnungen werden die Einflüsse verschiedener Modifikationen am BZ-Fahrzeug auf den Verbrauch untersucht. Dabei werden die Einflüsse sowohl isoliert als auch in Kombination untereinander betrachtet. Es stellt sich heraus, dass einige Modifikationen miteinander kombiniert werden können, ohne dass die Verbrauchseinsparungen der Einzelmaßnahmen signifikant reduziert werden.

Bemerkenswert ist auch, dass mittels eines neu entwickelten Bewertungsverfahrens Maßnahmen identifiziert werden konnten, die zu diesem optimalen BZ-Antriebskonzept führen. Werden diesem Konzept weitere Maßnahmen hinzugefügt, so kann der Verbrauch nicht mehr signifikant gesenkt werden.

Eine optimales BZ-Antriebskonzept setzt sich zusammen aus einem leistungverzweigtem Hybrid-BZ-Konzept in Verbindung mit einem Umgebungsdruck-BZS mit Membran-Gasreinigung und einer reduzierten Stromdichte.

Der mit diesem Antriebskonzept in Verbindung mit einem modifizierten elektrischen Antrieb erzielte Energieverbrauch kann im Vergleich zu dem Basis-Fahrzeug um 36% reduziert werden. In Verbindung mit einer angestrebten Gewichtsreduktion des BZS, die dazu führt, dass

die Schwungmassenklasse von 1360 kg erreicht wird, sind es sogar 40%. Es wird gezeigt, dass optimierte BZ-Fahrzeuge mit einem Verbrauch von 2,8 l/100 km bzw. 3 l/100 km Dieseläquivalent im NEFZ bei unverändertem Fahrzeuggewicht (Schwungmassenklasse 1590 kg), einen erheblich niedrigeren Energieverbrauch haben als zukünftige konventionelle Antriebe (3,9 l/100 km Dieseläquivalent). Damit zeigen diese Fahrzeuge sogar in der Gesamtenergiebilanz inklusive der Kraftstoffherstellung keine höheren Werte als verbrauchoptimierte konventionelle Antriebe.

Anhang A: Beschreibungen Prüfstandstechnik und elektrischer Antrieb

Anhang A.1: Berechnung Fahrwiderstand am Rollenprüfstand

Die Fahrwiderstände werden durch die Bremskräfte der Rolle simuliert. Das auf die Antriebsachse reduzierte Massenträgheitsmoment des Fahrzeugs wird durch eine entsprechend angepasste Massenträgheit der Rolle wiedergegeben. Die vom Rollenprüfstand aufgebrachten Kräfte, d.h. die simulierten Fahrwiderstandskräfte und die aus Beschleunigung und simulierter Massenträgheit errechnete Kraft, werden aufgezeichnet. Dabei wird die aufgezeichnete Kraft aus dem Drehmoment der Rolle errechnet.

Das aufgezeichnete Drehmoment entspricht dabei:

$$M_{\text{Rolle}} = \left(F_{\text{WD,Rolle}} + J \frac{a}{r_{\text{Dyn}}} \right) r_{\text{Rolle}} \quad (\text{A-1})$$

$F_{\text{WD,Rolle}}$ = Fahrwiderstandskräfte nach Kennlinie am Rollenprüfstand

J = eingestelltes Massenträgheitsmoment (MTM) der Rolle (entspricht Schwung-massen-klasse)

a/r_{Dyn} = Winkelbeschleunigung der Antriebsachse

r_{Rolle} = Halbmesser der Rolle

Nicht aufgezeichnet werden die Massenträgheiten im Antriebsstrang sowie die aus der Relativbewegung von Rolle und Antriebsrädern resultierende Fahrwiderstandskraft (Rollreibung). Um das tatsächliche Verhalten des Fahrzeugs auf der Straße darzustellen, ist eine nachträgliche Korrektur der vom Rollenprüfstand aufgezeichneten Kraft erforderlich. Die tatsächliche Fahrwiderstandskraft des Fahrzeugs wird aus Ausrollversuchen des geschleppten Fahrzeugs ermittelt. Die Massenträgheit des Fahrzeugs wird aus dem Fahrzeuggewicht ermittelt. Die Einteilung in eine Schwungmassenklasse erfolgt dabei aus dem EU-Leergewicht [48] des Fahrzeugs plus 25 kg.

Die für den vermessenen Prototypen (NECAR 3) ermittelte Schwungmassenklasse errechnet sich wie folgt:

$$m_{\text{fzg, ff (DIN)}} = 1880 \text{ kg}$$

$$m_{\text{fzg, EU}} = 1880 \text{ kg} + 68 \text{ kg (Fahrer)} + 7 \text{ kg (Gepäck)} = 1955 \text{ kg}$$

$$m_{\text{fzg, SMK}} = 1955 \text{ kg} + 25 \text{ kg} = 1980 \text{ kg}$$

Das so errechnete Gewicht für die Einteilung in eine Schwungmassenklasse führt zu einer Schwungmasse von 2040 kg (Tabelle und Rechenvorschriften im Anhang F).

Die aus Ausrollversuchen ermittelte Fahrwiderstandskraft wird durch ein Polynom 2.ter Ordnung abgebildet.

$$F_{WD} = v^2 A_2 + v A_1 + A_0 \quad (A-2)$$

mit v in km/h, $A_0 = 0,2295 \text{ N}/(\text{km}/\text{h}^2)$, $A_1 = 3,11 \text{ N}/(\text{km}/\text{h})$ und $A_2 = 158,1 \text{ N}$

Die Fahrwiderstandskraft am Rollenprüfstand berücksichtigt dabei den Luftwiderstand (quadratischer Term) sowie die Rollwiderstandskraft der nicht angetriebenen Achse. Vereinfachend wird angenommen, dass die Rollwiderstandskraft sich gleichmäßig auf Vorder- und Hinterachse verteilt. Damit können die beiden Koeffizienten A_0 und A_1 halbiert werden. Die am Rollenprüfstand als Fahrwiderstand hinterlegte Kennlinie ergibt sich damit zu:

$$F_{WD,Rolle} = v^2 A_2 + \frac{1}{2}(v A_1 + A_0) \quad (A-3)$$

Um das reale Abrollverhalten des Fahrzeugs auf der Straße wiederzugeben, muss zu der aufgenommenen Fahrwiderstandskraft ein Korrekturterm addiert werden. Dieser ergibt sich aus der Differenz der tatsächlichen zu den bei Rollenprüfstandsmessungen aufgezeichneten Fahrwiderständen.

$$F_{WD,Korrektur} = F_{WD} - F_{WD,Rolle} = \frac{1}{2}(v A_1 + A_0) \quad (A-4)$$

Zusätzlich zu den nicht aufgezeichneten Fahrwiderständen müssen noch die Drehträgheiten des Antriebsstrangs berücksichtigt werden.

$$F_{MTM,Korrektur} = (\Theta_{EA\&Getr} \Theta_{Räder}) \ddot{\varphi} \quad (A-5)$$

Damit ergibt sich die korrigierte Fahrwiderstandskraft (Zugkraft am Rad) zu:

$$F_x = F_{WD,Rolle} + F_{MTM,Korrektur} + F_{WD,Korrektur} = F_{WD,Rolle} + J \frac{a}{r_{Dyn}} + \frac{1}{2}(v A_1 + A_0) \quad (A-6)$$

Anhang A.2: Einfluss der Größen-Skalierungseffekte bei elektrischen Antrieben

Eine pauschale Aussage über den Einfluss der Baugröße auf den Wirkungsgrad ist schwierig zu treffen, da die individuelle Optimierung eine entscheidende Rolle spielt. Angenommen, die betrachteten Motoren seien aber genau gleich gut optimiert, dann gilt vereinfacht, dass der Wirkungsgrad von elektrischen Maschinen mit der Baugröße zunimmt, da sowohl die Kupferverluste als auch die Eisenverluste bei gleicher Stromdichte und Induktion dem Volumen proportional sind [35]. Wenn die Verlustleistung pro Volumeneinheit den linearen Abmessungen proportional ist, gilt näherungsweise:

$$\eta_{el} \approx \frac{1}{1 + k \frac{1}{D}} \quad (A-7)$$

k = Proportionalitätsfaktor

D = Durchmesser (Rotor)

Der Wirkungsgrad zweier Elektro-Motoren relativ zueinander, berechnet sich daher mit dem gleichen Proportionalitätsfaktor k .

$$\eta_i \approx \frac{1}{1 + \frac{D_{Basis}}{D_i} \left(\frac{1}{\eta_{Basis}} - 1 \right)} \quad (A-8)$$

Der so errechnete Wirkungsgradverlauf für elektrische Maschinen, basierend auf einer vermessenen, stromrichtergeführten, wassergekühlten, 4-poligen Asynchronmaschine (Kennfeld im Anhang C, Abbildung C.9) wird zur Modifikation der Kennfelder in Abhängigkeit der Leistung verwendet. Zusätzlich zur Anpassung der Kennfelder an die Momentenachse wird daher eine Modifikation des Wirkungsgrades vorgenommen. Die von [35] entwickelten Aussagen beziehen sich nicht auf die Leistungselektronik. Bei allen betrachteten Antrieben wird daher ein ähnliches Stromrichter-kennfeld verwendet. Anpassungen werden nur in Form von Skalierungen bezüglich der Momentenachse vorgenommen.

Anhang A.3: Verwendete Motor- und Getriebesteuerung

Für den wirkungsgradoptimierten Betrieb eines elektrischen Zweimotoren-Antriebs wird eine Betriebsstrategie benötigt. Zwei Motoren werden auf eine Welle geschaltet. Dieser Welle sind ein Getriebe (Festübersetzung oder 2-Gang Getriebe) und ein Differential nachgeschaltet. In den Untersuchungen von [35] erfolgt bei Erreichen des maximalen Drehmomentes einer Maschine, die Zuschaltung eines weiteren Antriebes. Das relative Drehmoment ist damit ein Kriterium für die Zuschaltung eines weiteren Antriebes. Diese Betriebsstrategie stützt sich auf die These, dass mit steigendem Moment der Wirkungsgrad eines elektrischen Antriebes zunimmt. Wie anhand eines typischen Motorkennfeldes ersichtlich ist (Abbildung C.9), gibt es aber keinen direkten Zusammenhang zwischen relativem Moment und Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad ist auch von der Drehzahl abhängig.

Aufgrund dieser Erkenntnis erscheint die Steuerung eines gesplitteten elektrischen Antriebes nach Schaltschwellen, die sich am relativen Moment orientieren, als nicht optimal. Im Hinblick auf eine optimale Ausnutzung eines gesplitteten Antriebes wird eine virtuelle, wirkungsgradoptimierte Motorsteuerung verwendet. Diese Motorsteuerung kann auch als Getriebesteuerung verwendet werden und "weiß" vor dem Umschalten, welcher Betriebszustand nach dem Umschalten vorliegen wird. Um diese „intelligente“ Motor- und Getriebesteuerung zu realisieren, werden in der Steuerung des Antriebes permanent alle möglichen Schaltzustände simuliert. Aus den so ermittelten virtuellen Wirkungsgraden wird dann der optimale Schaltzustand bestimmt.

Durch einen Vergleich der virtuellen Wirkungsgrade kann somit ein optimaler Betriebszustand des leistungsgesplitteten Antriebes (2-Motor) und des Getriebes (2-Gang) ermittelt werden. Die Regelung wird dabei auch durch verschiedene Rahmenbedingungen beeinflusst, wie physikalische Leistungsgrenzen, Motortemperatur, Schaltzustand einer möglichen Hybridsteuerung und Drehzahlgrenzen. Die für Zuschaltung eines zweiten Antriebes gemachten Ausführungen gelten auch für die Schaltzustände des Getriebes. Das Steuerungsschaltbild für eine

Motorsteuerung (d.h. Getriebe mit Festübersetzung) ist vereinfacht in Abbildung A.1 dargestellt.

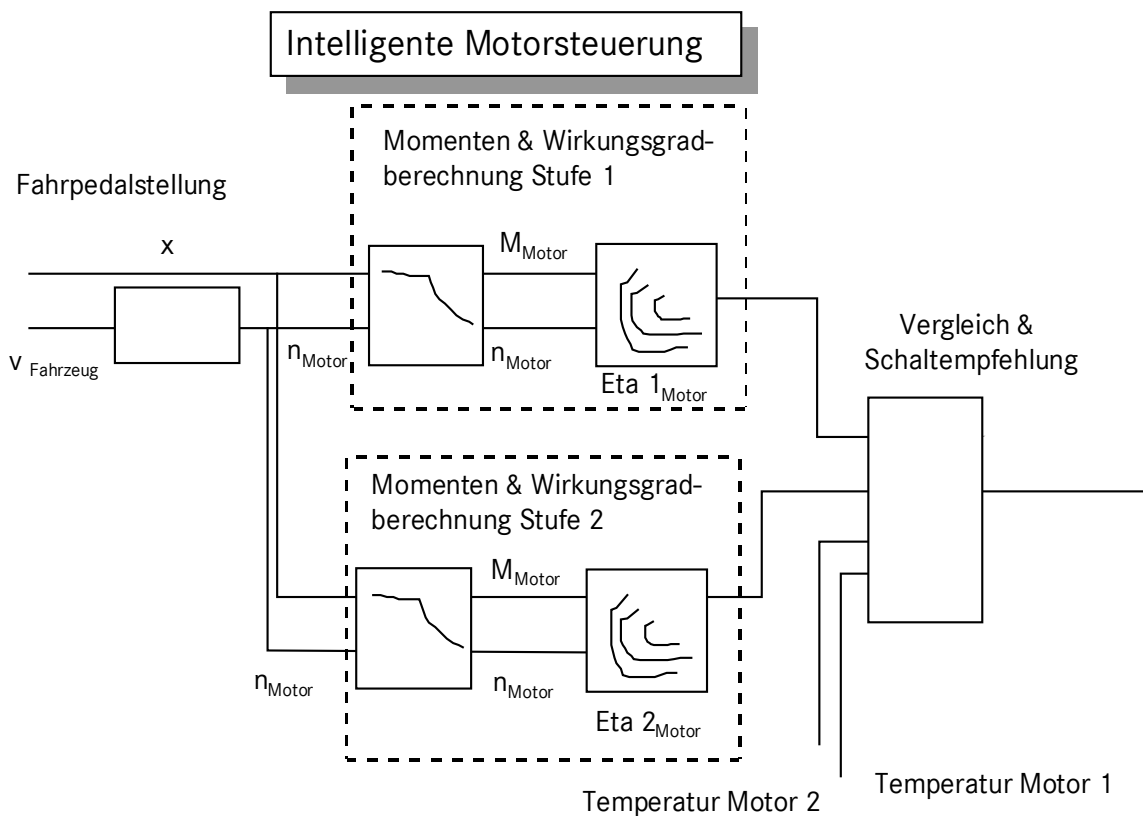


Abbildung A.1: Schaltschema einer intelligenten Motor-(Getriebe-)Steuerung

Die dargestellte Schaltung kann noch um eine Getriebesteuerung mit Getriebekennfeldern erweitert werden. Durch diese Steuerung wird zu jedem Zeitpunkt die Fahrpedalstellung aufgenommen und anhand der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit in ein aktuelles Motormoment umgerechnet. Dieses Moment wird weiter verwendet, um einen virtuellen Wirkungsgrad zu berechnen. Da dies für alle möglichen Schaltzustände (Getriebestufen) passiert, werden bei Festübersetzung zwei virtuelle Wirkungsgrade des Antriebes errechnet. Bei Verwendung einer Getriebesteuerung und einem Zwei-Gang-Getriebe werden vier virtuelle Antriebswirkungsgrade errechnet.

Anhang B: Chemische und thermodynamische Beziehungen

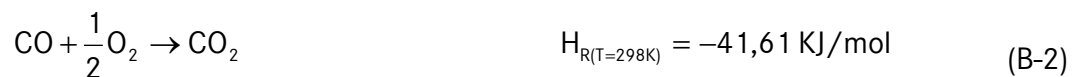
Anhang B.1: Chemische Reaktionsgleichungen

Wasserdampfreformierung und selektive Oxidation (Gasreinigung)

Zur Gewinnung von wasserstoffreichen Gemischen aus Methanol wird im Rahmen dieser Arbeit die Wasserdampfreformierung eingesetzt. Wie aus der Reaktionsenthalpie H_R entnommen werden kann, ist die Reaktion endotherm (positive Reaktionsenthalpie, d.h. Energie muss zugeführt werden).



Bei der Wasserdampfreformierung befindet sich CO im Reformat. Dieses wird durch selektive Oxidation in nachgeschalteten Gasreinigungsprozessen beseitigt. Wie aus der Reaktionsenthalpie H_R entnommen werden kann, ist die Reaktion exotherm (negative Reaktionsenthalpie, d.h. Energie wird frei).



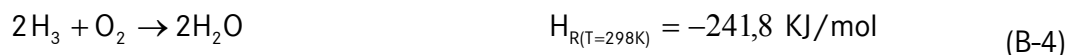
Methanolverbrennung

Methanol kann mit Sauerstoff verbrannt werden. Die entstehenden Produkte sind Wasser und CO_2 . Die exotherme Reaktionsenthalpie H_R kann auch als unterer Heizwert bezogen auf die Masse des Methanols angegeben werden ($H_u = 19500 \text{ kJ/kg}$ [8]).



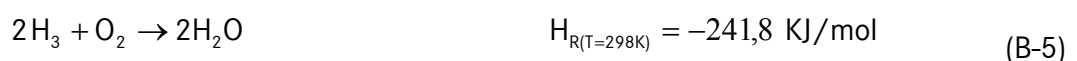
Wasserstoffverbrennung/Knallgasreaktion

Das entstehende Produkt bei der Wasserstoffverbrennung ist Wasser. Die exotherme Reaktionsenthalpie H_R kann auch als unterer Heizwert bezogen auf die Masse des Wasserstoffs angegeben werden ($H_u = 119900 \text{ kJ/kg}$ [8]).



Elektrochemische Reaktion in der Brennstoffzelle

Der Wasserstoff kann bei elektrischer Verbindung zwischen Kathode und Anode in der BZ auch elektrochemisch reagieren und oxidiert werden. Die exotherme Reaktionsenthalpie H_R entspricht der Knallgasreaktion und kann als unterer Heizwert bezogen auf die Masse des Wasserstoffs angegeben werden.



Anhang B.2: Thermodynamische Beziehungen

Das elektrochemische Potential der Brennstoffzelle wird in Abhängigkeit von Druck und Temperatur (Nernst'sche Gleichung [39]) bestimmt.

$$U_{\text{Zelle}} = U_0 - 2,303 \frac{RT}{nF} \log Q \quad (\text{B-6})$$

$$Q = \frac{a_{\text{H}_2\text{O}}}{a_{\text{H}_2} a_{\text{O}_2}^{1/2}} \quad (\text{B-7})$$

n = Anzahl der übertragenen Elektronen

$a_{\text{H}_2\text{O}}$ = Aktivität des Wassers (flüssig) = 1

a_{H_2} = Aktivität des Wasserstoffs (gasförmig) = p_{H_2}/p_0

a_{O_2} = Aktivität des Sauerstoffs (gasförmig) = p_{O_2}/p_0

p_0 = Druck bei Standardbedingungen (1 atm, $T = 298,15 \text{ K}$)

Damit errechnet sich die Zellspannung in der BZ:

$p = 3 \text{ bar}$ (Hochdruck-BZ): $U_{\text{Zelle}} = 1,25 \text{ V}$

$p = 1 \text{ bar}$ (Umgebungsdruck-BZ): $U_{\text{Zelle}} = 1,23 \text{ V}$

Berechnung des Partialdampfdrucks

Der Partialdampfdruck eines Stoffes in einem Gasgemisch aus A wird wie folgt berechnet:

$$p_A^* = \frac{m_A/MM_A}{m_A/MM_A + m_B/MM_B} p \quad (\text{B-8})$$

p = Absolutdruck

MM = Molmasse

Berechnung des Sättigungsdampfdrucks

Der Sättigungsdampfdruck von Wasser wird aus der Clausius-Clapeyron'schen Gleichung [49] berechnet.

$$p_s = p_e^{-\left(\frac{\Delta H_{\text{verd}}}{R}\right)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right)} \quad (\text{B-9})$$

T_s = Temperatur am Siedepunkt

ΔH_{verd} = Verdampfungsenthalpie

Berechnung der relativen Luftfeuchte

Die Luftfeuchte berechnet sich aus Sättigungsdampfdruck und Partialdampfdruck.

$$x_{\text{Luft}} = \frac{p^*}{p_s} \quad (\text{B-10})$$

Anhang C: Auslegungsdaten zum Brennstoffzellensystem

Anhang C.1: Systembeschreibung Brennstoffzellensysteme

Im Folgenden sind vier BZS im Volllastbetriebspunkt hinsichtlich der auftretenden Stoff- und Wärmeströme beschrieben. Das Basis-BZS entspricht dabei der Auslegung nach Tabelle 6.2, das Membran-BZS und das Umgebungsdruck-BZS entsprechen der Beschreibung nach Tabelle 6.20. Wasserstoffverluste in der Gasreinigung entfallen bei Membran-BZS. Der in der BZ elektrochemisch umgesetzte Wasserstoffstrom resultiert damit zu:

$$\dot{m}_{\text{H}_2, \text{BZ}} = \dot{m}_{\text{H}_2, \text{Ref, aus}} \cdot x_{\text{Offgas}} \quad (\text{C-1})$$

Der dem katalytischen Brenner zugeführte Wasserstoffstrom berechnet sich abweichend von Gleichung 4-21 wie folgt:

$$\dot{m}_{\text{H}_2, \text{KB}} = \dot{m}_{\text{H}_2, \text{Ref}} \cdot x_{\text{Offgas}} \quad (\text{C-2})$$

Da bei BZS mit Membran Gasreinigung keine Wasserstoffverbrennung in der Gasreinigung erfolgt, entfällt der dort beim Basis-BZS erzeugte Wärmestrom \dot{Q}_{Gasr} . Die im katalytischen Brenner entstehende Wärme \dot{Q}_{KB} wird zur Wärmebilanzierung benötigt. Der Wärmestrom kann aus den Massenströmen des Wasserstoffs und des Methanols analog Gleichung 4-27 mit deren Heizwerten errechnet werden. Relevante Auslegungsdaten der Gaserzeugung sind für verschiedene BZS in Tabelle C.1 dargestellt. Das im Folgenden als optimiertes BZS bezeichnete System entspricht dabei dem in **Tabelle 6.48** beschriebenen.

Für die obig beschriebenen BZS sind auch die Auslegungsdaten der BZ im Volllastbetriebspunkt zusammengefasst. In Tabelle C.2 und Tabelle C.4 sind die Auslegungsdaten der Luftmodule und des Kühlsystems dargestellt. Bei den Auslegungsdaten zur Kühlung wird eine ausgeglichene Wasserbilanz bei beiden BZS erreicht. Einen abschließenden Überblick über den Wirkungsgradverlauf des optimierten BZS im Vergleich zu den verschiedenen Grund-BZS (Basis, Membran, Umgebungsdruck) gibt Abbildung C. 3.

Anhang C.2: Kennlinien und Tabellen

	<div>Basis</div> <div>Membran</div> <div>Umg.dr.</div> <div>opt. BZS</div>			
Betriebspunkt Vollast/ Stromstärke BZ [A]	253	233	285	117
$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH, Verd}}$ [g/s]	9,07	8,12	10,22	7,14
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O, Verd}}$ [g/s]	7,65	6,85	8,62	6,03
$\dot{m}_{\text{H}_2, \text{BZ}}$ [g/s]	1,15	1,03	1,30	0,91
\dot{Q}_{Verd} [kW]	38,6	34,6	43,5	28,8
\dot{Q}_{Ref} [kW]	13,9	12,5	15,7	11,0
\dot{Q}_{Gasr} [kW]	-20,4	0,0	-22,9	0,0
\dot{Q}_{KB} [kW]	-41,5	-55,1	-46,7	-32,7
\dot{Q}_{Verlust} [kW]	-9,3	-8,0	-10,5	7,1
η_{GES}	0,78	0,78	0,78	0,78

Tabelle C.1: Auslegungsdaten der Gaserzeugung im Volllastpunkt für verschiedene BZS

	<div>Basis</div> <div>Membran</div> <div>Umg.dr.</div> <div>opt. BZS</div>			
Betriebspunkt Vollast/ Stromstärke BZ [A]	253	233	285	117
\dot{m}_{Komp} [g/s]	77,42	71,30	97,00	69,60
\dot{m}_{Exp} [g/s]	87,23	82,70		
ψ_{Verd}	3,0	3,0	1,8	1,8
ψ_{Exp}	0,49	0,49		
$P_{\text{el,Komp}}$ [KW]	12,6	11,8	12,0	8,6

Tabelle C.2: Auslegungsdaten Luftmodul für verschiedene BZS

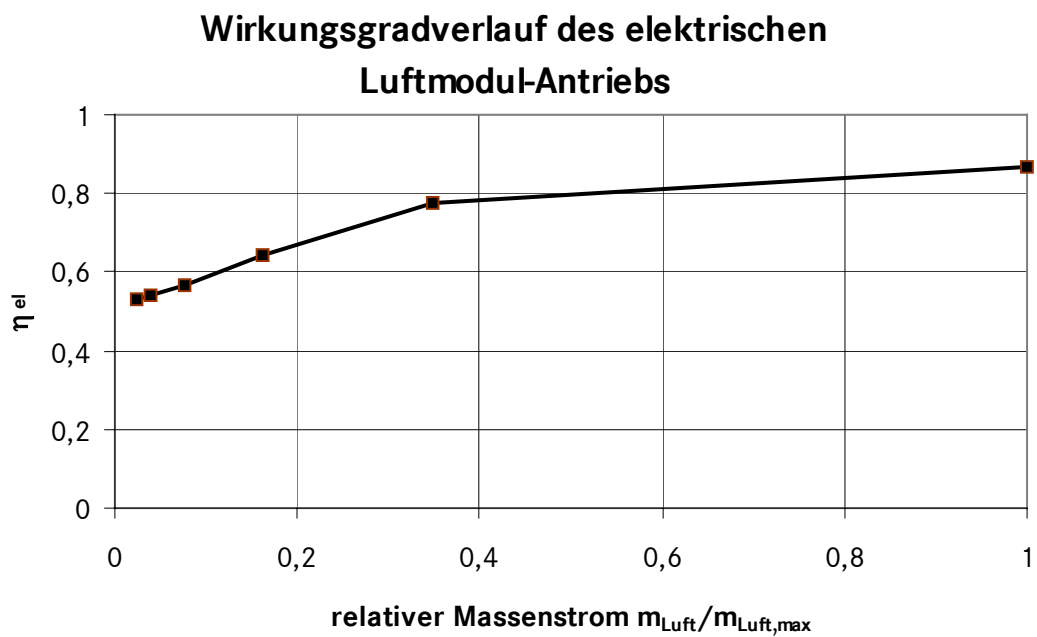


Abbildung C. 1: Wirkungsgradverlauf des elektrischen Luftmodulantriebs in Abhängigkeit des relativen Massenstromes

Druckverhältnis Verdichter

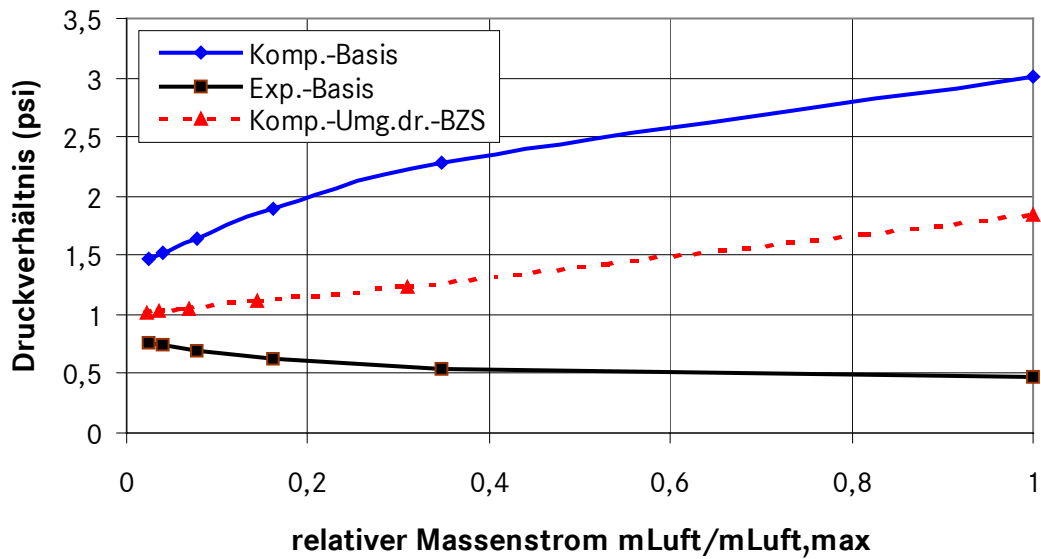


Abbildung C.2: Druckverhältnis des Luftmoduls in Abhängigkeit des Massenstroms

BZS-Wirkungsgrade

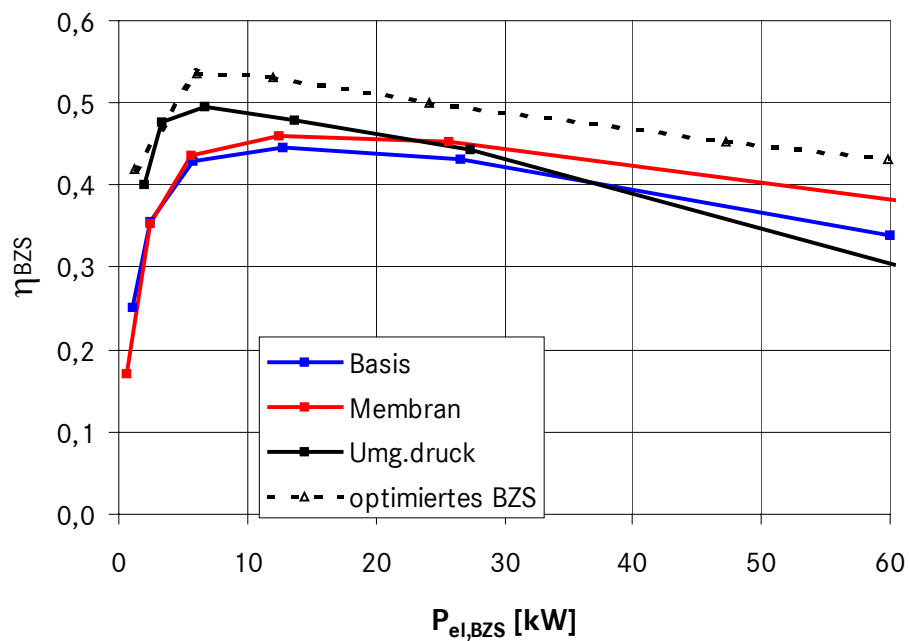


Abbildung C. 3: Wirkungsgradverlauf verschiedener Brennstoffzellensysteme (Kühlaggregate mit minimaler Aufnahmeleistung (200 W))

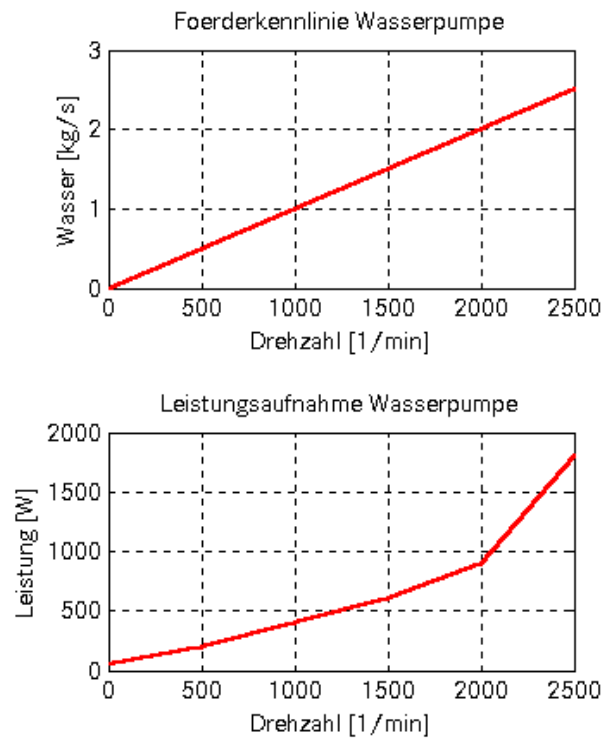


Abbildung C.4: Förderkennlinie und Leistungsaufnahme der Wasserpumpe

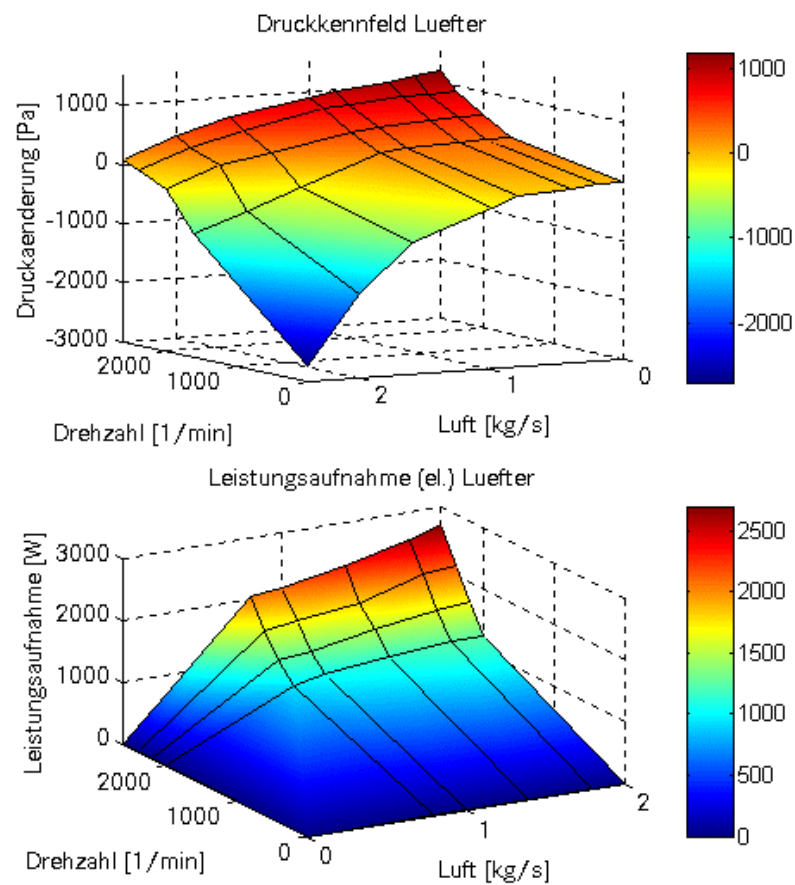


Abbildung C.5: Druckänderung (oben) und Leistungsaufnahme (unten) des Fahrzeuglüfters in Abhängigkeit von Drehzahl und Luftstrom

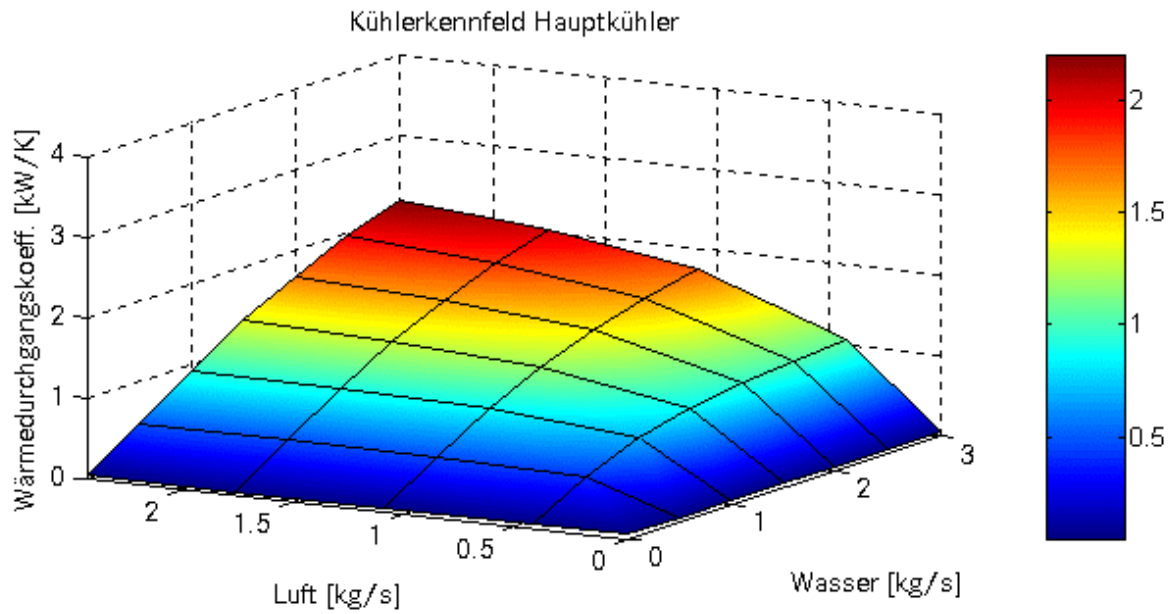


Abbildung C.6: Wärmedurchgangskoeffizientenkennfeld des Hauptkühlers

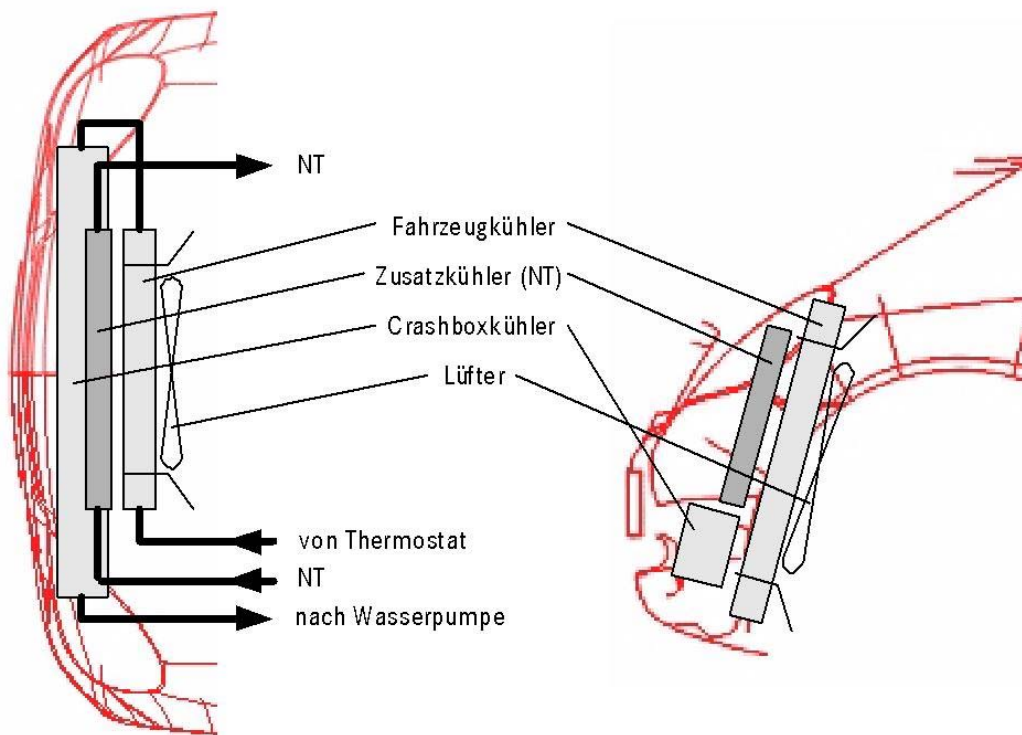


Abbildung C. 7: Einbausituation Crashbox-Kühler-Variante, Zusatzkühler NT=Nieder temperaturkreislauf) entfällt bei den in dieser Arbeit betrachteten Kühlsystemen.

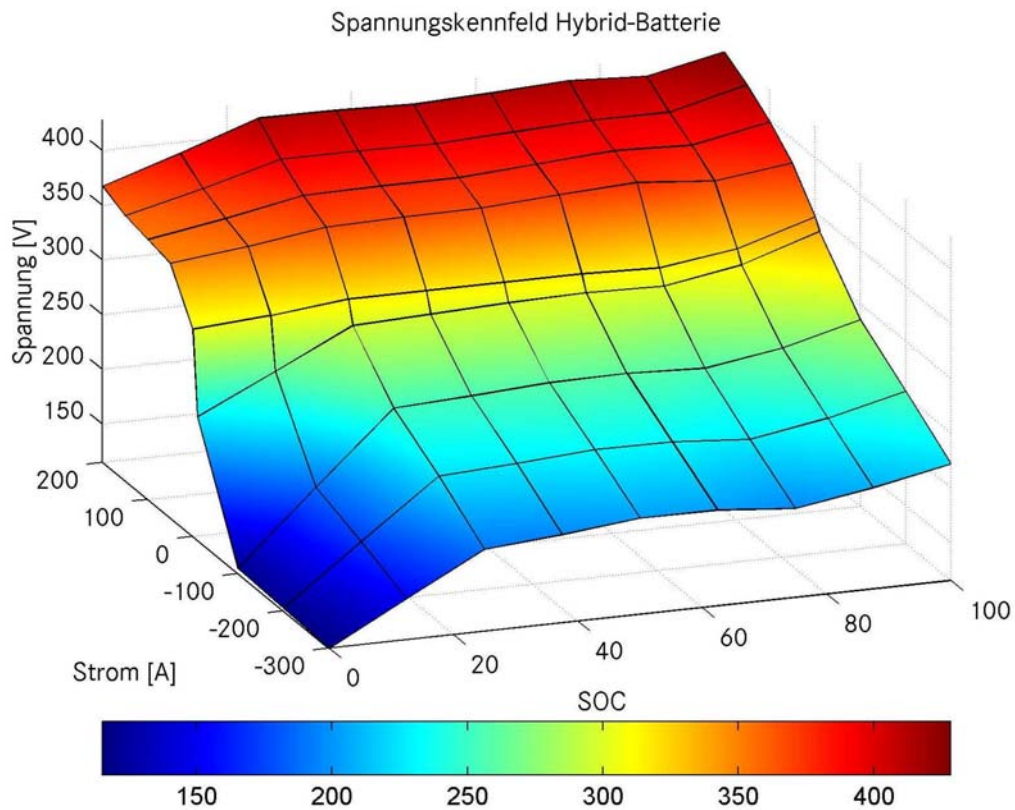


Abbildung C.8: Batteriekennfeld (vermessen) für typische NiMH 10 Ah Zellen

Leistung [kW]	$U_{BZ} [V] \setminus U_{Bat} [V]$	250	500
1	200	0,9	0,8
	400	0,85	0,9
5	200	0,97	0,95
	400	0,95	0,97
15	200	0,98	0,96
	400	0,96	0,98
30	200	0,98	0,96
	400	0,96	0,98
60	200	0,98	0,96
	400	0,96	0,98

Tabelle C.3: Leistungs- und Spannungsabhängige Wirkungsgrade des DC/DC-Wandlers im Antriebsstrang

	Basis	optimiertes BZS
	$T_{Umg}=35^{\circ}\text{C}$	$T_{Umg}=35^{\circ}\text{C}$
Betriebspunkt Vollast/ $I_{BZ}[\text{A}]$	253	117
$V_{Fzg}[\text{km/h}]$	155	161
$P_{el,KS}[\text{KW}]$	4,2	4,2
zugeführte Wärmeströme $[\text{KW}]$	79,9	69
$\dot{Q}_{BZ}[\text{KW}]$	55	41
$\dot{Q}_{Kond}[\text{KW}]$	15,5	17,2
$\dot{Q}_{EA}[\text{KW}]$	7,8	9,3
$\dot{Q}_{NA}[\text{KW}]$	1,6	1
abgeführte Wärmeströme $[\text{KW}]$	79,6	69,0
$\dot{Q}_{HK}[\text{KW}]$	67,2	58
$\dot{Q}_{CK}[\text{KW}]$	12,4	11

Tabelle C.4: Auslegungsdaten des Kühlsystems im Vollastpunkt für Basis-BZS und optimiertes-BZS

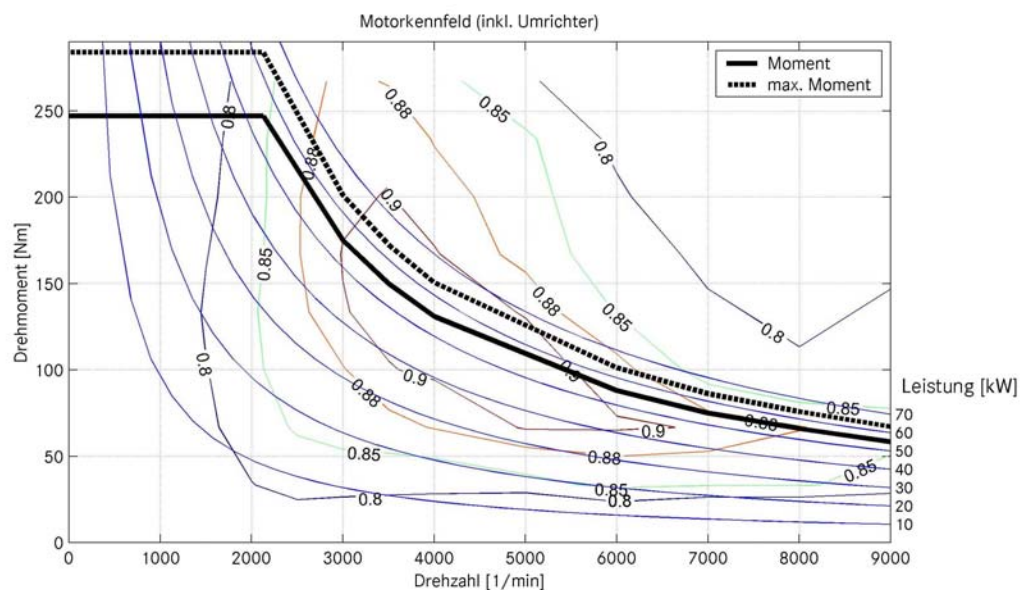


Abbildung C.9: Kennfeld des elektrischen Antriebs (motorischer Betrieb) des Basis-Fahrzeugs, $P_{mech} = 55 \text{ kW}/65 \text{ kW}$ (Spitzenleistung), Kennfeld gilt auch für generatorischen Betrieb

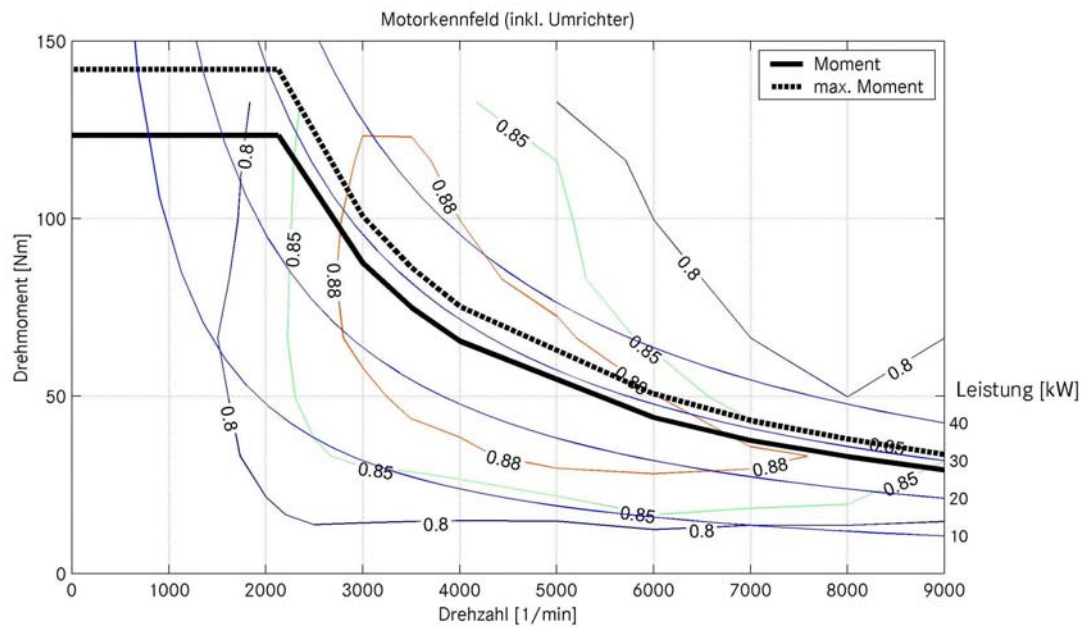


Abbildung C.10: Kennfeld des elektrischen Antriebs (motorischer Betrieb) der 2-Motor-Variante, $P_{\text{mech}} = 27,5 \text{ kW}/32,5 \text{ kW}$ (Spitzenleistung), Kennfeld gilt auch für generatorischen Betrieb

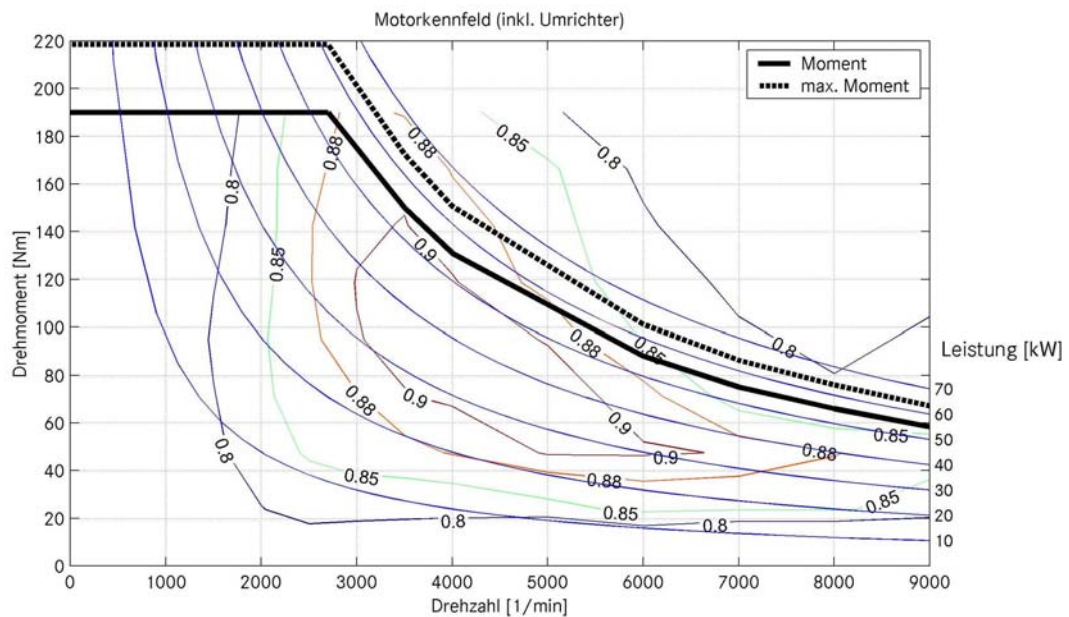


Abbildung C.11: Kennfeld des elektrischen Antriebs (motorischer Betrieb) der 2-Gang-Variante, $P_{\text{mech}} = 55 \text{ kW}/65 \text{ kW}$ (Spitzenleistung), Kennfeld gilt auch für generatorischen Betrieb

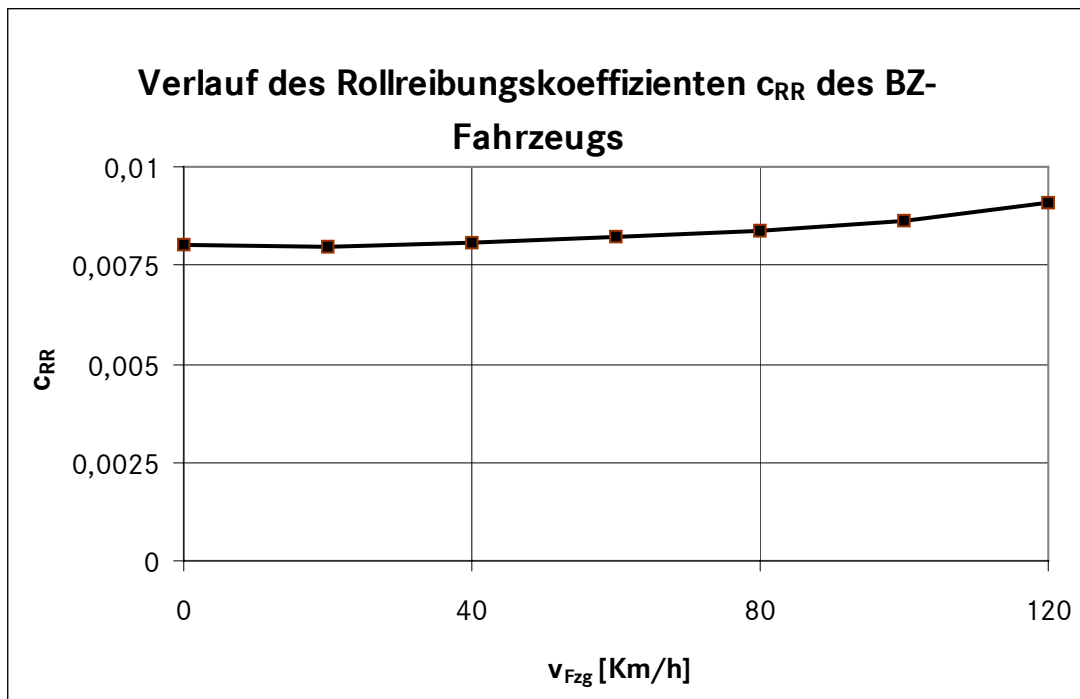


Abbildung C.12: Rollreibungskoeffizient über der Fahrgeschwindigkeit (Basis-Fahrzeug, SMK 1590 kg)

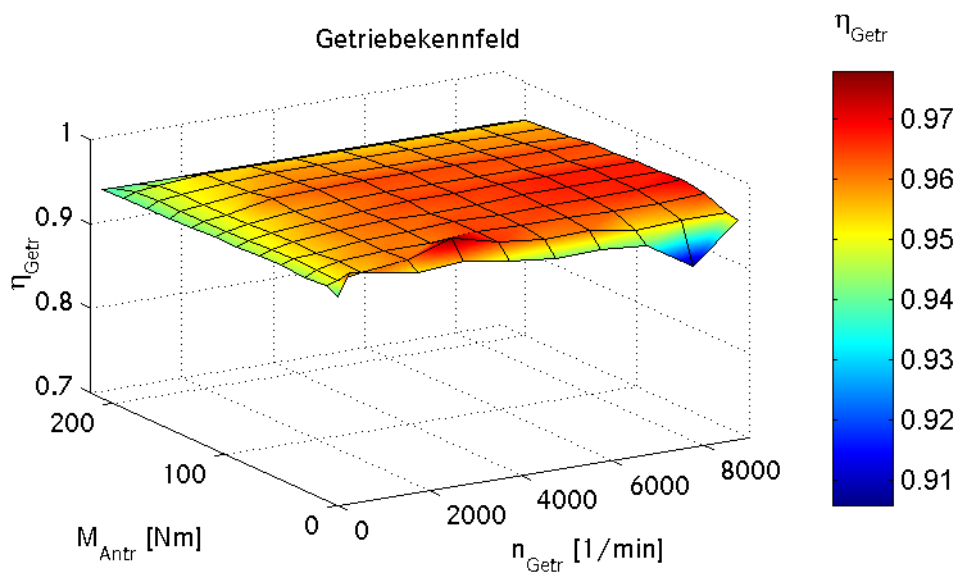


Abbildung C.13: Kennfeld des untersuchten Getriebes (nur Antriebsmomente, Wirkungsgrad in beiden Übersetzungsstufen gleich)

Anhang D: Ergänzende Simulationsergebnisse

Anhang D.1: Simulationsergebnisse aus US-Fahrzyklen

Simulationsergebnisse für das Basis-Fahrzeug sind in verschiedenen US-Fahrzyklen in Tabelle D.1 dargestellt.

Variante	E_{Rad} [kWh]	$E_{\text{Getr,Antr}}$ [kWh]	$E_{\text{el,Antr}}/E_{\text{el,BZS}}$ [kWh]	$E_{\text{el,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{H2,BZ}}$ [kWh]	$E_{\text{CH3OH,Verd}}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
Basis (NEFZ)	1,31	1,38	1,75	2,40	3,57	5,13	4,71
Basis (FTP 75)	1,45	1,53	1,99	2,76	4,10	6,52	5,48
Basis (Highway)	1,82	1,92	2,54	3,09	4,68	6,38	3,89

Tabelle D.1: Verbrauch des Basis-Fahrzeugs in verschiedenen Fahrzyklen

Wie aus Tabelle D.1 zu entnehmen ist, ist der streckenbezogene Dieserverbrauch (d.h. pro 100 km) des Basis-Fahrzeugs im FTP 75 deutlich höher als im NEFZ. Die aus Tabelle D.1 abgeleiteten Wirkungsgrade der Subsysteme sind in Tabelle D.2 dargestellt. Danach ist der Antriebsstrangwirkungsgrad im FTP 75 sogar noch höher als im NEFZ^A. Bemerkenswert ist der mit 0,63 sehr niedrige Wirkungsgrad der Gaserzeugung (stationär: $\eta_{\text{GES}} = 0,78$).

Variante	η_{Getr}	η_{EA}	η_{BZS}	η_{BZ}	η_{GES}	η_{Strang}
Basis (NEFZ)	0,95	0,79	0,34	0,67	0,70	0,28
Basis (FTP 75)	0,95	0,77	0,31	0,67	0,63	0,29
Basis (Highway)	0,95	0,76	0,40	0,66	0,73	0,29

Tabelle D.2: Wirkungsgrade der Subsysteme und des Gesamtsystems des Basis-Fahrzeugs in verschiedenen Fahrzyklen

Dieser sehr niedrige Wert resultiert aus den noch deutlicher als beim NEFZ ausgeprägten Überdosierungen der Gaserzeugung aufgrund der sehr dynamischen Leistungsanforderung in diesem Fahrzyklus. Eine Analyse des Energieumsatzes zeigt, warum der ermittelte Wirkungsgrad der Gaserzeugung im Fahrzyklus so deutlich von dem stationären Wert abweicht. Das Verhalten der Gaserzeugung im Fahrzyklus wird zu einer dreidimensionalen Darstellung zusammengefasst (vgl. Abbildung D.1). Auf der Abszisse ist die elektrische Leistung der Brennstoffzelle als Indikator für den Betriebspunkt (Index i), und auf der Ordinate ist der Wirkungsgrad der Gaserzeugung (Index j) aufgetragen. Die dritte Dimension wird durch den Schwärzungsgrad dargestellt. Die Schwärzung der Segmente $s_{i,j}$ errechnet sich aus der in diesem Segment umgesetzten chemischen Energie des Methanols (vgl. Gleichung 6-9). Um Bereiche niedrigeren Energieumsatzes deutlicher darzustellen, wird die Skalierung der Schwärzung auf

^A Die streckenbezogene Fahrwiderstandsenergie des FTP 75 ist höher als im NEFZ.

30% der maximal umgesetzten Energie pro Segment s_{\max} innerhalb des Diagramms bezogen. Die dargestellte Wirkungsgradkennlinie stellt den stationären Wirkungsgrad der Gaserzeugung dar^A.

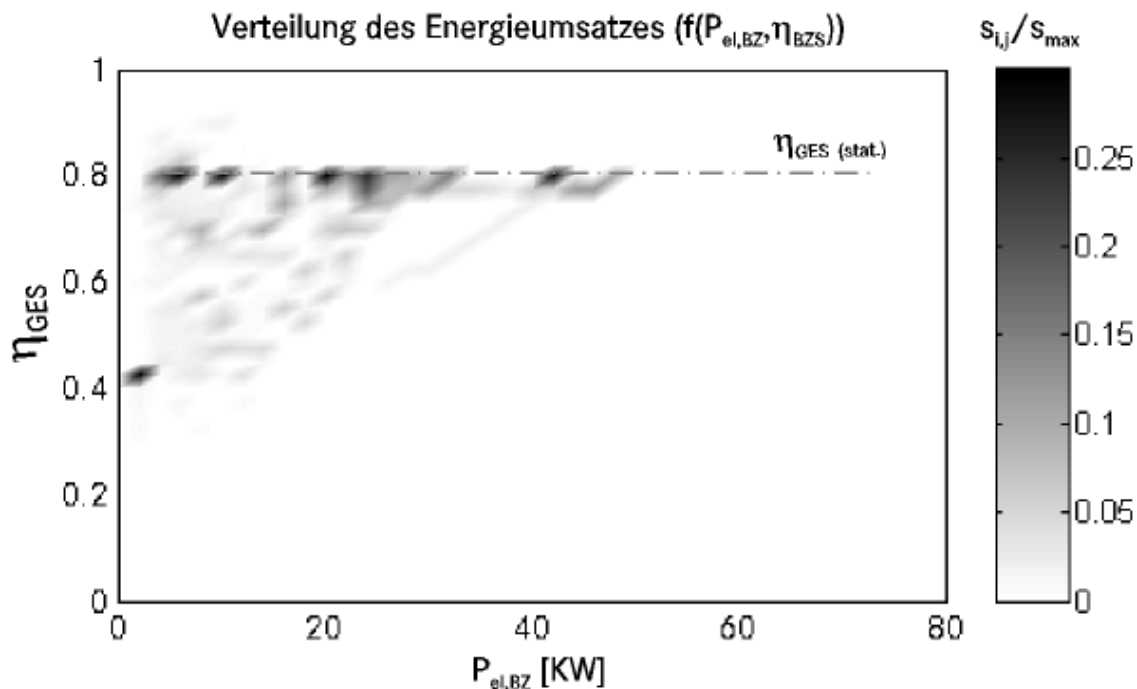


Abbildung D.1: Verteilung des Energieumsatzes der Gaserzeugung im FTP 75

Wie in Abbildung D.1 zu erkennen ist, findet fast der gesamte Energieumsatz in einem weit gestreuten Bereich vom Leerlauf bis zur Hälfte der maximalen BZ-Leistung unterhalb der stationären Wirkungsgradkennlinie statt. Analog zum NEFZ (vgl. Abbildung 6.3) ist auch hier das Leerlaufbetriebsverhalten der Gaserzeugung mit einem deutlichen Energieumsatz bei einem Wirkungsgrad von ca. 0,41 bei der Leerlaufleistung des BZ zu erkennen.

Im US-Highway-Fahrzyklus beträgt der Dieseläquivalentverbrauch des Basis-Fahrzeugs lediglich 3,89 l/100 km (Tabelle D.1). Der mit $\eta_{\text{GES}} = 0,73$ deutlich höhere Wirkungsgrad der Gaserzeugung im Vergleich zum NEFZ ($\eta_{\text{GES}} = 0,7$) beruht hier auf den wenigen und kurzen Leerlaufphasen sowie auf den geringen Lastwechseln (keine Überdosierungen). Der BZS-Wirkungsgrad steigt damit trotz leicht geringerer BZ-Wirkungsgrade als im NEFZ (Highway: $\eta_{\text{BZ}} = 0,66$, NEFZ: $\eta_{\text{BZ}} = 0,67$) auf $\eta_{\text{BZS}} = 0,4$ an. Auffällig im Highway-Fahrzyklus ist der im Vergleich zum NEFZ um drei Prozent gesunkene Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs ($\eta_{\text{EA}} = 0,76$).

Simulationsergebnisse der verbrauchsreduzierenden Maßnahmen in US-Fahrzyklen

Im Folgenden wird zunächst auf die Hybridkonzepte eingegangen. Anschließend werden die übrigen Modifikationen diskutiert. Die Energieeinsparungen an Dieseläquivalent sind dabei auf die jeweilige Basis-Variante im zugeordneten Fahrzyklus bezogen [z.B. Energieverbrauch

^A Die Betriebsstrategie bedeutet, dass die Kühlaggregate bis zur maximal zulässigen Betriebstemperatur der BZ nur minimal betrieben werden.

des Hybrid K bezogen auf den Energieverbrauch des Basis-Fahrzeugs (beides im FTP 75)]. Für die Hybridkonzepte sind die Energieeinsparungen in Abbildung D.2 dargestellt.

Die Energieeinsparungen im FTP 75 sind bei allen Hybridkonzepten im FTP 75 deutlich größer als bei einer Betrachtung im NEFZ. Mit einem leistungsverzweigten Hybrid können bis zu 35% an Methanolenergie bzw. Dieseläquivalent eingespart werden. Interessant ist, dass auch im FTP 75 die leicht phlegmatisierten Betriebsstrategien den stark phlegmatisierten überlegen sind, d.h. einen geringeren Energieverbrauch erzielen. Auch die Überlegenheit der leistungsverzweigten Hybride gegenüber dem kombinierten Hybrid-BZ-Konzept sowie die Überlegenheit der unidirektionalen DC/DC-Wandlung gegenüber der bidirektionalen ist im FTP 75 analog zum NEFZ gegeben. Die Aussagen über Hybridkonzepte aus dem NEFZ werden damit im FTP 75 bestätigt.

In einem zum NEFZ deutlich unterschiedlichen Fahrzyklus wie dem Highway-Fahrzyklus mit sehr viel weniger Beschleunigungswiderständen [Highway: E_{ax} ca. zwölf Prozent von E_{Rad} , NEFZ: E_{ax} ca. 34% von E_{Rad} (vgl. Tabelle 6.4)] ist die mit einem Hybrid und der damit verbundenen Bremsenergieerückgewinnung erzielbare Energieeinsparung verständlicherweise geringer. Die mit einem leistungsverzweigten Hybrid erzielbare Verbrauchsreduktion liegt dennoch bei neun Prozent. Auch bei diesem Fahrzyklus zeigt sich das bereits im NEFZ und FTP 75 beobachtete Verhalten, dass leicht phlegmatisierte Betriebsstrategien (geringe) Verbrauchsvorteile gegenüber stärker phlegmatisierten haben.

Anders als im NEFZ ist ein Vorteil des unidirektionalen DC/DC-Wandlers hier nicht zu erkennen. Ein von NEFZ und FTP 75 abweichendes Verhalten zeigt hier das kombinierte Hybrid-BZ-Konzept. Mit diesem Konzept werden im Highway-Fahrzyklus die größten Energieeinsparungen erzielt. Dieser Effekt hat drei Ursachen. Erstens kann in diesem Fahrzyklus der in diesem Konzept integrierte zweimotorige Elektroantrieb (2-Motor) den Energieverbrauch senken (Basis: $E_{el,Antr} = 2,54$ kWh, 2-Motor: $E_{el,Antr} = 2,26$ kWh). Zweitens werden in diesem Fahrzyklus nur geringe Lastwechsel des BZS benötigt, was dazu führt, dass das BZS weitgehend ohne Verluste durch Überdosierung betrieben wird.

Zusätzlich entfallen bei diesem Hybridkonzept die bei der DC/DC-Wandlung entstehenden Verluste.

Insgesamt werden die Aussagen über leistungsverzweigte Hybrid-BZ-Konzepte aus dem NEFZ im Highway-Fahrzyklus bestätigt. Bei der Betrachtung des kombinierten Hybrid-BZ-Konzeptes treten im Vergleich zum Verhalten im NEFZ die oben erläuterten Abweichungen auf.

Die auf das Basis-Fahrzeug bezogenen Energieeinsparungen für die übrigen, in 6.2 vorgestellten Modifikationen am Fahrzeug und BZS sind in Abbildung D.3 dargestellt. Die Energieeinsparungen an Dieseläquivalent sind dabei auf die jeweilige Basis-Variante im zugeordneten Fahrzyklus bezogen (s.o.). Bemerkenswert ist, dass Einsparungen im NEFZ zu ähnlichen oder noch größeren Einsparungen im FTP 75 führen. Besonders deutlich werden die größeren Energieeinsparungen bei der Variante mit Gasspeicher. Diese Energieeinsparungen sind mit der im Vergleich zum NEFZ höheren Dynamik des FTP 75 zu erklären.

Durch die häufigeren und stärkeren Lastwechsel kommt es zu mehr Überdosierungen im GES, die mit einem Gasspeicher weitgehend vermieden werden. Auch der Trend zu einem Mehrverbrauch bei Verwendung eines 2-Gang-Getriebes wird im FTP 75 bestätigt. Insgesamt zeigt sich, dass sich Maßnahmen, die im NEFZ verbrauchssenkend wirken, auch im FTP 75 den Energieverbrauch in mindestens ähnlichem Ausmaß minimieren.

Verbrauchsveränderung relativ zur Basis

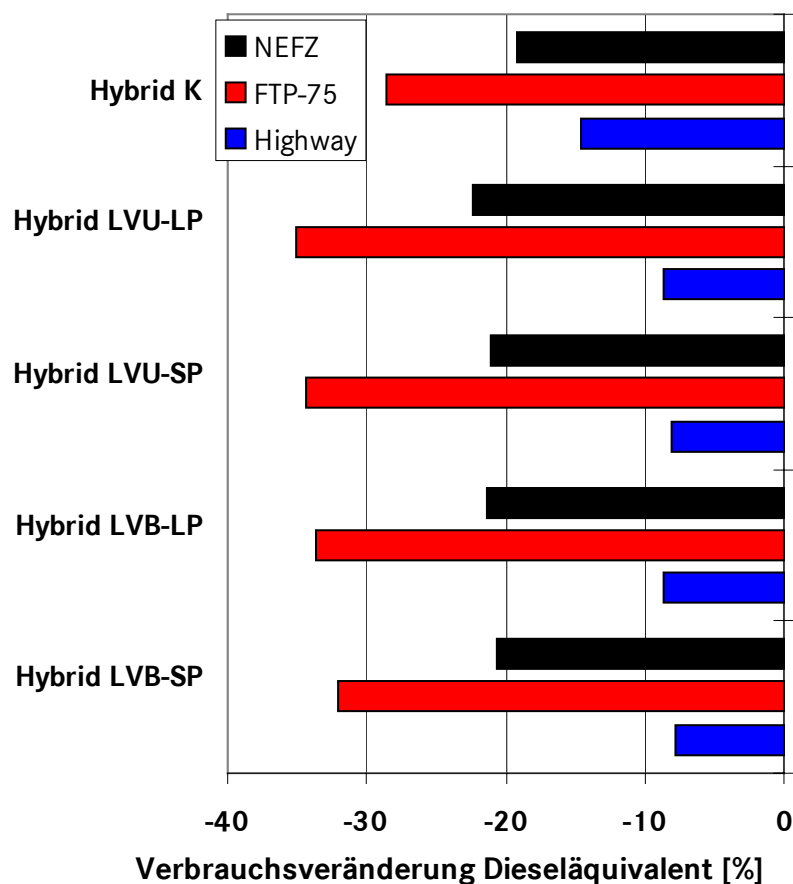


Abbildung D.2: Energieeinsparungen für Hybridkonzepte in US-Fahrzyklen im Vergleich zum NEFZ

Für den US-Highway-Fahrzyklus zeigen sich bei der Variante mit 2-Gang-Getriebe (2-Gang) und bei der Variante mit elektrischem Doppel-Antrieb (2-Motor) sehr viel größere Einsparungen als im NEFZ. Durch das höhere Geschwindigkeitsprofil mit weniger Beschleunigungen treten die Vorteile des bei Teillast wirkungsgradoptimierten Betriebs des elektrischen Antriebs (s. 6.2.2 und 6.2.3) offensichtlich deutlicher hervor als im NEFZ. Mit dem erheblichen Energieeinsparpotential des elektrischen Doppel-Antriebs lässt sich auch die außergewöhnlich hohe Verbrauchseinsparung des kombinierten Hybrid-BZ-Konzeptes^A im Highway-Fahrzyklus erklären (s.o). Der im NEFZ ermittelte erhebliche Verbrauchsvorteil einer BZS-Abschaltung gegenüber der Basis-Variante kann im Highway-Fahrzyklus nicht bestätigt werden. Aufgrund der sehr viel kürzeren Leerlaufphasen wirkt sich der hohe

^A Dieses Hybridkonzept hat einen integrierten Doppel-Antrieb (s. Beschreibung in 2.1.3).

Leerlaufverbrauch des BZS im Highway-Fahrzyklus nicht so negativ aus wie im NEFZ oder auch im FTP 75. Die mit einer Leerlauf-Abschaltung erzielbare Einsparung ist demzufolge geringer. Auch im Highway-Fahrzyklus werden die Aussagen über die Wirksamkeit der verbrauchssenkenden Maßnahmen aus NEFZ und FTP 75 bis auf die oben diskutierten Ausnahmen bestätigt.

Verbrauchsveränderung relativ zur Basis

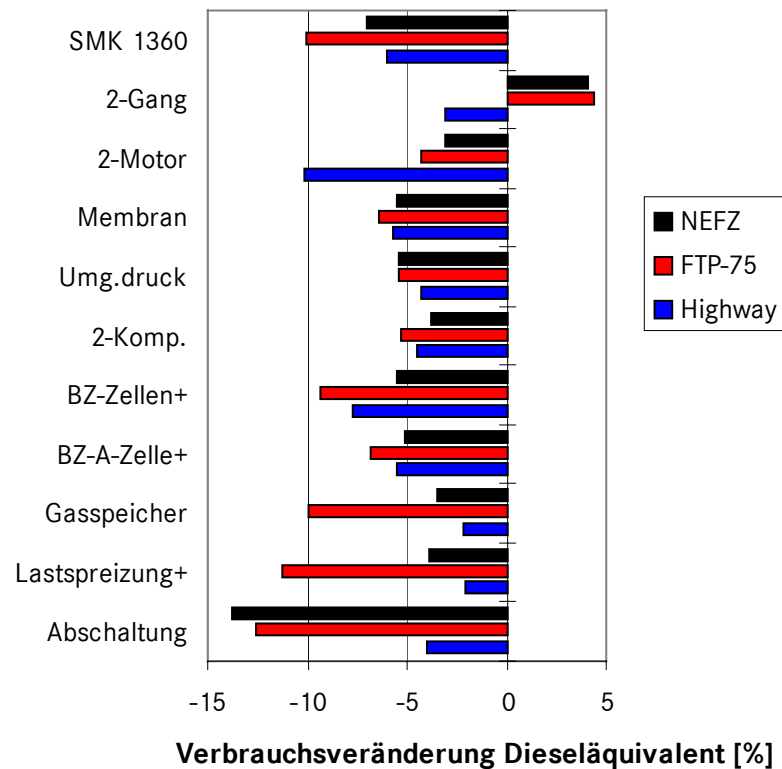


Abbildung D.3: Energieeinsparungen für verbrauchssenkende Maßnahmen in US-Fahrzyklen im Vergleich zum NEFZ

Anhang D.2: Simulationsergebnisse eines optimierten BZ-Konzepts

Hybrid LVU-LP	Membran	BZ-Zellen+	Umg.druck	2-Motor	SMK 1360	Gasspeicher	Abschaltung	E_{Rad} [kWh]	$E_{\text{el,Antr.}}/E_{\text{el,BZS}}$ [kWh]	$E_{\text{CH3OH,Verd}}$ [kWh]	V_{Diesel} [l/100 km]
x	x	x	x	x			1,19	1,50	3,05	2,81	
x	x	x	x	x	x	x	1,19	1,50	3,01	2,77	
Einsparung [%]							0%	0%	-1%	-1%	

Tabelle D.3: Simulationsergebnisse des ausgewählten optimierten BZ-Konzepts im Vergleich zu einem nochmals erweiterten BZS-Konzept (mit Gasspeicher und Abschaltung)

Anhang D.3: Simulationsergebnisse von Fahrleistungsberechnungen

	A 160 CDI	A-Klasse BZ BASIS	Hybrid-LVU	A-Klasse BZ BASIS SMK 1360
0 - 60 km/h [s]	6,3	10,1	6,1	9,3
0 - 100 km/h [s]	18	20,5	14,5	18,3
60 - 100 km/h [s]	11,7	13,4	8,8	12
v_{max} [km/h]	152	161	161	163
m_{Fzg} (Gewicht _{ff} ECE) [kg]	1145	1540	1540	1320
SMK [kg]	1130	1590	1590	1360
Gewicht _{a,max} * [kg]	1345	1740	1740	1520

* Gewicht bei Fahrleistungsberechnung

Tabelle D.4: Simulationsergebnisse der Fahrleistungsberechnung einiger BZ-Konzepte im Vergleich zum Referenzfahrzeug (A 160 CDI)

Anhang E: Ergänzende Struktogramme zum Simulationsmodell

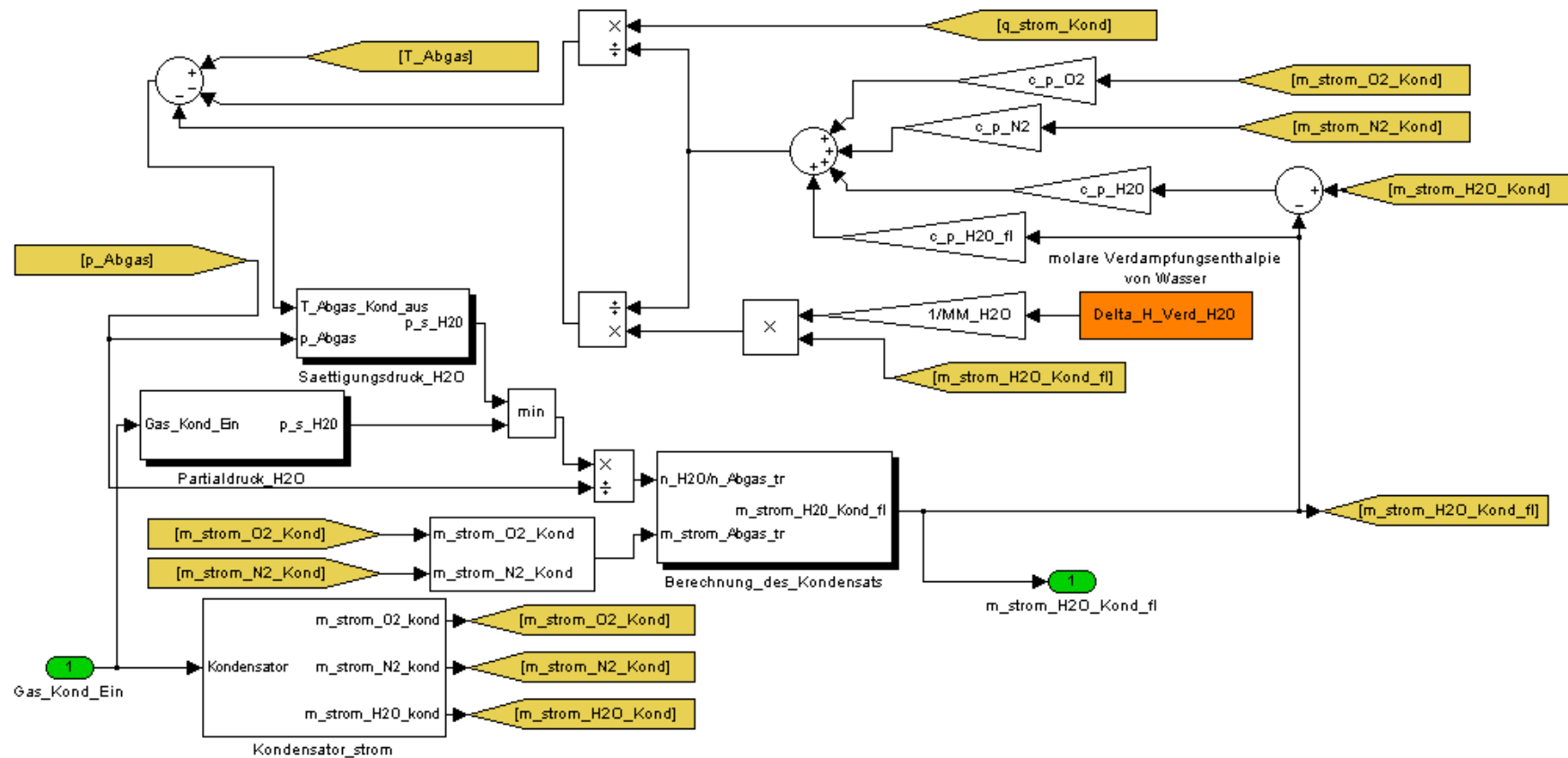


Abbildung E.1: Simulationsmodell des Kondensators (Teil 1)

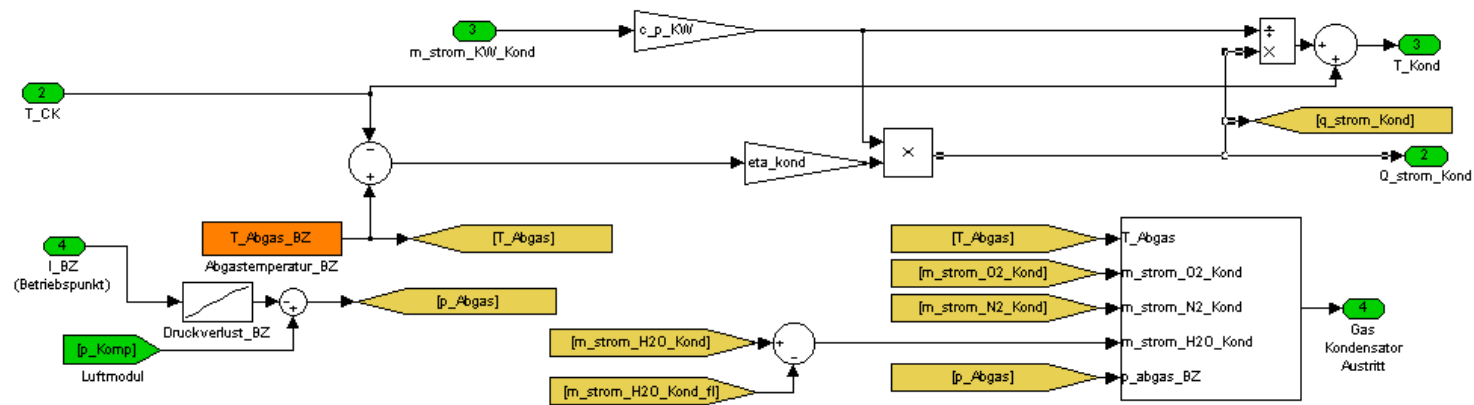


Abbildung E.2: Simulationsmodell des Kondensators (Teil 2)

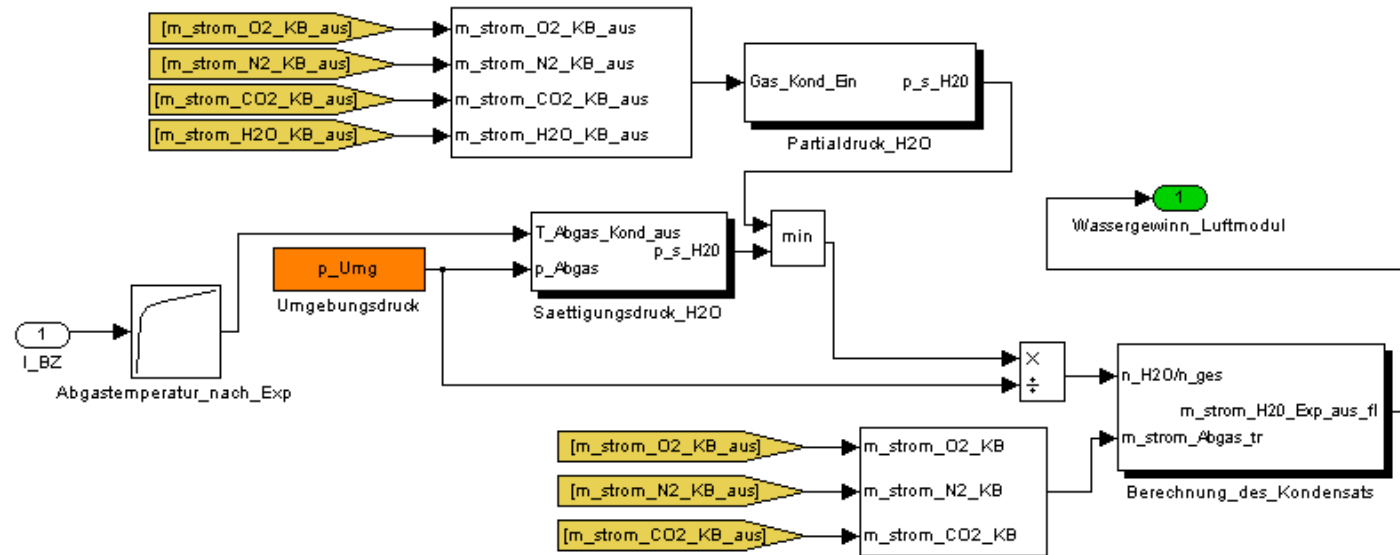


Abbildung E.3: Simulationsmodell des Luftmoduls, Subsystem Wasserückgewinnung Expander

Anhang F: Normen, Regelungen und Fahrzyklen

Schwungmassenklassen in kg

BM	kg	Bezugsmasse (translatorisch)	
BMo	kg	Bezugsmassenbereich obere Grenze	
BMu	kg	Bezugsmassenbereich untere Grenze	
FM	kg	Fahrermasse = 75 kg	
LM	kg	Leermasse	Fahrtfertiger Zustand EG: Mit Kühlflüssigkeit, Schmiermittel, Kraftstofftank 90% gefüllt, Werkzeug, Ersatzrad, Fahrermasse. Fahrtfertiger Zustand ECE und Anlage XXIII: Wie EG aber ohne Fahrermasse.
SM	kg	Schwungmasse (rotatorisch)	

Die Bezugsmasse wird auf dem Rollenprüfstand in eine äquivalente Schwungmasse abgebildet. Eine Schwungmassenklasse deckt einen definierten Bezugsmassenbereich ab.

Gültig ab 94/12/EG und 93/116/EWG, ECE R 83/03 (EU-/ECE-Fahrzyklus)

EG: $BM = LM - FM + 100$ (1)

ECE: $BM = LM + 100$ (2)

	BMu	SM Klasse	BMo
1	0	455	480
2	481	510	540
3	541	570	595
4	596	625	650
5	651	680	710
6	711	740	765
7	766	800	850
8	851	910	965
9	966	1020	1080
10	1081	1130	1190
11	1191	1250	1305
12	1306	1360	1420
13	1421	1470	1530
14	1531	1590	1640
15	1641	1700	1760
16	1761	1810	1870
17	1871	1930	1980
18	1981	2040	2100
19	2101	2150	2210
20	2211	2270	2380
21	2381	2270	2610
22	2611	2270	

Gültig für Anlage XXIII oder ECE-R 83 (US-Fahrzyklen)

$BM = LM + 136$ (3)

	BMu	SM Klasse	BMo
1	0	450	480
2	481	510	540
3	541	570	600
4	601	620	650
5	651	680	710
6	711	740	770
7	771	800	820
8	821	850	880
9	881	910	940
10	941	960	990
11	991	1020	1050
12	1051	1080	1110
13	1111	1130	1160
14	1161	1190	1220
15	1221	1250	1280
16	1281	1300	1330
17	1331	1360	1390

	BMu	SM Klasse	BMo
18	1391	1420	1450
19	1451	1470	1500
20	1501	1530	1560
21	1561	1590	1620
22	1621	1640	1670
23	1671	1700	1730
24	1731	1760	1790
25	1791	1810	1870
26	1871	1930	1980
27	1981	2040	2100
28	2101	2150	2210
29	2211	2270	2320
30	2321	2380	2440
31	2441	2490	2610
32	2611	2720	2830
33	2831	2940	

Abbildung F.1: Einteilung der Schwungmassenklassen

4. EU-/ECE-Fahrzyklus

Der neue EU-Fahrzyklus besteht aus 2 Teilen. Teil 1 besteht aus 4 City-Fahrzyklen und ergibt eine Zykluslänge von 4,052 km sowie eine Prüfungsdauer von 13 Minuten. Teil 2 (außerstädtischer Fahrzyklus) besteht aus 13 Phasen (Leerlauf, Beschleunigung, Konstantfahrt, Verzögerung). Ab EU Stufe 3 Wegfall des 40 s Vorlaufs, d. h. Beginn der Abgas-Probenahme ab Motorstart.

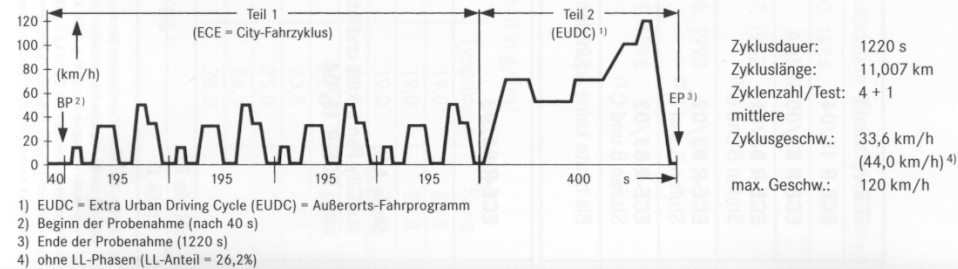


Abbildung F.2: ECE-Fahrzyklus

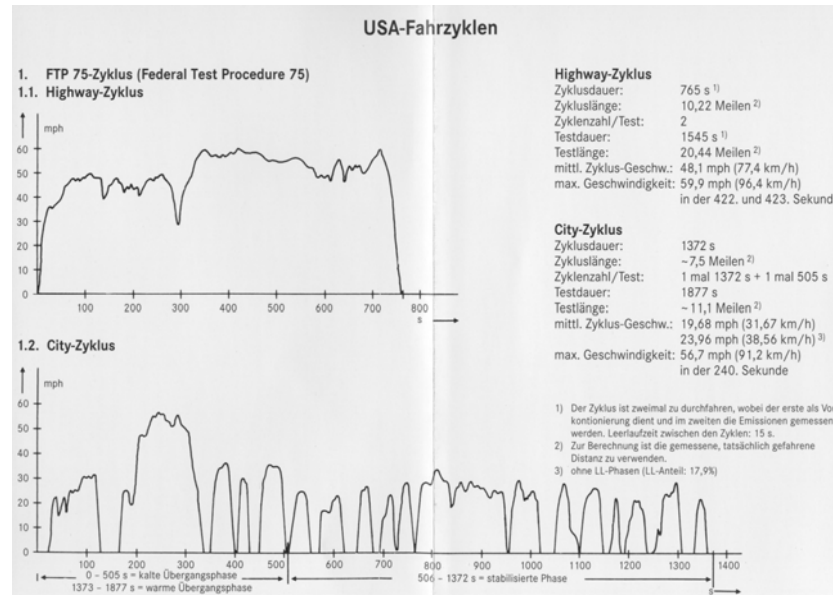


Abbildung F.3: US-Fahrzyklen

Literaturverzeichnis

- 1 Appleby, A. J., Foulkes, F.R.
Fuel Cell Handbook
Van Nostrand Reinhold, New York 1989
- 2 Baehr, H. D.
Thermodynamik
Springer-Verlag, Berlin, 1996
- 3 Göhring, M.
Betriebsstrategien für serielle Hybridantriebe
Dissertation RWTH Aachen, 1997
- 4 Krauß, R., Friedrich J., Spaniel D.
Stand und Entwicklungsmöglichkeiten des Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugs
VDI Berichte Nr. 1378, 1998
- 5 Kolke, R.
Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen
Brennstoffzellenfahrzeuge
Umweltbundesamt, Luftreinhaltung und Verkehr, Berlin, 1997
- 6 Carpetis, L.
Bewertung von Brennstoffzellenantrieben in Fahrzeugen im Hinblick auf Energie-
und Schadstoffbilanz
Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, STB-Bericht Nr. 14, 1997
- 7 Pischinger, S.
Verbrennungsmotoren Band I
Vorlesungsumdruck, Institut für Verbrennungskraftmaschinen, RWTH Aachen, 19.
Auflage, 1998
- 8 Gieck, K. , Gieck R.
Technische Formelsammlung
Gieck Verlag, Germering, 30. Auflage, 1995
- 9 Steiger, W.
Innovative Antriebskonzepte von Volkswagen
Workshop "Innovationpotentiale für umweltfreundliche PKW", Wuppertal, 1998
- 10 DaimlerChrysler AG
Pkw Verkaufstaschenbuch
Mercedes-Benz Deutschland, Vertrieb Pkw, Art.Nr. 1410119800, Berlin, 1998

-
- 11 Düsterwald, H.-G.
 Untersuchung eine Methanolreformerkonzeptes unter besonderen Bedingungen
 der Dynamik und Langzeitstabilität beim Einsatz im Brennstoffzellen-Pkw
 Berichte des Forschungszentrums Jülich, Nr. 3452, 1997

 - 12 Stricker, M.
 Abschätzung von Energierückgewinnungspotentialen bei Brennstoffzellen-
 Elektrofahrzeugen
 Diplomarbeit TH Darmstadt, Darmstadt, 1997

 - 13 Produktinformation Power Cache Ultracapacitors
 www.powercache.com
 Maxwell Technologies, San Diego, CA, USA, 1998

 - 14 Toyota Jidosha K.K.,
 Offenlegungsschrift Patent DE 19737406 A1
 Toyota, Aichi, Japan, 1998

 - 15 Harbolla, B.
 Entwicklung eines Bewertungsverfahrens zur Auswahl von Pkw-Hybridantrieben
 und Realisierung eines seriennahen Antriebskonzeptes
 Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 1993

 - 16 Wimmer, R.
 Integration Issues and Test Results of an FC/Battery System (Georgetown
 University)
 Fuel Cells for Transportation TOPTEC, Cambridge, MA, USA, 1998

 - 17 Ganser, B.
 Verfahrensanalyse: Wasserstoff aus Methanol und dessen Einsatz in
 Brennstoffzellen für Fahrzeugantriebe
 Berichte des Forschungszentrums Jülich, Nr. 2748, 1993

 - 18 Mitchell, W. L.
 Advanced Fuel Processor Development
 Epyx Corporation/Athur D. Little
 Fuel Cells for Transportation ,1998 Contractor's Annual Progress report,
 Department of Energy, USA, 1998

 - 19 Neutzler, J.
 Development of Advanced, Low-Cost PEM-Fuel Cell Stack
 Energy Partners

-
- Fuel Cells for Transportation ,1998 Contractor's Annual Progress report,
Department of Energy, USA, 1998
- 20 Höhle B., Ganzer, B., Menzer, R.
Niedertemperatur-Brennstoffzelle mit Methanol-Reformierung zur
Brenngaserzeugung
Forschungszentrum Jülich, 1990
- 21 DaimlerChrysler AG
Interne Untersuchungen an Brennstoffzellensystemen, 1997 - 1999
- 22 Regh, T.
R&D of a 50 kW High Efficiency, High Power Density, CO-Tolerant PEM Fuel Cell
Stack System
Allied Signal
Fuel Cells for Transportation, Contractors's Annual Progress Report 98
Dept. of Energy, Washington, USA, 1999
- 23 Pischinger, S., Wiartalla, A.
Institut für Verbrennungskraftmaschinen der RWTH Aachen
Aufladesysteme für Brennstoffzellenfahrzeuge
Vortrag im Haus der Technik, Essen, 1999
- 24 Amphlett, J.C., Mann P.F., Peppley, B.A.
Predicted Emmisions from a Methanol-fueled „Electrochemical Automobile
Engine“
SAE paper 952374, SAE, Warrendale, USA, 1995
- 25 Gossen, F.
Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu weiterentwickelten konventionell
angetriebenen Fahrzeugen
Dissertation RWTH Aachen, 2000
- 26 Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt
Informationsbroschüre zur Brennstoffzellentechnik
Institut für Thermodynamik, Stuttgart, 1999
- 27 Stodolsky, F. Gaines, L. Christopher, L. Feng, A.
Total Fuel Cycle Impacts of Advanced Vehicles
Paper No. 19999-01-0322
SAE International Congress and Exposition, Detroit, MI, USA, 1999

-
- 28 Odgen, J. M., et. al.
fuels fo Fuel Cell Vehicles: vehicle design and infrastructure Issues
SAE Paper 982500, 1998
- 29 Rake,
Regelungstechnik A und B
Vorlesungsumdruck, Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen, 19. Auflage,
1998
- 30 Mosig, J.,
Dreidimensionale mathematische Modellierung einer Brennstoffzelle mit
Protonen-Austausch-Membran, Berichte des Forschungszentrums Jülich 3480,
Jülich, 1997
- 31 Westphalen, D.
Fuel Cells for Transportation ,1998 Contractor's Annual Progress report,
Department of Energy, USA, 1998
- 32 Cronin, J.J.
Fuel Cells for Transportation ,1998 Contractor's Annual Progress report,
Department of Energy, USA, 1998
- 33 Friedman, J. F. et. al.
Balancing Stack, Air supply, and Water/Thermal Management Demands for an
Indirect Methanol PEM Fuel Cell System
Fuel Cell Power for Transportation 2001, Society of Automotive Engineers,
Warrendale, USA, 2001
- 34 Moore, T. C., Lovins, A. B.
Vehicle Design Strategies to Meet and Exceed PNGV Goals
SAE Paper 951906, 1995
- 35 Langheim, J.
Einzelantrieb für Elektrostrassenfahrzeuge
Dissertation RWTH Aachen, 1993
- 36 Kaufmann, L.
Vergleich und Bewertung verschiedener PKW-Antriebskonzepte hinsichtlich
Energie- und Schadstoffemissionen
Diplomarbeit FH Köln, 1996
- 37 Wipke, K. B., Cuddy M. R.
Using an Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR) to Guide Hybrid Vehivle

-
- Propulsion Development
National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 1999
- 38 Seiler, J.
Betriebstrategien am Serienhybrid
Diplomarbeit, Lehrstuhl für elektrische Antriebstechnik, TU München, 1995
- 39 Mortimer, C.
Das Basiswissen der Chemie
Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1987
- 40 Kordesch, K. Simader, G.
Fuel Cells an their applications
VCH, Weinheim, 1996
- 41 Küttner K.-H.
Kolbenverdichter
Springer-Verlag, Berlin, 1992
- 42 Baehr, H. D., Stephan, K.
Wärmeübertragung
Springer-Verlag, Berlin, 1998
- 43 Dischinger, J.
Entwicklung eines Rechenprogramms zur anwendungsorientierten Beurteilung
von Kompaktwärmetauschern
Diplomarbeit, Institut für Thermodynamik, Universität Stuttgart, 1990
- 44 Mitschke, M.
Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band A
Springer-Verlag, Berlin, 1975
- 45 MATLAB User's Manual
Optimization Toolbox, Release 11
The Mathworks, Natick, MA, USA, 1999
- 46 Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt
Informationsbroschüre zur Brennstoffzellentechnik
Institut für Thermodynamik, Stuttgart, 1999
- 47 Dubbel
Taschenbuch für den Maschinenbau
Springer-Verlag, 17. Auflage, Berlin, 1990

-
- 48 EU-Richtlinie
 ECE R83/03 (EU/ECE- Fahrzyklus)
- 49 Atkins, P. W.
 Physikalische Chemie
 VCH-Verlag, Weinheim, 1990

Lebenslauf

Name: Dirk Spaniel

Persönliche Daten

Geburtsdatum/-ort: 3.11.1971 in Marburg/Lahn

Staatsangehörigkeit: deutsch

Familienstand: ledig

Ausbildung

8/1978 - 7/1982 Grundschule Dautphetal

8/1982 - 7/1991 Gymnasium Biedenkopf, Abschluß: Abitur

10/1991 - 9/1993 Technische Universität Clausthal, Abschluß:
Vordiplom im Studiengang Chemieingenieurwesen

10/1993 - 3/1997 RWTH Aachen, Abschluß:
Diplom im Studiengang Maschinenbau, Fachrichtung Kraftfahrwesen

Promotion

4/1997 - 12/1999 DaimlerChrysler AG, Projekthaus Brennstoffzelle (EP/BZ), Doktorand

Hochschulseitige Betreuung:
RWTH Aachen, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wallentowitz

Die Erstellung der Dissertation wurde nach 12/1999 bis 12/2002
berufsbegleitend weitergeführt

Berufstätigkeit

1/2000 - DaimlerChrysler AG, Abteilung Fahrdynamik Versuch und Analyse
(EP/GFF), Versuchsingenieur