

Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik  
Technische Universität München

# Potenzial einer SOFC-APU bei der Verbrauchsoptimierung von Kraftfahrzeugen

Christian B. Diegelmann

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor Ingenieurs

genehmigte Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. sc. techn. (ETH) Andreas Herkersdorf

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing

Die Dissertation wurde am 14.11.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 28.04.2008 angenommen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b>	<b>iv</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
1.1 Entwicklungen im Automobilbau . . . . .	1
1.1.1 Zunahme elektrischer Verbraucher . . . . .	1
1.1.2 Reduktion von Kraftstoffverbrauch und Emissionen . . . . .	1
1.1.3 Ausrichtung in der Automobilindustrie . . . . .	5
1.2 Zielsetzung der Arbeit . . . . .	7
1.3 Stand der Technik . . . . .	7
<b>2 Integration einer APU ins Kraftfahrzeug</b>	<b>10</b>
2.1 Energiesystem Kraftfahrzeug . . . . .	10
2.1.1 Quellen . . . . .	10
2.1.2 Wandler . . . . .	11
2.1.3 Übertrager . . . . .	18
2.1.4 Senken . . . . .	18
2.1.5 Speicher . . . . .	20
2.2 Brennstoffzellen-APU . . . . .	22
2.2.1 Grundlagen der Brennstoffzelle . . . . .	22
2.2.2 Systembeschreibung SOFC-APU . . . . .	27
2.2.3 Wirkungsgradpotenzial SOFC-APU . . . . .	31
2.3 Anwendungsmöglichkeiten einer APU . . . . .	39
2.3.1 Anwendungen zur Verbrauchsreduktion . . . . .	39
2.3.2 Einbindung der APU ins Fahrzeug . . . . .	45
2.3.3 Zusammenfassung der Anwendungsmöglichkeiten . . . . .	49
<b>3 Berechnungsmethoden zum Kraftstoffverbrauch</b>	<b>51</b>
3.1 Definition von Szenarien . . . . .	51
3.1.1 Fahrzeug . . . . .	52
3.1.2 Fahrzyklus . . . . .	54
3.2 Abschätzung von Verbräuchen . . . . .	56
3.2.1 Teilverbräuche . . . . .	57
3.2.2 Addition der Teilverbräuche . . . . .	64
3.3 Simulation . . . . .	65
3.3.1 Grundmodell . . . . .	66

3.3.2	APU-Modell . . . . .	69
3.3.3	Bordnetzabbildung . . . . .	77
3.3.4	Klimatisierung und Heizung . . . . .	82
3.3.5	Betriebsstrategien . . . . .	82
3.3.6	SoC-Ausgleich . . . . .	86
3.4	Messung . . . . .	88
3.4.1	Kraftstoffverbrauchsmessung auf dem Rollenprüfstand . . . . .	89
3.4.2	Messung der Spannungsabhängigkeit der elektrischen Verbraucher . . . . .	91
3.4.3	Kraftstoffverbrauchsmessung der Standklimatisierung . . . . .	91
3.5	Zusammenfassende Bewertung der Methoden . . . . .	92
3.5.1	Charakterisierung der Methoden . . . . .	92
3.5.2	Vergleich der Genauigkeit der Ergebnisse . . . . .	94
3.5.3	Auswahl einer Methode . . . . .	99
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>101</b>
4.1	Stromversorgung im Stand . . . . .	101
4.1.1	Berücksichtigung des Startup-Verbrauchs der APU . . . . .	102
4.1.2	Einschränkungen der Batterie . . . . .	103
4.1.3	Standklimatisierung . . . . .	104
4.2	Stromversorgung während der Fahrt . . . . .	105
4.2.1	Ersatz des Generators durch die APU . . . . .	106
4.2.2	Kombination von APU und Generator . . . . .	110
4.2.3	Nutzung der Rekuperation . . . . .	111
4.3	Unterstützung der Motor-Stopp-Automatik (MSA) . . . . .	115
4.3.1	MSA ohne aktive Rekuperation . . . . .	116
4.3.2	MSA mit aktiver Rekuperation . . . . .	117
4.3.3	MSA mit Klimatisierung . . . . .	119
4.4	Nutzung der APU-Wärme . . . . .	120
4.4.1	Wärmeerzeugung zum Heizen des Fahrgastraums . . . . .	120
4.4.2	Abwärmennutzung zur Aggregatevorwärmung . . . . .	122
4.5	APU im Hybridfahrzeug . . . . .	123
4.5.1	Systemübersicht . . . . .	123
4.5.2	Grenzpotezial . . . . .	125
4.5.3	Weitere Einflussfaktoren . . . . .	128
4.6	Einflussanalyse . . . . .	130

4.6.1	Anteile am Kraftstoffverbrauch . . . . .	130
4.6.2	Auswirkungen geänderter Randbedingungen und Annahmen . . . . .	133
4.6.3	Übertragbarkeit der Ergebnisse . . . . .	141
4.7	Optimierungsmöglichkeiten . . . . .	141
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>145</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>149</b>
6.1	Herleitung der Gleichung des APU-Wirkungsgrads . . . . .	149
6.2	Fahrzeugdaten . . . . .	150
6.3	Messergebnisse . . . . .	151
	<b>Verwendete Formelzeichen</b>	<b>153</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>156</b>

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit, die während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der BMW Group entstanden ist, beigetragen haben.

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Wagner für die hochschulseitige Betreuung der Arbeit sowie die wertvollen Diskussionen und Anregungen. Gleichzeitig danke ich Herrn Prof. B. Heißing für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme der Zweitkorrektur.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. P. Lamp für die Betreuung der Arbeit seitens BMW. Durch seine Anregungen und Ratschläge sowie durch viele Diskussionen hat er in hohem Maße zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Genauso danke ich Herrn J. Tachtler, der die Arbeit angeregt und mich stets gefördert hat.

Weiterhin danke ich allen Kolleginnen und Kollegen, die mich bei meinen Tätigkeiten, vor allem bei der Durchführung der Versuche sowie bei der Beschaffung von Kennfeldern und experimentellen Daten, unterstützt haben. Im besonderen gilt mein Dank Hr. J. Kammerer, Hr. B. Ruhland, Hr. Dr. R. Höppler, Hr. W. Wegener, Hr. T. Zweimüller und Hr. B. Edlinger.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Familie und insbesondere bei meiner Frau Julia bedanken, die mich in allen Bereichen stets unterstützt haben.

# 1 Einleitung und Zielsetzung

## 1.1 Entwicklungen im Automobilbau

Der elektrische Leistungs- und Energiebedarf im Fahrzeug steigt zunehmend. Dadurch nimmt der Einfluss der elektrischen Energieerzeugung im Fahrzeug auf den Kraftstoffverbrauch zu. Neben bestehenden Maßnahmen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen wird in Zukunft verstärkt auch die Bereitstellung elektrischer Energie im Fokus von Optimierungsaufgaben stehen. Hier wird die Nachfrage nach neuen Konzepten und Technologien steigen. Die Notwendigkeit den Kraftstoffverbrauch zu senken wird neben ökonomischen Aspekten insbesondere durch die  $CO_2$  Gesetzgebung der Europäischen Union getrieben.

### 1.1.1 Zunahme elektrischer Verbraucher

Durch die fortschreitende Entwicklung elektrischer und elektronischer Komponenten sind im Fahrzeug ganz neue Möglichkeiten entstanden. Viele mechanische Systeme werden mit Elektrik / Elektronik aufgewertet oder komplett durch elektrische / elektronische Systeme ersetzt. Zusätzlich werden eine Vielzahl neuer Funktionen zur Steigerung von Komfort und Sicherheit in das Fahrzeug integriert. Elektrische Systeme lassen sich im allgemeinen besser steuern und regeln als mechanische Systeme. Außerdem bestehen oft größere Freiheiten bei der Unterbringung im Fahrzeug (Package).

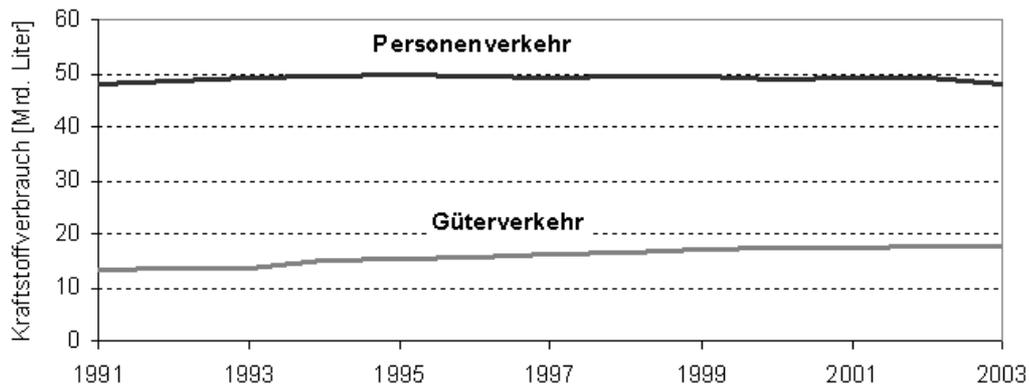
ABS, ESP und Airbag sind Beispiele für sicherheitsverbessernde Systeme, die alle nicht ohne Elektronik auskommen würden. Für komfortsteigernde Systeme sollen hier als Beispiel die elektrische Sitzheizung und Sitzverstellung, die Hifi-Anlage und das Navigationssystem genannt werden. In Zukunft werden vermutlich noch weitere elektrische Systeme wie steer-by-wire, brake-by-wire und Multimediaanwendungen hinzukommen.

Durch den gestiegenen elektrischen Leistungsbedarf in Kraftfahrzeugen sind in den vergangenen 35 Jahren die Generatorleistungen um etwa 500 % und die Kapazitäten der Bordbatterien um etwa 200 % gestiegen [1]. Aufgrund der weiteren Zunahme der elektrischen Verbraucher wird auch in Zukunft der Bedarf an elektrischer Leistung und damit auch an Energie weiter steigen. Die zunehmende Entwicklung von Hybridfahrzeugen führt zu einer weiter steigenden Bedeutung der elektrischen Energieform im Fahrzeug. Wenn der Verbrennungsmotor aus ist, muss heute die komplette elektrische Energieversorgung durch die Fahrzeugbatterie bewerkstelligt werden. Insbesondere wenn elektromotorisches Fahren gewünscht wird, führt dies zu hohen Leistungs- und Energieanforderungen, weshalb in Hybridfahrzeugen meist andere Batterietechnologien verwendet werden. Zur Steigerung der Versorgungssicherheit bezüglich elektrischer Energie in Kraftfahrzeugen, macht es Sinn, über komplett neue Lösungen nachzudenken, die sich vom bisherigen Motor-Generator-Konzept lösen.

### 1.1.2 Reduktion von Kraftstoffverbrauch und Emissionen

In Deutschland werden im Jahr ca. 50 Milliarden Liter Kraftstoff im Personenverkehr verbraucht. Wie in Bild 1.1 zu sehen ist, ist dabei der Verbrauch in den letzten Jahren im

Personenverkehr nicht weiter angestiegen, obwohl die Fahrleistungen des Personenverkehrs von 1991 bis 2003 um 15,7 % zugenommen haben. Der durchschnittliche Verbrauch eines Fahrzeugs ist trotz steigender Motorleistung und zusätzlicher Komfort- und Sicherheitsausstattung gesunken. Dies ist ein Erfolg bisheriger Verbrauchsoptimierungen. In Bild 1.1 ist zusätzlich der Kraftstoffverbrauch des Güterverkehrs dargestellt. Hier liegt aufgrund der Zunahme der Fahrleistung um 53,8 % eine deutliche Steigerung vor [2].



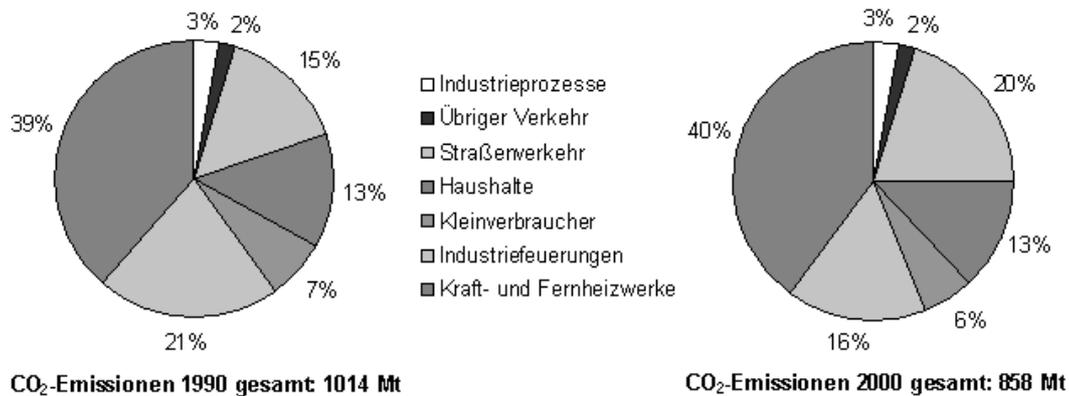
**Bild 1.1:** Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr in Deutschland [2]

### Umweltaspekte

Im Jahr 2003 produzierte der Straßenverkehr in Deutschland 158 Millionen Tonnen Kohlendioxid [3]. Durch unvollständige Verbrennung und Nebenreaktionen befinden sich neben den Verbrennungsprodukten Wasser und Kohlendioxid auch Schadstoffe im Fahrzeugabgas, vor allem Stickoxide, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe.

Die Abgase haben verschiedene Auswirkungen auf die Umwelt:

- Der  **$CO_2$ -Ausstoß** führt zu langfristigen Klimaveränderungen.  $CO_2$  ist neben anderen Treibhausgasen hauptverantwortlich für den sogenannten Treibhauseffekt, der vermutlich Hauptursache einer stetigen globalen Temperaturerhöhung ist. In Deutschland verursachte der Straßenverkehr im Jahr 1990 15 % der anthropogenen  $CO_2$ -Emissionen, siehe Bild 1.2. Während die Gesamt- $CO_2$ -Emissionen im Zeitraum 1990 bis 2000 um ca. 15 % zurückgingen, stiegen die  $CO_2$ -Emissionen des Straßenverkehrs um 15 % auf einen Anteil von 20 % [4].
- **Stickoxide ( $NO_x$ )** tragen zu saurem Regen und Ernteschäden bei. Sie reagieren durch Sonnenlicht mit flüchtigen organischen Verbindungen in der Atmosphäre zu bodennahem Ozon ( $O_3$ ). Das Ozon ist ein Vorläufer des Sommer-Smogs, der reizend wirkt und in hoher Konzentration giftig ist [5]. Seit 1995 kann in Deutschland bei hohen Ozonwerten ein „*großräumiges Fahrverbot für hoch emittierende Fahrzeuge*“ ausgerufen werden [6]. Im Sommer 1998 wurde zum ersten mal in mehreren Bundesländern Ozonalarm ausgelöst, was zu einem Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Fahrzeuge führte [7]. Auch in anderen Ländern ist es wegen Smog bereits zum Fahrverbot gekommen, z.B. im Januar 2002 in Norditalien.



**Bild 1.2:** Anteile der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland [4]

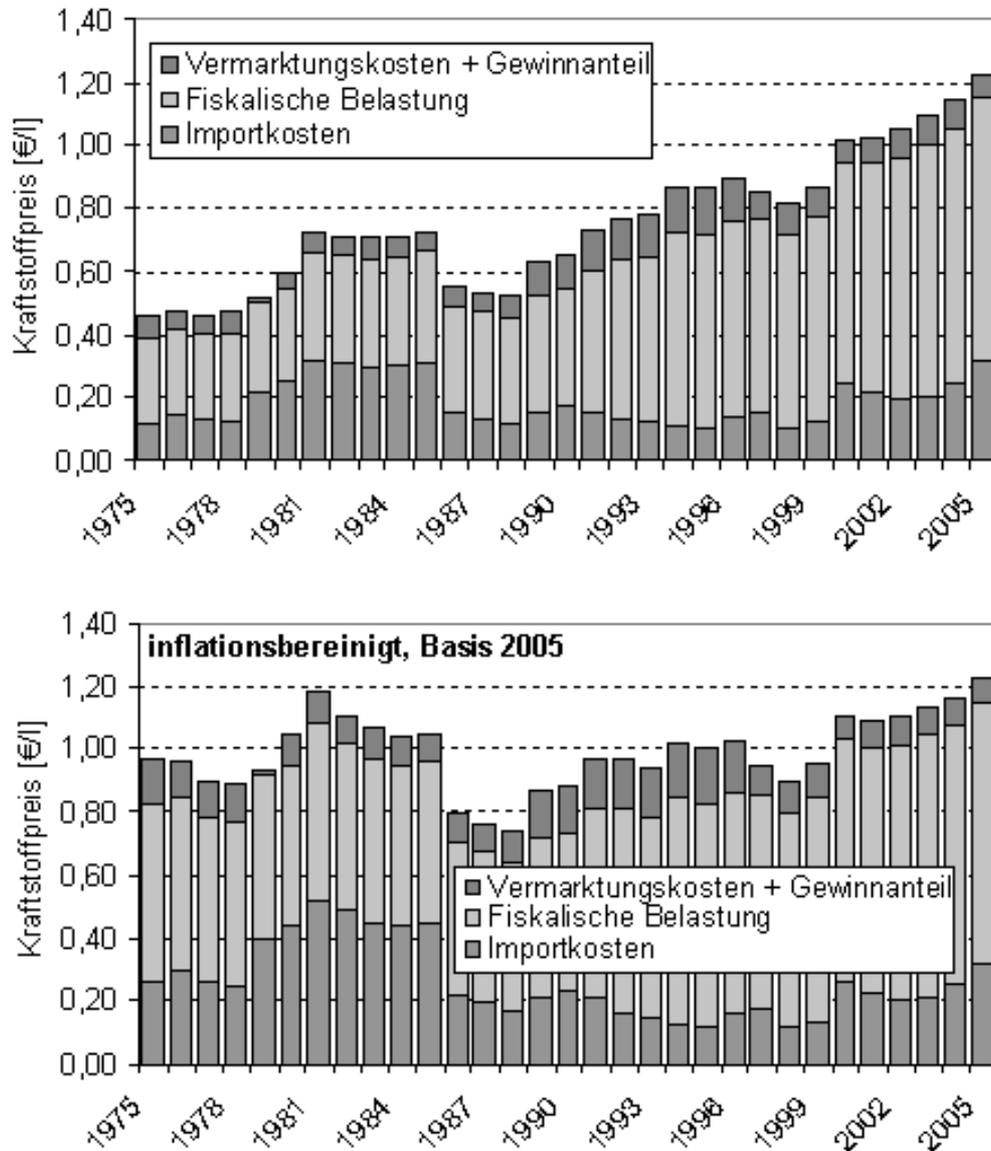
- **Kohlenmonoxid (CO)** ist ein sehr giftiges Gas, das den Sauerstofftransport im Blut behindert und in hohen Konzentrationen tödlich wirkt. Der Straßenverkehr verursacht ca. 3/4 aller CO-Emissionen [5].

Durch die Einführung von Abgaskatalysatoren im Fahrzeug wurden die schädlichen Gase stark reduziert. Bei Dieselfahrzeugen spielen zusätzlich Partikelemissionen eine Rolle, die durch die Einführung von Rußpartikelfiltern ebenfalls stark reduziert werden konnten. Mit dem Zukunftskraftstoff Wasserstoff kann in Zukunft die Emission von Schadstoffen weiter verringert werden, bis hin zum Zero-Emission-Vehicle (ZEV).

### Ökonomische Aspekte

Nicht nur Umweltaspekte führen zu Bestrebungen den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. Da die Erdölreserven begrenzt sind, muss über eine sparsame Verwendung sowie über Alternativen zum Erdöl nachgedacht werden. Schätzungen über die Reichweite des Erdöls differieren erheblich. Der Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung beziffert die „sicheren Erdölreserven weltweit [auf] 171 Milliarden Tonnen“ und gibt eine rechnerische Reichweite von 46 Jahren an (Stand 2003). Für das „Gesamtpotenzial“ der Erdölresourcen wird ein Schätzwert von 946 Milliarden Tonnen und eine damit verbundene rechnerische Reichweite von 260 Jahren angegeben [8]. Eine andere Prognose geht davon aus, dass bereits ab ca. 2014 die weltweite Erdölförderung abnehmen wird [9]. Durch neue Such- und Fördermethoden wird es in Zukunft weiter möglich sein, neue Erdölquellen zu finden und zu erschließen. Der Kostenfaktor wird jedoch eine immer größere Rolle spielen. Zusätzlich beeinflussen zunehmend politische Faktoren den Preis und die Verfügbarkeit von Erdöl.

Bereits jetzt leiden viele Verbraucher unter dem Anstieg der Kraftstoffpreise. In Bild 1.3 ist die Entwicklung der Kraftstoffpreise in Deutschland von 1975 bis 2005 dargestellt. Die Preise sind in dem Zeitraum um 165 % gestiegen. Berücksichtigt man die Inflationsrate, liegt allerdings nur ein Anstieg von 26 % vor. Auffällig ist, dass vor allem eine zunehmend Versteuerung der Kraftstoffe, nicht zuletzt durch die seit 1999 neu hinzugekommene Ökosteuern, zum Anstieg der Preise führte. Die Importkosten von Rohöl haben vor allem nach der zweiten Energiekrise 1979/80 zu einem extremen Anstieg der Kraftstoffpreise geführt. Nachdem die Importkosten ab 1986 bis 1999 eher rückläufig waren,



**Bild 1.3:** Preisentwicklung und Preiszusammensetzung Superbenzin in Deutschland (Jahresdurchschnittswerte, ab 1989 unverbleit) [3, 10]

steigen sie seit 2000 wieder an. Insgesamt muss mit einem weiteren Anstieg der Kraftstoffpreise gerechnet werden. Autokäufer, vor allem außerhalb des Premiumsegments, werden in Zukunft bei der Kaufentscheidung vermehrt den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs berücksichtigen.

#### Handlungsbedarf der Automobilindustrie

Das Bestreben aller Automobilhersteller sollte sein, den Verbrauch sowie die umweltschädlichen Emissionen von Fahrzeugen zu senken. Getrieben wird dies durch freiwillige Selbstverpflichtungen der Automobilhersteller sowie Gesetzgebungen in verschiedenen Ländern.

## Selbstverpflichtung

„Die zwischen der europäischen Automobilindustrie und den EU-Gremien getroffene freiwillige Vereinbarung sieht vor, die durchschnittlichen  $CO_2$ -Emissionen von neu in der Europäischen Union zugelassenen Personenkraftwagen (M1-Fahrzeuge<sup>1</sup>) bis zum Jahr 2008 um 25 % gegenüber dem Stand des Jahres 1995 zu verringern. Konkret bedeutet dies eine  $CO_2$ -Absenkung von 186 g/km  $CO_2$  auf 140 g/km  $CO_2$  im Jahr 2008<sup>2</sup>.“ [11]

## Gesetzgebung

„Die Grenzwerte in den europäischen Abgasvorschriften für leichte Kraftfahrzeuge - dies schließt Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge bis zu 3,5 t zulässige Gesamtmasse ein - wurden seit Beginn der Abgasgesetzgebungen 1970 bis zum Jahr 2000 um über 90 Prozent gesenkt.“ 2005 trat eine weitere Absenkungsstufe (EURO 4) in Kraft. Gegenüber der EURO 3-Stufe wurden die Grenzwerte „nochmals um teilweise über 60 % verschärft.“ [11] Neben der Gesetzgebung zu Abgasemissionen wird zur Zeit über gesetzliche  $CO_2$ -Grenzwerte oder eine Besteuerung der  $CO_2$ -Emissionen diskutiert.

### 1.1.3 Ausrichtung in der Automobilindustrie

Eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs wird in erster Linie durch eine Optimierung des Antriebsstrangs, eine Verringerung des Fahrzeuggewichts sowie durch eine Verminderung des Luft- und Rollwiderstands erreicht. Neben diesen Faktoren muss nach weiteren Möglichkeiten gesucht werden, den Kraftstoffverbrauch zu senken.

Um Anforderungen an höheren Komfort und mehr Sicherheit gerecht zu werden und trotzdem den Kraftstoffverbrauch zu senken und schädliche Emissionen zu reduzieren, wird an neuen Konzepten und Technologien geforscht. Dabei wurde in der Vergangenheit als Alternative zum Verbrennungsmotor (ICE<sup>3</sup>) das reine Elektrofahrzeug (EV<sup>4</sup> oder BEV<sup>5</sup>) und das Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV<sup>6</sup>) betrachtet. Die Serieneinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen scheidet bisher noch am Reifegrad der eingesetzten Brennstoffzellensysteme sowie an der fehlenden Kraftstoffinfrastruktur. Das Elektrofahrzeug hat vor allem bei kleinen Fahrzeugen mit geringer Reichweitenanforderung, z.B. bei Golfcarts, eine erfolgreiche Anwendung gefunden.

Der aktuelle Trend geht in Richtung Hybridisierung des konventionell angetriebenen Fahrzeugs. Das heißt, das Fahrzeug wird neben dem herkömmlichen Verbrennungsmotor mit einer Elektro-Maschine ausgestattet. Es werden verschiedene Hybridisierungsstufen betrachtet. Geringe Anpassungen am Fahrzeug reichen bereits aus, um eine Motorstopp-Automatik (Start/Stop-System) einzuführen oder die Vorteile der Rekuperation zu nutzen. Eine Nutzung des vollständigen Rekuperationspotenzials sowie Anwendungen wie Boosten und elektrisches Fahren bedingen eine größere E-Maschinen, einen größeren Energiespeicher und ein angepasstes Energiebordnetz. Je nach Ausprägung wird oft von Micro-,

<sup>1</sup>Kfz zur Personenbeförderung mit mindestens 4 Rädern und max. 9 Sitzplätzen (inkl. Fahrersitz)

<sup>2</sup>Dies entspricht einer Absenkung des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs von rund 8 l/100 km für PKW mit Ottomotor bzw. 7,0 l/100 km auf 5,3 l/100 km für PKW mit Dieselmotor.

<sup>3</sup>ICE = Internal Combustion Engine

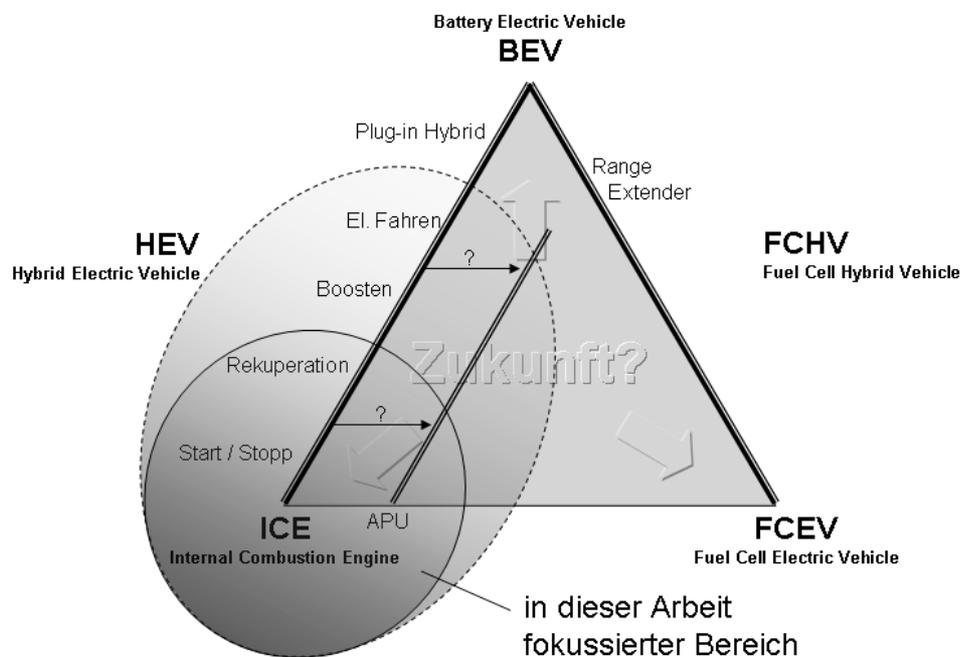
<sup>4</sup>EV = Electric Vehicle

<sup>5</sup>BEV = Battery Electric Vehicle

<sup>6</sup>FCEV = Fuel Cell Electric Vehicle

Mild- und Full-Hybridfahrzeugen gesprochen, wobei keine allgemeingültige Definition dieser Stufen existiert. Der „Plug-in“ Hybrid geht bereits stark Richtung Elektrofahrzeug. Die auf eine hohe Speicherkapazität ausgelegten Batterien können über eine Ladevorrichtung aus dem Stromnetz aufgeladen werden. So ist es möglich, dass der Plug-in Hybrid vor allem in urbanen Gebieten weitgehend elektrisch betrieben werden kann und dabei kaum lokale Emissionen verursacht.

Ein ähnlicher Hybridisierungstrend zeichnet sich auch bei den Brennstoffzellenfahrzeugen ab. Durch eine Vergrößerung der elektrischen Energiespeicher können Leistungsspitzen gepuffert werden, so dass die maximale Leistung des Brennstoffzellensystems reduziert werden kann. Toyota bezeichnet diese Fahrzeuge als FCHV (**F**uel **C**ell **H**ybrid **V**ehicle) [12]. Delphi betrachtet die Kombination von Elektrofahrzeug und Brennstoffzellenfahrzeug von der anderen Seite. Ausgehend von einem Elektrofahrzeug dient eine kleine Brennstoffzelle zur Erhöhung der Reichweite (range extender) [13].



**Bild 1.4:** Antriebsformen zwischen konventionellem verbrennungsmotorischem Antrieb, batteriebetriebenen Elektrofahrzeug und Brennstoffzellenfahrzeug

Eine kleine Brennstoffzelle kann auch im herkömmlichen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor als APU (**A**uxiliary **P**ower **U**nit) zur Stromerzeugung genutzt werden. Der Verbrennungsmotor dient weiterhin zum Antrieb des Fahrzeugs. Die elektrische Energieerzeugung wird weitgehend vom Antrieb getrennt und der APU übertragen. Der Vorteil der Brennstoffzellen-APU ist, dass sie unabhängig vom Verbrennungsmotor arbeitet und so auch im Stand elektrische Energie erzeugen kann. Außerdem wandelt sie Kraftstoff direkt in Strom um und verspricht so gegenüber der herkömmlichen Motor-Generator-Kombination einen höheren Wirkungsgrad bei der Stromerzeugung. Es gibt verschiedene Brennstoffzellentypen. Im Zusammenhang mit einer APU wird sowohl an der PEMFC<sup>7</sup>,

<sup>7</sup>Polymer Elektrolyte Membrane Fuel Cell

als auch an der SOFC<sup>8</sup> gearbeitet. Die SOFC-Technologie hat den Vorteil, dass bei der Nutzung heutiger Kraftstoffe (Benzin und Diesel) im Vergleich zur PEMFC eine relativ einfache Kraftstoffaufbereitung ausreicht [1]. In Bild 1.4 sind die verschiedenen Fahrzeugausprägungen und der in dieser Arbeit fokussierte Bereich dargestellt.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

In dieser Arbeit sollen Möglichkeiten aufgezeigt und bewertet werden, mit einer SOFC-APU den Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen zu reduzieren. Als erstes sollen dazu die Energieflüsse im heutigen Fahrzeug analysiert werden. Ausgehend von den Ergebnissen können Integrations- und Anwendungsmöglichkeiten einer APU identifiziert werden. Für interessante Anwendungsfelder soll das Potenzial, den Kraftstoffverbrauch durch eine SOFC-APU zu reduzieren, quantitativ bewertet werden.

Für die Bewertung der Einsparmöglichkeiten soll der Unterschied des Kraftstoffverbrauchs eines Fahrzeugs mit und ohne APU bei verschiedenen Szenarien bestimmt werden. So können die verschiedenen Anwendungs- und Integrationsmöglichkeiten bewertet und verglichen werden. Ziel ist es, eine weitgehend allgemeingültige Aussage über das Potenzial einer SOFC-APU zu erhalten. Die Aussage sollte möglichst nicht auf einzelne Fahrzeuge, Fahrzyklen oder andere Randbedingungen eingeschränkt sein.

Bei der Berechnung des Kraftstoffverbrauchs sollen verschiedene methodische Ansätze verglichen werden. Angefangen bei einer groben Abschätzung bis hin zur detaillierten Simulation bieten sich mehrere Berechnungswege an, die alle ihre Vor- und Nachteile haben. Eine einfache Abschätzung wird z.B. oft herangezogen, um in kurzer Zeit zu einer Aussage zu gelangen. Dabei fällt es meist schwer hinreichend die Qualität der Aussagen eingrenzen zu können. Aufwändige Modellierungen und Simulationen hingegen lassen meist eine hohe Aussagegenauigkeit erwarten, hängen aber stark vom Modell sowie den gewählten Annahmen ab. Die physikalisch-technischen Zusammenhänge sind dabei oft nur noch schwer nachvollziehbar. Nach der Analyse und dem Vergleich der einzelnen Methoden soll eine ausgewählt werden, mit der der oben geforderte quantitative Vergleich von Fahrzeugen mit und ohne APU durchgeführt wird.

## 1.3 Stand der Technik

Brennstoffzellen sowie der Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen stehen oft im Fokus von Forschungsarbeiten. Bei Arbeiten zum Thema Brennstoffzelle handelt es sich meist um weitgehend anwendungsunabhängige Grundlagenuntersuchungen oder Systemuntersuchungen. Stehen die Betrachtungen im Zusammenhang mit Fahrzeugen geht es meist um ein FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle), bei dem eine Brennstoffzelle die Energie für einen elektrischen Antrieb und Zusatzverbraucher bereitstellt.

An der Brennstoffzellen-APU zur elektrischen Energieversorgung im Fahrzeug arbeiten mehrere Zulieferer wie auch Fahrzeughersteller. Die bedeutendsten Hersteller von APU-Systemen sind Delphi und Webasto (SOFC) sowie UTC und Ballard<sup>9</sup> (PEMFC). Alle

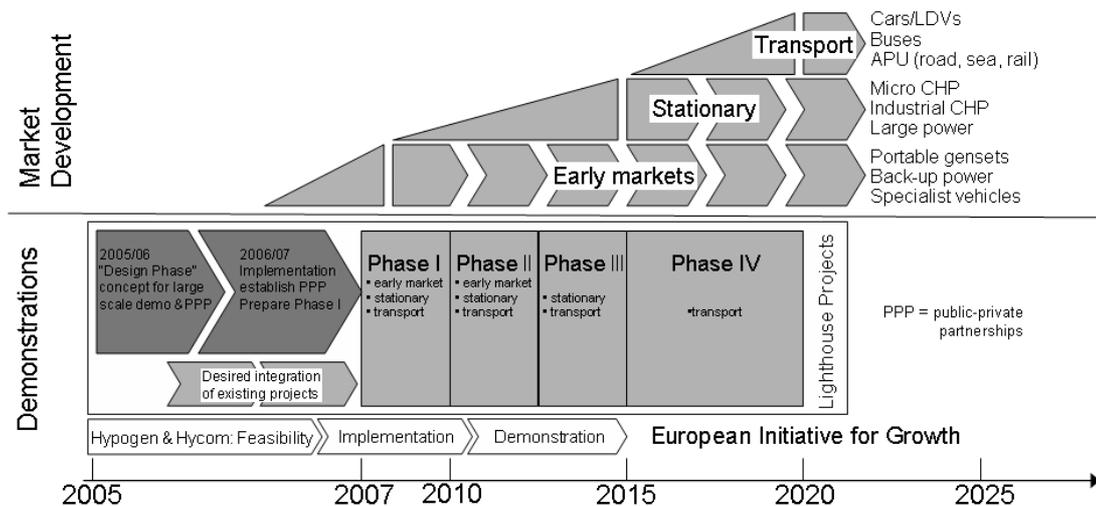
---

<sup>8</sup>Solid Oxide Fuel Cell

<sup>9</sup>in Zusammenarbeit mit DaimlerChrysler

vier Firmen haben bereits Prototypen aufgebaut und Testergebnisse vorgestellt [14–17]. Von folgenden weiteren Firmen ist bekannt, dass sie an APU-Systemen für Fahrzeuganwendungen arbeiten: AVL (SOFC) [18], FEV (PEMFC) [19], Fuel Cell Technologies LTD [20] und Palcan (PEMFC) [20]. Noch erwähnt werden soll die Firma Smart Fuel Cells, die „die erste serienmäßig in einem Fahrzeug eingesetzte Brennstoffzelle“ entwickelt hat [21]. Es handelt sich hierbei um ein mobiles System, das für die Unterstützung der elektrischen Energieversorgung von Wohnmobilen entwickelt wurde, jedoch nicht komplett ins Fahrzeug integriert ist. Basis ist eine DMFC (Direktmethanol-Brennstoffzelle). Das System hat einen eigenen Methanoltank. Die APU-Hersteller arbeiten weitgehend alle mit Fahrzeugherstellern und Forschungsinstituten zusammen. Die meisten Projekte werden durch öffentliche Mittel gefördert.

Im PKW-Bereich haben BMW (PEMFC und SOFC) [1,16] und DaimlerChrysler (PEMFC) [22] Brennstoffzellen-APUs vorgestellt. Auch von VW und PSA sind APU-Prototypen bekannt [23]. Die meisten APU-Entwicklungen sind auf den LKW-Bereich ausgerichtet. Hier bestehen geringere Anforderungen bezüglich Gewicht und Bauraum. Außerdem amortisieren sich die Kosten aufgrund der hohen Betriebsdauer früher und eine lange Startupzeit der APU wird eher akzeptiert als beim PKW, bzw. tritt nicht auf. Eine oft gestellte Frage ist, wann die erste Brennstoffzelle im Fahrzeug in Serie geht. Die Europäische Initiative für Wachstum sieht die ersten Brennstoffzellen-Anwendungen in anderen Bereichen. Erst ab 2015 wird ein zunehmender Einsatz in Fahrzeugen erwartet, siehe Bild 1.5.



**Bild 1.5:** Szenario für die Markteinführung von Brennstoffzellen nach [24]

Die größten Herausforderungen bei der Entwicklung von Brennstoffzellen bestehen in der Kostenreduktion und der Erhöhung der Lebensdauer. Zudem ist eine Gesamtsystemoptimierung notwendig, angefangen bei der Gewichtsreduktion über die Beschleunigung des Startups bis hin zur Wirkungsgradverbesserung. Während bei der PEM-Brennstoffzelle eine wesentliche Herausforderung die Inbetriebnahme bei Minustemperaturen ist, spielt bei der SOFC-Technologie die thermische Zyklisierbarkeit eine große Rolle. In den letzten Jahren wurden große Fortschritte bei der Entwicklung von APUs gemacht. Delphi hat die Stack-Masse von größer  $20\text{ kg}^{10}$  (Generation 2) auf  $8\text{ kg}$  (Generation 3.1) reduziert.

<sup>10</sup>inklusive Load Frame und Base Manifold;  $P_{nenn} = 5\text{ kW}_{el}$

Der Startup der APU dauert jedoch immer noch 75 Minuten [25]. Webasto hat von seiner Prototypenversion 2a (06/2004) nach Version 4 (03/2005) eine Wirkungsgradverbesserung von ca. 12 % auf ca. 17 % erreicht. Bei Markteinführung soll ein Wirkungsgrad größer 25 % erzielt werden [15].

Bei der Diskussion von Brennstoffzellen-APUs werden oft Einsparpotenziale beim Kraftstoffverbrauch als Argument für eine Brennstoffzellen-APU genannt. Meist handelt es sich um grobe Abschätzungen. Folgende Arbeiten gehen genauer auf das Thema ein:

- **DaimlerChrysler** hat Untersuchungen zu einer benzinbetriebenen PEMFC-APU in Mittelklassefahrzeugen durchgeführt. Außerdem wurde das Einsparpotenzial einer LKW-Standklimatisierung mittels APU im Vergleich zur Klimatisierung mit leerlaufendem Verbrennungsmotor analysiert [26].
- Am **Forschungszentrum Jülich** wird der Einsatz von Brennstoffzellen-APUs in verschiedenen mobilen Anwendungsbereichen bezüglich der Energieeffizienz analysiert. Dabei wird sowohl die PEMFC-, als auch die SOFC-Technologie betrachtet [27].
- **Delphi** hat Untersuchungen zum Einsatz von Brennstoffzellen-APUs im Militärbereich durchgeführt. Hier werden große Einsparpotenziale, vor allem von Fahrzeugen im „*silent watch modus*“, gesehen [28]. Im PKW-Bereich hat Delphi die Möglichkeiten erforscht durch eine SOFC-APU die Reichweite von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen zu erhöhen, also ein Schritt Richtung FCEV, jedoch mit kleiner Brennstoffzelle. Delphi sieht vor allem den Vorteil, dass die Batteriekapazitäten verkleinert werden können bei Reichweiten vergleichbar mit konventionellen Fahrzeugen [13].
- Bei der **FfE** (Forschungsstelle für Energiewirtschaft) wurde das Einsparpotenzial von dieselbetriebenen Brennstoffzellen-APUs (PEMFC und SOFC) in Reise- und Linienbussen bei der Raumkonditionierung (Heizen und Kühlen) über Simulationen betrachtet. Große Einsparpotenziale wurden vor allem bei langen Standzeiten und heißen Temperaturen ermittelt. Für den Linienbetrieb haben sich in den meisten Fällen keine Einsparungen ergeben [29].
- In den USA laufen bei großen LKWs die Dieselmotoren oft im Stand um den elektrischen Energiebedarf sowie Heiz- und Klimaanforderungen abzudecken. Verschiedene Institute und Firmen führen Untersuchungen durch, diesen Energiebedarf durch Brennstoffzellen-APUs (PEMFC und SOFC) zu decken, so dass der Verbrennungsmotor im Stand abgeschaltet werden kann. Lutsey von der **University of California**, Davis hat die Randbedingungen und Anforderungen zusammengetragen sowie das entstehende Einsparpotenzial über Simulationen ermittelt [30].

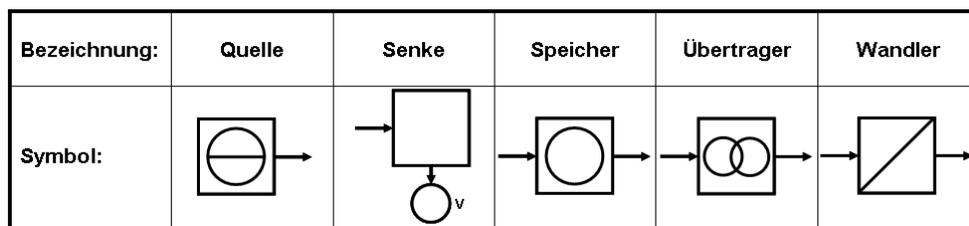
Mit dieser Arbeit soll ein zusätzlicher Beitrag zur Analyse des Einsparpotenzials einer Brennstoffzellen-APU geleistet werden. Dabei konzentriert sich diese Arbeit auf den PKW-Bereich und hierbei vor allem auf Einsparpotenziale auf Basis heutiger Fahrzeuge und mittelfristiger Fahrzeugentwicklungen. Zur Bewertung der Potenziale werden in erster Linie die Möglichkeiten der Simulation genutzt. Dabei wird der Schwerpunkt auf die kombinierte Betrachtung von APU und Fahrzeug gelegt.

## 2 Integration einer APU ins Kraftfahrzeug

In diesem Kapitel wird untersucht, wie eine Brennstoffzellen-APU aus Sicht des Energiemanagements sinnvoll in ein Kraftfahrzeug integriert werden kann. Neben der Betrachtung des „Energiesystems Kraftfahrzeug“ wird auf die Grundlagen der Brennstoffzellentechnik eingegangen. Dabei wird das in dieser Arbeit betrachtete APU-System beschrieben. Aus den Betrachtungen des heutigen Fahrzeugs und der Brennstoffzellen-APU werden potenzielle Anwendungen und Integrationsmöglichkeiten einer APU im Fahrzeug abgeleitet. Nach einer ersten qualitativen Bewertung (in diesem Kapitel) werden interessante Anwendungen herausgefiltert und im folgenden näher betrachtet. Eine quantitative Bewertung der priorisierten Anwendungen findet in Kapitel 4 statt.

### 2.1 Energiesystem Kraftfahrzeug

Ein heutiges Fahrzeug besteht aus über tausend Einzelteilen. Viele Teile haben nur einen geringen oder gar keinen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs. Meist spielt nur das Gewicht eine Rolle. Deshalb soll an dieser Stelle das *Energiesystem Kraftfahrzeug* in einer abstrahierten Form mit reduzierter Komplexität neu dargestellt werden. Dazu werden verschiedene „Prozesselemente“ [31], siehe Bild 2.1, eingeführt.



**Bild 2.1:** Symbole für Prozesselemente [31]

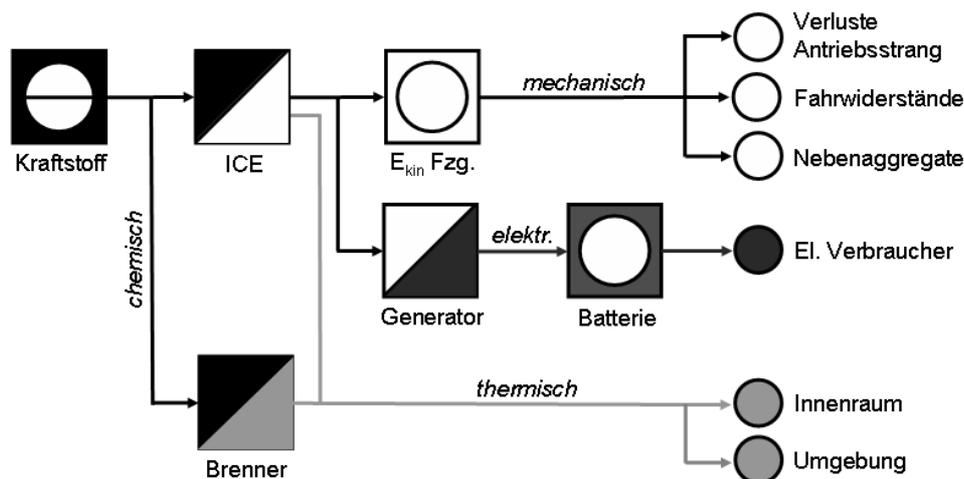
Es können unterschiedliche Detaillierungsgrade betrachtet werden. Z.B. kann die Komponente *Radio* gesamthaft als elektrische Energiesenke angesehen werden oder in weitere Subsysteme, bestehend aus Wandlern, Speichern und Senken, unterteilt werden. Der Detaillierungsgrad wird so gewählt, dass das Umfeld der APU ausreichend genau dargestellt wird. Eine Detaillierung bis zur Komponente *Radio* ist dabei nicht notwendig. In Bild 2.2 ist das Ergebnis abgebildet.

Zwischen den Prozesselementen können Leistungen einer Energieform ausgetauscht werden. Bild 2.2 beinhaltet chemische (Kraftstoff), mechanische, elektrische und thermische Energieformen. Innerhalb einer Energieform können unterschiedliche Potenziale und Ausprägungen auftreten, z.B. kann elektrische Leistung auf verschiedenen Spannungsebenen vorliegen.

Im folgenden werden die Hauptkomponenten näher beschrieben.

#### 2.1.1 Quellen

Die Energiequelle stellt Energie für das Fahrzeug zur Verfügung. Sie hat meist einen endlichen Energieinhalt und muss von außerhalb der Systemgrenzen wieder aufgeladen



**Bild 2.2:** Abstrahierte Darstellung der Energieflüsse im Kraftfahrzeug

werden. Beim heutigen Fahrzeug besteht die Energiequelle aus Kraftstoff (Benzin, Diesel, Wasserstoff, Erdgas, Methanol, o.ä.). Der Kraftstoff wird im Tank gespeichert und muss regelmäßig an einer Tankstelle nachgefüllt werden. Weitere mögliche Energiequellen sind elektrischer Strom, der extern zugeführt wird oder Sonnenenergie, die über ein im Dach integriertes Photovoltaik-Modul genutzt wird. Wenn Fahrzeugkonzepte mit verschiedenen Energiequellen, z.B. Benzin und Wasserstoff, miteinander verglichen werden sollen, muss auch der Aufwand der Energiebereitstellung mit berücksichtigt werden. In dieser Arbeit werden nur Benzin und Diesel als Energiequelle betrachtet. Innerhalb eines Vergleichs wird immer von der gleichen Energiequelle ausgegangen. Innerhalb eines Subsystems, z.B. dem elektrischen Energiebordnetz, können ebenfalls Quellen definiert werden, z.B. der Generator als Stromquelle.

### 2.1.2 Wandler

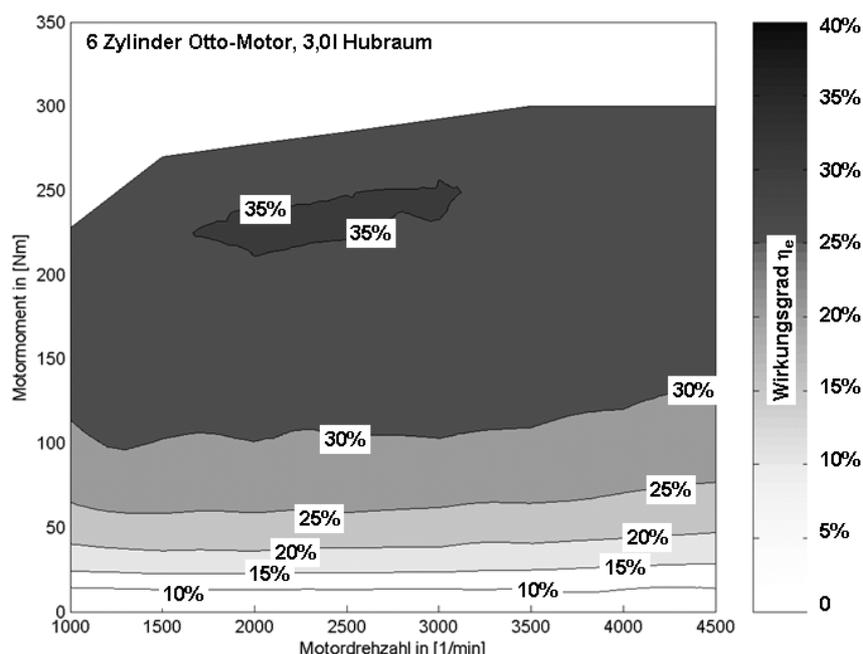
Energiewandler konvertieren eine Energieform in eine andere. Es gibt Wandler, die nur in eine Richtung arbeiten (unidirektional, z.B. Verbrennungsmotor), sowie Wandler, die bidirektional betrieben werden, z.B. eine E-Maschine mit generatorischem und motorischem Betrieb. Während ein idealer Wandler nur die Energieform ändert, muss beim realen Wandler auch ein Energieverlust berücksichtigt werden. Das heißt, der Energiewandler beinhaltet eine Energiesenke. Diese tritt meist in Form von Verlustwärme auf, ist jedoch auch in anderer Form denkbar, z.B. als Kraftstoffschlupf. Die Güte des Wandlers wird durch den Wirkungsgrad ausgedrückt. Im folgenden werden verschiedene Energiewandler beschrieben. Die APU, die ebenfalls ein Energiewandler ist, wird weiter unten im Kapitel 2.2 ausführlich behandelt.

#### Verbrennungsmotor

Der Verbrennungsmotor wandelt im Kraftstoff gebundene chemische Energie in mechanische Energie und in Wärme um. Die mechanische Leistung wird über die Kurbelwelle an den Antrieb geleitet. Ein Teil der mechanischen Leistung des Verbrennungsmotors geht über den Keilriemen an die Nebenaggregate. Die Wärme wird über das Abgas sowie über

das Kühlwasser abgeführt. Die in das Kühlwasser übertragene thermische Energie wird zum Teil noch für Heizzwecke genutzt. Bei einem negativen Antriebsmoment fungiert der Motor als Bremse. Durch die rotatorischen Massen und die hohe thermische Masse hat der Verbrennungsmotor zusätzlich Eigenschaften eines Speicher-Prozesselements.

Noch nicht berücksichtigt ist, dass der Verbrennungsmotor zum Betrieb mit elektrischem Strom versorgt werden muss. Dieser elektrische Energiebedarf wird hier vom Verbrennungsmotor getrennt in Kombination mit den anderen elektrischen Verbrauchern betrachtet.



**Bild 2.3:** Gemessenes Wirkungsgradkennfeld eines Verbrennungsmotors (Muscheldiagramm), inklusive Nebenaggregaten, außer Generator und Klimakompressor

In Bild 2.3 ist das Wirkungsgradkennfeld eines Verbrennungsmotors dargestellt. Das Kennfeld beschreibt den „Nutzwirkungsgrad“  $\eta_e$ <sup>11</sup> [32].

$$\eta_e = W_e / W_B \quad (2.1)$$

$W_e$  ist die an der Kurbelwelle effektiv verfügbare Arbeit.  $W_B$  ist der Arbeitsinhalt des zugeführten Kraftstoffs.

Der Nutzwirkungsgrad setzt sich aus verschiedenen Teilwirkungsgraden zusammen [32]:

$$\eta_e = \eta_B \cdot \eta_i \cdot \eta_m \quad (2.2)$$

- Der Brennstoffumsetzungsgrad  $\eta_B$  berücksichtigt den Kraftstoffanteil, der nicht innerhalb des Verbrennungsmotors verbrannt wird.

<sup>11</sup>Der Index  $e$  steht für *effektiv*.

- Der indizierte Wirkungsgrad  $\eta_i$  beschreibt das Verhältnis von Arbeit an den Kolben (indizierte Arbeit  $W_i$ ) zu der bereits oben verwendeten chemischen Kraftstoffenergie  $W_B$  (Gleichung 2.3). Die indizierte Arbeit ergibt sich aus den Mitteldrücken  $p_m$  an den Kolben und dem Hubraum  $V_H$ , siehe Gleichung 2.4 [33].  $z$  ist die Zylinderanzahl,  $n$  die Drehzahl und  $i$  ein Faktor, der beim Zweitaktmotor 1, beim Viertaktmotor 0,5 beträgt <sup>12</sup>.

$$\eta_i = W_i/W_B \quad (2.3)$$

$$W_i = \int p_m \cdot V_H \cdot z \cdot n \cdot i \, dt \quad (2.4)$$

Der indizierte Wirkungsgrad kann weiterhin in einen thermischen Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  und einen Gütegrad  $\eta_g$  unterteilt werden. Der thermische Wirkungsgrad ist abhängig vom zugrundeliegenden Kreisprozess und dem Verdichtungsverhältnis. Der Gütegrad berücksichtigt Abweichungen des realen Kreisprozesses vom theoretischen Vergleichsleichraumprozess.

- Laut [32] erfasst der mechanische Wirkungsgrad  $\eta_m$  „die mechanischen Verluste, insbesondere die Reibungsverluste vom Triebwerk und den Steuerorganen für den Gaswechsel, von Öl- und Wasserpumpe, Kraftstoff-Förderpumpe, Generator usw.“. Diese Definition wird hier leicht abgeändert. Der Generator wird außerhalb der Systemgrenzen platziert. Er wird nicht im mechanischen Wirkungsgrad berücksichtigt, da er in den folgenden Untersuchungen teilweise komplett durch eine APU ersetzt werden soll. Der Generator wurde dementsprechend aus dem Motorkennfeld herausgerechnet.

Für die weiteren Betrachtungen reicht es aus, den Nutzwirkungsgrad des Verbrennungsmotors heranzuziehen. Wie man im Kennfeld (Bild 2.3) sieht, ist er stark abhängig vom Motormoment. Den besten Wirkungsgrad erreicht der abgebildete Motor bei ca. 240 Nm und einer Drehzahl von 2000  $min^{-1}$ . Dies entspricht einer Motorleistung von ca. 50 kW. Im Teillastbereich steigt der spezifische Kraftstoffverbrauch stark an. Interessant ist eine Umrechnung des „Muscheldiagramm“-Kennfelds nach dem Willans-Ansatz [34]. Hier wird der absolute Kraftstoffverbrauch über der Nutzleistung des Verbrennungsmotors bei verschiedenen konstanten Drehzahlen aufgetragen, siehe Bild 2.4.

Man sieht, dass die Linien konstanter Drehzahl über große Bereiche weitgehend linear sind. Das heißt, ausgehend von einem beliebigen Arbeitspunkt nimmt bei gleichbleibender Drehzahl der Kraftstoffverbrauch bei Mehrbelastung linear zu. Außerdem fällt auf, dass die einzelnen Drehzahllinien annähernd parallel verlaufen. Das heißt, bei einer Mehrbelastung des Motors von z.B. 5 kW, ausgehend von einer Grundmotorleistung von z.B. 50 kW, nimmt der zusätzliche Kraftstoffverbrauch unabhängig von der Drehzahl im gleichen Maße zu. Sowohl bei einer Drehzahl von 4400  $min^{-1}$  als auch bei einer Drehzahl von 5600  $min^{-1}$  beträgt der Mehrverbrauch bei den beschriebenen Beispielzahlen ca. 0,3 g/s. Trotzdem ist der absolute Kraftstoffverbrauch bei einer höheren Drehzahl größer, obwohl die selbe Motorleistung vorliegt. Das liegt am Grundverbrauch des Motors. Die Linien in Bild 2.4 gehen nicht durch den Koordinatenursprung, sondern schneiden die y-Achse

<sup>12</sup>Faktor 0,5, da nur bei jedem zweiten Hub eine Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemischs erfolgt.

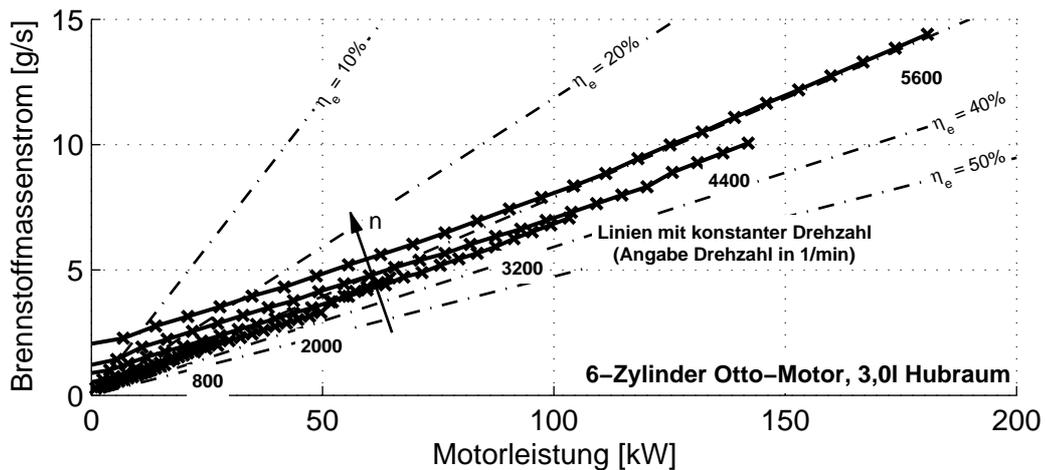


Bild 2.4: Darstellung des Motorkennfelds als Willans-Kennlinien

oberhalb. Der Schnittpunkt mit der y-Achse stellt den Leerlaufverbrauch des Verbrennungsmotors dar. Je höher die Drehzahl, desto höher ist der Wert des Leerlaufverbrauchs. Man sieht also, dass sich der Gesamtkraftstoffverbrauch aus zwei Teilverbräuchen zusammensetzt. Zum einen liegt eine drehzahlabhängige Grundbelastung vor, die unabhängig von der abgefragten Motorleistung zu einem drehzahlabhängigen Grundverbrauch führt. Zum anderen liegt ein drehzahlunabhängiger Verbrauchsanteil vor, der sich weitgehend direkt proportional zur Motorleistung verhält. Erst in der Nähe des maximalen Drehmoments nimmt der Kraftstoffverbrauch überproportional zu, was in erster Linie mit der Anfettung des Kraftstoff-Luft-Gemischs in diesem Bereich zusammenhängt.

Das proportionale Verhalten des drehzahlunabhängigen Verbrauchsanteils kann genutzt werden, um neben dem bestehenden Nutzwirkungsgrad  $\eta_e$  einen differentiellen Wirkungsgrad  $\eta_{diff}$  zu definieren. Zur besseren Verständlichkeit wird aus Bild 2.4 die Linie bei der Drehzahl  $2000 \text{ min}^{-1}$  extrahiert und in Bild 2.5 vergrößert dargestellt.

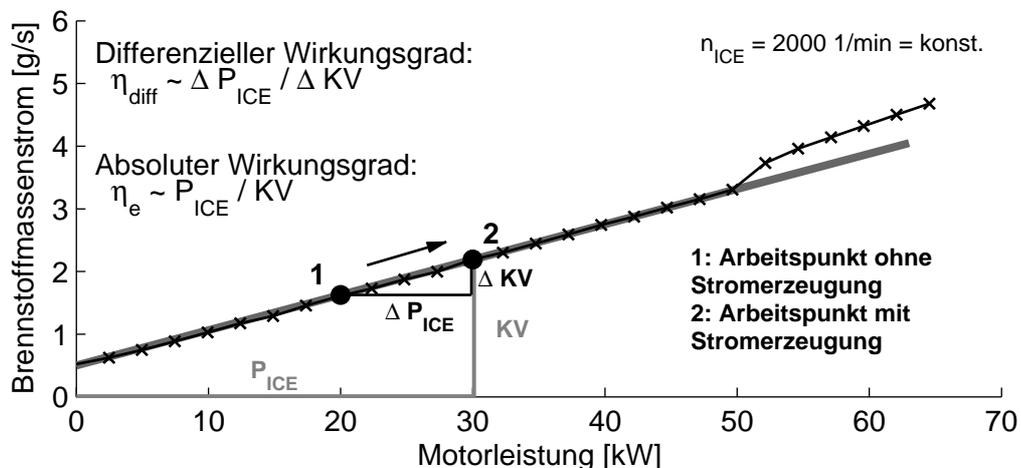


Bild 2.5: Berechnung des differentiellen Wirkungsgrads

Auf der Drehzahllinie sind zwei Punkte eingezeichnet. Punkt 1 soll einen beliebigen Ar-

beitspunkt im Motorkennfeld darstellen, wobei die Stromerzeugung über den Generator hier noch nicht berücksichtigt ist. Fahrzeuggeschwindigkeit und eingelegerter Gang bestimmen die Motordrehzahl. Die Motorleistung hängt von der Antriebsleistung sowie der Leistung der Nebenaggregate ab. Wenn nun eine zusätzliche Motorleistung angefordert wird, z.B. durch die Stromerzeugung per Generator, verschiebt sich der Arbeitspunkt von Punkt 1 auf Punkt 2, hier von  $20\text{ kW}$  auf  $30\text{ kW}$ <sup>13</sup>. Der Nutzwirkungsgrad  $\eta_e$  im Punkt 2 berechnet sich aus der Motorleistung  $P_{ICE}$ , dividiert durch die chemische Leistung des Gesamtkraftstoffverbrauchs  $KV$ . Im Beispiel in Bild 2.5 beträgt er 32%. Dieser Wert sagt etwas über die Effizienz des Verbrennungsmotors aus. Er eignet sich jedoch nicht für die Bewertung der Güte der Stromerzeugung. Hier kommt der differenzielle Wirkungsgrad  $\eta_{diff}$  zum Einsatz. Er wird aus dem Verhältnis von zusätzlicher Motorleistung zu zusätzlicher Kraftstoffleistung gebildet. Beim betrachteten Motor wird eine Steigung von ca.  $2,5\text{ kW}$  Kraftstoffleistung pro  $1\text{ kW}$  Nutzleistung ermittelt. Dies entspricht einem differentiellen Wirkungsgrad von 40% oder einem Verbrauch von  $0,275\text{ l/kWh}$ . Der Unterschied zwischen differentiellen Wirkungsgrad  $\eta_{diff}$  und absolutem Wirkungsgrad  $\eta_e$  steigt mit zunehmender Drehzahl aufgrund der größer werdenden Grundlast.

Wie oben bereits aufgezeigt wurde, ist der differenzielle Wirkungsgrad über große Bereiche des Motorkennfelds konstant. Des weiteren kann der Wert sogar näherungsweise auf andere Motoren übertragen werden. Schmidt [31] hat Werte von  $0,256\text{ l/kWh}$  für Benzinmotoren und  $0,199\text{ l/kWh}$  für Dieselmotoren ermittelt.

Vor allem bei der Potenzialbestimmung einer APU ist der differenzielle Wirkungsgrad interessant, da bei der Integration einer APU ins Fahrzeug der Verbrennungsmotor nicht entfällt, sondern nur die Nutzleistung des Motors beeinflusst wird. Neben der Betrachtung der Stromerzeugung kann der differenzielle Wirkungsgrad auch bei der Berechnung des Mehrverbrauchs durch eine höhere Antriebsleistung, z.B. durch Zusatzgewicht, oder durch eine Erhöhung der Motorleistung durch andere Nebenaggregate wie den Klimakompressor verwendet werden.

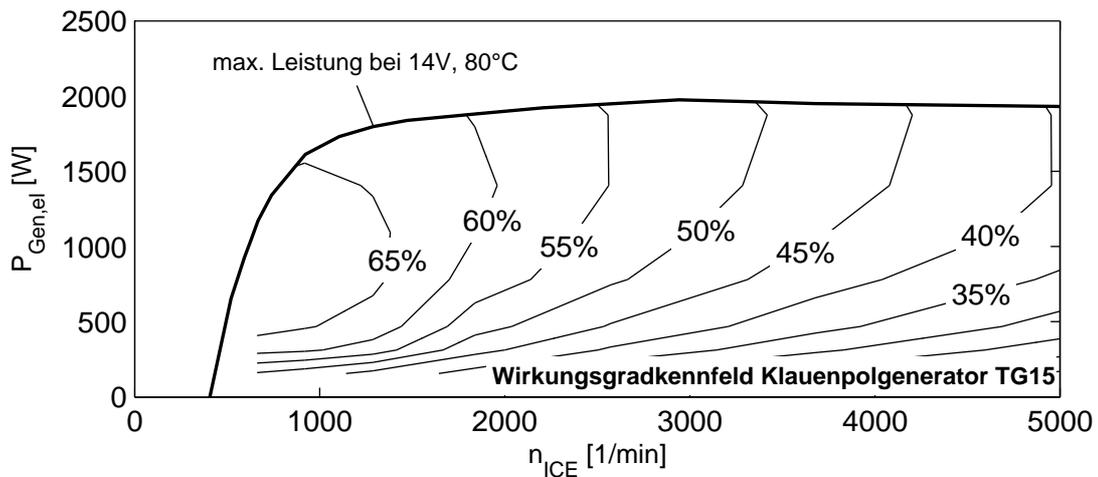
### Generator / E-Maschine

Der Generator erzeugt aus mechanischer Leistung elektrische Leistung. Er ist über den Riementrieb mit dem Verbrennungsmotor verbunden und damit direkt von der Drehzahl des Verbrennungsmotors abhängig. Im Pkw-Bereich liegen typische Übersetzungen im Bereich zwischen  $1 : 2$  und  $1 : 3$  [32].

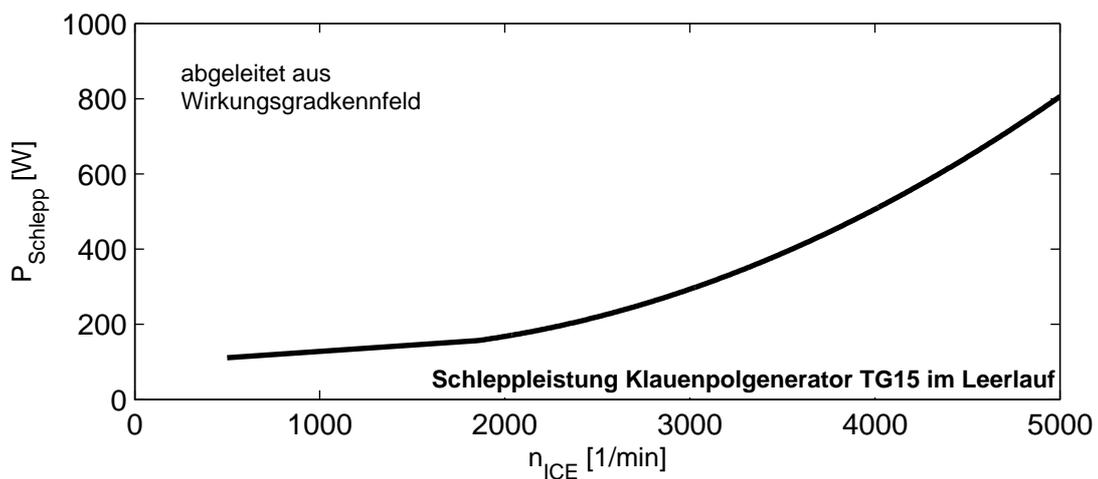
In Bild 2.6 ist das Wirkungsgradkennfeld eines Generators abgebildet. Man sieht, dass der Wirkungsgrad sowohl strom- als auch drehzahlabhängig ist. Bei sehr hohen Drehzahlen nimmt der Generatorwirkungsgrad ab. Dies wird durch die steigenden mechanischen Verluste durch Luft- (Lüfter) und Lagerreibung verursacht. Die Leerlaufleistung bei entregtem Generator wurde aus dem Wirkungsgradkennfeld abgeleitet. Sie ist in Bild 2.7 dargestellt. Ausführungen in [32] bestätigen die starke Zunahme der mechanischen Verluste bei steigender Drehzahl.

Alle Kennlinien und Kennfelder gelten für einen Generator bei einer Betriebstemperatur von  $80^\circ\text{C}$ . Ein kalter Generator hat prinzipiell einen höheren Wirkungsgrad. Fahrversuche mit einer durchschnittlichen Generatorbelastung haben ergeben, dass die Generatortem-

<sup>13</sup>Beispielwert, Leistungserhöhung durch Stromerzeugung bei heutigen Fahrzeugen wesentlich geringer.



**Bild 2.6:** Wirkungsgradkennfeld eines Klauenpolgenerators (Übersetzung  $\frac{n_{\text{Gen}}}{n_{\text{ICE}}} = 2,72$ )



**Bild 2.7:** Schleppmomentverluste eines Klauenpolgenerators im Leerlauf

peratur sehr schnell die Betriebstemperatur erreicht<sup>14</sup>, so dass keine Temperaturabhängigkeit berücksichtigt wird.

Neben dem reinen Generator für die Stromerzeugung werden elektrische Maschinen entwickelt, die auch motorisch genutzt werden können. Dabei gibt es unterschiedlichste Konzepte, angefangen von riemengetriebenen Starter-Generatoren bis hin zu Hybridantrieben. Bei Hybridantrieben werden „aufgrund der besseren Wirkungsgrade [gegenüber Gleichstrommaschinen] heute fast ausschließlich Drehstrommotoren sowohl in asynchroner als auch synchroner Bauart eingesetzt.“ Permanent erregte Maschinen weisen einen besonders hohen Wirkungsgrad auf. Die eingesetzten Magnete sind jedoch sehr teuer [35].

<sup>14</sup>Bei Versuchen mit einem BMW 330i stieg die Generatortemperatur innerhalb von ca. 250 s von 22°C auf 80°C.

### Standheizung / Zuheizter

Die Standheizung ist eine vom Verbrennungsmotor unabhängige Wärmequelle. Sie kann bereits vor Motorstart für einen vorgewärmten Fahrgastraum sorgen. Die Standheizung wandelt die Energie aus dem Kraftstoff direkt in thermische Energie um. In Personenkraftwagen ist die Standheizung meist in den bestehenden Kühl-Heiz-Kreislauf integriert. Die Wärme wird über das Kühlmittel zum Innenraumgebläse transportiert. Dort wird die Wärme über einen Wasser-Luft-Wärmeübertrager an die Gebläseluft abgegeben. Damit die Standheizung unabhängig vom Verbrennungsmotor betrieben werden kann, wird in den Wasserkreislauf eine vom Motor unabhängige elektrische Pumpe integriert.

Ein thermischer Zuheizter entspricht weitgehend einer Standheizung. Er dient als zusätzliche Heizquelle während der Fahrt und wird vor allem bei Fahrzeugen mit Dieselmotor eingesetzt. Die verbrauchsgünstigen Dieselmotoren erzeugen relativ wenig Abwärme, so dass bei manchen Fahrzeugen nur mit Zuheizter die Komfortansprüche erfüllt werden können. Der Unterschied zur Standheizung ist, dass meist die zusätzliche elektrische Wasserpumpe fehlt, da der Zuheizter nur bei laufendem Motor betrieben wird.

Bei PKWs werden Brenner mit einer Heizleistung bis zu  $5\text{ kW}$  verwendet [36]. Der Wirkungsgrad beträgt ca.  $80\%$ <sup>15</sup>. Die Verluste entstehen beim Wärmetauschprozess von heißem Brennerabgas auf das Kühlwasser.

Da der Wasserkreislauf eine große thermische Masse darstellt, dauert es einige Zeit, bis eine Standheizung ihre volle Wirkung im Innenraum entfaltet. Durch Abtrennung des Heizungskreislaufs vom Motorkreislauf durch Ventile versucht man das Volumen und damit die thermische Masse des Kühlmittels gering zu halten.

### Elektrischer Zuheizter (PTC)

Anstelle eines Kraftstoff-Zuheizers werden zunehmend elektrische PTC<sup>16</sup>-Luftheizer verbaut. Die PTC-Heizer sind meist in der Fahrzeuglüftung integriert. Sie wandeln elektrische Energie in Wärme. Die Wärme wird über die Gebläseluft direkt in den Fahrgastraum geführt. Der PTC-Zuheizer ist sehr effizient, da die Wärme sehr schnell in den Innenraum gelangt. Die thermischen Massen sind sehr gering, Wärmeverluste gibt es aufgrund der kurzen Wärmetransportwege kaum und selbst die Wärmeverluste der integrierten Elektronik werden zum Heizen verwendet. Allerdings muss die benötigte elektrische Leistung aus Kraftstoff erzeugt werden. Der effektive Wirkungsgrad (chemisch nach thermisch) liegt deshalb weit unter dem des Kraftstoff-Zuheizers. Der Vorteil von PTCs liegt also weniger beim geringen Kraftstoffverbrauch, als beim schnellen Ansprechen.

Beim Vergleich zwischen Kraftstoff-Zuheizern und PTCs darf also nicht nur der Kraftstoffverbrauch betrachtet werden. Auch der Komfortunterschied muss in die Bewertung mit einfließen, auch wenn eine Quantifizierung oft schwierig ist.

### Verdichter

Die Fahrzeugklimatisierung arbeitet mit einem Verdichter. Er nutzt die mechanische Leistung des Verbrennungsmotors zur Komprimierung des Kältemittels. Neben dem mechanischen Verdichter ist auch ein Verdichter mit elektrischem Antrieb möglich. Beim Vergleich

<sup>15</sup>Der Kraftstoffverbrauch (Benzin) bei  $5\text{ kW}$  Heizleistung beträgt  $0,69\text{ l/h}$  [36].

<sup>16</sup>Funktionskeramik mit „Positive Temperature Coefficient“ [37]

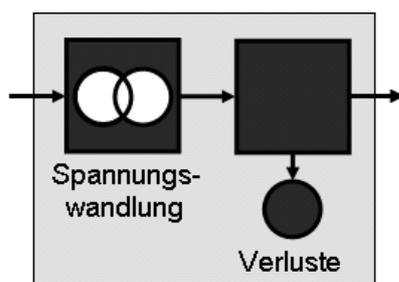
von mechanischer und elektrischer Klimaanlage ist zu berücksichtigen, dass der Verdichter heute eine vom Verbrennungsmotor aufgeprägte Drehzahl hat. Die Drehzahl des elektrisch angetriebenen Verdichters kann frei eingestellt werden. Des weiteren liegen eventuell unterschiedliche Bauformen vor. Bei mechanischen Verdichtern werden heute meist Taumelscheibenverdichter eingesetzt, für elektrische Verdichter bieten sich eher Spiralverdichter an [38].

### 2.1.3 Übertrager

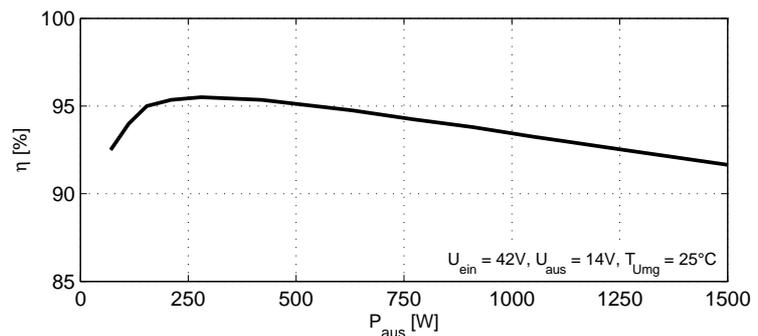
Nach der Definition von Schmidt [31] nehmen Übertrager „am Eingang eine Quantität auf und geben gleichzeitig am Ausgang eine Quantität wieder ab. Es kann keine Quantität gespeichert werden, weshalb beide Quantitäten bei einem idealen und somit verlustfreien Übertrager zu jedem Zeitpunkt gleich sein müssen.“ Die Energieform ändert sich dabei nicht. Reale Übertrager beinhalten eine Energiesenke in Form von Verlusten.

#### DC/DC-Wandler

Ein Beispiel für einen Übertrager ist ein DC/DC-Wandler. Er kann zwei Bordnetzbereiche mit unterschiedlichen Spannungsniveaus verbinden. Ein DC/DC-Wandler kann sowohl uni- als auch bidirektional ausgelegt werden. In dieser Arbeit wird ein unidirektionaler DC/DC-Wandler zur Einbindung einer APU ins Bordnetz benötigt. Das Subsystem DC/DC-Wandler ist in Bild 2.8 (a) dargestellt. Es ist aus den Prozesselementen „Übertrager“ und „Senke“ aufgebaut. Das Prozesselement Senke wird im nächsten Abschnitt noch beschrieben. Es berücksichtigt die Wirkungsgradverluste des realen DC/DC-Wandlers. In Bild 2.8 (b) ist der Wirkungsgradverlauf des betrachteten DC/DC-Wandlers abgebildet. Die maximale Leistung beträgt 1,5 kW.



(a) Subsystem



(b) Wirkungsgradkennlinie

**Bild 2.8:** DC/DC-Wandler: Das Wirkungsgradkennfeld basiert auf der Vermessung eines 1 kW-Wandlers der Firma Hella, skaliert auf 1,5 kW Maximalleistung.

### 2.1.4 Senken

„Eine Senke ist ein Prozesselement, das nur über einen Eingang, nicht aber über einen Ausgang verfügt.“ [31]. Schmidt unterscheidet nicht zwischen Energieverlusten und Ver-

brauchern. Energieverluste wurden bei den anderen Prozesselementen bereits angesprochen. Sie tauchen bei jedem realen Prozess auf und können meist durch die Angabe von Wirkungsgraden beschrieben werden. Energieverbraucher sind die „Endnutzer“ der Energie. Sie nutzen die Energie z.B. zur Überwindung des Fahrtwiderstands oder zur Erzeugung von Schallwellen.

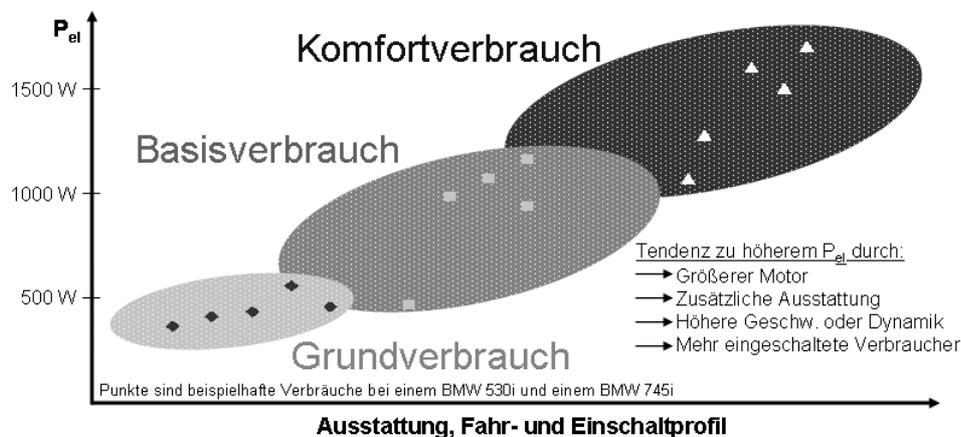
Damit nicht alle Energieverbraucher einzeln betrachtet werden müssen, werden sie zu mehreren großen Gruppen zusammengefasst:

### Elektrische Verbraucher

Die elektrischen Energiesenken können in Grundverbraucher, Basisverbraucher und Komfortverbraucher eingeteilt werden.

- Die **Grundverbraucher** sind immer an. Der Fahrer hat keinen direkten Einfluss auf die Höhe des Verbrauchs. Trotzdem kann die Höhe variieren, z.B. verbraucht der Variable-Ventil-Trieb (VVT) bei BMW-Benzinmotoren bei dynamischer Fahrweise mehr Energie als bei konstanter Autobahnfahrt.
- **Basisverbraucher** sind in jedem Fahrzeug verbaut. Es handelt sich um das Licht, den Scheibenwischer oder andere Systeme, die zum sicheren Betrieb eines Fahrzeugs notwendig sind. Der Fahrer schaltet diese Verbraucher bei Bedarf gezielt ein.
- Die **Komfortverbraucher** dienen zur Steigerung des Wohlbefindens und werden wie die Basisverbraucher nur bei Bedarf eingeschaltet. Viele Komfortverbraucher, z.B. die Sitzheizung, sind nicht serienmäßig im Fahrzeug verbaut.

Während die Grundverbraucher für ein Fahrzeug relativ exakt angegeben werden können, variieren die Basisverbraucher und vor allem die Komfortverbraucher stark, je nach Fahrzustand, äußeren Einflüssen (Temperatur, Helligkeit) und subjektivem Einschaltverhalten des Fahrers. Einen Überblick über den mittleren elektrischen Leistungsbedarf im Fahrzeug gibt Bild 2.9.



**Bild 2.9:** Größenordnung des elektrischen Leistungsbedarfs im Fahrzeug

Im Bild sind verschiedene Punkte aufgeführt, die zu einem höheren Leistungsbedarf führen. Interessanter Weise ist die Höhe des elektrischen Leistungsbedarfs kaum von der

Fahrzeuggröße abhängig. Ein BMW der 7er Baureihe verbraucht nahezu die selbe elektrische Leistung wie ein Fahrzeug der 5er Baureihe. Allerdings besteht ein indirekter Einfluss, da größere Fahrzeuge meist besser ausgestattet sind und größere Motoren verbaut haben. Eine Fokussierung auf beispielhafte elektrische Leistungsprofile erfolgt in Kapitel 3.1.

Die elektrischen Verbraucher sind auch vom Verbau einer APU abhängig. Zum einen stellt die APU während der Startup-Phase einen elektrischen Verbraucher dar, siehe Kapitel 2.2. Zum anderen beeinflusst die APU die Bordnetzspannung, was wiederum indirekt die Höhe des elektrischen Energiebedarfs beeinflusst, siehe Kapitel 4.

### Mechanische Verbraucher

Die größten mechanischen Verbraucher bzw. Energiesenken sind die Fahrwiderstände Rollreibung  $F_R$  (Gleichung 2.5) und Luftwiderstand  $F_L$  (Gleichung 2.6). Zusätzlich geht Energie im Antriebsstrang durch Reibung, z.B. im Getriebe, verloren. Ein letzter Punkt sind die Bremsverluste an der Motorbremse und der mechanischen Bremse.

$$F_R = m_{Fzg} \cdot g \cdot f_R \cdot \cos(\alpha) \quad (2.5)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_w \cdot A \cdot v^2 \quad (2.6)$$

Wie in Gleichung 2.5 zu sehen ist, geht die Fahrzeugmasse  $m_{Fzg}$  in die Rollreibung ein. Da die APU ein zusätzliches Gewicht darstellt, muss bei der Rollreibung zwischen Fahrzeugen mit und ohne APU unterschieden werden.

Neben den elektrischen und mechanischen Energiesenken kann man noch thermische, hydraulische und pneumatische Energiesenken definieren. Eine thermische Energiesenke kann z.B. der Innenraum darstellen. Da diese Energiesenken unabhängig vom Einsatz einer APU sind, ist keine genauere Betrachtung notwendig. Wichtig ist, dass die Energieströme zu diesen Energiesenken, z.B. die Wärmezufuhr zum Innenraum, bei allen vergleichenden Betrachtungen gleich sind.

### 2.1.5 Speicher

Als letztes Prozesselement soll hier der Energiespeicher aufgeführt werden. Wie der Name bereits sagt, speichert er Energie zwischen, ohne sie zu verbrauchen. Er nimmt zu einem Zeitpunkt Energie auf und gibt zu einem späteren Zeitpunkt wieder Energie ab. Während der ideale Energiespeicher die komplette aufgenommene Energie wieder abgeben kann, ist der reale Speicher verlustbehaftet. Zum einen wandelt er beim Laden und Entladen Energie in Wärme um. Zum anderen treten meist auch Verluste durch eine Selbstentladung auf. Ein Energiespeicher kann im Normalfall nur eine Energieform speichern.

Für die Zwischenspeicherung elektrischer Energie sind folgende Speicher interessant:

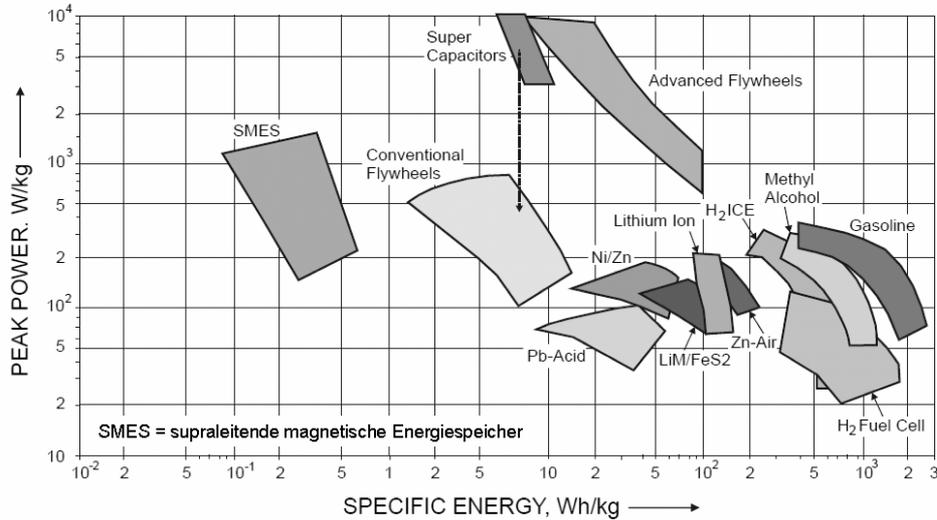
- **Batterie:** Im heutigen Fahrzeug ist im Normalfall ein Bleiakkumulator verbaut. Für Hybridfahrzeuge werden heute bereits Nickel-Metalhydrid-Akkumulatoren eingesetzt. Parallel werden Lithiumionenakkumulatoren entwickelt. Batterien weisen eine relativ große Speicherkapazität auf. Die Leistung ist jedoch, vor allem bei Starterbatterien, beschränkt.

- **Supercap:** Der Supercap, auch Ultracap oder Doppelschichtkondensator genannt, ist eine interessante Ergänzung oder eventuell sogar Alternative zur Batterie. Er hat einen relativ kleinen volumetrischen Speicherinhalt, dafür eine hohe Leistungsfähigkeit.

$$E_{SC} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_{max}^2 - U_{min}^2) \quad (2.7)$$

Der Energieinhalt  $E_{SC}$  des Supercaps hängt unmittelbar mit der Spannung zusammen. Er definiert sich nach Gleichung 2.7. Damit ein möglichst großer Energieinhalt genutzt werden kann, muss die Spannung stark variiert werden. Das heißt, der Supercap kann nicht ohne weiteres wie eine heutige Starterbatterie ins Fahrzeug integriert werden.

Im Ragone-Diagramm in Bild 2.10 wird deutlich, dass der Supercap gegenüber Batterien eine deutlich höhere spezifische Leistung hat, allerdings nur einen geringen Energieinhalt aufweist.



**Bild 2.10:** Ragone Diagramm: Vergleich verschiedener Energiespeichersysteme [39]

Die Zwischenspeicherung mechanischer Energie kann z.B. mit einem Schwungrad oder einer Torsionsfeder erfolgen [40]. Aber auch die Fahrzeugmasse und die rotierenden Massen speichern mechanische Energie. In erster Linie ist das kinetische Energie ( $E_{kin}$ , Gleichung 2.8), die durch die Beschleunigung des Fahrzeugs und der rotierenden Teile im Antriebsstrang aufgebaut wird. Bei Änderungen der Höhe, vor allem bei Bergfahrten, wird aber auch potenzielle Energie ( $E_{pot}$ , Gleichung 2.9) gespeichert. Zur Bestimmung der potenziellen Energie muss ein Bezugsniveau gewählt werden. Bei Unterschreiten des Bezugsniveaus wird die potenzielle Energie negativ. Die kinetische Energie kann nie negativ werden. Der Massefaktor  $e$  in Gleichung 2.8 berücksichtigt die rotatorischen Massen.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot e \cdot m_{Fzg} \cdot v^2 \quad \text{mit} \quad e = 1 + \frac{\sum J}{m_{Fzg} \cdot r^2} \quad (2.8)$$

$$E_{pot} = m_{Fzg} \cdot g \cdot (h - h_{Bezug}) \quad (2.9)$$

Die kinetische Energie ist als Speicher im Bild 2.2 mit berücksichtigt. Sie spielt eine große Rolle, wenn der Generator aus kinetischer Energie elektrische Energie erzeugt. Höhenunterschiede und damit potenzielle Energien werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

## 2.2 Brennstoffzellen-APU

Die Brennstoffzellen-APU (**A**uxiliary **P**ower **U**nit) ist eine Hilfsstromquelle, die neben dem Generator elektrische Leistung erzeugt.

### 2.2.1 Grundlagen der Brennstoffzelle

Brennstoffzellen zeichnen sich dadurch aus, dass sie die im Brenngas gebundene chemische Energie über einen elektrochemischen Prozess direkt in elektrische Energie und Wärme wandeln. Eine Brennstoffzelle besteht aus einer Anode und einer Kathode, die durch einen Elektrolyten voneinander getrennt sind. Das Brenngas wird kontinuierlich von außen zugeführt.

#### Brennstoffzellen-Typen

Es gibt verschiedene Arten von Brennstoffzellen. In erster Linie werden sie anhand des verwendeten Elektrolyten in Gruppen eingeteilt, siehe Tabelle 2.1. Die Brennstoffzellentypen unterscheiden sich vor allem durch den Ladungsträger des Elektrolyten, sowie durch unterschiedliche Betriebstemperaturen.

	<b>AFC</b> (Alkaline)	<b>PEMFC</b> (Polymer Electro- lyte Membrane)	<b>DMFC</b> (Direct- Methanol)	<b>PAFC</b> (Phosphoric Acid)	<b>MCFC</b> (Molten Carbonate)	<b>SOFC</b> (Solid Oxide)
Ladungsträger	$OH^-$	$H^+$	$H^+$	$H^+$	$CO_3^{2-}$	$O^{2-}$
Brennstoff <sup>1</sup>	$H_2$	$H_2$	$CH_3OH$	$H_2$	$H_2, CO, CH_4$ <sup>2</sup>	$H_2, CO, CH_4$
Katalysator	Platin	Platin	Platin	Platin	Nickel	Perowskit <sup>3</sup>
Betriebstemp.	$< 100^\circ C$	$60 - 120^\circ C$	$60 - 120^\circ C$	$160 - 220^\circ C$	$600 - 800^\circ C$	$700 - 1000^\circ C$
Anwendungen	Verkehr, Raumfahrt, Militär, Hausenergieversorgung, portable elektr. u. elektron. Geräte			dezentrale stationäre Kraft- Wärme-Kopplung		Verkehr (APU)

<sup>1</sup> direkt der Zelle zugeführt

<sup>2</sup>  $CH_4$  bei interner Reformierung

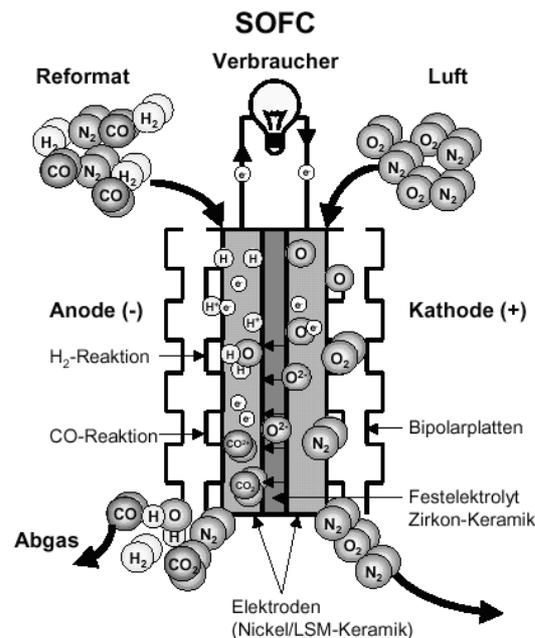
<sup>3</sup> Perowskit =  $CaTiO_3$ , an der Anode wird auch Nickel verwendet

**Tabelle 2.1:** Verschiedene Brennstoffzellentypen sowie ihre Eigenschaften und Anwendungsgebiete, adaptiert von [41, 42]

#### Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)

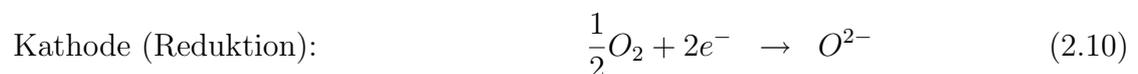
In dieser Arbeit soll in erster Linie eine Oxidkeramische Brennstoffzelle, eine sogenannte **SOFC** (**S**olid **O**xide **F**uel **C**ell), betrachtet werden. Die SOFC muss auf eine sehr hohe Betriebstemperatur von  $700^\circ C$  bis  $800^\circ C$  gebracht werden, da nur bei hoher Temperatur

der keramische Elektrolyt eine ausreichende Ionenleitfähigkeit besitzt. Bei der SOFC kann sowohl Wasserstoff ( $H_2$ ) als auch Kohlenmonoxid ( $CO$ ) und Methan ( $CH_4$ ) als Brenngas verwendet werden. Die Brenngase werden an der Anode zugeführt, siehe Bild 2.11. An der Kathode wird Sauerstoff zugeführt. Dabei kann bei der SOFC sowohl reiner Sauerstoff als auch Luft verwendet werden. Im Fahrzeug ist es wichtig, Luftsauerstoff verwenden zu können, da reiner Sauerstoff separat mitgeführt werden müsste.

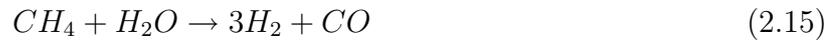


**Bild 2.11:** Prozesse in der Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) [43]

An der Kathode wird der Sauerstoff reduziert, siehe Gleichung 2.10. Die Sauerstoffionen wandern durch den Elektrolyten zur Anode. Dort werden die Brenngase oxidiert, siehe Gleichung 2.11 und 2.12. Die bei der Oxidation frei werdenden Elektronen können nicht durch den Elektrolyten wandern, da es sich um ein elektronisch nichtleitendes Material handelt. Sie werden über einen externen Stromkreis zur Kathode geführt. Dabei verrichten sie beim angeschlossenen Verbraucher Arbeit.



Bevorzugt wird an der Elektrode Wasserstoff oxidiert. Kohlenmonoxid wird meist nicht direkt oxidiert, sondern über die Shift-Reaktion in Gleichung 2.14 in Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt. Diese Reaktion läuft von der Kinetik her schneller ab, als die direkte Oxidation an der Elektrode. Das selbe gilt für Methan ( $CH_4$ ), siehe Gleichung 2.15, das oft in geringen Mengen ebenfalls im Brenngas enthalten ist [41].



### Maximales Wirkungsgradpotenzial

Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle im stationären Betrieb berechnet sich aus der elektrischen Arbeit  $W_{el}$  dividiert durch die Änderung der im Brenngas gebundenen chemischen Energie  $\Delta H$ :

$$\eta = \frac{\text{Nutzarbeit}}{\text{Gesamtarbeit}} = \frac{W_{el}}{\Delta H} \quad (2.16)$$

Die elektrische Arbeit  $W_{el}$  kann maximal den Betrag der Änderung der freien Gibbschen Energie  $\Delta G$  haben. Die Änderung der freien Gibbsche Energie ist die Differenz aus Enthalpieänderung und Temperatur mal Entropieänderung:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.17)$$

Das heißt, der theoretisch maximale Wirkungsgrad der Brennstoffzelle berechnet sich aus:

$$\eta_{max} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} \quad (2.18)$$

Für die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff



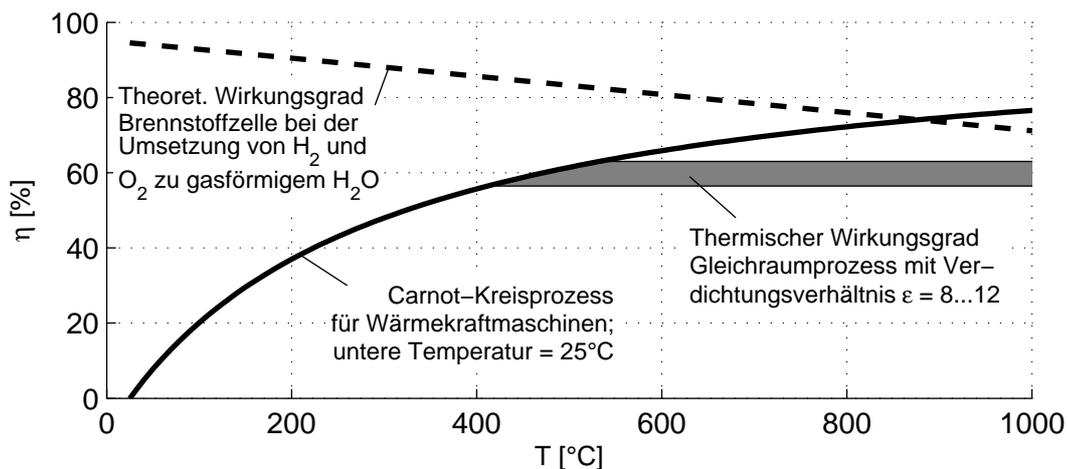
bei 25 °C beträgt er 94,5 %<sup>17</sup>.

Brennstoffzellen haben ein höheres maximales Wirkungsgradpotenzial als Wärmekraftmaschinen. Wärmekraftmaschinen arbeiten mit einem thermodynamischen Kreisprozess. Der effizienteste Kreisprozess ist der Carnot-Prozess. Der Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses ist abhängig von der oberen ( $T_1$ ) und unteren Temperatur ( $T_2$ ), zwischen denen der Prozess abläuft, siehe Gleichung 2.20. Je höher die obere Temperatur ist und umso größer der Temperaturunterschied ist, desto besser ist der Wirkungsgrad.

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (\text{T in K}) \quad (2.20)$$

In Bild 2.12 werden die maximalen Wirkungsgrade von Brennstoffzelle und Carnot-Prozess miteinander verglichen. Es ist zu sehen, dass die Brennstoffzelle vor allem bei niedrigen Betriebstemperaturen ein wesentlich größeres Wirkungsgradpotenzial als der Carnot-Prozess hat. Bei zunehmender Temperatur sinkt der maximale Wirkungsgrad von Brennstoffzellen, der vom Carnot-Prozess steigt. Allerdings kann die obere Temperatur bei Wärmekraftmaschinen nicht unendlich gesteigert werden. Es entstehen systembedingte

<sup>17</sup>Wasser gasförmig, Stoffwerte aus [44]



**Bild 2.12:** Vergleich Wirkungsgradpotenzial von Brennstoffzelle und Wärmekraftmaschine

Einschränkungen. Außerdem nimmt die Materialbelastung bei sehr hohen Temperaturen stark zu, vor allem aufgrund der extremen Temperaturwechsel.

Zusätzlich zum Carnot-Kreisprozess ist in Bild 2.12 der thermische Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  vom Otto-Prozess dargestellt [45]. Ein Ottomotor kann maximal diesen Wirkungsgradbereich erreichen. Der Wirkungsgrad ist stark vom Verdichtungsverhältnis  $\epsilon$  des Motors abhängig. Bosch [32] gibt für Ottomotoren Verdichtungsverhältnisse von 8 bis 12 an.

Das höhere maximale Wirkungsgradpotenzial der Brennstoffzelle gegenüber Wärmekraftmaschinen lässt Brennstoffzellen sehr interessant erscheinen. Allerdings führen sowohl beim Verbrennungsmotor als auch bei der Brennstoffzelle verschiedene Verluste zu einem niedrigeren tatsächlich erreichbaren Wirkungsgrad. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass Brennstoffzellen eine elektrische, Wärmekraftmaschinen eine mechanische Leistung erzeugen. Je nach Anwendung müssen weitere Wandlungsverluste berücksichtigt werden.

Der hier primär betrachtete 6-Zylinder Otto-Motor hat einen maximalen Wirkungsgrad von ca. 35 %. Die Beschreibung der einzelnen Verlustanteile erfolgte in Kapitel 2.1.2. Auch Brennstoffzellen erreichen nicht den theoretisch maximalen Wirkungsgrad. Im folgenden werden die Effekte in der Brennstoffzelle beschrieben, die zu einem Abfall des Wirkungsgrades führen.

### Verlustmechanismen der Brennstoffzelle

Bei der reinen Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff in einer Brennstoffzelle bei Standardbedingungen von 25°C und 1013 mbar würde die Umsetzung der freien Gibbsschen Energie an den Elektroden zu einer Spannung von 1,18 V<sup>18</sup> führen, siehe Gleichung 2.21. Die aus der Gibbsschen Energie ermittelte Spannung stellt also nur die maximale Leerlaufspannung<sup>19</sup> der Brennstoffzelle dar.

<sup>18</sup>Wasser gasförmig; liegt Wasser als flüssiges Produkt vor, steigt die Spannung auf 1,23 V, da die Verdampfungswärme entfällt.

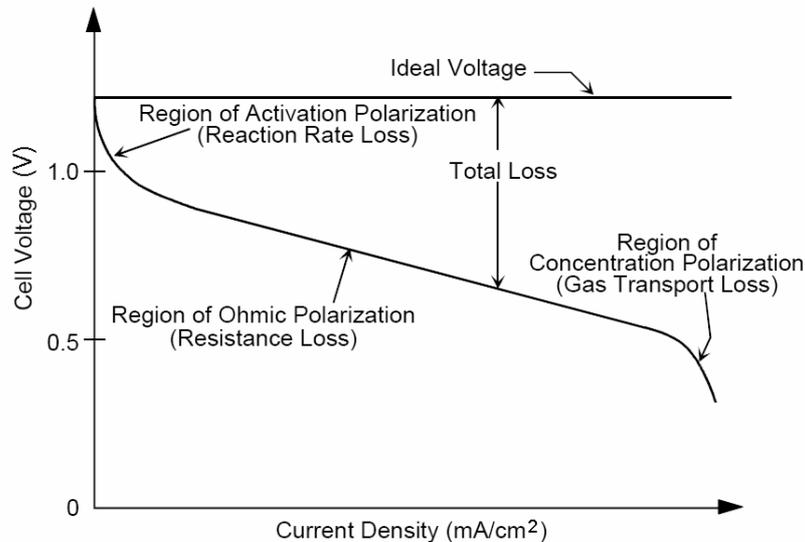
<sup>19</sup>Die Leerlaufspannung wird auch als Standardpotenzial  $E^\circ$  bezeichnet. Dabei steht  $^\circ$  für Standardbedingungen.

Allgemeiner wird die Leerlaufspannung über die Nernst-Gleichung beschrieben, siehe Gleichung 2.22. Die Nernst-Gleichung gibt ausgehend von dem Standardpotenzial  $E^\circ$  die Auswirkungen von Änderungen der Temperatur und der Konzentrationen der Reaktionspartner auf die Leerlaufspannung an.  $n$  ist die Anzahl der Elektronenübergänge der elektrochemischen Reaktion,  $F$  ist die Faraday-Konstante und  $R$  ist die molare Gaskonstante. Da hier alle Reaktionspartner gasförmig vorliegen, werden in Gleichung 2.22 die Partialdrücke verwendet.

$$U^\circ = \frac{-\Delta G}{nF} = 1,18V = E^\circ \quad (2.21)$$

$$E = E^\circ + \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2}}{p_{H_2O}} + \frac{RT}{2F} \ln p_{O_2}^{1/2} \quad (2.22)$$

Sobald Strom fließt treten zunehmend Verluste auf, so dass die Leerlaufspannung weiter sinkt. In Bild 2.13 ist der Strom-Spannungsverlauf einer Brennstoffzelle beispielhaft dargestellt. Bei niedrigen Strömen treten vor allem Verluste aufgrund einer Aktivierungspolarisation  $U_{act}$  auf. Mit steigendem Strom nehmen der ohmische Spannungsverlust  $U_{ohm}$  und die Konzentrationspolarisation  $U_{conc}$  zu [41, 46].



**Bild 2.13:** Prinzipieller Verlauf der Polarisationskurve einer Brennstoffzelle nach [41]

Die Ist-Spannung der Brennstoffzelle berechnet sich folgendermaßen:

$$U_{ist} = E - U_{act} - U_{ohm} - U_{conc} \quad (2.23)$$

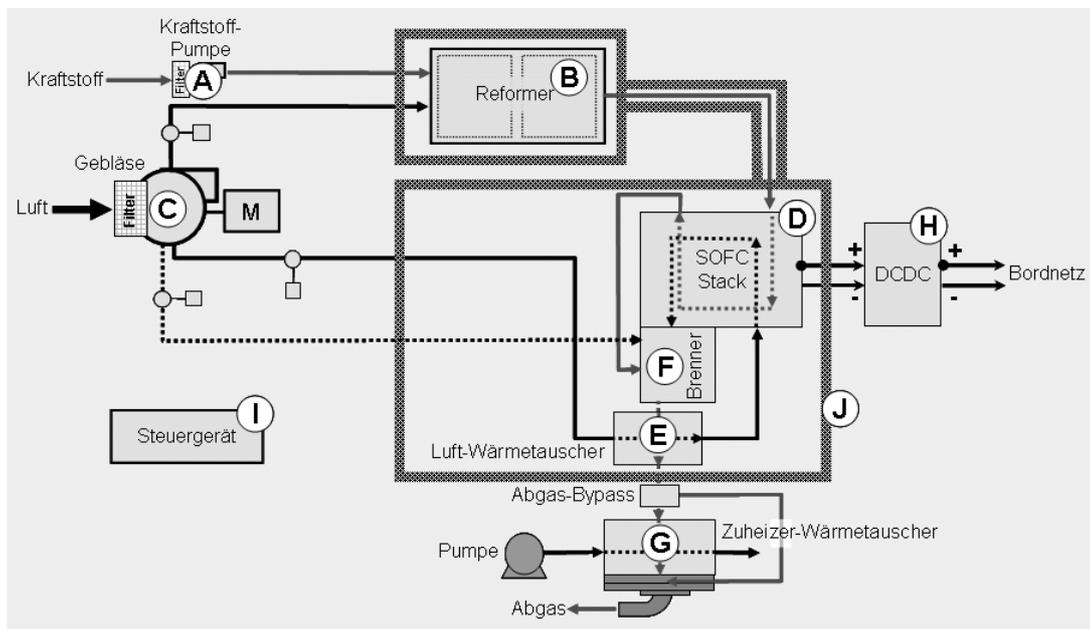
Der Gesamtwirkungsgrad an der Zelle kann berechnet werden, indem der theoretische Wirkungsgrad aus Gleichung 2.18 mit dem Quotienten aus Ist-Spannung und idealer Spannung multipliziert wird:

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \frac{U_{ist}}{E} \quad (2.24)$$

Bei einer Zellspannung  $U_{ist}$  von  $0,7\text{ V}$  sinkt der Zellwirkungsgrade von  $77\%$  (Leerlauf bei  $750^\circ\text{C}$ ) auf ca.  $46\%$ . Dieser Wirkungsgrad stellt noch keinen Systemwirkungsgrad dar. Brennstoffausnutzungsgrad, Reformer und elektrischer Eigenverbrauch führen zu einem niedrigeren Wirkungsgrad im Gesamtsystem APU, siehe dazu Abschnitt 2.2.3.

### 2.2.2 Systembeschreibung SOFC-APU

In dieser Arbeit wird eine SOFC-APU betrachtet. Dabei wird, soweit nicht anders vermerkt, von einer  $1,5\text{ kW}$ -APU mit der nachfolgend beschriebenen Systemkonfiguration ausgegangen. In Kapitel 3.3.2 wird auf die Modellierung des Systems eingegangen.



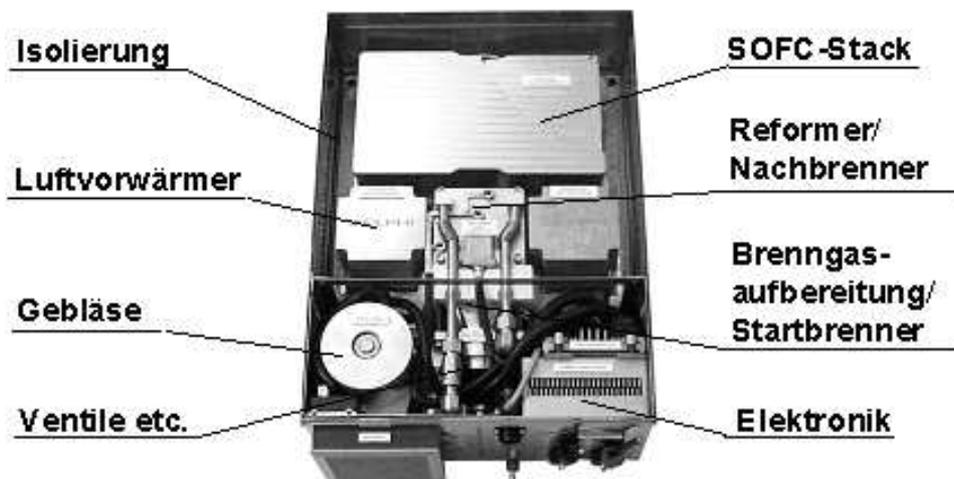
**Bild 2.14:** Systemübersicht SOFC-APU

In Bild 2.14 ist das APU-System dargestellt. Kraftstoff (Benzin oder Diesel) wird aus dem Tank über eine *Kraftstoffpumpe* (A) in den *Reformer* (B), hier ein POX-Reformer, gefördert. Zusätzlich wird über ein *Gebläse* (C) Luft dem Reformer zugeführt. Der Reformer wandelt den Kraftstoff durch partielle Oxidation mit der unterstöchiometrischen Luftmenge in ein wasserstoffreiches Reformat um. Das Reformat strömt in die eigentliche *Brennstoffzelle* (D). Es handelt sich um einen „Stack“ (Stapel) aus mehreren Zellen. Während das Reformat an der Anode zugeführt wird, strömt vorgewärmte Luft an der Kathode ein. Die Luft stammt vom selben Gebläse wie die Reformerluft, wurde jedoch noch in einem *Wärmeübertrager* (E) erwärmt, siehe unten. Im Stack wird durch die elektrochemische Umsetzung von Reformat und Luftsauerstoff eine elektrische Leistung erzeugt. Die Reaktionsprodukte und unverbrauchtes Reformat sowie die verbleibende Luft strömen vom Stack zum *Brenner* (F). Dort wird das restliche Reformat unter Zufuhr weiterer Luft verbrannt. Durch die Verbrennung entstehen heiße Abgase. Diese Abgase werden durch einen *Wärmeübertrager* (E) geleitet. So wird Wärme an die Kathodenluft übertragen.

Ein weiterer *Wärmeübertrager* (G) ist der eigentlichen APU nachgeschaltet. Er kann im Abgas noch enthaltene Wärme an das Kühlwasser des Fahrzeugs übertragen. Dies

ermöglicht es, die APU für die Heizung des Fahrgastraums oder zur Aggregateerwärmung zu nutzen, siehe Kapitel 2.3. Wenn die APU-Wärme nicht erwünscht wird, kann dieser Wärmeübertrager durch einen schaltbaren Bypass umgangen werden.

In Bild 2.14 ebenfalls enthalten ist ein *DC/DC-Wandler (H)*, der die elektrische Einbindung der APU ins Bordnetz ermöglicht. Gesteuert wird die APU über ein eigenes *Steuergerät (I)*. Die heißen Teile sind von einer *Wärmeisolierung (J)* umgeben. Hier nicht eingezeichnet ist die Rezirkulierung von Anodenabgas. Hierbei wird Anodenabgas aus dem Stack zur Steigerung des Wirkungsgrades in den Reformier zurückgespeist.



**Bild 2.15:** SOFC-APU von Delphi ( $5\text{ kW}_{el}$  Nennleistung)

In Bild 2.15 ist eine fertig aufgebaute SOFC-APU abgebildet. In der Box sind alle Komponenten bis auf den DC/DC-Wandler und den Zuheizung-Wärmeübertrager untergebracht.

### Reformer

Der Reformer wandelt Benzin oder Diesel in ein wasserstoffreiches Reformat um. Der erste Schritt ist die Erzeugung eines homogenen Kraftstoffdampf/Luft-Gemisches. Hierfür gibt es verschiedene Verfahren. Bei Benzin bietet sich das Einspritzen des Kraftstoffs über eine Düse in den Reaktionsraum an. Beim Zerstäuben verdampft das Benzin. Diesel hat einen wesentlich höheren Dampfdruck als Benzin. Hier bietet sich die Verdampfung über ein Vlies an. Bei Bedarf wird das Vlies elektrisch beheizt, um eine Verdampfung des Dieselmotorkraftstoffs sicherzustellen. Der Reformer ist das einzige Bauteil im APU-System, das an den verwendeten Kraftstoff angepasst werden muss.

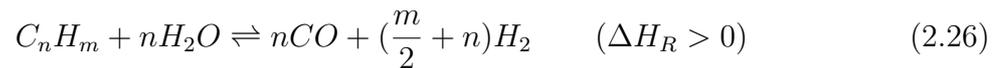
Bei beiden Kraftstoffen ist der grundlegende Vorgang im Reformer gleich. Zusammen mit Luftsauerstoff wird der verdampfte Kraftstoff partiell oxidiert (POX = Partielle Oxidation). Dadurch entsteht Wasserstoff ( $H_2$ ) und Kohlenmonoxid ( $CO$ ):



Die Reaktion ist exotherm. Das Reformat hat eine Temperatur von  $800 - 1000^\circ C$ , wobei innerhalb des Reformers die einströmende Luft durch das Reformat vorgewärmt wird

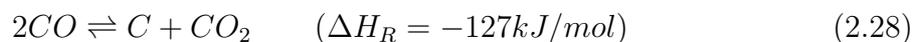
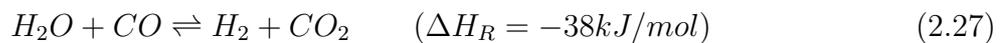
und so das Reformat abkühlt. Aufgrund von Nebenreaktionen, z.B. vollständige Verbrennung, und unverbrannten Kohlenwasserstoffen befinden sich auch Kohlendioxid ( $CO_2$ ) und Wasser ( $H_2O$ ) sowie Methan ( $CH_4$ ) und andere kurzkettige Kohlenwasserstoffe im Reformat. Außerdem enthält das Reformat Stickstoff ( $N_2$ ) aus der zugeführten Luft, sowie Schwefelverbindungen (v.a.  $SO_2$  und  $H_2S$ ) aus dem verwendeten Kraftstoff.

Wenn Anodenabgas vom Stack in den Reformier zurückgeführt wird (Rezirkulierung), kommt es neben der POX zur Dampfreformierung nach Gleichung 2.26.



Die Dampfreformierung (SR = Steam Reforming) ist endotherm. Sie nimmt Energie von der exothermen POX auf. Eine ideal ablaufende Reaktion, bei der die Energiefreisetzung der POX der Energieaufnahme der SR entspricht, wird als autotherme Reformierung bezeichnet.

Im Reformat treten verschiedene Gleichgewichtsreaktionen auf. Die zwei wichtigsten sind die Water-Gas-Shift Reaktion (Gleichung 2.27) und das Boudouard-Gleichgewicht (Gleichung 2.28).



Das Boudouard-Gleichgewicht liegt bei hohen Temperaturen sehr weit auf der linken Seite. Bei Betriebstemperatur spielt es deswegen keine große Rolle. Allerdings kann dieses Gleichgewicht beim Startupvorgang zu Verrußungsproblemen führen, wenn heißes Reformat auf kalte Stellen trifft, z.B. im Stack. Dann kühlt das Gas ab, das Gleichgewicht verschiebt sich nach rechts und Kohlenstoff ( $C$ ) fällt in Form von Ruß aus. An dieser Stelle spielt die Kinetik eine große Rolle. Sie entscheidet, inwieweit sich das Gleichgewicht wirklich einstellt.

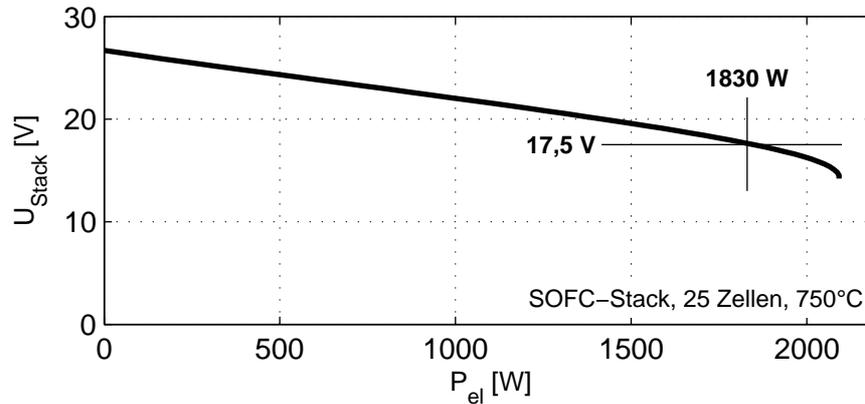
In dieser Arbeit soll der Reformierungsprozess nur zur Beurteilung des Wirkungsgrades der APU betrachtet werden. Dazu wird von einem relativ einfachen Modell ausgegangen, bei dem keine Reaktionskinetik berücksichtigt wird. Das thermische Verhalten des Reformers wird über thermische Massen und Wärmeverluste beschrieben. In Tabelle 2.2 sind die wichtigsten Daten des betrachteten Reformers zusammengefasst.

Größe	Zielwert
Maximale Brennstoffleistung	10 kW
Thermische Masse	320 g
Wärmeverlust	0,11 W/K
Wirkungsgrad POX	82 %
Wirkungsgrad mit Rezirkulierung	bis 100 %

**Tabelle 2.2:** Reformier-Größen

### SOFC-Stack

Der betrachtete Stack soll eine Leistung von  $1830\text{ W}$  bei  $0,7\text{ V}$  Zellspannung haben, um eine elektrische Nenn-Leistung des Gesamtsystems von  $1,5\text{ kW}$  zu erzielen. Um diese Leistung zu erreichen sowie eine akzeptable Arbeitsspannung zu ermöglichen, werden mehrere Zellen in Serie geschaltet.



**Bild 2.16:** Zusammenhang zwischen Stackspannung und Leistung (Polarisationskurve) der betrachteten SOFC-APU

Im hier untersuchten Beispiel werden 25 Zellen zu einem Stapel zusammengefügt. Jede Zelle hat eine aktive Fläche von  $80\text{ cm}^2$ . Bei einer Zellspannung von  $0,7\text{ V}$  entsteht eine Stackspannung von  $25 \cdot 0,7\text{ V} = 17,5\text{ V}$ . Die Abhängigkeit der Spannung von der Leistung ist in Bild 2.16 abgebildet. Die Kennlinie gilt bei einer Stacktemperatur von  $750^\circ\text{C}$ . Bei geringeren Temperaturen geht die Leistung bei konstanter Spannung stark zurück, da die Leitfähigkeit des Elektrolyten abnimmt.

Größe	Zielwert
Bauform	planar
Gasführung	Gleichstrom
Zellenanzahl	25
Nennspannung	$25 \cdot 0,7\text{ V} = 17,5\text{ V}$
Nennleistung @ $0,7\text{ V}$	$1830\text{ W}$
Maximalleistung @ $0,6\text{ V}$	$2080\text{ W}$
Leistungsdichte @ $0,7\text{ V}$	$0,9\text{ W/cm}^2$
Stromdichte @ $0,7\text{ V}$	$1,3\text{ A/cm}^2$
Betriebstemperatur	$750^\circ\text{C}$
Brennstoff-Ausnutzung	80 %
Thermische Masse / Zelle	52 g
Thermische Masse Gasverteiler	500 g
Thermische Masse sonstiges	20 g
Thermische Masse Stack gesamt	1820 g

**Tabelle 2.3:** Stack-Größen

In Tabelle 2.3 sind einige wichtige Größen des betrachteten SOFC-Stacks zusammengestellt. Es handelt sich um Zielwerte zur Bestimmung des Grenzpotenzials einer APU bei

der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. Vor allem die angestrebten thermischen Massen werden heute noch nicht erreicht. Sie liegen heute noch um den Faktor 2 höher.

### Brenner

Die Brennstoffzelle kann nicht das gesamte Brenngas im Reformat ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ) umwandeln. Der Zielwert der Brenngasausnutzung (Fuel Utilisation) liegt bei 80%. Ungenutztes Brenngas wird nach dem Stack einer Nachverbrennung zugeführt. Der notwendige Sauerstoff stammt zum größten Teil aus dem Kathodenabgas. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, weitere Luft direkt über das Gebläse einzublasen. Dies stellt einen zusätzlichen Freiheitsgrad bei der Regelung des Gesamtsystems dar. So kann der Brenner unabhängig von der Luftzufuhr im Stack betrieben werden. Zusätzliche Luft ist vor allem zur Kühlung der Abgase notwendig. Gestartet wird der Brenner über eine Zündvorrichtung. Sobald der Brenner eine bestimmte Temperatur erreicht hat, ist keine aktive Zündung mehr notwendig. Für den Brenner sind in Tabelle 2.4 Kennwerte angegeben.

Größe	Zielwert
Maximalleistung	10 kW
Thermische Masse	340 g

*Tabelle 2.4: Brenner-Größen*

### 2.2.3 Wirkungsgradpotenzial SOFC-APU

Zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs eines Fahrzeugs mit SOFC-APU ist der Gesamtwirkungsgrad des APU-Systems entscheidend. Hierbei müssen drei Punkte berücksichtigt werden:

- Eine kalte APU muss zunächst aufgewärmt werden. Dieser Vorgang, der APU-Startup, führt zu einem Energieverbrauch. Da der APU-Startup zeitlich begrenzt stattfindet, fließt dieser Energieverbrauch nicht in den APU-Wirkungsgrad ein, sondern wird separat betrachtet.
- Während der Stromerzeugung kann ein leistungsabhängiger APU-Wirkungsgrad bestimmt werden.
- Wird neben der elektrischen Leistung thermische Leistung der APU genutzt, muss auch dies bewertet werden.

Zusätzlich müssen Gewichtsunterschiede im Fahrzeug bei Verbrauchsberechnungen berücksichtigt werden. Für eine 1,5 kW-APU wird hier von einem zusätzlichen Gewicht von 20 kg im Fahrzeug ausgegangen, inklusive Integrationsmaßnahmen.

### APU-Startup

Nachfolgend wird der Aufheizvorgang der APU beschrieben, wobei vor allem auf die notwendige Energie eingegangen wird. Zur Veranschaulichung der Vorgänge in der APU

sind in Bild 2.17 zu drei Zeitpunkten die Leistungsströme in der APU festgehalten. Das Bild basiert auf eigenen Simulationen mit dem in Kapitel 3 beschriebenen APU-Modell.

Beim Startupvorgang startet zuerst der Reformier. Durch eine vollständige Verbrennung des Kraftstoffs erreicht der Reformier innerhalb kurzer Zeit seine Betriebstemperatur und geht in eine Partielle Oxidation über. Der Reformier arbeitet mit voller Leistung, so dass das System schnell aufgewärmt wird.

Das heiße Reformat fließt auf der Anodenseite durch den Stack. Dabei gibt das Reformat Wärme an den Stack ab. Im Stack findet zu diesem Zeitpunkt noch keine elektrochemische Reaktion statt. Das Reformat wird im Brenner komplett verbrannt. Dabei entsteht viel Wärme im Brennerabgas. Durch den hohen Brenngasanteil im Reformat steigt die Temperatur im Brenner sehr schnell über  $1000^{\circ}\text{C}$ , siehe 2. Diagramm in Bild 2.17. Zur Kühlung muss zum Teil zusätzliche Luft in den Brenner eingeleitet werden. Dabei wird die Zusatzluft so geregelt, dass das Abgas des Brenners immer eine Temperatur knapp über  $1000^{\circ}\text{C}$  behält. Durch die hohe Temperatur ist sichergestellt, dass ein Maximum an Wärme im nachfolgenden Wärmeübertrager an die Kathodenzuluft übertragen wird.

Die Menge an Kathodenluft wird so eingestellt, dass eine möglichst schnelle Aufheizung erfolgt, ohne einen zu großen Temperaturgradienten zwischen Stackeingang und Stackausgang zu erreichen. Ein bestimmter Wert (hier  $300\text{ K}$ ) darf nicht überschritten werden, da sonst die thermischen Spannungen im Stack zu groß würden und zu Rissen in der Keramik der Zelle führen könnten. Ab einer Kathodenabgastemperatur von  $700^{\circ}\text{C}$  wird die Brennstoffzelle elektrisch belastet.

Der Zielwert für die Startupzeit beträgt  $200\text{ s}$ . Der Energieverbrauch des Startups soll nicht mehr als  $2000\text{ kJ}$  an Kraftstoffbedarf betragen. Dies entspricht einer Menge von  $0,06\text{ l}$  Benzin. Zusätzlich wird während des Startups von einem elektrischen Leistungsbedarf für das Gebläse, das Steuergerät, die Sensoren und weitere Aktoren von  $360\text{ W}$  ausgegangen. Diese Zielwerte stellen eine Herausforderung dar und können nur mit einem optimierten System erreicht werden.

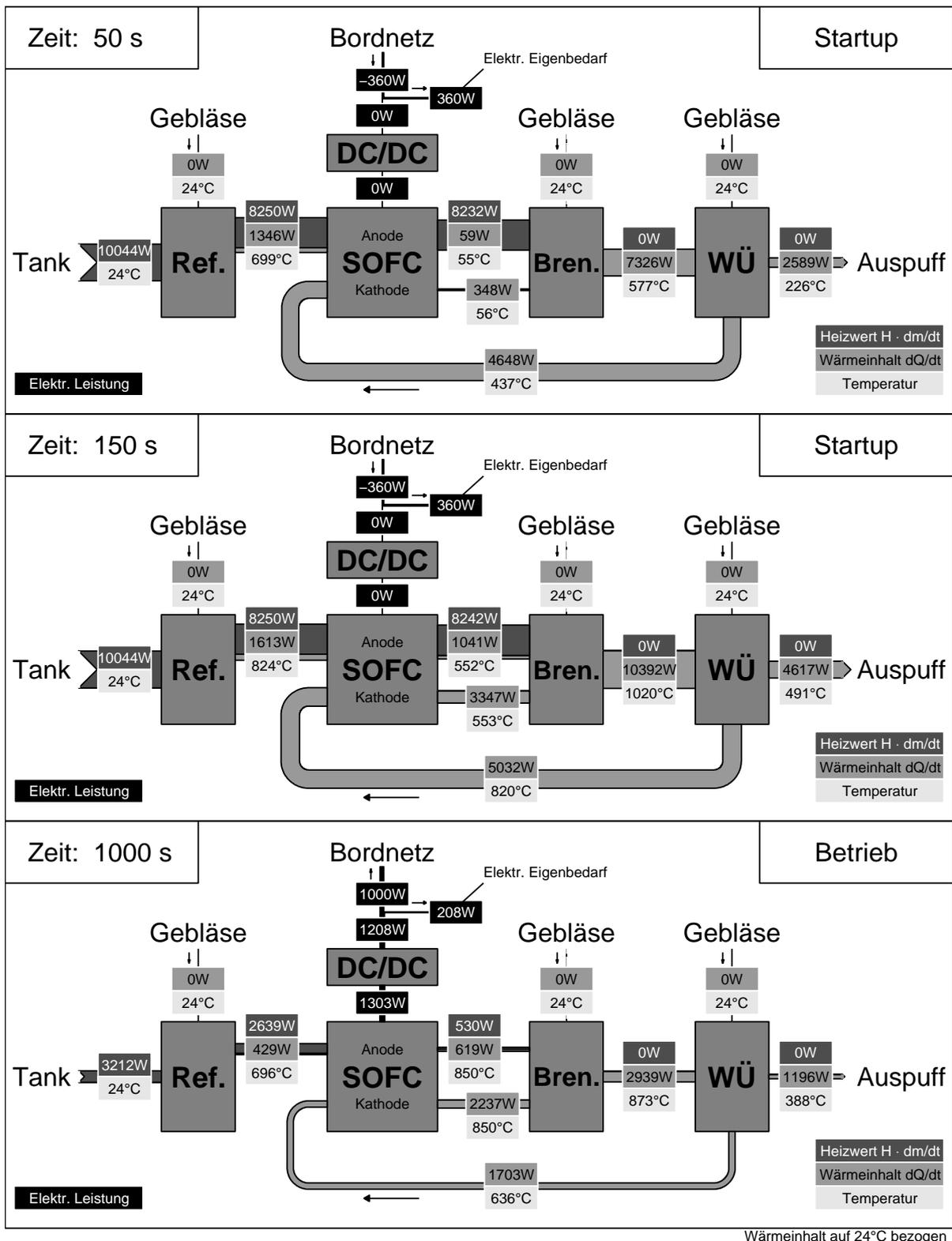
Der Startup-Verbrauch wird im wesentlichen durch die aufzuheizende thermische Masse  $m_{therm}$  und die Betriebstemperatur bestimmt. In Gleichung 2.29 ist die notwendige Energie dargestellt:

$$E = \frac{1}{\eta_{WE}} \cdot m_{therm} \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.29)$$

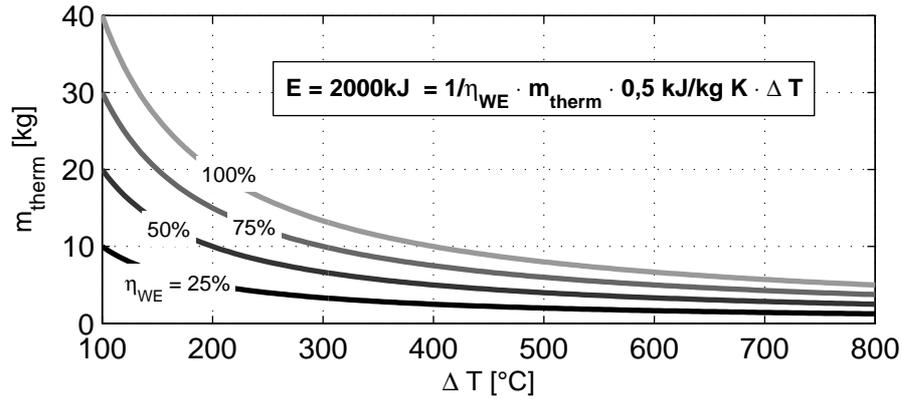
$\eta_{WE}$  ist der Nutzungsgrad der Wärmeeinbringung in das Gesamtsystem. Er berücksichtigt, wieviel Energie von der eingesetzten Kraftstoffenergie als Wärme in der APU verbleibt.  $m_{therm} \cdot c$  ist die thermische Masse multipliziert mit dem durchschnittlichen Wärmekoeffizienten der betroffenen Bauteile.  $\Delta T$  ist der Temperaturunterschied zwischen Starttemperatur und Betriebstemperatur des Stacks<sup>20</sup>. Wenn der Stack noch Restwärme vom letzten Betrieb aufweist oder die Betriebstemperatur verringert werden kann, reduziert sich der Wert und es ist weniger Aufheizenergie notwendig.

In Bild 2.18 ist der Zusammenhang von  $\Delta T$ ,  $m_{therm}$  und  $\eta_{WE}$  dargestellt. Aus dem Bild kann man herauslesen, wieviel thermische Masse  $m_{therm}$  mit welchem Temperaturunter-

<sup>20</sup>Vereinfacht wird in Gleichung 2.29 davon ausgegangen, dass die anderen heißen Bauteile eine ähnliche Temperatur wie der Stack haben.



**Bild 2.17:** Sankey-Diagramme SOFC-APU: Eingezeichnet sind die Leistungsströme zwischen den Modulen der APU zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Angegeben ist die chemisch gebundene Leistung (Heizwert), der Wärmeinhalt sowie die Temperatur der Stoffströme. Zusätzlich sind elektrische Leistungen eingezeichnet. Während die ersten beiden Diagramme Zeitpunkte während des Startups darstellen, gibt das dritte Diagramm einen nahezu eingeschwungenen Zustand mit einer elektrischen Nettoleistung von 1000 W wieder. (Quelle: Eigene Simulationen, Beschreibung des Modells in Kapitel 3)



**Bild 2.18:** Einflussparameter auf den Startup-Verbrauch der SOFC-APU

schied  $\Delta T$  bei welchem Wärmeeinbringungsgrad  $\eta_{WE}$  mit einer konstanten Energiemenge  $E$  von  $2000 \text{ kJ}$  aufgeheizt werden kann.

Die Temperaturdifferenz beträgt bei  $24^\circ\text{C}$  Umgebungstemperatur und  $700^\circ\text{C}$  Betriebstemperatur  $676^\circ\text{C}$ . Bei der Wärmeeinbringung sollte ein Nutzungsgrad von mindestens 50 % erreicht werden. Das heißt im Umkehrschluss, dass maximal 50 % der Kraftstoffenergie während dem gesamten Startupvorgang über das Abgas entweicht. Im hier betrachteten APU-System wird ein  $\eta_{WE}$  von 64 %<sup>21</sup> erreicht. Am Anfang des Startups geht nahezu gar keine Energie verloren. Da die Bauteile alle noch kalt sind, wird der größte Teil der Verbrennungswärme an die Bauteile übertragen. Das APU-Abgas enthält nur noch einen vergleichsweise geringen Wärmeinhalt. Zum Zeitpunkt  $t = 50 \text{ s}$ , siehe oberstes Diagramm in Bild 2.17, beträgt der Wärmeinhalt im Abgas  $2893 \text{ W}$ .  $\eta_{WE}$  beträgt zu diesem Zeitpunkt 74%<sup>22</sup>. Im mittleren Diagramm ( $t = 150 \text{ s}$ ) liegt der Wärmeinhalt des Abgases wesentlich höher, obwohl nicht mehr Kraftstoff zugeführt wird.  $\eta_{WE}$  liegt nur noch bei 54 %. Der Reformier und der Wärmeübertrager sind zu diesem Zeitpunkt bereits auf Betriebstemperatur. Es muss nur noch der SOFC-Stack weiter aufgeheizt werden. Der SOFC-Stack wird in erster Linie über die Erwärmung der Kathodenluft über den in Bild 2.17 eingezeichneten Luft-Wärmeübertrager (WÜ) aufgeheizt. Der Wärmeverlust an das Abgas wird wesentlich durch die Güte des Wärmeübertragers bestimmt. Der Übertragungswirkungsgrad  $\phi$ , auch Betriebscharakteristik genannt, bestimmt sich laut VDI-Wärmeatlas [47] nach:

$$\phi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{T_{Brennerabgas} - T_{APU-Abgas}}{T_{Brennerabgas} - T_{Luftzugang}} \quad (2.30)$$

Die Gleichung gilt für einen Kreuzstrom-Wärmeübertrager.  $\dot{Q}$  ist die übertragene Wärmeleistung,  $\dot{Q}_{max}$  die maximal übertragbare Wärmeleistung. Zu den drei Zeitpunkten in Bild 2.17 weist der Wärmeübertrager eine Betriebscharakteristik  $\phi$  von 0,63 ( $t = 50 \text{ s}$ ), 0,53 ( $t = 150 \text{ s}$ ) und 0,57 ( $t = 1000 \text{ s}$ ) auf. Die Güte des Wärmeübertragers hängt zum einen von der Bauform ab. Zum anderen beeinflusst aber auch die Höhe der Gasströme die Güte. Ein hoher Kathodenluftmassenstrom, z.B. bei  $t = 50 \text{ s}$ , führt zu einer niedrigeren mittleren Lufttemperatur im Wärmeübertrager. Dadurch liegt ein höherer

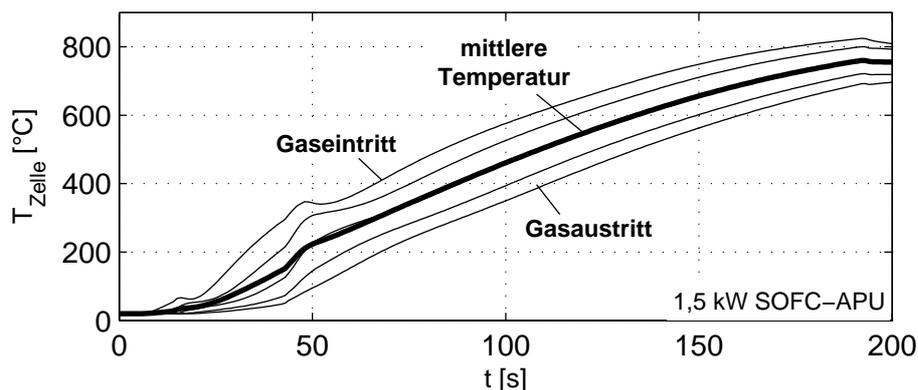
<sup>21</sup>über den gesamten Startup betrachtet

<sup>22</sup>Momentaufnahme

Temperaturgradient zwischen den beiden Gasströmen im Wärmeübertrager vor, was wiederum einen höheren Wärmeübergang bedeutet. Die Abgastemperatur am Ausgang des Wärmeübertragers sinkt. Der Wert  $\phi$  steigt.

Ziel ist es, eine hohe Güte des Wärmeübertragers zu erreichen, um die Abgasverluste zu begrenzen. Dabei müssen jedoch weitere Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Zum einen kann der Luftmassenstrom nicht beliebig geändert werden, vor allem da bei einem höheren Massenstrom die Temperatur abnimmt und dadurch der Wärmeübergang im SOFC-Stack verschlechtert wird. Zum anderen muss während dem Betrieb insgesamt Verlustwärme aus dem SOFC-Stack abgeführt werden. Das heißt, in diesem Fall ist eine gewisse Abwärme im Abgas sogar erwünscht.

Aus den ermittelten Werte von  $676^\circ\text{C}$  für  $\Delta T$  und 64% für  $\eta_{WE}$ , ergibt sich aus Bild 2.18 eine maximal zulässige thermische Masse von nur 3,8 kg. Im Simulationsmodell ist dieser Zielwert durch eine entsprechende Auslegung der Bauteile erreicht worden. Die Umsetzbarkeit wird in dieser Arbeit nicht überprüft. Der Temperaturverlauf im Stack während des Startupvorgangs ist in Bild 2.19 dargestellt. Angegeben ist die Festkörpertemperatur an fünf Stellen entlang der Strömungsrichtung, angefangen beim Gaseintritt bis zum Gasaustritt. Zusätzlich ist durch eine dickere Linie die mittlere Temperatur der Zellen eingezeichnet.



**Bild 2.19:** Temperaturverlauf im Stack während des APU-Startups (aus eigener 1D-Simulation, Beschreibung des Simulationsmodells in Kapitel 3)

In dieser Arbeit werden die in Tabelle 2.5 aufgeführten Größen für den Startup-Verbrauch verwendet.

Größe	Zielwert
Startupzeit	200 s
Startupenergie (Kraftstoff)	2000 kJ
El. Leistung APU während Startup	360 W

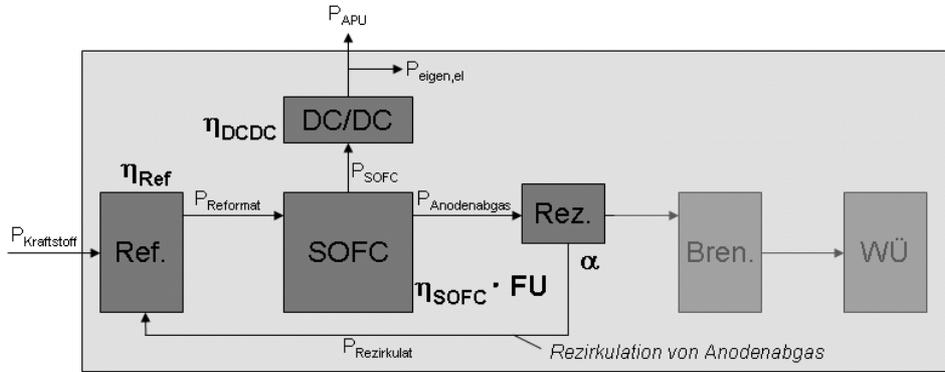
**Tabelle 2.5:** Zielgrößen APU-Startup für die hier betrachtete 1,5 kW SOFC-APU

### Stromerzeugung

Der Gesamtwirkungsgrad der APU bei der Stromerzeugung setzt sich aus folgenden Anteilen zusammen:

$$\begin{aligned}\eta_{APU} &= \frac{P_{APU}}{P_{Kraftstoff}} = \\ &= \eta_{SOFC} \cdot FU \cdot \eta_{Ref} \cdot \frac{1}{1 - \alpha \cdot \eta_{Ref} \cdot (1 - FU)} \cdot \eta_{DCDC} \cdot \frac{P_{APU}}{P_{APU} + P_{eigen,el}}\end{aligned}\quad (2.31)$$

Die Teilwirkungsgrade und Leistungsströme sind in Bild 2.20 gekennzeichnet. Eine detaillierte Herleitung von Gleichung 2.31 befindet sich im Anhang auf Seite 149.  $\eta_{SOFC}$  ist der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle, wie er in Kapitel 2.2.1 beschrieben wird.  $FU$  ist die Fuel Utilisation. Sie bezeichnet, wieviel Brenngas in der Brennstoffzelle tatsächlich genutzt wird. In der Regelung der Brennstoffzelle wird  $FU$  weitestgehend auf 80 % eingestellt. Nur bei niedrigen Leistungen liegt eine niedrigere Brenngasnutzung vor, da das System sonst auskühlt.



**Bild 2.20:** Definition Leistungsströme in der SOFC-APU als Grundlage für die Definition von Wirkungsgraden

Der Reformerwirkungsgrad  $\eta_{Ref}$  berechnet sich aus der vom Reformer abgeführten Nutzleistung (Reformatleistung) dividiert durch die zugeführten Leistungen (Kraftstoff und Rezirkulat), siehe Gleichung 2.32. Dabei wird jeweils nur die chemisch gebundene Energie berücksichtigt. Die enthaltene Wärme kann nur zum Teil genutzt werden, so dass sie nicht zur Nutzleistung hinzugerechnet wird.  $\eta_{Ref}$  liegt zwischen 80 % und 100 %<sup>23</sup>.

$$\eta_{Ref} = \frac{P_{Reformat}}{P_{Kraftstoff} + P_{Rezirkulat}} \quad (2.32)$$

$\alpha$  ist der Rezirkulierungsanteil des Anodenabgases:

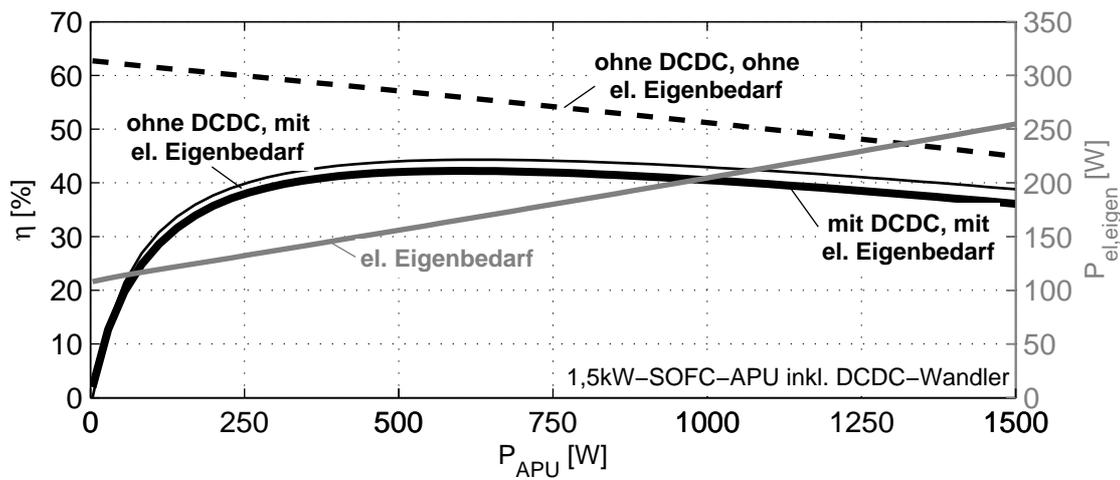
$$\alpha = \frac{\text{Massenstrom Rezirkulat}}{\text{Massenstrom Anodenabgas}} \quad (2.33)$$

Der Wert von  $\alpha$  kann theoretisch zwischen 0 und 1 liegen. Allerdings machen nur Werte bis ca. 0,3 Sinn, vor allem da die Volumenströme von Reformat und Rezirkulat mit zunehmendem  $\alpha$  überproportional zunehmen. Durch die Rezirkulierung wird die Brennstoffausnutzung erhöht. Dies ist durch den Term  $\frac{1}{1 - \alpha \cdot \eta_{Ref} \cdot (1 - FU)}$  in Gleichung 2.31 berücksichtigt.

<sup>23</sup>autotherme Reformierung

Zusätzlich hat die Rezirkulierung Auswirkungen auf  $\eta_{Ref}$  (siehe oben) und  $\eta_{SOFC}$  (durch Änderung der Gaskonzentrationen).

$\eta_{DCDC}$  ist der Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers, vergleiche Kapitel 2.1.3.  $P_{eigen,el}$  drückt den elektrischen Eigenbedarf der APU aus. Während des Betriebs versorgt sich die APU selbst mit elektrischer Leistung. Dieser Anteil muss im Wirkungsgrad berücksichtigt werden. Es liegt eine Grundleistung von ca. 100 W vor, z.B. für die Versorgung des Steuergeräts. Die Grundleistung fällt unabhängig von der APU-Leistung an. Hinzu kommt ein betriebsabhängiger Anteil. In Bild 2.21 ist der angenommene elektrische Eigenbedarf zusammen mit dem APU-Wirkungsgrad und dem Gesamtwirkungsgrad dargestellt.



**Bild 2.21:** Wirkungsgrade der SOFC-APU (Gesamtsystem inklusive Verluste im DC/DC-Wandler, mit Anodengaszirkulierung)

Eine Optimierung des Gesamtwirkungsgrads wird erreicht, wenn der elektrische Eigenbedarf weitgehend bereits vor dem DC/DC-Wandler abgezweigt wird. Voraussetzung ist, dass die elektrischen Verbraucher für den großen Spannungsbereich der Brennstoffzelle ausgelegt sind. Bei vielen Verbrauchern, z.B. dem Gebläse, stellt dies kein Problem dar. Ein Relais oder eine Diodenschaltung ermöglicht während des APU-Startups eine Versorgung der elektrischen Verbraucher über die 12 V-Seite.

In der Wirkungsgradkennlinie in Bild 2.21 sind bereits die angesprochenen Optimierungen durch Rezirkulierung und Versorgung des elektrischen Eigenbedarfs vor dem DC/DC-Wandler berücksichtigt. Bei der Wirkungsgradkennlinie handelt es sich um ein Ziel, das heute so noch nicht bei kompletten APU-Systemen erreicht wird. In [28] werden ähnliche Wirkungsgradziele angegeben. Die Herausforderung besteht in der optimalen Kombination verschiedener, oft konkurrierender Ziele. So ist z.B. eine hohe Kraftstoffausnutzung ( $FU$ ) erwünscht. Allerdings bedeutet eine hohe Kraftstoffausnutzung, dass am Ende der Zellen die Brenngaskonzentration relativ gering ist. Aufgrund der niedrigen Brenngaskonzentration nimmt die Leistungsdichte am Ende der Zellen ab, was auch eine Abnahme der mittleren Leistungsdichte der Zellen bedeutet. Zur Erreichung einer vorgegebenen Nennleistung muss eine von der mittleren Leistungsdichte abhängige Gesamtzellfläche vorgesehen werden. Bei reduzierter Leistungsdichte steigt die Gesamtzellfläche. Eine höhere Zellfläche bedeutet eine erhöhte thermische Masse. Diese verursacht wiederum eine erhöhte Aufheizenergie. Es besteht also ein Zielkonflikt zwischen minimaler Aufheizenergie und

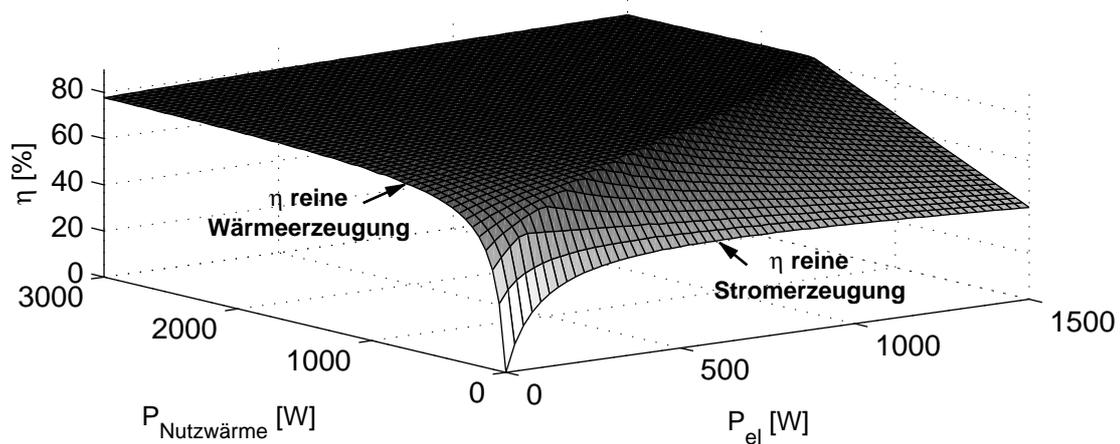
maximaler Kraftstoffausnutzung bei gegebener Nennleistung.

### Kraft-Wärme-Kopplung

Wenn die APU-Abwärme genutzt wird, muss diese zusätzliche Nutzung im Wirkungsgrad berücksichtigt werden. Weber [46] definiert einen thermischen Wirkungsgrad:

$$\eta_{thermisch} = \frac{\text{gewonnene Nutzwärme}}{\text{chemische Energie des Brennstoffs}} \quad (2.34)$$

Der Gesamtnutzungsgrad der APU ergibt sich dann aus der Summe von elektrischem und thermischem Wirkungsgrad. In Bild 2.22 ist der Gesamtnutzungsgrad bei einer zusätzlichen Wärmenutzung dargestellt. Dabei wird von einem Wirkungsgrad der Wärmeübertragung vom Abgas auf das Kühlwasser von 80 % ausgegangen.



**Bild 2.22:** Nutzungsgrad SOFC-APU bei zusätzlicher Wärmenutzung (1,5kW-SOFC-APU)

Wie in Bild 2.22 zu sehen ist, steigt bereits bei geringer Wärmenutzung der Nutzungsgrad deutlich an. Bei einer höheren Wärmeanforderung wird die APU zu einer Art Zuheizung oder Standheizung mit zusätzlicher Stromerzeugung. Dabei erreicht sie ein ähnliches Nutzungsgradpotenzial wie der Zuheizung, erzeugt jedoch neben der Wärme energetisch höherwertige elektrische Energie. Wird mehr Wärme angefordert, als über das APU-Abgas zur Verfügung steht, kann zusätzliche Wärme im System relativ einfach erzeugt werden, indem zusätzlicher Kraftstoff eingespritzt wird. Dadurch nimmt die Kraftstoffausnutzung ( $FU$ ) im Stack automatisch ab. Im Brenner wird mehr Reformat verbrannt und das Abgas hat einen höheren Wärmeinhalt. In Bild 2.22 macht sich die Stelle, an der zusätzlicher Kraftstoff zur Erhöhung der Abgasenthalpie eingespritzt wird, durch einen Knick im Kennfeld bemerkbar. Entlang des Knicks liegt ein optimales Verhältnis von Strom zu Nutzwärme vor, da hier die komplette Abwärme genutzt wird.

## 2.3 Anwendungsmöglichkeiten einer APU

Im vorherigen Kapitel wurde die Funktion einer SOFC-APU beschrieben. Sie erzeugt aus Kraftstoff Strom und Wärme. In diesem Kapitel wird beschrieben, wo und wie der Strom und die Wärme im Fahrzeug eingesetzt werden können.

### 2.3.1 Anwendungen zur Verbrauchsreduktion

Eine Brennstoffzellen-APU wird oft im Zusammenhang mit neuen kundenwertigen Funktionen genannt, z.B. einer Standklimatisierung. Durch eine zusätzliche Funktion wird allerdings generell der Kraftstoffverbrauch zunächst steigen. Deshalb soll in dieser Arbeit die Fragestellung nicht lauten, welche zusätzlichen Funktionen mit einer Brennstoffzellen-APU realisiert werden können, sondern welche bestehenden Funktionen mit einer APU energetisch optimiert werden können. Dabei kann durchaus auch das Beispiel Standklimatisierung herangezogen werden. Eine Standklimatisierung kann auch über den Verbrennungsmotor betrieben werden, der über eine Fernbedienung gestartet wird. Diese Funktion, auch „Telestart“ genannt, ist in einigen Ländern erlaubt (nicht in Deutschland) und kann daher für einen energetischen Vergleich herangezogen werden.

Im folgenden soll zwischen direkten und indirekten Einspareffekten unterschieden werden.

- **Direkte Einspareffekte:** Einsparpotenziale, die durch einen besseren Wirkungsgrad der APU bei der Strom- und Wärmeerzeugung gegenüber Vergleichssystemen auftreten.
- **Indirekte Einspareffekte:** Einspareffekte, die über den eigentlichen Wirkungsgradvorteil hinausgehen. Hier werden durch die APU entstandene Freiheitsgrade, z.B. bei der Auslegung von Fahrzeugsystemen und Betriebsstrategien, genutzt, um den Kraftstoffverbrauch zu senken.

#### Direkte Einspareffekte

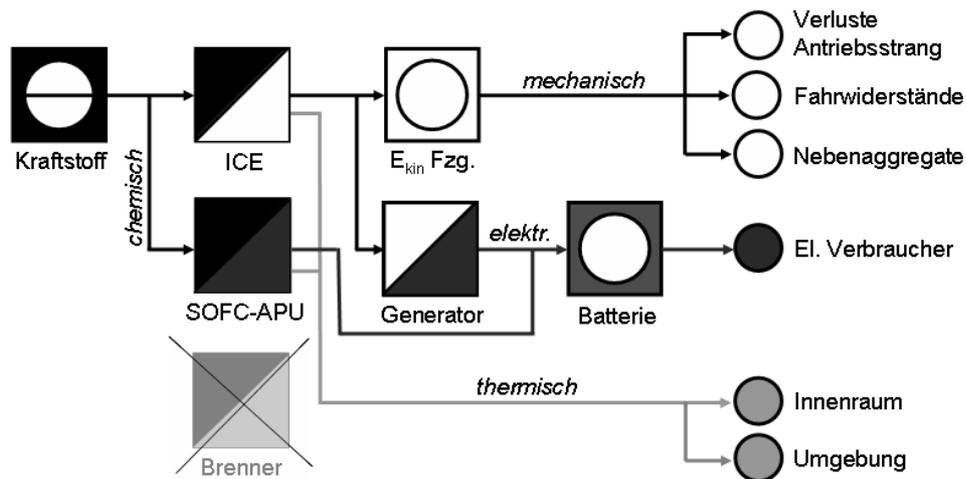
Einsparungen im Kraftstoffverbrauch sind möglich, indem die bisherigen Strom- und Wärmeproduzenten durch die APU unterstützt oder sogar ersetzt werden, siehe Bild 2.23.

#### **Stromproduktion**

Die bisherige Stromproduktion erfolgt über die Kopplung von Motor und Generator. Der Motor erzeugt aus Kraftstoff mechanische Energie und der Generator wandelt diese mechanische Energie in elektrische Energie um. Dabei hat der Motor vor allem im Teillastbereich einen relativ schlechten Wirkungsgrad, so dass ein Wirkungsgradvorteil durch die APU zu erwarten ist. Die Stromproduktion per APU ist das zentrale Thema dieser Arbeit und wird in den folgenden Kapiteln intensiver diskutiert.

#### **Wärmeproduktion**

Im Fahrzeug wird die meiste Wärme bisher durch den Verbrennungsmotor produziert. Dabei handelt es sich um Abwärme, die bei Bedarf für die Innenraumheizung verwendet



**Bild 2.23:** Integration einer APU in das „Energiesystem Kraftfahrzeug“

wird. Da die Abwärme kostenlos zur Verfügung steht, sollte sie auch weiterhin genutzt werden. Erst wenn die Abwärme des Verbrennungsmotors nicht mehr die gewünschte Heizleistung erbringt, und deshalb Zuheizsysteme wie thermische Zuheizler oder PTC-Systeme eingesetzt werden, lohnt es sich, die APU-Abwärme heranzuziehen und des weiteren sogar zusätzliche Wärme mit der APU zu erzeugen. Der thermische Zuheizler, sowie auch Standheizungen können dabei komplett durch die APU ersetzt werden. Elektrische PTC-Systeme haben eine schnellere Reaktionszeit als die APU. Das heißt, ein PTC-Zuheizler kann in den energetischen Betrachtungen nicht ohne weiteres durch eine APU ersetzt werden, da Komfortunterschiede bestehen.

### Indirekte Einspareffekte

Neben den direkten Einspareffekten kommen noch indirekte Effekte hinzu, die teilweise wesentlich größere Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch haben können.

### **Reduktion der elektrischen Speicherverluste**

Der Generator kann bei Leerlaufdrehzahl die angeforderte elektrische Leistung häufig nicht mehr erzeugen, so dass die Batterie unterstützend Strom liefern muss. Die APU liefert einen konstanten Strom unabhängig von der Motordrehzahl, so dass es bei einem Fahrzeug mit APU zu einem geringeren Energiedurchsatz der Batterie kommt. Dies führt neben einer Verlängerung der Batterielebensdauer vor allem zu geringeren Speicherverlusten beim Lade- und Entladevorgang.

### **Nutzung der APU-Abwärme**

Die APU produziert beim Startup sowie im Betrieb Abwärme auf einem hohen Temperaturniveau, siehe Kapitel 2.2. Wenn keine Heizleistung benötigt wird, kann diese Wärme dem Verbrennungsmotor, dem Getriebe oder dem Hinterachsgetriebe zugeführt werden. Die Systeme kommen schneller auf Betriebstemperatur. Dadurch werden Reibverluste reduziert und Kraftstoff eingespart. Allerdings ist eine aufwändigere Integration der APU ins Fahrzeug notwendig.

### **Standfunktionen bei stehendem Motor**

Vor allem im Stand hat die APU einen großen Vorteil, da für die Strom- und Wärmeproduktion der Verbrennungsmotor nicht laufen muss. Kann der Verbrennungsmotor bei einem Fahrzeug mit APU abgeschaltet werden, da er nur zur Strom- und Wärmeproduktion betrieben wird, dürfen die Verbrauchseinsparungen der APU gutgeschrieben werden. Eine motorunabhängige Wärmeproduktion ist zwar auch mit einer Standheizung möglich, hier zeigt eine SOFC-APU aber deutliche Nutzungsgradvorteile durch eine optimierte Kraft-Wärme-Kopplung. Eine sehr interessante Standanwendung mit hohem Einsparpotenzial ist die elektrische Standklimatisierung. Sie ist eine Alternative zum Motorfernstart, d.h. Klimatisierung mit mechanischem Kompressor bei laufendem Motor. Für die elektrische Klimatisierung muss jedoch zusätzlich zur APU ein elektrischer Klimakompressor im Fahrzeug verbaut sein.

### **Elektrifizierung von Nebenaggregaten**

Zunehmend werden Nebenaggregate nicht mehr direkt vom Verbrennungsmotor, sondern elektrisch betrieben. Dadurch sind sie von der Motordrehzahl entkoppelt und können bedarfsgerecht im idealen Drehzahlbereich betrieben werden. Durch die APU wird zusätzliche elektrische Energie zur Verfügung gestellt, was die Elektrifizierung vereinfacht, teilweise sogar erst ermöglicht. Neben dem elektrischen Klimakompressor werden heute bereits in einigen Fahrzeugen die Wasserpumpe und die Lenkhilfepumpe elektrisch betrieben. Weitere interessante Systeme, die jedoch höhere elektrische Leistungen benötigen, sind die aktive Rollstabilisierung (ARS), sowie die Bremsdruckverstärkung. Beide Systeme werden heute rein hydraulisch betrieben, wobei die hydraulische Energie vom Verbrennungsmotor erzeugt wird.

### **Gewichtsreduktion**

Da die APU bestehende Systeme wie den Zuheizer, den Generator und die Batterie ersetzt oder unterstützt, können diese Systeme eventuell entfallen oder kleiner ausgeführt werden. So kann ein Gewichtsvorteil entstehen. Allerdings hat sich gezeigt, dass viele Komponenten aufgrund verschiedenster Anforderungen ausgelegt werden. So muss die Batterie im heutigen Fahrzeug vor allem einen sicheren Motorstart gewährleisten. Da beim Motorstart die APU nicht zwangsläufig betriebsbereit ist, kann die Batteriegröße im heutigen Fahrzeug nicht reduziert werden. Ein Entfall des Generators scheidet wegen der APU-Startupzeit aus. Ohne Generator würde während des APU-Startups die Bordnetzspannung stark einbrechen. Der Entfall eines Zuheizers oder einer Standheizung führt zu einer Gewichtseinsparung. Allerdings wird ein großer Teil durch das zusätzliche Gewicht der APU wieder kompensiert. Insgesamt wird keine Gewichtseinsparung erwartet, sondern von einem Mehrgewicht durch die APU ausgegangen.

### **Eingriff in Verbrennungsmotor und Antriebsstrang**

Noch erwähnt werden soll die Möglichkeit einer Adaption von Motor und Antriebsstrang. Während eine Anpassung der Motorleistung im allgemeinen keinen Sinn macht, da die APU sich in anderen Leistungsklassen bewegt, ist ein Eingriff in die Motorsteuerung durchaus denkbar.

Teilweise besteht bei Motoren ein Zündwinkelvorrat<sup>24</sup>, der plötzlich ansteigende Generatormomente bei hohen Stromgradienten abfangen soll. Eine APU kann Stromanstiege beim Generator dämpfen, so dass kein Zündwinkelvorrat mehr notwendig ist. Allerdings konnte der Zündwinkelvorrat in der Vergangenheit bereits reduziert werden, indem eine aktive Begrenzung des Stromgradienten im Generator eingeführt wurde. Insofern hat die APU hier nur noch ein minimales zusätzliches Optimierungspotenzial.

Interessanter ist die Anhebung der Motorleerlaufdrehzahl, wenn die Leistungsgrenze des Generators im Leerlauf erhöht werden soll. Diese Anhebung, die zu einem erhöhten Leerlaufverbrauch führt, ist mit einer APU als zusätzlicher elektrischer Energiequelle nicht mehr nötig.

Ein weiterer Effekt ist die Anpassung der Übersetzung des Hinterachsgetriebes. Durch die Entlastung des Generators und damit des Motors steht dem Motor mehr Drehmoment für den Antrieb zur Verfügung. Dadurch steigen auch die Fahrleistungen, z.B. das Beschleunigungsvermögen, an. Nun können die Fahrleistungen wieder angepasst werden, indem die Hinterachsübersetzung entsprechend geändert wird. Dies führt wiederum zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs, da das Drehzahlniveau gesenkt wird. Was allerdings bei der Getriebeanpassung mit beachtet werden muss, ist eine eventuelle Zunahme des Fahrzeuggewichts durch die APU, was zu einer Verschlechterung der Fahrleistungen führt. Welcher Effekt schließlich überwiegt, muss untersucht werden.

### Neue Fahrzeugfunktionen

Bisher wurden nur Funktionen ausgehend vom heutigen Standardfahrzeug betrachtet. In Kombination mit den neuen Fahrzeugfunktionen Motor-Stopp-Automatik (MSA) und Rekuperation sowie im Hybridfahrzeug erscheint eine APU besonders interessant.

### **Motor-Stopp-Automatik (MSA)**

Die Motor-Stopp-Automatik stellt den Motor bei Stillstand des Fahrzeugs automatisch ab, wenn bestimmte Voraussetzungen, z.B. ein ausreichender Batterieladestand, erfüllt sind. Dadurch ist es möglich, den Kraftstoffverbrauch bei Fahrten mit hohem Standanteil deutlich zu reduzieren. Zu beachten ist, dass bei abgeschaltetem Motor weiterhin eine sichere Energieversorgung des Bordnetzes über die Batterie gewährleistet ist. [48, 49]

Eine APU unterstützt die MSA-Funktion durch eine motorunabhängige Stromerzeugung in den Stopp-Phasen. Teilweise ist es sogar möglich, dass sie den Einsatz von MSA überhaupt erst ermöglicht, da ohne APU keine ausreichende Energieversorgung sichergestellt werden kann oder zu viele Einschränkungen hingenommen werden müssen. Durch die ausreichende Stromerzeugung der APU muss der Kunde auch in der Stopp-Phase auf keine Funktion verzichten. Besonders interessant ist dies bei der Klimatisierung. Eine APU in Kombination mit einem elektrischen Klimakompressor kann während der Standphase für eine ausreichende Erhaltungsklimatisierung sorgen. Alternativen wie Kältespeicher oder Nutzung von Batterien führen nur zu unbefriedigenden Ergebnissen oder bedeuten eine reduzierte maximal mögliche Abschaltzeit des Motors bis hin zu einer Aussetzung der MSA-Funktion bei laufender Klimaanlage.

---

<sup>24</sup>Vorverlegung des Zündzeitpunkts

Ein weiterer Vorteil der APU kann die Wärmeproduktion im Stand sein. So kann im Winter auch bei stehendem Motor der Innenraum geheizt werden. Es ist kein separater Zuheizter notwendig. Des Weiteren kann die APU-Abwärme dem Motor zugeführt werden, so dass der Motor schneller auf Betriebstemperatur kommt und so die MSA-Funktion früher aktiv wird. Eventuell kann die APU-Abwärme bei längeren Motorstillstandszeiten auch dafür sorgen, dass der Motor und vor allem der Abgaskatalysator langsamer auskühlen und so ein besserer Motor-Neustart mit geringeren Emissionen und geringerem Kraftstoffverbrauch möglich ist.

### Rekuperation

Ziel der Rekuperationsstrategie ist es, in Bremsphasen einen möglichst großen Anteil der kinetischen Energie im Fahrzeug durch „*elektrisches Bremsen*“ per Generator in nutzbare elektrische Energie umzuwandeln. Für eine hohe Rekuperationsleistung ist es sowohl wichtig, dass der Generator eine hohe elektrische Leistung hat, als auch eine entsprechende Möglichkeit vorzusehen, die erzeugte Leistung zu verbrauchen oder zwischenspeichern. Dabei soll hier weiterhin das bestehende 14 V-Bordnetz als Basis dienen. [49, 50]

Eine zunehmende Rekuperation spricht zunächst gegen den Einsatz einer APU, da weniger Strom im Fahrzeug durch Kraftstoffeinsatz erzeugt werden muss. Rekuperierte elektrische Energie kostet keinen zusätzlichen Kraftstoff und kann so von der Effizienz nicht überboten werden.

Allerdings schließt eine APU die Nutzung der Rekuperation nicht aus. Voraussetzung, um die selbe Rekuperationsenergie zu erhalten ist, dass Generator und elektrische Speicher nicht verkleinert werden. Ein zusätzlicher elektrischer Energiebedarf, der nicht durch Rekuperation abgedeckt wird, kann weiterhin mit hohem Wirkungsgrad von der APU erzeugt werden.

Zwei kleine Vorteile kann die APU zusätzlich aufweisen. Zum einen ist es denkbar, dass bei einer vorhandenen APU die Energiespeicher vor einer Rekuperationsphase tiefer entladen werden dürfen und so mehr Speicherplatz für die rekuperierte Energie zur Verfügung steht. Dies ist dann zulässig, wenn beim unerwarteten Abstellen des Fahrzeugs der Energiespeicher durch Nachladen wieder auf ein Mindestniveau gebracht werden kann, so dass die Startfähigkeit des Motors erhalten bleibt. Ein zweiter Vorteil einer Kombination von APU und Rekuperation kann sein, dass durch eine optimierte Betriebsstrategie die APU immer im optimalen Wirkungsbereich betrieben wird.

Die APU hat jedoch auch einen Nachteil. Wenn eine Bremsung durch den Fahrer eingeleitet wird, steht schlagartig sehr viel Rekuperationsleistung zur Verfügung. Um diese Leistung zu nutzen muss der Generator sehr schnell hochgefahren werden, was relativ einfach möglich ist. Problematischer ist, dass die APU im selben Moment heruntergefahren werden muss, wenn der Generator bereits den kompletten aktuellen Strombedarf plus die maximale Stromaufnahme des Speichers abdeckt. Bei diesen dynamischen Vorgängen weist die APU eventuell einen erhöhten Kraftstoffverbrauch auf.

### Hybridfahrzeug

Beim Hybridfahrzeug existieren zwei Energiewandler für den Antrieb, ein Verbrennungsmotor und eine E-Maschine. Durch eine höhere elektrische Leistung der E-Maschine ge-

genüber dem Generator und einem größeren elektrischen Energiespeicher, können die beiden Funktionen MSA und Rekuperation besser umgesetzt werden. Zusätzlich besteht beim Hybridfahrzeuge (Full Hybrid) die Möglichkeit, bei niedrigen Geschwindigkeiten den Verbrennungsmotor abzuschalten und elektrisch zu fahren. Die Energie wird dabei aus dem elektrischen Energiespeichern entnommen und muss zu einem späteren Zeitpunkt bei laufendem Verbrennungsmotor wieder nachgeladen werden.

Eine APU kann ein Hybridfahrzeug folgendermaßen weiter optimieren:

- **Reduktion des Gewichts:** Bei gleicher Funktion, d.h. gleicher Anteil elektrischer Fahrt in ausgewählten Vergleichszyklen, kann die Speicherkapazität reduziert werden, da die APU auch während dem elektrischen Fahrbetrieb ständig Strom produziert. Natürlich muss auch hier das Mehrgewicht der APU gegengerechnet werden. Allerdings liegen beim Hybridfahrzeug je nach Auslegung höhere Gewichtsreduktionspotenziale vor als beim heutigen Fahrzeug.
- **Ausdehnung des elektrischen Fahranteils:** Alternativ kann bei gleichem Speicher und gleicher elektrischer Maschine der elektrische Fahranteil mit einer APU erhöht werden, da die Speicher langsamer entleert werden. Dies ist natürlich sehr stark vom Geschwindigkeitsprofil abhängig.
- **Geringere Speicherverluste:** Während elektrischen Fahrphasen kann von der APU erzeugte elektrische Energie direkt für den elektrischen Antrieb genutzt werden. Vom Generator erzeugte Energie muss stets zwischengespeichert werden, was zu Speicherverlusten führt.
- **Nutzung der APU-Wärme:** Ein weiterer Vorteil der APU liegt in der gekoppelten Wärmeproduktion. In längeren elektrischen Fahrphasen entfällt die Heizleistung des Verbrennungsmotors. Während bei Fahrzeugen ohne APU ein separater Zuheizung notwendig ist, kann mit APU die APU-Wärme dem Innenraum zugeführt werden. Außerdem kann die APU-Abwärme genutzt werden um ein Auskühlen des Verbrennungsmotors und der Abgaskatalysatoren zu verlangsamen.

Des Weiteren gelten weiterhin die im Abschnitt *Motor-Stopp-Automatik* und *Rekuperation* beschriebenen Vorteile sowie der direkte Einspareffekt durch eine sehr effiziente Stromerzeugung der APU.

### Weitere Anwendungen

Es sind verschiedene weitere Anwendungen denkbar, z.B. die Nutzung des APU-Reformats für einen emissionsreduzierten Startbetrieb des Verbrennungsmotors, oder die Nutzung einer APU zur Umsetzung von Boil-off-Gasen<sup>25</sup> in einem Wasserstofffahrzeug. Diese Anwendungen sollen hier jedoch nicht weiter betrachtet werden.

### Nachteile der APU

Die APU hat nicht nur Vorteile, sondern auch Nachteile. Zum einen bedeutet die APU zunächst ein zusätzliches Gewicht im Fahrzeug, das den Kraftstoffverbrauch erhöht und

<sup>25</sup>Wasserstoff, der über ein Überdruckventil aus dem Tank abgelassen wird

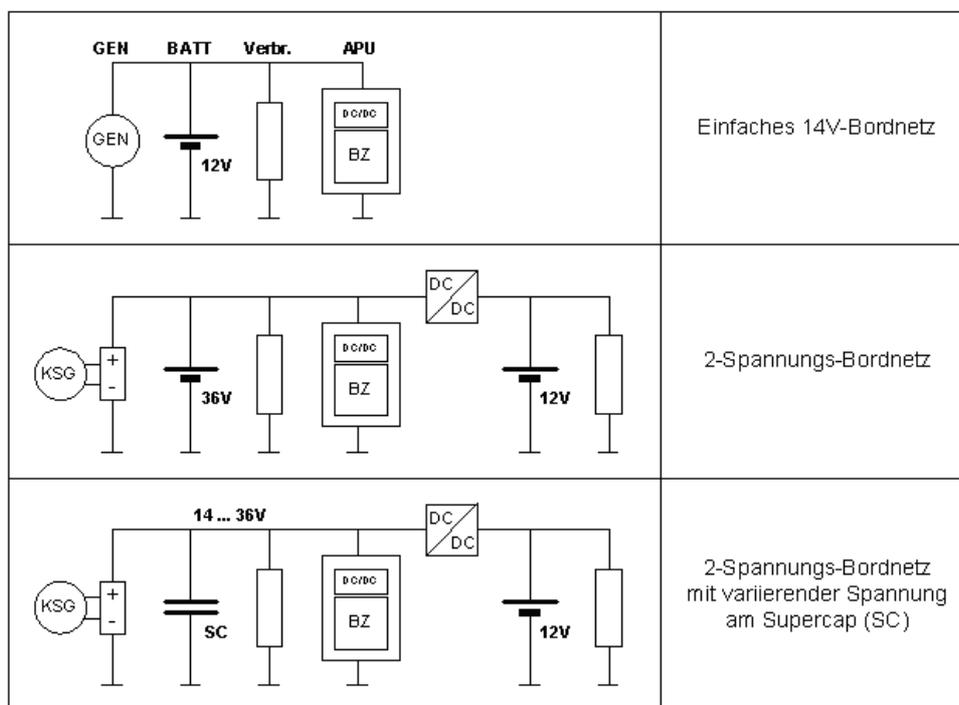
die Fahrleistungen verschlechtert. Zum anderen benötigt die APU Energie (Kraftstoff und elektrische Energie) für den Aufheizvorgang. In wieweit diese Nachteile durch die Vorteile kompensiert werden können, zeigen die Ergebnisse der Verbrauchsberechnungen in Kapitel 4. Zunächst sollen noch die Einbindungsmöglichkeiten der APU ins Fahrzeug betrachtet werden.

### 2.3.2 Einbindung der APU ins Fahrzeug

Die APU erzeugt Strom und Wärme. Will man diese Erzeugnisse nutzen, muss man sie in der gewünschten Menge an die Verbraucher leiten, wobei die Gegebenheiten im Fahrzeug beachtet werden müssen.

#### Einbindung in das Bordnetz

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, variiert die Ausgangsspannung einer Brennstoffzelle, abhängig von der erzeugten Leistung. Soll eine APU in ein Bordnetz integriert werden, muss diese Spannung über einen DC/DC-Wandler an die Bordnetzspannung angepasst werden. Die Bordnetzspannung hängt vor allem von den integrierten Speichern ab. Kleine Variationen der Spannung können zu einem (gezielten) Laden oder Entladen des Speichers führen. Speicher und elektrische Verbraucher sind nur für einen bestimmten Spannungsbereich ausgelegt, so dass die Spannung nicht beliebig variiert werden darf.



**Bild 2.24:** Ausgewählte Bordnetztopologien mit Brennstoffzellen-APU

Teilweise besteht die Möglichkeit, einzelne Verbraucher oder Bordnetzteile direkt über die Brennstoffzelle ohne Wandler zu versorgen. Dies geht dann, wenn die angeschlossenen Komponenten einen zugelassenen Spannungsbereich haben, der größer oder gleich

dem Spannungsbereich der Brennstoffzelle ist. Dies funktioniert z.B. relativ gut bei einem elektrischen Klimakompressor. Generell ist eine möglichst einfache Einbindung ohne DC/DC-Wandler erwünscht, da dieser beim Wandeln der Spannung Verluste aufweist sowie Gewicht, Bauraumbedarf und Kosten verursacht.

In Bild 2.24 sind drei Bordnetzeinbindungen einer APU für verschiedene Grundkonzepte des Bordnetzes dargestellt. Die APU ist jeweils über einen DC/DC-Wandler mit dem restlichen Bordnetz verbunden. Im obersten Bild ist ein herkömmliches  $14\text{ V}^{26}$ -Bordnetz dargestellt. Eine  $12\text{ V}$ -Bleibatterie ist mit den elektrischen Verbrauchern, dem Generator und der Brennstoffzelle parallel geschaltet.

In der Mitte von Bild 2.24 ist ein 2-Spannungs-Bordnetz dargestellt. Neben dem bestehenden  $14\text{ V}$ -Bordnetz wurde eine zweite Spannungsebene von  $42\text{ V}$  geschaffen, inklusive einer  $36\text{ V}$ -Batterie. Der Generator wurde hier durch einen Kurbelwellenstartergenerator (KSG) ersetzt, der über einen Inverter die  $42\text{ V}$ -Ebene speist. Durch das höhere Spannungsniveau wird bei gleichem Strom eine höhere Leistung erreicht. Da viele Leistungshalbleiter eine Strombeschränkung haben, können so bei gleicher Bauweise höhere Leistungen umgesetzt werden. Außerdem fallen in den Leitungen bei gleicher Leistung niedrigere Verlustleistungen an oder die Leitungen können bei gleichem Verlust mit einem kleineren Querschnitt ausgelegt werden. Dies führt zu nicht zu vernachlässigenden Gewichts- und Kosteneinsparungen. Die elektrischen Verbraucher können sowohl an der  $14\text{ V}$ -Seite, als auch auf der  $42\text{ V}$ -Seite angeschlossen werden. Da bei höherer Spannung die Verluste vor allem bei großen elektrischen Verbrauchern tendenziell geringer sind, empfiehlt es sich, diese an die  $42\text{ V}$ -Seite anzuschließen. Damit ist es auch empfehlenswert, die APU auf die  $42\text{ V}$ -Seite zu setzen, so dass bei der Versorgung der großen Verbraucher keine zusätzlichen Verluste am DC/DC-Wandler, der die beiden Spannungsebenen verbindet, entstehen.

Als drittes Beispiel für eine Bordnetztopologie mit APU ist ein 2-Spannungs-Bordnetz mit Supercap anstatt  $36\text{ V}$ -Batterie dargestellt. Der Supercap wird über einen größeren Spannungsbereich betrieben, z.B.  $14\text{ V}$  bis  $36\text{ V}$ . Dabei variiert die Leerlaufspannung des Supercaps in diesem Bereich mit dem Ladezustand. Wird von außen durch Generator und DC/DC-Wandler eine niedrigere Spannung aufgeprägt, wird der Supercap entladen. Bei einer höheren Spannung wird er geladen. Diese Bordnetztopologie mit Supercap eignet sich hervorragend zur Rekuperation von Bremsenergie. Die Brennstoffzellen-APU kann wie oben wieder im oberen Spannungsast integriert werden. Da der Supercap über einen großen Spannungsbereich betrieben werden kann, könnte die APU theoretisch ohne einem zusätzlichen DC/DC-Wandler mit dem oberen Bordnetz-Ast verbunden werden. Dies würde jedoch zu großen Einschränkungen bei der Betriebsstrategie des Supercaps oder der Brennstoffzelle führen, da die beiden Spannungen, sprich Arbeitspunkte, nicht mehr unabhängig voneinander eingestellt werden könnten. Zwei Beispiele sollen dies veranschaulichen:

- Soll der Supercap gezielt entladen werden, um einen Speichervorhalt für kommende Rekuperationsphasen zu schaffen, hieße dies eine Absenkung der Spannung. Die Spannung sinkt jedoch nur, wenn die Brennstoffzelle stark ausgelastet ist und somit eine hohe elektrische Leistung erzeugt. Das heißt, in den meisten Fällen wird hier ein Überangebot an elektrischer Leistung bestehen, da sowohl Brennstoffzelle als

---

<sup>26</sup>zum Teil wird auch vom  $12\text{ V}$ -Bordnetz gesprochen

auch Supercap elektrische Leistung anbieten. Wird diese Leistung nicht abgenommen, kann der Supercap nicht entladen werden. Eventuell kann hier ein kurzzeitiges Abschalten der Brennstoffzelle Abhilfe schaffen. Ein Einschalten der Brennstoffzelle würde jedoch wieder zu einem Laden des Supercaps führen. Das heißt, die Brennstoffzelle müsste bis zur nächsten Rekuperationsphase abgeschaltet bleiben. Damit die APU nicht immer abgeschaltet bleibt, ist es denkbar, ein mittleres Ladeniveau des Supercaps zu definieren. Unterhalb dieses Niveaus wird die APU eingeschaltet und lädt den Supercap auf. Oberhalb des Niveaus wird die APU abgeschaltet. Im besten Fall wird dann die Bordnetzversorgung allein aus dem Supercap bewerkstelligt, der nur in Rekuperationsphasen über den KSG wieder geladen wird. In jedem Fall kann die Leistungsfähigkeit von Supercap und APU nicht voll ausgenutzt werden.

- Günstiger ist der Fall, dass der Supercap stets gut gefüllt sein soll, um in MSA-Phasen die Energieversorgung zu unterstützen. In diesem Fall liefert der Supercap zusätzliche Energie sobald die Leistungserzeugung der APU steigt und damit die Spannung sinkt. Allerdings nimmt der Energieinhalt des Supercaps bei längerer Leistungsabgabe schnell ab, so dass die APU zunehmend die Leistung selbst erzeugen muss. Der Supercap dient hier also mehr als Puffer. Er lässt der APU mehr Zeit zum Nachregeln. Tendenziell wird die APU gleichmäßiger betrieben und kann so einen höheren mittleren Wirkungsgrad erreichen. Allerdings ist es fraglich, ob dies den Einbau eines Supercaps rechtfertigt.

Das heißt, der DC/DC-Wandler zur Einbindung der APU ins Bordnetz wird weiterhin bei allen betrachteten Varianten als sinnvoll erachtet.

Bisher konnte sich das 2-Spannungsbordnetz nicht durchsetzen, unter anderem, da kein Zulieferer von 14 V-Komponenten in Vorleistung bei der Umstellung auf 42 V treten wollte. Durch den derzeitigen Trend zur Hybridisierung von Fahrzeugen geht die Tendenz Richtung 2-Spannungs-Bordnetzen mit Spannungsniveaus größer 100 V. In dieser Arbeit soll in erster Linie das bestehende 14 V-Bordnetz betrachtet werden.

#### Einbindung in das Wärmemanagement

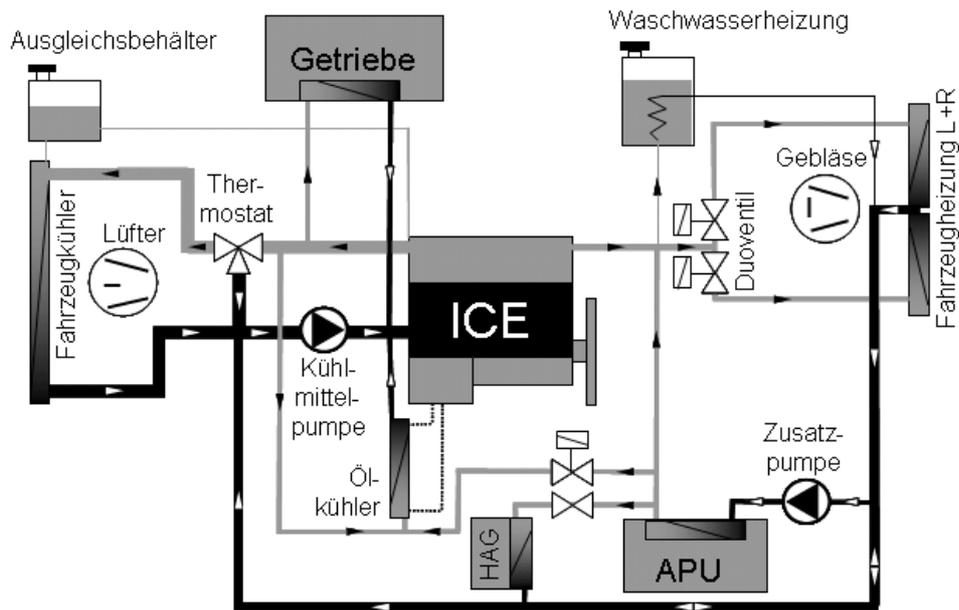
Die thermische Leistung der APU ist zunächst in der Abgasenthalpie enthalten. Nun besteht die Möglichkeit dieses Abgas als Wärmequelle direkt einzusetzen, indem es z.B. durch Aggregate geführt oder zum Anblasen des Hinterachsgetriebes genutzt wird. Diese Möglichkeit stellt sich jedoch nicht als besonders günstig heraus, da keine exakte Gasführung gegeben ist und die Gefahr besteht, dass Abgase im Extremfall in den Innenraum gelangen.

Günstiger ist es, die Wärme im Abgas über einen Wärmetauschprozess einem Transportmedium zuzuführen. Folgende drei Medien sind denkbar:

- **Luft:** Für die Aufheizung des Innenraums könnte die aufzuwärmende Frischluft direkt über den Abgas-Wärmeübertrager geführt werden, so wie es größtenteils bei LKW-Standheizungen üblich ist. Diese Möglichkeit bedeutet jedoch je nach Sitz der APU eine aufwändige Führung der Frischluft. Wenn die APU im Fahrzeugheck verbaut ist, ist diese Möglichkeit nahezu ausgeschlossen. Außerdem ist mit dieser

Möglichkeit nur die Fahrzeugheizung berücksichtigt, nicht jedoch der Wunsch die APU-Abwärme zur Aggregatevorwärmung zu nutzen.

- **Öl:** Die Aggregatevorwärmung könnte gut über einen Abgas-Motoröl-Wärmeübertrager realisiert werden. Das Motoröl wird (teilweise) vom Ölkreislauf abgezweigt und durch die APU-Abwärme erwärmt. Da die APU-Abgase sehr hohe Temperaturen haben können, wirft diese Möglichkeit sicherheitstechnische Fragestellungen auf, da das Öl sich in keinem Fall, auch im Falle von Leckagen, entzünden darf. Deshalb wird auch diese Möglichkeit nicht weiter verfolgt.
- **Wasser:** Als dritte Möglichkeit bietet sich die Verwendung von Wasser als Transportmedium an. Hier besteht der Vorteil, dass ein Kühlmittelkreislauf im Fahrzeug bereits vorhanden ist. Der Kreislauf muss nur noch intelligent mit der APU verbunden werden. Heizung und Verbrennungsmotor sind bereits angeschlossen. Eventuell ist wie bei einer Standheizung noch eine zusätzliche Wasserpumpe notwendig. Da Wasser eine sehr hohe spezifische Wärmekapazität hat, eignet es sich auch, die Wärme über größere Strecken zu transportieren, z.B. aus dem Heckbereich in den Motorraum. Eine Einbindung des Hinterachsgetriebes in das Wärmemanagement würde noch eine Verbindung des Kühlkreislafs mit dem Bauteil erfordern, was nicht einfach ist und sich nur bei großem Nutzen lohnt.



**Bild 2.25:** Einbindung der APU in den Kühlmittelkreislauf (Kühlmittelkreislauf ohne APU weitgehend von [51] adaptiert)

Eine Anpassung des Kühlmittelkreislaufs muss verschiedene Auslegungskriterien und Anforderungen berücksichtigen. So müssen z.B. die Wärmeströme und die Druckabfälle bei der Auslegung berücksichtigt werden. Auf die Details soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Eine funktionale Übersicht eines Kühlmittelkreislaufs mit eingebundener APU ist in Bild 2.25 dargestellt.

### Einbindung in Betriebsstrategien

Eine APU im Fahrzeug muss auch in verschiedenen Betriebsstrategien berücksichtigt werden. Vor allem in den Betriebsstrategien von MSA, Rekuperation und Hybrid werden zumindest die Parameter angepasst. Zusätzlich muss entschieden werden, welches Master-System die APU in Betrieb setzt. Eine Inbetriebnahme kann z.B. durch den Zündschlüsselschalter oder durch eine Aktivierung der Standklimatisierung oder Standheizung erfolgen. In dieser Arbeit wird bei einem Fahrzeug mit APU davon ausgegangen, dass bei Zyklusstart auch automatisch die APU gestartet wird.

Wird eine APU als Sonderausstattung „add-on“ in ein bestehendes Fahrzeug integriert, ist eventuell eine Integration der APU in die bestehenden Betriebsstrategien schwierig. Hier besteht die Möglichkeit der APU als Soll-Spannung die Generator-Sollspannung plus einem Aufschlag vorzugeben. Dadurch wird stets eine primäre Stromerzeugung durch die APU gewährleistet. Der Generator und die Batterie dienen dann zur Pufferung, wenn die APU nicht genügend elektrische Leistung produzieren kann. Die Umsetzung der Betriebsstrategien im Simulationsmodell wird in Kapitel 3 beschrieben.

### 2.3.3 Zusammenfassung der Anwendungsmöglichkeiten

In den letzten Abschnitten wurden interessante Anwendungsmöglichkeiten aufgezählt. In Tabelle 2.6 sind alle angesprochenen Anwendungen aufgeführt und mit einer qualitativen Bewertung aufgrund der in den obigen Abschnitten aufgeführten Erkenntnissen versehen. Die Elektrifizierung der Nebenaggregate sowie der Eingriff in den Verbrennungsmotor und den Antriebsstrang wurden mit „0“ bewertet, da die APU bei der Erschließung vorhandener Einsparpotenziale nur eine untergeordnete Rolle spielt. Bereits heute findet eine Elektrifizierung der Lenkunterstützung und der Wasserpumpe ohne APU statt. Ebenfalls mit „0“ bewertet wurden Einsparpotenziale durch die Gewichtsreduktion sowie durch die direkte Wärmeproduktion. Dass eine Gewichtsreduktion des Gesamtfahrzeugs durch die APU nur schwer erreichbar ist, wurde oben beschrieben. Bei der Nutzung der APU zur reinen Wärmeproduktion ist die APU nicht effizienter als ein Kraftstoffzuheizer. Erst durch die Nutzung von Abwärme bei der Stromerzeugung (Kraft-Wärme-Kopplung) wird die Wärmeproduktion der APU interessant. Dieser Punkt ist als indirekter Einspareffekt unter „Nutzung Abwärme“ aufgeführt. Alle mit „0“ bewerteten Anwendungen werden im weiteren nicht mehr betrachtet.

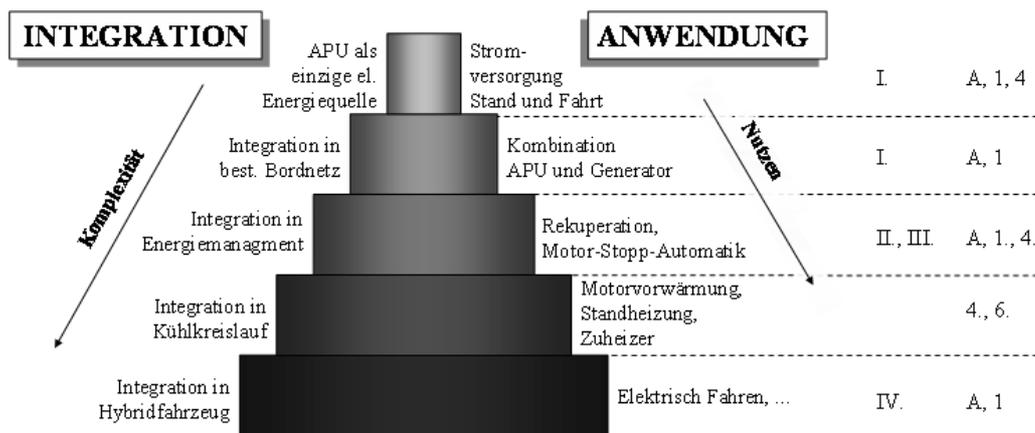
Direkte Einspareffekte	+ Indirekte Einspareffekte	... in Kombination mit folgenden neuen Fahrzeugfunktionen	
A: Strom	++	1. Reduktion elektr. Speicherverluste	+
		2. Elektrifizierung von Nebenaggregaten	0
		3. Eingriff in Verbrennungsmotor und Antriebsstrang	0
B: Wärme	0	4. Standfunktionen bei stehendem Motor	++
		5. Gewichtsreduktion	0
		6. Nutzung Abwärme	+
		I. (heute)	+
		II. Rekuperation	+
		III. Motor-Stopp-Automatik (MSA)	++
		IV. Hybrid (Elektr. Fahren, Rekuperation, MSA)	++

**Tabelle 2.6:** Übersicht betrachtete Integrationsstufen APU

Neben der Nutzung von APU-Abwärme wird die Reduktion von elektrischen Speicherverlusten als untersuchenswert betrachtet. Beide Punkte sind in Tabelle 2.6 mit einem „+“ markiert. Als besonders interessant („++“) werden die direkten Wirkungsgradvorteile bei der Stromerzeugung und vor allem alle Standfunktionen mit elektrischem Energiebedarf

oder Wärmebedarf angesehen. Bei den Betriebsstrategien werden die MSA-Funktion und die Hybrid-Funktionen, hier vor allem das elektrische Fahren, als besonders interessant erachtet.

Verschiedene Anwendungen, z.B. die Nutzung von Abwärme, verlangen eine tiefere Integration der APU ins Fahrzeug. Das heißt, die Anwendungen können nicht mehr unabhängig vom Grad der Fahrzeugintegration betrachtet werden. In Bild 2.26 sind mehrere Integrationsstufen aufgeführt. Die als interessant identifizierten Anwendungen sind auf der rechten Seite zugeordnet. Die Zahlen und Buchstaben beziehen sich auf die Nummerierung in Tabelle 2.6.



**Bild 2.26:** Übersicht betrachtete Integrationsstufen APU

Solange kein Generator verbaut bzw. im Betrieb ist, z.B. bei Standanwendungen, reicht bei der APU eine einfache konstante Spannungsvorgabe aus. Sobald eine APU und ein Generator gleichzeitig im Fahrzeug Strom erzeugen, muss eine Betriebsstrategie vorgesehen werden. In Kapitel 2.3.2 ist eine einfache Möglichkeit aufgezeigt, wie die APU ins bestehende Bordnetz integriert wird, ohne dass eine zusätzliche Integration ins Energiemanagement des Fahrzeugs notwendig ist. Dies ist vor allem dann interessant, wenn die APU als Sonderausstattung im Fahrzeug verbaut ist und das Energiemanagement des Basisfahrzeugs nicht angepasst werden muss.

Wenn jedoch die Vorteile der Rekuperation und der Motor-Stopp-Automatik auch mit APU voll genutzt werden sollen, ist eine Berücksichtigung der APU im Energiemanagement notwendig. Bei der Verwendung der APU-Abwärme ist zusätzlich eine Integration der APU in den Kühlkreislauf des Fahrzeugs erforderlich, siehe Kapitel 2.3.2. Zum Schluss soll noch eine Integration der APU in ein Hybridfahrzeug betrachtet werden.

Mit jeder Integrationsstufe nehmen die Anwendungsmöglichkeiten zu und steigt der Nutzen. Allerdings nimmt auch die Komplexität des Gesamtsystems stetig zu. Spätestens bei der Integration ins Hybridfahrzeug dürfte dies einen Grad erreicht haben, der dazu führt, dass die APU als fester Bestandteil des Serienfahrzeugs entwickelt wird. Eine teilweise Ausstattung der Fahrzeuge mit einer APU als Sonderausstattung ist hier eventuell nicht mehr sinnvoll.

### 3 Berechnungsmethoden zum Kraftstoffverbrauch

Im vorherigen Kapitel wurden die technischen Eigenschaften der APU, die Einbindung ins Fahrzeug sowie mögliche Anwendungen einer APU zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs diskutiert. Das Kraftstoffeinsparpotenzial mit APU soll nun quantifiziert werden. Dazu stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, angefangen von der einfachen Abschätzung, bis zur Bestimmung über Messungen. Jede Methode hat Vor- und Nachteile. Eine einfache Abschätzung hat den Vorteil, dass sie sehr schnell zu Aussagen führt. Messungen bedeuten meist einen relativ großen Aufwand, führen dafür aber zu wesentlich genaueren Ergebnissen. In diesem Kapitel sollen mehrere Methoden zur Bestimmung des Einsparpotenzials einer APU dargestellt und bewertet werden. Ziel ist es, die Vor- und Nachteile der Methoden darzustellen sowie Einsatzgebiete und Grenzen aufzuzeigen. Eine Methode soll für die weiteren Betrachtungen ausgewählt werden.

<b>Abschätzung</b>	<b>Simulation</b>	<b>Messung</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Betrachtung von Zeitverläufen – Berechnungen mit Mittelwerten</li> <li>• Starke Vereinfachung</li> <li>• Nutzung von Erkenntnissen aus bestehenden Simulationen und Messungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzung bestehendes Fahrzeuggrundmodell</li> <li>• Abbildung der APU mit verschiedenen Detaillierungsgraden</li> <li>• Abbildung des Bordnetzes mit verschiedenen Detaillierungsgraden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Messungen auf Rollenprüfstand</li> <li>• abhängig von vorhandener Hardware</li> </ul>
<b>MS Excel</b>	<b>AVL Cruise + Simulink</b>	<b>Prüfstand + Messtechnik</b>

*Tabelle 3.1: Übersicht Methoden zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs*

Behandelt werden die Möglichkeiten der einfachen Abschätzung, der Simulation und der Messung, siehe Tabelle 3.1. Während es sich bei der Abschätzung vor allem um die Rechnung mit Mittelwerten handelt, werden bei der Simulation Zeitverläufe betrachtet. Bei der Simulation werden verschiedene Detaillierungsgrade bei der Modellierung verfolgt. Messungen können nur in einem begrenzten Umfang durchgeführt werden, abhängig von der vorhandenen Hardware und den verfügbaren Prüfmitteln. Sie dienen vor allem zur Validierung der Simulationsmodelle. Eine Beschreibung der einzelnen Methoden folgt in den nächsten Abschnitten. Zuvor wird noch auf die Bildung von Szenarien eingegangen, die bei jeder Berechnung, unabhängig von der Methode, zur Definition der Eingangsgrößen und Parameter notwendig ist.

#### 3.1 Definition von Szenarien

Zur Bestimmung des Potenzials einer APU zur Verbrauchsreduktion muss der Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs mit APU mit dem eines Fahrzeugs ohne APU verglichen werden. Zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs müssen Fahrzeug und Fahrzyklus definiert werden. Sowohl beim Fahrzeug als auch beim Fahrzyklus ist eine Betrachtung verschiedener Variationen notwendig. Über die Variation von Zyklen wird eine Vielzahl von Nutzungsprofilen abgedeckt. Durch Variation von Fahrzeugparametern und -komponenten, z.B. Gewicht oder Generatorgröße, kann die Übertragbarkeit von Potenzialaussagen auf

andere Fahrzeuge geprüft werden. Neben der Variation von Komponenten, ist auch eine Variation von Betriebsstrategien notwendig, so dass die in Kapitel 2 beschriebenen APU-Anwendungen und Integrationsstufen abgebildet werden können.

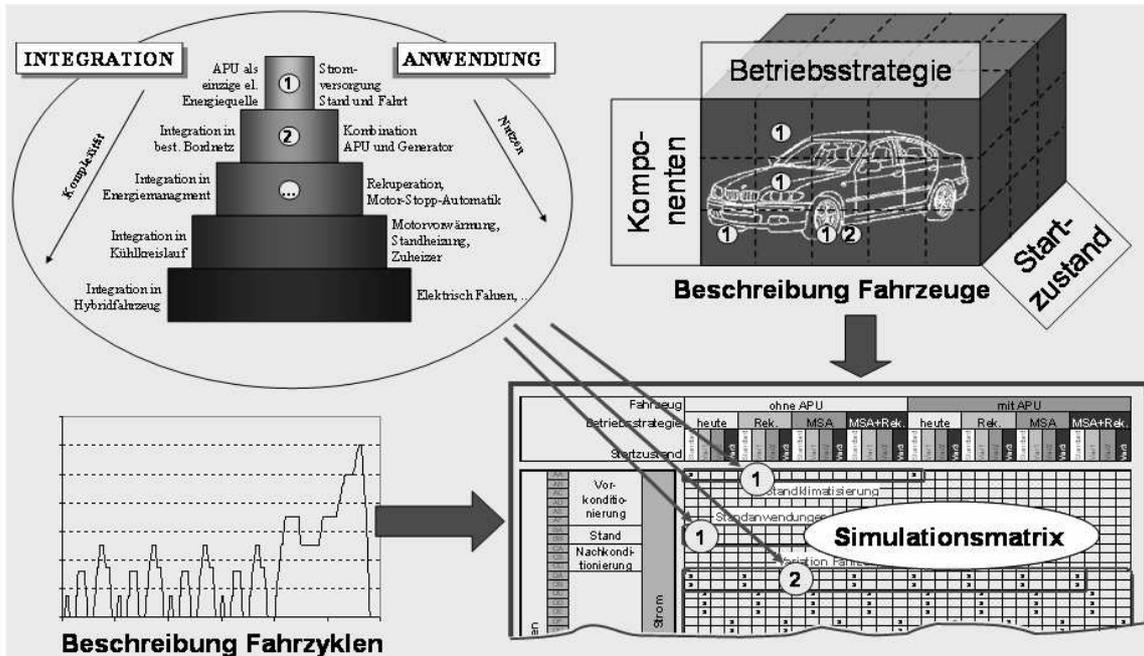


Bild 3.1: Schritte zur Simulationsmatrix

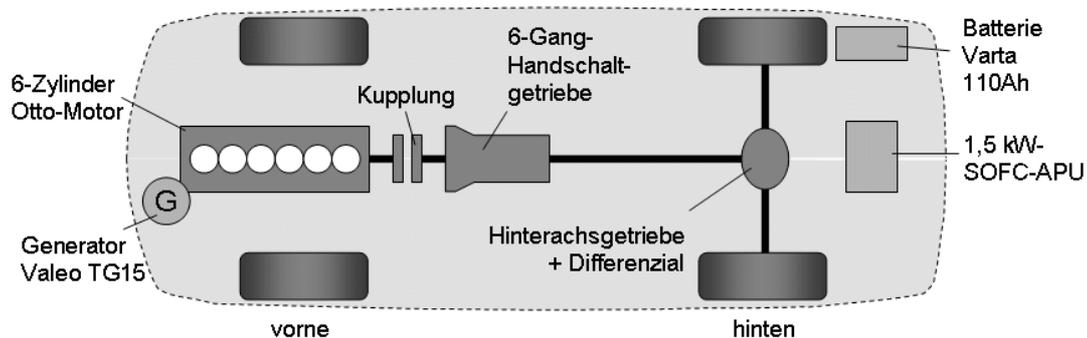
Ausgehend von verschiedenen Variationsmöglichkeiten von Fahrzeugen und Fahrzyklen wird eine Simulationsmatrix aufgestellt, siehe Bild 3.1, die eine Vielzahl interessanter Kombinationsmöglichkeiten wiedergibt. Auf Grundlage dieser Simulationsmatrix werden Inputparameter für nachfolgende Berechnungen zusammengestellt. Da eine Betrachtung aller Kombinationsmöglichkeiten zu viele Varianten erzeugen würde, wird eine Auswahl der interessantesten Kombinationen durchgeführt. Ziel ist es, ein breites Betrachtungsfeld aufzuspannen, wobei ...

- ... alle in Kapitel 2 beschriebenen Anwendungen abgebildet werden sollen. Dabei ist es wichtig, dass die Anwendungen in den betrachteten Fahrzyklen auch aktiv sind. Dies trifft z.B. bei der Kombination Motor-Stopp-Automatik und Autobahnzyklus nicht zu.
- ... ein möglichst breites Feld abgedeckt wird, so dass eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Fahrzeuge und andere (ähnliche) Nutzungsprofile möglich ist.

### 3.1.1 Fahrzeug

Als Basisfahrzeug wird ein BMW 530i verwendet, der auch als Versuchsfahrzeug für Messungen zur Verfügung steht. Da das Fahrzeug als reales Versuchsfahrzeug existiert, liegt eine sehr detaillierte Beschreibung des Fahrzeugs, inklusive aller Einzelkomponenten und Sonderausstattungen, vor. Für die Betrachtung des Kraftstoffverbrauchs sind die meisten Angaben nicht relevant, so dass die Darstellung in einer abstrahierten Form wie in

Kapitel 2.1 beschrieben ausreichend ist. In Bild 3.2 ist der Antriebsstrang des Fahrzeugs dargestellt. Die Grunddaten des Fahrzeugs sind im Anhang auf S. 150 aufgeführt.



**Bild 3.2:** Antriebsstrang und Hauptkomponenten des Basisfahrzeugs, inkl. eingezeichneter SOFC-APU

Ausgehend von diesem Fahrzeug wird eine Variante mit 1,5 kW SOFC-APU abgeleitet. Zusätzlich wird eine Hybridvariante mit und ohne APU<sup>27</sup> untersucht. Die Hybridvariante wird im Kapitel 4 im Rahmen der Hybriduntersuchungen genauer beschrieben.

### Komponenten

Das Fahrzeug besteht aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten. Die wesentlichen Komponenten mit möglichem Einfluss auf das APU-Potenzial sind Verbrennungsmotor, Generator und Batterie.

- Beim Verbrennungsmotor des Basisfahrzeugs handelt es sich um einen 6-Zylinder Otto-Motor mit 3,0 l Hubraum. Das Wirkungsgradkennfeld ist in Bild 2.3 im Kapitel 2.1.2 dargestellt.
- Der Generator, ein Klauenpolgenerator, stammt von der Firma Valeo und hat einen Nennstrom von 150 A.
- Bei der Batterie wird als Basis von einer 110 Ah Bleibatterie der Firma Varta ausgegangen, analog der im Versuchsfahrzeug integrierten Batterie. In der Serienausstattung sind meist kleinere Batterien verbaut.

Alle Komponenten sind in den Betrachtungen einzeln austauschbar, z.B. der 3,0 l Otto-Motor im Basisfahrzeug durch einen 3,0 l Diesel-Motor. Die Einflüsse unterschiedlicher Komponenten werden über Einzelvariationen im Kapitel 4.6 ermittelt. Die elektrischen Verbraucher werden nicht einzeln, sondern als Lastkollektiv betrachtet.

### Betriebsstrategien

Neben der Fahrzeughardware spielt die Steuerung und Regelung der Komponenten eine große Rolle. Dabei geht es sowohl um den Betrieb der Einzelkomponenten, als auch um das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten im Fahrzeug. Die Umsetzung der Steuerungslogik und Regelungsalgorithmik erfolgt auf Basis von Betriebsstrategien. Folgende vier Betriebsstrategien sollen in den nachfolgenden Berechnungen betrachtet werden:

<sup>27</sup>Betrachtung von zwei APU-Größen: 1,5 kW und 3,0 kW

- **heute:** Abbildung des heutigen Fahrzeugs ohne Rekuperation und MSA-Funktion
- **Rek.:** Rekuperationsfunktion
- **MSA:** Motor-Stopp-Automatik
- **MSA+Rek.:** Kombination Motor-Stopp-Automatik und Rekuperationsfunktion

Hinter einer Betriebsstrategie, z.B. der MSA-Funktion, stecken viele Teilfunktionen. Bei der MSA-Funktion ist z.B. eine Teilfunktion die Motorabschaltverzögerung, die das Abschalten des Verbrennungsmotors erst nach 2 s erlaubt. Der Wert von 2 s ist parametrisierbar. Insgesamt existieren eine Vielzahl von einstellbaren Werten, so dass bei jeder Betriebsstrategie neben der Logik- und Algorithmuserstellung eine Parametrisierung erfolgen muss. Dafür wurden mehrere Parametersätze definiert und getestet. Zum Schluss wurde für jede Funktion ein Parametersatz ausgewählt, wobei auf eine realistische Umsetzbarkeit im Fahrzeug geachtet wurde. Für ein Fahrzeug mit APU wird kein separater Parametersatz verwendet, da sonst keine Unterscheidung mehr möglich ist, ob Einsparungen eher auf die geänderte Betriebsstrategie oder direkt auf die APU zurückzuführen sind. Allerdings ist es durchaus vorstellbar, dass mit einer APU andere Parameter möglich sind, z.B. eine Nutzung von MSA bei niedrigeren Batterieladezuständen, da eine elektrische Energieversorgung im Stand gegeben ist.

### Startzustände

Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Zustand des Fahrzeugs zu Beginn einer Betrachtung. Wenn z.B. der Verbrennungsmotor bei Fahrtbeginn bereits warm ist, hat dies eine große Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch. In Tabelle 3.2 sind die betrachteten Startzustände relevanter Komponenten aufgeführt, wobei durch Kombination mehrerer Möglichkeiten vier Szenarien erstellt wurden.

Szenario Startzustand:	Standard	Var1	Var2	Var3
Motor, Antriebsstrang, Kühlsystem:	kalt <sup>1</sup>	heiß <sup>2</sup>	heiß	kalt
SOFC-APU:	kalt <sup>1</sup>	heiß <sup>2</sup>	warm <sup>3</sup>	kalt
Ladezustand (SoC) el. Speicher:	100 %	100 %	70 %	50 %

<sup>1</sup> Umgebungstemperatur, <sup>2</sup> Betriebstemperatur, <sup>3</sup> Temperatur nach 6 h Stand

**Tabelle 3.2:** Definition der Startzustände

Oft wird der Startzustand, vor allem der des Verbrennungsmotors, über den Fahrzyklus vorgegeben.

### 3.1.2 Fahrzyklus

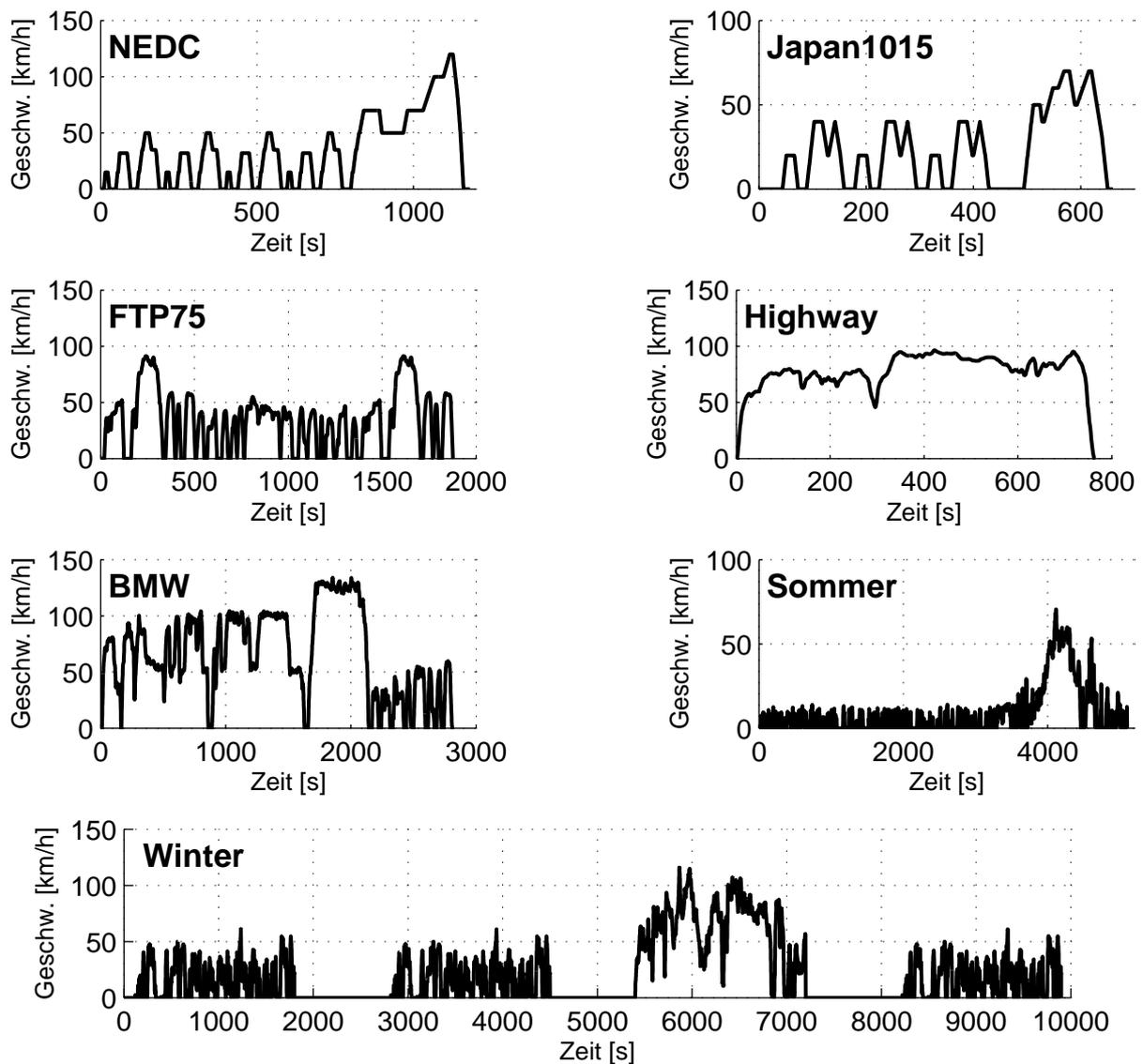
Ein Fahrzyklus wird durch folgende Punkte definiert:

- Dauer des Fahrzyklus
- Geschwindigkeitsprofil, teilweise inkl. Gangvorgabe

- Einschaltprofil der elektrischen Verbraucher
- Klimatisierungs- und Heizleistungsanforderungen
- Streckenbeschreibung (Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Reibwert, ...)

Höhenprofile und Kurvenverläufe werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Nachfolgend werden sieben ausgewählte Fahrzyklen kurz beschrieben. Die Geschwindigkeitsverläufe der Fahrzyklen sind in Bild 3.3 abgebildet.

- **NEDC**: Der „Neue Europäische Fahrzyklus“ (**N**ew **E**uropean **D**riving **C**ycle) wird von der Europäischen Union zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs und der Abgasschadstoffe von Fahrzeugen vorgegeben. Der *NEDC* besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil wird ein Stadtzyklus vier mal durchlaufen. Im zweiten Teil folgt eine Überlandfahrt mit einer Geschwindigkeit von bis zu  $120\text{ km/h}$ . Neben der Geschwindigkeit wird vom Gesetzgeber bei Schaltgetrieben auch die Gangposition vorgegeben. Der *NEDC* wird mit kaltem Motor gestartet. Beim *NEDC* handelt es sich um einen künstlich erstellten Zyklus mit geringer Dynamik, der nur bedingt das tatsächliche Fahrerverhalten abbildet.
- **Japan1015**: Der Japan-1015 Zyklus, auch 10+15 Hot Mode Cycle genannt, ist dem *NEDC* ähnlich. Er startet jedoch mit warmem Motor und beinhaltet längere Leerlaufphasen. Außerdem erreicht er nur eine maximale Geschwindigkeit von  $70\text{ km/h}$ .
- **FTP75**: Der *FTP75*-Zyklus (**F**ederal **T**est **P**rocedure) wird in den USA für Emissionstests eingesetzt. Er ist auch unter den Namen City Cycle und EPA III bekannt. Der *FTP75* ist wesentlich dynamischer als der *NEDC* oder der *Japan1015*. Der Zyklus wird kalt gestartet.
- **Highway**: Der **H**ighway **F**uel **E**conomy **T**est (HWFET) bildet eine Fahrt auf einem Highway in den USA ab. Im Unterschied zu den anderen Zyklen treten keine Standphasen und kein Leerlauf auf.
- **BMW**: Hier handelt es sich um einen Fahrzyklus, der bei BMW zur Abschätzung des Kundenverbrauchs verwendet wird. Der Zyklus ist gegenüber dem *NEDC* wesentlich dynamischer und beinhaltet höhere Geschwindigkeiten.
- **Sommer**: Auch dieser Zyklus wird bei BMW verwendet, jedoch nicht für Aussagen zum Kraftstoffverbrauch sondern zur Auslegung des Bordnetzes. Es handelt sich um einen extremen Stadtverkehr, wie er z.B. in Tokyo während der Rushhour auftritt. Der Zyklus zeichnet sich durch niedrige Geschwindigkeiten, viele Standphasen und damit einem sehr niedrigen Drehzahlniveau aus. Zusätzlich wird bei diesem Zyklus eine hohe Umgebungstemperatur angenommen, die zu einem hohen Strombedarf für die Klimatisierung führt.
- **Winter**: Wie der Sommer-Zyklus dient auch der Winter-Zyklus bei BMW zur Bordnetzauslegung. Hier werden ähnlich wie beim *NEDC* Stadt- und Überlandfahrtanteile kombiniert. Im Gegensatz zum *NEDC* handelt es sich jedoch um einen aus



*Bild 3.3: Geschwindigkeitsprofile der betrachteten Fahrzyklen*

Messfahrten abgeleiteten Zyklus mit einer wesentlich höheren Dynamik. Der Zyklus dauert sehr lange. Er beinhaltet drei längere Standphasen, in denen der Motor auch ohne MSA-Funktion abgestellt wird. Die Umgebungstemperatur beträgt  $-20^{\circ}\text{C}$ . Gebläse, Sitz- und Heckscheibenheizung führen zu einem hohen elektrischen Energiebedarf.

Darüber hinaus stehen noch Standprofile und Profile mit konstanter Geschwindigkeit zur Verfügung. In Tabelle 3.3 sind charakteristische Größen zum Vergleich der Fahrzyklen aufgeführt.

### 3.2 Abschätzung von Verbräuchen

Das Ziel der einfachen Abschätzung ist es, innerhalb kurzer Zeit Aussagen zum Potenzial einer APU zu generieren, auch wenn nur wenige Inputdaten zur Verfügung stehen. Des

Zyklus:	NEDC	Japan1015	FTP75	Highway	BMW	Sommer	Winter
Dauer [min]:	20	11	31	13	47	85	165
Ø Geschwindigkeit [km/h]:	33,6	24,8	34,1	77,6	65,6	9,3	32,5
Max. Geschwindigkeit [km/h]:	120,0	70,0	91,3	96,4	133,9	70,0	115,8
Strecke [km]:	11,0	4,2	17,8	16,5	52,0	13,1	55,1
Anteil Stand [%]:	23,7	31,4	18,0	0,5	8,4	25,5	20,7 / 43,5 *
Warmstart:	nein	ja	nein	ja	ja	nein	nein
Ø El. Verbrauch [W]:	392	383	383	383	798	927	1143
Umgebungstemperatur [°C]:	24	24	24	24	24	40	-20

\* ohne / mit Berücksichtigung der drei Standphasen mit abgestelltem Verbrennungsmotor

**Tabelle 3.3:** Charakteristische Größen von ausgewählten Fahrzyklen

weiteren kann die Abschätzung als erstes Instrument dienen, um Tendenzen zu erkennen und Schwerpunkte für nachfolgende, detaillierte Simulationen zu setzen. Bei der Analyse von Ergebnissen sind die physikalischen Wirkzusammenhänge bei einer Abschätzung manchmal leichter zu erkennen als in einer komplexen Simulation.

In dieser Arbeit erfolgt die Abschätzung des Kraftstoffverbrauchs durch Addition von Teilverbräuchen. Die Teilverbräuche werden über einfache physikalische Zusammenhänge ermittelt oder durch Abstraktion von Ergebnissen komplexer Simulationen abgeleitet. Es werden keine zeitlichen Verläufe betrachtet. Die Zulässigkeit bzw. Grenzen dieses Vorgehens wird durch den Abgleich mit einem vollständigen Simulationsmodell überprüft.

### 3.2.1 Teilverbräuche

Folgende Teilverbräuche werden betrachtet:

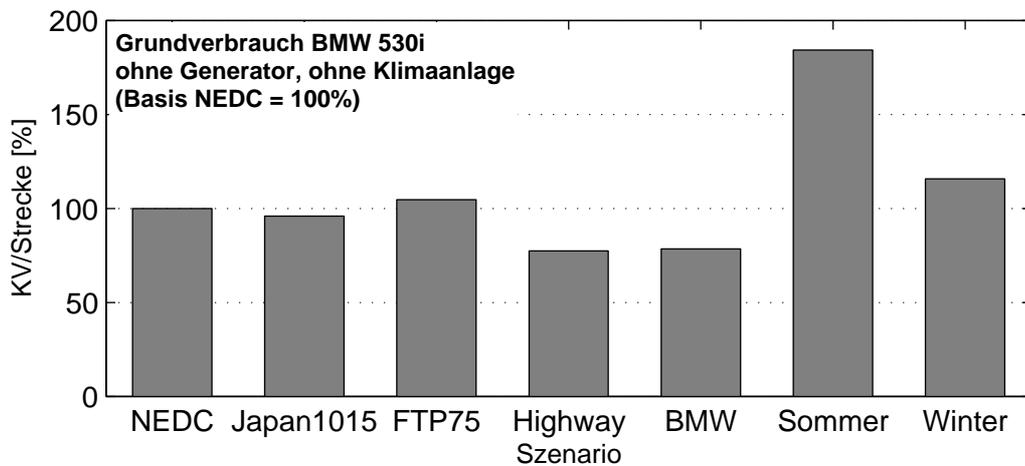
- Grundverbrauch des Fahrzeugs
- Mehrverbrauch durch das Zusatzgewicht
- Mehrverbrauch durch die Stromerzeugung
- Mehrverbrauch durch den APU-Startup
- Mehrverbrauch durch die Klimatisierung
- Mehrverbrauch durch den Zuheizter
- Minderverbrauch durch die MSA-Funktion
- Minderverbrauch durch die Aggregatevorwärmung

#### Grundverbrauch des Fahrzeugs

Der Grundverbrauch eines Fahrzeugs ist hier der Kraftstoffverbrauch, der sowohl bei einem Fahrzeug mit als auch ohne APU anfällt. Das heißt, im Grundverbrauch darf weder die

Stromerzeugung, noch Heizung oder Klimatisierung enthalten sein, da diese Anteile durch eine APU beeinflusst werden.

Der Grundverbrauch hängt vom Fahrzyklus und vom Fahrzeug ab, insbesondere vom Motor. Er kann über vorhandene Simulationstools bestimmt werden. Bei einem Vergleich von einem Fahrzeug mit und ohne APU spielt der Grundverbrauch keine Rolle, da er bei beiden Fahrzeugen den gleichen Betrag hat. Auswirkungen hat er jedoch, wenn der Verbrauchsunterschied auf den Gesamtkraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs bezogen wird. In Bild 3.4 ist der Grundverbrauch für die in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Fahrzyklen dargestellt. Vereinfacht wird für die Abschätzung stets der Grundverbrauch des *NEDC* herangezogen.



**Bild 3.4:** Grundverbrauch eines BMW 530i in verschiedenen Fahrzyklen, berechnet mit dem Simulationsprogramm Cruise

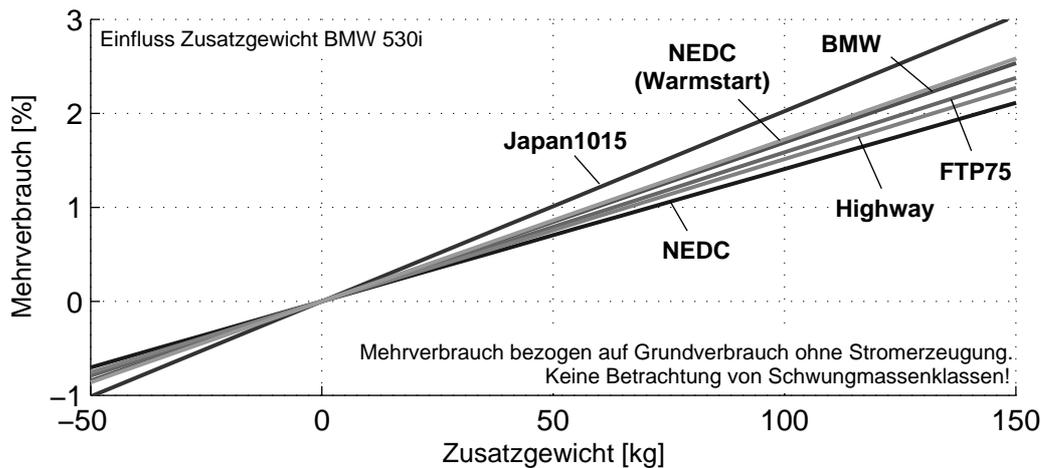
#### Mehrverbrauch durch das Zusatzgewicht

Ein erhöhtes Fahrzeuggewicht hat einen erhöhten Kraftstoffverbrauch zur Folge. In Bild 3.5 ist der Zusammenhang des Kraftstoffverbrauchs und des Fahrzeuggewichts bei verschiedenen Zyklen abgebildet. Es besteht weitgehend ein linearer Zusammenhang.

Die bestehenden Unterschiede resultieren aus unterschiedlich ausgeprägten Beschleunigungsanteilen sowie aus Unterschieden bei kalt und warm gestartetem Fahrzeug. Bei einem kalt gestarteten Fahrzeug ist der spezifische Mehrverbrauch prinzipiell niedriger, da ein höheres Zusatzgewicht zu einer höheren Belastung des Verbrennungsmotors führt. Dadurch wird der Betriebspunkt des Motors schneller erreicht und ein Teil des Mehrverbrauchs wieder kompensiert.

Der Mehrverbrauch im *NEDC* beträgt  $0,137 \frac{l}{100 km \cdot 100 kg}$ . Die Spanne des Wertes bei den untersuchten Fahrzyklen beträgt  $0,090 \frac{l}{100 km \cdot 100 kg}$  (*Highway*) bis  $0,187 \frac{l}{100 km \cdot 100 kg}$  (*Japan1015*). Eberle [52] hat in seiner Arbeit ähnliche Ergebnisse erzielt. Er gibt für den *NEDC* einen Wert von  $0,134 \frac{l}{100 km \cdot 100 kg}$  an. Für den warm gestarteten *NEDC* gibt Eberle einen um  $0,013 \frac{l}{100 km \cdot 100 kg}$  höheren Wert an. Die von ihm untersuchten Alltagszyklen weisen Werte bis zu  $0,235 \frac{l}{100 km \cdot 100 kg}$  auf.

Die Berechnung des Mehrverbrauchs durch Zusatzgewicht erfolgt über folgende Formel:



**Bild 3.5:** Mehrverbrauch durch das Zusatzgewicht bei verschiedenen Fahrzyklen, ermittelt durch eine Parametervariation mit dem Simulationsprogramm Cruise

$$\Delta KV_{\text{Zusatzgewicht}} [kJ] = k \cdot \frac{m_{\text{Zusatz}}}{100 \text{ kg}} \cdot \frac{s_{\text{Zyklus}}}{100 \text{ km}} \cdot \text{Heizwert} \cdot \text{Dichte}_{\text{Kraftstoff}} \quad (3.1)$$

In Tabelle 3.4 sind die für jeden Zyklus idealen Konstanten  $k$  angegeben. Für eine zyklusunabhängige Abschätzung des Mehrverbrauchs wird für  $k$  ein mittlerer Wert von  $0,14 \frac{l}{100 \text{ km} \cdot 100 \text{ kg}}$  verwendet. Der durch diese Verallgemeinerung resultierende Fehler ist in Tabelle 3.4 für jeden der betrachteten Fahrzyklen angegeben.

Zyklus	$k \left[ \frac{l}{100 \text{ km} \cdot 100 \text{ kg}} \right]$	Fehler bei $k = 0,14 \frac{l}{100 \text{ km} \cdot 100 \text{ kg}}$
NEDC	0,137	-2,4 %
Japan1015	0,187	33,3 %
FTP75	0,160	14,3 %
Highway	0,090	-35,7 %
BMW	0,137	-2,4 %
NEDC (warm)	0,143	2,4 %

**Tabelle 3.4:** Parameter für die Abschätzung des Zusatzgewichts nach Gleichung 3.1

Die größten Fehler treten beim *Highway*- und beim *Japan1015*-Zyklus auf. Beim *Highway*-Zyklus spielt der Gewichtseinfluss eine geringe Rolle, da keine große Dynamik vorliegt. Der *Japan1015*-Zyklus ist ein sehr kurzer, warm gestarteter Zyklus, mit einer niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeit. Wenn für andere, hier nicht betrachtete Fahrzyklen mit ähnlicher Charakteristik der Wert von  $k$  übernommen wird, wird von einem ähnlichen Fehler im Bereich von  $\pm 36\%$  ausgegangen.

Bei der Messung des Kraftstoffverbrauchs auf dem Rollenprüfstand wurden in der Vergangenheit Schwungmassen verschiedener Größe zur Simulation der Trägheitskräfte des Fahrzeugs verwendet. Für festgelegte Gewichtsintervalle (Schwungmassenklassen) wurde jeweils eine Referenzmasse mit einer Schwungmasse definiert. Die Schwungmassen wurden über Kupplungen direkt mit der Antriebsrolle verbunden. Heute wird meistens eine elektrische Schwungmassensimulation eingesetzt. Trotzdem haben die Schwungmassenklassen, die eine Stufung der Schwungmassen ermöglichen, heute in den meisten Fahrzyklen

noch Bestand. Innerhalb einer Schwungmassenklasse nimmt der Kraftstoffverbrauch mit steigendem Gewicht nur gering zu, da nur der zunehmende Rollwiderstand einfließt, siehe Gleichung 2.5 in Kapitel 2. Beim Wechsel von einer Klasse in die nächste entsteht beim Kraftstoffverbrauch ein Sprung.

In Simulationen kann die Verwendung von Schwungmassenklassen nachgebildet werden. In dieser Arbeit wird jedoch nicht<sup>28</sup> mit Schwungmassenklassen gerechnet, da dies zum einen nicht dem tatsächlichen Verbrauch entspricht. Zum anderen muss neben dem Zusatzgewicht das Ausgangsgewicht des Fahrzeugs bekannt sein, was zu einer Einschränkung der Übertragbarkeit der Ergebnisse führt.

### Mehrverbrauch durch die Stromerzeugung

Bei der Abschätzung des Mehrverbrauchs eines Fahrzeugs durch die Stromerzeugung, wird mit der mittleren elektrischen Bordnetzleistung  $P_{el,BN}$  sowie mit den mittleren Wirkungsgraden von Generator und APU gerechnet. Die Wirkungsgrade können direkt vorgegeben werden oder aus einem Kennfeld über die mittlere elektrische Leistung und die mittlere Drehzahl bestimmt werden.

Für eine Verfeinerung der Abschätzung werden noch folgende Punkte berücksichtigt:

- **APU-Startup:** Während des APU-Startups muss eine erhöhte elektrische Leistung erzeugt werden, siehe Kapitel 2. Die APU kann in dieser Zeit keinen Strom erzeugen, weshalb die elektrischen Verbraucher zwischenzeitlich aus dem elektrischen Speicher versorgt werden. Dazu wird ein konstanter Speicherwirkungsgrad berücksichtigt.
- **MSA-Phasen:** Der Generator kann während MSA-Phasen keinen Strom erzeugen. Auch hier wird eine Zwischenspeicherung mit einem konstanten Wirkungsgrad berücksichtigt. Während einer MSA-Phase benötigt der Verbrennungsmotor eine geringere elektrische Leistung.

Der Mehrverbrauch für die Stromerzeugung berechnet sich aus der elektrischen Leistung des Stromerzeugers  $P_{el,Erz}$ , dividiert durch den Wirkungsgrad des Erzeugers und multipliziert mit der Zyklusdauer:

$$KV_{Stromerz} [kJ] = \frac{P_{el,Erz}}{\eta_{Erz}} \cdot t_{Zyklus} \quad (3.2)$$

Bei der Stromerzeugung per **Generator** berechnet sich der Stromerzeugerwirkungsgrad  $\eta_{Erz}$  über Gleichung 3.3. Die zu erzeugende elektrische Leistung  $P_{el,Erz}$  entspricht der Bordnetzleistung  $P_{el,BN}$ .

$$\eta_{Erz} = \eta_{Gen} \cdot \eta_{ICE,diff} \quad (3.3)$$

Der differenzielle Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors  $\eta_{ICE,diff}$  ist weitgehend konstant, siehe Kapitel 2.1.2. Der Generatorwirkungsgrad  $\eta_{Gen}$  ist vom Generatorstrom und von der Generator Drehzahl abhängig, siehe Bild 2.6 in Kapitel 2.1.2. Hier wird stark vereinfacht ein mittlerer Wirkungsgrad von 60 % angenommen.

<sup>28</sup>außer Vergleiche mit Prüfstandsversuchen

Bei der **APU** entspricht  $\eta_{Erz}$  dem APU-Wirkungsgrad  $\eta_{APU}$ . Hier wird ein konstanter Wirkungsgrad von 40% angenommen.  $P_{el,Erz}$  muss etwas aufwendiger berechnet werden, siehe Gleichung 3.4, da während der Startupphase der APU die Fahrzeugbatterie als Zwischenspeicher dient sowie zusätzlich elektrische Leistung von der APU angefordert wird.

$$P_{el,Erz} = \frac{(P_{el,BN} + P_{el,APU,Startup})}{\eta_{Batt}} \cdot \frac{t_{Startup}}{t_{Zyklus}} + P_{el,BN} \cdot \left(1 - \frac{t_{Startup}}{t_{Zyklus}}\right) \quad (3.4)$$

Bei der MSA-Funktion wird die Bordnetzleistung für Fahrt und Stand separat betrachtet und die Zwischenspeicherung in der Batterie mit berücksichtigt, siehe Gleichungen 3.5 und 3.6.  $p_{MSA}$  ist der zeitliche Anteil der Motor-Stopp-Phasen an der Gesamtzykluszeit.

$$\text{MSA u. Gen: } P_{el,BN} = p_{MSA} \cdot P_{el,BN,MSA}/\eta_{Batt} + (1 - p_{MSA}) \cdot P_{el,BN,Fahrt} \quad (3.5)$$

$$\text{MSA u. APU: } P_{el,BN} = p_{MSA} \cdot P_{el,BN,MSA} + (1 - p_{MSA}) \cdot P_{el,BN,Fahrt} \quad (3.6)$$

Bei aktiver Rekuperation kann die zu erzeugende elektrische Leistung  $P_{el,BN}$  um eine angenommene durchschnittliche Rekuperationsleistung  $P_{el,Rek}$  reduziert werden, siehe Gleichung 3.7. Die Höhe der Rekuperationsleistung muss jedoch über aufwendigere Methoden ermittelt werden.

$$P_{el,BN,neu} = P_{el,BN} - P_{el,Rek} \quad (3.7)$$

Komplexere Zusammenspiele von APU und Generator können über die hier beschriebene *Abschätzung* nur bedingt betrachtet werden.

#### Mehrverbrauch durch den APU-Startup

Der benötigte Kraftstoffverbrauch für den APU-Startup wird direkt als Wert vorgegeben.

#### Mehrverbrauch durch die Klimatisierung

Ebenfalls abgeschätzt werden soll der Kraftstoffmehrverbrauch durch eine Fahrzeugklimatisierung. Dabei wird zunächst die herkömmliche mechanische Klimaanlage, die über den Verbrennungsmotor betrieben wird, betrachtet, siehe Gleichung 3.8.

$$KV_{AC,mech}[kJ] = P_{Kälte} \cdot \frac{1}{COP_{AC,mech}} \cdot \frac{1}{\eta_{ICE,diff}} \cdot t_{Zyklus} \quad (3.8)$$

Die gewünschte Kälteleistung  $P_{Kälte}$  wird direkt vorgegeben. Der *Coefficient of Performance* (*COP*) einer Klimaanlage kennzeichnet das Verhältnis von erzeugter Kälteleistung zu aufgewendeter Leistung.  $\eta_{ICE,diff}$  ist wieder der differentielle Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors.

Die Berechnung des zusätzlichen Kraftstoffverbrauchs bei der elektrischen Klimatisierung erfolgt über Gleichung 3.9.

$$KV_{AC,el}[kJ] = P_{Kälte} \cdot \frac{1}{COP_{AC,el}} \cdot \frac{1}{\eta_{Erz}} \cdot t_{Zyklus} \quad (3.9)$$

Die Kälteleistung  $P_{Kälte}$  wird wie bei der mechanischen Klimatisierung als Inputgröße vorgegeben. Der Wirkungsgrad zur Stromerzeugung  $\eta_{Erz}$  muss abhängig vom Stromerzeuger bestimmt werden, siehe Abschnitt „Mehrverbrauch Stromerzeugung“. Der  $COP$  kennzeichnet wie bei der mechanischen Klimatisierung das Verhältnis von Kälteleistung zu aufgewendeter Leistung. Allerdings ist nun die aufgewendete Leistung die dem Klimakompressor zugeführte elektrische Leistung, im Gegensatz zur mechanischen Leistung bei der mechanischen Klimatisierung.

Bei durchgeführten Untersuchungen lag der  $COP$  sowohl bei der mechanischen<sup>29</sup> als auch bei der elektrischen Klimaanlage über große Arbeitsbereiche bei einem Wert von ca. 2 [53]. Die Betrachtungen erfolgten mit einem herkömmlichen Taumelscheibenverdichter (mechanische Klimatisierung) und einem Scrollverdichter (elektrische Klimatisierung).

#### Mehrverbrauch durch den Zuheizung

In dieser Arbeit berücksichtigt werden ...

- ... ein herkömmlicher Kraftstoffzuheizung und
- ... der Einsatz einer APU als Zuheizung.

Der Mehrverbrauch durch einen **Kraftstoffzuheizung** wird über einen konstanten Wirkungsgrad  $\eta_{Zuheizung}$  berechnet, siehe Gleichung 3.10. Der Wirkungsgrad hängt hauptsächlich von der Güte der Wärmeübertragung an das Kühlmittel ab. Er beträgt ca. 80 % [36].

$$KV_{Kraftstoffzuheizung} = P_{therm,nutz} / \eta_{Zuheizung} \cdot t_{Zyklus} \quad (3.10)$$

Der zusätzliche Verbrauch der **APU zur Wärmeerzeugung** ist abhängig von der Höhe der Stromerzeugung. Erst wenn die Abgasenthalpie für die benötigte Wärme nicht mehr ausreicht, muss Wärme durch zusätzlichen Kraftstoff erzeugt werden. In Gleichung 3.11 wird dieser Kraftstoffaufwand berechnet, wobei  $\eta_{W\ddot{U}}$  bezeichnet, welcher Anteil der APU-Abgasenthalpie an das Kühlmittel übertragen wird. Die APU-Abwärme und zusätzlich erzeugte Wärme haben das selbe Temperaturniveau.

$$KV_{Wärmeerz,APU} = \left( \frac{P_{therm,nutz}}{\eta_{W\ddot{U}}} - \left( \frac{1}{\eta_{APU}} - 1 \right) \cdot P_{el,APU} \right) \cdot t_{Zyklus} \quad (3.11)$$

Wie bereits bei der Klimaanlage wird auch hier zum Vergleich von Fahrzeugen mit und ohne APU eine einfache gemeinsame Schnittstelle gewählt, die thermische Nutzleistung  $P_{therm,nutz}$ . Sie wird dem Kühlmittel und damit indirekt dem Innenraum zugeführt.

In der Betrachtung werden folgende Punkte nicht berücksichtigt:

<sup>29</sup>bei durchschnittlicher Fahrgeschwindigkeit und Motordrehzahl im *NEDC*

- Durch die Stromerzeugung per APU wird der Verbrennungsmotor entlastet und erzeugt dadurch weniger Heizleistung. Dies kann sich vor allem bei betriebswarmem Motor auch bei der zur Verfügung stehenden Heizleistung bemerkbar machen. Wird der Generator z.B. um  $400\text{ W}$  elektrisch entlastet, verbraucht der Verbrennungsmotor ca.  $1670\text{ W}$  weniger chemische Energie. Nimmt man an, dass  $1/3$  der durch Kraftstoff dem Motor zugeführten Energie als Wärme über das Kühlmittel abgeführt wird, verringert sich in diesem Fall der im Kühlmittel enthaltene Wärmestrom um ca.  $560\text{ W}$ . Müsste dieser Betrag über die APU zusätzlich erzeugt werden, würde bei hohen Wärmeanforderungen der Kraftstoffverbrauch der APU um  $700\text{ W}$  steigen. Dies würde zu einem zusätzlichen Kraftstoffaufwand für die Zuheizung von ca.  $17\%$ <sup>30</sup> führen. Das heißt, der Einfluss der Entlastung des Verbrennungsmotors kann durchaus einen großen Einfluss haben. Es wird davon ausgegangen, dass der Einfluss eher geringer ist, allerdings sind hier in der Zukunft weitere Untersuchungen notwendig.
- Wenn die APU im Heck des Fahrzeugs verbaut wird, bestehen mit und ohne APU sehr unterschiedliche Einspeisestellen der Wärme in den Kühlmittelkreislauf. Dies macht sich vor allem beim Start des Zuheizers bemerkbar. Geht man von einem zusätzlichen Kühlmittelvolumen von  $0,7\text{ l}^{31}$  aus, das von  $5^\circ\text{C}$  auf durchschnittlich  $60^\circ\text{C}$  aufgeheizt werden muss, ist eine zusätzliche Wärmemenge von ca.  $160\text{ kJ}$  notwendig. Bei einem Wirkungsgrad von  $80\%$  bedarf es zur Gewinnung dieser Wärme einer Kraftstoffenergie in Höhe von  $200\text{ kJ}$ . Dies entspricht  $1,5\%$  der Kraftstoffenergie einer halbstündigen Standheizphase mit APU oder eine Erhöhung des Mehrverbrauchs des Zuheizbetriebs per APU im *NEDC* um  $0,6\%$ -Punkte, bezogen auf den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs ohne Zuheizung.
- Es wird davon ausgegangen, dass alle energetischen Verluste der APU im Abgas wiederzufinden sind. Dies ist eine gute Näherung, vor allem wenn die integrierte Leistungselektronik über die Luftzufuhr der APU gekühlt wird. Es werden jedoch nicht alle elektrischen Verluste berücksichtigt und auch die Wärmeverluste über die APU-Gehäuseoberfläche gehen nicht in die Betrachtung ein. Im stationären Betrieb wird ein Fehler von ca.  $50\text{ W}$  erwartet. Um den fehlenden Wärmestrom von  $50\text{ W}$  zu kompensieren, wäre ein zusätzlicher Kraftstoffaufwand in Höhe von kleiner  $0,2\%$  bezogen auf den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs ohne Zuheizung im *NEDC* notwendig.

Bei der vereinfachten Betrachtung der APU als Zuheizung im Vergleich zum herkömmlichen Kraftstoffzuheizung können also durchaus größere Abweichungen auftreten. Hier sind in Zukunft noch genauere Untersuchungen notwendig.

#### Minderverbrauch durch die MSA-Funktion

Wenn der Motor während Stopp-Phasen automatisch abschaltet, reduziert sich der Kraftstoffverbrauch. Die Höhe der Reduktion wird durch die Multiplikation von Leerlaufverbrauch und Dauer der Motorstopps abgeschätzt, siehe Gleichung 3.12. Der MSA-Anteil

<sup>30</sup>Basis Zuheizleistung von  $3\text{ kW}$

<sup>31</sup>Annahme: Leitungslänge  $2 \cdot 3,5\text{ m}$ , Querschnittsfläche  $1\text{ cm}^2$

$p_{MSA}$  kann näherungsweise mit dem Anteil an Standphasen im Zyklus, siehe Tabelle 3.3, gleichgesetzt werden.

$$KV_{MSA} = P_{LL} \cdot p_{MSA} \cdot t_{Zyklus} \quad (3.12)$$

Hierbei werden folgende Fehler in Kauf genommen:

- Die komplette Standzeit wird als MSA-Zeit genutzt. Dies ist in der Realität bei Zyklen mit Kaltstart nicht der Fall. Die Funktion wird erst bei warmem Verbrennungsmotor aktiviert. Außerdem schaltet die Funktion erst bei einer längeren Stopp-Phase den Motor aus.
- Der Leerlaufverbrauch wird als konstant angenommen. In der Realität ändert sich der Wert, vor allem abhängig von der Motortemperatur.
- Der zusätzliche elektrische Verbrauch für den Motorneustart wird nicht berücksichtigt.

Der Leerlaufverbrauch  $P_{LL}$  ist stark abhängig vom Motor und von der Leerlaufdrehzahl.

#### Minderverbrauch durch die Aggregatevorwärmung

Wie in Kapitel 2 beschrieben, kann die APU-Abwärme genutzt werden, um Aggregate wie den Verbrennungsmotor oder das Getriebe schneller auf Betriebstemperatur aufzuheizen. Eine Abschätzung des resultierenden Einsparpotenzials  $KV_{Vorwaermung}$  über einen einfachen physikalischen Zusammenhang ist dabei nicht möglich. Um überhaupt Aussagen treffen zu können, wird auf Erfahrungswerte bei ähnlichen Maßnahmen und Expertenmeinungen zurückgegriffen. Desweiteren können Ergebnisse aus Simulationen mit speziellen Programmen wie *GT Power* herangezogen werden. Generell handelt es sich dabei um grobe Schätzwerte oder um Angaben die sich auf ganz konkrete Anwendungen und Randbedingungen beziehen.

### 3.2.2 Addition der Teilverbräuche

Der Gesamtverbrauch des Fahrzeugs berechnet sich durch Addition der einzelnen Teilverbräuche, siehe Gleichungen 3.13 und 3.14. Die Indizes  $G$  und  $A$  stehen für **G**enerator-Fahrzeug (ohne APU) und **A**PU-Fahrzeug (mit APU). Durch die Subtraktion des Gesamtverbrauchs ohne APU vom Gesamtverbrauch mit APU kann das Reduktionspotenzial einer APU bestimmt werden, siehe Gleichung 3.15. Je nach Fahrzeug, Betriebsstrategie und Fahrzyklus werden Parameter bei der Berechnung der Teilverbräuche geändert. Teilweise entfallen Teilverbräuche. Z.B. entfällt der MSA-Minderverbrauch, wenn keine MSA-Betriebsstrategie vorliegt.

$$KV_{ges}^G = KV_0 + KV_{Stromerz}^G + KV_{Zuheizer}^G + KV_{AC}^G - KV_{MSA} \quad (3.13)$$

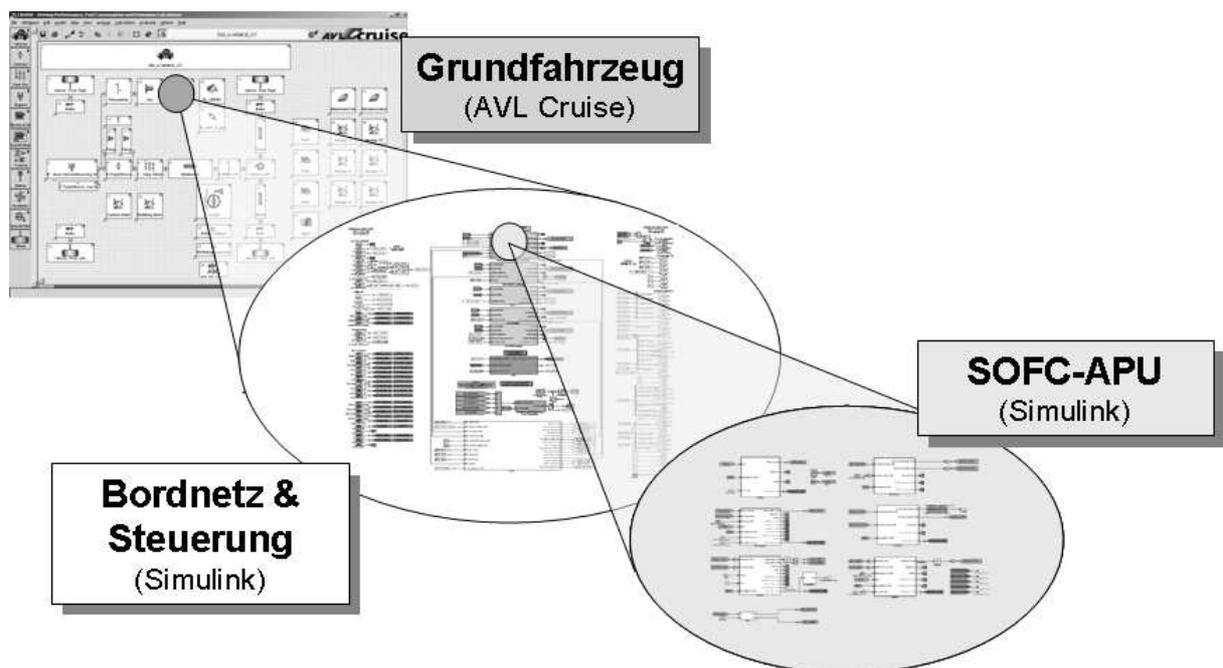
$$KV_{ges}^A = KV_0 + KV_{Stromerz}^A + KV_{Zuheizer}^A + KV_{AC}^A - KV_{MSA} \\ + KV_{Zusatzgewicht}^A + KV_{APU,Startup}^A - KV_{Vorwaermung}^A \quad (3.14)$$

$$\Delta KV = KV_{ges}^A - KV_{ges}^G \quad (3.15)$$

Vorraussetzung für die Addierbarkeit der einzelnen Kraftstoffverbrauchsanteile ist die Unabhängigkeit voneinander. Dies ist gegeben aufgrund des weitgehend linearen Zusammenhangs von Motorleistung und Brennstoffmassenstrom des Verbrennungsmotors, siehe Willanslinien in Bild 2.4, Kapitel 2.1.2. Dieser Punkt ist auch entscheidend für die Bestimmung der einzelnen Teilverbräuche, da stets mit dem differentiellen, nicht mit dem absoluten Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors gerechnet wird. Allerdings muss beachtet werden, dass es sich immer noch um eine relativ grobe Abschätzung handelt. Eine Betrachtung der Genauigkeit im Vergleich zu Simulationsergebnissen erfolgt in Kapitel 3.5.2.

### 3.3 Simulation

Mit Hilfe der Simulation sollen genauere Aussagen zum Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs mit APU getroffen werden. Ziel ist es, den Verbrauchsunterschied eines Fahrzeugs mit und ohne APU darzustellen, sowie Zusammenhänge und Einflüsse zu ermitteln. Dabei ist weiter eine gewisse Allgemeingültigkeit zu wahren, so dass die Ergebnisse nicht nur auf exakt eine Fahrzeugkonfiguration zutreffen, sondern auch auf andere Fahrzeugkonzepte übertragbar sind.



*Bild 3.6: Einbindung des Bordnetz- und APU-Modells in das bestehende Fahrzeuggrundmodell*

Die Simulationen sollen mit der Standardsoftware AVL Cruise® (kurz Cruise) in Kombination mit MATLAB®/SIMULINK™ durchgeführt werden, siehe Bild 3.6. Ein Fahrzeuggrundmodell in Cruise wurde übernommen. Dieses Grundmodell muss um folgende Punkte erweitert werden:

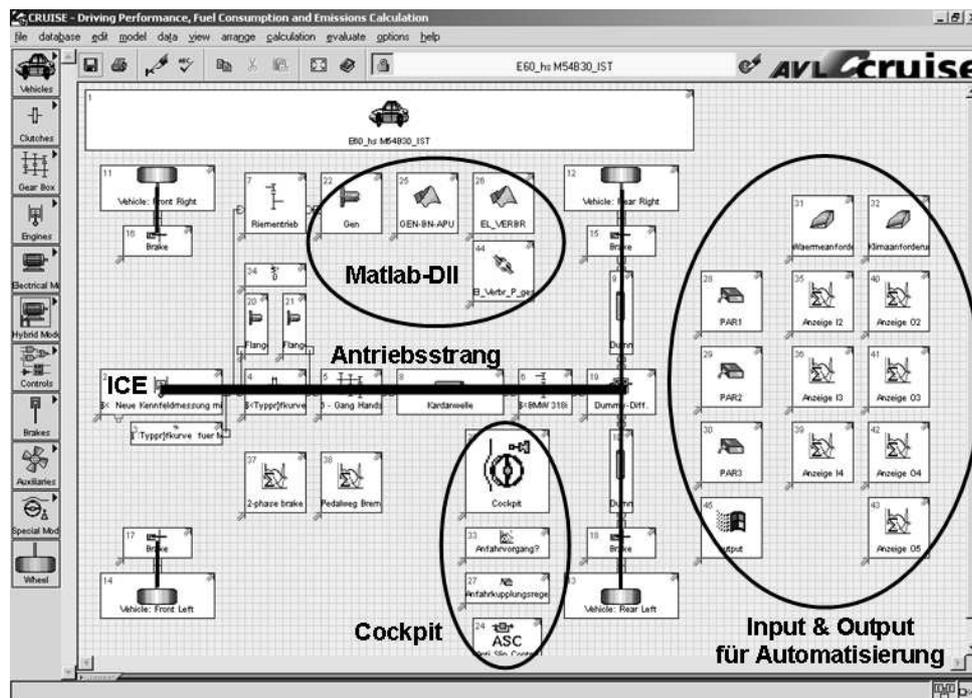
- APU-Modell

- Elektrisches Energiebordnetz
- Heizung und Klimatisierung
- Erweiterte Steuerung und Regelung

Dabei konzentriert sich diese Arbeit auf die elektrische Einbindung der APU. Heizungs- und Klimafunktionen werden am Rande mit betrachtet, um ein möglichst vollständiges Bild der möglichen Anwendungen abzugeben. Das Gesamtmodell ist modular aufgebaut. Durch eine exakte Definition der Schnittstellen können Teilmodelle einfach durch detailliertere Modelle oder geänderte Komponenten ersetzt werden.

### 3.3.1 Grundmodell

Das erweiterte Grundmodell ist in Bild 3.7 dargestellt. Zu sehen ist die Cruise-Benutzeroberfläche mit den einzelnen Komponentenbausteinen. Im Bild markiert ist der Antriebsstrang, ein Standardantrieb mit Verbrennungsmotor vorne, manuellem Schaltgetriebe und Heckantrieb. Die meisten Komponenten wie Verbrennungsmotor, Getriebe und Räder sind über Kennlinien und Kennfelder modelliert.

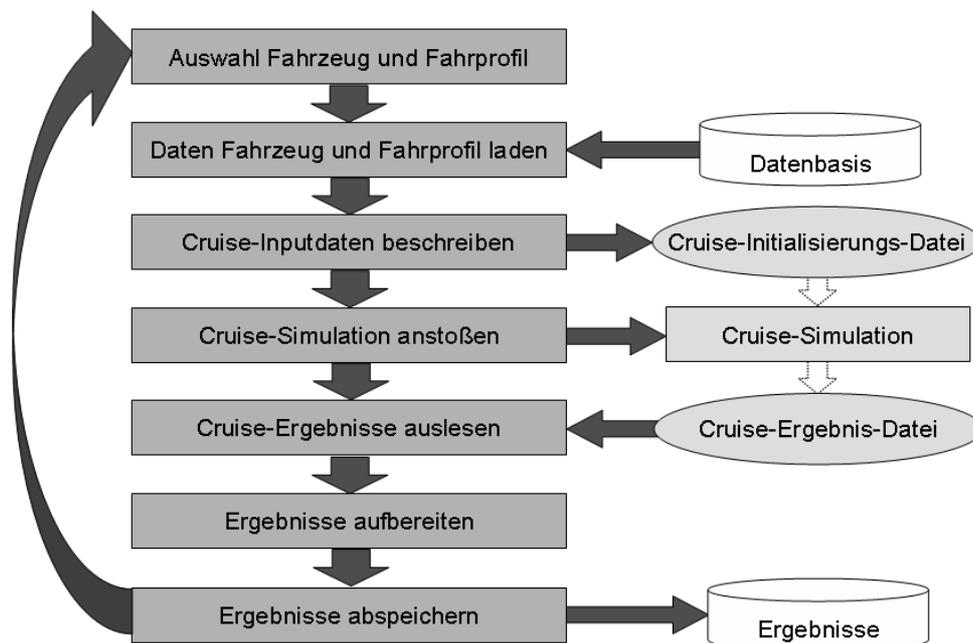


**Bild 3.7:** Cruise-Oberfläche mit dem Grundfahrzeug und den folgenden Erweiterungen: Matlab-Dll, Automatisierungskomponenten und Anpassung Cockpit

Die Modellerweiterungen (Bordnetz, APU, ...) wurden durch eine Matlab-Dll (Dynamic Link Library) in das Modell eingefügt. Alle elektrischen Anteile wurden komplett in der Dll abgebildet. Die mechanischen Schnittstellen von Generator und mechanischem Klimakompressor zum Verbrennungsmotor wurden in Cruise über einen sogenannten Flansch-Baustein realisiert.

Die Steuerung des Fahrzeugs erfolgt in Cruise in erster Linie im sogenannten Cockpit-Baustein. Mit der Einführung neuer Betriebsstrategien musste die Steuerung erweitert werden. Die Erweiterungen, z.B. die MSA-Funktion, wurden alle in der Matlab-Dll umgesetzt. Über einen Datenbus werden Steuerbefehle an den Cockpit-Baustein weitergeleitet, so dass eine Beeinflussung des Fahrzeugantriebs durch die neuen Funktionen wie MSA möglich ist.

Zum Vergleich verschiedener Simulationsmethoden und verschiedener Fahrzeugvarianten und Szenarien muss eine große Anzahl an Simulationen durchgeführt werden. Damit nicht jede Simulation manuell parametrisiert, gestartet und ausgewertet werden muss, wurde eine Automatisierungsroutine in Matlab geschrieben. Beim Start der Automatisierungsroutine müssen zunächst das zu simulierende Fahrzeug und der Fahrzyklus definiert werden. Matlab lädt dann die entsprechenden Parameter und Zyklusdaten aus einer anfangs erstellten Datenbasis. Die Daten werden anschließend in die Cruise-Initialisierungsdateien geschrieben. Hierbei spielen auch die neu geschaffenen Inputblöcke in Cruise, siehe rechte Seite im Bild 3.7, eine Rolle. Sie stellen die Schnittstelle zur Parametrisierung der Fahrzeugkomponenten dar. Die eigentliche Cruise-Simulation wird anschließend automatisch von Matlab angestoßen. Danach werden ausgewählte Cruise-Ergebnisse in Matlab eingelesen, aufbereitet und in einer neuen Datei abgespeichert. Der beschriebene Ablauf ist in Bild 3.8 dargestellt. Durch wiederholtes Ausführen des Ablaufs ist eine nahezu beliebige Anzahl an Batchläufen möglich, bei denen Fahrzeugparameter, Fahrprofile und Umgebungsbedingungen automatisch variiert werden.



**Bild 3.8:** Automatisierungsroutine für die Cruise-Simulationen, erstellt mit dem Programm Matlab

Zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs bietet Cruise zwei Simulationsmethoden an [54]:

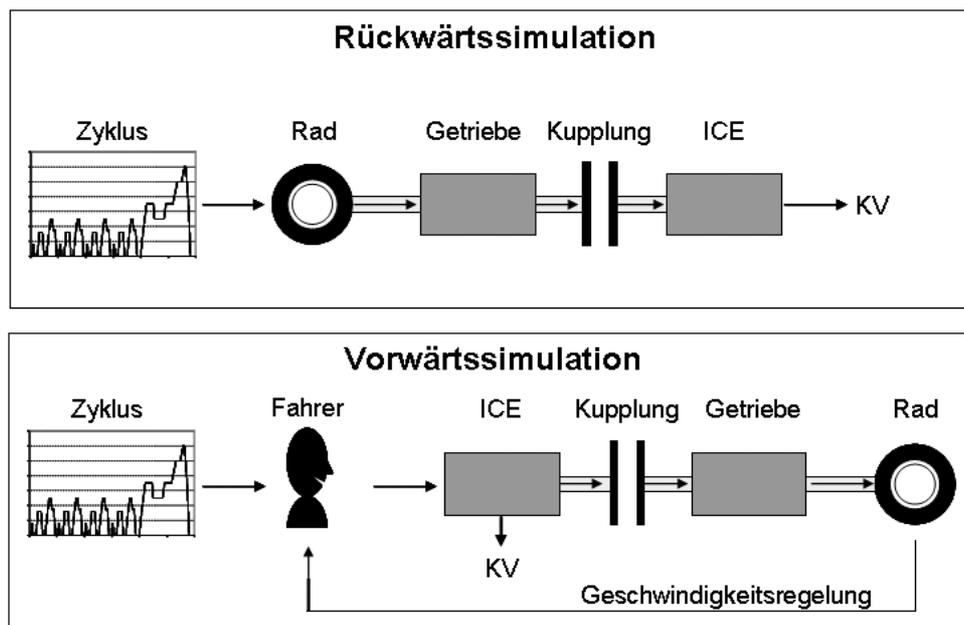
- Quasistationäre Simulation
- Dynamische Simulation

### Quasistationäre Simulation

Bei der quasistationären Simulation wird der Fahrzeugzustand in äquidistanten Zeitschritten bestimmt. Dabei wird in Cruise während eines Zeitschritts von einer konstanten Beschleunigung aller Elemente ausgegangen.

Es handelt sich um eine Rückwärtssimulation. Das heißt, die Berechnung erfolgt rückwärts, ausgehend von der Geschwindigkeitsvorgabe des Fahrprofils, siehe Bild 3.9 oben. Aus dem Fahrprofil wird die Sollgeschwindigkeit und damit die Beschleunigung der Räder berechnet. Das benötigte Moment muss nun von den Antriebswellen oder bei negativer Beschleunigung teilweise auch von der Bremse aufgebracht werden. In Kombination mit der Gangvorgabe wird im Getriebe das notwendige Eingangsmoment und die Eingangsdrehzahl berechnet. Zum Schluss wird durch Addition von Getriebemoment und Lastmoment der Nebenaggregate das Ausgangsmoment des Verbrennungsmotors berechnet. Das Ausgangsmoment und die Drehzahl bestimmen den Arbeitspunkt des Verbrennungsmotors, aus dem sich wiederum über ein Verbrauchskennfeld der Kraftstoffverbrauch berechnet.

Bei der quasistationären Simulation ist keine Steuerung von Gas- und Bremspedal durch ein Fahrermodell notwendig. Das hat den Vorteil, dass die Berechnung sehr zeiteffizient abläuft.



**Bild 3.9:** Unterscheidung zwischen der Rückwärts- und Vorwärtssimulation

### Dynamische Simulation

Bei der dynamischen Simulation wird das Fahrzeugverhalten durch ein System einfacher nichtlinearer Differentialgleichungen abgebildet. Zum Lösen der Differentialgleichungen müssen diese diskretisiert werden, wodurch wieder eine zeitschrittweise Abbildung des Fahrzeugzustands erfolgt. Die Zeitschrittweite wird jedoch im Gegensatz zur quasistationären Simulation nicht mehr konstant festgelegt, sondern je nach Dynamik des Fahrzeugzustands angepasst. Das heißt, bei großer Dynamik wird die Zeitschrittweite verkleinert.

Liegen weitgehend konstante Fahrphasen vor, wird mit einer größeren Zeitschrittweite gerechnet.

Bei der dynamischen Simulation wird eine Vorwärtsrechnung eingeführt, die den Fahrer als Regelement zur Regelung der Fahrzeuggeschwindigkeit berücksichtigt, siehe Bild 3.9 unten. Der Fahrer wird über ein Fahrermodell abgebildet. Es gibt über Gas- und Bremspedal das Verhalten von Verbrennungsmotor und Bremse vor. Ausgehend vom Verbrennungsmotor werden nun Momente über das Getriebe und die Antriebswellen an die Räder weitergegeben. Es stellt sich eine Geschwindigkeit ein. Durch Verändern der Gas- und Bremspedalstellung regelt das Fahrermodell diese Geschwindigkeit mit dem Ziel die Sollgeschwindigkeit aus dem vorgegebenen Fahrzyklus zu erreichen.

In Kapitel 3.5 werden Genauigkeit und Berechnungsdauer der beiden Methoden verglichen und eine Methode ausgewählt.

### 3.3.2 APU-Modell

Das APU-Modell muss sowohl den Startup, als auch den Betrieb der SOFC-APU abbilden. Neben Strom und Spannung wird dabei der Kraftstoffverbrauch sowie der Wärmeeintrag ins Kühlwasser berechnet.

Es soll von folgenden beiden Detaillierungsstufen der APU ausgegangen werden:

- Wirkungsgradkennlinie
- Physikalisches APU-Modell

In Kapitel 2.2 wurde bereits das APU-System beschrieben, inklusive der Angabe der Wirkungsgradkennlinie. An dieser Stelle soll speziell auf die Erstellung des physikalischen APU-Modells eingegangen werden. Dabei sollen in erster Linie der Modellierungsansatz und die wesentlichen Elemente der Modellierung beschrieben werden.

#### Modularisierung

Analog zur Hardware, siehe Kapitel 2, wird auch im Modell eine Modularisierung vorgenommen. Kraftstoffpumpe, Reformer, Stack und Nachverbrennung stellen jeweils ein Modul dar. Zusätzlich existieren zwei Wärmeübertragermodule, ein Gebläse- und ein DC/DC-Wandlermodul. Alle Module besitzen klar definierte Schnittstellen. Dabei wird zwischen physikalischen Ein- und Ausgängen, Aktorsignalen, Sensorsignalen und reinen Informationsausgängen unterschieden. Durch die Schnittstellendefinition ist es möglich einzelne Module einfach auszutauschen, z.B. das Modell eines Benzinreformers durch das eines Dieselreformers. Rohrleitungen oder elektrische Leitungen werden durch Verbinden der physikalischen Ein- und Ausgänge abgebildet. Ein Steuermodul liest die Sensorsignale ein und gibt Aktorsignale aus.

#### Abbildung der Stoffströme

Abgesehen vom Kraftstoff sind alle Stoffströme Gase, die über folgende sieben Hauptbestandteile dargestellt werden können:  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ . Dies ist ausreichend, um alle grundlegenden Reaktionen abzubilden. Nebenreaktionen und andere

Gasanteile werden vernachlässigt. Neben den Gasanteilen werden der Stoffstrom und die Gastemperatur in allen Modulen berechnet.

Chemische Reaktionen werden im Stack über die Berechnung der Gleichgewichtsbedingungen zu jedem Zeitschritt der Simulation abgebildet. Reformer und Nachverbrennung werden über einfachere Modelle dargestellt. Im Reformer wird stets von einer vollständigen Umsetzung des vorhandenen Kraftstoffs ausgegangen. In der Nachverbrennung werden alle brennbaren Gase komplett oxidiert, solange ausreichend Sauerstoff zur Verfügung steht.

#### Abbildung des thermischen Verhaltens

Die Wärmezufuhr bei Reaktionen wird aus der Reaktionsenthalpie bestimmt. Dabei wird von einer isobaren Zustandsänderung des Gases ausgegangen. Die Erwärmung der Gase berechnet sich über Gleichung 3.16.  $Q_{res}$  ist die resultierende Wärmezufuhr des Gases, berechnet aus der Wärmezufuhr durch chemische Reaktionen  $Q_{Rkt}$  und der Wärmeabfuhr an angrenzende Festkörper  $Q_{Festkoerper}$ , siehe Gleichung 3.17.

$$dQ_{res} = c_p \cdot m dT \quad \text{mit } c_p = f(T) \quad (3.16)$$

$$dQ_{res} = dQ_{Rkt} - dQ_{Festkoerper} \quad (3.17)$$

Mischen sich zwei Gasströme mit unterschiedlichen Temperaturen, wird die resultierende Gastemperatur über den Grundsatz berechnet, dass die Summe der Wärmeinhalte der einzelnen Gasbestandteile vor der Mischung gleich dem Gesamtwärmeinhalt nach der Mischung ist [55]:

$$c_1 m_1 T_1 + c_2 m_2 T_2 + \dots = T_m (c_1 m_1 + c_2 m_2 + \dots) \quad T \text{ in } ^\circ\text{C} \quad (3.18)$$

Der Wärmeübergang zwischen Gasen und Festkörpern wird über die berührende Oberfläche  $A$ , den Übergangskoeffizienten  $\alpha$  und die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen Gas und Festkörper berechnet, siehe Gleichung 3.19. Wärmeverluste vom Festkörper an die Umgebung werden über einen Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$ , multipliziert mit der Oberfläche  $A$  und der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen Festkörper und Umgebung, bestimmt (Gleichung 3.20).

$$dQ_{Festkoerper} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T dt \quad (3.19)$$

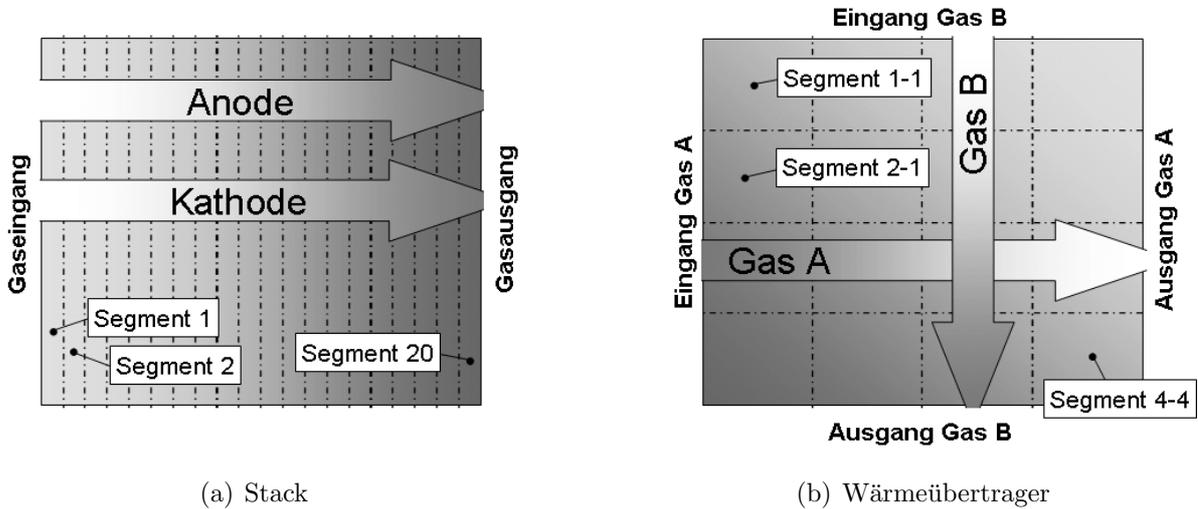
$$dQ_{Umg} = k \cdot A \cdot \Delta T dt \quad (3.20)$$

Die Berechnung der Temperatur des Festkörpers geschieht über die Betrachtung von thermischen Massen. Ausgehend von einer Ausgangstemperatur  $T_0$  werden sämtliche Wärmeaufnahmen und -abgaben der thermischen Massen integriert:

$$T_{Festkoerper} = T_0 + \frac{1}{m c_p} \int_0^t \dot{Q}_{Festkoerper} - \dot{Q}_{Umg} dt \quad (3.21)$$

Werden innerhalb eines Festkörpers höhere Temperaturgradienten erwartet, die Auswirkungen auf das thermische Verhalten des Systems haben, wird der Festkörper in mehrere Segmente unterteilt. Dies ist vor allem beim Stack und bei den Wärmeübertragern

der Fall. Der Stack wird in 20 Segmente entlang der Strömungsrichtung unterteilt, siehe Bild 3.10 (a). Zusätzlich wird der Gasverteiler des Stacks mit weiteren 4 Segmenten berücksichtigt. Der Gegenstromwärmeübertrager wird ebenfalls in 20 Segmente unterteilt. Der Kreuzstromwärmeübertrager wird in 4 mal 4 Segmente unterteilt, siehe Bild 3.10 (b).



**Bild 3.10:** Unterteilung des Stacks und des Kreuzstromwärmeübertragers in Segmente zur Abbildung der Temperaturgradienten innerhalb der Festkörper

Die Wärmeleitung im Gas wird vernachlässigt, da sie im Vergleich zur Strömungsgeschwindigkeit nur eine untergeordnete Rolle spielt. Im Festkörper wird eine Wärmeleitung dort berücksichtigt, wo eine Unterteilung in mehrere Segmente stattgefunden hat.

### Abbildung des elektrischen Verhaltens

Bei hohen Temperaturen und verfügbarem Reformat liegt an den Zellen im Stack eine Spannung an. Die Zellen sind in Reihe geschaltet, so dass die Gesamtspannung über das Produkt der Zellspannung mit der Zellenzahl berechnet wird. Der Stack hat eine elektrische Verbindung zum DC/DC-Wandler, der wiederum mit dem Bordnetz verbunden ist. Der DC/DC-Wandler stellt auf der Bordnetzseite eine vorgegebene Soll-Spannung ein. Ist diese Soll-Spannung größer als die Bordnetzspannung  $U_{BN}$  an der Batterie, fließt Strom. Die Höhe des Stromflusses  $I_{DCDC,aus}$  berechnet sich über den Leitungswiderstand  $R_{L,APU}$ <sup>32</sup>, siehe Gleichung 3.22. Aus dem Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers sowie dem Strom und der Spannung am Wandlereingang berechnet sich die notwendige elektrische Leistung am Wandlereingang ( $P_{DCDC,ein}$ , siehe Gleichung 3.23). Aus  $P_{DCDC,ein}$  und der Stackspannung  $U_{Stack}$  wird im DC/DC-Wandlermodul der notwendige Strom  $I_{Stack}$  berechnet (Gleichung 3.24). Die Stackspannung ist wiederum in erster Linie von  $I_{Stack}$  abhängig, siehe Polarisationskurve in Bild 2.13. Im Stackmodul wird die aktuelle Stackspannung in Abhängigkeit von Stacktemperatur, Stackstrom und Gasströmen berechnet. Stackstrom und Stackspannung sind also sowohl vom DC/DC-Wandler, als auch vom Verhalten des Stacks abhängig. Die Berechnung der beiden Größen erfolgt über einen Solver in Simulink.

<sup>32</sup>Leitung zwischen DC/DC-Wandlereingang und Bordnetzknotten

$$I_{DCDC,aus} = \frac{U_{DCDC,aus} - U_{BN}}{R_{L,APU}} \quad (3.22)$$

$$P_{DCDC,ein} = \frac{1}{\eta_{DCDC}} \cdot U_{DCDC,aus} \cdot I_{DCDC,aus} \quad (3.23)$$

$$I_{Stack} = \frac{P_{DCDC,ein}}{U_{Stack}} \quad (3.24)$$

Der Stromfluss  $I_{Stack}$  definiert die Zahl der Ladungsübergänge ( $O^{2-}$ ) durch den Elektrolyt jeder Zelle und damit den Verbrauch an Reformat an der Anodenseite bzw. Sauerstoff an der Kathodenseite. Multipliziert mit der Zellenanzahl ergibt sich der Gesamtumsatz an Brenngas und Luft im Stack.

### Steuerung

Die Steuerung ist ein wesentliches Element des APU-Modells. Sie kann unterteilt werden in einen Zustandsautomaten, eine Luft- und Kraftstoffregelung und eine Regelung des DC/DC-Wandlers.

### **Zustandsautomat**

Der Zustandsautomat gibt an, in welchem Zustand sich die APU befindet. Durch ein externes Signal kann die APU eingeschaltet werden. Damit wird vom Zustand „aus“ in den Zustand „Startup“ gewechselt. Bei Erreichen einer vorgegebenen Stacktemperatur wird in den Zustand „Betrieb“ umgeschaltet. Ein Abschalten des Stacks wurde nicht modelliert.

### **Kraftstoffregelung**

Während des Startupbetriebs wird die maximal mögliche Kraftstoffmenge angefordert, um das System möglichst schnell auf Betriebstemperatur aufzuheizen. Sobald auf den Zustand „Betrieb“ umgeschaltet wird, wird die Kraftstoffzufuhr reduziert. Die Kraftstoffzufuhr wird so eingeregelt, dass bei Stromfluss eine Kraftstoffausnutzung von 80 % erreicht wird. Liegt eine niedrigere Kraftstoffausnutzung vor, heißt das, dass zuviel Kraftstoff zugeführt wird. Die Kraftstoffzufuhr wird reduziert. Liegt die Kraftstoffausnutzung über 80 %, wird die zugeführte Kraftstoffmenge erhöht.

Über die Kraftstoffausnutzung reagiert das System automatisch auf Änderungen der elektrischen Leistungen. Zusätzlich werden bei der Regelung der Kraftstoffzufuhr Sprünge bei der Leistungsanforderung berücksichtigt.

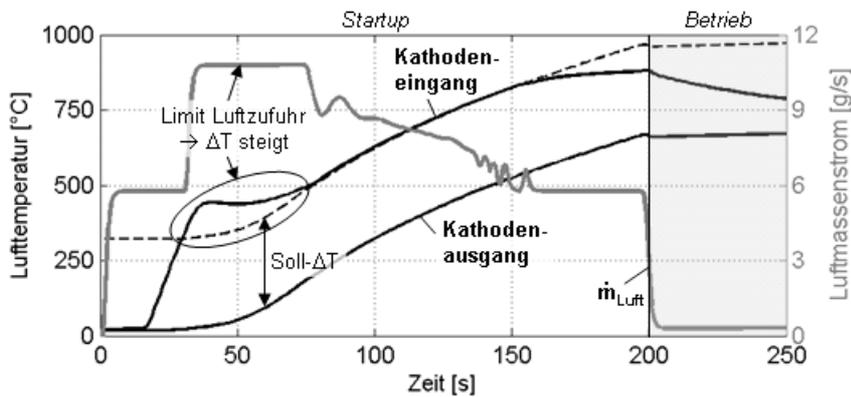
Eine minimale Kraftstoffzufuhr darf nicht unterschritten werden, da sonst das APU-System auskühlt. Bei einer zusätzlichen Wärmeanforderung an das APU-System für Heizzwecke wird die Soll-Kraftstoffausnutzung von 80 % auf einen niedrigeren Wert verändert. So entsteht im System mehr Abwärme, die für Heizzwecke zur Verfügung steht.

## Luftregelung

Die Luftregelung beinhaltet die Regelung des Gesamtmassenstroms der zugeführten Luft, sowie die Verteilung der Luft auf die drei Pfade „Reformer“, „Stack“ und „Nachverbrennung“. Der Gesamtmassenstrom wird über die Gebläsedrehzahl eingestellt. Die Luftverteilung wird über drei separat ansteuerbare Ventile geregelt.

Der Reformer wird während dem Startup für kurze Zeit mit  $\lambda = 1,2$  betrieben. In dieser Phase wird der zugeführte Kraftstoff komplett verbrannt und der Reformer aufgeheizt. Danach wird die Luftzufuhr auf  $\lambda = 0,36$  geregelt, so dass sich eine partielle Oxidation einstellt.

Im Stack wird während des Startups eine definierte Minimalluftmenge zugeführt. Aufgrund der geringen Menge wird diese Luftmenge durch den Wärmetauschprozess mit den Abgasen aus der Nachverbrennung, siehe Kapitel 2.2, sehr heiß. Diese heiße Luft wird in den kalten Stack eingeführt und kühlt dort sehr schnell ab. Damit im Stack keine zu großen thermischen Spannungen auftreten, soll die zugeführte Luft maximal  $300\text{ K}$  wärmer als die austretende Luft sein. Dies wird durch eine Regelung der Luftmenge erreicht. Ist der Temperaturgradient größer als  $300\text{ K}$ , wird mehr Luft zugeführt. Durch den größeren Massenstrom erreicht die Luft im Wärmeübertrager keine so hohe Temperatur mehr und der Temperaturgradient sinkt. Ist der Temperaturgradient kleiner als  $300\text{ K}$ , wird die Luftzufuhr zum Stack bis auf einen Wert von minimal  $6\text{ g/s}$  reduziert, so dass die in den Stack eingeblasene Luft die maximal erlaubte Temperatur hat. So ist stets ein hoher Temperaturgradient zwischen Gaseingang und -ausgang aber auch zwischen Gas und Festkörper im Stack gegeben. Nur bei einem hohen Temperaturgradienten ist eine optimale Wärmeübertragung der Luft an den Stack gegeben.



**Bild 3.11:** Verlauf des Luftmassenstroms und der Lufttemperaturen des Kathodenein- und ausgangs im Stack während des APU-Startups

In Bild 3.11 ist der Verlauf des Massenstroms der Stackluft während der Startuppphase zusammen mit der Lufttemperatur von Kathodenein- und ausgang aufgezeigt. Der Massenstrom steigt zunächst auf den vorgegebenen Sollwert von ca.  $6\text{ g/s}$  an. Nach einer Verzögerung von ca.  $20\text{ s}$  steigt die Temperatur der Stackeingangsluft stark an. Bereits nach wenigen Sekunden hat sie einen wesentlich höheren Wert als die Stackausgangsluft erreicht, so dass die Luftzufuhr erhöht wird. Die Luft wird bis auf einen maximalen Wert von ca.  $11\text{ g/s}$  erhöht. An dieser Stelle wird zusammen mit der Luftzufuhr zu Reformer

und Nachverbrennung der eingestellte Maximalwert<sup>33</sup> des Gebläses von 12 g/s erreicht. Das Überschwingen der Temperatur auf eine maximale Temperaturdifferenz zwischen einströmender und ausströmender Luft von ca. 400 K<sup>34</sup> wird hier toleriert. Eine Reduktion kann nur durch eine Rücknahme des Kraftstoffstroms oder durch eine Vergrößerung des Gebläses erreicht werden. Sobald die Temperatur der ausströmenden Gase steigt, darf auch die Temperatur der einströmenden Gase steigen. Da der Energieinhalt des zugeführten Kraftstoffs nicht ausreicht, die Temperatur bei gleichbleibender Luftmenge immer weiter steigen zu lassen, wird die Luftmenge wieder reduziert, bis der untere Sollwert von 6 g/s wieder erreicht wird. Eine weitere Absenkung der Luftmenge würde zu einer Beibehaltung der Temperaturdifferenz von 300 K führen. Allerdings ist dies nicht sinnvoll, da die geringere Luftmenge weniger Wärmeenergie transportieren kann. Gesucht ist das Optimum aus Wärmemenge und hohem Temperaturniveau für einen hohen Wärmeübergang. Außerdem spielen weitere Effekte, wie z.B. der Strömungsverlauf im Wärmeübertrager eine Rolle. Bei sehr geringen Luftmengen liegt in den Wärmeübertragern eine laminare Strömung vor, die gegenüber einer turbulenten Strömung bei höheren Luftströmen eine schlechtere Wärmeübertragung bedeutet.

Sobald die APU von der Startupphase in die Betriebsphase wechselt, wird von der Temperaturgradientenregelung auf eine einfache Temperaturregelung umgeschaltet. Ziel ist es, auf eine konstante Stacktemperatur zu regeln. Da die Temperaturen der ein- und ausströmenden Gase einfacher zu messen sind als die Stacktemperatur, wird auf eine Regelung der Temperatur der ausströmenden Kathodenluft zurückgegriffen. Wird eine zu hohe Temperatur gemessen, wird zur Kühlung zusätzliche Luft zugeführt. Bei zu niedriger Temperatur wird die Luftzufuhr reduziert. Dabei wird darauf geachtet, dass stets genügend Luftsauerstoff für die chemischen Reaktionen zur Verfügung steht, indem ein  $\lambda \geq 1$  eingestellt wird.

Die Luftzufuhr der Nachverbrennung wird so eingestellt, dass immer ein  $\lambda \geq 1,5$  im Gesamtsystem zur Verfügung steht. Das heißt, wenn im Reformier bereits genügend Luft für eine vollständige Verbrennung zugegeben wird, muss in der Nachverbrennung keine Luft mehr eingeblasen werden. Reicht die Luft aus Reformier und Stack jedoch nicht für eine vollständige Verbrennung aller Gase aus, muss zusätzliche Luft in der Nachverbrennung zugeführt werden. Die Überhöhung des  $\lambda$ -Wertes um 0,5 dient der Sicherheit, dass alle Gase wirklich verbrannt werden.

Zusätzlich ist bei der Nachverbrennung eine Temperaturregelung zum Bauteilschutz implementiert. Sobald die Temperatur der ausströmenden Gase eine festgelegte Grenze von 1000°C überschreitet, wird zusätzliche Luft zur Kühlung eingeblasen.

### Validierung des Modells

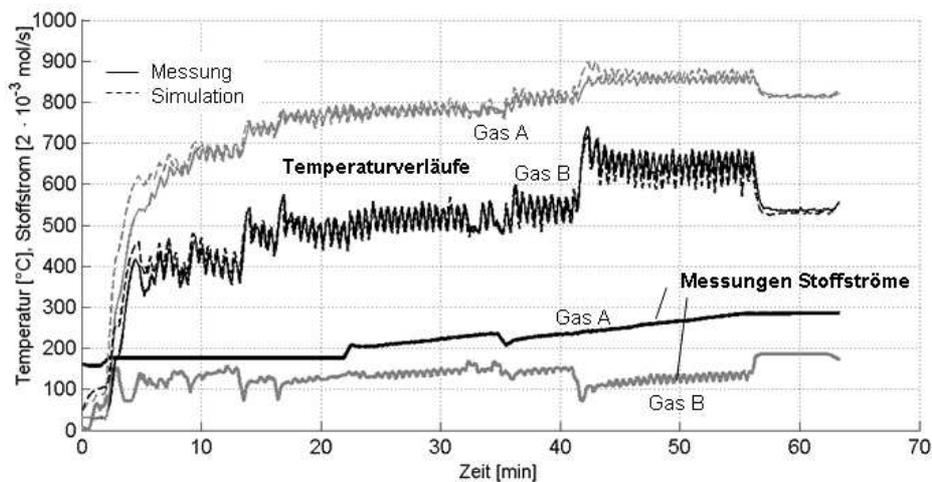
Große Teile des APU-Modells wurden bereits über Messergebnisse validiert.

Das Ergebnis der Validierung des Kreuzstromwärmeübertragers ist in Bild 3.12 dargestellt. Stoffströme und Eingangstemperaturen der beiden Gase A und B aus der Messung wurden dem Modell vorgegeben. Man sieht, dass die Ausgangstemperaturen der Gase A und B von Simulation und Messung sehr gut übereinstimmen.

---

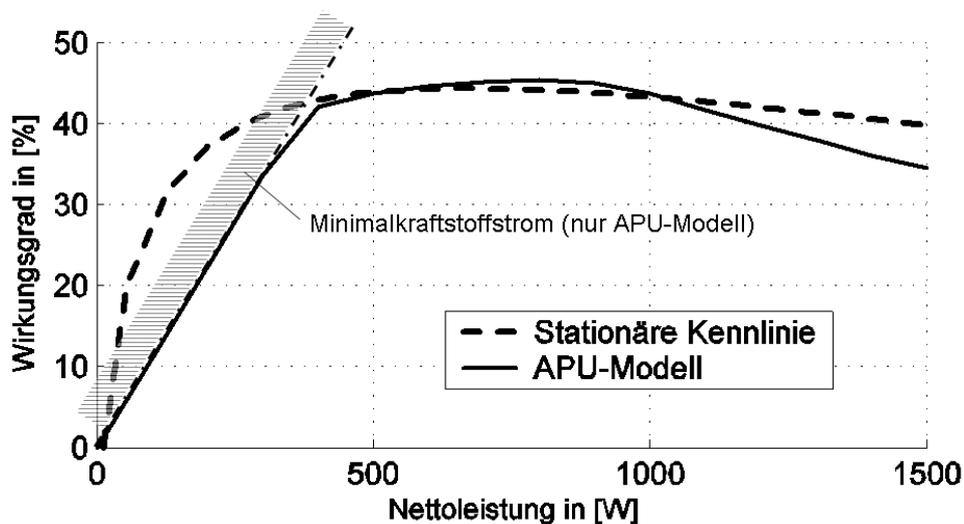
<sup>33</sup>Modell ohne Berücksichtigung von Druckabfällen

<sup>34</sup>Im Festkörper wird in der Simulation eine maximale Temperaturdifferenz von 350 K festgestellt.



**Bild 3.12:** Validierung des Modells des Kreuzstromwärmeübertragers durch den Vergleich mit Messungen

Eine endgültige Validierung des gesamten APU-Modells steht noch aus. Vor allem das elektrische Verhalten muss noch über Messungen abgesichert werden. Plausibilitätskontrollen wurden durchgeführt. Der Wirkungsgrad bei eingeschwungenem Zustand entspricht weitgehend der stationären Kennlinie, siehe Bild 3.13.



**Bild 3.13:** Vergleich des eingeschwungenen Wirkungsgrades des physikalischen APU-Modells mit der Wirkungsgradkennlinie

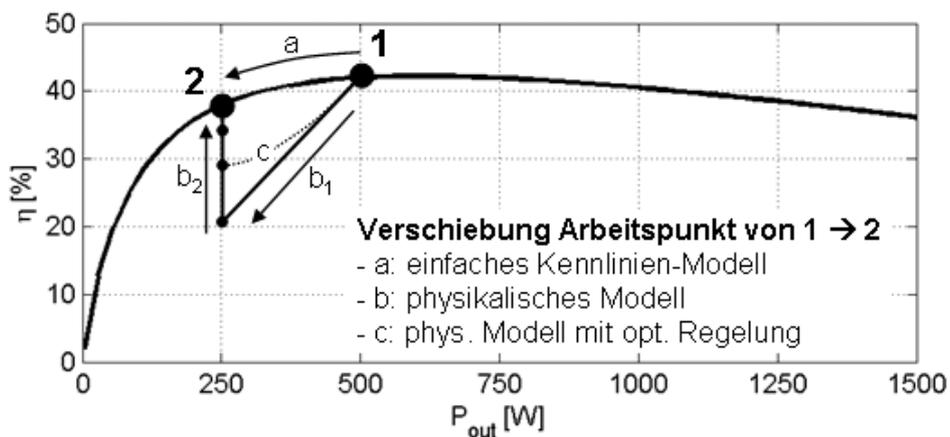
Bei niedriger Nettoleistung weist das physikalische Modell einen niedrigeren Wirkungsgrad auf, da im Modell der definierte Mindestkraftstoffmassenstrom bis zu einer elektrischen Nettoleistung von ca. 400 W dominiert. Diese Einschränkung ist notwendig, da bei einem geringeren Kraftstoffmassenstrom das Gesamtsystem auszukühlen droht. Bei der Wirkungsgradkennlinie wurde diese Einschränkung nicht berücksichtigt, da von existierenden Verbesserungsmöglichkeiten ausgegangen wird. Eine detaillierte Analyse von Optimierungspotenzialen der APU wurde hier nicht durchgeführt.

### Vergleich zwischen der APU-Kennlinie und dem APU-Modell

Die **Kennlinie** berücksichtigt die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Nutzleistung. Bei der SOFC-APU stellt die Nutzleistung den größten Einfluss auf den Wirkungsgrad dar. Insofern ist die Kennlinie eine gute Möglichkeit zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs.

Das **physikalische Modell** berücksichtigt dynamische Vorgänge und zeitliche Veränderungen, zum Beispiel von Temperaturen. Außerdem wird die Steuerung und Regelung detailliert abgebildet. Dies hat zunächst den Vorteil, dass das APU-System wesentlich genauer als durch eine einfache Wirkungsgradkennlinie abgebildet wird. Allerdings besteht beim APU-Modell eine starke Abhängigkeit des Wirkungsgrades vom Regelverhalten. Änderungen an der Regelung können starke Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch haben. Aussagen zum maximalen Potenzial einer APU können nur nach einer umfangreichen Optimierung der APU-Steuerung getroffen werden.

In einem Beispiel soll der Einfluss der APU-Regelung beim physikalischen Modell gegenüber der einfachen Kennlinie aufgezeigt werden. In Bild 3.14 ist die Wirkungsgradkennlinie der APU dargestellt. Oben dargestellte Abweichungen zwischen dem Kennlinien-Ansatz und dem physikalischen Modell sollen hier nicht betrachtet werden. Ausgehend von einem eingeschwungenen Zustand (1) wird die elektrische Leistung der APU von 500 W auf 250 W reduziert (2). Der APU-Wirkungsgrad zum Zeitpunkt (1) ist bei der Berechnung mit dem physikalischen Modell und mit der Kennlinie gleich. Bei der Berechnung mit der Kennlinie wird nun der Wirkungsgrad auf der optimalen Kennlinie direkt auf den Punkt 2 verschoben (a). Bei der Berechnung mit dem physikalischen Modell wird ebenfalls sofort die Leistung reduziert. Allerdings wird hier berücksichtigt, dass der Kraftstoffmassenstrom nicht zeitgleich angepasst wird. Dadurch besteht im ersten Moment bei gleichem Kraftstoffmassenstrom und halber Leistungsanforderung auch ein auf die Hälfte reduzierter Wirkungsgrad ( $b_1$ ). Erst nach einiger Zeit passt die Kraftstoffregelung den Kraftstoffstrom an ( $b_2$ ), so dass der Wirkungsgrad in Punkt 2 erreicht wird. Der genaue Verlauf bei Laständerung hängt von der Art und Geschwindigkeit der Regelung ab. Die Kurve (c) in Bild 3.14 skizziert eine verbesserte Regelung.



**Bild 3.14:** Prinzipbild der Verschiebung des Arbeitspunkts der APU

Berechnungen mit einer einfachen Kennlinie geben gegenüber Berechnungen mit dem physikalischen Modell also eher das maximale Wirkungsgradpotenzial wieder. Deshalb eignet

sich die Wirkungsgradkennlinie besser für die durchzuführende Potenzialabschätzung. Das APU-Modell dient dazu, Effekte, die den Kraftstoffverbrauch beeinflussen, zu analysieren und über eine Optimierung von Bauteilparametern und der Betriebsstrategie die Machbarkeit der Wirkungsgradkennlinie nachzuweisen. Bei der Betriebsstrategie besteht noch ein großes Optimierungspotenzial. Ziel einer Optimierung der APU-Steuerung und der optimalen Einbindung in das Fahrzeugenergiemanagement ist, die Kurve ( $b_1$ ) weitgehend an die Kurve ( $a$ ) heranzuführen.

Das physikalische APU-Modell beinhaltet iterative Berechnungsanteile. Deshalb kann keine Dynamic-Link-Library (dll) erstellt werden und das APU-Modell nicht direkt in Cruise eingebunden werden. Alternativ erfolgt die Kopplung der Simulinkmodelle, d.h. APU-Modell und Bordnetzabbildung, über eine in Cruise verfügbare Matlab-API (Application Programming Interface). Dabei handelt es sich um eine Schnittstelle, die eine Co-Simulation zwischen Cruise und Matlab ermöglicht. Über die API-Schnittstelle werden die beiden Simulationsprogramme synchronisiert und Daten ausgetauscht. Der größte Nachteil der Co-Simulation ist die wesentlich längere Berechnungsdauer.

### 3.3.3 Bordnetzabbildung

Das elektrische Energiebordnetz verknüpft die elektrischen Energieerzeuger, Speicher und Verbraucher miteinander. Nachfolgend werden fünf Detaillierungsstufen zur Abbildung des Bordnetzes beschrieben.

#### Detaillierungsstufe 1: Leistungsbilanz ohne Batterie

Als erster Schritt wird das Grundfahrzeug um ein Generatormodell erweitert. Das Generatormodell ermittelt aus einem Kennfeld das Generatormoment. In das Kennfeld gehen die Generatorzahl und der Generatorstrom ein. Die Generatorzahl wird aus der Motordrehzahl mit der Übersetzung des Riemetriebes berechnet, siehe Gleichung 3.25. Der Generatorstrom berechnet sich aus der Leistung der elektrischen Verbraucher und einer als konstant angenommenen Generatorspannung, siehe Gleichung 3.26.

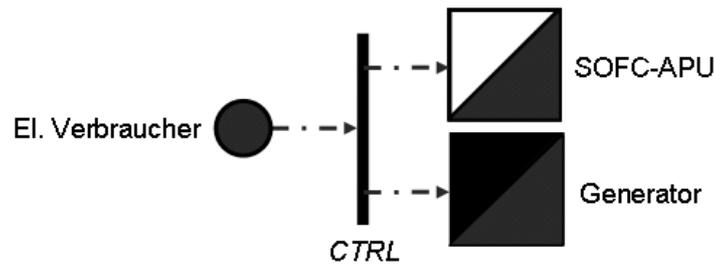
$$n_{Gen} = n_{ICE} \cdot i_{Gen} \quad (3.25)$$

$$I_{Gen} = \frac{P_{el,Verbr}}{U_{Gen}} \quad (3.26)$$

Parallel zum Generator kann eine APU eingesetzt werden, die über die oben beschriebene Wirkungsgradkennlinie abgebildet wird. Da nun zwei Stromerzeuger existieren, muss eine Steuerung (CTRL) entscheiden, welcher Stromerzeuger wie viel Leistung produzieren soll, siehe Bild 3.15. Die Bordnetzspannung wird als konstant angenommen. Ebenso wird von einer konstanten Leistung der elektrischen Verbraucher ausgegangen.

Bei der Auswahl des Stromerzeugers muss zusätzlich der Zustand der APU beachtet werden. Während dem Startup kann die APU noch keinen Strom erzeugen. In dieser Phase muss der Strom komplett vom Generator erzeugt werden.

Da in dieser Detaillierungsstufe noch kein Energiespeicher berücksichtigt wurde, können verschiedene Varianten nicht simuliert werden. So ist keine Betrachtung möglich, bei der



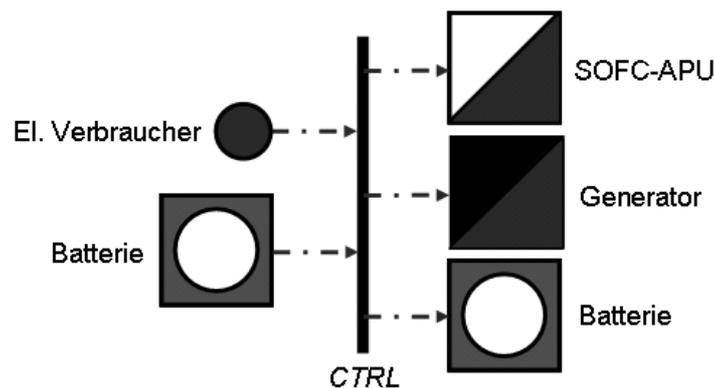
**Bild 3.15:** Aufteilung der el. Leistung der Verbraucher auf den Generator und die APU

die elektrischen Verbraucher während des APU-Startups aus der Batterie versorgt werden. Ebenfalls ist keine Betrachtung der MSA-Funktion ohne APU möglich. Auch die Untersuchung von Rekuperationspotenzialen macht ohne Speicher keinen Sinn.

Der Vorteil dieser 1. Detaillierungsstufe ist, dass eine einfache Ergänzung des Fahrzeug-Grundmodells ausreichend ist. Bei Fahrzeugen ohne APU ist bei der Modellierung keine Erweiterung durch eine Matlab-Dll notwendig. Diese Detaillierungsstufe wird teilweise in der Praxis zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs heutiger Fahrzeuge mit dem Programm Cruise verwendet.

### Detaillierungsstufe 2: Leistungsbilanz mit Batterie

Zur Betrachtung aller Anwendungen, sprich auch MSA und Rekuperation, wird das Modell um einen elektrischen Energiespeicher, hier eine 12V-Bleibatterie, erweitert. Gleichzeitig werden die Stromerzeuger auf ihre maximale Leistung begrenzt. Wird mehr Strom durch die elektrischen Verbraucher angefordert als erzeugt werden kann, muss dieser Strom aus der Batterie entnommen werden. Durch die Modellierung der Batterie können nun Betriebsstrategien betrachtet werden, die den Ladezustand der Batterie berücksichtigen.



**Bild 3.16:** Leistungsbilanz mit Batterie

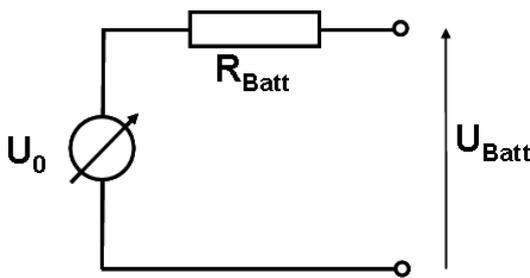
Wie in der 1. Detaillierungsstufe wird auch hier die Leistung der beteiligten Elemente über eine Leistungsbilanz berechnet, siehe Bild 3.16. Dabei kann die Batterie sich zu jedem Zeitschritt sowohl wie eine elektrische Energiequelle als auch wie eine Senke verhalten. Die Aufteilung der Leistungsströme wird über eine CTRL-Einheit gesteuert. Die Bordnetzspannung wird weiterhin als konstant angenommen.

Die 2. Detaillierungsstufe stellt eine zweckmäßige Erweiterung der 1. Stufe dar, so dass alle im Kapitel 2 definierten Anwendungen untersucht werden können. Durch die konstante Bordnetzspannung kann es jedoch vor allem bei neuen Betriebsstrategien wie Rekuperation und MSA noch zu größeren Ungenauigkeiten kommen.

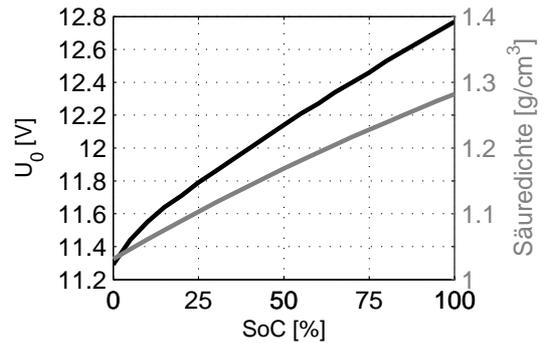
### **Detaillierungsstufe 3:** Bordnetzmodell mit $P_{el,Verbr} = konstant$

In der 3. Detaillierungsstufe wird anstatt der Betrachtung von elektrischen Leistungen eine Modellierung von Strom und Spannung eingeführt.

Die Umstellung der Betrachtung von Leistungen auf Ströme und Spannungen führt dazu, dass auch die beteiligten Bauteile entsprechend modelliert werden müssen. APU und Generator haben jeweils einen Spannungsregler, der versucht, eine vorgegebene Soll-Spannung einzustellen. Die elektrischen Verbraucher werden als leistungskonstant angenommen, so dass Strom und Spannung sich indirekt proportional verhalten. Die Batterie wird über ein einfaches Innenwiderstandsmodell abgebildet, siehe Bild 3.17. Die Klemmenspannung  $U_{Batt}$  berechnet sich nach Gleichung 3.27, wobei die Ruhespannung  $U_{Batt,0}$  und der Innenwiderstand  $R_{Batt}$  vom Ladezustand und der Temperatur der Batterie abhängen.



(a) Ersatzschaltbild



(b)  $U_0 = f(\text{SoC})$

**Bild 3.17:** Batteriemodell: Abbildung der Batterie über eine Spannungsquelle und einen Innenwiderstand

$$U_{Batt} = U_{Batt,0} + R_{Batt} \cdot I_{Batt} \quad (3.27)$$

Der Generator, die APU, die Batterie und die elektrischen Verbraucher sind parallel geschaltet, siehe Bild 2.24 in Kapitel 2. Das heißt, dass alle Elemente die selbe Spannung haben (2. Kirchhoffsches Gesetz). Die Höhe der Spannung hängt von der Höhe der Stromflüsse, dem Batterieladezustand und weiteren Einflussfaktoren wie der Temperatur und der Generatorzahl ab.

Durch einen geeigneten Rechenalgorithmus soll der Zusammenhang von Strom und Spannung abgebildet und berechnet werden. Das standardmäßige Vorgehen ist das Aufstellen aller Maschen- und Knotengleichungen, sowie die Lösung dieser Gleichungen durch einen geeigneten Solver. Mit Simulink können derartige Gleichungen iterativ gelöst werden. Allerdings entsteht dabei eine so genannte „algebraic loop“ und das Modell kann nicht mehr in eine Dll umgewandelt werden. Die Umwandlung ist jedoch notwendig, damit das Modell in Cruise eingebunden werden kann.

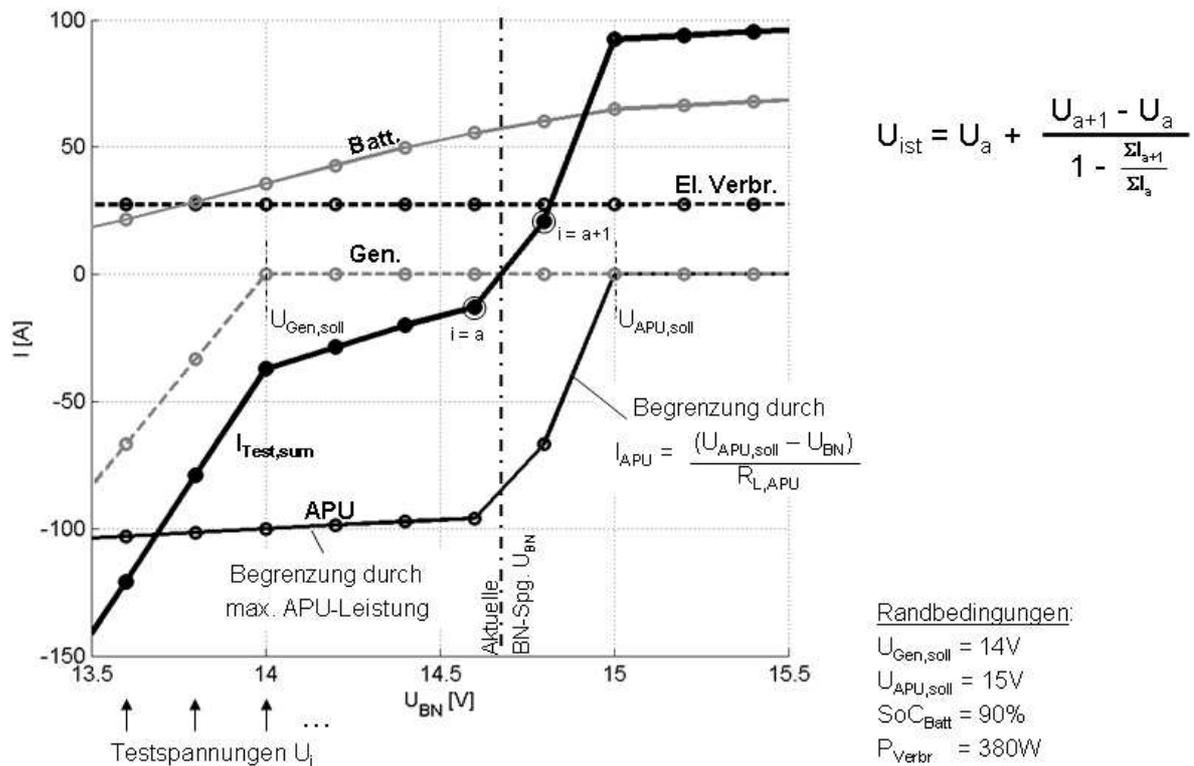
Zur Lösung dieses Zielkonflikts wird ein anderer Ansatz über ein Interpolationsverfahren gewählt. Als Bordnetzspannung werden mehrere Testspannungen definiert (Gleichung 3.28). Zu jeder Testspannung werden Testströme von Generator, APU, Batterie und elektrischen Verbrauchern ermittelt (Gleichung 3.29). Die Testströme werden für jede Testspannung addiert, siehe Gleichung 3.30.

$$\vec{U}_{Test} = \begin{pmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

$$\vec{I}_{Test,i} = f(\vec{U}_{Test}) \quad \text{mit } i \in \{Gen, APU, Batt, Verbr\} \quad (3.29)$$

$$\vec{I}_{Test,sum} = \sum_i \vec{I}_{Test,i} \quad (3.30)$$

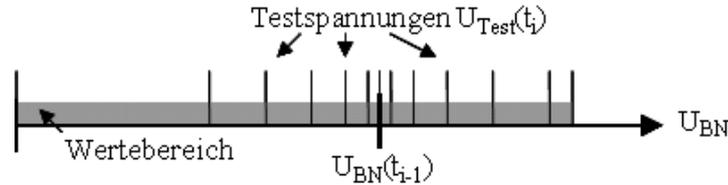
Nun wird über Interpolation ermittelt, bei welcher Spannung die Summe der Ströme null ergibt, siehe Bild 3.18. Bei dieser Spannung ist die Knotengleichung erfüllt. Die ermittelte Spannung entspricht der aktuellen Bordnetzspannung. Aus ihr können anschließend die tatsächlichen Ströme berechnet werden.



**Bild 3.18:** Bestimmung der aktuellen Bordnetzspannung über Interpolation

In Bild 3.18 sind die Testspannungen äquidistant im Abstand von 0,2 V gewählt. Dadurch werden teilweise die Zwischenbereiche nicht exakt abgebildet, so z.B. der APU-Strom im Beispiel zwischen 14,6 V und 14,8 V. Durch einen geringeren Abstand der Testspannungen wäre eine Optimierung möglich. Allerdings würde dies zu wesentlich größeren Vektoren führen.

Eine bessere Optimierung der Methode wird erreicht, indem die Testspannungen den Wertebereich nicht gleichmäßig abdecken, sondern im Bereich der zuletzt berechneten Bordnetzspannung konzentriert sind, siehe Bild 3.19. So wird mit einer geringen Anzahl an Testspannungen die Bordnetzspannung mit guter Genauigkeit bestimmt. Nur im Moment einer großen Änderung der aktuellen Bordnetzspannung tritt noch eine hohe Ungenauigkeit auf.



**Bild 3.19:** Definition von Testspannungen, konzentriert um die zuletzt berechnete Bordnetzspannung

#### Detailierungsstufe 4: Bordnetzmodell mit $P_{el,Verbr} = f(U_{BN})$

Die Leistungsaufnahme der elektrischen Verbraucher hängt teilweise stark von der Spannung ab, siehe Sensitivitätsanalyse in Kapitel 4.6. Nur ca. 1/3 der elektrischen Verbraucher sind leistungskonstant. Das heißt, bei einer niedrigeren Bordnetzspannung fordern die meisten elektrischen Verbraucher eine geringere Leistung an. Dieser Punkt soll nun in der 4. Detailierungsstufe berücksichtigt werden, indem die Verbraucher in  $R$ -,  $P$ - und  $I$ -konstante Verbraucher aufgeteilt werden:

$$P_{el,Verbr} = P_{el,Verbr,R} + P_{el,Verbr,P} + P_{el,Verbr,I} \quad (3.31)$$

Die Nennleistung der Verbraucher ist auf eine Spannung  $U_{Bezug}$  von 14 V bezogen. Die Berechnung der einzelnen Anteile ist in den Gleichungen 3.32 - 3.34 dargestellt.

$$P_{el,Verbr,R} = P_{el,Verbr,Bezug} \cdot p_{el,Verbr,R} \cdot (U_{BN}/U_{Bezug})^2 \quad (3.32)$$

$$P_{el,Verbr,P} = P_{el,Verbr,Bezug} \cdot p_{el,Verbr,P} \quad (3.33)$$

$$P_{el,Verbr,I} = P_{el,Verbr,Bezug} \cdot p_{el,Verbr,I} \cdot U_{BN}/U_{Bezug} \quad (3.34)$$

Die Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit der elektrischen Verbraucher führt zu einem höheren Aufwand bei der Bereitstellung von Inputdaten. Ob dieser Aufwand gerechtfertigt ist, soll der Methodenvergleich in Kapitel 3.5 zeigen.

#### Detailierungsstufe 5: Bordnetzmodell mit $P_{el,Verbr} = f(U_{BN}, t)$

Bisher wurde immer von über die Zeit konstanten elektrischen Verbrauchern ausgegangen. Tatsächlich besteht am Anfang einer Fahrt eher ein höherer elektrischer Leistungsbedarf, da zu diesem Zeitpunkt oft elektrische Verbraucher im Einsatz sind, z.B. die Sitzheizung oder Heckscheibenheizung, die später reduziert oder abgeschaltet werden.

Dieser Effekt soll in einer 5. Detailierungsstufe berücksichtigt werden, so dass neben der Spannungsabhängigkeit zusätzlich eine zeitliche Abhängigkeit der elektrischen Verbraucher modelliert wird. Wie bereits in der 4. Detailierungsstufe ist ein zusätzlicher Aufwand vor allem durch die Bereitstellung von detaillierten Inputdaten für die Simulation gegeben.

### 3.3.4 Klimatisierung und Heizung

Klimatisierung und Heizung sollen in den folgenden Simulationen nur am Rande betrachtet werden. Deshalb werden relativ einfache Modellierungsansätze gewählt.

Die Klimatisierung wird ähnlich wie bei der Abschätzung über einen COP (Coefficient of Performance) betrachtet. Der Unterschied zur Abschätzung besteht darin, dass die Wirkungsgradkette vom Kraftstoff bis zum Klimakompressor genauer abgebildet wird. Außerdem kann ein zeitabhängiges Inputsignal für die gewünschte Kälteleistung vorgegeben werden.

Bei der Heizung soll analog zur Abschätzung von einem zusätzlichen Bedarf an Wärmeleistung im Kühlwasser ausgegangen werden. Im Unterschied zur Abschätzung kann der zusätzliche Kraftstoffaufwand zur Wärmeerzeugung per APU über das vorliegende APU-Modell genauer ermittelt werden.

Eine detaillierte Betrachtung des Wärmehaushalts des Verbrennungsmotors ist mit dem vorliegenden Cruise-Modell leider nicht möglich. Cruise bietet eine Möglichkeit die Wärmekapazität des Verbrennungsmotors durch eine äquivalente Wassermasse abzubilden [54]. Dies führt jedoch zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis. Das Warmlaufverhalten weicht von dem aus Versuchen ermittelten Verhalten stark ab.

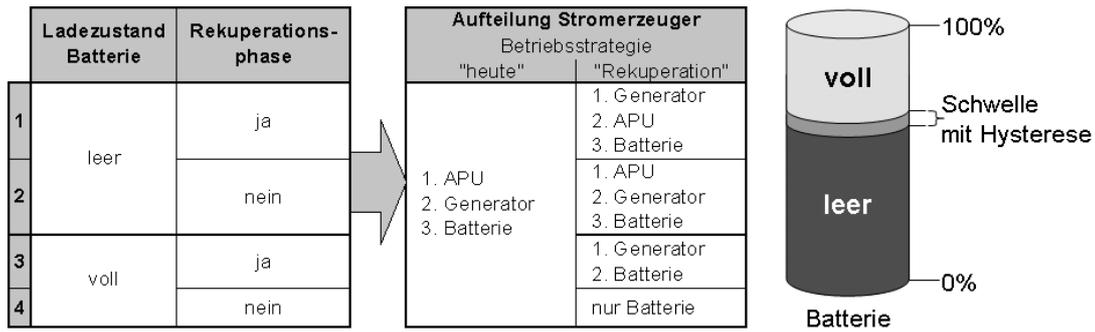
### 3.3.5 Betriebsstrategien

In Kapitel 2 wurden verschiedene Betriebsstrategien aufgeführt, die bei der Integration einer APU ins Fahrzeug eine Rolle spielen. Diese Betriebsstrategien müssen ausgearbeitet und im Modell implementiert werden.

#### Bordnetzmanagement inklusive Rekuperation

Das Bordnetzmanagement bestimmt, wann welcher Energieerzeuger wieviel elektrische Leistung bereitstellt. Bei der 1. Detaillierungsstufe wird nur digital zwischen den zwei möglichen Erzeugern APU und Generator unterschieden. Ohne APU übernimmt der Generator bei allen Betriebsstrategien die Stromerzeugung. Die Generatorleistung  $P_{el,Gen}$  ist dabei stets gleich der Verbraucherleistung  $P_{el,Verbr}$ . Die MSA-Funktion kann ohne APU bei der Detaillierungsstufe 1 nicht betrachtet werden, da kein Energiespeicher berücksichtigt wird. Mit APU übernimmt meist die APU die komplette elektrische Energieversorgung. Nur während einer Rekuperationsphase (= Bremsphase) übernimmt der Generator die komplette Stromerzeugung.

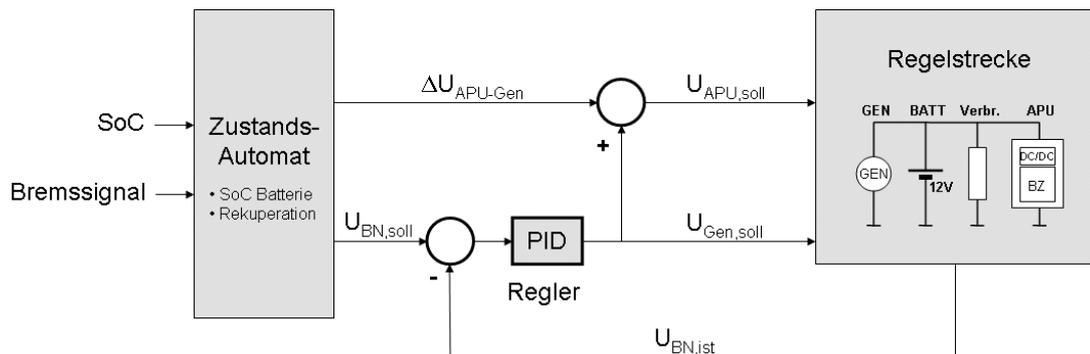
Bei der 2. Detaillierungsstufe kann der Ladezustand der Batterie bei der Betriebsstrategie mit berücksichtigt werden. Dies ist bei der Rekuperationsstrategie wichtig, da bei voller Batterie die Batterie gezielt entladen wird um einen Speichervorhalt für kommende Rekuperationsphasen zu schaffen, siehe auch Beschreibung Rekuperationsstrategie in Kapitel 2. In Bild 3.20 ist dargestellt, welcher Energieerzeuger primär elektrische Leistung für das Bordnetz bereitstellt. Bei der Betriebsstrategie „heute“ stellt immer zunächst die APU die angeforderte elektrische Leistung bereit. Erst wenn die APU ihre maximale Leistung erreicht hat (oder keine APU verbaut ist), erzeugt der Generator zusätzliche elektrische Leistung. Sollte der elektrische Leistungsbedarf so hoch sein, dass APU und Generator zusammen nicht ausreichend Leistung erzeugen, wird zusätzlich elektrische Energie aus



**Bild 3.20:** Bordnetzmanagement (Detaillierungsstufe 2)

der Batterie entnommen. Bei der Betriebsstrategie „Rekuperation“ geschieht die Aufteilung der Stromerzeugung abhängig vom Ladezustand der Batterie und von der Rekuperationsmöglichkeit. Die Umschaltung des Ladezustands der Batterie zwischen voll und leer erfolgt über eine Hysterese. So wird ein ständiges Umschalten im Bereich des Grenzwertes vermieden.

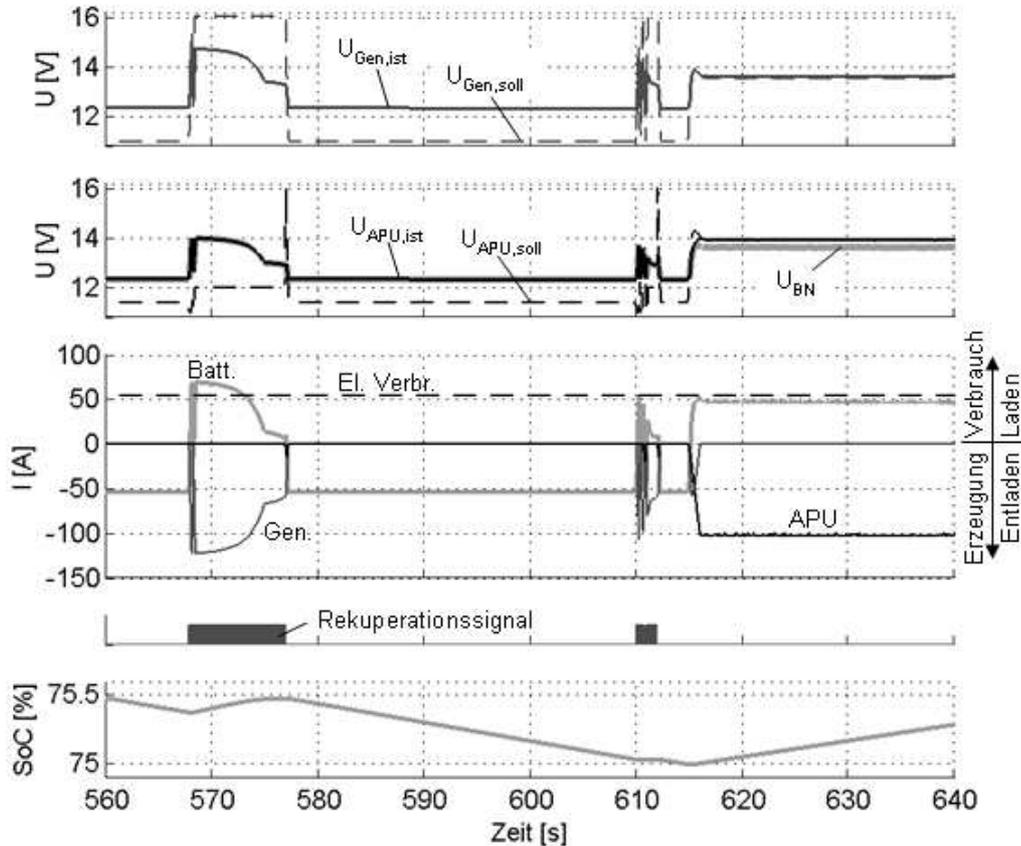
Bei den Detaillierungsstufen 3 - 5 liegt kein zentrales Steuerelement zur Leistungsaufteilung mehr vor. Sie wird nun indirekt über die Vorgabe von Soll-Spannung gesteuert.



**Bild 3.21:** Regelung der Bordnetzspannung über die Vorgabe der Generator- und APU-Spannungen

In Bild 3.21 ist das Regelprinzip von APU- und Generatorspannung dargestellt. Im Zustandsautomat wird wie bei der 2. Detaillierungsstufe, siehe Bild 3.20, zwischen vier Zuständen unterschieden. Bei einer Rekuperationsanforderung wird  $\Delta U_{APU-Gen}$  auf  $-2\text{ V}$  gesetzt, so dass dem Generator eine wesentlich höhere Soll-Spannung als der APU vorgegeben wird. Dadurch erfolgt die Stromerzeugung weitgehend durch den Generator. Die Soll-Bordnetzspannung  $U_{BN,soll}$  wird während einer Rekuperationsphase auf  $14,8\text{ V}$  angehoben, damit die Batterie mehr Strom aufnimmt. Wenn keine Rekuperationsphase vorliegt, soll in erster Linie die APU die Stromversorgung übernehmen. Dies wird dadurch erreicht, dass  $\Delta U_{APU-Gen}$  auf  $0,4\text{ V}$  gesetzt wird. Wenn die vorgegebene Soll-Bordnetzspannung aufgrund einer voll ausgelasteten APU nicht erreicht wird, hebt der PID-Regler die Soll-Spannung von Generator und APU automatisch an. Sobald die Soll-Spannung des Generators die Ist-Bordnetzspannung übertrifft, unterstützt der Generator die APU bei der Stromerzeugung. Soll die Batterie gezielt entladen werden, wird die Soll-Bordnetzspannung auf einen Wert unterhalb der Batteriespannung abgesenkt. Der PID-

Regler reduziert die Spannungsvorgaben für APU und Generator, so dass beide Wandler keine elektrische Leistung liefern.



**Bild 3.22:** Zeitverlauf der Rekuperation (bei betriebsbereiter APU)

In Bild 3.22 ist der zeitliche Verlauf von Strom, Spannung und Batterieladezustand eines Ausschnitts einer Fahrt im *NEDC* dargestellt. Zu Beginn des gezeigten Ausschnitts, bei 560 s, wird die Stromversorgung der elektrischen Verbraucher allein von der Batterie übernommen. APU- und Generatorstrom sind jeweils 0. Der Ladezustand der Batterie (SoC) nimmt kontinuierlich ab. Bei 568 s liegt die erste Rekuperationsphase vor. Die Soll-Spannung des Generators wird auf maximal 16 V angehoben. Generatorspannung und Generatorstrom steigen. Der Generatorstrom erreicht die drehzahlabhängige Maximalstromkennlinie, so dass hier eine Begrenzung der Generatorspannung bei 14,7 V auftritt. Die Generator-Soll-Spannung wird nicht erreicht. Die Bordnetzspannung erreicht zu diesem Zeitpunkt aber immerhin 14 V, so dass die Batterie einen relativ hohen elektrischen Strom aufnimmt. Zum Ende der Rekuperationsphase sinkt die Generatorspannung und damit auch die Bordnetzspannung und der Batteriestrom, da der Generator aufgrund der abnehmenden Drehzahl weniger Strom produzieren kann. Bei einer geringeren Generatorauslastung, vor allem bei einer kleineren elektrischen Verbraucherleistung, würde die Bordnetzspannung während der Rekuperationsphase auf bis zu 14,8 V geregelt werden. Die APU liefert während Rekuperationsphasen keinen Strom. Der Unterschied zwischen Generatorspannung und Bordnetzspannung entspricht dem Spannungsabfall an der Lei-

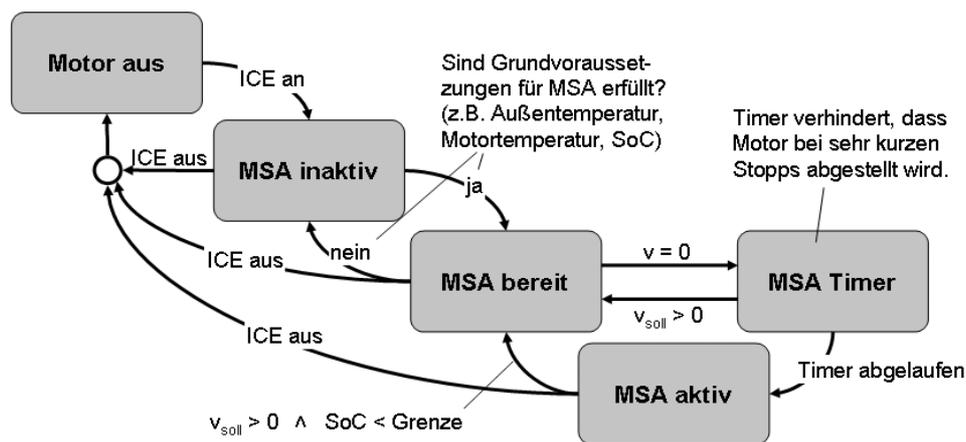
tung. Die APU-Spannung ist gleich der Bordnetzspannung wenn kein Strom von der APU ins Bordnetz fließt.

Nach der Rekuperationsphase wird die Generator-Soll-Spannung wieder auf ein Niveau unterhalb der Batteriespannung abgesenkt. Dadurch wird der Generator entregt und der Generatorstrom wird null. Kurz nach der zweiten Rekuperationsphase bei 615s erreicht der Batterieladezustand seine untere Schwelle, so dass die Betriebsstrategie von Entladen auf Laden umschaltet. Die APU-Soll-Spannung wird so vorgegeben, dass sich eine Bordnetzspannung von 13,6 V einstellt. APU-Soll- und Ist-Spannung sind in diesem Beispiel nach einer kurzen Einregelzeit nahezu identisch. Die Generator-Soll-Spannung liegt 0,4 V unterhalb der APU-Soll-Spannung. Solange die Bordnetzspannung über der Generator-Soll-Spannung liegt, produziert der Generator keinen Strom. Erst wenn die Bordnetzspannung den Wert der Generator-Soll-Spannung unterschreitet, erzeugt der Generator Strom um die Soll-Spannung einzustellen.

Die beschriebene Betriebsstrategie hat den Vorteil, dass sie die bestehende Generatorschnittstelle zur Vorgabe einer Soll-Spannung nutzt. Die Vorgehensweise ist relativ robust, da außer SoC, Bremssignal und Bordnetzspannung keine weiteren Informationen, wie z.B. Höhe der Stromverbraucher oder APU-Größe, bekannt sein müssen. Die Regelung wurde mit dem Tool *Stateflow* umgesetzt.

### Motor-Stopp-Automatik (MSA)

Die MSA-Funktion wird neu in das bestehende Fahrzeugmodell integriert. Die MSA-Steuerungseinheit entscheidet anhand verschiedener Inputgrößen, ob der Motor abgeschaltet wird und gibt dementsprechend ein Signal an den Motor aus. Die Programmierung erfolgte mit *Stateflow*, siehe Bild 3.23.



**Bild 3.23:** Umsetzung der MSA-Steuerung mit *Stateflow*

Zu sehen sind in Bild 3.23 die einzelnen Zustände, in denen sich die MSA-Funktion befinden kann. Ausgehend von „Motor aus“ wird bei Motorstart in den Zustand „MSA inaktiv“ geschaltet. Wenn alle Grundvoraussetzungen für MSA, z.B. ein ausreichender Ladezustand der Batterie, erfüllt sind, wird in den Zustand „MSA bereit“ gewechselt. Nun wird die Fahrzeuggeschwindigkeit beobachtet. Sobald die Geschwindigkeit null ist, wird ein Timer im Zustand „MSA Timer“ aktiviert. Nach einer vorgegebenen Zeit wird

auf den Zustand „MSA aktiv“ geschaltet. Dieser Zustand veranlasst, dass der Motor abgeschaltet wird. Sobald die Sollgeschwindigkeit<sup>35</sup> größer null wird oder MSA-Anforderungen, z.B. der Batterieladezustand nicht mehr erfüllt werden, wird der Zustand „MSA aktiv“ verlassen und der Motor wieder gestartet.

### 3.3.6 SoC-Ausgleich

Zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs für die Stromerzeugung sollte der Ladezustand der Fahrzeugbatterie bei Fahrtbeginn und Fahrtende gleich sein. Nur so kann ein fairer Vergleich zwischen verschiedenen Systemen und Betriebsstrategien durchgeführt werden. Wichtig ist ein Ausgleich des Ladezustands vor allem bei neuen Betriebsstrategien wie Rekuperation und Motor-Stopp-Automatik, da nun der Ladezustand der Batterie zunehmend variiert. Besonders wichtig wird der Ausgleich bei Hybridfahrzeugen, da hier die Batterie einen größeren Energiedurchsatz erfährt.

Es bestehen zwei Möglichkeiten einen ausgeglichenen Ladezustand einzustellen:

1. **Energetische Bewertung des  $\Delta SoC$ :** Die Differenz des Ladezustands von Fahrtbeginn und Fahrtende wird rechnerisch in einen Kraftstoffverbrauch umgerechnet. Liegt der Ladezustand am Fahrtende über dem Ausgangszustand, wird eine Kraftstoffgutschrift berechnet.
2. **Anpassung des Ausgangsladezustands:** Der Ladezustand der Batterie zu Fahrtbeginn wird so vorgegeben, dass sich am Fahrtende der selbe Ladezustand einstellt. In der Simulation wird dies durch Optimierungsroutinen erreicht. Bei Messungen ist dieses Vorgehen nur bedingt möglich.

Bei der **Energetischen Bewertung** des  $\Delta SoC$  wird der SoC-Unterschied mit der Nennkapazität  $C_{nenn}$  der Batterie und einer durchschnittlichen Ladespannung  $U_{BN}$  multipliziert. So erhält man die notwendige elektrische Energie, die zum Ausgleich fehlender Ladung notwendig ist, bzw. die bei einem zu hohen Ladezustand zu viel aufgewendet wurde. Diese Energie muss mit dem Stromerzeugungswirkungsgrad  $\eta_{Erz}$  verrechnet werden. Die Berechnung ist in Gleichung 3.35 zusammengefasst. Der Stromerzeugungswirkungsgrad hängt davon ab, ob die APU oder der Generator die Stromerzeugung übernimmt.

$$\Delta KV = \frac{1}{\eta_{Erz}} \cdot \Delta SoC \cdot C_{nenn} \cdot U_{BN} \quad (3.35)$$

Der Vorteil dieser Methode ist, dass sie leicht anwendbar ist und eine Korrektur der Ergebnisse nach einer Simulation oder Messung ermöglicht. Allerdings eignet sich die Methode nur bei kleinen Abweichungen des Ladezustands vom Sollzustand. Bei größeren Abweichungen kann es zu Effekten kommen, die durch die einfache Korrektur über den Stromerzeugungswirkungsgrad nicht mehr abgedeckt werden. Dies soll an einem Beispiel verdeutlicht werden:

---

<sup>35</sup>In der Simulation kann mit der Sollgeschwindigkeit gearbeitet werden. In der Realität wird die Sollgeschwindigkeit dem Fahrzeug nur indirekt über das Gaspedal vorgegeben. Die MSA-Funktion muss deshalb anhand von Gas-, Kupplungs-, Brems- oder Gangsignal geschaltet werden.

*Ein Zyklus wird mit voller Batterie gestartet. Der Zyklus hat viele Standphasen, in denen der Motor durch eine MSA-Funktion automatisch abgeschaltet wird. Die Batterie entleert sich in dieser Zeit. Während der Fahrt wird die Batterie wieder gefüllt. Der Ladezustand kann jedoch nicht komplett ausgeglichen werden, da der Generator an seiner Leistungsgrenze angelangt ist. Am Ende der Fahrt hat die Batterie eine negative Ladebilanz von 10%.*

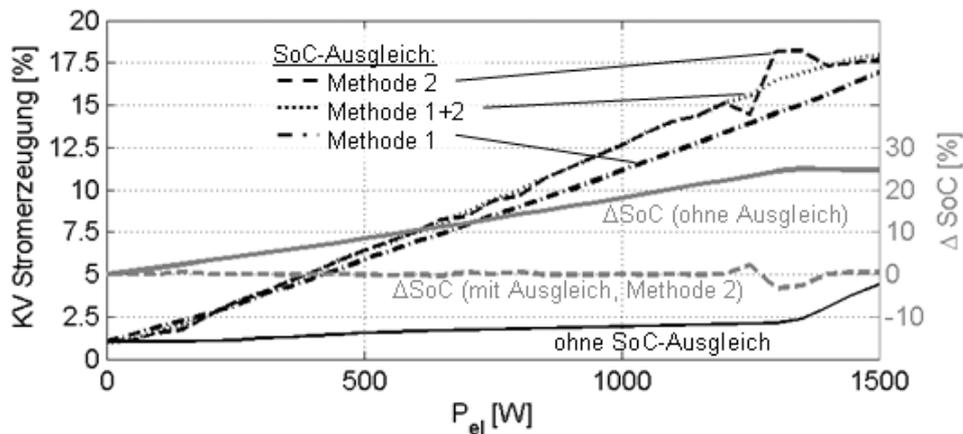
*Wird dieser Zyklus nun mehrmals hintereinander gefahren, wird die Batterie immer weiter entladen. Ab einer bestimmten Grenze muss das Energiemanagement im Fahrzeug ein weiteres Entladen verhindern, damit die Startfähigkeit des Fahrzeugs erhalten bleibt. Verhindert wird das weitere Entladen, indem die Motor-Stopp-Automatik deaktiviert wird. Dadurch wird aber auch der Kraftstoffverbrauch wesentlich beeinflusst. Dieser Einfluss wird durch die einfache Korrektur über den Stromerzeugungswirkungsgrad nicht mehr abgebildet.*

Das Beispiel stellt einen extremen Einfluss dar. Auch andere Effekte führen zu einer ungenauen Korrektur:

- Abhängig vom Ladezustand ändert sich die Stromaufnahmefähigkeit sowie die Leerlaufspannung der Batterie.
- Neben der Betriebsstrategie MSA hängen auch die Betriebsstrategie der Rekuperation und das Zusammenspiel von APU und Generator vom Ladezustand der Batterie ab.
- APU- und Generatorwirkungsgrad ändern sich mit der Höhe der Stromproduktion.

Eine bessere Möglichkeit einen ausgeglichenen Ladezustand zu erreichen stellt die **Anpassung** des **Ausgangsladezustands** dar. Über eine Optimierungsroutine wird der Unterschied zwischen Ladezustand zu Fahrtbeginn und Fahrtende minimiert. Wenn nun der Zyklus mehrmals hintereinander gefahren wird, wird jedes Mal das selbe Ergebnis erzeugt.

In Bild 3.24 ist der Effekt des SoC-Ausgleichs dargestellt. Bei einem Fahrzeug mit Rekuperationsstrategie wurde im *NEDC* die elektrische Verbraucherleistung variiert, aufgetragen auf der x-Achse. Auf der y-Achse ist der Kraftstoffverbrauch für die Stromerzeugung aufgetragen. Eine zweite y-Achse bildet den Unterschied des Batterieladezustands  $\Delta SoC$  zwischen Fahrtbeginn und Fahrtende ab. Ohne SoC-Ausgleich wird bei Fahrtbeginn mit einem SoC von 100 % gerechnet. Man sieht, dass  $\Delta SoC$  mit zunehmender elektrischer Verbraucherleistung steigt, da die Rekuperationsstrategie eine gezielte Batterieentladung verfolgt um einen Speichervorhalt zu schaffen. Der Kraftstoffverbrauch steigt ohne SoC-Ausgleich nur minimal, da der zusätzliche elektrische Energiebedarf weitgehend aus der Batterie stammt. Erst bei 1350 W erreicht  $\Delta SoC$  ein stabiles Niveau und der Kraftstoffverbrauch steigt. Ein Grundverbrauch für die Stromerzeugung besteht auch bei 0 W Leistungsanforderung durch das Leerlaufmoment des mitdrehenden Generators, das nicht im Basisverbrauch des Fahrzeugs enthalten ist. Mit SoC-Ausgleich nach Methode 2 ist  $\Delta SoC$  über den gesamten Leistungsbereich nahezu konstant. Der Kraftstoffverbrauch steigt kontinuierlich. Nur im Bereich über 1200 W gelingt es nicht durch Variation des Anfangsladezustands den Ladezustand voll auszugleichen. Dies macht sich sofort durch Unregelmäßigkeiten im Kraftstoffverbrauch bemerkbar. Durch eine zusätzliche Korrektur



**Bild 3.24:** Vergleich der Methoden zum SoC-Ausgleich. Methode 1: Energetische Bewertung des  $\Delta\text{SoC}$ . Methode 2: Anpassung des Ausgangsladezustands. (Angabe des Kraftstoffverbrauchs für die Stromerzeugung bezogen auf den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs ohne Stromerzeugung).

mit Methode 1 (Kombination Methode 1+2) lässt sich der Ladezustand voll ausgleichen. Der SoC-Ausgleich kann auch komplett durch Methode 1 erfolgen. Da dafür ein konstanter Wirkungsgrad für die Stromerzeugung verwendet wird, stimmt die Korrektur nur in einem Punkt in Bild 3.24 mit der Methode 2 exakt überein.

In den folgenden Simulationen wird aus den oben genannten Gründen stets die zweite Methode (Anpassung des Ausgangsladezustands) zum SoC-Ausgleich verwendet. Verbleibende Abweichungen werden zusätzlich über die erste Methode (Rückrechnung  $\Delta\text{SoC}$  in einen Kraftstoffverbrauch) mit berücksichtigt. Bei der Abschätzung und bei Simulationen mit der Detaillierungsstufe 1 wird kein Ladezustand berechnet. Hier ist kein SoC-Ausgleich notwendig.

### 3.4 Messung

Die Voraussetzung zur Durchführung von Messungen ist die Verfügbarkeit von Hardware und Prüfvorrichtungen. Vor allem der erste Punkt ist oft kritisch, da in der frühen Entwicklungsphase oft noch keine Bauteile vorhanden sind. In dieser Arbeit dienen Messungen in erster Linie zur Bereitstellung von Inputdaten für Simulationen und Abschätzungen sowie zur Validierung von Teilmodellen.

Folgende Versuche wurden durchgeführt:

- Kraftstoffverbrauchsmessungen auf dem Rollenprüfstand
- Charakterisierung des elektrischen Energiebordnetzes
- Kraftstoffverbrauchsmessung einer Standklimatisierung

Der Aufbau und die Durchführung der Messungen werden nachfolgend beschrieben. Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit Simulationsergebnissen erfolgt in Kapitel 3.5.2. Die

Versuche erfolgten mit einem heutigen Fahrzeug. Versuche mit einem Fahrzeug mit integrierter SOFC-APU wurden nicht durchgeführt.

### 3.4.1 Kraftstoffverbrauchsmessung auf dem Rollenprüfstand

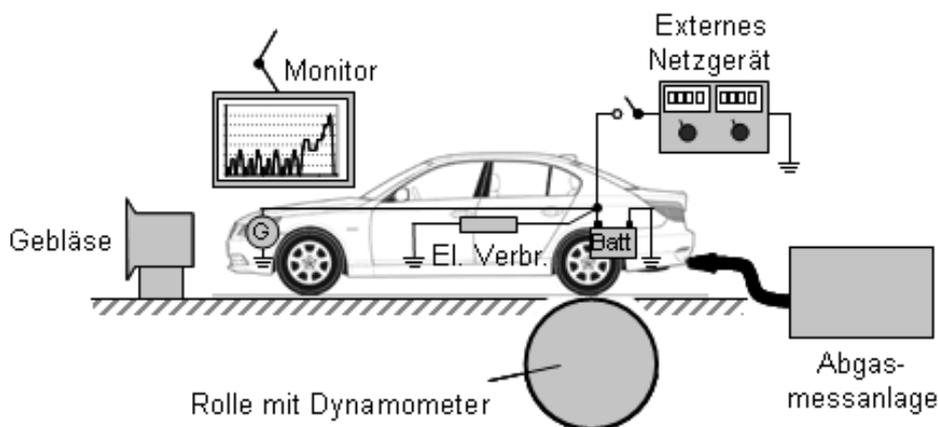
Das Ziel der Messungen auf dem Rollenprüfstand war primär die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchunterschieds eines heutigen Fahrzeugs mit und ohne Stromerzeugung per Generator im *NEDC*. Zusätzlich sollte die Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauchs von der elektrischen Leistungsanforderung der Verbraucher bei konstanter Fahrt untersucht werden sowie der Verbrauchsunterschied zwischen kaltem und betriebswarmem Fahrzeug ermittelt werden.

#### Versuchsaufbau

An dieser Stelle folgt eine kurze Beschreibung des Rollenprüfstands und des Versuchsfahrzeugs.

#### Rollenprüfstand

Die Messungen fanden auf einem Rollenprüfstand statt. Der Prüfstand ist in Bild 3.25 dargestellt. Das Versuchsfahrzeug wird mit den angetriebenen Hinterrädern auf einer Rolle platziert. Ein Gebläse vor dem Fahrzeug simuliert die Luftströmung in den Motorraum zur Kühlung des Motors. Über einen Monitor sieht der Fahrer den vorgegebenen Geschwindigkeitsverlauf sowie die aktuelle Geschwindigkeit. Er muss über Gas und Bremse die Geschwindigkeit so regeln, dass ein vorgegebenes Toleranzband nicht verlassen wird. Der einzulegende Gang ist über die Zeit vorgegeben.



**Bild 3.25:** Rollenprüfstand mit dem Versuchsfahrzeug und einem separaten Netzgerät als Ersatz für die APU

Die Räder des Fahrzeugs treiben die Rolle an. Dabei übt die Rolle einen Widerstand aus, der den Fahrwiderständen, siehe Kapitel 2.1.4, entspricht. Die Prüfung wird nach der offiziellen Vorschrift zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs im *NEDC* [56] vorgenommen, inklusive der Vorgabe zur Verwendung von Schwungmassenklassen. Dadurch wird nicht das tatsächliche Fahrzeuggewicht herangezogen, sondern das Referenzgewicht der

zutreffenden Schwungmassenklasse. Der Luftwiderstand des Fahrzeugs muss durch Ausrollversuche ermittelt werden. Die Werte lagen für das verwendete Fahrzeug bereits vor, so dass kein eigener Ausrollversuch durchgeführt werden musste.

Die Abgase des Fahrzeugs werden über einen Schlauch in eine Abgas-Analyseanlage geleitet. Dabei werden alle Gase analysiert und quantifiziert. Über die analysierten Abgase und die chemische Zusammensetzung des Kraftstoffs wird der volumetrische Kraftstoffverbrauch berechnet.

### Versuchsfahrzeug

Als Versuchsfahrzeug stand das bereits beschriebene Basisfahrzeug, ein BMW 530i, zur Verfügung. Das Fahrzeug wurde mit folgenden Messstellen ausgestattet:

- Strom und Spannung an Generator, Batterie und elektrischen Verbrauchern<sup>36</sup>
- Temperatur in der Ölwanne, im Kühlmittelkreislauf und im Abgasstrang

Zusätzlich wurden verschiedene Fahrzeugdaten aus der Motorsteuerung aufgezeichnet, z.B. die Motordrehzahl, die Kraftstoffeinspritzmenge und die Motortemperatur. Die Spannungsversorgung des Messsystems erfolgte über eine eigene Messtechnikbatterie, so dass das Fahrzeugbordnetz nicht beeinflusst wurde.

Zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs ohne Stromerzeugung wurde ein zuschaltbares externes Netzgerät mit dem Bordnetz in der Nähe der Fahrzeugbatterie verbunden. Zusätzlich wurde über einen BSD-DME<sup>37</sup>-Simulator die Möglichkeit vorgesehen, den Generator zu entregen, indem ihm eine niedrige Soll-Spannung von  $10,6\text{ V}$ <sup>38</sup> vorgegeben wurde.

### Versuchsablauf

Der grundlegende Versuchsablauf ist in Bild 3.26 dargestellt. Zunächst wurde das Fahrzeug betankt. Vor der Messung wurde ein Prezyklus gefahren. Danach wurde das Fahrzeug für mindestens  $12\text{ h}$  bei  $24^\circ\text{C}$  Umgebungstemperatur konditioniert. Die Fahrzeugbatterie wurde dabei über ein externes Ladegerät ständig geladen. Dann wurde der *NEDC* gefahren und der Kraftstoffverbrauch gemessen. Nach dem *NEDC* mit Kaltstart wurden weitere Messungen mit warmem Motor durchgeführt, unter anderem zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchsunterschieds zwischen kaltem und warmem Fahrzeug. Bevor der nächste *NEDC* mit kaltem Motor gefahren wurde, wurde das Fahrzeug nachgetankt, um größere Gewichtsunterschiede zu vermeiden.



**Bild 3.26:** Versuchsablauf der Rollenprüfstandsversuche

<sup>36</sup>die Spannung der elektrischen Verbraucher entspricht der Batteriespannung

<sup>37</sup>BSD = Bitserielle Datenschnittstelle, DME = Digitale Motorelektronik

<sup>38</sup>kleinster einstellbarer Wert

Bei Messungen des Kraftstoffverbrauchs ohne Generator-Stromerzeugung wurde das externe Netzgerät eingeschaltet und der Generator über die BSD-Schnittstelle entregt. Alle Versuche wurden zwei mal durchgeführt. Als Ergebnis wurde jeweils der Mittelwert der beiden Versuche verwendet. Zeitliche Verläufe von Strom, Spannung, Temperaturen und Kraftstoffverbrauch einzelner Messungen sind im Anhang auf S. 151 dargestellt.

### 3.4.2 Messung der Spannungsabhängigkeit der elektrischen Verbraucher

Mit dem selben Versuchsaufbau wie oben wurden Messungen am elektrischen Energiebordnetz durchgeführt. Es wurde die Höhe des elektrischen Leistungsbedarfs in Abhängigkeit verschiedener Einschaltprofile ermittelt. Außerdem wurde die Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Bordnetzspannung bestimmt. Dafür wurde über das externe Netzgerät die Bordnetzspannung gezielt variiert und der Stromfluss über einen Shunt gemessen. Der Generator war bei diesem Versuch entregt. Neben den eigenen Versuchen steht eine Datenbank mit dem elektrischen Leistungsbedarf verschiedener Komponenten zur Verfügung. Die Ergebnisse sind in Kapitel 2.1.4 dargestellt und fließen zu einem großen Teil in die Abschätzungen und Simulationen ein.

### 3.4.3 Kraftstoffverbrauchsmessung der Standklimatisierung

Da die Standklimatisierung eine wesentliche Anwendung der APU ist, wurde hier der Kraftstoffverbrauch nicht nur simuliert sondern auch über eine Messung bestimmt. Dazu wurde ein BMW 745i mit mechanischem Klimakompressor in einer Klimakammer untersucht. Bei verschiedenen Umgebungstemperaturen wurde ein „Pull down“, das heißt maximale Klimatisierung, für 30 Minuten durchgeführt. Da die Klimatisierung in diesem Fall über den mechanischen Kompressor erfolgt, muss der Verbrennungsmotor während der Klimatisierung laufen.

In der Klimakammer war keine Abgas-Analyseanlage wie beim Rollenprüfstand vorhanden. Deshalb wurde der Kraftstoffverbrauch über ein Einspritzsignal der Motorsteuerung bestimmt. Da diese Methode eine wesentlich geringere Genauigkeit als die Abgasanalyse aufweist, wird zusätzlich vor und nach dem Versuch der Tank maximal gefüllt. Die Nachtankmenge dient zur Plausibilisierung der Ergebnisse aus der Motorsteuerung. Nachtankmenge und Ergebnisse aus der Motorsteuerung sowie Simulationsergebnisse stimmen gut überein, so dass die Ergebnisse als zuverlässig angesehen werden.

Bei einer Standklimatisierung über einen elektrischen Klimakompressor läuft der Verbrennungsmotor nicht. Nur die APU verbraucht in dieser Phase Kraftstoff. Da noch keine APU für Messungen des Kraftstoffverbrauchs zur Verfügung steht, kann keine direkte Vergleichsmessung erfolgen. Allerdings stehen Messergebnisse zum Leistungsverbrauch einer elektrischen Standklimatisierung über ein externes Netzgerät zur Verfügung, so dass der Kraftstoffverbrauch einer APU über den Wirkungsgrad berechnet werden kann.

Die Ergebnisse zum Vergleich von elektrischer und mechanischer Standklimatisierung sind in Kapitel 4.1.3 dargestellt.

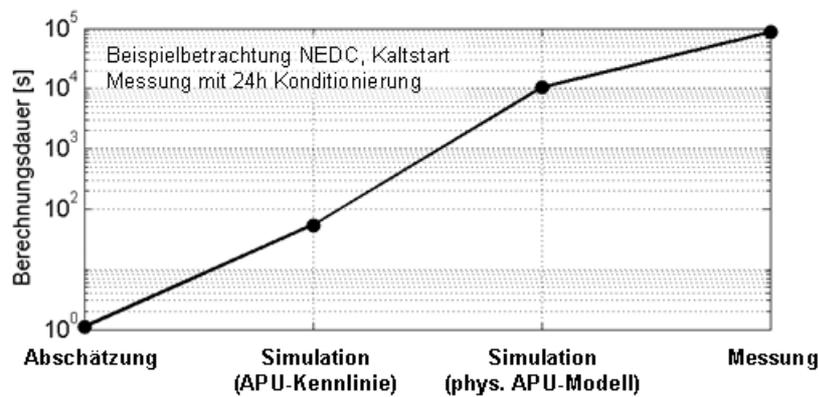
## 3.5 Zusammenfassende Bewertung der Methoden

In den letzten drei Kapiteln wurden verschiedene Möglichkeiten zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs dargestellt. Nachfolgend werden die Methoden charakterisiert und verglichen. Ziel ist es, eine Methode auszuwählen, um die in Kapitel 2 beschriebenen Anwendungen einer APU zu analysieren und quantifizierte Aussagen zu treffen.

### 3.5.1 Charakterisierung der Methoden

Anhand verschiedener Merkmale sollen die Methoden beschrieben und klassifiziert werden.

- **Genauigkeit:** Die Genauigkeit, vor allem bezüglich der Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs, ist natürlich ein wesentlicher Punkt. Im nächsten Kapitel wird dieser Punkt explizit behandelt, indem die Ergebnisse verschiedener Methoden miteinander verglichen werden. Prinzipiell ist die höchste Genauigkeit bei der Messung zu erwarten, die geringste Genauigkeit bei der Abschätzung.
- **Allgemeingültigkeit:** Mit zunehmender Spezifizierung von Bauteilen und Eingangsgrößen nimmt die Allgemeingültigkeit von Ergebnissen ab. So wird z.B. durch die Detaillierungsstufe 4 die Spannungsabhängigkeit der elektrischen Verbraucher berücksichtigt. Allerdings können dadurch die Ergebnisse nicht mit der dadurch erreichten Steigerung an Genauigkeit auf andere Fahrzeuge mit einer geänderten Spannungsabhängigkeit übertragen werden. Prinzipiell nimmt die Allgemeingültigkeit der Aussagen von der Abschätzung über die Simulation zu den Versuchen hin ab.
- **Zeitlicher Aufwand der Modellierung:** Der zeitliche Aufwand der Modellierung ist stark abhängig von bereits vorhandenen Teilmodellen sowie von bestehenden fachlichen Kenntnissen. Gegenüber der Abschätzung steigt der Aufwand einer Simulation erheblich. Wird für die Simulation ein physikalisches APU-Modell genutzt, ist nochmals von einer deutlichen Erhöhung des Aufwands auszugehen. Bei Messungen ist der Aufwand sehr stark von der vorhandenen Hardware und dem Entwicklungsstand der betrachteten Systeme abhängig. Wenn keine Hardware verfügbar ist, kann der zeitliche Aufwand zur Anfertigung von Prototypen immens sein.
- **Simulationszeit:** Die Simulationszeit spielt vor allem dann eine Rolle, wenn größere Parametervariationen durchgeführt werden sollen. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Methoden wurden anhand eines Beispielszenarios ermittelt, siehe Bild 3.27. Die Simulation mit einem physikalisches APU-Modell dauert aufgrund der Verknüpfung von Cruise und Simulink über die API-Schnittstelle sehr lang.
- **Nachvollziehbarkeit:** Generell ist eine einfache Abschätzung oder ein einfaches Modell leichter nachvollziehbar, als eine aufwendige Modellierung. Dieser Punkt ist nicht zu vernachlässigen, da durch eine gute Nachvollziehbarkeit von Berechnungen Fehler vermieden werden und Zusammenhänge leichter analysiert werden können.
- **Vergleichbarkeit der Ergebnisse:** Ziel der Untersuchungen ist es, den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs mit und ohne APU zu bestimmen. Damit die beiden Verbräuche mit und ohne APU vergleichbar sind, dürfen keine Komfortunterschiede



**Bild 3.27:** Simulationszeiten der verschiedenen Methoden

vorliegen. Genauso muss bei beiden Fahrzeugvarianten ein ausgeglichener Ladezustand des Energiespeichers bei Fahrtende vorliegen, siehe Kapitel 3.3.6. Während bei Abschätzungen diese Vergleichbarkeit stets gegeben ist, stellt dies bei Versuchen teilweise ein Problem dar. Bei den durchgeführten Rollenprüfstandsversuchen fungiert z.B. ein Mensch als Fahrer. Dadurch können kleine Abweichungen beim Geschwindigkeitsverlauf nicht ausgeschlossen werden. Außerdem ist ein großer Aufwand für die Vorkonditionierung des Fahrzeugs notwendig, um gleichbleibende Prüfbedingungen zu schaffen.

- **Eingangsdaten:** Bei einer Abschätzung sind weniger Eingangsdaten notwendig als bei einer Simulation. Je detaillierter das Simulationsmodell wird, desto detaillierter werden auch die notwendigen Eingangsdaten. Eingangsdaten sind dabei Geschwindigkeitsverläufe, Einschaltprofile, Startbedingungen und Umgebungsbedingungen. Fehler, bzw. ungenaue Eingangsdaten, setzen sich entsprechend fort und können zu falschen Aussagen führen, die nicht sofort ersichtlich sind.
- **Systemkenntnis:** Versuche können nur bei vorhandener Hardware durchgeführt werden. Hardware kann wiederum nur erstellt werden, wenn das Gesamtsystem klar definiert ist bis hin zu detaillierten Fertigungszeichnungen. Abschätzungen können auch im Konzeptstadium durchgeführt werden. Hier muss keine so detaillierte Systemkenntnis vorliegen. Das heißt, es muss z.B. noch keine Bordnetztopologie definiert sein. Auch die Größe der APU spielt hier noch keine Rolle. Bei den Simulationen wird mit steigender Detaillierungsstufe eine zunehmende Systemkenntnis gefordert. Ab Detaillierungsstufe 3 muss z.B. die Bordnetztopologie bekannt sein.

In Tabelle 3.5 ist eine Bewertung der Methoden anhand dieser beschriebenen Kriterien auf Basis der in dieser Arbeit gemachten Erfahrungen dargestellt. Die Bewertung kann nicht durchgehend auf andere Projekte übertragen werden, dient jedoch als Anhaltswert. Aus der Tabelle sticht die *Abschätzung* mit den meisten „gut“-Bewertungen hervor. Tatsächlich hat die Abschätzung einige Vorteile, da sie mit geringem Aufwand und ohne der Kenntnis umfangreicher Eingangsdaten und Systemkenntnisse durchgeführt werden kann. Allerdings schneidet sie beim wesentlichen Punkt, der Genauigkeit der Ergebnisse bei der Berechnung des Kraftstoffverbrauchs schlecht ab.

	Abschätzung	Simulation, Detaillierungsstufe ...					Messung
		1	2	3	4	5	
+ = gut ○ = mittel - = schlecht							
<b>Nutzen</b>							
Genauigkeit der Berechnung des Kraftstoffverbrauch	-	-	○	+	+	+	+
Allgemeingültigkeit der Aussage	+	-	○	○	○	-	-
Zusatzinformationen (SoC-Verlauf, Energieströme)	-	-	○	+	+	+	○
Möglichkeit der Parametervariation	+	+	+	+	+	+	-
<b>Aufwand</b>							
Zeitlicher Aufwand der Modellierung, bzw. des Messaufbaus	+	+/-*	+/-*	○/-*	○/-*	○/-*	+
Zeitlicher Aufwand der Simulation, bzw. des Versuchs	+	○	○	○	○	○	-
Nachvollziehbarkeit (Fehleranfälligkeit, Plausibilisierung und Interpretation der Ergebnisse)	+	○/-*	○/-*	○/-*	○/-*	○/-*	○
<b>Eingangsgrößen und Randbedingungen</b>							
Umfang der notwendigen Eingangsdaten	+	○	○	○	○	-	-
Umfang der notwendigen Systemkenntnisse	+	+/-*	+/-*	○/-*	○/-*	○/-*	-
Ausschluss von Komfortunterschieden	+	+	+	○	○	○	-
Ausgeglichener SoC	+	+	○	○	○	○	-
Ausschluss unerwünschter äußerer Einflüsse (Temperatur, ...)	+	+	+	+	+	+	-

\* APU-Kennlinie / APU-Modell

Tabelle 3.5: Charakterisierung der Methoden

### 3.5.2 Vergleich der Genauigkeit der Ergebnisse

Wie bereits gesagt, ist die Genauigkeit der Ergebnisse ein wesentliches Auswahlkriterium für eine Methode. Deshalb soll die Genauigkeit in diesem Kapitel explizit betrachtet werden, indem die Ergebnisse aus Untersuchungen mit verschiedenen Methoden miteinander verglichen werden.

Als Referenz für den Vergleich wird die Simulation mit Detaillierungsstufe 4 und APU-Kennlinie herangezogen. Verglichen wird der ermittelte Gesamtkraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs.

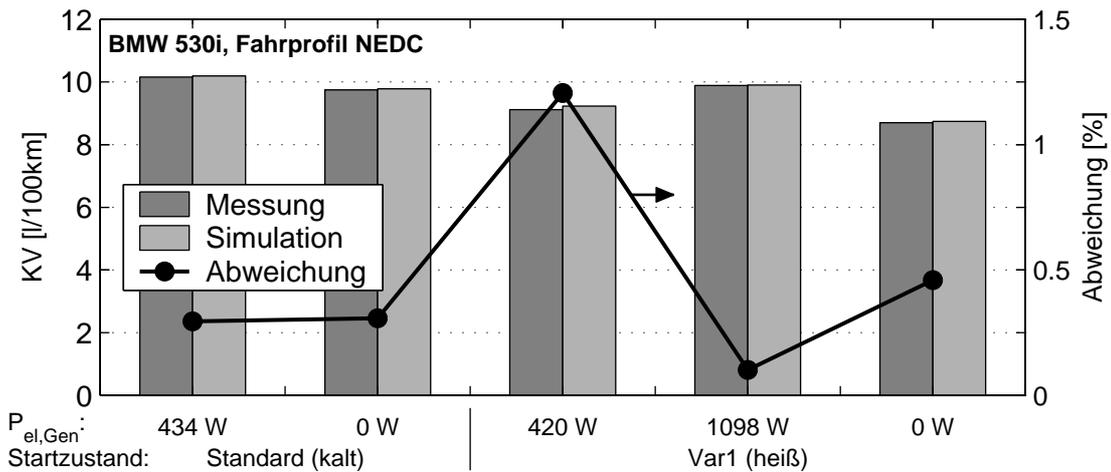
Folgende Betrachtungen werden durchgeführt:

1. Vergleich mit Versuchsergebnissen vom Rollenprüfstand
2. Vergleich der quasistationären Simulation mit der dynamischen Simulation
3. Vergleich verschiedener Detaillierungsstufen, inklusive einem Vergleich mit Ergebnissen aus der Abschätzung

Die meisten Vergleiche werden im *NEDC* durchgeführt.

#### 1. Vergleich mit Versuchsergebnissen vom Rollenprüfstand

In Bild 3.28 werden Simulationsergebnisse mit Messergebnissen zur Validierung des Simulationsmodells verglichen. Abgebildet ist der Kraftstoffverbrauch aus Messungen und Simulationen eines Fahrzeugs ohne APU sowie die Abweichung der Werte aus der Simulation zu den Messwerten. Bei der Simulation handelt es sich um eine quasistationäre Simulation mit Detaillierungsstufe 4 der Bordnetzabbildung.



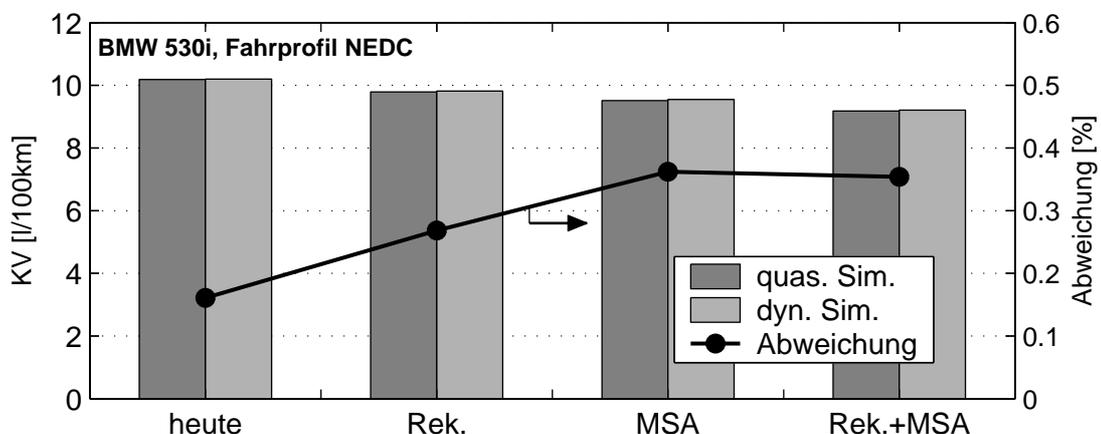
**Bild 3.28:** Vergleich der Ergebnisse des Kraftstoffverbrauchs (KV) aus Messungen und Simulationen im NEDC, ohne APU

Es wurden verschiedene elektrische Bordnetzleistungen betrachtet. Außerdem wurden sowohl Kaltstarts als auch Warmstarts untersucht. Die Angaben  $P_{el,Gen} = 0\text{ W}$  in Bild 3.28 bedeuten, dass der Generator entregt wurde. Die elektrische Energieversorgung des Fahrzeugs erfolgte in diesem Fall über das externe Netzgerät, vergleiche Kapitel 3.4.1.

Der über Simulationen ermittelte Kraftstoffverbrauch weist tendenziell einen etwas höheren Wert auf. Die Abweichungen sind jedoch gering, so dass von einem gut geeigneten Grundmodell ausgegangen werden kann.

## 2. Vergleich der quasistationären Simulation mit der dynamischen Simulation

In Kapitel 3.3.1 wurden die beiden in Cruise verfügbaren Simulationsmodi *Quasistationäre Simulation* und *Dynamische Simulation* vorgestellt. Wie in Bild 3.29 zu sehen ist, unterscheidet sich der berechnete Kraftstoffverbrauch zwischen den beiden Methoden nur geringfügig. Im Bild ist nur das Ergebnis ohne APU dargestellt. Mit APU liegen die Abweichungen in der selben Größenordnung.



**Bild 3.29:** Vergleich der Ergebnisse des Kraftstoffverbrauchs (KV) einer dynamischen Simulation mit der einer quasistationären Simulation (NEDC, ohne APU)

Bei der *dynamischen Simulation* liegt aufgrund der Vorwärtsrechnung mit Fahrermodell, vergleiche Kapitel 3.3.1, ein leicht verändertes Bremssignal vor. Ausgehend vom Bremssignal wird das Rekuperationssignal gesetzt und die Generator-Soll-Spannung vorgegeben. So führt der Unterschied im Bremssignal zu einer Erhöhung des Unterschieds des Kraftstoffverbrauchs zwischen den beiden Methoden bei der Betriebsstrategie „Rekuperation“ gegenüber der Betriebsstrategie „heute“.

Bei der Betriebsstrategie „MSA“ ist der Unterschied noch größer, da bei Berechnungen mit der Methode *dynamische Simulation* gegenüber der *quasistationären Simulation* die MSA-Zeiten im *NEDC* ca. 2 s geringer sind. Auch dieser Effekt wird hauptsächlich durch das Fahrermodell verursacht. Die Kombination der Betriebsstrategien „Rekuperation“ und „MSA“ zeigt, dass die Abweichungen nicht addiert werden können, da weitere Effekte mitwirken.

Insgesamt spielen die hier festgestellten Abweichungen zwischen *dynamischer Simulation* und *quasistationärer Simulation* in der Größenordnung von kleiner 0,4 % des Gesamtverbrauchs keine große Rolle, zumal die Abweichungen mit und ohne APU in der gleichen Größenordnung liegen.

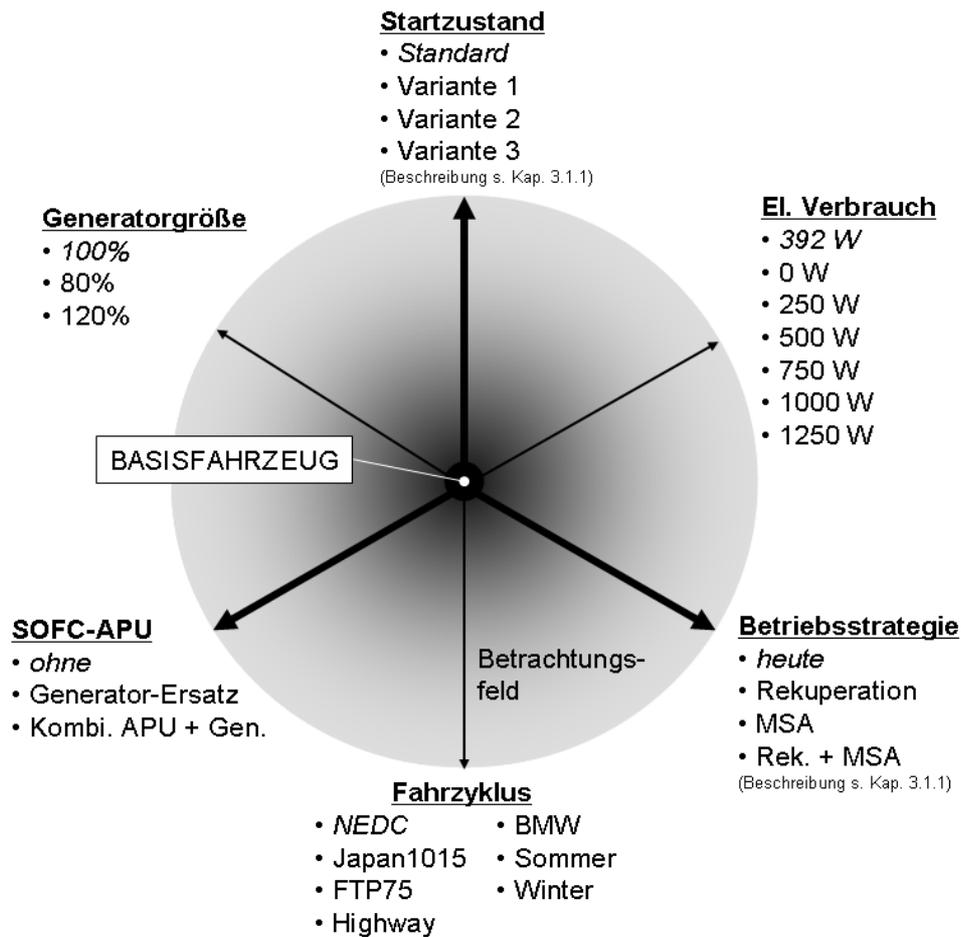
### 3. Vergleich verschiedener Detaillierungsstufen, inklusive der Abschätzung

In Kapitel 3.3.3 wurden fünf verschiedene Detaillierungsstufen zur Abbildung des Bordnetzes bei der Simulation des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen beschrieben. An dieser Stelle soll ein Vergleich der Genauigkeit der Berechnungsergebnisse zeigen, wie groß der Unterschied der einzelnen Detaillierungsstufen ist. In Tabelle 3.5 wurde dargestellt, dass der Aufwand bei der Modellerstellung und bezüglich der Bereitstellung von Eingangsdaten mit zunehmender Detaillierung steigt. Der Vergleich der Berechnungsgenauigkeit der Detaillierungsstufen soll zeigen, welcher Aufwand zu deutlich besseren Ergebnissen führt. Neben den fünf Detaillierungsstufen wird die in Kapitel 3.2 beschriebene Abschätzung mit betrachtet.

Zur Bestimmung der Genauigkeit wäre ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messergebnissen ideal. Allerdings kann der Kraftstoffverbrauch nicht bei allen Fahrzeugvariationen und Szenarien über Versuche bestimmt werden. Zum einen ist die notwendige Hardware nicht verfügbar. Zum anderen würde die Anzahl der Varianten einen erheblichen Messaufwand bedeuten. Deshalb wird wieder die Detaillierungsstufe 4 als Vergleichsbasis herangezogen. Die Validierung dieser Detaillierungsstufe über Versuche ist bereits im vorhergehenden Abschnitt bei einer eingeschränkten Anzahl an Variationen erfolgt.

Der Vergleich der Detaillierungsstufen und der Abschätzung soll für verschiedene Fahrzeugkonfigurationen, Fahrzyklen und Randbedingungen gelten. Erreicht wird dies durch einen empirischen Vergleich bei einer großen Anzahl an Variationen. Dafür wird zunächst ein Betrachtungsfeld aufgespannt, siehe Bild 3.30. Ausgehend vom bereits beschriebenen Basisfahrzeug, siehe Kapitel 3.1.1, werden einzelne Größen variiert. Für jede Detaillierungsstufe sowie für die Abschätzung wurden 32 Varianten berechnet. Insgesamt wurden 192 Simulationen durchgeführt. Alle Werte wurden nachträglich SoC-bereinigt.

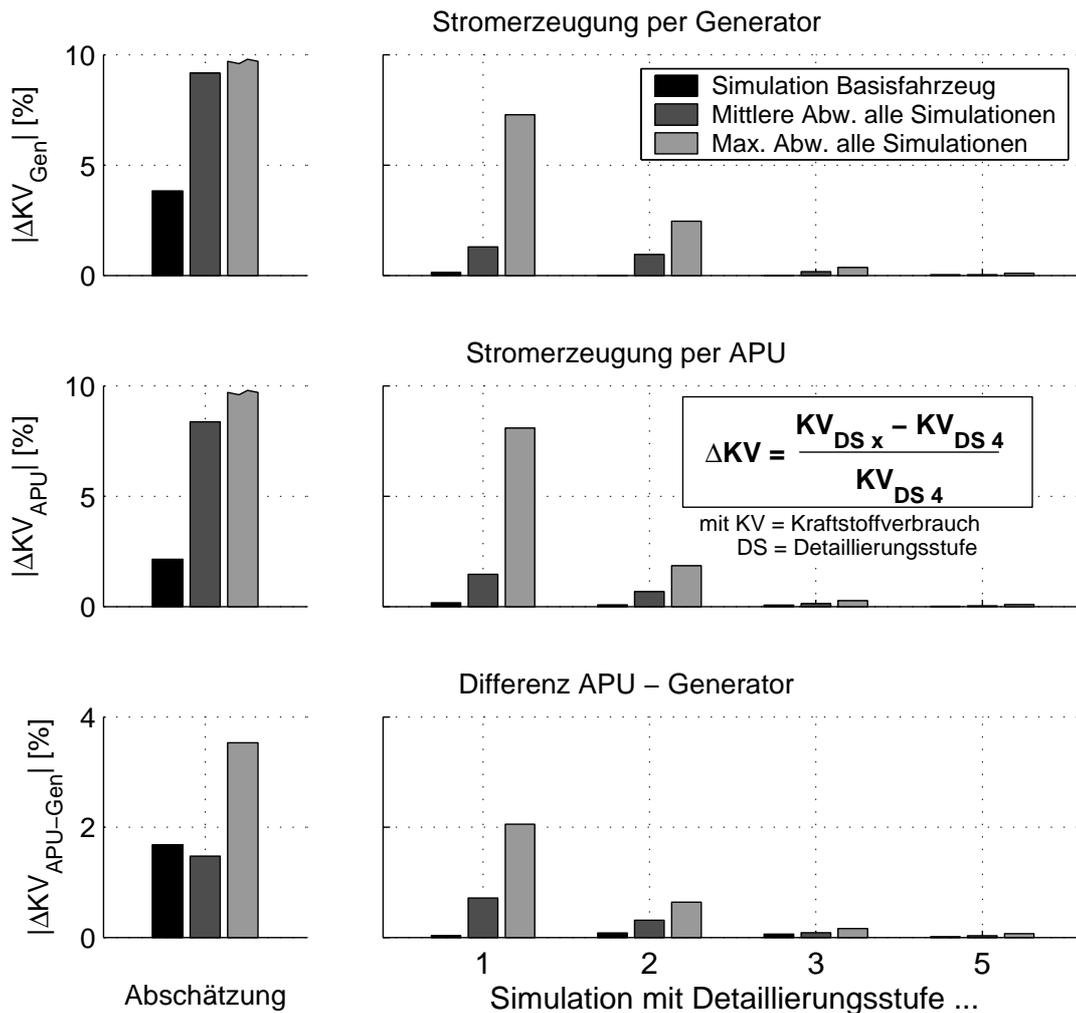
In Bild 3.31 sind die Ergebnisse des Vergleichs dargestellt. Im obersten Diagramm wird ein Fahrzeug ohne APU betrachtet. Das mittlere Diagramm gibt die Ergebnisse mit APU wieder. Im untersten Diagramm sind die Genauigkeiten des berechneten Verbrauchsunterschieds zwischen Fahrzeug mit und ohne APU dargestellt.



**Bild 3.30:** Variation verschiedener Einstellungen zur Aufspaltung eines Betrachtungsfelds für den Vergleich der Simulationen. Bei den dicken Linien wurde jede Variante mit jeder verglichen. Bei den dünnen Linien ist nur eine Variation ausgehend vom Basisfahrzeug erfolgt. Die oberste, kursiv geschriebene Variationsmöglichkeit beschreibt das Basisfahrzeug.

Die Abweichungen des berechneten Kraftstoffverbrauchs zum Berechnungsergebnis mit der Detaillierungsstufe 4 sind in Prozentpunkten angegeben, bezogen auf den mit der Detaillierungsstufe 4 ermittelten jeweiligen Fahrzeuggesamtverbrauch. Dabei sind für jede Detaillierungsstufe sowie für die Abschätzung jeweils drei Werte in Form von Balken dargestellt. Der erste Balken kennzeichnet den Unterschied bei der Berechnung des Kraftstoffverbrauchs des Basisfahrzeugs ohne und mit APU (Generator-Ersatz) im NEDC. Der zweite Balken gibt den Mittelwert der Abweichungen aus allen durchgeführten Simulationen an. Der dritte Balken zeigt den maximalen Unterschied aus allen durchgeführten Simulationen auf.

Der erste Balken zeigt, dass bereits die **Detaillierungsstufe 1** den Kraftstoffverbrauch des Basisfahrzeugs ausreichend genau berechnet. Das heißt, diese Detaillierungsstufe ist ausreichend, wenn keine detaillierteren Bordnetz betrachtungen durchgeführt werden sollen. Bei komplexeren Bordnetzfunktionen wie der Rekuperation oder der Motor-Stopp-Automatik reicht diese Modellierung jedoch nicht mehr aus. Dies zeigt die große mittlere und maximale Abweichung sowohl beim Fahrzeug mit und ohne APU, als auch beim Ver-



**Bild 3.31:** Vergleich der Genauigkeit der verschiedenen Detaillierungsstufen und der Abschätzung im Vergleich zu Detaillierungsstufe 4. Alle Berechnungen wurden mit dem beschriebenen Basisfahrzeug BMW 530i bei verschiedenen Betriebsstrategien, Startbedingungen und weiteren Variationen durchgeführt.

brauchsunterschied der beiden Fahrzeugkategorien auf. Die größten Abweichungen entstehen bei der Simulation der MSA-Funktion in Kombination mit einer zu Fahrtbeginn relativ leeren Batterie. In Detaillierungsstufe 1 wird die MSA-Funktion trotz niedrigem Batterieladezustand aktiviert, da aufgrund des fehlenden Batteriemodells die Betriebsstrategie nicht ausreichend modelliert wurde.

Bei der **Detaillierungsstufe 2** wurde ein einfaches Batteriemodell integriert, so dass hier die mittlere und maximale Abweichung zurückgeht. Allerdings treten auch hier noch zu große Abweichungen auf. Vor allem bei hohen elektrischen Leistungen und stark schwankenden Bordnetzspannungen, z.B. bei der Rekuperationsstrategie, ist dies der Fall.

Mit der **3. Detaillierungsstufe** wurden eine variable Bordnetzspannung und ein Batteriemodell eingeführt. Dadurch treten nur noch geringe Abweichungen zur Stufe 4 auf. Der Grund für die verbleibenden Abweichungen liegt in der Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit der elektrischen Verbraucher in der 4. Detaillierungsstufe. Die Betriebsstra-

ategie „heute“ wird bei der 3. Detaillierungsstufe nahezu ohne Abweichungen gegenüber der 4. Detaillierungsstufe abgebildet, da die Bordnetzspannung auf 14 V geregelt wird. Erst bei Betriebsstrategien mit abweichender Spannungsregelung, vor allem bei der Rekuperationsstrategie, treten Unterschiede beim Kraftstoffverbrauch auf.

Bei der **Detaillierungsstufe 5** wurde gegenüber der Stufe 4 der zeitliche Verlauf der elektrischen Leistungsanforderung der Verbraucher berücksichtigt, während bei der Detaillierungsstufe 4 mit dem Mittelwert gerechnet wurde. Die dadurch resultierenden Abweichungen sind relativ klein. Zur Festlegung des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Verbraucher wurde ein Einschaltprofil großer Verbraucher hinterlegt. Der zeitliche Verlauf im NEDC wurde über Messungen ermittelt. Die Standardabweichung vom Mittelwert betrug 80 W. Untersuchungen zur Auswirkung von Schwankungen des elektrischen Leistungsbedarfs auf den Kraftstoffverbrauch haben ergeben, dass Auswirkungen vor allem von der Höhe der Schwankungen abhängen. Bei Standardabweichungen von 80 W beträgt der Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch maximal 0,4 % bei der Stromerzeugung per APU und 0,1 % bei der Stromerzeugung per Generator, jeweils bezogen auf den Gesamtkraftstoffverbrauch des Fahrzeugs. Die Unterschiede resultieren aus einer größeren Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der elektrischen Leistung bei der APU. Bei größeren Schwankungen der elektrischen Leistung nimmt der Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch zu. Bei einer simulierten Standardabweichung von 160 W wurde im Fahrzeug mit APU eine maximale Änderung des Kraftstoffverbrauchs durch die Schwankungen in Höhe von 1,3 % festgestellt. Beim Fahrzeug ohne APU lag der Wert bei 0,2 %.

Bei allen Detaillierungsstufen treten bei der Bildung der Differenz zwischen den beiden Fahrzeugkategorien (mit / ohne APU) meist geringere Abweichungen zur Detaillierungsstufe 4 auf, da sich Fehler teilweise gegenseitig aufheben. Dies macht sich vor allem bei der **Abschätzung** bemerkbar. Die Abschätzung ist ganz links im Diagramm dargestellt. Eine Verwendung der Abschätzung zur Bestimmung des Gesamtkraftstoffverbrauchs ist nicht sinnvoll. Dafür ist sie nicht ausgelegt und deshalb kommen auch zum Teil extreme Fehler von über 10 % zustande. Diese Fehler resultieren vor allem aus der falschen Bestimmung des Grundverbrauchs bei warmem Verbrennungsmotor. Sie sollen hier nicht weiter beachtet werden. Interessant ist die Bestimmung der Verbrauchsdifferenz zwischen einem Fahrzeug mit und ohne APU. Hier ist die Abschätzung erstaunlich gut und zeigt im Mittel Abweichungen im Vergleich zur Simulation mit Detaillierungsstufe 4 von unter 2 %-Punkten auf. Allerdings kommt es zum Teil auch zu Abweichungen von bis zu 3,5 %-Punkten. Die hier beschriebene Abschätz-Methode ist also durchaus geeignet, um Tendenzaussagen zu generieren. Die Simulation ersetzen kann sie jedoch nicht. Dies zeigen die bestehenden Abweichungen zur Detaillierungsstufe 4.

### 3.5.3 Auswahl einer Methode

In den letzten zwei Abschnitten wurden die betrachteten Methoden charakterisiert und die Genauigkeit der Ergebnisse verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass jede Methode Vor- und Nachteile hat und so für bestimmte Anwendungsgebiete geeignet ist. Darauf aufbauend werden in Tabelle 3.6 für verschiedene Berechnungsziele, Berechnungsgrößen und Szenarien die Eignung der betrachteten Methoden angegeben.

Bei der Bestimmung des APU-Potenzials bei der Verbrauchsoptimierung spielt die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse eine große Rolle. Simulationen mit der Detaillierungs-

	Abschätzung			Simulation, Detaillierungsstufe ...					Messung
	1	2	3	4	5				
<div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;"> <div style="margin-right: 10px;"> <span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: white; margin-right: 5px;"></span> ungeeignet  <span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #cccccc; margin-right: 5px;"></span> bedingt geeignet  <span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #333333; margin-right: 5px;"></span> gut geeignet         </div> </div>									
<b>Berechnungsziel</b>									
Grobbewertung, Tendenzaussagen									
Potenzialaussagen APU									
Parametervariationen									
Auslegung Komponenten (APU, Gen., Batterie)									
Modellvalidierung									
<b>Berechnungsgrößen</b>									
Kraftstoffverbrauch (Gesamtfahrzeug) ohne APU									
Kraftstoffverbrauch (Gesamtfahrzeug) mit APU									
Verbrauchsunterschied mit/ohne APU									
Analyse Energieströme und Wirkungsgrade									
<b>Szenarien</b>									
Betriebsstrategie heute									
neue Betriebsstrategien									
extreme Fahrzyklen									
extreme Stromprofile									

**Tabelle 3.6:** Empfehlung zur Nutzung der hier betrachteten Methoden in Abhängigkeit verschiedener Kriterien

stufe 1 und 2 sind für Betrachtungen des heutigen Fahrzeugs ausreichend. Sollen neue Betriebsstrategien und ein komplexeres Zusammenspiel von APU und Generator untersucht werden, ist eine detailliertere Abbildung des Bordnetzes notwendig, umgesetzt ab der Detaillierungsstufe 3. Für die nachfolgenden Betrachtungen soll in erster Linie die Simulation mit der Detaillierungsstufe 4 herangezogen werden. Die 5. Detaillierungsstufe arbeitet mit zeitlichen Einschaltprofilen der elektrischen Verbraucher. Diese Methode soll nicht verwendet werden, da die Einschaltprofile nicht für alle Zyklen vorliegen und die Übertragbarkeit der bestehenden Einschaltprofile auf andere Zyklen und zukünftige Fahrzeuge fraglich ist. Die genaue Betrachtung von Einschaltprofilen ist dann notwendig, wenn bei der Auslegung von Komponenten die elektrischen Leistungsspitzen wichtig sind oder extreme Stromprofile vorliegen. Die Abschätzung ist eine gute Möglichkeit, Tendenzen aufzuzeigen und Schwerpunkte für weitere, detailliertere Betrachtungen zu definieren. Sie werden zur Plausibilisierung von Simulationsergebnissen genutzt sowie bei der Betrachtung von Randthemen wie der Fahrzeugheizung verwendet. Die Messungen werden vorrangig zur Verifikation des Simulationsmodells verwendet.

Für die Abbildung der APU wird die Wirkungsgradkennlinie genutzt. Das physikalische APU-Modell wird aus zwei Gründen nicht verwendet. Zum einen reagiert das Modell sehr sensibel auf kleine Änderungen in der Steuerung. Um das APU-Potenzial weiter zu detaillieren müsste zunächst die Steuerung der APU für alle Betriebsbereiche optimiert werden. Dies ist nicht der Fokus dieser Arbeit. Zum anderen kann das APU-Modell nicht direkt in Cruise eingebettet werden (siehe Kapitel 3.3.2). Dadurch dauert eine Simulation sehr lange. Eine umfangreiche Parametervariation ist damit nicht möglich. Das APU-Modell dient jedoch zur Identifikation von Einflüssen der APU-Betriebsstrategie auf den Kraftstoffverbrauch der APU und stellt eine gute Ausgangsbasis für eine Weiterentwicklung des Gesamtmodells dar.

## 4 Ergebnisse

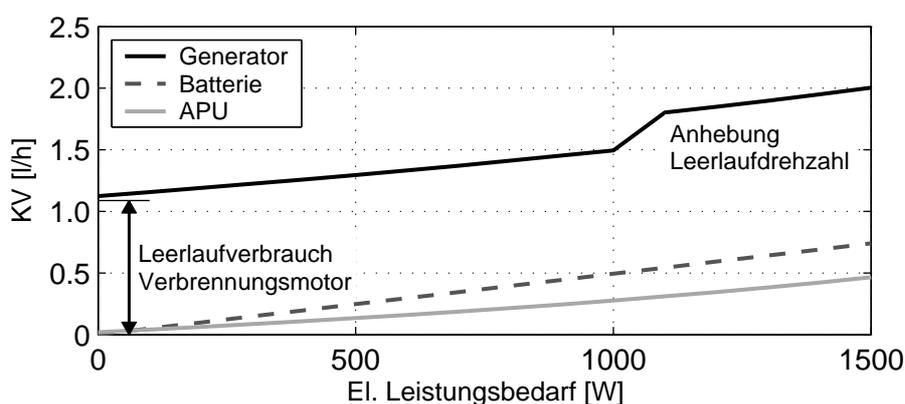
In Kapitel 2 wurde dargestellt, wie eine Brennstoffzellen-APU in ein Fahrzeug integriert werden kann. Dabei wurde auf interessante Anwendungen und technische Möglichkeiten eingegangen, sowie eine erste qualitative Bewertung durchgeführt. In Kapitel 3 wurden Methoden beschrieben, wie die Auswirkungen einer APU auf den Kraftstoffverbrauch quantitativ bestimmt werden können.

In diesem Kapitel werden die Berechnungsergebnisse dargestellt und analysiert. Dabei werden die Anwendungen und Integrationsstufen der APU ins Fahrzeug aus Bild 2.26 betrachtet. Grundlage für die Berechnungen ist soweit nicht anders angegeben die in Kapitel 3 beschriebene Simulation mit Detaillierungsstufe 4 und APU-Wirkungsgradkennlinie.

Alle Betrachtungen wurden mit dem beschriebenen Basisfahrzeug BMW 530i durchgeführt. Bei der APU handelt es sich soweit nicht anders angegeben um die im Kapitel 2.2 beschriebene 1,5 kW SOFC-APU.

### 4.1 Stromversorgung im Stand

Im heutigen Fahrzeug gibt es zwei Möglichkeiten elektrische Energie im Stand bereit zu stellen - die Fahrzeugbatterie und den Generator. Kleine Energiemengen können aus der Fahrzeugbatterie entnommen werden. Wenn größere Energiemengen benötigt werden, muss der Verbrennungsmotor gestartet werden, so dass der Generator elektrischen Strom erzeugt. Die APU bietet eine interessante dritte Möglichkeit der elektrischen Energieversorgung im Stand. In Bild 4.1 ist der Kraftstoffverbrauch in [l/h] für die drei möglichen Wege der Stromerzeugung dargestellt.



**Bild 4.1:** Vergleich des Kraftstoffverbrauchs (KV) verschiedener Stromerzeuger im Stand, ohne Berücksichtigung APU-Startup

Bei der Variante **Batterie** wird davon ausgegangen, dass die Batterie bei der nächsten Fahrt wieder aufgeladen wird. Während dieser Fahrt muss die entnommene elektrische Energie unter Berücksichtigung von Lade- und Leitungsverlusten vom Generator erzeugt werden. Die erhöhte Stromerzeugung des Generators führt bei dieser Fahrt zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch. Dieser zusätzliche Kraftstoffverbrauch ist im obigen Diagramm dargestellt. Bei der Berechnung wurde ein durchschnittlicher Batteriewirkungsgrad

(Laden und Entladen) von 80% angenommen. Wenn kein elektrischer Leistungsbedarf vorliegt, beträgt der Kraftstoffverbrauch 0.

Bei der Variante **Generator** treibt der Verbrennungsmotor im Leerlauf den Generator zur Stromerzeugung an. Ab einer Leistung von ca. 1000 W erfolgt eine Anhebung der Leerlaufdrehzahl, da sonst die geforderte Leistung vom betrachteten Generator nicht mehr erbracht werden kann. Im Unterschied zur Stromerzeugung per Generator während der Fahrt, wird im Stand der gesamte Kraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors als Aufwand für die Stromerzeugung betrachtet. Das heißt, dass ein beträchtlicher Anteil des Kraftstoffverbrauchs nur dazu aufgewendet wird, die Schleppmomentverluste des Verbrennungsmotors zu überwinden. Selbst ohne Stromerzeugung existiert ein hoher Grundverbrauch.

Die Variante **APU** geht zunächst von einer betriebsbereiten APU aus. Die Linie in Bild 4.1 spiegelt die Wirkungsgradkennlinie der APU wieder, inklusive Berücksichtigung des DC/DC-Wandlers und des elektrischen Eigenbedarfs. Liegt kein elektrischer Leistungsbedarf vor, besteht bei der APU trotzdem ein kleiner Grundverbrauch in Höhe von ca. 0,02 l/h.

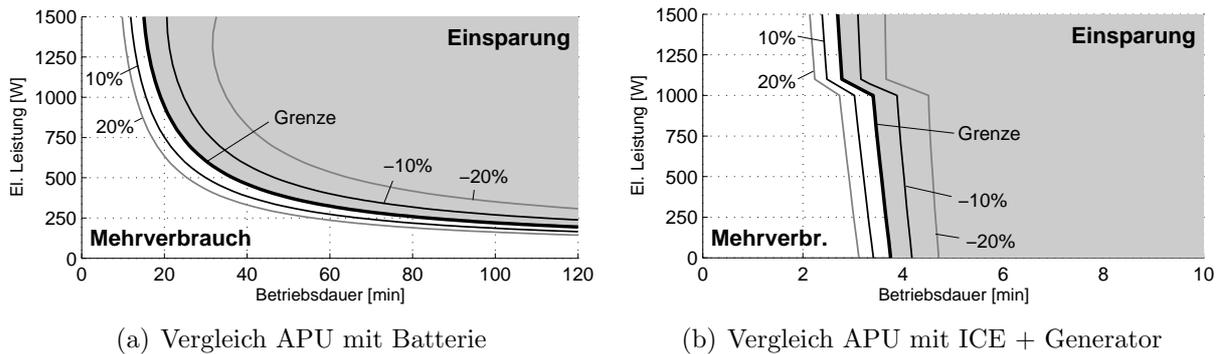
Wie in Bild 4.1 zu sehen ist, hat die betriebsbereite APU fast immer den geringsten Kraftstoffverbrauch. Nur bei sehr geringen elektrischen Leistungen ist es günstiger die Energie aus der Batterie zu entnehmen. In diesem Bereich macht sich der relativ zur Nutzleistung hohe elektrische Eigenbedarf der APU bemerkbar. Der Generator schneidet aufgrund des hohen Grundverbrauchs des Verbrennungsmotors immer am schlechtesten ab.

#### 4.1.1 Berücksichtigung des Startup-Verbrauchs der APU

Wenn die APU aus dem kalten Zustand gestartet werden muss, spielen beim Kraftstoffverbrauch zusätzlich der Startup-Verbrauch sowie die Betriebsdauer eine Rolle. Der Startup-Verbrauch hat unabhängig von der Betriebsdauer immer den gleichen Betrag. Je länger die APU verwendet wird, desto eher kann der Startup-Verbrauch durch den Wirkungsgradvorteil der APU kompensiert werden. Dabei ist auch die Höhe der Nutzleistung wichtig.

Damit der Startup-Verbrauch der APU mit berücksichtigt werden kann, wird eine dritte Dimension, die Betriebsdauer, eingeführt, siehe Bild 4.2. Die dicke schwarze Linie markiert die Grenze, ab der eine APU gegenüber einer Batterie (a), bzw. einem Generator (b) effektiver Strom erzeugt. Rechts der Grenze kann mit einer APU Kraftstoff eingespart werden. Links der Grenze besteht durch die APU ein Mehrverbrauch. Zusätzlich sind mehrere dünne Linien eingezeichnet. Sie geben die Höhe der Einsparung, bzw. des Mehrverbrauchs der APU gegenüber dem Vergleichssystem an. Verlängert man die x-Achse (= Betriebsdauer) gegen unendlich, erhält man den statischen Kraftstoffverbrauch ohne APU-Startup aus Bild 4.1. Die Startupzeit von 200 s ist in der Betriebsdauer enthalten. Während des Startups wird die angeforderte elektrische Leistung aus der Batterie entnommen. Anschließend wird die entnommene Lademenge innerhalb des betrachteten Zyklus wieder zurückgeladen.

In Bild 4.2 (a) ist zu sehen, dass eine APU erst ab ca. 200 W Nettoleistung besser als eine Batterie ist. Dies liegt an dem stark abfallenden Wirkungsgrad der APU im Teillastbereich. Da der Wirkungsgradvorteil einer APU gegenüber der Variante *Batterie* nicht



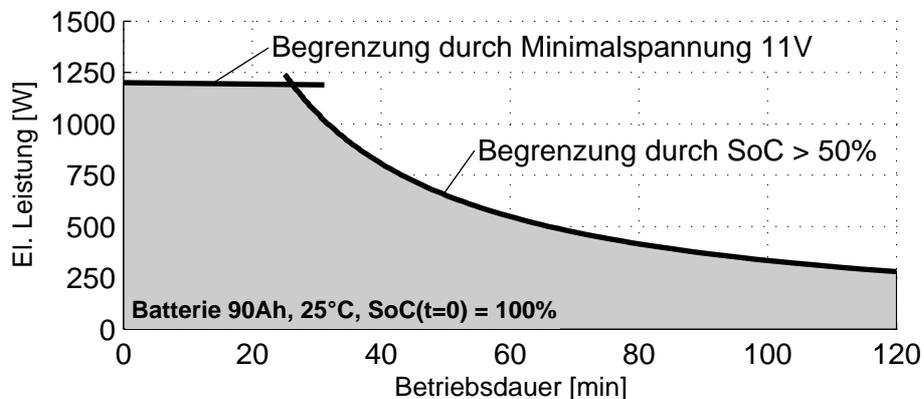
**Bild 4.2:** Vergleich des Kraftstoffverbrauchs verschiedener Stromerzeuger im Stand, mit Berücksichtigung des APU-Startups

besonders groß ist, können auch bei höherer Leistung erst nach einiger Zeit Verbrauchsvorteile erzielt werden. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass höhere Leistungen aus der heutigen Bordnetz-Batterie nur für eine sehr kurze Zeit entnommen werden können.

Gegenüber der direkten Generatorstromerzeugung hat die APU im Stand klare Vorteile, siehe Bild 4.2 (b). Bereits nach spätestens 4 min lohnt sich eine APU, unabhängig von der Höhe der elektrischen Nutzleistung. Der Knick in der Linie resultiert aus einer Drehzahlanhebung des Verbrennungsmotors, siehe oben. Die hinterlegten Werte wurden von 0 bis 1500 W elektrische Leistung mit einer Schrittweite von 50 W bestimmt.

#### 4.1.2 Einschränkungen der Batterie

Um eine Vorstellung über die Nutzungsdauer der heutigen Fahrzeugbatterie zu geben, ist in Bild 4.3 dargestellt, wie lange eine bestimmte Leistung entnommen werden kann, bis ein Ladezustand von 50 % erreicht wird. Bei einer tieferen Entladung wird zunehmend die Startfähigkeit des Motors gefährdet. Die tatsächlich entnehmbare Energiemenge hängt von der Batteriegröße, dem Batteriezustand (Ladezustand SoC, Batteriealterung SoH, State of Function SoF) und der Energiemanagement-Strategie ab.



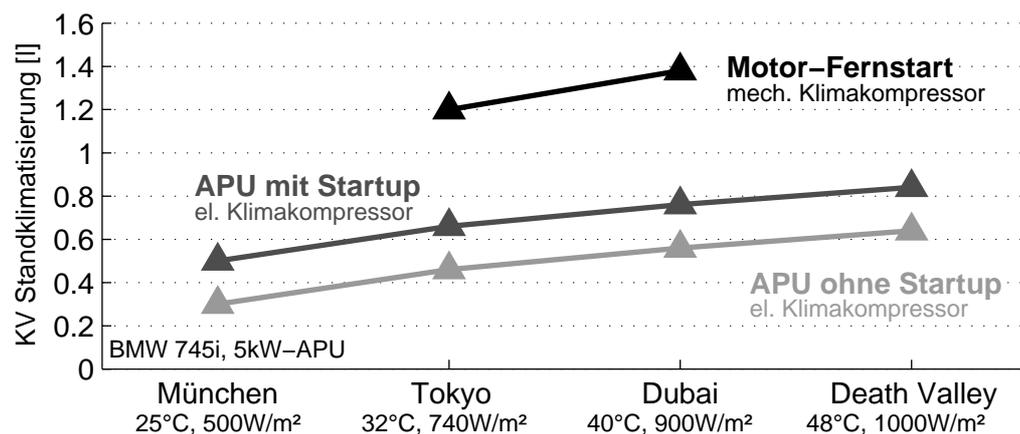
**Bild 4.3:** Leistungsgrenzen der heutigen Bleibatterie (Bsp. 90Ah), abgeleitet aus Labormessungen

Die maximale Leistung einer Batterie ist beschränkt. Im Beispiel in Bild 4.3 dürfen maximal  $1200\text{ W}$  entnommen werden, da sonst die Bordnetzspannung unter  $11\text{ V}$  einbricht. Wird die Batterie häufig für Standanwendungen mit hohem Energiebedarf verwendet, muss aufgrund der höheren Batteriezyklisierung mit einer verminderten Lebensdauer der Batterie gerechnet werden. Eine Vergrößerung der Batterie für Standanwendungen ist denkbar, führt jedoch wiederum zu einem erhöhten Gewicht, was sich negativ auf den Kraftstoffverbrauch während der Fahrt sowie auf die Fahrleistungen auswirkt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für die elektrische Energieversorgung von Standverbrauchern mit kleiner elektrischer Leistung, wie Radio oder eine kleine Kühlbox, die Batterie die beste Lösung darstellt. Für Anwendungen, die einen höheren elektrischen Energiebedarf haben, z.B. eine elektrische Klimatisierung oder eine elektrische Steckdose für höhere Leistungen, ist die heutige Fahrzeugbatterie jedoch nicht geeignet. Hier ist die APU eine ideale Ergänzung.

### 4.1.3 Standklimatisierung

Die elektrische Standklimatisierung soll hier nochmal separat betrachtet werden. Wie bereits in Kapitel 2 aufgezeigt, bietet die APU große Vorteile, da ein motorunabhängiger, nahezu geräuschloser Betrieb mit reduzierten Emissionen möglich ist. Ein Vergleich mit einer batteriebetriebenen Standklimatisierung soll nicht durchgeführt werden, da dieser Weg auf Grund der extrem großen notwendigen Batteriekapazität nicht als zielführend angesehen wird. Ein Vergleich mit einer elektrischen Standklimatisierung bei laufendem Motor und Stromerzeugung über den Generator ist nicht notwendig, da dies einem reinen Vergleich der günstigeren Stromerzeugung entspricht, siehe oben. Allerdings fehlt noch der Vergleich mit einem mechanischen Klimakompressor, der direkt über den Verbrennungsmotor angetrieben wird.



**Bild 4.4:** Vergleich des Kraftstoffverbrauchs (KV) von elektrischer und mechanischer Standklimatisierung (Ergebnisse aus Messungen in Kombination mit Berechnungen)

In Bild 4.4 ist der Kraftstoffverbrauch der verschiedenen Systeme dargestellt. Auf der x-Achse sind vier verschiedene Klimaszenarien aufgezeichnet, wobei das Szenario *Death Valley* die höchsten Anforderungen an die Standklimaanlage stellt. Um auch in diesem

Szenario eine ausreichende Klimatisierung zu erreichen, wurde hier eine SOFC-APU mit 5 kW Nennleistung verwendet. Unter den Szenariobezeichnungen sind in Bild 4.4 die Temperatur und die Intensität der Sonneneinstrahlung angegeben. Die Klimatisierung erfolgt jeweils für 30 Minuten.

Der Kraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors wurde für zwei Szenarien gemessen. Im Szenario *Tokyo* wurden in den 30 Minuten Standklimatisierung 1,2 l Kraftstoff verbraucht. Im Szenario *Dubai* stieg dieser Wert auf 1,4 l auf Grund der höheren Temperatur. Simulationen haben die Werte bestätigt [53].

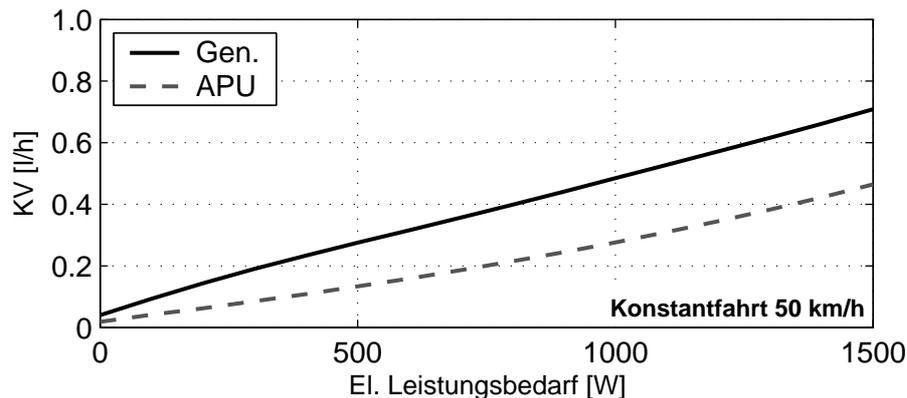
Der Kraftstoffverbrauch der elektrischen Klimatisierung wurde ebenfalls durch Versuche ermittelt, siehe Kapitel 3.4.3. Alle vier angegebenen Klimaszenarien wurden untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die APU wesentlich weniger Kraftstoff für die 30 Minuten Klimatisierung benötigt, als der Verbrennungsmotor. Besonders günstig ist die APU, wenn kein Startup notwendig ist. Dann sinkt der Verbrauch im Vergleich zum *Motor-Fernstart* auf mehr als die Hälfte. Aber auch mit Startup ist der APU-Verbrauch wesentlich niedriger als der Kraftstoffverbrauch der mechanischen Klimatisierung. Im Alltag wird je nach Nutzungsprofil ein verminderter Startup-Verbrauch auftreten, da zum Teil noch Restwärme in der APU vorhanden ist, siehe Kapitel 2.2. Das heißt, der Kraftstoffverbrauch bewegt sich zwischen den beiden Linien „APU mit Startup“ und „APU ohne Startup“.

Während der Verbrennungsmotor im Teillastbereich mit einem geringen Wirkungsgrad läuft, kann die APU ihren hohen Wirkungsgrad ausnutzen. Zusätzlich kann der elektrische Klimakompressor bei einer optimalen Drehzahl betrieben werden. Allerdings hat der elektrische Klimakompressor auch Nachteile. Wird die elektrische Energie vom Verbrennungsmotor über den Generator erzeugt, kommt es zur mehrfachen Energiewandlung, die immer mit Wirkungsgradverlusten behaftet ist. So zeigen Simulationen, dass während der Fahrt eine elektrische Klimatisierung keine Kraftstoffeinsparungen bringt, auch wenn die elektrische Energie von einer APU erzeugt wird [53]. Verbesserungen können hier jedoch eventuell durch optimierte elektrische Kompressoren erzielt werden. Außerdem ist über den Einsatz eines Hybridkompressors nachzudenken. Zukünftige Klimaanlage mit  $CO_2$  als Kältemittel können zu anderen Randbedingungen führen, so dass eine neue Bewertung notwendig ist.

## 4.2 Stromversorgung während der Fahrt

Die APU hat gezeigt, dass sie im Stand wesentliche Vorteile gegenüber dem Generator hat. Im folgenden wird das Potenzial einer APU während der Fahrt betrachtet. Hier entfällt der größte Nachteil des Generators im Stand, der hohe Grundverbrauch des Verbrennungsmotors im Leerlauf, siehe Bild 4.1. Der Leerlaufverbrauch des Verbrennungsmotors wird nicht mehr der Stromerzeugung zugerechnet, da er während der Fahrt auch bei einem Fahrzeug ohne Stromerzeugung auftritt.

In Bild 4.5 ist der zusätzliche Kraftstoffverbrauch für die Stromerzeugung per Generator und APU in Abhängigkeit von der elektrischen Nutzleistung dargestellt. Dabei wird von einer konstanten Fahrt bei 50 km/h ausgegangen. Mit der APU wird ein deutlich geringerer Kraftstoffverbrauch als mit dem Generator erzielt. Bei beiden Systemen liegt bei fehlender Nutzleistung (0 W) ein geringer Grundverbrauch vor. Bei der APU resultiert dieser Grundverbrauch aus dem elektrischen Eigenbedarf, der von der APU selbst erzeugt wird.



**Bild 4.5:** Vergleich des Kraftstoffverbrauchs (KV) für die Stromerzeugung per Generator und APU während der Fahrt, APU betriebsbereit

Der Generator verursacht einen Grundverbrauch durch ein drehzahlabhängiges Grundschleppmoment, siehe Kapitel 2. Der Vergleich von APU und Generator bei konstanter Fahrt ist jedoch nicht ausreichend, da verschiedene Effekte nicht berücksichtigt werden:

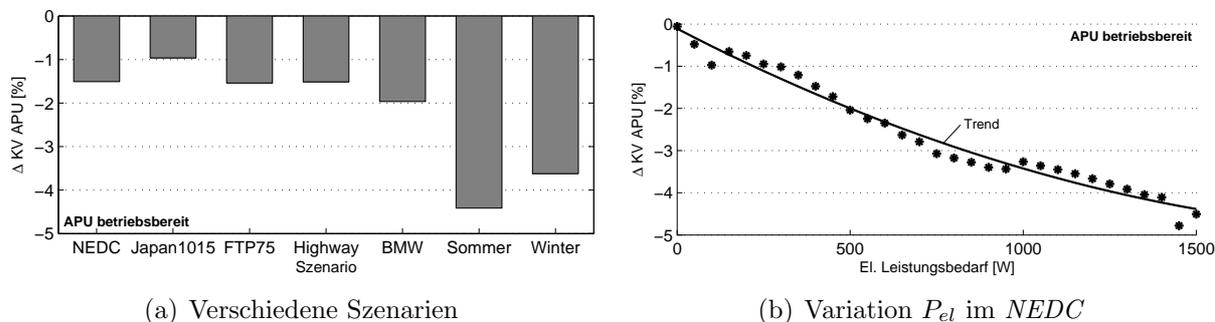
- Verschiedene Drehzahl-niveaus führen beim Generator zu unterschiedlichen Schleppmomentverlusten. Je nach Fahrprofil kann dies große Unterschiede bei der Effektivität des Generators bedeuten. Autobahnprofile haben z.B. ein deutlich höheres Drehzahl-niveau, was zu einem höheren Kraftstoffverbrauch für die Generatorstromerzeugung führt.
- Die Stromerzeugung per Generator während einer starken Bremsphase belastet den Motor nicht. Es kommt nur zu einer Umverteilung der Energieflüsse weg von der Bremse hin zum Generator. Dieser Effekt ist als Rekuperation bekannt und tritt bereits heute im Fahrzeug auf. Auch wenn die Stromerzeugung des Generators während der Bremsphase nicht aktiv gesteuert wird, besteht eine „passive“ Rekuperation.
- Wenn die APU zu Fahrtbeginn kalt ist, muss zunächst ein Startup durchgeführt werden. Der Energieaufwand muss beim Vergleich von APU und Generator mit berücksichtigt werden. Außerdem kann während des Startups kein elektrischer Strom durch die APU erzeugt werden. Zusätzlich muss die Fahrdauer berücksichtigt werden. Bei einer längeren Fahrt kann der Startup-Verbrauch, ein Einmal-aufwand, wieder kompensiert werden.

Um die obigen Punkte mit zu berücksichtigen, wird der Verbrauchsunterschied zwischen einem Fahrzeug mit und ohne APU anhand der in Kapitel 3.1 definierten Szenarien untersucht. Zusätzlich wird der Einfluss des elektrischen Leistungsbedarfs ermittelt, indem einer Variation des Leistungsbedarfs bei konstantem Fahrprofil stattfindet. Als Fahrprofil wurde für diese Variation der *NEDC* ausgewählt.

#### 4.2.1 Ersatz des Generators durch die APU

Zunächst wird der Generator komplett entfernt und durch eine APU ersetzt. Als Vergleichsbasis dient ein heutiges Fahrzeug mit Generator, ohne aktive Rekuperation. Als

erstes wird davon ausgegangen, dass die APU zu Fahrtbeginn bereits betriebswarm ist. Dies ist dann der Fall, wenn eine Standklimaphase vorausgegangen ist oder wenn das Fahrzeug nicht lange stand, so dass die APU noch warm ist.



**Bild 4.6:** Verbrauchseinsparung bei Ersatz des Generators durch eine APU, APU betriebsbereit

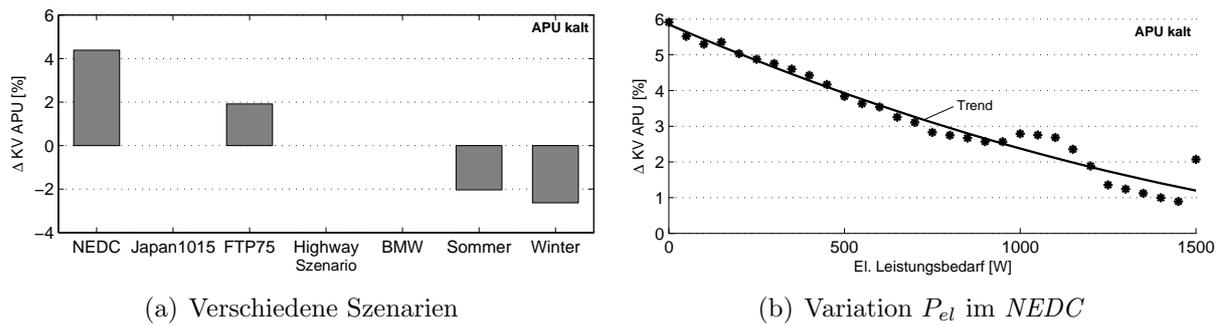
In Bild 4.6 sind die Ergebnisse dargestellt. Bild 4.6 (a) zeigt, dass in allen Fahrzyklen eine Einsparung erzielt wird. Die geringste Einsparung wird im Japan1015-Zyklus erzielt. Der Zyklus hat ein niedriges Drehzahlniveau sowie einen geringen elektrischen Leistungsbedarf. Besonders groß ist die Einsparung in den Szenarien *Sommer* und *Winter*. In diesen beiden Szenarien ist der elektrische Leistungsbedarf sehr hoch, so dass der Kraftstoffverbrauch für die Stromerzeugung entsprechend ins Gewicht fällt.

Die Abhängigkeit des Einsparpotenzials vom elektrischen Leistungsbedarf wird vor allem in Bild 4.6 (b) deutlich. Hier wurde der elektrische Leistungsbedarf bei konstantem Fahrprofil (*NEDC*) variiert. Mit zunehmendem Leistungsbedarf nimmt das Einsparpotenzial der APU zu, da ein höherer Wirkungsgrad gegenüber der Stromerzeugung per Generator vorliegt. Da sowohl der APU-Wirkungsgrad als auch der Generatorwirkungsgrad von der jeweils erzeugten Leistung abhängen, liegt kein linearer Zusammenhang zwischen elektrischem Leistungsbedarf und Einsparpotenzial vor. Zusätzlich führen Diskretisierungsfehler sowie zum Teil Ungenauigkeiten beim SoC-Ausgleich zu Unregelmäßigkeiten im Kurvenverlauf. Ungenauigkeiten beim SoC-Ausgleich spielen vor allem im Bereich von 1500 W eine Rolle, da hier die APU und der Generator an ihre Leistungsgrenzen kommen.

Wenn die APU bei Fahrtbeginn kalt ist, muss sie aufgeheizt werden. Wie in Bild 4.7 zu sehen ist, verschieben sich dadurch die Balken deutlich Richtung Mehrverbrauch. Der Startup-Verbrauch beträgt ca. 6% des Fahrzeuggrundverbrauchs im *NEDC*.

In Bild 4.7 (a) ist zu sehen, dass sich der Startup-Verbrauch bei den verschiedenen Zyklen unterschiedlich auswirkt. Bei längeren Zyklen, z.B. *Sommer* und *Winter* spielt der Startup-Verbrauch keine so große Rolle, da er bei längerer Zyklusdauer durch den Wirkungsgradvorteil der APU wieder ausgeglichen werden kann. Ganz im Gegensatz dazu, steigt der Mehrverbrauch bei relativ kurzen Zyklen wie dem *NEDC* sprunghaft an. Der *Japan1015*-, der *Highway*- und der *BMW*-Zyklus sind hier nicht dargestellt, da sie warm gestartet werden und insofern auch von einem APU-Warmstart ausgegangen werden kann. Bei der Variation der elektrischen Leistung im *NEDC* in Bild 4.7 (b) verschiebt sich die komplette Kurve im Vergleich zu Bild 4.6 (b) um ca. 6 Prozentpunkte nach oben.

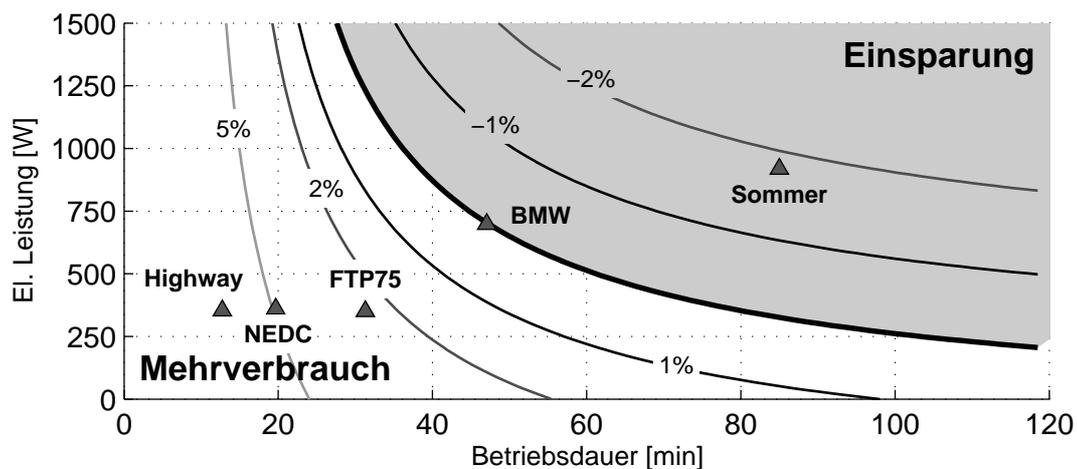
Da die APU während des Startups noch keinen Strom erzeugt, muss Energie aus der Batterie entnommen werden. Die Effekte der Zwischenspeicherung spielen allerdings nur



**Bild 4.7:** Verbrauchseinsparung bei Ersatz des Generators durch eine APU, APU kalt (mit Startup)

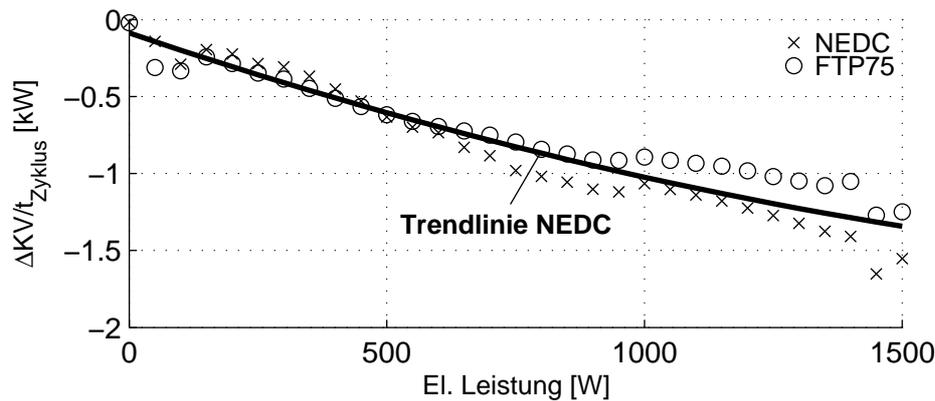
eine untergeordnete Rolle. Erst bei einem hohen elektrischen Leistungsbedarf macht sich dies deutlicher bemerkbar.

Man sieht, dass die Zyklusdauer neben dem elektrischen Leistungsbedarf den größten Einfluss auf den Verbrauchsunterschied einer APU gegenüber einem Generator darstellt. Deshalb wird, wie bereits in Kapitel 4.1 bei der Stromerzeugung im Stand, eine neue Darstellung für eine Betrachtung mit APU-Startup gewählt, siehe Bild 4.8.



**Bild 4.8:** Potenzial der Stromerzeugung per APU bei Generatorersatz, mit voller Berücksichtigung des APU-Startups

Auf der x-Achse ist die Betriebsdauer der APU aufgetragen. Die y-Achse stellt die elektrische Leistung der Verbraucher im Fahrzeug dar. Der obere, grau markierte Bereich stellt eine Einsparung der APU dar. Im unteren Bereich kommt es zu einem Mehrverbrauch aufgrund des Startup-Verbrauchs. Mit zunehmender Betriebsdauer und zunehmender elektrischer Leistung wird ein Ausgleich des Startup-Verbrauchs durch den Wirkungsgradvorteil der APU erreicht. Zusätzlich zur Grenze zwischen Kraftstoffmehrverbrauch und -einsparung sind Linien mit Verbrauchsunterschieden eingezeichnet. Die Werte beziehen sich auf den Grundverbrauch eines Fahrzeugs im *NEDC*. So ist ein einfacher Überblick möglich, wann sich eine APU abhängig von Betriebsdauer und elektrischer Leistung lohnt. Außerdem sind die untersuchten Zyklen eingezeichnet. Es fehlt der Winterzyklus, der mit einer Betriebsdauer von *165 min* nicht mehr im Bild liegt.



**Bild 4.9:** Durchschnittliche Kraftstoffeinsparung bei der Stromerzeugung per APU bezogen auf die Zykluszeit, aufgetragen über der elektrischen Leistung, dargestellt für den NEDC und den FTP75; Fahrzeug mit betriebsbereiter APU als Generatorersatz.

Zur Erstellung von Bild 4.8 wird für alle 100 s und alle 50 W der Verbrauchsunterschied zwischen einem Fahrzeug mit und ohne APU und der Energieaufwand für den APU-Startup (Kraftstoff und elektrische Energie) addiert. Hierbei werden die Ergebnisse einer betriebsbereiten APU aus Bild 4.6(b) herangezogen und auf die Zykluszeit normiert. Der normierte Verbrauchsunterschied ist in Bild 4.9 dargestellt. Auf der x-Achse ist die elektrische Verbraucherleistung aufgetragen. Sie entspricht der y-Achse in Bild 4.8. Auf der y-Achse ist der normierte Verbrauchsunterschied zwischen APU- und Generatorstromerzeugung dargestellt.

Zur Erstellung des P-t-Diagramms (Bild 4.8) wird die Trendlinie der NEDC-Ergebnisse verwendet. Die Standardabweichung der einzelnen Simulationsergebnisse des NEDC von der Trendlinie beträgt 9,3 %. Dadurch entsteht in Bild 4.8 eine Unsicherheit bei der Bestimmung der notwendigen Betriebsdauer bis zum Erreichen der Einspargrenze von 10,4 %<sup>39</sup>.

Generell erscheint die Aussageunsicherheit der P-t-Darstellung zunächst relativ hoch. Allerdings soll die Darstellung in Bild 4.8 auch nur als Ergänzung zu Bild 4.7 verstanden werden, um den Einfluss des Startup-Verbrauchs besser zu veranschaulichen. Ob nun der Startup-Verbrauch in 30 min oder 33 min ( $\hat{=}$  10 % Abweichung) kompensiert wird, spielt für die Veranschaulichung keine große Rolle.

Die Simulationsergebnisse des FTP75 weichen mit einer Standardabweichung von 10,6 % von der NEDC-Trendlinie ab. Hier beträgt die Unsicherheit bezüglich der Bestimmung der Grenzbetriebsdauer 13,6 %. Das heißt, dass das Bild 4.8 auch für den FTP75 mit einer ähnlichen Aussagesicherheit herangezogen werden kann. Das selbe gilt für weitere Zyklen. Nur extreme Zyklen wie ein Hochgeschwindigkeitszyklus weisen sehr große Abweichungen auf.

Laut Bild 4.8 lohnt sich eine APU erst ab einer längeren Fahrdauer und bei Leistungen von mindestens 200 W. Zu bedenken ist, dass Bild 4.8 nur für eine kalte APU gilt. Im Alltag wird die APU je nach Fahrzeugnutzung nie komplett auskühlen, so dass die

<sup>39</sup>Standardabweichung auf Betriebsdauer umgerechnet, Formel:  $\frac{\Delta t}{t} = -\frac{1}{1+1/p}$  mit p = relative Abweichung zur Trendlinie

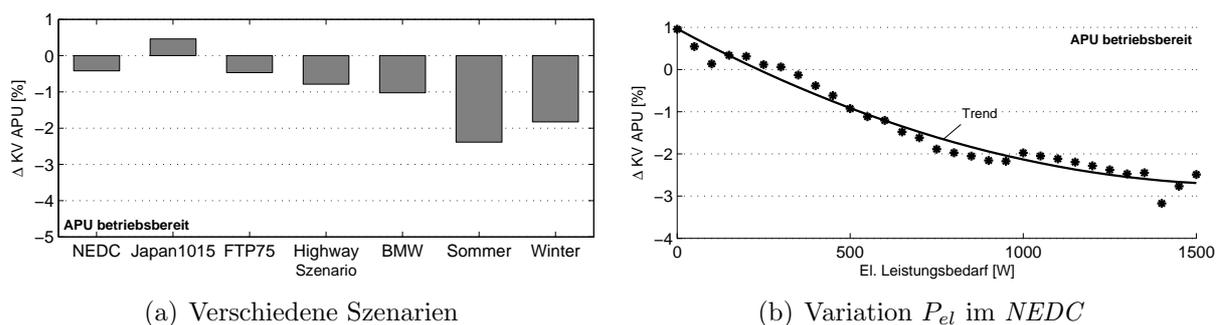
Restwärme in der APU die benötigte Startupenergie reduziert. Dadurch verschiebt sich die Grenze nach links unten.

#### 4.2.2 Kombination von APU und Generator

Bisher wurde davon ausgegangen, dass der Generator komplett durch die APU ersetzt wird. Vor allem die Startup-Zeit der APU führt jedoch dazu, dass der Generator nicht ohne weiteres entfallen kann. Der Generator kann während des APU-Startups das Fahrzeug mit elektrischer Energie versorgen. Ohne Generator läuft die Stromerzeugung in dieser Zeit nur über die Batterie. Dies kann zu starken Einbrüchen der Bordnetzspannung sowie aufgrund der höheren Batteriebelastung zu einer verringerten Batterielebensdauer führen.

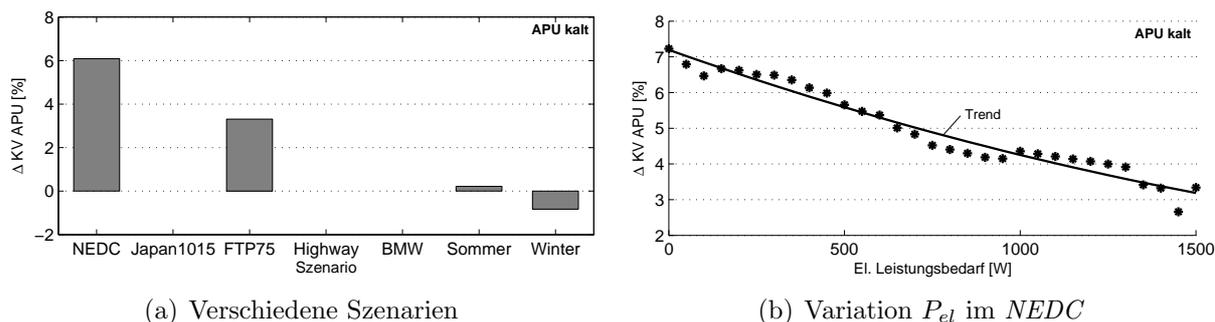
Nachfolgend wird von einem funktionsfähigen Basisfahrzeug mit Generator ausgegangen, in das die APU als zusätzliche Stromquelle *add-on* ins Bordnetz auf einfache Weise integriert wird. Dies entspricht einem Einführungsszenario einer APU, bei dem die APU z.B. nur in Fahrzeuge mit der Sonderausstattung Standklimatisierung eingebaut wird, wobei die APU auch während der Fahrt genutzt werden soll.

Der große Vorteil der Kombination von APU und Generator ist eine höhere Versorgungssicherheit bei der elektrischen Energiebereitstellung. Allerdings führt diese Systemauslegung auch zu Nachteilen. Schleppmomentverluste des Generators sowie eine erhöhte elektrische Leistung der elektrischen Verbraucher aufgrund einer höheren Bordnetzspannung führen zu einem gesteigerten Energieverbrauch. Die Schleppmomentverluste des Generators treten auch auf, wenn die APU die Stromversorgung komplett übernimmt und der Generator im entregten Zustand nur im Leerlauf dreht. Die erhöhte Bordnetzspannung resultiert aus der Anhebung der APU-Sollspannung über das Niveau der Generatorspannung zur einfachen Steuerung der Aufteilung der elektrischen Energieversorgung ohne Eingriff in das bestehende Bordnetzmanagement. Die Höhe der einzelnen Einflüsse wird in der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 4.6 dargestellt.



**Bild 4.10:** Verbrauchseinsparung bei der Kombination von APU und Generator (APU *add-on*), APU betriebsbereit

In den Bildern 4.10 und 4.11 ist die Auswirkung der Kombination von APU und Generator auf den Kraftstoffverbrauch abgebildet. Wie bereits im letzten Kapitel werden wieder verschiedene Fahrzyklen sowie eine Variation des elektrischen Leistungsbedarfs betrachtet. Dabei wird wieder zwischen betriebsbereiter APU (Bild 4.10) und kalter APU (Bild 4.11) unterschieden.



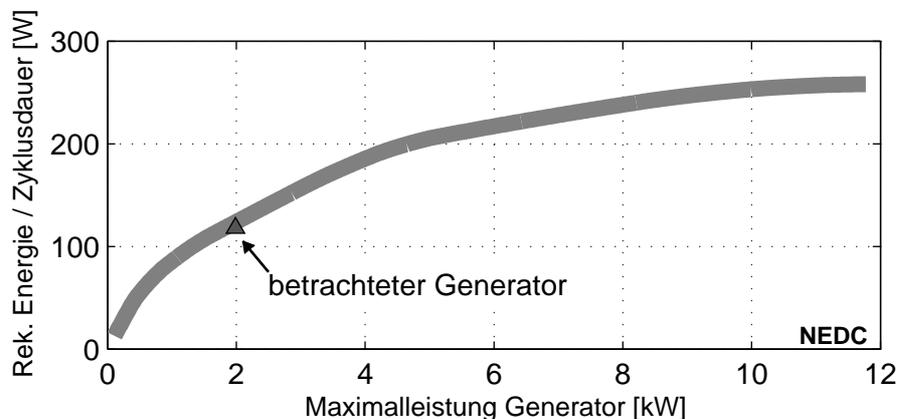
**Bild 4.11:** Verbrauchseinsparung bei der Kombination von APU und Generator (APU add-on), APU kalt (mit Startup)

Gegenüber dem Ersatz des Generators durch die APU ist aufgrund der zusätzlichen Verluste der Verbrauchsvorteil der APU geringer, unabhängig von betriebsbereiter oder kalter APU. Das heißt, die hohe Versorgungssicherheit, kombiniert mit einer einfachen Integrationsmöglichkeit der APU ins Fahrzeug, wird durch Nachteile beim Kraftstoffverbrauch erkauft.

Bei einer betriebsbereiten APU liegen weiterhin bei fast allen Szenarien Einsparungen vor. Nur beim *Japan1015*-Zyklus kommt es zu einem Mehrverbrauch. Dies liegt an dem niedrigen Drehzahlniveau, bei dem der Generator einen günstigeren Wirkungsgrad aufweist. Bei kalter APU können nur noch im Winter-Szenario Kraftstoffverbrauchseinsparungen erzielt werden.

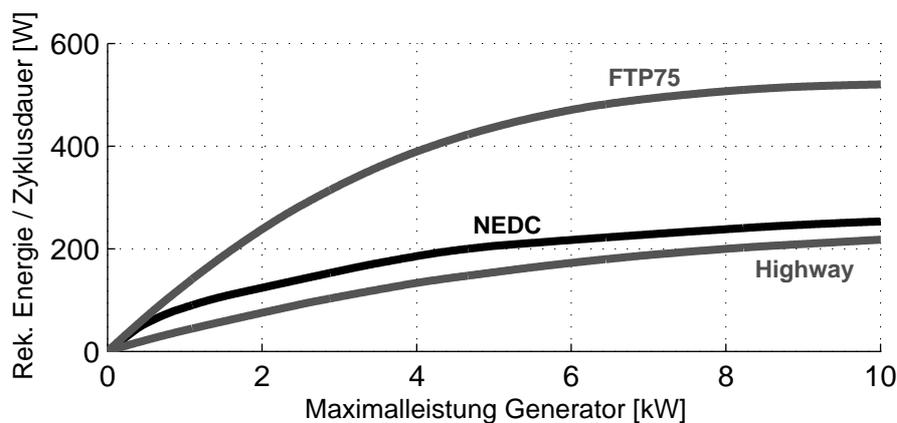
### 4.2.3 Nutzung der Rekuperation

Allerdings bringt die Kombination der APU mit einem Generator auch Vorteile. In den Bremsphasen kann der Generator kostenlos kinetische Energie in elektrische Energie rekuperieren. Dieser Effekt tritt bereits heute zum Teil im Fahrzeug auf (passive Rekuperation) und kommt dem durchschnittlichen Stromerzeugungswirkungsgrad des Generators zu Gute.



**Bild 4.12:** Rekuperationspotenzial im NEDC, ohne Berücksichtigung von Speicherverlusten und der Aufnahmefähigkeit des elektrischen Energiespeichers

In Bild 4.12 ist das maximale Rekuperationspotenzial im *NEDC* am Beispiel eines BMW 530i dargestellt. Auf der x-Achse ist die Baugröße des Generators in Form von maximal aufnehmbarer mechanischer Leistung aufgetragen. Auf der y-Achse ist die im *NEDC* rekuperierte elektrische Energie, dividiert durch die Zyklusdauer, abgebildet. Indem die Zyklusdauer berücksichtigt wird, kann das Rekuperationspotenzial verschiedener Zyklen verglichen werden. Je nach Generatorleistung variiert das Rekuperationspotenzial. Bei höherer Leistung kann mehr mechanische Bremsenergie in elektrische Nutzenergie umgewandelt werden. Voraussetzung ist jedoch, dass die elektrische Energie zum Zeitpunkt der Rekuperation auch verbraucht oder zwischengespeichert werden kann. Speicherverluste sind in Bild 4.12 noch nicht berücksichtigt, da sie vom Anteil der Zwischenspeicherung und von der Art, der Größe und dem Zustand des Speichers abhängen.

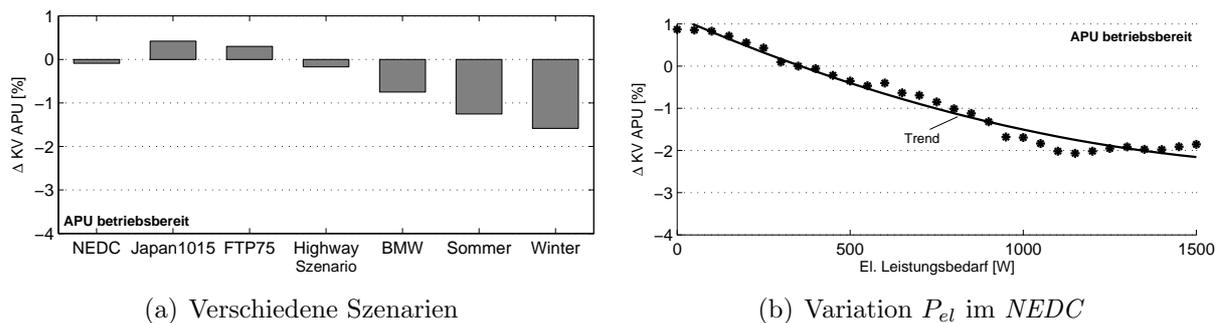


**Bild 4.13:** Vergleich des Rekuperationspotenzials in verschiedenen Fahrzyklen, ohne Berücksichtigung von Speicherverlusten

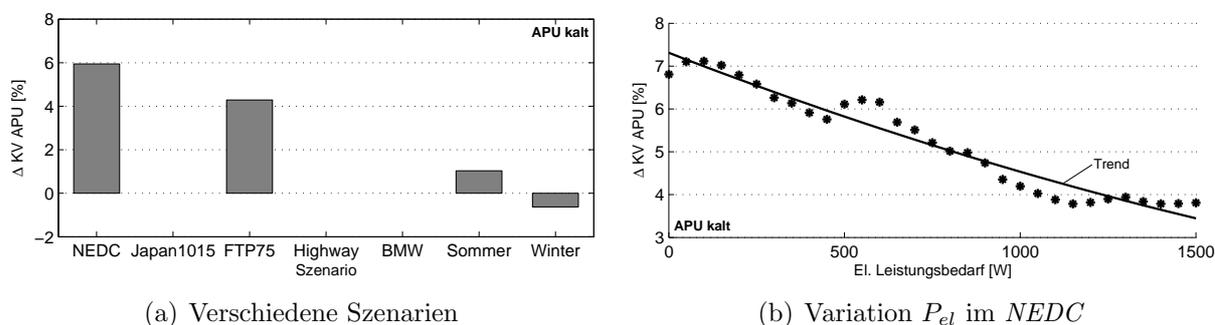
Neben der Generatorgröße ist das Rekuperationspotenzial auch von der Zykluscharakteristik abhängig. Der *NEDC* stellt eine Kombination aus Stadt- und Überlandfahrt dar, jedoch ohne große Dynamik. Zum Vergleich ist im Bild 4.13 das Rekuperationspotenzial im *FTP75* und im *Highway*-Zyklus dargestellt. Der *FTP75* hat eine höhere Dynamik als der *NEDC* und hat deshalb auch ein höheres Rekuperationspotenzial. Im *Highway*-Zyklus gibt es kaum Bremsphasen. Dadurch ist auch das Rekuperationspotenzial geringer. Damit das Rekuperationspotenzial aktiv genutzt werden kann, sind sowohl beim Fahrzeug mit APU als auch beim Fahrzeug ohne APU Anpassungen im Bordnetzmanagement notwendig, siehe Kapitel 2.3.2.

Um die Auswirkungen der aktiven Rekuperation auf das Einsparpotenzial einer APU aufzuzeigen, sind in den Bildern 4.14 und 4.15 wieder die Verbrauchsunterschiede zwischen einem Fahrzeug mit und ohne APU dargestellt. Tendenziell verschlechtert sich das Einsparpotenzial einer APU, da durch die Rekuperation „kostenlos“ elektrische Energie gewonnen wird und so ein geringerer Anteil der elektrischen Energie durch die APU erzeugt wird. Vor allem bei kleinen elektrischen Leistungen macht sich dieser Effekt bemerkbar.

Besonders deutlich wird dies bei der Darstellung aller bisher betrachteten Integrationsmöglichkeiten einer APU in Bild 4.16. Beim *Generator-Ersatz* erreicht eine kalte APU am schnellsten die Grenze zwischen Kraftstoffmehrverbrauch und -einsparung. Der Entfall des Leerlaufmoments des Generators führt zu diesem Ergebnis. Das geringste Einsparpotenzial hat eine APU in Kombination mit einer aktiven Rekuperation.



**Bild 4.14:** Verbrauchseinsparung bei der Kombination der APU mit dem Generator und der Nutzung der Rekuperation, APU betriebsbereit



**Bild 4.15:** Verbrauchseinsparung bei der Kombination der APU mit dem Generator und der Nutzung der Rekuperation, APU kalt (mit Startup)

Trotzdem ist es sinnvoll, bei der Kombination von APU und Generator eine aktive Rekuperation einzuführen, da der Gesamtkraftstoffverbrauch für die Stromerzeugung sinkt. Dies wird in Bild 4.17 deutlich. Hier ist der Kraftstoffverbrauch im *NEDC* für die elektrische Energieversorgung im Fahrzeug bezogen auf den Grundverbrauch bei allen bisher betrachteten Integrationsmöglichkeiten dargestellt. Die erste Säule gibt den energetischen Aufwand beim heutigen Fahrzeug ohne APU und ohne aktive Rekuperation wieder. Er beträgt ca. 5 % vom Kraftstoffverbrauch ohne Stromerzeugung. Mit Rekuperation, siehe zweite Säule, sinkt dieser Aufwand im betrachteten Beispiel um ca. 1 %-Punkt. Das Einsparpotenzial ist relativ klein, da durch eine limitierte Stromaufnahmefähigkeit der Batterie sowie einer begrenzten Leistungsfähigkeit des Generators nur ein Teil der Bremsenergie rekuperiert werden kann.

Die dritte Säule in Bild 4.17 stellt den Kraftstoffverbrauch für die Stromerzeugung durch eine APU bei einem Entfall des Generators dar. Wie bereits festgestellt, liegt hier bei betriebsbereiter APU ein relativ großes Einsparpotenzial gegenüber Fahrzeugen ohne APU vor. Der APU-Startup-Verbrauch erhöht den energetischen Aufwand extrem, so dass bei kalter APU ein höherer Kraftstoffverbrauch als beim Fahrzeug ohne APU (= nur Generator) vorliegt. Die vierte und fünfte Säule zeigen den energetischen Aufwand für die Stromerzeugung bei Kombination von APU und Generator ohne und mit Rekuperation. In beiden Fällen liegt ein höherer Energieverbrauch als beim Generatorersatz (= nur APU) vor. Zu beachten ist, dass bei der Kombination von APU und Generator mit Rekuperation ein niedrigerer Energieverbrauch für die Stromerzeugung besteht als ohne Rekuperation,



### 4.3 Unterstützung der Motor-Stopp-Automatik (MSA)

24% der Zykluszeit im *NEDC* steht das Fahrzeug. Im *Japan1015*-Zyklus beträgt der Standanteil sogar 31%, siehe Tabelle 4.1. In dieser Zeit läuft der Verbrennungsmotor im Leerlauf. Lediglich der Generator und eventuell weitere Hilfsaggregate wie Klimakompressor, Lenkhilfepumpe, Wasserpumpe und Bremskraftverstärker werden betrieben. Bereits im Kapitel „Standanwendungen“ wurde aufgezeigt, dass der Verbrennungsmotor im Leerlauf nur ineffektiv betrieben wird. Deshalb ist es sinnvoll, den Verbrennungsmotor über die MSA-Funktion während Standphasen auszuschalten.

<b>NEDC</b>	<b>Japan1015</b>	<b>FTP75</b>	<b>Highway</b>	<b>BMW</b>	<b>Sommer</b>	<b>Winter</b>
23,7%	31,4%	18,0%	0,5%	8,4%	25,5%	20,7%

*Tabelle 4.1: Anteil der Standzeit in den betrachteten Fahrzyklen*

Das Thema MSA wird in vielen Arbeiten behandelt und soll hier nur in Hinblick auf die Stromversorgung betrachtet werden. Da der Generator bei abgeschaltetem Motor keinen Strom liefert, muss die elektrische Energieversorgung in der Standphase komplett über die Fahrzeugbatterie bewerkstelligt werden. Dies führt jedoch zu folgenden Problemen:

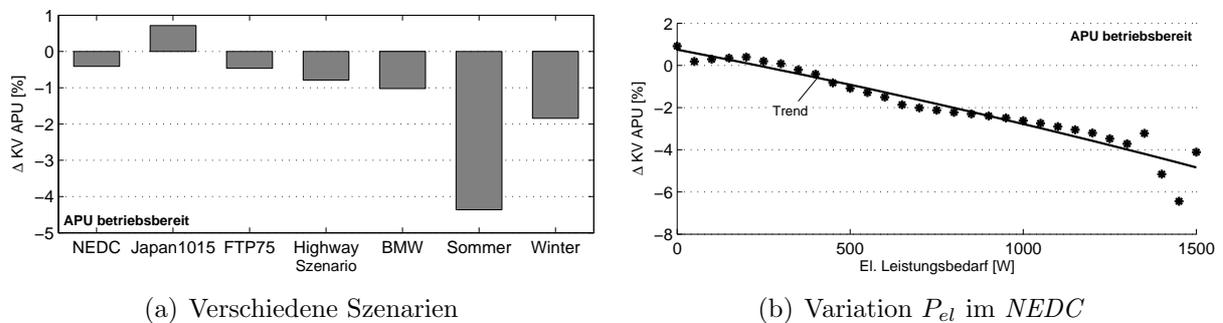
- Die Höhe der Batterieleistung, sowie die Menge der entnehmbaren Energie ist begrenzt, siehe Kapitel 4.1, Bild 4.3. Solange kein hoher elektrischer Energiebedarf während der Standphase vorliegt, ist dies unproblematisch, vor allem da der Bordnetzbedarf bei abgeschaltetem Verbrennungsmotor eher sinkt. Sollen aber alle elektrischen Verbraucher uneingeschränkt in der MSA-Phase betrieben werden, stößt das System schnell an seine Grenzen.
- Die entnommene Energiemenge muss während der Fahrt wieder in die Batterie zurückgeführt werden. Eine begrenzte Generatorleistung sowie die maximale Ladungsaufnahme der Batterie führen hier zu Einschränkungen bei der Geschwindigkeit des Ladungsausgleichs. Kritisch ist die Rückladung vor allem bei geringen Temperaturen, da die Batterie dann schlechter geladen werden kann, so dass hier die MSA-Funktion abgeschaltet werden muss.
- Eine ständige Entladung der Batterie führt zu einem erhöhten Energiedurchsatz und zu einem niedrigeren durchschnittlichen Ladeniveau. Dies kann wiederum zu einer geringeren Lebensdauer der Batterie führen.
- Eine MSA-Strategie, bei der die Batterie immer möglichst voll sein soll, um lange Standphasen zu überbrücken, steht teilweise im Gegensatz zu einer Rekuperations-Strategie. Bei der Rekuperations-Strategie wird die Batterie teilweise gezielt entladen um in Rekuperationsphasen Energie aufnehmen zu können.

Eine APU kann hier eine ideale Ergänzung bieten, vor allem bei der Bereitstellung elektrischer Energie im Stand, aber auch bei der Flexibilisierung der Betriebsstrategie.

Die Motor-Stopp-Automatik ermöglicht im *NEDC* eine Kraftstoffeinsparung von ca. 5%. In der Literatur werden Potenziale zwischen 5% und 15% angegeben [4, 57]. Hier soll der Nutzen einer APU bei einer MSA-Strategie im Vordergrund stehen. Deshalb wird in den nachfolgenden Diagrammen sowohl beim Fahrzeug mit APU, als auch beim Fahrzeug ohne APU, von einer aktiven MSA-Funktion ausgegangen.

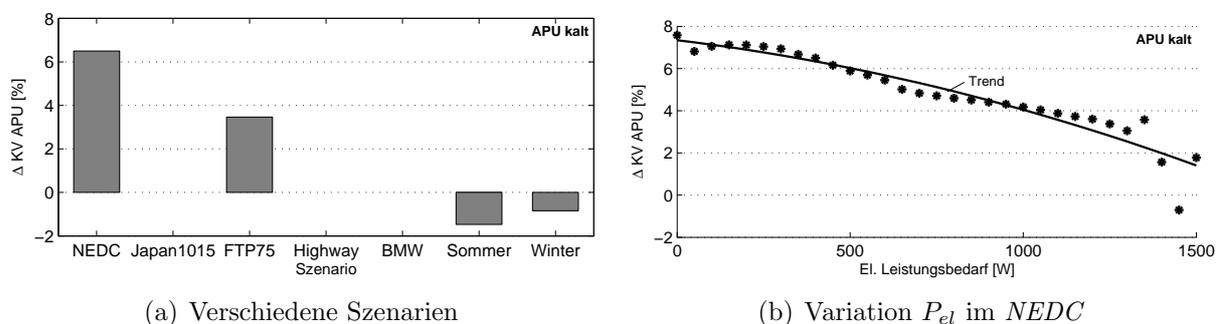
### 4.3.1 MSA ohne aktive Rekuperation

Zunächst soll die Motor-Stopp-Automatik ohne aktive Rekuperation betrachtet werden. In Bild 4.18 ist der Verbrauchsvorteil durch die APU bei betriebsbereiter APU aufgezeigt. Im Vergleich zur Kombination von APU und Generator ohne MSA und Rekuperation, siehe Kapitel 4.2.2 Bild 4.10, ändert sich der Verbrauchsvorteil vor allem bei Zyklen mit hohem MSA-Anteil und bei hohen Strömen. Besonders deutlich wird dies beim *Sommer*-Zyklus, wo das Einsparpotenzial der APU um 2 %-Punkte zunimmt. Im Japan1015-Zyklus erhöht sich der relative Mehrverbrauch gegenüber der Betrachtung ohne MSA. Während den MSA-Phasen sinkt der elektrische Leistungsbedarf, da der Leistungsbedarf des Verbrennungsmotors weitgehend entfällt. Die APU wird in dieser Zeit bei extremer Teillast und damit ungünstigem Wirkungsgrad betrieben. Zum Teil liegt der Anstieg des relativen Mehrverbrauchs auch daran, dass der Gesamtkraftstoffverbrauch sinkt und somit der Anteil der Aufwendungen für die Stromerzeugung zunimmt.



**Bild 4.18:** Verbrauchseinsparung durch die APU bei einer MSA-Strategie, APU betriebsbereit

Bei der Variation der elektrischen Leistung im rechten Diagramm zeigt sich durch die MSA-Funktion ein größeres Einsparpotenzial der APU, vor allem bei einem Leistungsbedarf größer 1000 W. Bei Leistungen zwischen 1300 W und 1500 W wird die Leistungsgrenze von APU und Generator erreicht, so dass es hier zu größeren Streuungen kommt.

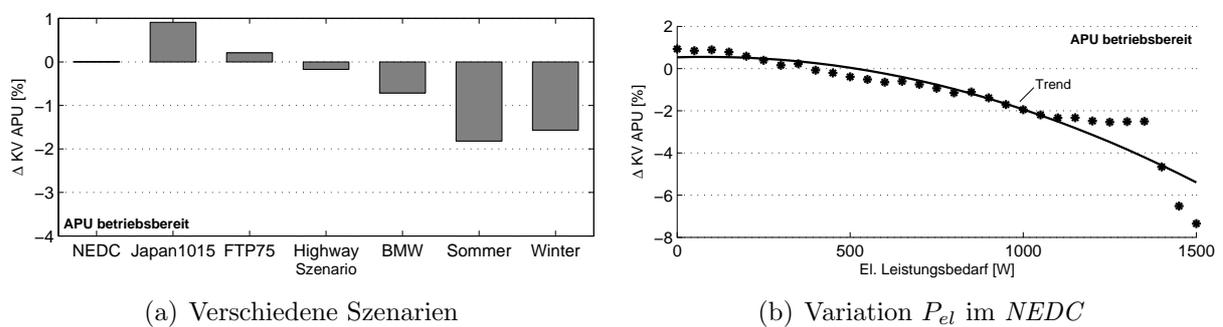


**Bild 4.19:** Verbrauchseinsparung durch die APU bei einer MSA-Strategie, APU kalt (mit Startup)

In Bild 4.19 ist der Verbrauchsunterschied eines Fahrzeugs mit APU und MSA-Funktion gegenüber einem Fahrzeug ohne APU mit MSA-Funktion bei kalter APU dargestellt. Wie

bei den bisherigen Betriebsstrategien führt auch hier der Startup-Verbrauch der APU in den meisten Szenarien zu einem Mehrverbrauch. Nur bei den Zyklen *Sommer* und *Winter* kann aufgrund der langen Zyklusdauer der Startup-Verbrauch kompensiert werden und ein Verbrauchsvorteil durch die APU erzielt werden. Wenn die MSA-Funktion aufgrund von Temperaturgrenzen, Batterieladezuständen oder Komfortgründen nur mit APU aktiviert werden kann, steigt der Verbrauchsvorteil eines Fahrzeugs mit APU sprunghaft, da sowohl der oben dargestellte APU-Vorteil als auch das eigentliche MSA-Potenzial der APU zugeordnet werden können.

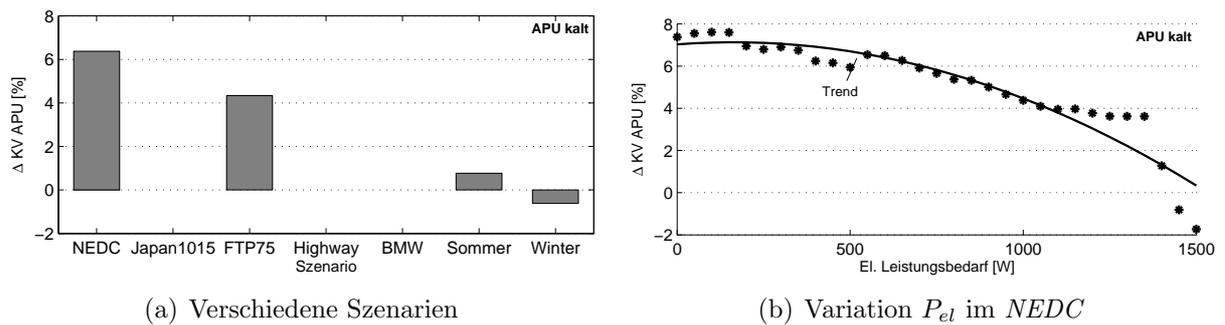
### 4.3.2 MSA mit aktiver Rekuperation



**Bild 4.20:** Verbrauchseinsparung durch die APU bei einer kombinierten MSA- und Rekuperationsstrategie, APU betriebsbereit

In Bild 4.20 ist das Einsparpotenzial der betriebsbereiten APU bei der Nutzung der MSA-Funktion in Kombination mit der Rekuperationsfunktion dargestellt. Die Verbrauchsunterschiede zwischen einem Fahrzeug mit und ohne APU ändern sich gegenüber den vorherigen Betrachtungen ohne Rekuperation nur geringfügig. Analog zur Betrachtung ohne MSA führt die Rekuperation zunächst zu einer Abnahme des APU-Potenzials. Erst bei einem hohen elektrischen Energiebedarf, z.B. beim *Winter*-Szenario oder bei hohen Leistungen in Bild 4.20(b) zeigt die APU Vorteile auf. Sie ermöglicht eine sichere Energieversorgung im Stand, auch bei relativ niedrigem Batterieladezustand. So unterstützt die APU sowohl die MSA- als auch die Rekuperationsfunktion. Bei Leistungen bis 1350 W verhalten sich die Ergebnispunkte in Bild 4.20 (b) wie in Bild 4.14 (b) bei der Betrachtung der Rekuperationsfunktion ohne zusätzliche MSA-Funktion. Ab einer Leistung von 1400 W nimmt das Einsparpotenzial stark zu. Dies liegt daran, dass ab diesem Punkt ohne APU nicht mehr genügend elektrische Leistung erzeugt werden kann, so dass die Länge der MSA-Standphasen im Fahrzeug ohne APU reduziert werden. Der Zeitpunkt, zu dem MSA-Phasen eingeschränkt werden, ist von der APU-Größe, der Generatorgröße, der Batteriegröße, vom elektrischen Leistungsbedarf und vor allem vom Fahrzyklus abhängig. Die eingezeichnete Trendlinie stellt den prinzipiellen Verlauf des Einsparpotenzials einer APU dar.

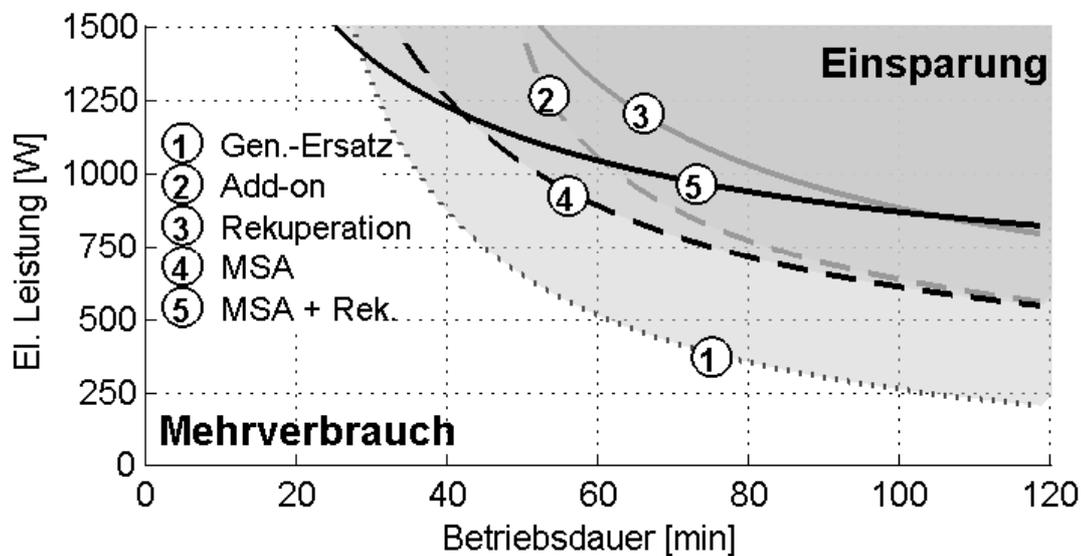
Hier nicht berücksichtigt ist, dass bei hohem elektrischen Leistungsbedarf eventuell eine Deaktivierung der MSA-Funktion notwendig ist, um größere Spannungseinbrüche zu vermeiden. Eine APU kann in diesem Fall eine erweiterte Nutzung der MSA-Funktion ermöglichen.



**Bild 4.21:** Verbrauchseinsparung durch die APU bei einer kombinierten MSA- und Rekuperationsstrategie, APU kalt (mit Startup)

In Bild 4.21 ist wieder das Einsparpotenzial bei kalter APU dargestellt. Wie bei den vorherigen Betrachtungen verursacht auch hier der Startup-Verbrauch eine deutliche Verschlechterung des APU-Potenzials. Nur bei dem sehr langen *Winter*-Zyklus besteht weiterhin ein Einsparpotenzial.

Zur Veranschaulichung der notwendigen Betriebsdauer, bis zur Kompensation des Startup-Verbrauchs, ist in Bild 4.22 erneut ein P-t-Diagramm dargestellt, nun inklusive der MSA-Funktion und der Kombination von MSA-Funktion und aktiver Rekuperation.



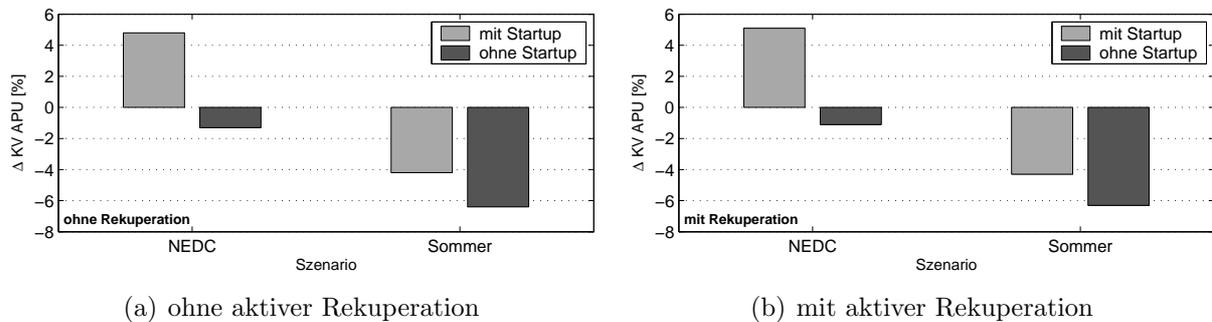
**Bild 4.22:** Vergleich der Einsparpotenziale verschiedener Integrationsmöglichkeiten im P-t-Diagramm, APU kalt (mit Startup)

Man sieht, dass die kalte APU in Kombination mit einer MSA-Funktion bereits bei einer geringeren Betriebsdauer zu Kraftstoffeinsparungen führt als eine reine „Add-on“-Lösung oder Rekuperationsstrategie. Bei hohen elektrischen Leistungen wird die Kompensation des Startup-Verbrauchs fast so schnell erreicht wie beim „Generator-Ersatz“, da gegenüber dem Fahrzeug ohne APU keine Zwischenspeicherung der elektrischen Energie notwendig ist. Bei zusätzlicher Rekuperationsstrategie hat die APU den Vorteil, dass sie auch bei

teilgeladener <sup>40</sup> Batterie stets eine sichere elektrische Energieversorgung in Standphasen ermöglicht und so auch bei hohen elektrischen Leistungen keine Einschränkungen der MSA-Funktion auftreten.

### 4.3.3 MSA mit Klimatisierung

Bei abgeschaltetem Motor ist eine Klimatisierung über den mechanischen Klimakompressor nicht möglich. Für die Klimatisierung während der Standphase kann ein elektrischer Klimakompressor vorgesehen werden. Während bisher der elektrische Leistungsbedarf in den MSA-Phasen durch das Abschalten des Verbrennungsmotors reduziert wurde, steigt dann der Leistungsbedarf durch die elektrische Klimatisierung extrem an. Hier wird von einem zusätzlichen elektrischen Bedarf von  $1,2\text{ kW}$  für die Aufrechterhaltung des Klimatisierungskomforts in Standphasen ausgegangen.



**Bild 4.23:** Verbrauchseinsparung durch die APU bei einer elektrischen Erhaltungsklimatisierung in den MSA-Standphasen

Im Bild 4.23 sind die Ergebnisse für den *NEDC* und das *Sommer*-Szenario bei elektrischer Klimatisierung während den Standphasen dargestellt, sowohl mit als auch ohne aktiver Rekuperation. Der Einfluss der Rekuperation ist nur minimal. Der hohe elektrische Energiebedarf in der Standphase kann durch die APU wesentlich besser abgedeckt werden als durch den Generator. Ohne APU muss die elektrische Energie in der Batterie zwischengespeichert werden, wodurch Speicherverluste entstehen. In den Fahrphasen kommt der Generator bei niedrigen Drehzahlen wie im Sommer-Zyklus schnell an seine Leistungsgrenze, so dass die Batterie nur langsam wieder aufgeladen werden kann. So kann es zur Unterschreitung des minimalen Soll-Batterieladezustands kommen und die MSA-Funktion wird teilweise deaktiviert.

*Anmerkung: Eine elektrische Klimatisierung während der Fahrt ist energetisch meist ungünstiger als eine Klimatisierung über den direkt vom Verbrennungsmotor angetriebenen mechanischen Klimakompressor [53]. Deshalb wird hier während der Fahrt von einer mechanisch angetriebenen Klimatisierung, z.B. unter Verwendung eines Hybridkompressors (kann mechanisch und elektrisch betrieben werden), ausgegangen.*

<sup>40</sup>Ladungsvorhalt in der Batterie zur Aufnahme von rekuperierter Energie in Bremsphasen

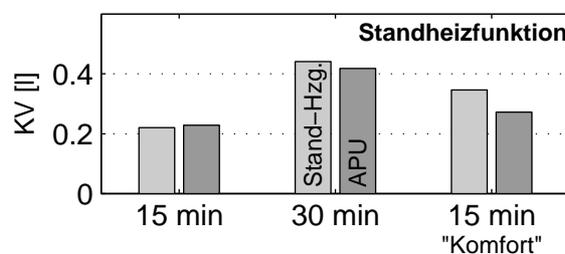
## 4.4 Nutzung der APU-Wärme

Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben wurde, erzeugt die APU Wärme auf einem hohen Temperaturniveau. Diese Wärme kann für Heizzwecke oder zur Aggregateerwärmung genutzt werden. Die APU-Wärmenutzung steht nicht im Fokus dieser Arbeit, soll aber vollständigshalber am Rande mit betrachtet werden.

### 4.4.1 Wärmeerzeugung zum Heizen des Fahrgastraums

Bei Bedarf kann die Wärme zum Heizen des Innenraums genutzt werden. Der Vorteil gegenüber einer herkömmlichen Standheizung oder eines Zuheizers ist, dass durch die Kraft-Wärme-Kopplung ein höherer Gesamtnutzungsgrad besteht, siehe Kapitel 2.2.1.

Zunächst soll der Verbrauchsvorteil bei einer Standheizeranwendung ermittelt werden. Dazu werden drei Szenarien betrachtet, eine 15-minütige Standheizphase, eine 30-minütige Standheizphase und eine 15-minütige Standheizphase „Komfort“. Beim letzten Szenario werden zusätzlich elektrische Heizungen zur Vorwärmung der Sitze und zum Abtauen der Frontscheibe betrieben. In Bild 4.24 sind die Ergebnisse dargestellt. Bei der 15-minütigen Standheizphase verbraucht die herkömmliche Standheizung ca. 0,2 l Kraftstoff. Dabei ist der energetische Aufwand zum Ausgleich der während der Standheizphase aus der Batterie entnommenen elektrischen Energie berücksichtigt. Die APU benötigt geringfügig mehr Kraftstoff. Der große Vorteil ist, dass die APU nach der Standheizphase auf Betriebstemperatur ist und für die elektrische Energieversorgung während der Fahrt zur Verfügung steht.



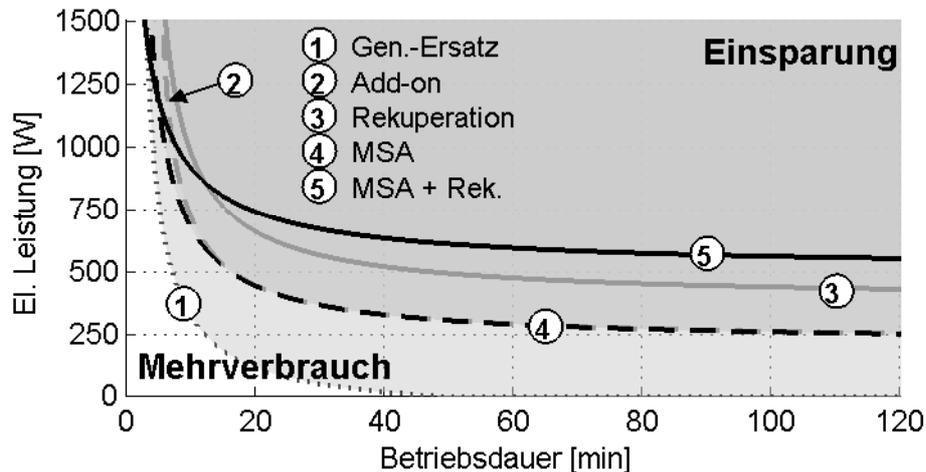
**Bild 4.24:** Vergleich der Simulationsergebnisse des Kraftstoffverbrauchs (KV) bei der Standheizfunktion mit herkömmlicher Standheizung mit der Wärmenutzung der SOFC-APU, inklusive Berücksichtigung des APU-Startups aus kaltem Zustand

Bei einer 30-minütigen Standheizphase verdoppelt sich der Kraftstoffverbrauch der herkömmlichen Standheizung. Bei der APU besteht ein Einmalaufwand durch den APU-Startup. Dieser Verbrauch ist bereits in den ersten 15 Minuten enthalten. Verlängert sich nun die Betriebsdauer, nimmt der Kraftstoffverbrauch nicht linear mit der Zeit zu. Theoretisch besteht auch bei der herkömmlichen Standheizung ein Einmalaufwand zum Aufheizen der thermischen Massen. Da diese Massen jedoch relativ gering sind<sup>41</sup>, wird dieser Aufwand hier vernachlässigt. Da die während der Standheizphase verbrauchte elektrische Energie mit APU wesentlich effizienter erzeugt werden kann, kommt es bei der 30-

<sup>41</sup>nur Brenner, keine Berücksichtigung des Wasserkreislaufs

minütigen Standheizphase zu einem Einspareffekt der APU gegenüber der herkömmlichen Standheizung.

Beim dritten Szenario wird durch die zusätzlichen elektrischen Heizmaßnahmen von einem elektrischen Leistungsbedarf von  $1500\text{ W}$  ausgegangen. Die APU kann hier ihre Vorteile deutlich ausspielen und es kommt zum größten Einspareffekt.

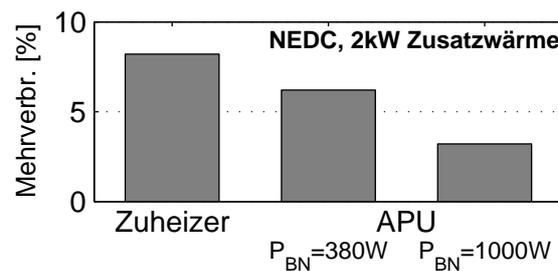


**Bild 4.25:** Vergleich des Einsparpotenzials verschiedener Integrationsmöglichkeiten einer APU im  $P$ - $t$ -Diagramm mit vorausgegangener 15-minütiger Standheizphase

In Bild 4.25 ist der zweite Einspareffekt einer Standheizungsphase per APU dargestellt. Durch eine 15-minütige Standheizphase vor der Fahrt, verschiebt sich die Kompensationsgrenze des APU-Startup-Verbrauchs bei kalter APU deutlich nach links gegenüber Bild 4.22. Bei einer 30-minütigen Standheizphase oder bei der betrachteten „Komfort“-Standheizung hat sich der APU-Startup-Verbrauch bereits während der Standheizphase amortisiert. Das heißt, mit Standheizphase lohnt sich eine APU bei nahezu jeder Fahrt, auch im kalten Zustand. Nur bei sehr geringen elektrischen Leistungen ist sie aufgrund des ungünstigen Arbeitspunktes ineffizienter als der Generator, abgesehen von der Betrachtung *Generator-Ersatz*, bei der das Generatorschleppmoment entfällt.

Wenn der Verbrennungsmotor zu wenig Abwärme für die Innenraumheizung produziert, wird während der Fahrt ein Zuheizter betrieben. Beim untersuchten Motor, einem 6-Zylinder Ottomotor, ist keine Zuheizung notwendig. Verwendet wird ein Zuheizter bei sehr verbrauchsarmen Motoren, oft bei Dieselmotoren, eventuell auch bei zukünftigen verbrauchsarmen Otto-Motoren, z.B. mit Direkteinspritzung. Besonders interessant wird ein Zuheizter, wenn der Verbrennungsmotor für längere Zeit abgeschaltet wird, z.B. bei langen MSA-Phasen oder bei Hybridfahrzeugen.

Das Einsparpotenzial beim Ersatz eines Kraftstoffzuheizers durch eine APU soll durch die Annahme einer konstanten zusätzlichen Wärmeproduktion von  $2\text{ kW}$  im *NEDC* untersucht werden. Der Zuheizter erhöht den Kraftstoffverbrauch im *NEDC* um  $8,2\%$ , siehe Bild 4.26. Bei der betriebsbereiten APU hängt der zusätzliche Kraftstoffverbrauch stark von der erzeugten elektrischen Leistung ab. Wird eine Leistung von  $380\text{ W}$  (= Grundverbrauch) erzeugt, erhöht sich der Gesamtkraftstoffverbrauch des Fahrzeugs um  $6,2\%$ . Bei einer elektrischen Leistung von  $1000\text{ W}$  tritt nur noch ein Mehrverbrauch von  $3,2\%$  für



**Bild 4.26:** Kraftstoffaufwand (Mehrverbrauch) für die Erzeugung von Zusatzwärme für die Innenraumheizung während der Fahrt im NEDC: Vergleich von Kraftstoffzuheizer und APU (APU betriebsbereit, Betrachtung von zwei elektrischen Verbraucherleistungen)

die Wärmeerzeugung auf, da aufgrund der höheren elektrischen Leistung mehr Abwärme erzeugt wird, die wiederum für die Innenraumheizung verwendet werden kann. Es liegt also durch die APU, im Vergleich zum Kraftstoffzuheizer, ein Einsparpotenzial von 2% bis 5% vor. An dieser Stelle wird besonders der Vorteil der Kraft-Wärme-Kopplung der APU deutlich.

#### 4.4.2 Abwärmenutzung zur Aggregatevorwärmung

Selbst wenn keine Wärme für die Erwärmung des Fahrgastraums benötigt wird, kann die APU-Abwärme genutzt werden. Wie bereits in Kapitel 2.3.1 beschrieben, kann die Abwärme zur Erwärmung des Verbrennungsmotors, des Getriebes oder des Hinterachsgetriebes verwendet werden. Dadurch erreichen die Aggregate schneller ihre Betriebstemperatur. Damit wird Kraftstoff eingespart, da bei kalten Aggregaten aufgrund höherer Reibung ein höherer Kraftstoffverbrauch vorliegt.

In den durchgeführten Verbrauchsmessungen auf dem Rollenprüfstand wurde im *NEDC* ein Verbrauchsunterschied zwischen kaltem und warmem Fahrzeug von 10% ermittelt. Dies ist das maximale Einsparpotenzial, das durch ein beschleunigtes Aufheizen des Fahrzeugs erreicht werden kann. Abschätzungen und Expertengespräche haben ergeben, dass Einsparungen von ca. 1% – 2% durch Nutzung der APU-Abwärme realistisch erreichbar sind. Eberspächer gibt in einer Werbebroschüre für Standheizungen an, dass „ein vorgewärmter Motor [] in der Startphase ca. 20% weniger Kraftstoff“ benötigt. Außerdem reduziert „eine Standheizung [] die Schadstoffemissionen beim Start um rund 60%.“ [58] Die für die Standheizung angegebenen Effekte sind auch für die APU zu erwarten, auch ohne Nutzung der APU-Wärme für die Innenraumheizung. Genauere Untersuchungen wurden nicht durchgeführt, da das verwendete Simulationsprogramm Cruise hierfür als nicht ausreichend angesehen wird <sup>42</sup>.

Bei sehr niedrigen Temperaturen sind höhere Einsparpotenziale zu erwarten. Eine Erhöhung der zugeführten Kraftstoffenergie zur Steigerung der APU-Wärme ist nicht sinnvoll. Es kann nie mehr Energie eingespart werden, als an anderer Stelle aufgebracht wird. Bei der Vorwärmung von Aggregaten ist nur die Nutzung von bestehender Abwärme sinnvoll.

<sup>42</sup>Betrachtungen über Zusatzmodule wie AVL BOOST oder Matlab-Dlls wären denkbar.

## 4.5 APU im Hybridfahrzeug

Ein Hybridfahrzeug nutzt die Vorteile der Rekuperation und der Motor-Stopp-Automatik. Durch größere Speicher und eine leistungsfähige E-Maschine werden die Vorteile sogar noch ausgebaut. Zusätzlich wird elektrisches Fahren ermöglicht. Durch das elektrische Fahren kommt es zu einem wesentlich höheren elektrischen Leistungsbedarf. Wie in den bisherigen Kapiteln zu sehen war, ist der Einsatz einer APU erst ab einem höheren Leistungsbedarf interessant. Insofern kann ein Hybridfahrzeug für den Einsatz einer APU zusätzliche Perspektiven eröffnen.

### 4.5.1 Systemübersicht

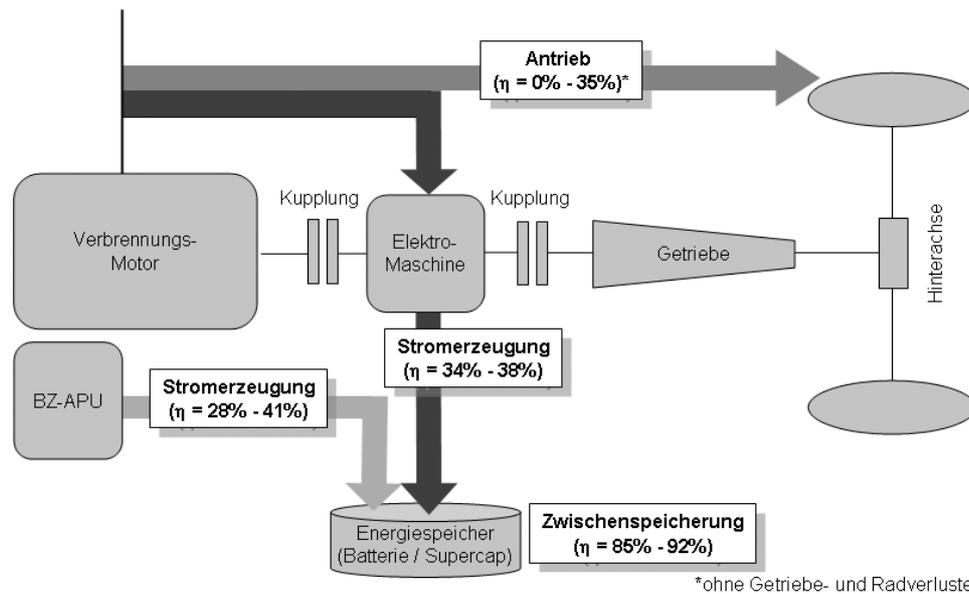
Im betrachteten Parallel-Hybridfahrzeug ist zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe eine Elektromaschine im Antriebsstrang platziert, siehe Bild 4.27. Die E-Maschine wird sowohl motorisch zum elektrischen Fahren, als auch generatorisch zur Stromerzeugung betrieben. Sie ist sowohl vom Verbrennungsmotor als auch vom Getriebe über je eine Kupplung trennbar. Die Kupplung zum Getriebe ist notwendig, damit der Verbrennungsmotor über die E-Maschine gestartet werden kann und damit der Verbrennungsmotor die E-Maschine zur Stromerzeugung antreiben kann, unabhängig vom Fahrzustand des Fahrzeugs. Über die zweite Kupplung kann der Verbrennungsmotor abgetrennt werden. Das hat den Vorteil, dass er sowohl beim elektrischen Fahren, als auch bei der Rekuperation nicht mitgeschleppt werden muss. Dadurch werden die Verlustmomente im Antriebsstrang reduziert.

Die Brennstoffzellen-APU ist über ein elektrisches Energiesystem mit der Elektromaschine und einem Energiespeicher verbunden. Die Einbindung erfolgt über einen DC/DC-Wandler.

Das Basisfahrzeug, ein BMW 530i, wird aus den vorhergehenden Rechnungen ohne Hybridfunktion übernommen. Dabei wird darauf verzichtet ein höheres Gewicht durch Hybridkomponenten anzunehmen, vor allem da nicht der Vergleich zu heutigen Fahrzeugen im Vordergrund steht, sondern das Potenzial einer APU im Hybridfahrzeug identifiziert werden soll.

Bei den folgenden Untersuchungen wird nur mit Leistungen und Wirkungsgraden gerechnet. Dies reicht aus, einen ersten Eindruck zu gewinnen, welchen Beitrag eine APU zu einem Hybridfahrzeug leisten kann. Der größte Vorteil dieser Einschränkungen liegt darin, dass so keine detaillierte Definition des Fahrzeugs mit Spannungsebenen und Bordnetzkonzepten notwendig ist. Der Nachteil einer fehlenden Genauigkeit wird durch den Vorteil der Allgemeingültigkeit und Nachvollziehbarkeit aufgewogen.

In Bild 4.27 sind die Hauptenergieflüsse bei laufendem Verbrennungsmotor eingezeichnet. Der Verbrennungsmotor treibt über den Antriebsstrang die Räder an der Hinterachse an. Die Antriebsleistung wird je nach Arbeitspunkt des Verbrennungsmotors und Fahrzustand mit einem Wirkungsgrad zwischen 0 % (Motorleerlauf) und ca. 35 % zur Verfügung gestellt. Ein Teil der Motorleistung wird über die E-Maschine in elektrische Leistung umgewandelt. Durch Multiplikation des differentiellen Wirkungsgrads des Verbrennungsmotors (ca. 40 % – 45 %) und des Wirkungsgrads der E-Maschine (Annahme 85 %) erhält man für die Stromerzeugung per E-Maschine einen Wirkungsgrad von 34 % – 38 %.

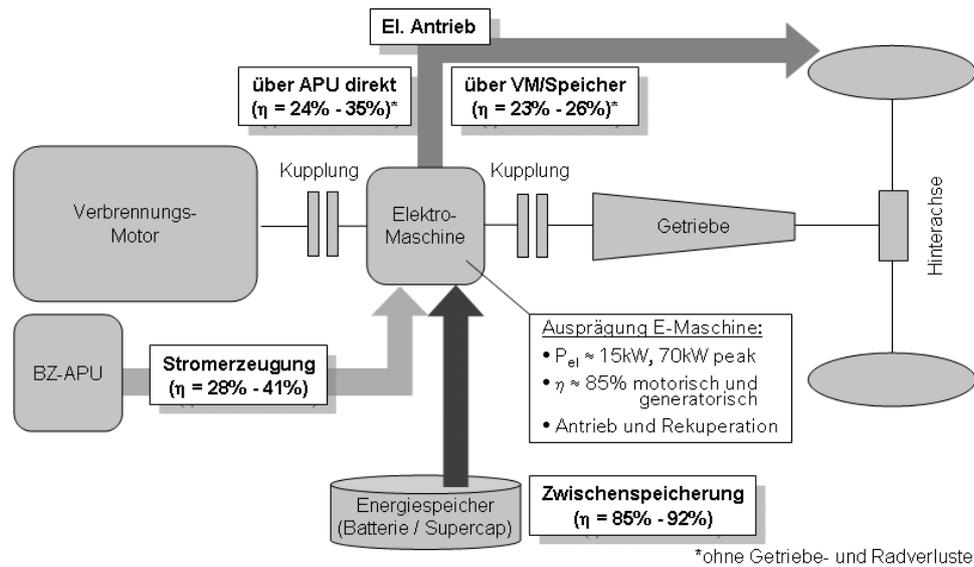


**Bild 4.27:** Energieflüsse im Hybridfahrzeug bei verbrennungsmotorischem Fahren

Eine alternative Stromerzeugung ist über die APU möglich. Inklusive DC/DC-Wandler wird ein Wirkungsgrad zwischen 0 % (APU-Leerlauf) und 41 % erzielt, vergleiche Kennfeld in Kapitel 2.2. Es wird davon ausgegangen, dass ein APU-Leerlauf durch eine intelligente Betriebsstrategie ausgeschlossen werden kann, so dass ein minimaler Wirkungsgrad von 28 % (= geringe Auslastung APU) angenommen wird.

Die erzeugte elektrische Energie wird direkt verbraucht oder im elektrischen Energiespeicher zwischengespeichert. Während die Zwischenspeicherung beim heutigen Fahrzeug energetisch keine große Rolle spielt, wird sie bei den Anwendungen Rekuperation und MSA immer wichtiger. Bei größeren elektrischen Fahranteilen wird der Motor für noch längere Zeiten abgeschaltet als bei der MSA-Funktion. Tendenziell verlängern sich beim Hybridfahrzeug die Zeiten mit stillstehendem Verbrennungsmotor, nicht zuletzt durch elektrische Fahranteile. Beim elektrischen Fahren wird zusätzlich ein hoher elektrischer Energiebedarf benötigt. Deshalb ist die Zwischenspeicherung im Hybridfahrzeug sehr bedeutend. Beim Energiespeicher werden sowohl Batterien mit einem angenommenen mittleren Gesamtwirkungsgrad (Laden + Entladen) von 85 % betrachtet, als auch Supercaps mit einem angenommenen mittleren Gesamtwirkungsgrad von 92 %. Beim Supercap wird aufgrund der geringen spezifischen Energiedichte von einer maximal verbaubaren Größe von 100 Wh nutzbarer Energieinhalt ausgegangen. Bei der Batterie werden hier keine Einschränkungen gemacht, solange die in den nachfolgenden Berechnungen ermittelte Sollgröße der Batterie keine unrealistischen Werte annimmt.

In Bild 4.28 ist der Energiefluss bei elektrischem Antrieb dargestellt. Der Verbrennungsmotor ist nun abgeschaltet und liefert keine Leistung mehr. Der Antrieb erfolgt allein über die E-Maschine. Die benötigte Leistung stammt aus dem elektrischen Speicher oder wird direkt von der APU erzeugt. Hier kann die APU ihren Vorteil des motorunabhängigen Betriebs zur Geltung bringen. Wird die Leistung aus dem Speicher bereitgestellt, beträgt der Gesamtwirkungsgrad des elektrischen Antriebs 23 % – 26 %, inklusive der vorherigen Erzeugung über den Verbrennungsmotor. Wenn die elektrische Energie direkt von der APU



**Bild 4.28:** Energieflüsse im Hybridfahrzeug bei elektrischem Fahren

erzeugt wird, kann ein höherer Wirkungsgrad von 24 % – 35 % für den elektrischen Antrieb erreicht werden. Der Gesamtwirkungsgrad bezieht sich hier immer auf Antriebsleistung zu Kraftstoffeinsatz.

In den Bildern 4.27 und 4.28 nicht dargestellt ist die Kombination von verbrennungsmotorischem Antrieb und elektrischem Antrieb. Dies kann z.B. zum Erreichen einer höheren Beschleunigung sinnvoll sein. Eine vierte Phase stellt die Rekuperation dar. Hier dreht sich der Energiefluss aus Bild 4.28 um. Es fließt Energie von der Hinterachse über die E-Maschine zum Speicher.

#### 4.5.2 Grenzpotenzial

Zur Bestimmung des Einsparpotenzials einer APU in Hybridfahrzeugen ist neben dem oben definierten Fahrzeugaufbau eine Betriebsstrategie notwendig. Beim Entwurf und der Diskussion verschiedener Betriebsstrategien hat sich gezeigt, dass Anforderungen aus unterschiedlichen Bereichen bestehen. Die ideale Betriebsstrategie muss unter der Berücksichtigung von Fahrkomfort, Kundenverhalten, heutigen und zukünftigen Gesetzesvorschriften, vor allem bezüglich Emissionen, und anderen Randbedingungen erstellt werden. Die Betriebsstrategie hat einen sehr großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Um eine größere Unabhängigkeit von der „gesamthaf optimalen“ Betriebsstrategie zu gewinnen, soll das Grenzpotenzial hinsichtlich Kraftstoffverbrauch einer APU ausgelotet werden. Dabei wird eine Betriebsstrategie gesucht, die ideal für einen minimalen Kraftstoffverbrauch ist. Dieser minimale Kraftstoffverbrauch stellt das Grenzpotenzial einer APU dar. Das Grenzpotenzial gibt eine Vorstellung, ob sich eine APU lohnt, ist jedoch im realen Fahrzeug nicht zu 100 % realisierbar.

Um einen minimalen Kraftstoffverbrauch zu erreichen, soll immer der Leistungspfad gewählt werden, der zu diesem Zeitpunkt den besten Wirkungsgrad aufweist. Wie in den Bildern 4.27 und 4.28 zu sehen ist, überschneiden sich die Wirkungsgradbereiche für die unterschiedlichen Antriebsvarianten teilweise:

- Verbrennungsmotorischer Antrieb: 0 % – 30 %
- Elektrischer Antrieb über Verbrennungsmotor / Speicher: 23 % – 26 %
- Elektrischer Antrieb über APU: 24 % – 35 %

Nun hat der elektrische Antrieb im *NEDC* fast immer einen besseren Wirkungsgrad als der direkte Antrieb über den Verbrennungsmotor. Nur kurze Zeit, bei hoher Auslastung, arbeitet der Verbrennungsmotor in einem günstigeren Wirkungsgradbereich. Allerdings ist es nicht möglich, nur über den elektrischen Antrieb zu fahren, da zumindest beim Fahrzeug ohne APU der elektrische Speicher von Zeit zu Zeit wieder aufgeladen werden muss. Deshalb werden bei den Untersuchungen noch folgende Randbedingungen festgelegt:

- Ausgeglichene Ladebilanz am Ende des Zyklus
- Berücksichtigung einer Leistungsgrenze der E-Maschine von 15 kW
- Festlegung von zwei festen APU-Größen: 1,5 kW und 3,0 kW

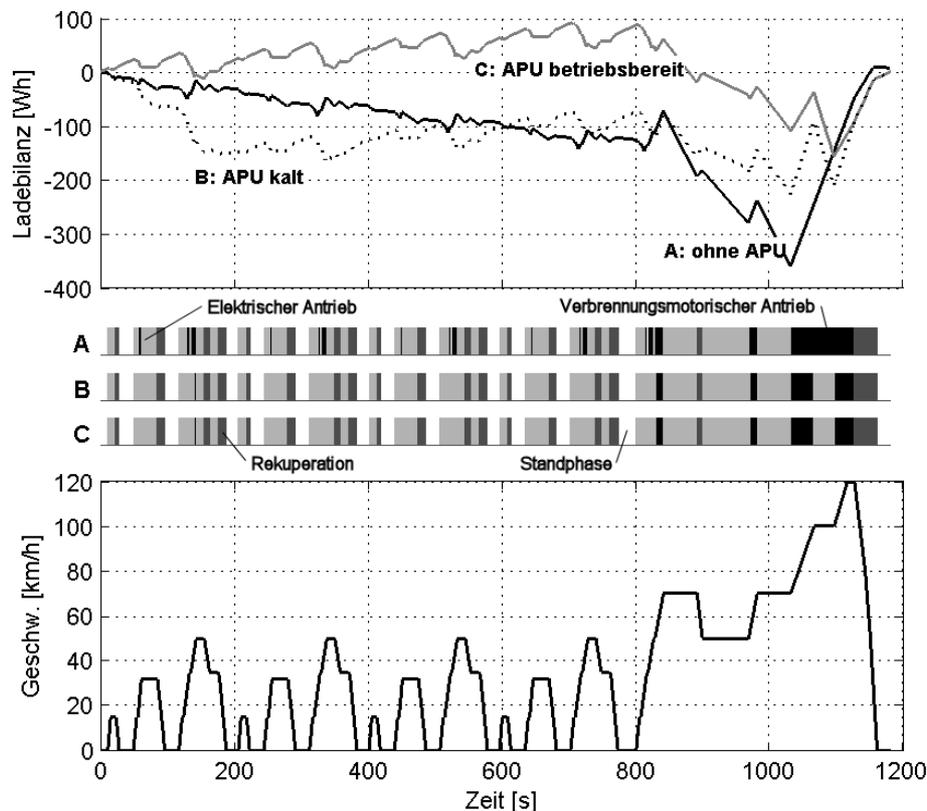
Da von einer relativ kleinen APU ausgegangen wird, reicht die von der APU erzeugte Energie nicht immer zur Abdeckung der elektrischen Leistungsanforderung aus. Während den verbrennungsmotorischen Fahrphasen kann jedoch zusätzlich durch die E-Maschine elektrische Energie erzeugt werden. Eine größere APU ist nicht sinnvoll, da dies zusätzliches Gewicht und einen höheren Startup-Verbrauch bedeuten würde.

In Bild 4.29 ist der Speicherverlauf im *NEDC* bei einer Hybridvariante mit und ohne APU beispielhaft dargestellt. In der Mitte sind für die drei Betrachtungen A, B und C die Phasen elektrisches Fahren, verbrennungsmotorisches Fahren, Rekuperation und Stand markiert. Mit APU hat das Fahrzeug mehr elektrische Fahranteile. Wenn die APU aus dem kalten Zustand gestartet werden muss, wird die elektrische Energie während der Startupzeit (200 s) aus dem Speicher entnommen. Der SoC nimmt in dieser Zeit stark ab. Durch eine höhere Beteiligung des Generators bei der Stromerzeugung kann aber auch in diesem Fall die Ladebilanz ausgeglichen werden.

In Bild 4.30 sind die Verbrauchseinsparungen für mehrere Hybridvarianten dargestellt. Die beiden ersten Balken zeigen das maximale Einsparpotenzial durch eine erweiterte MSA-Funktion und Rekuperation im *NEDC*. Bei der erweiterten MSA-Funktion wird nun der Verbrennungsmotor nicht nur im Stand, sondern auch in Phasen ohne Antriebsleistung (Bremsen und „Segeln“) abgeschaltet. Der Verbrennungsmotor wird in diesen Phasen ausgekuppelt.

Es werden sowohl Batterien, als auch Supercaps als Speicher betrachtet. Wohlgermerkt handelt es sich bei den Ergebnissen um Grenzpotenziale, die man so in der Praxis nicht erreichen wird, da Potenzial durch Zusatzgewicht, eine alltagstaugliche Umsetzung und andere Randbedingungen verloren geht. Trotzdem kann man anhand der Ergebnisse generelle Aussagen zum Potenzial einer APU in einem Hybrid-Fahrzeug treffen.

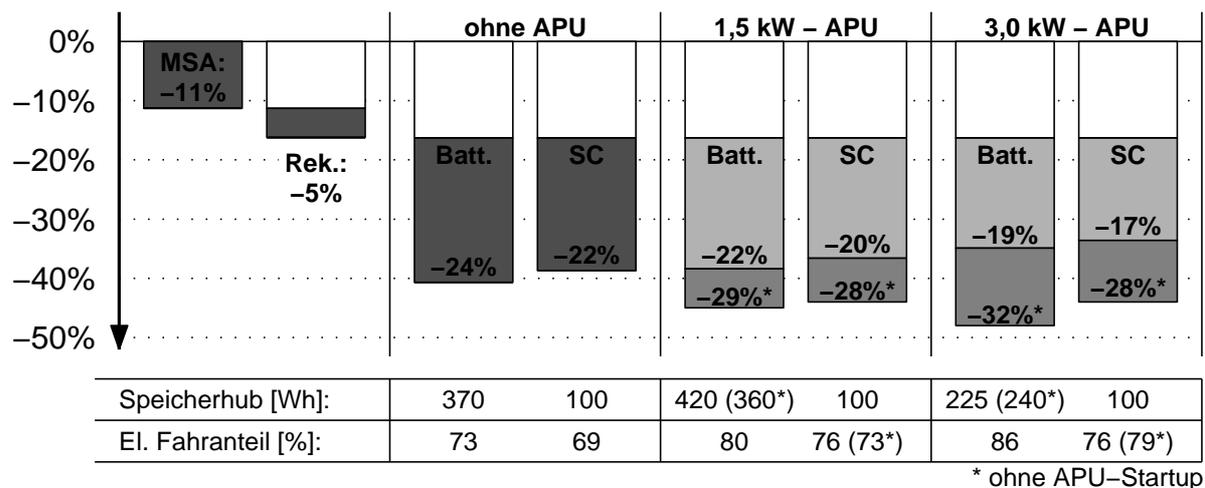
- Generell hat die APU leichte Verbrauchsvorteile aufgrund des höheren Wirkungsgrads.



**Bild 4.29:** Zeitlicher Verlauf von Ladebilanz, Fahrphasen und Geschwindigkeit bei einem Hybridfahrzeug mit Batterie im NEDC. Betrachtung von drei Varianten: A: ohne APU, B: APU bei Fahrtbeginn kalt, C: APU bei Fahrtbeginn betriebsbereit; APU-Größe: 3,0 kW; Energiespeicher: Batterie.

- Diese Verbrauchsvorteile werden jedoch wie bereits bei den bisherigen Untersuchungen zu einem großen Teil durch den Startup-Verbrauch der APU wieder aufgehoben.
- Wirkliche Vorteile kann die APU nur dann erzielen, wenn durch die APU wesentlich mehr elektrische Fahranteile erreicht werden, bzw. in Standphasen häufiger der Verbrennungsmotor abgeschaltet wird. Dies kann zum Beispiel im dichten Berufsverkehr mit vielen Stop-and-go-Phasen und niedrigem Geschwindigkeitsniveau der Fall sein. Hier wird nur eine geringe durchschnittliche Antriebsleistung benötigt. Im NEDC trifft dies nicht zu. Wie in Bild 4.29 zu sehen ist, kann auch ohne APU der elektrische Speicher immer wieder kurz aufgeladen werden. Ob diese Strategie des kurzen Einschaltens des Verbrennungsmotors im Serienfahrzeug realisierbar ist, muss sich zeigen. Allerdings zeigt Toyota mit dem Prius II und dem Lexus RX400h hier gute Lösungen.

In Bild 4.31 ist nochmal der große Einfluss des Startup-Verbrauchs auf das Einsparpotenzial einer APU dargestellt. Verglichen wird die Stromerzeugung einer E-Maschine mit Zwischenspeicherung in einer Batterie mit der Stromerzeugung über eine APU bei Nennleistung ohne Zwischenspeicherung. Dies stellt den maximal möglichen Einspareffekt der



**Bild 4.30:** Grenzpotenzial der Kraftstoffeinsparung mit einem Hybridfahrzeug mit teil-elektrischem Fahren im NEDC; Betrachtung von Batterie (Batt.) und Supercap (SC) als Energiespeicher

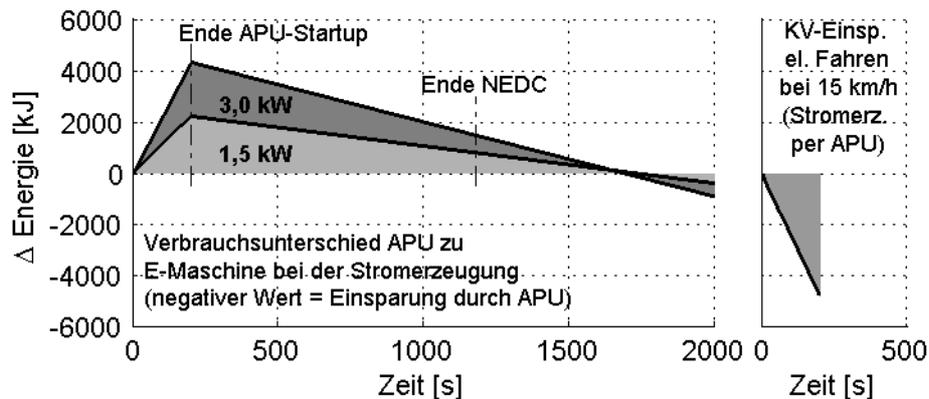
APU dar. Bis zum Ende des APU-Startups steigt der Mehrverbrauch der APU an. In dieser Zeit kann die APU keine elektrische Leistung erzeugen. Erst nach dem Startup führt die Stromerzeugung über die APU zu Energieeinsparungen aufgrund des besseren Wirkungsgrades. Allerdings sieht man in Bild 4.31, dass sowohl bei der 1,5 kW-APU, als auch bei der 3,0 kW-APU der Startup-Verbrauch erst nach ca. 1700 s kompensiert wird. Deshalb ist eine Kombination eines Hybridfahrzeugs mit einer APU zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs nur interessant, wenn ...

- ... eine längere Betriebsdauer vorliegt.
- ... der Startup-Verbrauch sinkt, z.B. bei häufiger Nutzung oder Vorklimatisierung.
- ... der elektrische Fahranteil durch die APU gesteigert werden kann.

Der große Effekt von mehr elektrischen Fahranteilen (bei geringer Geschwindigkeit) wird im rechten Fenster in Bild 4.31 deutlich. Dargestellt ist die Kraftstoffeinsparung durch elektrisches anstatt verbrennungsmotorisches Fahren bei 15 km/h, wobei die notwendige elektrische Energie von der APU erzeugt wird. Die Kraftstoffeinsparung beträgt in diesem Beispiel 2400 kJ pro 100 s. Im linken Bild kann die betriebsbereite APU im Vergleich zur E-Maschine bei der elektrischen Stromerzeugung (gleichbleibende elektrische Fahranteile) nur maximal 144 kJ pro 100 s (1,5 kW-APU) bzw. 288 kJ pro 100 s (3,0 kW-APU) einsparen. Das heißt, wenn eine Vermeidung des Teillastbetriebs des Verbrennungsmotors durch elektrisches Fahren durch die APU ermöglicht wird, steigt der energetische Nutzen der APU enorm.

### 4.5.3 Weitere Einflussfaktoren

In den bisherigen Betrachtungen nicht berücksichtigt sind folgende Vorteile einer APU:



**Bild 4.31:** Prinzipielle Darstellung der Einflüsse des APU-Startups und der Stromerzeugung per APU auf den Energieverbrauch sowie des Einsparpotenzials durch elektrisches Fahren bei 15 km/h: Es dauert relativ lange, bis der Startupverbrauch durch den besseren APU-Wirkungsgrad kompensiert werden kann. Eine schnellere Kompensation gelingt, wenn durch die APU zusätzliche elektrische Fahranteile möglich sind.

- Ein Hybridfahrzeug benötigt eine elektrische Klimaanlage, damit auch während elektrischen Fahrphasen klimatisiert werden kann. Dadurch steigt der elektrische Energiebedarf im Fahrzeug, auch während verbrennungsmotorischen Fahrphasen. Eine APU unterstützt die elektrische Energieversorgung. Die elektrischen Energiespeicher können eventuell kleiner ausgelegt werden, vor allem bei der Umsetzung einer Standklimatisierung, die theoretisch auch über die elektrischen Energiespeicher versorgt werden kann.
- Im Winter wird im Hybridfahrzeug ein Zuheizung benötigt. Bei einer APU kann die APU-Abwärme für die Zuheizung verwendet werden, so dass durch die Kraft-Wärmekopplung ein erhöhter Nutzungsgrad besteht.
- Bei niedrigen Temperaturen kann die Batterie mit APU besser geladen werden, da die Ladungsaufnahme von Batterien sinkt und mit APU eine gleichmäßigere Ladung der Batterie erfolgt. Ohne APU wird die Batterie nur während verbrennungsmotorischer Fahranteile geladen. Reicht diese Ladung nicht aus, müssen die elektrischen Fahranteile reduziert werden.
- Eine APU reduziert den Energiedurchsatz und Ladungshub der Speicher und kann so zu einer Erhöhung der Lebensdauer der Energiespeicher beitragen.
- Durch eine APU kann eine Betriebsstrategie freier und flexibler gestaltet werden. Z.B. kann der elektrische Speicher tiefer entladen werden, da bei unerwartet langer Standphase die APU als Energielieferant zur Verfügung steht. Ohne APU dürfte der Verbrennungsmotor in dieser Situation nicht abgeschaltet werden oder müsste während der Standphase automatisch gestartet werden, um ein weiteres Entladen der Batterie zu vermeiden. Aus Kundensicht sollte dies weitgehend vermieden werden.

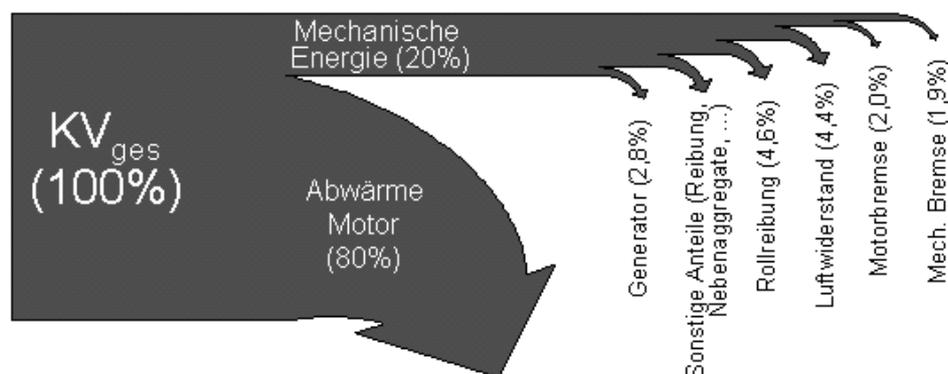
Zusammenfassend bietet die APU also vor allem eine interessante Möglichkeit ein Hybridfahrzeug alltagstauglicher und kundenfreundlicher zu gestalten. Je nach Fahrprofil kann sie zu einer Erhöhung der elektrischen Fahranteile führen. Ein zusätzlicher Beitrag zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs ist jedoch nur zu erwarten, wenn lange Betriebszeiten der APU vorliegen oder der Startup-Verbrauch deutlich reduziert werden kann.

## 4.6 Einflussanalyse

Bisher wurden die meisten Betrachtungen an einem konkreten Beispielfahrzeug durchgeführt. Dabei wurde immer nur auf den Verbrauchsunterschied zwischen Fahrzeugen mit und ohne APU eingegangen. In diesem Kapitel sollen zunächst die einzelnen Anteile am Kraftstoffverbrauch analysiert werden. Im zweiten Abschnitt wird die Auswirkung geänderter Randbedingungen und Annahmen untersucht. Ausgehend von der Höhe der Einflüsse kann eine Aussage getroffen werden, inwieweit die in den letzten Kapiteln ermittelten Ergebnisse auf andere Fahrzeuge übertragbar sind.

### 4.6.1 Anteile am Kraftstoffverbrauch

In Bild 4.32 ist in einem Sankeydiagramm die Aufteilung der Energieströme beim betrachteten Basisfahrzeug im *NEDC* dargestellt. Nur 20 % der eingesetzten Kraftstoffenergie ( $KV_{ges}$ ) werden vom Verbrennungsmotor in mechanische Energie umgewandelt. 2,8 % der Kraftstoffenergie werden vom Generator für die Stromerzeugung aufgenommen. Der größte Anteil der mechanischen Energie vom Motor dient zur Überwindung der Fahrwiderstände: Rollreibung 4,6 % und Luftwiderstand 4,4 %. Die Beschleunigungsarbeit, die auch zu den Fahrwiderständen zählt, taucht hier nicht auf. Sie liegt nur zwischenzeitlich als kinetische Energie vor. Beim Abbremsen wird sie zum größten Teil in Wärme an mechanischer Bremse und Motorbremse (Schleppmomentverluste) umgewandelt. Geringe Teile der kinetischen Energie werden am Generator in elektrische Energie umgewandelt. Dieser Anteil ist im Zweig „Generator“ enthalten. Der größte Anteil der Kraftstoffenergie entfällt auf die Abwärme im Motor. Sie wird durch die Wasserkühlung, durch das Abgas und zu geringen Anteilen durch Wärmeleitung und Konvektion abgeführt.

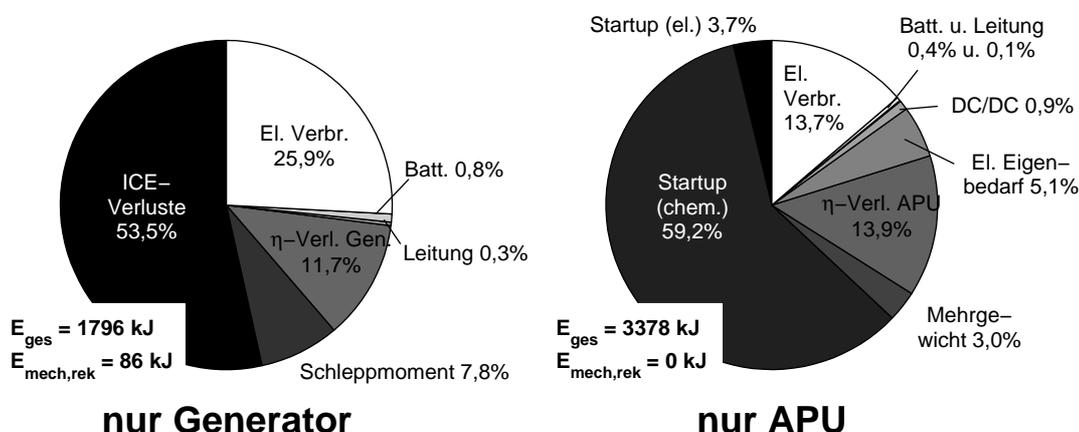


**Bild 4.32:** Sankey-Diagramm: Fahrzeug ohne APU im *NEDC* mit 560 W Stromerzeugung

Beim Einsatz einer APU ändert sich das Diagramm. Der Generatoranteil wird stark reduziert oder entfällt. Auch die Motorabwärme reduziert sich, da eine geringere Motorleistung benötigt wird. Außerdem verändern sich die Fahrwiderstände, aufgrund des zusätzlichen APU-Gewichts. Zudem ändern sich die Bremsverluste von Verbrennungsmotor und mechanischer Bremse, wenn mehr oder weniger Energie rekuperiert wird. Im folgenden soll anhand von vier Fahrzeugvarianten im *NEDC* dargestellt werden, welche (Verlust-) Anteile bei der Stromerzeugung bestehen. Die Größen sind auf den jeweiligen Gesamtkraftstoffverbrauch für die Stromerzeugung (= 100 %) normiert. Alle Ergebnisse entstammen Simulationen, wobei die Energieanteile durch „virtuelle Sensoren“ und Subtraktion verschiedener Simulationsläufe ermittelt wurden. Als „virtueller Sensor“ wurde z.B. ein Momentensensor am Generator zur Ermittlung des Schleppmoments bei entregtem Generator eingefügt. Der Einfluss des APU-Mehrgewichts wurde z.B. durch die Subtraktion des Kraftstoffverbrauchs eines Fahrzeugs mit und ohne APU, jeweils ohne Stromerzeugung, bestimmt. Ein Vergleich des Gesamtkraftstoffverbrauchs der vier betrachteten Szenarien untereinander befindet sich in Bild 4.17, Kapitel 4.2.3.

#### Fahrzeugvariante „nur Generator“

Das Tortendiagramm in Bild 4.33 (links) zeigt die Bestandteile des für die Stromerzeugung zusätzlich aufgewendeten Kraftstoffs beim heutigen Fahrzeug mit Generator ohne APU. Die Nutzleistung (*El. Verbr.*) beträgt ca. 1/4 des Gesamtkraftstoffverbrauchs für die Stromerzeugung. Die Speicher- und Leitungsverluste spielen nur eine untergeordnete Rolle, 0,8 % und 0,3 % vom Gesamtaufwand der Stromerzeugung. Einen großen Anteil stellt der Wirkungsgradverlust des Generators ( $\eta$ -Verl. Gen.) bei der Stromerzeugung dar. Im Durchschnitt beträgt der Generatorwirkungsgrad nur 58 %. In diesem Betrag enthalten sind die Schleppmomentverluste des Generators. Diese fallen auch bei entregtem Generator aufgrund Reibungs- und Lüfterverlusten an und sind deshalb im Diagramm separat ausgewiesen. In Bezug zum Gesamtkraftstoffverbrauch zur Stromerzeugung betragen die Schleppmomentverluste 7,8 %. Noch nicht berücksichtigt ist dabei der Wirkungsgradverlust des Verbrennungsmotors (*ICE-Verluste*). Hier fällt der größte Energieanteil in Höhe von 53,5 % bei der Stromerzeugung per Generator ab. Dieser Verlust entsteht durch die



**Bild 4.33:** Zusammensetzung des Kraftstoffverbrauchs für die Stromerzeugung bei verschiedenen Fahrzeugvarianten im *NEDC* - ohne aktive Rekuperation

zusätzliche mechanische Leistung, die für den Antrieb des Generators aufgebracht werden muss. Ein kleiner Teil der mechanischen Leistung am Generator wird durch die Umwandlung von kinetischer Energie (Rekuperation von Bremsenergie) bereitgestellt ( $P_{mech,rek}$ ). Da in diesem Fall keine aktive Rekuperation vorliegt, ist der Betrag relativ klein. Die Energie in Höhe von  $86\text{ kJ}$  entspricht einem Betrag von  $4,8\%$  vom Gesamtaufwand für die Stromerzeugung  $E_{ges}$ . Das Verhältnis von mechanischer Energie ( $100,0\% - 53,5\%$ ) zu Kraftstoffenergie ( $100,0\%$ ) beträgt  $46,5\%$ . Dieser Wert entsteht durch einen differentiellen Wirkungsgrads des Verbrennungsmotors von  $41,7\%$ , vergleiche Kapitel 2.1.2, in Kombination mit der rekuperierten mechanischen Energie in Höhe von  $4,8\%$ .

#### Fahrzeugvariante „nur APU“

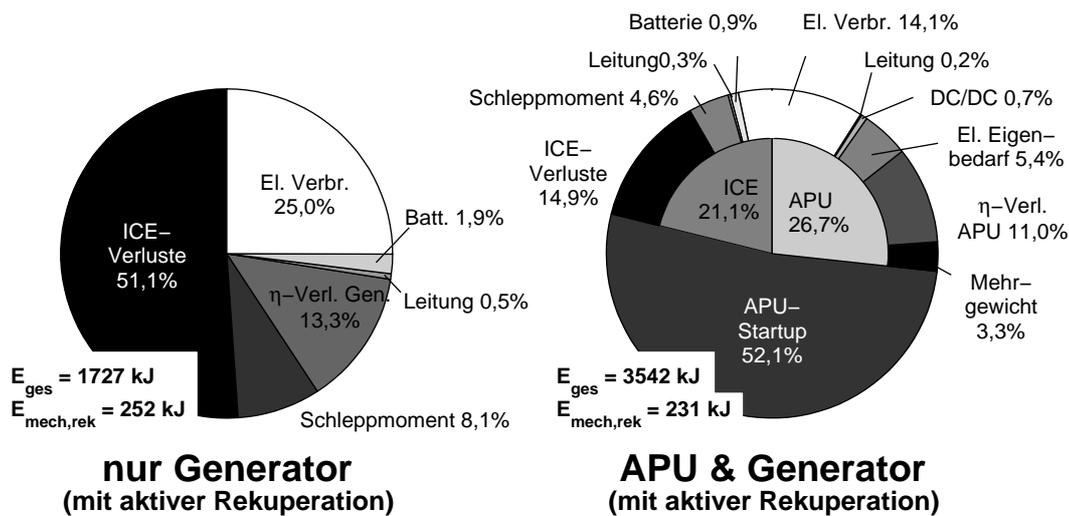
Beim zweiten Tortendiagramm, Bild 4.33 (rechts), ersetzt die APU den Generator. Es fällt sofort auf, dass der Startup-Verbrauch über  $60\%$  (*chem. + el.*) des Kraftstoffverbrauchs für die Stromerzeugung ausmacht. Dabei spielt vor allem der direkte Kraftstoffverbrauch (*Startup chem.*) eine große Rolle. Zusätzlich benötigt die APU während des Startups elektrische Energie (*Startup el.*). Dieser Anteil ist zwar wesentlich kleiner als der direkte Kraftstoffverbrauch, beträgt aber auch  $3,7\%$ . Die eigentliche Nutzleistung (*El. Verbr.*) beträgt bei voller Berücksichtigung des Startupverbrauchs nur  $13,7\%$  des Gesamtenergieaufwands für die Stromerzeugung. Die Speicherverluste der Fahrzeugbatterie ( $0,4\%$ ), die Leitungsverluste ( $0,1\%$ ) und die Wandlerverluste des DC/DC-Wandlers ( $0,9\%$ ) sind relativ klein. Deutlicher ins Gewicht fällt der relativ hohe elektrische Eigenbedarf der APU im Betrieb ( $5,1\%$ ). Die Wirkungsgradverluste der APU zur Bruttostromerzeugung (vor Abzug des elektrischen Eigenbedarfs) betragen  $13,9\%$  ( $\eta$ -Verl. APU). Unter Berücksichtigung der Wandlerverluste, des elektrischen Eigenbedarfs und des Wirkungsgrades bei der Stromerzeugung kann für die APU im Betrieb ein Wirkungsgrad von  $42\%$  ermittelt werden. Dies entspricht der zugrundeliegenden Wirkungsgradkennlinie aus Bild 2.21 in Kapitel 2.2.3. Das angenommene Mehrgewicht der APU in Höhe von  $20\text{ kg}$  führt zu einem Anteil von  $3,0\%$  am Kraftstoffverbrauch für die Stromerzeugung.

#### Fahrzeugvariante „nur Generator - mit aktiver Rekuperation“

Die Zusammensetzung des Energieaufwands für die Stromerzeugung per „Generator mit aktiver Rekuperation“ ist im linken Diagramm in Bild 4.34 dargestellt. Der Unterschied zur Fahrzeugvariante „nur Generator“ in Bild 4.33 besteht darin, dass eine geänderte Betriebsstrategie vorliegt, eine aktive Rekuperation. Der Gesamtkraftstoffverbrauch nimmt etwas ab. Die Batterie wird aufgrund der häufigen Zwischenspeicherung von Energie mehr genutzt. Dadurch liegt hier ein höherer Energieverlust vor, der jedoch im Vergleich zu den Verlusten am Generator und am Verbrennungsmotor gering ist. Die rekuperierte mechanische Energie entspricht nun  $14,6\%$  des Betrags des Kraftstoffverbrauchs für die Stromerzeugung. Die größten Verlustanteile sind wieder die Verluste im Verbrennungsmotor, die Schleppmomentverluste des Generators sowie die Wirkungsgradverluste im Generator.

#### Fahrzeugvariante „APU & Generator - mit aktiver Rekuperation“

Die Kombination von APU und Generator erscheint besonders interessant, da so der gute Wirkungsgrad der APU mit dem Rekuperationspotenzial des Generators kombiniert werden kann. Allerdings wurde bereits in Bild 4.17 in Kapitel 4.2.3 ersichtlich, dass dies



**Bild 4.34:** Zusammensetzung des Kraftstoffverbrauchs für die Stromerzeugung bei verschiedenen Fahrzeugvarianten im NEDC - mit aktiver Rekuperation

nicht zwangsläufig zu einer Kraftstoffeinsparung führt. Im rechten Diagramm in Bild 4.34 wird der Grund deutlich. Zum einen hat bei kalter APU immer noch der APU-Startup-Verbrauch einen dominanten Anteil am Kraftstoffverbrauch. Zum anderen haben sowohl APU als auch Generator Grundverbräuche, die unabhängig von der Höhe der Stromerzeugung sind: Mehrgewicht, elektrischer Eigenbedarf und Schleppmomentverluste. Die rekuperierte mechanische Energie ist fast gleich der Energie im linken Diagramm ohne APU. Die Abnahme beträgt nur 8% bezogen auf die rekuperierte Energie im linken Diagramm, hervorgerufen durch den notwendigen Umschaltvorgang von APU- auf Generator-Stromerzeugung.

Die vier diskutierten Tortendiagramme verdeutlichen, welche Einflüsse auf den Kraftstoffverbrauch der Stromerzeugung einwirken. Sie dienen als Beispiele und geben eine Größenordnung der Bestandteile am Kraftstoffverbrauch an. Allerdings ändern sich die Anteile mit geänderten Randbedingungen. So sinkt z.B. der Einfluss des Mehrgewichts, wenn die Höhe der elektrischen Verbraucher zunimmt. Der Einfluss steigt, wenn das Mehrgewicht sich erhöht. Im nächsten Abschnitt wird untersucht, wie sich der Kraftstoffverbrauch bei geänderten Randbedingungen verhält. Dabei werden vor allem die Bestandteile betrachtet, bei denen ein bedeutender Anteil am Kraftstoffverbrauch für die Stromerzeugung festgestellt wurde.

#### 4.6.2 Auswirkungen geänderter Randbedingungen und Annahmen

Ausgehend vom Basisfahrzeug sollen die Auswirkungen von geänderten Randbedingungen und Annahmen im NEDC untersucht werden. Die bedeutendsten Einflussgrößen auf den Verbrauchsunterschied zwischen APU und Generator wurden in den Ergebnissen in Kapitel 4.1 bis 4.5 bereits dargestellt:

- Fahrzyklus und Betriebsdauer der APU
- Höhe der elektrischen Nutzleistung

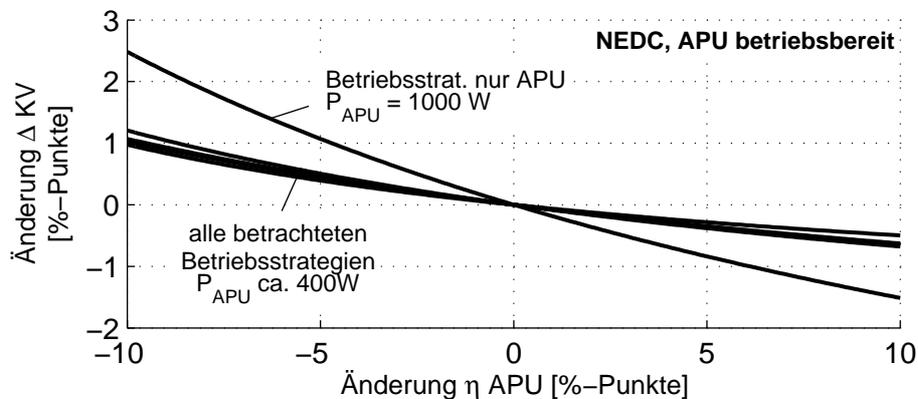
- Art der Fahrzeugintegration und Betriebsstrategie

Es gibt jedoch noch weitere Größen, die sich auf den Kraftstoffverbrauch auswirken. Die folgenden Zahlen und Diagramme beziehen sich alle auf den *NEDC*.

### APU-Größen

#### APU-Gesamtwirkungsgrad

Der Wirkungsgrad der APU spielt eine bedeutende Rolle. Eine Änderung des Gesamtwirkungsgrads (inklusive elektrischer Eigenbedarf und DC/DC-Wandler) um  $\pm 1$  %-Punkt ruft im *NEDC* eine Veränderung des Kraftstoffverbrauchs von  $\mp 0,08$  %-Punkten hervor (APU betriebsbereit,  $P_{APU}$  ca. 400 W). Der Wert ist auf den Gesamtkraftstoffverbrauch bezogen. Bezieht man den Wert auf den Kraftstoffverbrauch zur Stromerzeugung, erhält man eine Veränderung von ca.  $\mp 2$  %-Punkten. Mit zunehmender elektrischer Leistung steigt der Wert näherungsweise linear an. In Bild 4.35 ist die Veränderung des Gesamtkraftstoffverbrauchs über der Änderung des APU-Wirkungsgrads im *NEDC* dargestellt. Es sind alle untersuchten Betriebsstrategien eingezeichnet. Die Linien liegen dicht beieinander, da die von der APU erzeugte elektrische Energie bei allen Betriebsstrategien auf dem gleichen Niveau liegt. Zusätzlich ist eine Linie mit einer höheren elektrischen Leistung eingezeichnet. Hier wird der große Einfluss der Leistung deutlich.



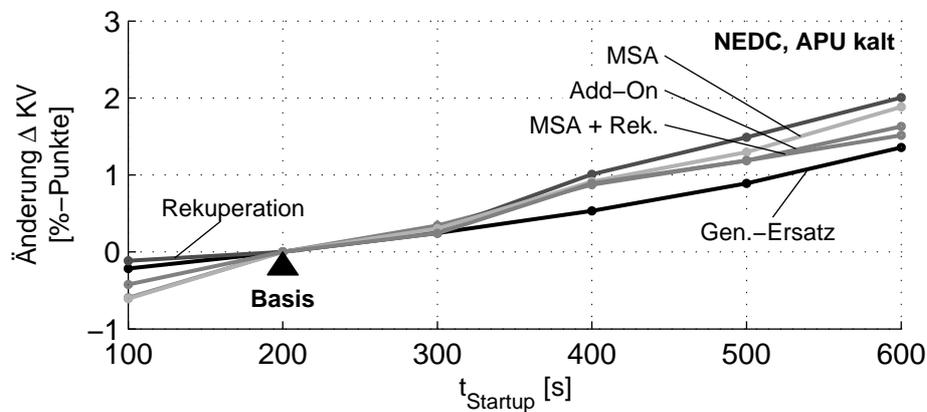
**Bild 4.35:** Auswirkung von Änderungen des APU-Wirkungsgrads auf den Kraftstoffverbrauchsunterschied zwischen einem Fahrzeug mit und ohne APU

#### APU-Startup

Der Startup-Verbrauch der APU wird durch die drei Kenngrößen *direkter Kraftstoffverbrauch*, *elektrischer Energiebedarf* und *Startupzeit* gekennzeichnet.

- Der *direkte Kraftstoffverbrauch* spielt die größte Rolle. Eine Halbierung dieses Betrags führt dazu, dass im *NEDC* der Kraftstoffverbrauch um 3 % sinkt. Genauso würde jedoch ein um 50 % erhöhter Startup-Verbrauch zu 3 % zusätzlichem Verbrauch im *NEDC* führen.

- Der *elektrische Energiebedarf* der APU während dem Startup ist nicht zu vernachlässigen. Allerdings spielt er eine wesentlich geringere Rolle als der direkte Startup-Verbrauch. Eine Änderung des elektrischen Energiebedarfs um  $\pm 100\text{ W}$  bei gleichbleibender Startupzeit würde zu einer Änderung des Kraftstoffverbrauchs im *NEDC* von  $\pm 0,14\%$  bis  $\pm 0,20\%$  führen, je nach Betriebsstrategie.
- Verlängert sich die *Startupzeit*, führt dies zu zwei Effekten. Erstens wird sich die elektrische Startup-Leistung der APU aufgrund konstanter Grundverbraucher nicht wesentlich reduzieren. Dies führt zu einem erhöhten elektrischen Energiebedarf während des Startups ( $E = P \cdot t$ ). Zweitens wird erst zu einem späteren Zeitpunkt durch die APU Strom erzeugt. Während des APU-Startups kann die Stromerzeugung sowohl über den Generator als auch aus der Batterie erfolgen. Energetisch ist es trotz Speicherverlusten geringfügig günstiger, die Energie aus der Batterie zu entnehmen und später die Batterie über die APU wieder zu laden.



**Bild 4.36:** Auswirkung der Startupzeit der APU auf den Kraftstoffverbrauch des Gesamtfahrzeugs im *NEDC*, Betrachtung verschiedener Betriebsstrategien

In Bild 4.36 ist der Einfluss der Startupzeit auf das Einsparpotenzial der APU dargestellt. Die elektrische Startupleistung wurde in den Untersuchungen konstant gehalten, so dass beide oben genannten Effekte auftreten. Der direkte Kraftstoffverbrauch des APU-Startups wurde nicht verändert. Man sieht, dass die Startupzeit durchaus eine große Rolle spielt. Im Diagramm sind alle untersuchten Betriebsstrategien dargestellt. In erster Linie führt bei einer längeren Startupzeit der erhöhte elektrische Energiebedarf zu einer Abnahme des APU-Potenzials. Im *NEDC* kann dies bei einer Startupzeit von  $10\text{ min}$  bis zu  $2\%$ -Punkte betragen. Der Startup zieht sich in diesem Fall über die Hälfte des kompletten Zyklus und die APU kann nur noch für  $10\text{ min}$  ihren höheren Wirkungsgrad ausspielen.

Zwischen den Betriebsstrategien gibt es nur geringe Abweichungen. Bei der *Rekuperationsstrategie* bringt eine Verkürzung der Startupzeit am wenigsten, da hier in den ersten Zyklusminuten die Batterie aktiv entladen wird. Beim *Generator-Ersatz* ist die geringste Auswirkung einer längeren Startupzeit festzustellen, da hier der komplette elektrische Bordnetzbedarf während der Startupzeit zunächst aus der Batterie entnommen wird und später wieder durch die APU erzeugt wird. Bei den anderen Betriebsstrategien

wird die Stromerzeugung während des Startups zumindestens zum Teil vom Generator übernommen.

### Mehrgewicht

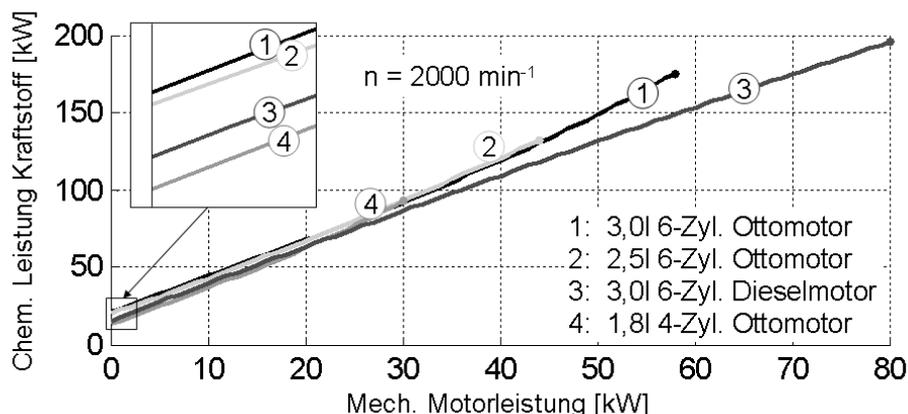
Das APU-Gewicht wurde in allen Berechnungen, außer bei den Hybridfahrzeugbetrachtungen, mit berücksichtigt. Beim Hybridfahrzeug wurde davon ausgegangen, dass das APU-Gewicht durch Gewichtseinsparung, z.B. bei den Speichern, kompensiert werden kann. Generell ist die Abschätzung des Mehrgewichts nur eingeschränkt möglich, auch dadurch bedingt, dass ein großer Anteil des Mehrgewichts von der Fahrzeugintegration abhängt.

Der Einfluss von Gewichtsänderungen auf den Kraftstoffverbrauch wurde bereits in Kapitel 3.2 bei der Abschätzung des Kraftstoffverbrauchs dargestellt. Vereinfacht kann im *NEDC* von einem Mehrverbrauch von  $0,137 \frac{l}{100 km \cdot 100 kg}$  oder ca. 0,013% pro *kg* Zusatzgewicht ausgegangen werden.

### Verbrennungsmotor

Die Größe des Verbrennungsmotors spielt nur im Stand und bei Motorabschaltstrategien eine wichtige Rolle. Bei der Stromerzeugung im Stand wurde in Kapitel 4.1 der Leerlaufverbrauch des Verbrennungsmotors der Stromerzeugung zugerechnet. Da ein größerer Motor in der Regel einen höheren Leerlaufverbrauch hat, sinkt im Stand der Gesamtwirkungsgrad für die Stromerzeugung per Generator. Das heißt, die APU hat im Stand bei größeren Motoren einen höheren Verbrauchsvorteil. Das selbe gilt, wenn durch die APU längere MSA-Phasen oder mehr elektrische Fahranteile beim Hybridfahrzeug möglich sind.

Der differenzielle Wirkungsgrad, siehe Kapitel 2.1.2, ist nahezu unabhängig von der Motorgroße. Auch der Motorentyp (Otto- oder Dieselpromess) hat keinen großen Einfluss auf das Einsparpotenzial einer APU. Dieselmotoren zeichnen sich gegenüber Ottomotoren durch bessere Wirkungsgrade im Teillastbereich aus. Der Grund für den besseren Wirkungsgrad liegt vor allem im geringeren Leerlaufverbrauch (bei gleichem Hubraum). Der differenzielle Wirkungsgrad weicht nur geringfügig vom Ottomotor ab.



**Bild 4.37:** Vergleich der Willanslinien verschiedener Verbrennungsmotoren (Otto/Diesel, unterschiedliche Hubräume) bei einer konstanten Drehzahl

In Bild 4.37 ist die im Kraftstoff gebundene chemische Leistung über der mechanischen Motorleistung für vier Motoren bei einer konstanten Drehzahl ( $2000 \text{ min}^{-1}$ ) eingezeichnet. Man sieht, dass die Linien im unteren Leistungsbereich (= häufigster Arbeitsbereich) nahezu parallel verlaufen. Das heißt, der differenzielle Wirkungsgrad ist in diesem Bereich bei allen dargestellten Motoren ähnlich. Er liegt bei 40 % – 42 % bei den Ottomotoren. Beim Dieselmotor liegt der differenzielle Wirkungsgrad um 2 – 3 %-Punkte höher. Der Schnittpunkt der Linien mit der y-Achse kennzeichnet den Leerlaufverbrauch der einzelnen Motoren. Den geringsten Leerlaufverbrauch hat der 1,8l-Ottomotor. Der 3,0l-Dieselmotor liegt zwar über dem 1,8l-Ottomotor, jedoch deutlich unter dem 3,0l-Ottomotor. Was in dem Bild noch gut erkennbar ist, ist die unterschiedliche maximale mechanische Leistung der Motoren bei  $2000 \text{ min}^{-1}$  (Ende der Linien). Hier zeigt sich der Vorteil des Dieselmotors, der bereits bei niedrigen Drehzahlen hohe Momente und damit auch hohe Leistungen aufweist.

Das Fazit ist, dass die Ergebnisse aus Kapitel 4.2 bis 4.5 weitgehend auf andere Motoren übertragbar sind, solange mit und ohne APU die selbe Betriebsdauer des Motors vorliegt. Bei Dieselmotoren wird das Einsparpotenzial der APU etwas niedriger ausfallen. Wenn durch die APU der Verbrennungsmotor abgeschaltet werden kann, z.B. bei einer elektrischen Standklimatisierung, darf das Ergebnis nicht auf andere Motoren übertragen werden. Ebenfalls kritisch ist, wenn der Verbrennungsmotor bei sehr hohen Leistungen betrieben wird. Auch dann werden bei unterschiedlich großen Motoren unterschiedliche Ergebnisse auftreten, da bei kleineren Motoren der lineare Bereich in Bild 4.37 früher verlassen wird.

### Fahrleistungen

Bisher noch nicht berücksichtigt wurde, dass die APU auch Auswirkungen auf die Fahrleistungen hat. Die Fahrleistungen eines Fahrzeugs werden durch Kenngrößen wie die minimale Beschleunigungsdauer von 0 auf  $100 \text{ km/h}$ , die minimale Beschleunigungsdauer von  $80$  auf  $120 \text{ km/h}$  (Elastizität) oder die Maximalgeschwindigkeit beschrieben.

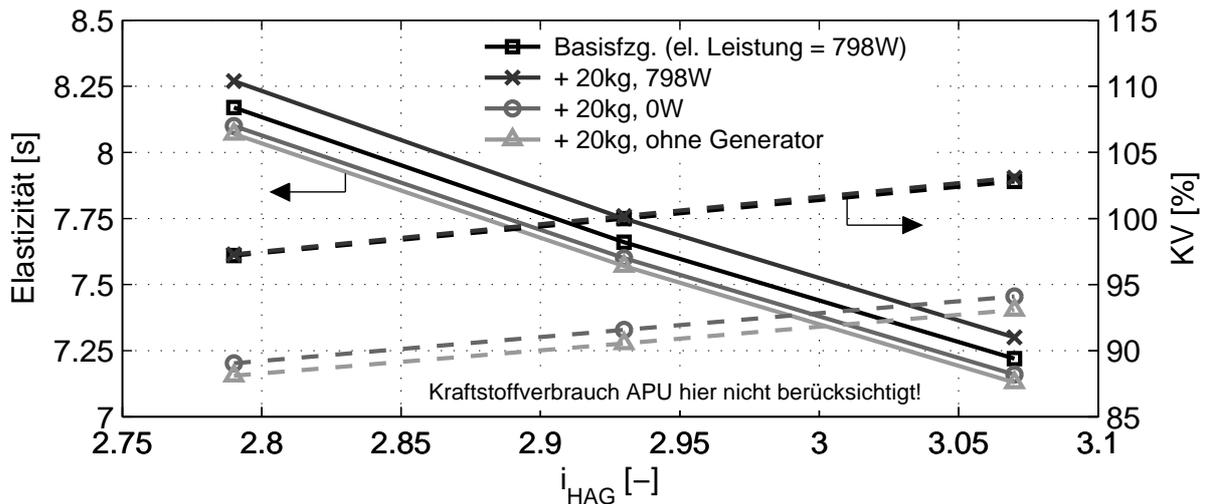
Prinzipiell stellen Fahrleistungen und Kraftstoffverbrauch zwei gegensätzliche Optimierungsziele dar. Um einen niedrigen Kraftstoffverbrauch zu erreichen, ist ein niedriges Drehzahlniveau günstig, sprich eine lange (hohe) Getriebeübersetzung. Ein agiles Fahrverhalten erreicht man durch eine kurze (niedrige) Getriebeübersetzung, da so bei höheren Drehzahlen im allgemeinen eine höhere Drehmomentenreserve des Motors vorliegt. Je nach Gewichtung der Ziele wird ein Kompromiss festgelegt, der zu einer entsprechenden Getriebeübersetzung führt.

Durch die APU erhöht sich das Fahrzeuggewicht. Dadurch sinken die Fahrleistungen, da mehr Leistung zur Überwindung der Fahrwiderstände aufgebracht werden muss und dadurch bei gegebener Drehzahl die Drehmomentenreserve abnimmt. Um diesen Effekt auszugleichen, kann die Getriebeübersetzung nach unten angepasst werden. Eine geänderte Übersetzung bedeutet jedoch eine Anhebung des Drehzahlniveaus und damit eine Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs.

Allerdings hat die APU auch einen positiven Einfluss auf die Fahrleistungen. Da sie den Generator entlastet, wird auch der Verbrennungsmotor entlastet. Dadurch steht mehr Leistung für den Antrieb zur Verfügung. Auch dieser Effekt kann durch eine Anpassung der Getriebeübersetzung, hier eine Vergrößerung der Übersetzung, ausgeglichen werden.

Gleichzeitig wird das Drehzahlniveau des Verbrennungsmotors herabgesetzt und damit der Kraftstoffverbrauch reduziert.

Nun ist die Frage, wie groß die Auswirkungen der beiden oben beschriebenen Effekte der APU sind und welcher Effekt überwiegt. Dazu werden die Fahrleistungen und der Kraftstoffverbrauch bei verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen und variiertes Hinterachsübersetzung simuliert. Das Ergebnis ist in Bild 4.38 dargestellt.

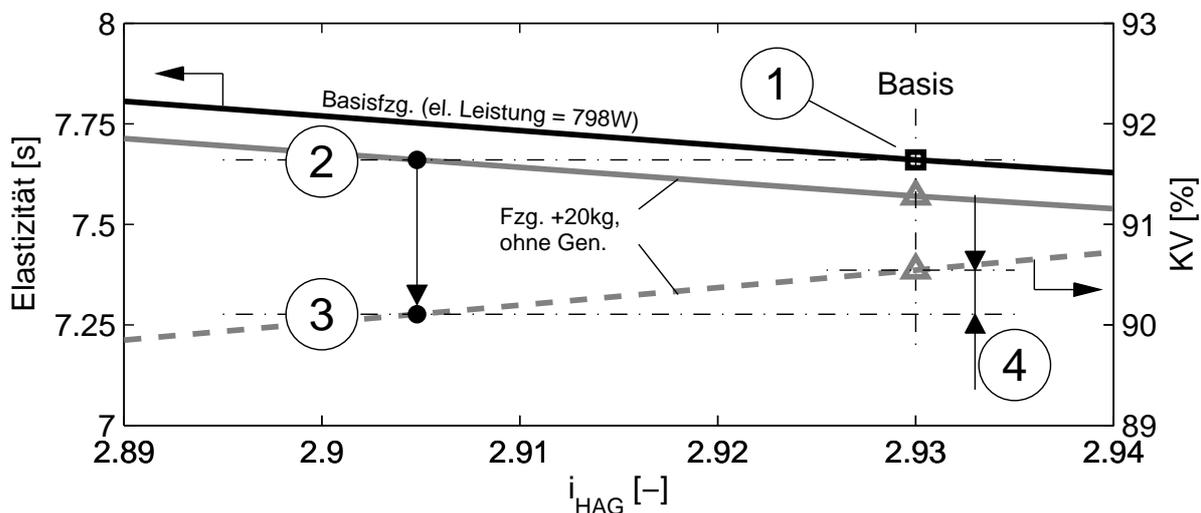


**Bild 4.38:** Auswirkung einer variierten Hinterachsgetriebeübersetzung auf die Elastizität von 80 auf 120 km/h im 4. Gang und auf den Kraftstoffverbrauch

Die Übersetzung des Hinterachsgetriebes  $i_{HAG}$  ist folgendermaßen definiert:  $i_{HAG} = \frac{n_{Antrieb}}{n_{Abtrieb}}$  mit  $n_{Abtrieb} = n_{Rad}$ . Die Gesamtübersetzung setzt sich aus der Übersetzung des Hauptgetriebes und des Hinterachsgetriebes zusammen. Mit abnehmender Hinterachsgetriebeübersetzung nimmt die Gesamtübersetzung zu und umgekehrt. In Bild 4.38 ist zu erkennen, dass eine Gewichtszunahme von 20 kg gegenüber dem Basisfahrzeug eine deutliche Verschlechterung der Elastizität zur Folge hat. Auf den Kraftstoffverbrauch hat das zusätzliche Gewicht nur eine geringe Auswirkung. Wird der Generator entlastet, verbessern sich die Fahrleistungen deutlich. Die durch das Zusatzgewicht hervorgerufene Verschlechterung wird mehr als kompensiert. Der Kraftstoffverbrauch verringert sich. Allerdings ist in Bild 4.38 der Kraftstoffverbrauch der APU nicht berücksichtigt. Er spielt für den Ausgleich der Fahrleistung aber auch keine Rolle. Die beste Fahrleistung besteht bei komplettem Entfall des Generators, da in diesem Fall zusätzlich das Leerlaufschleppmoment des Generators entfällt.

Theoretisch kann nun der Fahrleistungsunterschied eines Fahrzeugs mit und ohne Generatorstromerzeugung ausgeglichen werden, indem die Übersetzung des Hinterachsgetriebes angepasst wird. Eine Anpassung der Übersetzung des normalen Getriebes ist nicht sinnvoll, da hier mehrere Übersetzungsstufen angepasst werden müssten. In Bild 4.39 ist der Ausgleich des Fahrleistungsunterschieds durch Anpassung der Übersetzung dargestellt. Punkt 1 kennzeichnet die Ausgangsübersetzung (2,93) und das Ausgangsniveau der Elastizität. Dieses Ausgangsniveau der Elastizität schneidet in Punkt 2 die graue Kurve des Fahrzeugs ohne Generator mit Zusatzgewicht. Das heißt, die Übersetzung des Hinterachsgetriebes muss auf den Wert 2,905 geändert werden, um eine gleichbleibende Elastizität

des Fahrzeugs im 4. Gang zu erhalten. Punkt 3 kennzeichnet den Schnittpunkt der angepassten Hinterachsgetriebeübersetzung mit der Kurve des Kraftstoffverbrauchs des Fahrzeugs ohne Generator. In Punkt 4 ist der durch die Getriebeanpassung hervorgerufene Verbrauchsunterschied dargestellt, ca. 0,5 %-Punkte.



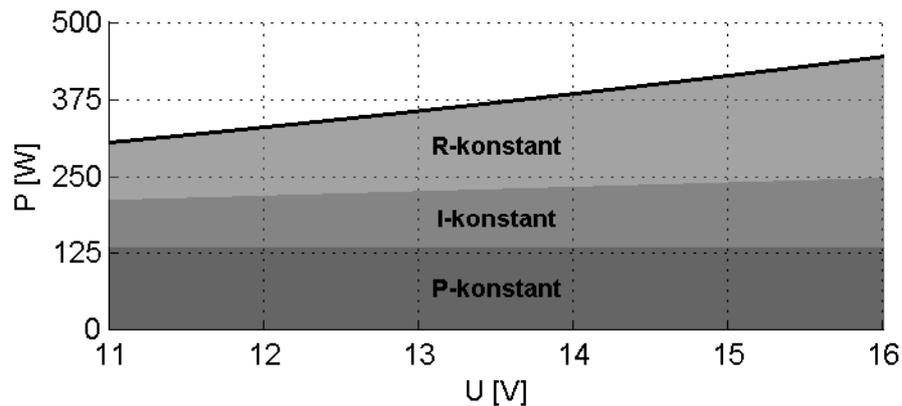
**Bild 4.39:** Theoretischer Ausgleich von Fahrleistungsunterschieden, hier der Elastizität von 80 auf 120 km/h im 4. Gang, durch Anpassung der Hinterachsgetriebeübersetzung sowie die Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch

Der theoretische Ausgleich des Fahrleistungsunterschieds zeigt, dass eine APU hier durchaus ein weiteres Potenzial aufweist. Allerdings ist die Bewertung des Fahrleistungsunterschieds schwierig. In der Praxis ist eine Anpassung der Übersetzung um so kleine Werte nicht machbar. Außerdem ist der Fahrleistungsunterschied stets abhängig von der momentanen Generatorleistung. Zur Steigerung der Fahrleistung ist auch eine temporäre Abschaltung des Generators möglich. Des weiteren verhalten sich nicht alle Fahrleistungsgrößen gleich. Insgesamt kann aber davon ausgegangen werden, dass die Fahrleistungen durch die hier betrachtete APU tendenziell leicht verbessert werden, sprich das angenommene Zusatzgewicht mehr als kompensiert wird.

### Bordnetzspannung

Wie in Kapitel 2 beschrieben, lassen sich die elektrischen Verbraucher grob in leistungskonstante (P-konstant), stromkonstante (I-konstant) und widerstandskonstante (R-konstant) Verbraucher einteilen. Während die leistungskonstanten Verbraucher von der Bordnetzspannung unabhängig sind, steigt der Leistungsbedarf der stromkonstanten Verbraucher mit der Bordnetzspannung linear an. Der Leistungsbedarf der widerstandskonstanten Verbraucher nimmt sogar quadratisch mit der Bordnetzspannung zu, siehe Bild 4.40.

Das heißt, durch eine Variation der Bordnetzspannung ändert sich auch der elektrische Leistungsbedarf. Bei einer Anhebung der Bordnetzspannung um 0,4 V, wie es bei der einfachen Fahrzeugintegration der APU geschehen ist, kommt es zu einer Erhöhung der elektrischen Verbraucherleistung um 15 W, bzw. 3%. Dies führt zu einem Kraftstoffmehrverbrauch von 0,09% bezogen auf den Gesamtverbrauch des heutigen Fahrzeugs.



**Bild 4.40:** Auswirkung der Bordnetzspannung auf die Leistung der elektrischen Verbraucher; Beispiel des elektrischen Leistungsbedarfs eines BMW 530i im NEDC; Aufteilung in R-, I- und P-konstante Anteile

Bei größeren Spannungsänderungen und höheren elektrischen Leistungen macht sich dieser Effekt noch stärker bemerkbar. Eine Spannungsänderung von  $\pm 2V$  führt zu einer Änderung der elektrischen Verbraucherleistung um ca.  $\pm 15\%$ . Bei einem grob abgeschätzten Kraftstoffverbrauch von 1 % pro 100 W elektrische Leistung, führt dies zu einem Mehr- bzw. Minderverbrauch von ca.  $\pm 0,15\%$  pro 100 W. Ein höherer Nutzen durch den höheren elektrischen Leistungsbedarf liegt in den meisten Fällen nicht vor.

#### Weitere Einflussgrößen

Es existieren weitere Einflussgrößen, die jedoch nur eine geringe Bedeutung haben. Drei Größen sollen hier genannt werden:

- Der **Wirkungsgrad des Energiespeichers** spielt aufgrund der geringen Zwischenspeicherung nur eine untergeordnete Rolle. Er wird jedoch extrem wichtig beim Hybridfahrzeug, siehe Unterschied Ergebnisse zwischen Betrachtungen mit Batterie und Supercap als Energiespeicher in Bild 4.30, Kapitel 4.5.
- Der **Generatorwirkungsgrad** hat einen ähnlich großen Einfluss wie der APU-Wirkungsgrad. Da bei den Simulationen ein gemessenes Wirkungsgradkennfeld verwendet wurde, ist die Aussageunsicherheit beim Generator allerdings wesentlich geringer als bei der APU. Neben dem Wirkungsgrad spielt vor allem die Generatorgröße eine Rolle, da ein kleinerer Generator geringere Schleppmomentverluste im Leerlauf aufweist. Dieser Effekt wird im nächsten Kapitel im Rahmen der Optimierungsmöglichkeiten genauer betrachtet.
- Die **Umgebungstemperatur** hat vor allem einen Einfluss auf die Anwendungen, z.B. auf den Heiz- und Klimatisierungsbedarf. Tiefe Temperaturen führen zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors solange der Motor noch nicht warm ist. Eine APU entlastet den Verbrennungsmotor, was einen längeren Warmlauf bedeutet. Allerdings kann durch eine Integration der APU in das Wärmemanagement auch eine Verkürzung der Warmlaufzeit erreicht werden.

Niedrige Temperaturen beeinflussen auch die Fahrzeugbatterie. Die Stromaufnahme sinkt, was Auswirkungen auf die Betriebsstrategie haben kann. Insgesamt sind die indirekten Einflüsse der Umgebungstemperatur, z.B. auf die Betriebsstrategien, größer als die direkten Einflüsse.

### 4.6.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Genaugenommen gelten die Ergebnisse aus Kapitel 4.1 bis 4.5 nur für die angegebenen Fahrzeugkonfigurationen und Szenarien. Allerdings sind durch die Variation von Fahrzyklen, elektrischen Leistungen und weiteren Randbedingungen die Haupteinflussgrößen ersichtlich. Tendenziell dürfen die Ergebnisse auch auf andere Fahrzeuge und Szenarien übertragen werden.

Verbrennungsmotortyp und -größe spielen nur bei Standanwendungen eine größere Rolle. Für Fahrzyklen, elektrische Leistungsniveaus, Fahrzeugintegrationsmöglichkeiten und Betriebsstrategien sind in dieser Arbeit viele Beispiele aufgeführt, so dass für weitere Szenarien und Fahrzeuge eine Ableitung möglich ist. Nur bei extremen Fahrzyklen, z.B. Hochgeschwindigkeitszyklen, können keine Aussagen getroffen werden, vor allem wenn ein stark abweichendes Drehzahlniveau vorliegt.

Der APU-Wirkungsgrad und vor allem das APU-Startupverhalten haben einen besonders großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Deshalb ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse bei einem geänderten APU-Verhalten stark eingeschränkt. Eine weitere Einschränkung der Übertragbarkeit ist gegeben, wenn sehr große Abweichungen von Komponenten, z.B. Batterie- oder Generatorgröße, vorliegen. Insgesamt beachtet werden muss, dass die meisten Ergebnisse auf den Gesamtkraftstoffverbrauch des Fahrzeugs bezogen sind. Bei einer geänderten Bezugsgröße ändert sich auch das relative Einsparpotenzial.

## 4.7 Optimierungsmöglichkeiten

Im letzten Kapitel wurden die Einflüsse auf den Kraftstoffverbrauch aufgezählt. In diesem Kapitel werden mögliche Optimierungspotenziale beim APU-Fahrzeug identifiziert.

### Startup-Verbrauch der APU

Da der APU-Startup-Verbrauch den größten Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch der APU hat, ist hier eine Optimierung besonders wirkungsvoll.

- Wenn die APU vom vorangegangenen Betrieb noch warm ist, ist weniger Energie für das erneute Aufheizen notwendig. Eine optimierte **Isolierung** kann die Abkühlung verlangsamen. Allerdings führt eine stärkere Isolierung zu einer höheren Masse und einem größeren Bauraum. Schwachstellen stellen die Rohrverbindungen dar, die als Wärmebrücken wirken und Wärme entweichen lassen.
- Eine **Reduktion der Masse** oder der spezifischen Wärmekapazität führt zu einer geringeren Wärmekapazität der APU und damit zu einem geringeren Energiebedarf beim Aufheizen. Die betrachteten Massen stellen bereits Zielgrößen dar. Inwieweit eine weitere Reduktion möglich ist, wird die weitere Entwicklung der Brennstoffzellentechnik zeigen.

- Eine **niedrigere Betriebstemperatur** der SOFC würde ebenfalls helfen, den Start-up-Verbrauch zu reduzieren. Die Firma *Ceres Power Ltd.* entwickelt eine IT-SOFC<sup>43</sup> mit einem Arbeitsbereich von 500–600°C [59]. Eine Reduktion der Starttemperatur von 750°C auf 500°C würde eine Reduktion des Startup-Verbrauchs um mindestens 34%<sup>44</sup> bedeuten. Allerdings darf eine niedrigere Betriebstemperatur nicht zu einem niedrigeren Wirkungsgrad der APU führen.
- Eine **Gesamtsystemoptimierung** kann ebenfalls zu einer Reduktion des Start-upverbrauchs führen. Durch eine optimierte Gasführung und eine verbesserte Betriebsstrategie kann es möglich sein, die Aufheizenergie effizienter einzusetzen und weniger Abwärmeverluste zu erzeugen. Allerdings steht eine Optimierung der Gasführung oft im Konflikt mit Gewichts- und Kostenzielen.

### Wirkungsgrad der APU

Eine Erhöhung des APU-Wirkungsgrads führt zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch und ist somit stets zu begrüßen. Verschiedene Forschungsinstitute arbeiten daran sowohl die Zelle, den Stack als auch den Reformer zu optimieren. Genauso wird an der Systemoptimierung gearbeitet. Ziel ist es, z.B. durch eine Rezirkulierung des Reformats, den Kraftstoff optimal auszunutzen.

Neben dem eigentlichen Stromerzeugungswirkungsgrad spielt auch der elektrische Eigenbedarf eine große Rolle, siehe Bild 4.33 in Kapitel 4.6. Eine Reduktion kann auf mehrere Arten erfolgen, z.B. über die Optimierung einzelner Bauteile, z.B. des Gebläses. Eine andere Möglichkeit besteht darin, bestehende Systeme im Fahrzeug mitzunutzen und so den elektrischen Energiebedarf zu reduzieren. Z.B. könnte die APU-Steuerung auf einem bestehenden Steuergerät mit integriert werden. Vor allem bei geringer Stromerzeugung tritt der elektrische Eigenbedarf deutlich hervor. In Phasen geringer elektrischer Leistungsanforderung ist es auch denkbar, die APU kurzzeitig komplett abzuschalten, so dass kein Leerlaufverbrauch auftritt. Dies würde in den untersuchten Rekuperationsszenarien, in denen phasenweise nur die Batterie zur Stromerzeugung verwendet wird, teilweise eine Einsparung in Höhe von 0,4% bedeuten. In wieweit eine kurzzeitige Abschaltung der APU technisch möglich ist, vor allem in Hinblick auf einen schnellen Neustart, muss untersucht werden.

### Komponentengrößen

Alle Simulationen wurden mit einer festgelegten Fahrzeugkonfiguration durchgeführt, siehe Anhang Seite 150. Nachfolgend wird untersucht, inwieweit eine Anpassung von APU-, Generator- oder Batteriegröße zu einer Optimierung des APU-Potenzials führen kann.

- Die **APU-Größe** beeinflusst den Startup-Verbrauch und damit den entscheidenden Faktor beim Kraftstoffverbrauch. Zusätzlich verschiebt sich bei gleichbleibender elektrischer Verbraucherleistung der Arbeitspunkt im Wirkungsgradkennfeld, wenn

<sup>43</sup>IT-SOFC = Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell

<sup>44</sup>berechnet über den Unterschied des Wärmehalts der aufgeheizten APU; darüberhinaus sind weitere Einsparungen durch einen höheren mittleren Wirkungsgrad der Wärmeeinbringung möglich, wobei dies wiederum stark von der maximal erlaubter Gastemperatur abhängt

die APU-Größe geändert wird. Der Einfluss des Startup-Verbrauchs ist bei kurzen Zyklen so groß, dass bei den Variationen der APU-Größe immer die kleinste betrachtete APU mit 1 kW Nennleistung den geringsten Kraftstoffverbrauch bedeutet hat. Auch bei betriebsbereiter APU ist die 1 kW-APU im *NEDC* als optimal hervorgetreten, außer beim Hybridfahrzeug mit deutlich höherem elektrischen Energiebedarf. Tendenziell hat eine größere APU bei gleicher relativer Auslastung einen besseren Wirkungsgrad. Im *NEDC* liegt jedoch nur ein geringer elektrischer Leistungsbedarf vor. Deshalb verschiebt sich der Arbeitspunkt der APU mit zunehmender Nennleistung Richtung Teillast. Dadurch verschlechtert sich der Kraftstoffverbrauch von größeren APUs im *NEDC* auch bei betriebsbereiter APU. Zusätzlich verursacht die 1 kW-APU das geringste Mehrgewicht. Beim Hybridfahrzeug ist die optimale APU-Größe stark von der Betriebsstrategie abhängig. Aber auch hier gilt, dass eine Überdimensionierung aufgrund des starken Einflusses des Startup-Verbrauchs vermieden werden sollte.

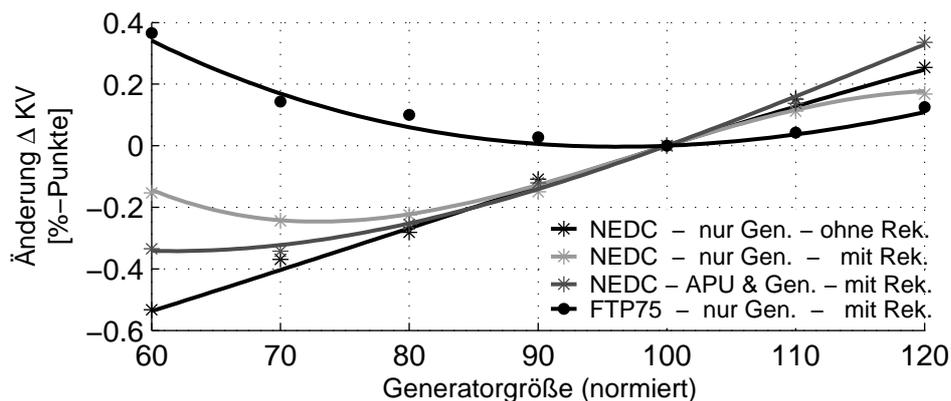
Für die Untersuchungen zur Optimierung der APU-Größe wurden APUs zwischen 1 kW und 5 kW Nennleistung betrachtet. Simulationen wurden im 0,5 kW-Schritt durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Eine APU kleiner als 1 kW wurde nicht betrachtet, da Komfortanwendungen wie Erhaltungsklimatisierung nicht mehr möglich sind. Bereits 1 kW ist hier ein sehr geringer Wert.

Nennleistung	1,0 kW	1,5 kW	2,0 kW	2,5 kW	3,0 kW	4,0 kW	5,0 kW
betriebsbereit	-1.58 %	-1.51 %	-1.37 %	-1.20 %	-1.02 %	-0.65 %	-0.26 %
kalt	2.60 %	4.40 %	6.31 %	8.27 %	10.25 %	14.24 %	18.24 %

**Tabelle 4.2:** Einfluss der APU-Größe auf den Kraftstoffverbrauch im *NEDC* im Vergleich zum Fahrzeug ohne APU am Beispiel der Betriebsstrategie „Generatorsersatz“; betriebsbereite und kalte APU

- Die **Generator-Größe** hat zwei Einflüsse auf den Kraftstoffverbrauch. Zum einen steigt mit zunehmender Generatorgröße auch das Leerlaufschleppmoment. Zum anderen kann ein größerer Generator prinzipiell mehr Bremsenergie rekuperieren. Aufgrund des steigenden Leerlaufmoments ist es generell günstiger bei einem APU-Fahrzeug, bei dem der Generator nur zur Überbrückung des APU-Startups gebraucht wird, einen möglichst kleinen Generator einzubauen, bis hin zum Entfall des Generators. Auch ohne APU führt ein kleiner Generator im *NEDC* aufgrund des geringen elektrischen Leistungsbedarfs zum niedrigsten Kraftstoffverbrauch, siehe Bild 4.41, Simulation „*NEDC* - nur Gen. - ohne Rek.“. Die Auslegung der Generatorgröße muss jedoch so erfolgen, dass auch bei sehr hohem elektrischen Leistungsbedarf eine sichere elektrische Versorgung gewährleistet ist.

Die Generatorgröße wirkt sich auch auf die maximal rekuperierbare Bremsenergie aus. Die Simulationsergebnisse in Bild 4.41 zeigen jedoch, dass beim „*NEDC* - nur Gen. - mit Rek.“ der geringste Kraftstoffverbrauch mit einem kleineren Generator erreicht wird. Die durch einen größeren Generator zusätzlich rekuperierte Energie ist geringer als das zusätzliche Schleppmoment während dem normalen Generatorbetrieb. Mit APU sieht das Resultat ähnlich aus. Hier lohnt sich die Vergrößerung des Generators sogar noch weniger. Grund für das schlechte Abschneiden der Rekuperation ist, dass im *NEDC* nur geringe Verzögerungen vorliegen und dadurch der größte



**Bild 4.41:** Optimierung der Generatorgröße: Fahrzeugsimulation mit verschiedenen Generatorgrößen (lineare Skalierung von Generatorkennfeld und Maximalstromkennlinie), Unterschied des Kraftstoffverbrauchs auf den Gesamtfahrzeugverbrauch des jeweiligen Szenarios bezogen.

Teil der kinetische Energie vom Motorschleppmoment aufgenommen wird. Dies wird durch einen Vergleich mit dem *FTP75*-Zyklus deutlich, siehe Bild 4.41, Simulation „*FTP75 - nur Gen. - mit Rek.*“. Während das Verbrauchsoptimum im *NEDC* bei einer Generatorgröße von ca. 75 % des betrachteten Basisgenerators liegt, ist die Größe des Basisgenerators im *FTP75*-Zyklus optimal.

- Eine geringere **Batterie-Größe** bedeutet zunächst ein geringeres Gewicht. Allerdings kann sie auch dazu führen, dass MSA-Phasen früher abgebrochen werden oder weniger Energie rekuperiert wird. Im *NEDC* ist der Einfluss der Batteriegröße minimal. Die Batterie wird normalerweise auf Extremszenarien, z.B. für den Motor Kaltstart bei tiefen Temperaturen oder den Betrieb vieler elektrischer Verbraucher, ausgelegt. Des weiteren wird vor allem bei Hybridfahrzeugen eine größere Batterie gewählt, um die Batterielebensdauer zu verlängern. Da die APU die Batterie unterstützt, ist eine Reduktion der Batteriegröße durchaus denkbar. Eine Reduktion der Batteriegröße von z.B. 110 Ah auf 70 Ah Nennkapazität bedeutet eine Gewichtsersparung von 8,8 kg<sup>45</sup>. Dies führt wiederum zu einer Kraftstoffeinsparung im *NEDC* von 0,1 %.

### Fahrzeug-Gesamtkonzept

Im Rahmen der Integration der APU in das Fahrzeug sind weitere Optimierungen denkbar, z.B. eine ganzheitliche Betriebspunktoptimierung von APU, Generator, Batterie und Verbrennungsmotor oder das Abtrennen des Generators vom Antriebsstrang im Leerlauf. Durch eine optimierte Bordnetzeinbindung ohne DC/DC-Wandler, siehe Kapitel 2.3.2, können die Wandlerverluste reduziert werden. Außerdem kann die APU-Abwärme bei tiefen Temperaturen in zukünftigen Hybridfahrzeugen zur Erwärmung der Batterien verwendet werden, um eine höhere Stromaufnahme und damit ein höheres Rekuperationspotenzial zu erreichen. Genauso kann die Abwärme des Verbrennungsmotors verwendet werden, um den Startup der APU zu unterstützen.

<sup>45</sup>Daten: Varta

## 5 Zusammenfassung

Der elektrische Energiebedarf im Fahrzeug nimmt stetig zu. Dies steht zunächst im Gegensatz zu Anforderungen, den Kraftstoffverbrauch zu senken. Insgesamt führt dies zur Nachfrage nach neuen Technologien und neuen Konzepten bei der elektrischen Energieerzeugung im Fahrzeug. Die Brennstoffzellen-APU stellt in diesem Zusammenhang ein interessantes System dar, da sie effizient und unabhängig vom Verbrennungsmotor elektrische Energie erzeugen kann. Durch die Kombination einer Brennstoffzelle, hier einer SOFC, mit einem Reformer, kann die APU mit den heutigen Kraftstoffen Benzin und Diesel betrieben werden.

Bei der Analyse des Energiesystems Kraftfahrzeug werden in dieser Arbeit verschiedene Anwendungsmöglichkeiten einer SOFC-APU zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs identifiziert. Neben der reinen Stromversorgung kann die APU Funktionen wie Motor-Stopp-Automatik (MSA) oder elektrisches Fahren (Hybridfahrzeug) unterstützen. Des Weiteren erzeugt eine SOFC-APU Abwärme auf einem hohen Temperaturniveau. Die Abwärme kann zum Heizen des Fahrgastraums oder zur Vorwärmung des Verbrennungsmotors verwendet werden.

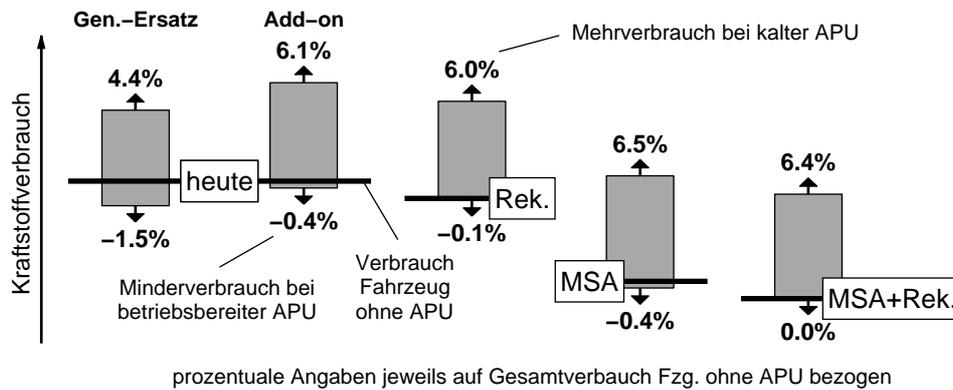
Für die Bewertung der Einsparpotenziale wurden mehrere Methoden betrachtet. Eine einfache Abschätzung des Kraftstoffverbrauchs über mittlere Wirkungsgrade und Leistungen ist bereits ausreichend, um die Haupteinflüsse zu identifizieren und zu bewerten. Eine höhere Genauigkeit wird durch Simulationen erreicht. Dabei kann je nach Anforderung die Modellierung mit verschiedenen Detaillierungsgraden erfolgen. Mit zunehmender Detaillierung steigen der Modellierungsaufwand sowie die Anforderungen an die Eingangsdaten für Simulationen. Messungen sind zur Analyse von Einsparpotenzialen in der frühen Phase nicht sinnvoll. Sie dienen jedoch zur Validierung von Simulationsmodellen sowie zur Erzeugung von Eingangsdaten. Besonders wichtig bei den Berechnungen ist ein ausgeglichener Ladezustand der elektrischen Energiespeicher zwischen Fahrtbeginn und Fahrtende. Nur so kann ein aussagekräftiger Vergleich des Kraftstoffverbrauchs mit und ohne APU erfolgen. Der Ausgleich des Ladezustands wurde in der Simulation durch eine Anpassung des Ausgangsladezustands über eine Optimierungsroutine erreicht. Verbleibende Abweichungen wurden energetisch bewertet.

Die Einsparpotenziale einer SOFC-APU hängen in erster Linie von drei Faktoren ab, dem Startup-Verbrauch der APU, der Betriebsdauer und der angeforderten elektrischen Leistung. Eine kalte APU muss zunächst auf eine Betriebstemperatur von  $700^{\circ}\text{C}$  bis  $800^{\circ}\text{C}$  erwärmt werden. Dieser Aufheizvorgang benötigt Energie, so dass zunächst ein Mehrverbrauch besteht. Erst nach längerer Betriebsdauer kompensiert sich dieser Mehrverbrauch durch die hohe Effizienz der SOFC-APU. Die Dauer ist stark abhängig von der elektrischen Leistung. Bei höherer elektrischer Leistung besteht prinzipiell eine höhere Einsparrate durch die APU.

Besonders interessant ist eine APU bei Standanwendungen mit hohem Energiebedarf, da hier durch die APU ein Betrieb des Verbrennungsmotors im extremen Teillastbereich vermieden wird. Bei einer 30-minütigen Standklimatisierung können so z.B. Kraftstoffeinsparung von ca. 36 % erreicht werden, inklusive Startup-Verbrauch.

Während der Fahrt sind Einsparpotenziale beim Kraftstoffverbrauch nur bei betriebsbereiter APU oder bei längerer Betriebsdauer zu erwarten. Der Verbrauchsunterschied

zum Fahrzeug ohne APU wurde bei Fahrzeugen mit verschiedenen Basisbetriebsstrategien (heutiges Fahrzeug, Fahrzeug mit Motor-Stopp-Automatik, Fahrzeug mit Rekuperationsfunktion) sowie in mehreren Fahrzyklen ermittelt. Die betrachtete SOFC-APU hat eine Nennleistung von  $1,5\text{ kW}$ . In Bild 5.1 sind die Ergebnisse im für Kraftstoffverbrauchsmessungen vorgegebenen Standardzyklus *NEDC* (New European Driving Cycle) dargestellt.



**Bild 5.1:** Unterschied des Kraftstoffverbrauchs eines Fahrzeugs mit APU gegenüber eines Fahrzeugs ohne APU im *NEDC* bei verschiedenen Betriebsstrategien

Der Kraftstoffverbrauch des Vergleichsfahrzeugs ohne APU ist jeweils durch einen waagerechten Strich markiert. Die Säule gibt den Verbrauchsunterschied einer APU an, angefangen beim Minderverbrauch bei betriebsbereiter APU bis zum Mehrverbrauch bei kalter APU. Enthält die APU noch Restwärme von einer vorangegangenen Fahrt, reduziert sich der Energieaufwand für den Startup und der Verbrauchsunterschied liegt zwischen den beiden Extremen. Im ersten Szenario in Bild 5.1 wird der Generator durch die APU ersetzt. Hier können die höchsten Einsparungen von bis zu  $-1,5\%$  erzielt werden. Bei kalter APU kommt es zu einem Mehrverbrauch von  $4,4\%$ . Wird die APU „add-on“ zum Generator in das Fahrzeug integriert, erhöht sich der Kraftstoffverbrauch, da der Generator auch im entregten Zustand Schleppmomentverluste aufweist. Durch den Generator kann Bremsenergie rekuperiert werden. Dadurch reduziert sich das maximale Einsparpotenzial der APU auf  $-0,1\%$ , da weniger elektrische Leistung durch die APU erzeugt wird. Insgesamt kann jedoch durch die Rekuperationsfunktion der Gesamtverbrauch um ca.  $-1\%$ <sup>46</sup> im *NEDC* gesenkt werden. Die MSA-Funktion reduziert den Kraftstoffverbrauch des Basisfahrzeugs um ca.  $-5\%$ . Der absolute Verbrauchsunterschied der APU bewegt sich auf ähnlichem Niveau wie ohne MSA-Funktion. Der maximale relative Mehrverbrauch liegt aufgrund der geänderten Bezugsgröße höher. Hier wird der Verbrauchsunterschied der APU auf den jeweiligen Grundverbrauch des Fahrzeugs ohne APU bezogen, da nicht der Einfluss von Rekuperations- und MSA-Funktion im Fokus steht, sondern das Potenzial einer APU bei verschiedenen Ausgangsfahrzeugkonfigurationen betrachtet werden soll.

Das Einsparpotenzial einer APU wurde in sechs weiteren Fahrzyklen untersucht. In Tabelle 5.1 ist dargestellt, bei welchen Szenarien und Anwendungen mit der SOFC-APU Verbrauchsvorteile ermittelt wurden. Die höchsten Einsparungen von je  $-4,4\%$  wurden dabei im *Sommer*-Zyklus beim Ersatz des Generators durch die APU und bei der Kombination mit der MSA-Funktion erzielt. Generell führt die APU vor allem in langen Fahrzyklen

<sup>46</sup>bei ausgeglichener Ladebilanz

und bei einem hohen elektrischen Energiebedarf zu Verbrauchseinsparungen. Verallgemeinert kann die Grenze zwischen Mehrverbrauch und Verbrauchseinsparung für verschiedene Betriebsstrategien in Abhängigkeit von elektrischer Leistungsanforderung und Betriebsdauer angegeben werden. Bei einer elektrischen Leistungsanforderung von 1000 W liegt die Grenze bei kalter APU z.B. zwischen 35 und 80 Minuten. Wird davon ausgegangen, dass im Alltag eine APU zwischen zwei Fahrten nie komplett auskühlt, verringern sich die Zeiten zur Kompensation des Startup-Verbrauchs erheblich.

Besonders hohe Leistungsanforderungen liegen bei einer elektrischen Erhaltungsklimatisierung während MSA-Standphasen vor. Hier kann die APU ihren motorunabhängigen Betrieb nutzen und während der Stopp-Phase effizient Energie bereitstellen. Zwei Fahrzyklen, der *NEDC* und der *Sommer*-Zyklus, wurden mit elektrischer Erhaltungsklimatisierung untersucht. Durch die APU kommt es zu einer Kraftstoffeinsparung von  $-1,3\%$  (bei kalter APU  $+4,8\%$  Mehrverbrauch) im *NEDC* und  $-6,4\%$  (bei kalter APU  $-4,2\%$ ) im *Sommer*-Zyklus.

		Szenario								Stand- klimatisierung	Stand- heizung
		NEDC	Japan1015	FTP75	Highway	BMW	Sommer	Winter			
Betriebsstrategie	Gen.-Ersatz	↕ / ↗	- / ↗	↕ / ↗	- / ↗	- / ↗	↗ / ↗	↗ / ↗			
	"add-on"	↕ / ↗	- / ↘	↕ / ↗	- / ↗	- / ↗	↔ / ↗	↗ / ↗			
	Rekuperation	↕ / ↔	- / ↘	↕ / ↘	- / ↗	- / ↗	↕ / ↗	↗ / ↗			
	MSA	↕ / ↗	- / ↘	↕ / ↗	- / ↗	- / ↗	↗ / ↗	↗ / ↗	↗ / ↗	↗ / ↗	
	MSA + Rek.	↕ / ↔	- / ↘	↕ / ↘	- / ↗	- / ↗	↘ / ↗	↗ / ↗			
	MSA + Klima*	↕ / ↗	-	-	-	-	↗ / ↗	-			
	Hybrid	↕ / ↗	-	-	-	-	-	-			

↗ Kraftstoffeinsparung, ↗ geringe Kraftstoffeinsparung, ↔ neutral, ↘ geringer Mehrverbrauch, ↕ Mehrverbrauch durch eine SOFC-APU, APU kalt / betriebsbereit

- keine Bewertung

\*Erhaltungsklimatisierung während Standphasen

**Tabelle 5.1:** Potenzial der SOFC-APU bei der Verbrauchsoptimierung bei verschiedenen Anwendungen und Szenarien

Durch die Nutzung der APU-Abwärme zur Aggregatevorwärmung ist im *NEDC* ein zusätzliches Einsparpotenzial in Höhe von  $-1\%$  bis  $-2\%$  denkbar. Bei der Nutzung der APU zum Heizen des Innenraums machen sich die Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung bemerkbar, so dass sich die APU bereits nach kurzer Betriebszeit lohnt.

Im Hybridfahrzeug ist eine APU interessant, da hier vor allem beim teilelektrischen Fahren hohe elektrische Leistungen fließen. Durch die APU kann die elektrische Leistung energetisch effizienter bereitgestellt werden als durch die E-Maschine. Verluste durch eine Zwischenspeicherung elektrischer Energie entfallen oder werden reduziert. Allerdings macht sich auch hier der hohe Einmalaufwand des APU-Startups negativ bemerkbar, so dass im *NEDC* bei kalter APU keine Einsparung erzielt werden kann, es sei denn die APU führt zu mehr elektrischen Fahranteile, was wiederum eine indirekte Einsparung bedeuten kann. Erst bei längerer Betriebsdauer kann der APU-Startupverbrauch durch den Wirkungsgradvorteil der APU kompensiert werden.

Für direkte Kraftstoffeinsparungen im *NEDC* nach heutigen Prüfvorgaben eignet sich die APU nicht. Allerdings bietet eine APU im Fahrzeug zusätzliche Freiheitsgrade bei

der Auslegung von Systemen, vor allem bei der Motor-Stopp-Automatik und bei Hybridfahrzeugen. Auf diese Weise kann sie indirekt zu Einsparungen beitragen. So können z.B. Zielkonflikte wie eine große elektrische Reichweite kombiniert mit einer beschränkten Speicherkapazität beim Hybridfahrzeug durch eine APU gelöst werden.

Bei der weiteren Entwicklung der APU ist auf eine weitgehende Optimierung des Startup-Verbrauchs zu achten. Die hier betrachteten Zielwirkungsgrade sind anzustreben. Die Startupzeit ist für den Kraftstoffverbrauch weniger kritisch als der Energieverbrauch. Allerdings kann sie Auswirkungen auf die Auslegung von Generator und Batterie haben. Außerdem führt bei gegebener Fahrdauer eine lange Startupzeit zu einer verkürzten Betriebsdauer der APU. Die APU-Größe sollte anhand der Anwendungen wie Standklimatisierung ausgelegt werden. Eine Überdimensionierung ist jedoch zu vermeiden, da mit zunehmender Größe der Startup-Verbrauch steigt.

## 6 Anhang

### 6.1 Herleitung der Gleichung des APU-Wirkungsgrads

Die Leistungsströme sind in Bild 2.20 im Kapitel 2.2.3 definiert.  $FU$  stellt den Brennstoffausnutzungsgrad (Fuel Utilisation) im Stack dar.

APU-Wirkungsgrad ohne DC/DC-Wandler und ohne elektrischem Eigenverbrauch:

$$\eta_{APU'} = \frac{P_{SOFC}}{P_{Kraftstoff}} \quad (6.1)$$

mit

$$P_{SOFC} = P_{Reformat} \cdot \eta_{SOFC} \cdot FU \quad (6.2)$$

$$P_{Kraftstoff} = \frac{P_{Reformat}}{\eta_{Ref}} - P_{Rezirkulat} \quad (6.3)$$

$$P_{Rezirkulat} = \alpha \cdot P_{Anodenabgas} \quad (6.4)$$

$$P_{Anodenabgas} = P_{Reformat} \cdot (1 - FU) \quad (6.5)$$

ergibt sich

$$\eta_{APU'} = \frac{P_{Reformat} \cdot \eta_{SOFC} \cdot FU}{\frac{P_{Reformat}}{\eta_{Ref}} - P_{Rezirkulat}} = \quad (6.6)$$

$$= \eta_{SOFC} \cdot FU \cdot \frac{P_{Reformat}}{\frac{P_{Reformat}}{\eta_{Ref}} - \alpha \cdot P_{Reformat} \cdot (1 - FU)} = \quad (6.7)$$

$$= \eta_{SOFC} \cdot FU \cdot \eta_{Ref} \cdot \frac{1}{1 - \alpha \cdot \eta_{Ref} \cdot (1 - FU)} \quad (6.8)$$

Gleichung 6.3 ergibt sich aus der Definition des Reformerwirkungsgrads, siehe Gleichung 2.32 in Kapitel 2.2.3.

APU-Wirkungsgrad mit DC/DC-Wandler und elektrischem Eigenverbrauch:

$$\eta_{APU} = \frac{P_{APU}}{P_{Kraftstoff}} \quad (6.9)$$

mit

$$P_{APU} = P_{SOFC} \cdot \eta_{DCDC} - P_{eigen,el} \quad (6.10)$$

$$P_{Kraftstoff} = \frac{P_{APU}}{\eta_{APU}} \quad (6.11)$$

ergibt sich

$$\eta_{APU} = \frac{P_{SOFC} \cdot \eta_{DCDC}}{P_{Kraftstoff}} - \frac{P_{eigen,el}}{P_{Kraftstoff}} = \quad (6.12)$$

$$= \frac{P_{SOFC}}{P_{Kraftstoff}} \cdot \eta_{DCDC} - \frac{P_{eigen,el}}{P_{APU}} \cdot \eta_{APU} = \quad (6.13)$$

$$= \eta_{APU'} \cdot \eta_{DCDC} - \frac{P_{eigen,el}}{P_{APU}} \cdot \eta_{APU} \quad (6.14)$$

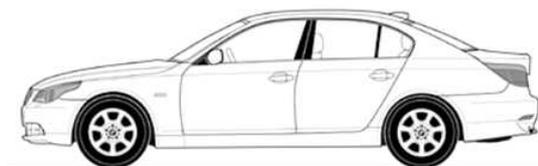
Gleichung 6.14 nach  $\eta_{APU}$  auflösen:

$$\eta_{APU} = \eta_{APU'} \cdot \eta_{DCDC} \cdot \frac{P_{APU}}{P_{APU} + P_{eigen,el}} = \quad (6.15)$$

$$= \eta_{SOFC} \cdot FU \cdot \eta_{Ref} \cdot \frac{1}{1 - \alpha \cdot \eta_{Ref} \cdot (1 - FU)} \cdot \eta_{DCDC} \cdot \frac{P_{APU}}{P_{APU} + P_{eigen,el}} \quad (6.16)$$

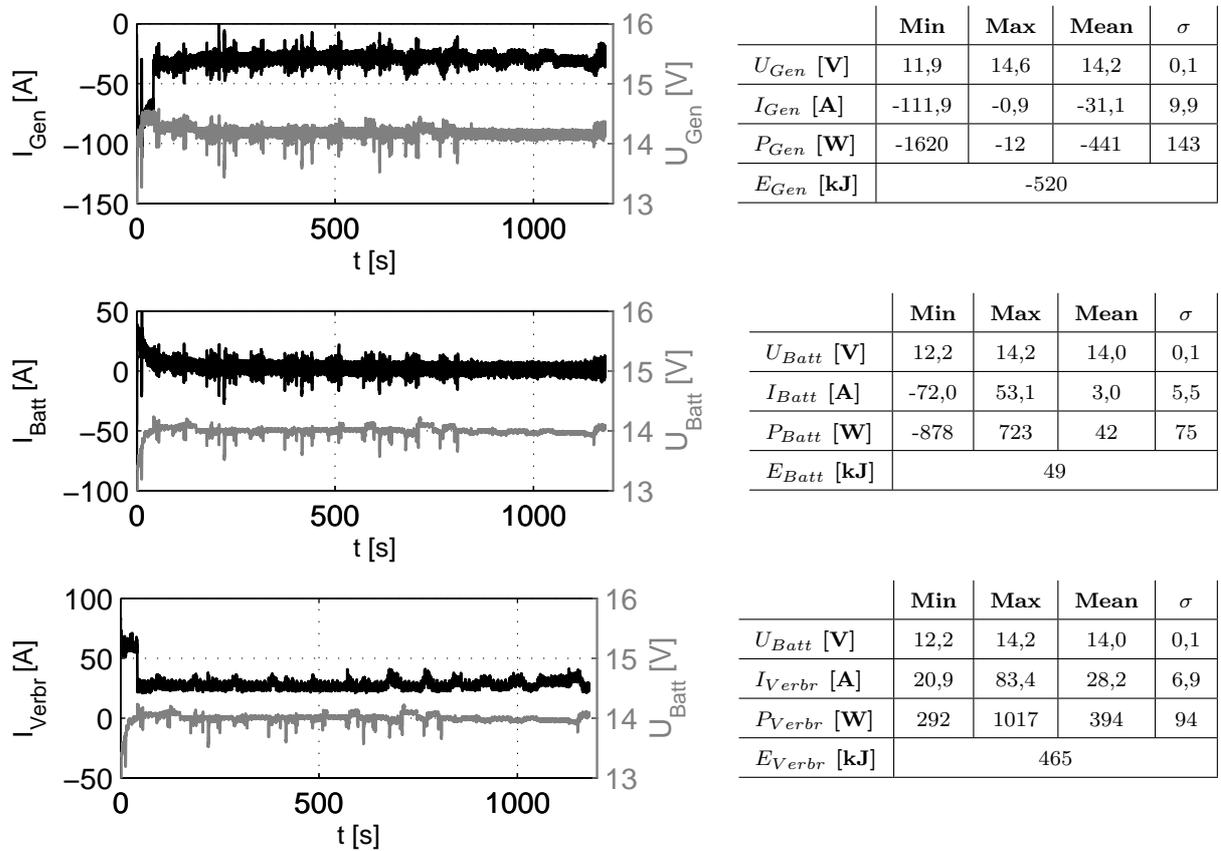
## 6.2 Fahrzeugdaten

<b>Fahrzeug</b>		<b>Motor</b>	
Modell:	BMW 530i (E60)	Bezeichnung:	M54B30H
Leergewicht:	1495 kg	Brennverfahren:	Otto
Luftwiderstand:	0,286	Zylinder / Ventile:	6 / 4
Frontfläche:	2,26 m <sup>2</sup>	Hubraum:	2979 cm <sup>3</sup>
Antrieb:	Standard	Nennleistung:	170 kW @ 5900 $\frac{1}{min}$
		Max. Drehmoment:	300 Nm @ 3500 $\frac{1}{min}$
		Verdichtung:	10,2
<b>Getriebe</b>			
Typ:	6-Gang Schaltgetr.		
Serienübersetzung:			
I / II / III : 1	4,35 / 2,50 / 1,67		
IV / V / VI : 1	1,23 / 1,0 / 0,85		
Hinterachsübers.: 2,93			
<b>El. Bordnetz</b>			
Generator:	Valeo TG15		
Batterie:	Varta 110Ah, Blei		

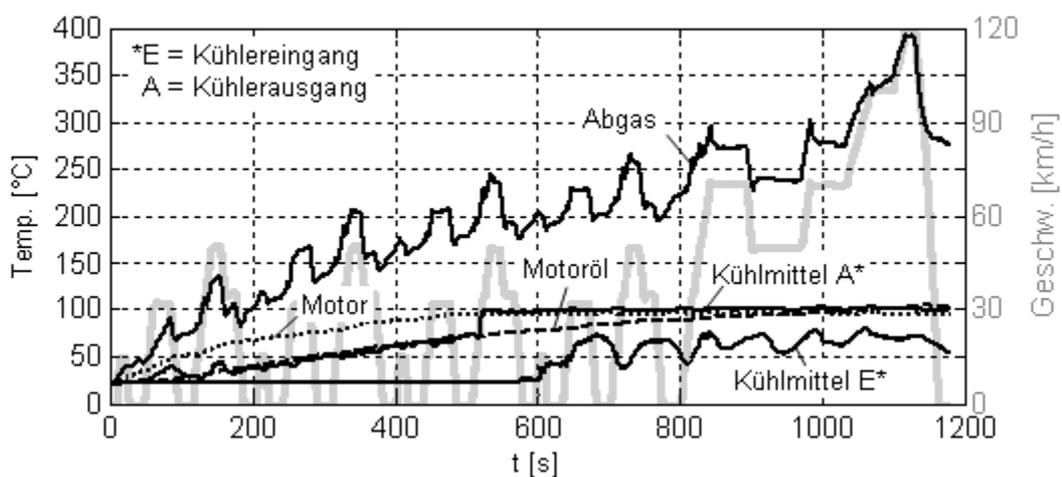


**Tabelle 6.1:** Daten des Basisfahrzeugs

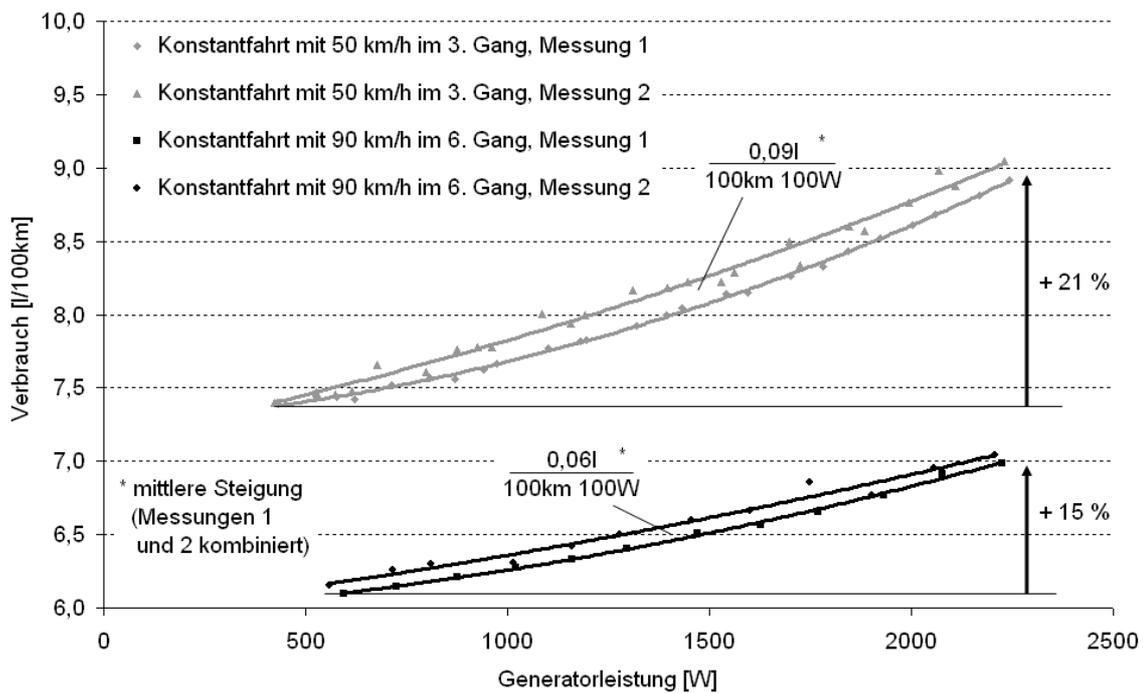
### 6.3 Messergebnisse



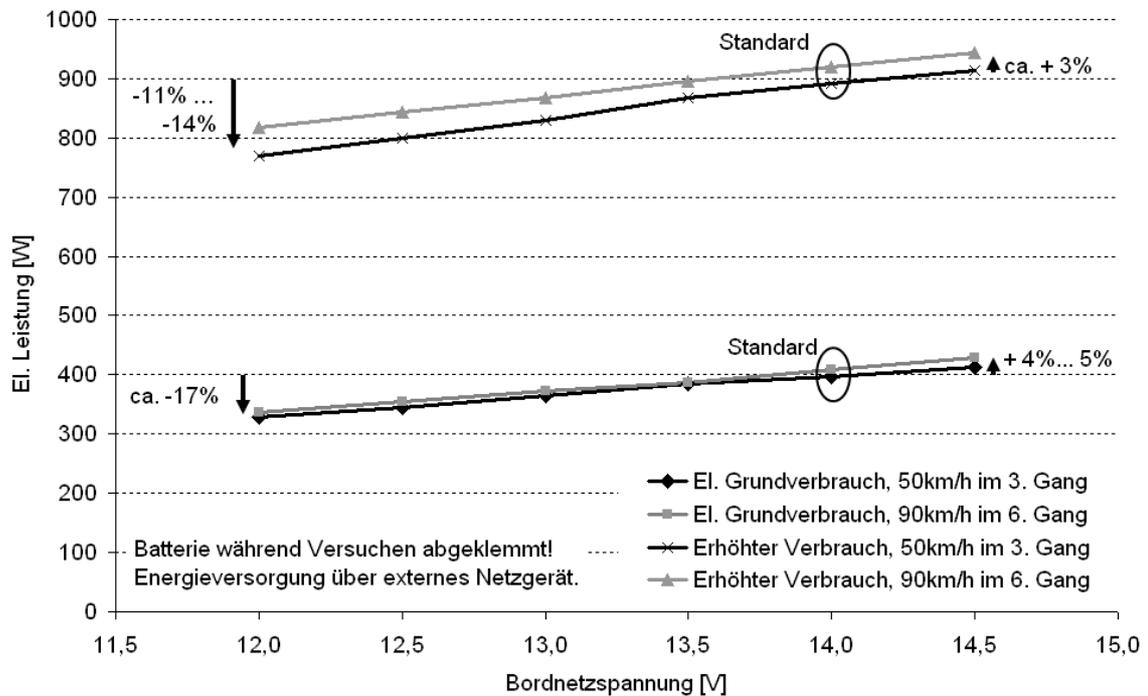
**Bild 6.1:** Messung auf dem Rollenprüfstand: Strom- und Spannungsverläufe des Basisfahrzeugs im NEDC



**Bild 6.2:** Messung auf dem Rollenprüfstand: Temperaturverläufe und Geschwindigkeitsprofil des Basisfahrzeugs im NEDC



**Bild 6.3:** Mehrverbrauch durch die Stromerzeugung per Generator. Die elektrische Verbraucherleistung wurde über eine externe Last variiert.



**Bild 6.4:** Einfluss der Bordnetzspannung auf die Leistung der elektrischen Verbraucher im Fahrzeug. Die Bordnetzspannung wurde über ein externes Netzgerät variiert.

## Verwendete Formelzeichen

Lateinische Formelzeichen:

$A$	$m^2$	Fläche
$C$	$F$	Kapazität
$c$	$J/(kgK)$	spezifische Wärmekapazität
$c_w$	-	Luftwiderstandsbeiwert
$COP$	-	Coefficient of Performance
$E$	$J, kJ$	Energie
$E_{Nernst}, E^\circ$	$V$	Nernstpotenzial
$e$	-	Massefaktor
$F$	$N$	Kraft
$f_R$	-	Rollwiderstandsbeiwert
$FU$	-	Fuel Utilisation (Brennstoffnutzungsgrad)
$\Delta G$	$kJ/kmol$	freie Gibbsche Energie
$\Delta H$	$kJ/kmol$	Enthalpie
$\Delta H_R$	$kJ/kmol$	Reaktionsenthalpie
$h$	$m$	Höhe
$I$	$A$	Stromstärke
$i$	-	Übersetzung, Faktor, Index
$J$	$kg\ m^2$	Massenträgheitsmoment
$k$	$\frac{l}{100km \cdot 100kg}$ $W/(m^2K)$	Konstante Wärmedurchgangskoeffizient
$KV$	$kJ, g/s, l/h$	Kraftstoffverbrauch
$m$	$kg, t$	Masse
$n$	$1/min$	Drehzahl
	-	Anzahl Elektronenübergänge
$P$	$W, kW$	Leistung
$p$	$Pa$	(Partial-) Druck
	-	Anteil, relative Abweichung
$Q$	$kJ$	Wärme
$R$	$\Omega$	Widerstand
$r$	$m$	Radius
$\Delta S$	$kJ/(kmolK)$	Entropieänderung
$s$	$km$	Strecke
$SoC$	$\%$	State of Charge (Ladezustand)
$T$	$K, ^\circ C$	Temperatur
$t$	$s, min, h$	Zeit
$U$	$V$	Spannung
$v$	$m/s, km/h$	Geschwindigkeit
$V_H$	$m^3, l$	Hubraum
$W$	$kJ$	Arbeit
$z$	-	Zylinderzahl

Griechische Formelzeichen:

$\alpha$	$^{\circ}$	Steigungswinkel
	$W/(m^2K)$	Wärmeübergangskoeffizient
	-	Rezirkulierungsgrad
$\epsilon$	-	Verdichtungsverhältnis
$\eta$	%	Wirkungsgrad
$\eta_{diff}$	%	differenzieller Wirkungsgrad
$\lambda$	-	Luftzahl
$\Phi$	-	Übertragungswirkungsgrad Wärmeübertrager
$\rho$	$kg/m^3$	Dichte

Konstanten:

$F$	$9,6485 \cdot 10^4 C/mol$	Faradaysche Konstante
$g$	$9,8066 m/s^2$	Fallbeschleunigung
$R$	$8,3145 J/(molK)$	allgemeine Gaskonstante

Abkürzungen und Indices:

AC	Air Conditioning
APU	Auxiliary Power Unit
B	Brennstoff
Batt	Batterie
BEV	Battery Electric Vehicle
BN	Bordnetz
Dll	Dynamic Link Library
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
e	effektiv
el	elektrisch
Erz	Erzeuger
EU	Europäische Union
EV	Electric Vehicle
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
Gen	Generator
ges	gesamt
HAG	Hinterachsgetriebe
i	indiziert
ICE	Internal Combustion Engine (Verbrennungsmotor)

kin	kinetisch
KSG	Kurbelwellen-Starter-Generator
L	Leitung
LKW	Lastkraftwagen
LL	Leerlauf
m	mechanisch, mittel
MSA	Motor-Stopp-Automatik
NEDC	New European Driving Cycle
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
pot	potenziell
POX	Partielle Oxidation
PTC	Positive Temperatur Coefficient (el. Heizelement)
PKW	Personenkraftwagen
Ref	Reformer
Rek	Rekuperation
res	resultierend
Rez	Rezirkulierung
SC	Supercap (Doppelschichtkondensator)
SMES	supraleitender magnetischer Energiespeicher
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SR	Steam Reforming (Dampfreformierung)
th, therm	thermisch
Umg	Umgebung
Var	Variante
Verbr	Verbraucher
WE	Wärmeeinbringung
WÜ	Wärmeübertrager
ZEV	Zero-Emission-Vehicle

## Literaturverzeichnis

- [1] Tachtler, J. et al.: „*Auxiliary Power Units with Solid Oxid Fuel Cell Technology for Independent Electric Power Supply in Passenger Cars.*“ 4. Europäisches SOFC-Forum, Luzern, Juli 2000.
- [2] Bundesumweltamt: „*Daten zur Umwelt.*“ [www.env-it.de/Umweltdaten/](http://www.env-it.de/Umweltdaten/), Stand November 2006.
- [3] MWV: „*Jahresbericht Mineralöl-Zahlen 2005.*“ Mineralölwirtschaftsverband e.V., Hamburg, Mai 2006.
- [4] Mehlin, M. et al.: „*Flottenverbrauch 2010 - Aktivierung des Reduktionspotentials und Beitrag zum Klimaschutz.*“ Forschungsbericht 2003-17, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Berlin, Juli 2002.
- [5] Greenergy: <http://www.greenergy.de>, Stand Mai 2002.
- [6] Umweltministerium: <http://www.umweltministerium.bayern.de/service/umwberat/ubbozo.htm>, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Stand Mai 2002.
- [7] UPI: <http://www.upi-institut.de/upi48.htm>, Umwelt- und Prognose-Institut e.V., Stand Mai 2002.
- [8] WEG: „*Reserven und Ressourcen - Potenziale für die zukünftige Erdgas- und Erdölversorgung.*“ Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasförderung e.V., Hannover, April 2006.
- [9] Varela, F.: „*Plugging the Gap - A survey of world fuel resources and their impact on the development of wind energy.*“ Renewable Energy Systems / Global Wind Energy Council, [www.gwec.net](http://www.gwec.net), September 2006.
- [10] Statistisches Bundesamt: „*Verbraucherpreisindex.*“ Stand November 2006.
- [11] VDA: „*Auto 2001.*“ Jahresbericht, Verein Deutscher Automobilhersteller, Frankfurt am Main, August 2001.
- [12] Toyota: „*Toyota FCHV.*“ <http://www.toyota.co.jp>, Stand November 2003.
- [13] Botti, J. et al.: „*Electric Vehicle Range Extension Using an SOFC APU.*“ SAE Technical Paper 2005-01-1172, Society of Automotive Engineers, Detroit, Michigan, 2005.
- [14] Zizelman, J. et al.: „*Auxiliary Power Units with SOFC Technology for Independent Electric Power Supply in Passenger Cars.*“ Europäisches SOFC-Forum, Luzern, 2002.
- [15] Rozumek, M., Boltze, M.: „*Bordstromversorgung mit einer SOFC-APU.*“ Präsentation, APU Tagung Erlangen, Oktober 2005.
- [16] Schneider, M.; Götz, G.; Fleming, B.: „*PEM Fuel Cell Systems in Automotive Vehicles - The Auxiliary Electric Power Unit of the Future.*“ The National Hydrogen Association's 15th Annual U.S. Hydrogen Conference, Los Angeles, USA, 2004.

- [17] Schäfer, J. et al.: „*Experimental studies of a highly integrated steam reformer - porous burner unit.*“ Präsentation, Fuel Cells Science & Technologies 2004, München, Oktober 2004.
- [18] BMVIT: „*Austrian Advanced Automotive Technology.*“ Förderprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie Österreich, Ergebnisse der 2. Ausschreibung, Wien, April 2005.
- [19] Ogrzewalla, J., et al.: „*Optimized Mixture Formation for Fuel Prozessors.*“ Fuel Cell Seminar, Miami, USA, 2003.
- [20] Fuel Cells 2000: „*Transportation Fuel Cells - Market Info.*“ <http://www.fuelcells.org/transmarket.pdf>, Stand Dezember 2003.
- [21] SFC: „*Neue EFOY-Brennstoffzellengeneration von SFC für das Reisemobil.*“ Pressemeldung, Smart Fuel Cell, Brunnthäl, Mai 2006.
- [22] DaimlerChrysler: <http://www.daimlerchrysler.de>, Stand Mai 2002.
- [23] Rose, R., Vincent, W.: „*Fuel Cell World Survey 2003.*“ Breakthroug Technologies Institute, Washington C.C., Februar 2004.
- [24] Barrett, S.: „*The European hydrogen and fuel cell Strategic Research Agenda and Deployment Strategy.*“ Fuel Cells Bulletin 2005(5), Elsevier, May 2005.
- [25] Niethammer, M.: „*Development Update on Delphi's Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) System.*“ Präsentation, APU Tagung Erlangen, Oktober 2005.
- [26] Walliser, D., Thomas, M.: „*Bordenergieversorgung mit Brennstoffzellen.*“ Präsentation, 8. Esslinger Forum für Kfz-Mechatronik, Esslingen, 2002.
- [27] Grube, T., et al.: „*Optionen und Herausforderungen des Einsatzes von Auxiliary Power Units in mobilen Anwendungen.*“ VDI-Tagung Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, November 2006.
- [28] Conover, J., et al.: „*Logistics and Capability Implications of a Bradley Fighting Vehicle with a Fuel Cell Auxiliary Power Unit.*“ SAE Technical Paper 2004-01-1586, Society of Automotive Engineers, Detroit, Michigan, 2004.
- [29] Hauptmann, F.: „*Einsatz von BZ-APU in Bussen.*“ Kurzbericht, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, [www.ffe.de](http://www.ffe.de), München, November 2003.
- [30] Lutsey, N.: „*Fuel Cells for Auxiliary Power in Trucks: Requirements, Benefits, and Marketability.*“ Master-Thesis, University of California, Davis, Juli 2003.
- [31] Schmidt, M.: „*Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs von Nebenaggregaten im Kraftfahrzeug.*“ Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Nr. 537, Düsseldorf, 2003.
- [32] Bosch: „*Kraftfahrtechnisches Taschenbuch.*“ VDI-Verlag, Düsseldorf, 24. Auflage, 2002.
- [33] Grohe, H.: „*Otto- und Dieselmotoren.*“ Vogel Buchverlag, Würzburg, 8. Auflage, 1987.

- [34] Ambühl, D., Schilter, A.: „*Auswirkungen von Eco-Drive bei Fahrzeugen im Jahr 2010.*“ Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie, ETH Zürich, Oktober 2003.
- [35] Bady, R.; Biermann, J.-W.: „*Hybrid-Elektrofahrzeuge - Strukturen und zukünftige Entwicklungen.*“ 6. Symposium „Elektrische Straßenfahrzeuge“, Technische Akademie Esslingen, 2000.
- [36] Eberspächer: <http://www.eberspaecher.com>, Stand Januar 2006.
- [37] Houber, H.; Binder, C.; Hamburger, A.: „*PTC-Innenraumheizung der neuesten Generation.*“ ATZ/MTZ Sonderausgabe System Partners 2002.
- [38] Gentner, H.: „*Vergleichende Untersuchung von mechanisch, elektrisch und thermisch angetriebenen Kälteanlagen zur Fahrzeugklimatisierung.*“ Fortschritt-Berichte VDI Reihe 19, Nr. 82, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [39] Canders, W.-R.: „*Elektrische Fahrzeugantriebe und neue Verkehrstechniken.*“ Vorlesungsskript, TU Braunschweig, 2004.
- [40] Guzzella, L.: „*Fahrzeugantriebssysteme.*“ Vorlesungsskript, ETH Zürich, 1999.
- [41] N.N.: „*Fuel Cell Handbook.*“ U.S. Department of Energy, Morgantown, West Virginia, USA, 6. Auflage, November 2002.
- [42] Carette, L., Friedrich, K.A., Stimming, U.: „*Fuel Cells - Fundamentals and Applications.*“ Fuel Cells, Volume 1, Issue 1, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2001.
- [43] Bambach, M.; Tachtler, J.; Wandel, K.: „*Brennstoffzellen-Systeme für die motorunabhängige Stromversorgung von Fahrzeug-Bordnetzen.*“ VDI-Berichte Nr. 1646, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [44] CRC: „*CRC Handbook of Chemistry and Physics.*“ Chemical Rubber Company, Cleveland, Ohio, USA, 1996.
- [45] Sandner, H.: „*Thermodynamik I.*“ Vorlesungsskript, TU München, 1998.
- [46] Weber, A.: „*Entwicklung von Kathodenstrukturen für die Hochtemperatur-Brennstoffzelle SOFC.*“ Dissertation, Universität Karlsruhe, 2002.
- [47] VDI: „*VDI-Wärmeatlas.*“ Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [48] Wolff, S., et al.: „*Die Einführung der Auto-Start-Stopp-Funktion (ASSF) in Volumenmodellen der BMW Group - ein intelligenter Beitrag zur effizienten Dynamik.*“ 7. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik, Stuttgart, 2007.
- [49] Diegelmann, C., et al.: „*BMW EfficientDynamics powered by Intelligent Energy Management.*“ 7th Advanced Automotive Battery Conference, Long Beach, CA, USA, 2007.
- [50] Hafkemeyer, M., et al.: „*Effiziente Dynamik durch intelligentes Energiemanagement.*“ VDI-Tagung, Dresden, 2002.

- [51] Windisch, H.: „*Der Kühlkreislauf wird revolutioniert - Thermomanagement im Kfz.*“ Horizonte 21, Dezember 2002.
- [52] Eberle, R.: „*Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau.*“ Dissertation, TU Berlin, 2000.
- [53] Diegelmann, C.: „*Auswirkungen einer SOFC-APU auf den Kraftstoffverbrauch von Kraftfahrzeugen.*“ Diplomarbeit bei BMW, München, 2002.
- [54] AVL: „*AVL Cruise Users Guide.*“ Version 2.2, AVL LIST GmbH, Graz, Mai 2003.
- [55] Kuchling, H.: „*Taschenbuch der Physik.*“ Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig, 16. Auflage, 1996.
- [56] EU: „*Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Personenkraftwagen mit Verbrennungsmotoren hinsichtlich der Messung der Kohlendioxidemission und des Kraftstoffverbrauches.*“ ECE-Regelung Nr. 101, <http://www.unece.org/trans/main/welcwp29.htm>, Stand Dezember 2002.
- [57] Bertram, M.: „*Antrieb mit intermittierendem Motorbetrieb.*“ Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe vom 1.6.1996.
- [58] Eberspächer: „*Mehr Sicherheit und Komfort mit Eberspächer Standheizungen.*“ Werbebroschüre, J. Eberspächer GmbH, 6. Auflage, Esslingen, Juli 2006.
- [59] Lewis, G., et al.: „*Metal Supported IT-SOFCs for Operation at 500-600C.*“ Fuel Cell Seminar, Miami, USA, 2003.