

Elektrische Standklimatisierung in Hybridfahrzeugen

1 Einleitung

Die derzeitige Innenraumklimatisierung von Kraftfahrzeugen mit konventionellem verbrennungsmotorischen Antrieb ist – mit Ausnahme von thermischen Zuheizungen – direkt mit dem Fahrmotor gekoppelt.

Bei zukünftigen Fahrzeugantriebskonzepten wird aus Gründen der Verbrauchs- und Emissionsminderung der Fahrmotor nicht mehr permanent in Betrieb sein. Schon durch die Erweiterung des konventionellen verbrennungsmotorischen Antriebs um die einfache Start-Stopp-Funktion ergeben sich nennenswerte Kraftstoffeinsparpotenziale, die in der Literatur mit 4...6 % beziffert werden [1]. Für komplexe Hybridkonzepte werden bis zu 25% Kraftstoffeinsparung gegenüber Vergleichsfahrzeugen mit konventionellem verbrennungsmotorischem Antrieb gehandelt [2]. Die Auswirkungen auf das Emissionsverhalten sind entsprechend. Experten gehen deshalb davon aus, dass Hybridfahrzeuge im Jahr 2015 einen Weltmarktanteil von 20 % erreichen werden [3].

Fahrzeugantriebskonzepte ohne permanent betriebenen Fahrmotor erfordern autarke Klimatisierungssysteme, die Wärme- und Kälteleistung fahrmotorunabhängig bereitstellen und verteilen können. Dies gilt insbesondere bei extremen Umgebungsbedingungen. Das Bild 1 macht den Bedarf nach einem autarken Klimatisierungssystem z.B. an heißen Sommertagen unmittelbar ersichtlich. Dort ist das Verhalten der Verdampferaustritts- und der Blaslufttemperaturen bei einem Fahrzeugs ohne autarke Klimatisierung während einer vorübergehenden Fahrtunterbrechung mit ausgeschaltetem Verbrennungsmotor dargestellt.

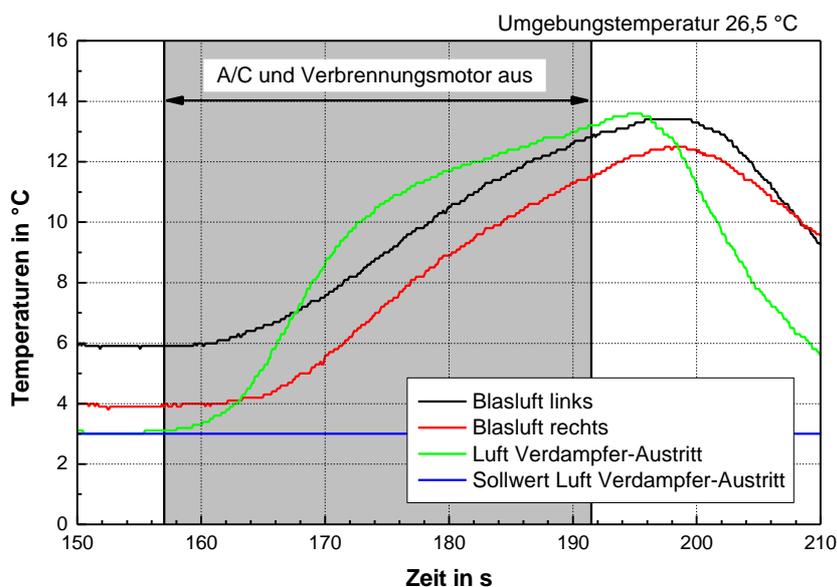


Bild 1: Verhalten von Blasluft- und Fahrgastzellentemperatur während des Fahrzeugstillstands bei einem Fahrzeug mit Start-Stopp-Funktion, ohne Stopp-Klimatisierung (Drehzahl Klimagebläse unverändert).

* Dr.-Ing. Dirk Vollmer, Dr.-Ing. Peter Horstmann, Dr.-Ing. Marcus Kneifel, ROBERT BOSCH GMBH, Stuttgart

Innerhalb der in Bild 1 betrachteten Betriebspause von etwa 35s steigen die Blaslufttemperaturen um etwa 8K an. Mit dieser Temperaturerhöhung ist ein Anstieg der Luftfeuchtigkeit verbunden, der von den Insassen als störend empfunden wurde. Autarke Klimatisierungssysteme zur Standklimatisierung können hier eine echte Komfortverbesserung bieten, da sie prinzipiell die Aufrechterhaltung der Lufteinblastemperaturen auch bei ausgeschaltetem Fahrmotor erlauben.

Je nach Dauer des Fahrzeugstillstands muss beim Begriff Standklimatisierung genauer differenziert werden (siehe Tabelle 1). Bei der Aufrechterhaltung der Fahrgastzellentemperatur während kurzer Fahrtunterbrechungen, wie sie bei Start-Stopp-Betrieb typischerweise auftreten, sprechen wir von Stopp-Klimatisierung. Die eigentliche Standklimatisierung meint die längerfristige Aufrechterhaltung der Fahrgastzellentemperatur, beispielsweise für ein geparktes, aber noch besetztes Fahrzeug. Der Übergang von der Standklimatisierung zur Nachklimatisierung ist fließend. Bei entsprechender Dimensionierung ermöglichen autarke Klimatisierungssysteme prinzipiell auch weitergehende Funktionen wie die Vorklimatisierung des geparkten, unbesetzten Fahrzeugs, die einem weiterhin steigenden Komfortbedürfnis der Fahrzeugnutzer Rechnung trägt.

	Start-/Stopp-Klimatisierung	Vor-, Stand- und Betriebsklimatisierung
Zeitdauer	10...120 s (typisch 40 s)	>> 2 min
Betriebsmodi	- Heizen - Kühlen * - Lüften	- Heizen - Kühlen - Lüften

Tabelle 1: Betriebsmodi des Klimasystems (* in diesem Beitrag behandelt).

Vor-, Stand- und Stopp-Klimatisierung unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der jeweiligen Zeitdauern, als auch hinsichtlich der erforderlichen Leistungen bzw. Energien. Im vorliegenden Beitrag wird im Wesentlichen nur die Stopp-Klimatisierung betrachtet, mit der Beschränkung auf die Teilfunktion Stopp-Kühlung der Fahrgastzelle, d.h. die Bereitstellung von Kälteleistung. Weitere Funktionen wie die Heizung, Belüftung und Entfeuchtung der Fahrgastzelle werden nicht eingehender betrachtet.

Die Verfügbarkeit einer Stopp-Klimatisierung stellt die Mindestanforderung dar, damit Hybridfahrzeuge oder Fahrzeuge mit Start-Stopp-Funktion auch bei ungünstigen Umgebungsbedingungen den Klimatisierungskomfort heutiger konventioneller Fahrzeuge erreichen.

2 Anforderungen an die Standklimatisierung

2.1 Typische Stillstandszeiten im Start-Stopp-Fahrbetrieb

Die zugrunde gelegten Dauern der Fahrtunterbrechungen bei Start-Stopp-Fahrbetrieb haben entscheidenden Einfluss auf die Auslegung des autarken Klimatisierungssystems zur Stopp-Klimatisierung, insbesondere auf die benötigten Energiespeicher. Es ist leicht vorstellbar, dass sich eine typische Zeitdauer nur sehr unscharf angeben lässt und auch keinen allgemeingültigen Charakter besitzt.

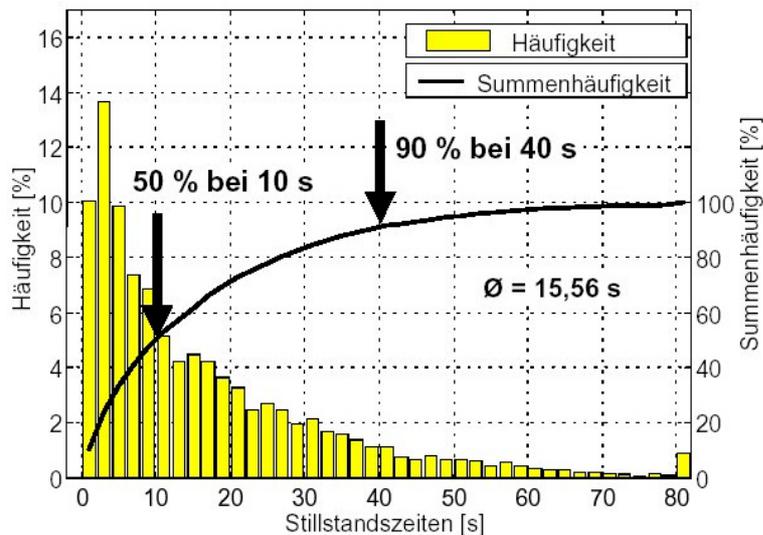
Das Bild 2 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Stillstandszeiten eines Pkw im realen Fahrbetrieb als ein Resultat einer von Bosch in Auftrag gegebenen Studie [4]. Die zugehörigen Daten wurden auf einem 60 km langen Rundkurs im Großraum Stuttgart ermittelt, der von verschiedenen Fahrern zu den verschiedensten Tageszeiten etwa 100mal durchfahren wurde. Gewertet wurden nur Stillstandszeiten ≥ 1 s. Die Fahrer kamen pro Runde durchschnittlich 38mal zum Stillstand. Anhand von Bild 2 kann u.a. abgelesen werden, dass etwa die Hälfte aller Stillstandszeiten maximal 10 s andauern, und dass nur etwa 10 % aller Stillstandszeiten länger als 40 s sind. Die durchschnittliche Stillstandsdauer beträgt hier knapp 16 s. Eine Wiederholung der Studie mit einem Fahrzeug aus einer anderen Fahrzeugklasse ergab nahezu identische Ergebnisse hinsichtlich der typischen Stillstandszeiten.

Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass neben der Dauer einer Fahrtunterbrechung auch deren zeitliche Abfolge bei der Auslegung der Stopp-Klimatisierung zu beachten ist. In bestimmten Fahrsituationen können mehrere kurze Stopps dicht hintereinander erfolgen, z.B. bei einem Ampelhalt. Diese sind dann hinsichtlich der Klimatisierung eher wie eine einzelne längere Fahrunterbrechung zu bewerten, werden aber in Bild 2 jeweils einzeln erfasst. Mit dieser Argumentation verschiebt sich die ermittelte durchschnittliche Stillstandsdauer tendenziell zu größeren Werten.

Der für die Verbrauchs- und Emissionsmessungen in Europa maßgebliche Fahrzyklus MNEFZ¹ ist zur Gewinnung einer durchschnittlichen Stillstandszeit ungeeignet: das Geschwindigkeitsprofil ist synthetisch, und Fahrer- sowie Störeinflüsse sind dadurch eliminiert. Demzufolge ist das Spektrum der Stillstandszeiten im MNEFZ sehr diskret, 86 % der Fahrtunterbrechungen liegen im Bereich 18...21 s, die kürzeste Stillstandszeit beträgt 11 s (7 %), die längste 28 s (7 %).

Welche Stillstandszeit letztendlich als maßgeblich für die Auslegung der Stopp-Klimatisierung ausgewählt wird, hängt von der Fahrzeugklasse und der Einschätzung des Fahrzeugherstellers ab.

¹ MNEFZ: Modifizierter Neuer Europäischer Fahrzyklus



Steckenlänge:	60 km
Innerortanteil:	31 %
Überlandanteil:	18 %
BAB-/Schnellstraßenanteil:	51 %
Max. Neigung:	±8.5 %
Region:	Großraum Stuttgart

Bild 2: Häufigkeitsverteilung der Stillstandszeiten eines Pkw im realen Fahrbetrieb in Deutschland (Quelle: [4]).

2.2 Erforderliche Kälteleistung für eine typische Pkw-Fahrgastzelle bei der Standklimatisierung

2.2.1 Stopp-Klimatisierung

Aufgabe der Stopp-Klimatisierung ist die Aufrechterhaltung der Innenraumtemperatur der bereits abgekühlten Fahrgastzelle bei besetztem Fahrzeug. Aus energetischen Gründen ist es sinnvoll, die Klimaanlage während der Stopp-Klimatisierung im Umluftmodus zu betreiben. Aufgrund der Kurzfristigkeit der Fahrzeugstillstandszeiten ist diese Voraussetzung angemessen. Die durch die autarke Klimaanlage bereitzustellende Kälteleistung muss dann im Wesentlichen den solaren Wärmeeintrag, den Wärmedurchgang durch die Karosserie von außen nach innen sowie die latente und sensible Wärmeabgabe der Insassen kompensieren können.

In Tabelle 2 ist die Abschätzung der Kälteleistungsanforderung für die Stopp-Klimatisierung für einen heißen Sommertag in Süddeutschland erläutert (angenommene Temperaturdifferenz zwischen Fahrgastzelle und Umgebung: 15 K). Bei einem voll besetzten Fahrzeug ergibt sich demnach eine Kälteleistungsanforderung von etwa 3.3 kW als worst-case-Anforderung, bei einem mit nur zwei Personen besetztem Fahrzeug und bedecktem Himmel von etwa 2.2 kW. Ein Richtwert für die bereitzustellende Kälteleistung der Stopp-Klimatisierung liegt demnach bei etwa 2.5 kW. Dieser Wert entspricht auch ungefähr der Kälteleistung, den heutige konventionelle Klimaanlage bei Leerlaufdrehzahl des Antriebsmotors üblicherweise erreichen. Zur Überbrückung einer Fahrtunterbrechung von beispielsweise 40 s ist demnach eine Kälteenergie von 0.03 kWh erforderlich.

Unmittelbar nach Beginn der Fahrtunterbrechung wird der Wärmeeintrag über die Karosserie zunächst durch deren Wärmekapazität gepuffert und ist für die Fahrgastinsassen nicht sofort spürbar. Unter dieser Randbedingung ist vom autarken Klimasystem zunächst nur der Wärmeeintrag durch die Insassen sowie der solare Wärmeeintrag durch die Fenster auszugleichen. Für die kurzfristige Klimatisierung, wie etwa der Stopp-Klimatisierung, wird eine anfängliche Kälteleistungsanforderung von etwa 1 kW als realistisch eingeschätzt. Wann

diese Kälteleistung auf den o.g. höheren Wert gesteigert werden muss, wird u.a. durch die tatsächlichen Umgebungsbedingungen bestimmt.

Szenario:	1.) Heißer Sommertag, wolkenloser Himmel, Pkw voll besetzt	2.) Heißer Sommertag, bedeckter Himmel, Pkw mit 2 Insassen
Solarer Wärmeeintrag:	$\approx 1.25kW$	$\approx 0.75kW$
Wärmedurchgang durch Karosserie:	$(k \cdot A)_{Karosserie} \cdot \Delta T \approx 75 \frac{W}{K} \cdot 15K \approx 1.1kW$	
Latente Wärmeabgabe der Insassen:	$100 \frac{W}{Person} \cdot 5Personen = 0.5kW$	$100 \frac{W}{Person} \cdot 2Personen = 0.2kW$
Sensible Wärmeabgabe der Insassen:	$75 \frac{W}{Person} \cdot 5Personen \approx 0.4kW$	$75 \frac{W}{Person} \cdot 2Personen = 0.15kW$
Summe:	$\approx 3.3kW$	$\approx 2.2kW$

Tabelle 2: Abschätzung der Kälteleistungsanforderungen für die Stopp-Klimatisierung bei einer angenommenen Temperaturdifferenz von 15 K zwischen Umgebung und Fahrgastzelle.

2.2.2 Standklimatisierung

Auch bei der längerfristigen Standklimatisierung ist aus wirtschaftlichen Gründen ein möglichst langer Betrieb des autarken Klimasystems im Umluftmodus anzustreben; jedoch erfordert die Luftqualität in der Fahrgastzelle früher oder später die Zumischung von Außenluft.

Bei Zumischung von Außenluft steigt die erforderliche Kälteleistung gegenüber dem in Abschnitt 2.2.1 genannten Richtwert von 2.5 kW erheblich an. Um eine Größenordnung zu nennen: zur Abkühlung von 150 kg/h Außenluft (entspricht etwa einer unteren bis mittleren Lüfterstufe) von 40 °C, 40 % relativer Luftfeuchte auf 10°C Einblastemperatur ist eine zusätzliche Kälteleistung am Verdampfer von 2.6 kW erforderlich, wobei ca. 50 % dieser Leistung auf die Entfeuchtung entfallen.

2.2.3 Abkühlung des besetzten Fahrzeugs

Der Einbau eines autarken Klimatisierungssystems zusätzlich zur bestehenden konventionellen, d.h. fahrmotorgetriebenen Klimaanlage ist nur für bestimmte Systemansätze sinnvoll. Bei einigen Konzepten ist es naheliegend, dass das autarke Klimatisierungssystem auch die Aufgaben der konventionellen Klimaanlage im Fahrbetrieb übernimmt. Bei der Dimensionierung des autarken Klimasystems ist in diesem Fall auch eine ausreichende Kälteleistung für eine hinreichend dynamische Abkühlung der Fahrgastzelle vorzuhalten. Weiterhin ist die in Abschnitt 2.2.2 bereits angesprochene Zumischung von Außenluft zu berücksichtigen.

Das Bild 3 zeigt die berechnete benötigte Abkühlzeit und Abkühlenergie eines vorher geparkten Pkw nach Fahrtantritt in Abhängigkeit der vorgehaltenen Kälteleistung. Dargestellt ist zum einen die Zeit t_{70} , die bis zur Erreichung der Temperatur T_{70} benötigt wird, sowie die

hierfür erforderliche Kälteenergie. Die Temperatur T_{70} ist dadurch gekennzeichnet, dass die anfängliche Temperaturdifferenz zwischen Fahrgastzelle und Sollwert zu 70 % abgebaut ist. Die Parameter dieser Berechnung entsprechen dem worst-case-Szenario aus Tabelle 2, wiederum wird der reine Umluftbetrieb betrachtet. Gemäß Bild 3 sollte die zur dynamischen Abkühlung der Fahrgastzelle vorgehaltene Kälteleistung aus energetischen Gründen mindestens etwa 5 kW betragen.

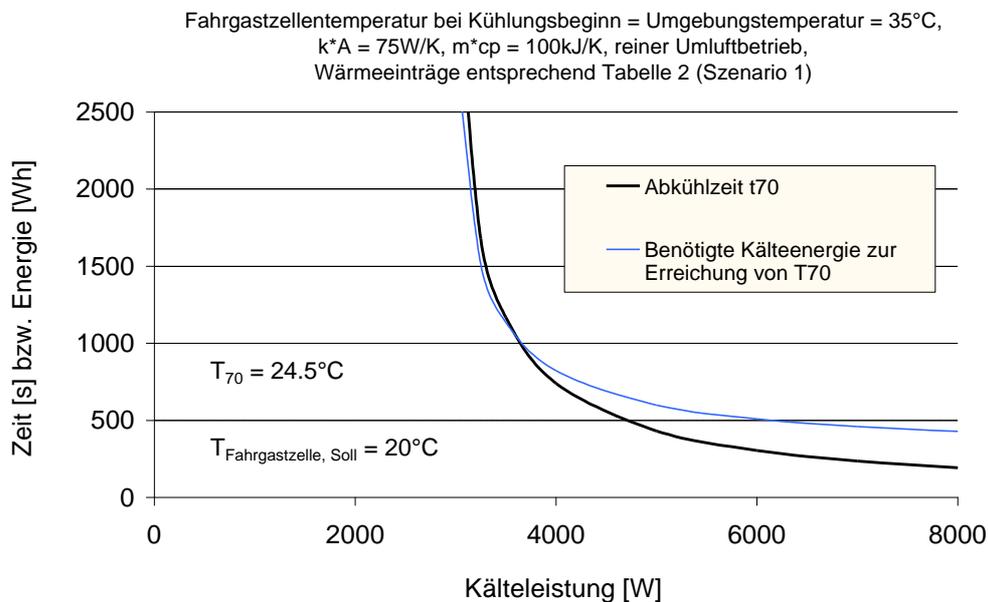


Bild 3: Berechnete benötigte Abkühlzeit und Kälteenergie bis zur Erreichung von T_{70} .

2.3 *Dynamische Anforderungen an ein autarkes Klimasystem zur Stopp-Klimatisierung*

Sofern das autarke Klimasystem zur Stopp-Klimatisierung ein ergänzendes System ist, welches die konventionelle Klimaanlage bei Fahrtunterbrechung ablöst, ist die erforderliche Kälteleistung innerhalb von wenigen Sekunden zu erbringen.

Leistungsreserven für eine dynamische Abkühlung der Fahrgastzelle sind bei diesem Ergänzungssystem nicht vorzuhalten, da die Hauptfunktion der Stopp-Klimatisierung im Wesentlichen auf die Aufrechterhaltung der gegenwärtigen Fahrgastzellentemperatur beschränkt ist.

2.4 *Leistungsbedarf für den Betrieb der Kälteanlage bei Stopp-Klimatisierung einschließlich Luftumwälzung*

Für die Stopp-Klimatisierung ist neben der Bereitstellung von etwa 2.5kW Kälteleistung auch elektrische Leistung für den Betrieb der Lüfter, Pumpen und Ventile notwendig.

Messungen an bestehenden konventionellen Klimaanlage lassen einen elektrischen Leistungsbedarf in der Größenordnung von 0.5 kW erwarten, der bei der Stopp-Klimatisierung ebenfalls unabhängig vom Fahrmotor gedeckt werden muss. Die Aufschlüsselung dieses geschätzten Bedarf ist in Tabelle 3 angegeben.

Ferner ist abhängig vom Gesamtkonzept des autarken Klimasystems gegebenenfalls auch elektrische Leistung für die Erzeugung/Bereitstellung der Kälteleistung selbst erforderlich.

Innenraumgebläse	100 W	(Leistungsbereich bis ca. 400 W)
Kondensatorgebläse (Kühlerlüfter)	250 W	(Leistungsbereich bis ca. 600 W)
Kompressorkupplung	40 W	(falls vorhanden)
Ventile/Sensoren im Kältemittelkreislauf	20 W	(systemspezifisch)
Klima-Steuergerät	10 W	
Zusatzwasserpumpe im Kühlmittelkreislauf für Reheat-Betrieb	20 W	
Summe	440 W	

Tabelle 3: Geschätzter elektrischer Leistungsbedarf eines autarken Klimasystems.

2.5 Wirkungsgradbetrachtung der konventionellen Fahrgastzellenkühlung

2.5.1 Wirkungsgradbetrachtung bei stehendem Fahrzeug

Eine grundsätzlich mögliche Strategie zur Aufrechterhaltung der Fahrgastzellenkühlung während einer Fahrtunterbrechung besteht darin, die Stopp-Funktion des Fahrmotors bei eingeschalteter Klimaanlage einfach zu deaktivieren. Dieser Lösungsweg ist aus Kostengesichtspunkten attraktiv, jedoch aus ökologischer Sicht umstritten. Dennoch soll dieser Ansatz hier genauer betrachtet werden, um eine Bewertungsgrundlage für fahrmotorunabhängige Konzepte zu schaffen.

Für die Betrachtung wird vorausgesetzt, dass der Verbrennungsmotor während des Fahrzeugstillstands mit Leerlaufdrehzahl und ausschließlich für den Betrieb des Klimasystems arbeitet.

Konventionelle, fahrmotorabhängige Klimasysteme verfügen in der Regel über einen Hubkolbenverdichter, dessen Verdrängungsvolumen steuerbar ist. Die Leistungsziffer (Coefficient of Performance COP) der Kälteanlage ist stark von den jeweiligen Betriebsbedingungen abhängig, ganz wesentlich auch von dem Wertepaar Antriebsdrehzahl und eingeregelmtem Verdrängungsvolumen. Für Absolutwerte des COP finden sich in der Literatur zum Teil recht unterschiedliche Angaben, auch bei vergleichbaren Betriebsbedingungen. Dies lässt vermuten, dass die Güte der heute in Fahrzeugen vorhandenen Kälteanlagen uneinheitlich ist, weshalb Richtwerte für den COP nur schwer zu formulieren sind.

Derzeitig ausgeführte Klimaanlage können die für die Stopp-Klimatisierung geforderte Kälteleistung von 2.5 kW bereits bei Leerlaufdrehzahl des Verbrennungsmotors erzeugen. Bei dieser Drehzahl und Kälteleistung arbeitet der Verdichter mit maximalem Verdrängungsvolumen und deshalb mit einem günstigen Wirkungsgrad. Innerhalb der hier durchgeführten Betrachtung wird für diesen Betriebsfall ein COP von etwa 2 angenommen. Dieser Wert wurde aus Messungen an einem etwas älteren Versuchsträger ermittelt². In der Literatur fin-

² Fahrzeugalter ca. 3 Jahre.

den sich zum Teil ähnliche Werte (z.B. in [5]), aber auch signifikant höhere Werte (z.B. in [6]). Bei verbesserten R134a-Anlagen und CO₂-Anlagen ergeben sich insgesamt ähnliche Werte, mit leichten Vorteilen für CO₂ als Kältemittel (siehe z.B. in [6]).

Bei dem angenommenen COP von 2 belastet der mechanisch angetriebene Klimakompressor den Verbrennungsmotor mit etwa 1.25 kW effektiver Leistung. Die Erzeugung der benötigten elektrischen Leistung von 0.5 kW belastet den Verbrennungsmotor zusätzlich mit etwa 0.9 kW (der Generatorwirkungsgrad wurde für diesen Betriebspunkt mit 0.55 angenommen). In Summe wird der Verbrennungsmotor durch den Betrieb der Klimaanlage mit etwa 2.2 kW an der Kurbelwelle mechanisch belastet.

Da laut Voraussetzung der Verbrennungsmotor bei stehendem Fahrzeug ausschließlich für den Betrieb der Klimaanlage betrieben wird, muss sein absoluter Wirkungsgrad für den erforderlichen Primärenergieeinsatz herangezogen werden. Der Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors ist u.a. stark von dessen Betriebspunkt (Drehzahl und Last) abhängig. Generell liegt der Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors bei Leerlaufdrehzahl und niedriger Motorlast verglichen mit dem Bestpunkt sehr ungünstig. Der jeweilige Absolutwert ist zudem immer motorspezifisch, da wesentlich vom Motorkonzept und der Motorkonstruktion bestimmt. An einem großvolumigen Common-Rail-Dieselmotor der neuesten Generation wurde bei einer mechanischen Last von 2 kW bei Leerlaufdrehzahl ein Wirkungsgrad von 19 % bestimmt, an einem modernen Otto-Motor ähnlicher Nennleistung ein Wirkungsgrad von 14 %. Diese beiden Wirkungsgrade werden hier als Randbedingungen der Abschätzung angenommen.

Unter Voraussetzung der genannten Motorwirkungsgrade ergibt sich rechnerisch eine auf den Primärenergieeinsatz bezogene Effizienz der Standklimatisierung bei laufendem Verbrennungsmotor von etwa 16 % (Ottomotor) bis 22 % (Dieselmotor):

$$h_{\text{Stoppkühlung, Dieselmotor}} = \frac{\text{Kälteleistung}}{\text{Kraftstoffleistung}} = \frac{\text{Kälteleistung}}{\text{Kurbelwellenleistung} / h_{\text{Motor}}} \approx 0.22$$

$$h_{\text{Stoppkühlung, Ottomotor}} = \frac{\text{Kälteleistung}}{\text{Kraftstoffleistung}} = \frac{\text{Kälteleistung}}{\text{Kurbelwellenleistung} / h_{\text{Motor}}} \approx 0.16$$

In dieser Abschätzung wurde der Wirkungsgrad des Riementriebes berücksichtigt. Ein autarkes Klimasystem muss bei der Stopp-Klimatisierung eine höhere Gesamteffizienz als 16 % (beim Ottomotor) bzw. 22 % (beim Dieselmotor) aufweisen, damit dieses System ökonomisch und ökologisch sinnvoll ist.

Das Bild 4 zeigt das zugehörige Leistungsflussdiagramm für die Stopp-Klimatisierung mit laufendem Verbrennungsmotor.

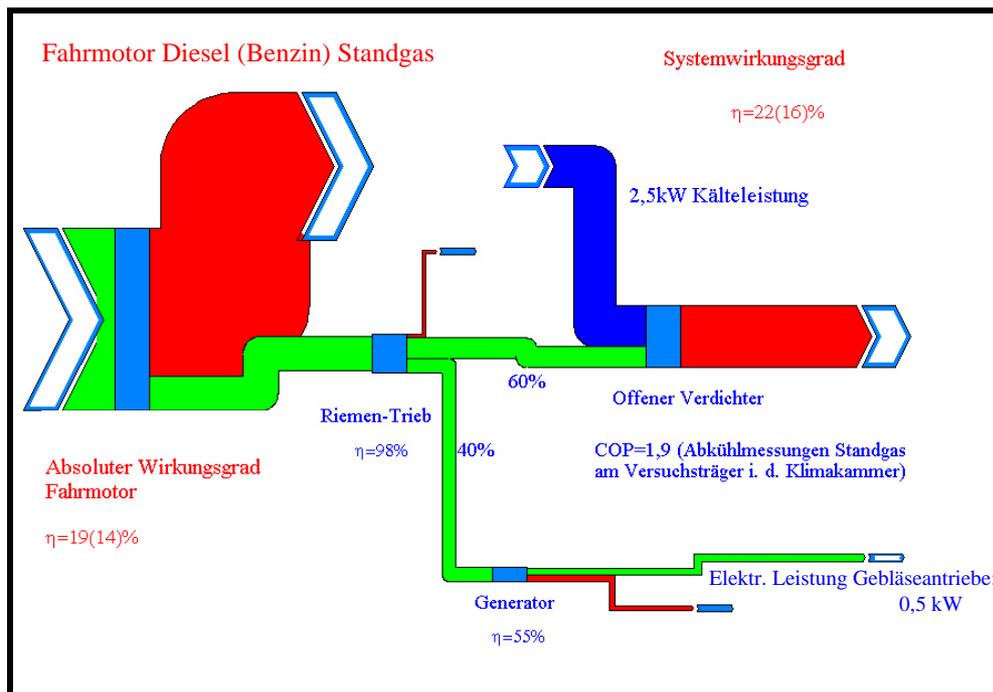


Bild 4: Leistungsflussdiagramm und Wirkungsgradkette für die Stopp-Klimatisierung mit laufendem Verbrennungsmotor (Leerlaufdrehzahl). Klammerwerte gelten für den Benzinmotor.

2.5.2 Wirkungsgradbetrachtung bei bewegtem Fahrzeug

Je nach Fahrzeugkonzept ist es vorstellbar, dass das autarke Klimatisierungssystem auch zur Klimatisierung des bewegten Fahrzeugs eingesetzt wird. Für diesen Fall ist die Betrachtung der konventionellen Fahrgastzellenkühlung als Bewertungsgrundlage erforderlich. Das autarke Klimasystem sollte dann auch im Fahrbetrieb mindestens die Effizienz der konventionellen, fuhrmotorgetriebenen Klimaanlage (Referenzwert) erreichen.

Im Wesentlichen sind es zwei veränderte Randbedingungen, die zu einer unterschiedlichen Gesamteffizienz der Fahrgastzellenkühlung bei stehendem und bewegtem Fahrzeug führen. Zum einen ist aufgrund der im Fahrbetrieb im Mittel höheren Motordrehzahl von einem verschlechterten COP der Kälteanlage auszugehen. Für die nachfolgende Betrachtung wird bei bewegtem Fahrzeug ein COP von 1.5 angenommen. Dies ist ebenfalls ein Wert, der für eine mittlere Drehzahl aus Fahrzeugmessungen ermittelt wurde.

Der zweite wichtige Unterschied liegt in der Tatsache begründet, dass die für den Betrieb der Klimaanlage erforderliche mechanische Kurbelwellenleistung bei bewegtem Fahrzeug eine Zusatzleistung darstellt, während sie bei stehendem Fahrzeug die alleinige Motorlast darstellt.

Bei bewegtem Fahrzeug stellt die für den Vortrieb benötigte Antriebsleistung die primäre Last des Verbrennungsmotors dar. Die für den Betrieb der Nebenaggregate, also auch der Klimaanlage, benötigte Mehrleistung führt zu einem Mehrverbrauch, der über den differentiellen Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors abschätzbar ist. Der differentielle Wirkungsgrad berechnet sich als Quotient aus der zusätzlichen effektiven Kurbelwellenleistung und dem zusätzlichen Kraftstoffdurchsatz:

$$h_{diff} = \frac{\Delta P_{eff, Zusatz}}{\Delta \dot{m}_{fuel} \cdot h_{u, fuel}}$$

Der nominelle Wert des differentiellen Wirkungsgrads liegt über dem absoluten Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors und schwankt je nach Betriebspunkt zwischen 40...50 %. Für die folgenden Betrachtungen wird für Otto- und Dieselmotor von einem durchschnittlichen differentiellen Wirkungsgrad von 45 % ausgegangen.

Unter Zugrundelegung eines durchschnittlichen differentiellen Wirkungsgrades von 45 % und eines COPs von 1.5 ergibt sich für die konventionelle Fahrgastzellenkühlung bei bewegtem Fahrzeug eine Gesamteffizienz (Kälteleistung zu Primärenergieeinsatz) von ca. 43 %. In Bild 5 ist das Leistungsflussdiagramm und die Wirkungsgradkette für diesen Betriebsfall dargestellt.

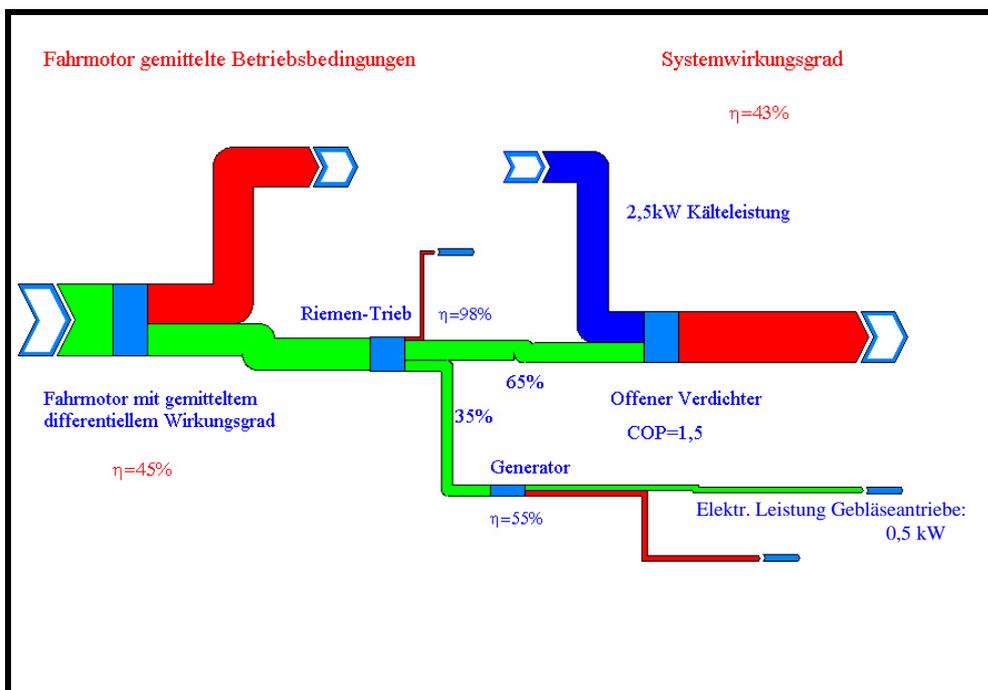


Bild 5: Leistungsflussdiagramm und Wirkungsgradkette der konventionellen Fahrzeugklimatisierung bei bewegtem Fahrzeug für gemittelte Betriebsbedingungen.

2.5.3 Folgerungen

Die Wirkungsgradbetrachtungen zur konventionellen, durch den Verbrennungsmotor betriebenen Fahrgastzellenkühlung erlauben zwei wesentliche Folgerungen:

1. Der untere Referenzwert für den Systemwirkungsgrad bzw. die Gesamteffizienz einer autarken Standklimatisierung beträgt ca. 22 %. Andernfalls ist es im Hinblick auf den Primärenergieeinsatz günstiger, den Verbrennungsmotor während des Fahrzeugstillstands weiterlaufen zu lassen und die Fahrgastzellenkühlung auf konventionelle Weise zu betreiben.
2. Soll das autarke Klimasystem neben der Standklimatisierung auch während des Fahrbetriebs zur Fahrgastzellenkühlung eingesetzt werden, so liegt der untere Referenzwert für den Systemwirkungsgrad bei ca. 43 %.

3 Klimatisierungssysteme für die autarke Fahrgastzellenkühlung

Wirtschaftlichkeit, Kosten, Leistungsdichte, Dynamik sowie Einsatz etablierter Technik machen den heutigen vom Fahrmotor angetriebenen R134a-Kaltdampfprozess zu einer ersten Wahl für die Fahrgastzellenklimatisierung während der Fahrt. Ähnliches kann beim Übergang zu CO₂ als Kältemittel erwartet werden. Diese Gründe empfehlen den Kaltdampfprozess auch als Basis für autarke Klimasysteme; dennoch wurden auch Nicht-Kaltdampfprozesse in die Betrachtungen mit einbezogen und evaluiert.

Vor dem Hintergrund von Fahrzeugen mit Start-Stopp-Funktion oder komplexeren Hybridantrieben, die über mindestens eine leistungsstarke E-Maschine verfügen, ist eine eingehende Betrachtung der elektrischen Klimatisierung naheliegend. Die elektrische Klimatisierung bildet deshalb den inhaltlichen Schwerpunkt innerhalb dieses Abschnitts, auf die weiterhin betrachteten Klimatisierungssysteme wird nur am Rande eingegangen.

3.1 Elektrischer Antrieb des Klimakompressors

Ein autarkes Klimatisierungssystem mit elektrischem Kompressorantrieb ist hochdynamisch und steht während der Stopp-Phasen sofort zur Verfügung.

Bei dem hier betrachteten System wird der Kompressor des ansonsten konventionell aufgebauten Klimasystems elektrisch angetrieben. Es wird unterstellt, dass die eigentliche Verdichtereinheit des elektrischen Klimakompressors gegenüber der des konventionellen Klimasystems unverändert ist.

3.1.1 Klimatisierung mit wahlweise elektrischem oder mechanischem Verdichterantrieb

Es ist ein naheliegender Ansatz, den Klimakompressor nur während der Stopp-Phasen elektrisch anzutreiben und das Klimasystem ansonsten konventionell zu belassen, d.h. während des Fahrbetriebs mechanisch anzutreiben.

Eine besonders vorteilhafte Anordnung für ein solches Klimasystem besteht aus einer Starter-Generator-Einheit, die gemeinsam mit dem Klimakompressor auf einer Welle sitzt. Im Fahrbetrieb treibt der Fahrmotor (hoher differentieller Wirkungsgrad) den Generator und den Verdichter an. Im Standbetrieb wird der Kraftfluss zwischen Starter-Generator und Fahrmotor unterbrochen; der Kompressor wird nun vom Starter-Generator angetrieben und aus der Batterie gespeist.

Bei diesem Systemansatz ist die Kompressordrehzahl im Standbetrieb variabel einstellbar, während des Fahrbetriebs aber starr mit der Fahrmotordrehzahl gekoppelt. Als Stellgröße für die Kälteleistung ist deshalb auch ein variables Verdrängungsvolumen des Kältemittelverdichters erforderlich.

3.1.1.1 Stand-/Stoppklimatisierung: elektrischer Klimakompressor aus Batterie gespeist

Für die Effizienzbewertung dieses Systemansatzes sind mehrfache Energieumwandlungen sowie die Speicherung zu betrachten. Die Kette besteht aus:

- der Umwandlung mechanischer in elektrische Energie und deren Speicherung während der Fahrt,
- der Rückumwandlung von elektrischer in mechanische Energie für den Antrieb des Klimakompressors während des Fahrzeugstillstands,
- der Wandlung von mechanischer in thermische Kälteenergie zur Fahrgastzellenkühlung.

Für das Verhältnis von Kälteleistung zu mechanischer Kompressorwellenleistung (COP_{mech}) wird wiederum 1.9 angenommen. Für den elektrischen Antrieb des Klimakompressors kann ein Wirkungsgrad von ca. 0.8 angenommen werden. Bei einer Kälteleistungsanforderung von 2.5 kW resultiert daraus eine erforderliche elektrische Leistung von etwa 2.2 kW (einschließlich Lüfter, etc.). Eine solche Leistung kann im 14 V-Bordnetz unter Verwendung einer Bleibatterie nicht mehr sinnvoll dargestellt werden, der Übergang auf eine höhere Spannungsebene sowie ein Hochstromspeicher wird erforderlich. Der Batteriewirkungsgrad (Laden/Entladen) für Hochstromspeicher liegt derzeit bei ca. 75 %, für die Zukunft werden bis zu 90% prognostiziert (NiMH-Systeme). Für die Erzeugung der elektrischen Energie kann ein Generatorwirkungsgrad von ca. 55...70 % angenommen werden.

Aus Gründen der Effizienz sollte die für die Stopp-Klimatisierung erforderliche elektrische Energie vollständig während der Fahrt erzeugt und gespeichert werden (→ differentieller Wirkungsgrad des Fahrmotors).

Das Bild 6 zeigt das Leistungsflussdiagramm für diesen Systemansatz. Je nach Generatorwirkungsgrad und Lade-/Entladeeffizienz der Batterie ergibt sich eine Gesamteffizienz für die Stopp-Klimatisierung von etwa 22...33 %.

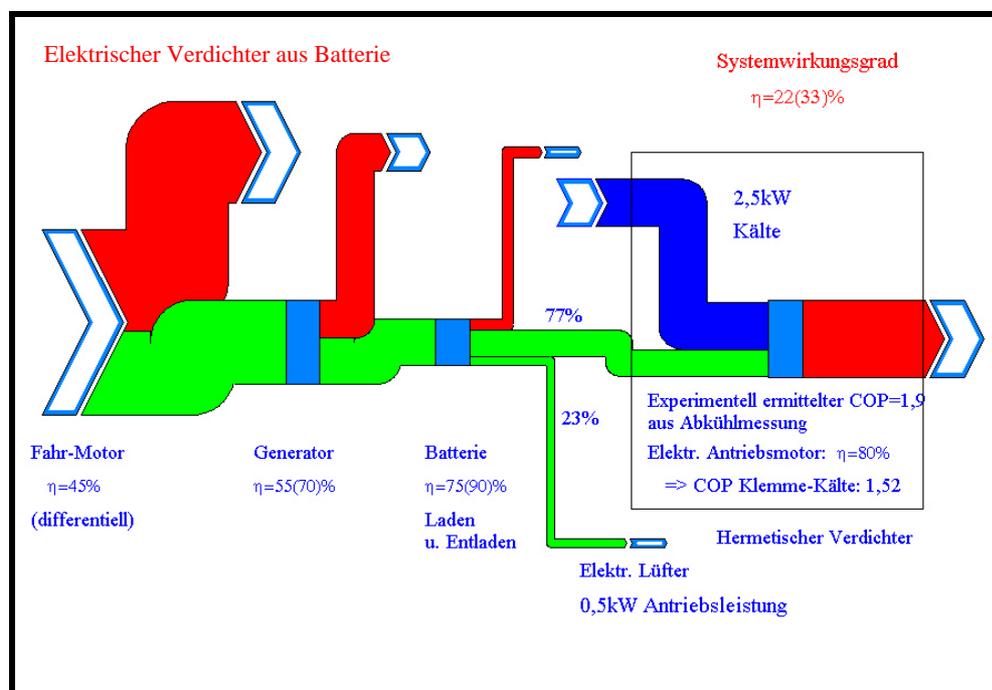


Bild 6: Leistungsflussdiagramm und Wirkungsgradkette der Stopp-Klimatisierung beim Systemkonzept „wahlweise elektrischer oder mechanischer Verdichterantrieb“. Klammerwerte stellen Wirkungsgradpotenzial mit optimierten Komponenten dar.

3.1.1.2 Bewegtes Fahrzeug: Klimakompressor mechanisch durch Fahrmotor angetrieben

Bei bewegtem Fahrzeug verhält sich das Klimasystem exakt wie ein konventionelles Klimasystem in heutigen Fahrzeugen, d.h. der Klimakompressor wird mechanisch durch den Fahrmotor angetrieben. Dieser Fall wurde bereits in Abschnitt 2.5.2 betrachtet, die Gesamteffizienz der Fahrgastzellenkühlung wurde dort zu ca. 43 % ermittelt.

3.1.2 Klimatisierung mit rein elektrischem Kompressorantrieb

Der wesentliche Aspekt des ausschließlich elektrischen Kompressorantriebs ist die vollständige Entkopplung von der Drehzahl des Fahrmotors in jedem Betriebszustand. Ein Klimakompressor mit steuerbarem Verdrängungsvolumen ist damit nicht mehr erforderlich, zur Einstellung der gewünschten Kälteleistung ist die Kompressordrehzahl allein ausreichend. Dies erlaubt einen vereinfachten Aufbau des Verdichters.

Zusätzliche Vorteile und Wirkungsgradpotenziale bietet die Bauart eines Hermetikverdichters. Diese Vorteile sind u.a. Entfall von Reibleistung und Leckage der Wellendichtung, sowie Kühlung des Elektromotors und ggf. der Leistungselektronik durch das Kältemittel.

3.1.2.1 Stand-/Stoppklimatisierung: elektrischer Klimakompressor aus Batterie gespeist

Dieser Fall entspricht prinzipiell dem in Abschnitt 3.1.1.1 betrachteten Fall (Gesamteffizienz der Stopp-Klimatisierung etwa 22...33 %), allerdings kann hier von einer tendenziell verbesserten Gesamteffizienz aufgrund des veränderten Klimakompressors ausgegangen werden.

3.1.2.2 Bewegtes Fahrzeug: elektrischer Klimakompressor vom Fahrmotor gespeist

Bei entsprechender Systemauslegung wird das autarke Klimasystem ausschließlich vom Fahrmotor gespeist, d.h. die Verluste durch die Zwischenspeicherung von elektrischer Energie in der Batterie werden vermieden.

Unter Zugrundelegung der gleichen Wirkungsgrade wie in Abschnitt 3.1.1.1 (Stopp-Klimatisierung mit elektrischem Kompressorantrieb) ergibt sich je nach Generatorwirkungsgrad eine Gesamteffizienz der Fahrgastzellenkühlung von 28...36 %.

Auch hier kann aufgrund des veränderten Klimakompressors tendenziell von einer eher höheren Gesamteffizienz ausgegangen werden.

3.2 Weitere Ansätze zur autarken Fahrgastzellenkühlung

Im Rahmen der Konzeptfindung und –bewertung wurden auch die nachfolgend aufgeführten weiteren Ansätze zur autarken Fahrgastzellenkühlung betrachtet:

- Photovoltaische Unterstützung der elektrischen Standklimatisierung.
- Einbindung eines Latentwärmespeichers.
- Zusätzlicher Verbrennungsmotor zum direkten Antrieb eines leistungsgeregelten R134a-Hubkolbenkompressors und eines drehzahloptimierten Generators.
- Mehrere Ansätze zum Gaskreisprozess:
 - Duplex-Stirling-System (Stirling-Motor und -Kältemaschine),
 - Stirling-Motor als Kompressorantrieb im R134a-Kältemittelkreislauf,
 - Stirling-Motor plus elektrischer Starter/Generator und elektrischer Klimakompressor.
- Brennstoffzelle und elektrischer Klimakompressor.
- Absorptionskälteprozess.

Auf eine ausführliche Diskussion dieser Systeme soll hier verzichtet werden, die abgeleitete Einschätzung der jeweiligen Gesamteffizienz ist im Bild 7 (Abschnitt 3.3) verdichtet und kommentarlos dargestellt.

3.3 Energetische Beurteilung der betrachteten autarken Klimasysteme

Das Bild 7 gibt einen komprimierten Überblick über die Ergebnisse der Effizienzbewertung der in Abschnitt 3 betrachteten autarken Systeme zur Stopp-Klimatisierung. Als Bewertungsgrundlage ist auch die Effizienz der konventionellen, fahrmotorgetriebenen Fahrgastzellenkühlung bei stehendem Fahrzeug (Leerlauf) und während der Fahrt aufgetragen. Die Effizienz der Stopp-Klimatisierung mit laufendem Verbrennungsmotor („Fahrmotor (Diesel), stehendes Fahrzeug“) bildet den unteren Referenzwert, der von den alternativen Systemen erreicht werden sollte.

Der dargestellte obere Referenzwert gilt für die Klimatisierung während des Fahrbetriebs; er wird durch die konventionelle, fahrmotorgetriebene Fahrgastzellenkühlung markiert. Die schräg schraffierten Bereiche kennzeichnen die abgeschätzten Verbesserungspotenziale der einzelnen Systeme. Die Pfeile deuten eventuelle zusätzliche Potenziale durch einen veränderten Klimakompressor an.

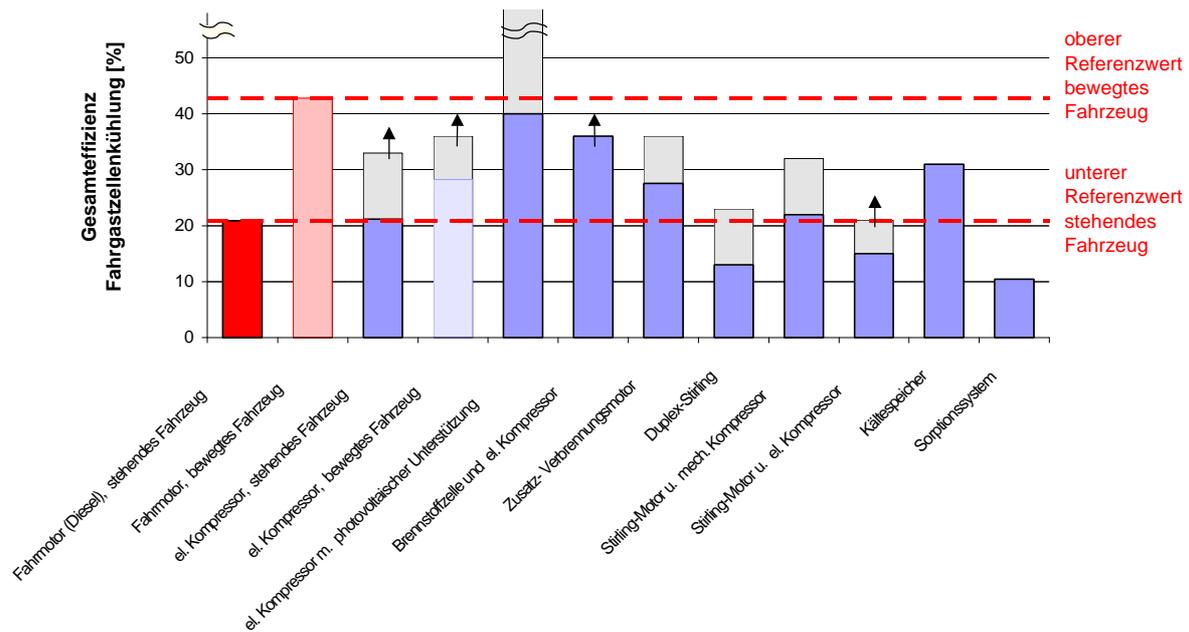


Bild 7: Energetische Beurteilung verschiedener Konzepte zur Stopp-Klimatisierung.

Aus Bild 7 geht hervor, dass einige autarke Klimasysteme bei der Standklimatisierung energetische Vorteile gegenüber der konventionellen Fahrgastzellenkühlung aufweisen. Keines dieser autarken Klimasysteme ist aber der konventionellen Fahrgastzellenkühlung während des Fahrbetriebs überlegen³. Nur das System bestehend aus Brennstoffzelle und elektrischem Klimakompressor bietet nach Bild 7 ein eindeutiges Potenzial, die Effizienz der konventionellen Klimaanlage im Fahrbetrieb zu übertreffen.

Basierend auf diesem Ergebnis besteht aktuell die energetisch attraktivste Lösung aus einem System, bei dem die Fahrgastzellenkühlung während des Fahrbetriebs weiterhin konventionell erfolgt, d.h. der Klimakompressor während der Fahrt mechanisch angetrieben wird. Die flexibelste Gesamtlösung ergibt sich mit einem wahlweise elektrisch oder mechanisch angetriebenem Klimakompressor. Zusätzliche Solarzellen auf dem Fahrzeugdach können die Erzeugung der erforderlichen elektrischen Energie bzw. die Batterieladung unterstützen und die Gesamteffizienz der Stopp-Klimatisierung mit diesem System – bei hohen Systemkosten – erheblich verbessern.

Bosch hat aus den vorgenannten Gründen das Konzept eines wahlweise mechanisch oder elektrisch angetriebenen Klimakompressors zur autarken Fahrgastzellenkühlung intensiver untersucht. Im folgenden Abschnitt 4 werden zwei hybride Antriebskonzepte eingehender vorgestellt, die über eine derartige Stopp-Klimatisierung verfügen:

1. Verbrennungsmotor mit riemengetriebenem Startergenerator und von der Kurbelwelle trennbarer Riemenscheibe und
2. Fahrzeug mit leistungsverzweigendem Dual-E-Getriebe („Power Split Hybrid“)

Beide Antriebskonzepte wurden in Versuchsträgern umgesetzt. Die Klimaanlage wurde in beiden Fällen mit CO₂ als Kältemittel ausgeführt. Beim Versuchsträger 2 ist zusätzlich ein Betrieb der Klimaanlage im Wärmepumpenmodus (Stand- bzw. Zuheizfunktion) möglich.

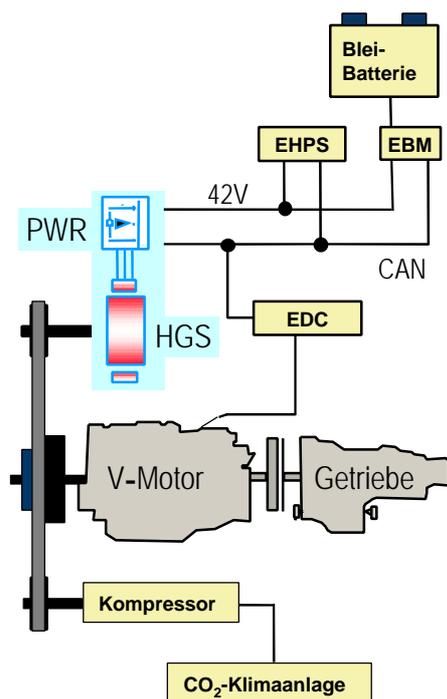
³ Nicht alle der betrachteten autarken Klimasysteme sind für eine Klimatisierung im Fahrbetrieb geeignet.

4 Vorstellung zweier Hybridkonzepte

4.1 *Verbrennungsmotor mit riemengetriebenem Startergenerator und von der Kurbelwelle trennbarer Riemenscheibe*

In Bild 8 ist das Antriebskonzept des ersten Versuchsträgers schematisch dargestellt. Die wesentlichen Merkmale dieses Konzepts sind der Verbrennungsmotor mit riemengetriebenem Startergenerator zur Darstellung der Start/Stopp-Funktion sowie die von der Kurbelwelle trennbare Riemenscheibe, um die elektrische Stand- bzw. Stopp-Klimatisierung zu ermöglichen. Im Fahrbetrieb besteht eine starre Kopplung zwischen Fahrmotor- und Kompressor-drehzahl, wohingegen der Kompressor im Standklimatisierungsbetrieb mit variablen Drehzahlen betrieben werden kann.

Dieses Antriebskonzept macht ein Fahrzeug noch nicht zum Hybridfahrzeug. Erst wenn zusätzlich der Verbrennungsmotor elektromotorisch unterstützt oder Bremsenergie elektrisch rekuperiert wird, kann von einem milden Hybridkonzept gesprochen werden. Beides ist auch bei riemengetriebenem Startergenerator und 42V-Bordnetz in begrenztem Umfang möglich. Bei dem Versuchsträger 1 liegt streng genommen kein Hybridfahrzeug vor, da die Funktionen elektrisches Boosten und Bremsenergieerikuperation nicht realisiert wurden.



- Motor Start - Stopp
- Startergenerator am Riemen HGS
- Kurbelwellen-Riemenscheibe mit zusätzlicher Startübersetzung
- Standklimatisierung, elektrisch-mechanisch angetrieben (Riemenscheibe von Kurbelwelle trennbar)
- CO₂ – Klimaanlage
- Pulswechselrichter PWR
- 14/42V Bordnetz
- Elektronisches Batteriemanagement EBM
- Elektrohydraulische Lenkung EHPS
- Motorsteuergerät EDC

(El. Boosten und Rekuperation von Bremsenergie am Versuchsträger nicht realisiert.)

Bild 8: Antriebskonzept des Versuchsträgers 1 mit Einbindung des Klimasystems.

4.2 *Leistungsverzweigendes Dual-E-Getriebe („Power Split Hybrid“)*

Dieser zweite Versuchsträger wurde im Rahmen eines Entwicklungsprojektes aufgebaut, welches eine möglichst ganzheitliche Betrachtung des Energiemanagements im Kraftfahrzeug verfolgte: COMET – Control of Mechanical, Electrical and Thermal Power [7]. Die Ver-

netzung, d.h. koordinierte Steuerung aller Energieströme ergibt dabei neue Funktionen und Potenziale. Als wesentliche Ziele für das innovative Fahrzeugkonzept sind eine gute Fahrbarkeit und ein hoher Insassenkomfort bei gleichzeitiger Verbrauchsminderung unter Berücksichtigung der Emissionsgrenzwerte zu nennen. Bei der Entwicklung wurde eine hohe Systemkomplexität bewusst in Kauf genommen, um hinsichtlich der Potenziale den Bereich des Möglichen auszuloten.

Das wesentliche Merkmal des COMET-Fahrzeugkonzepts ist der Antriebsstrang, gekennzeichnet durch einen Verbrennungsmotor mit leistungsverzweigendem Dual-E-Getriebe. Wichtige Eigenschaften hinsichtlich des Verbrauchs- und Emissionsverhaltens sind:

- Automatisches Start-Stopp-System,
- Regeneratives Bremsen,
- Thermomanagement,
- Betrieb des Verbrennungsmotors bei optimiertem Arbeitspunkt,
- Bedarfsgerechte Steuerung der Nebenaggregate.

Hinsichtlich des Komforts sind folgende Aspekte bzw. Funktionen zu nennen:

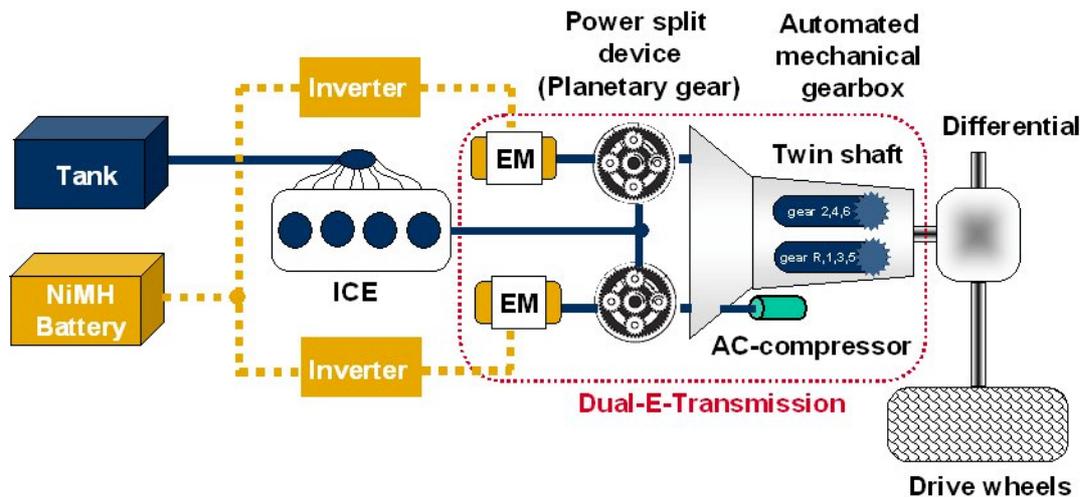
- Komfortstart des Verbrennungsmotors,
- Elektrisches Anfahren und Kriechen,
- Stufenlose Getriebeübersetzung,
- Erhöhtes Antriebsmoment durch Arbeitspunktverschiebung des Verbrennungsmotors und elektrisches Boosten.
- Elektrische Standheizung und –klimatisierung.
- Leistungsstarkes Bordnetz.

In Bild 9 ist das Antriebskonzept des COMET-Fahrzeugs schematisch dargestellt. Das Bild 10 zeigt ergänzend die wesentlichen Elemente des leistungsverzweigenden Dual-E-Getriebes sowie beispielhaft den Leistungsfluss im Hybridbetrieb. Die Leistung des elektrischen Bordnetzes kann durch Gewichtung der beiden E-Maschinen gesteuert werden.

Bedingt durch das leistungsverzweigende Dual-E-Getriebe kann der Klimakompressor wahlweise mechanisch, elektrisch oder kombiniert angetrieben werden. Im Fahrbetrieb ist weiterhin eine Korrelation zwischen Kompressor- und Fahrmotordrehzahl vorhanden, auch wenn hier prinzipiell die Kompressordrehzahl bei gegebener Fahrzeuggeschwindigkeit in Grenzen variiert werden könnte⁴. Das Klimasystem benötigt deshalb neben der Kompressordrehzahl in jedem Fall eine zweite Stellgröße zur Steuerung der Kälteleistung.

Im elektrischen Standklimatisierungsbetrieb kann der Klimakompressor naturgemäß mit beliebiger Drehzahl betrieben werden.

⁴ Diese Möglichkeit zur eventuellen Optimierung des Klimaanlagebetriebes wurde beim Versuchsträger nicht genutzt.



- Riemenfreier Verbrennungsmotor
- Automatisiertes Dual-E-Getriebe mit zwei Elektromaschinen (stufenlose Übersetzung)
- NiMH Hochleistungsbatterie
- 14/42V Bordnetz
- Elektrohydraulische Servolenkung
- Elektrohydraulische Bremse
- Thermomanagement
- CO₂-Klimaanlage, elektrisch-mechanisch angetrieben, auch Wärmepumpenmodus

Bild 9: Antriebskonzept und Einbindung Klimasystem.

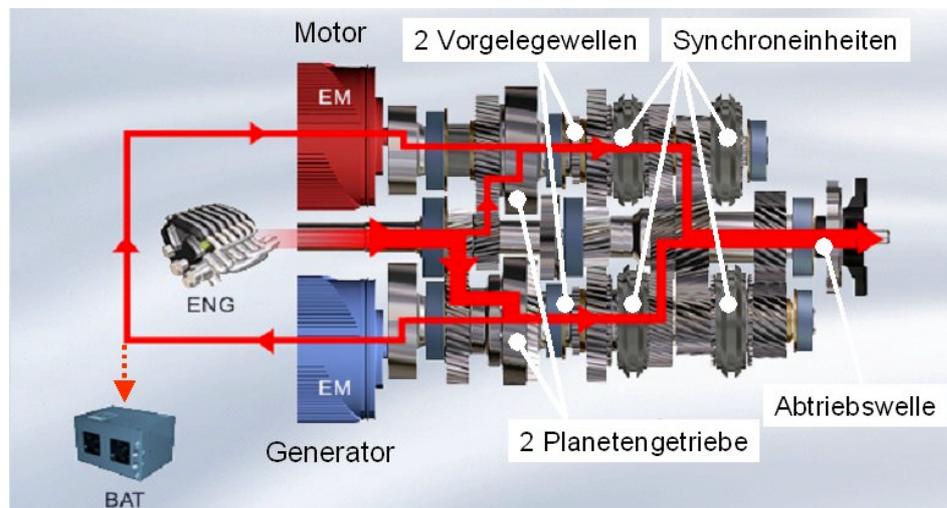


Bild 10: Elemente des Dual-E-Getriebes mit Leistungsfluss im Hybridbetrieb.

5 Messergebnisse

Trotz der Verschiedenheit der Fahrzeugkonzepte ist die Darstellung der Standklimatisierungsfunktion bei beiden Versuchsträgern als energetisch und konzeptionell gleichwertig einzustufen. Bei beiden Versuchsträgern ist die Klimaanlage als CO₂-Anlage aufgebaut, bei beiden Fahrzeugen wird die Klimaanlage während des Fahrzeugstillstands elektrisch angetrieben und aus der Batterie gespeist, und beide Fahrzeuge verfügen über einen Hubkolbenverdichter als Klimakompressor. Die im Detail unterschiedliche Realisierung in den beiden Versuchsträgern führt zu leichten Verschiebungen in der Energiebilanz während der Stand-

bzw. Stopp-Klimatisierung (siehe Abschnitt 5.2). Ein weiterer Unterschied zwischen beiden Klimasystemen besteht darin, dass die Klimaanlage des Versuchsträgers 2 auch im Wärmepumpenmodus betrieben werden kann.

Die durchgeführten und im folgenden gezeigten Messungen beschränken sich auf Messungen zum Nachweis der Funktionsfähigkeit und auf die Ermittlung von Leistungsbilanzen in unterschiedlichen Betriebszuständen.

5.1 Fahrtunterbrechung mit / ohne Stopp-Klimatisierung

Das Bild 11 zeigt Ergebnisse aus Fahrzeugmessungen zur Stopp-Klimatisierung. Dargestellt sind einige wesentliche Temperaturen des Klimasystems während einer Fahrtunterbrechung an einem Sommertag bei etwa 27 °C Umgebungstemperatur. Die folgenden drei Situationen sind dort gegenübergestellt:

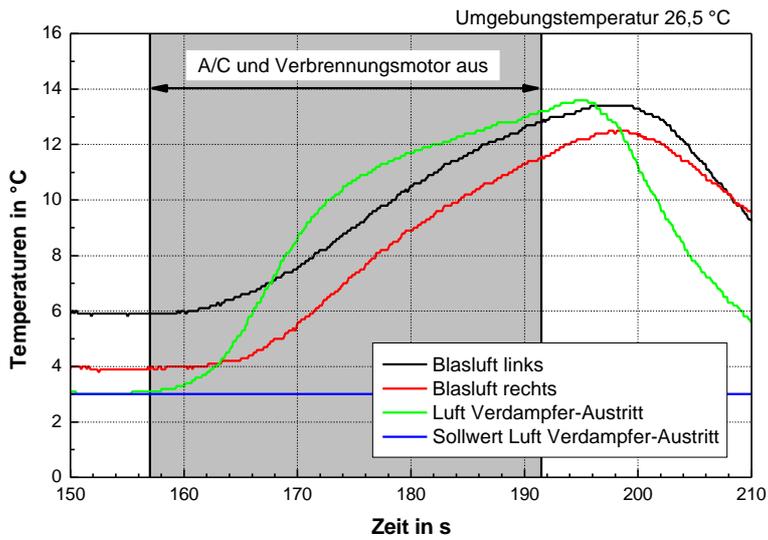
- Fahrtunterbrechung ohne Stopp-Klimatisierung (A/C aus),
- Fahrtunterbrechung mit Stopp-Klimatisierung im reinen Außenluftbetrieb und
- Fahrtunterbrechung mit Stopp-Klimatisierung im reinen Umluftbetrieb.

Wie in Bild 11 ersichtlich ist, wird die Stopp-Klimatisierung jeweils erst nach einer vorgegebenen Karenzzeit nach Motor-Aus aktiviert. Diese Karenzzeit ist bei den realisierten Hybridkonzepten aus steuerungstechnischen Gründen erforderlich, um den Stopp-Betrieb sicher vom Fahrbetrieb zu unterscheiden. Das obere Teilbild in Bild 11 zeigt nochmals das Bild 1.

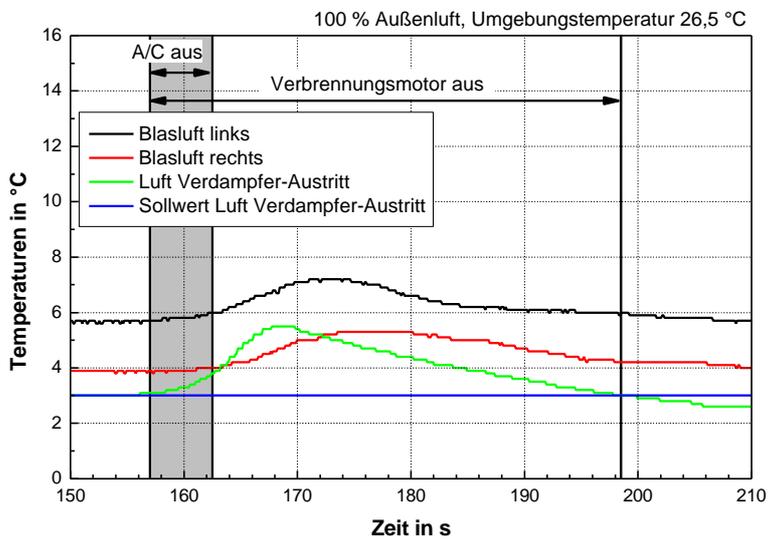
Ohne Stopp-Klimatisierung (oberes Teilbild in Bild 11) beginnt etwa 2 s nach Deaktivierung der Klimaanlage ein Anstieg der Lufttemperatur am Verdampfer-Austritt. Am Ende der Stillstandsphase beträgt die Zunahme der Lufttemperatur am Verdampfer-Austritt etwa 10 K. Dieser Temperaturanstieg ist leicht verzögert auch an den Blasluftdüsen spürbar; hier wird innerhalb der Stillstandsphase eine maximale Temperaturerhöhung von etwa 8 K messbar. Auf die mittlere gemessene Fahrgastzellentemperatur (nicht dargestellt) ergab sich in dieser Phase praktisch kein Einfluss. Mit dem Anstieg der Blaslufttemperatur war ein Anstieg der Luftfeuchtigkeit verbunden, der von Testpersonen im Fahrzeug subjektiv als unangenehm empfunden wurde.

Auch in den Fällen mit Stopp-Klimatisierung (mittleres und unteres Teilbild von Bild 11) ergibt sich ebenfalls nach etwa 2 s ein Anstieg der Lufttemperatur am Verdampfer-Austritt. Dieser ist durch die angesprochene Karenzzeit bei der Wiedereinschaltung der Klimaanlage bedingt. Durch Einschaltung der Klimaanlage wird der Anstieg der Lufttemperatur am Verdampferaustritt innerhalb von etwa 5 s gebremst und anschließend wieder langsam abgebaut. Da hier der Anstieg der Verdampferaustrittstemperatur in Dauer und Höhe begrenzt ist, ist an den Blasluftdüsen zum Innenraum nur eine geringe Temperaturerhöhung messbar. Die mittlere Fahrgastzellentemperatur (nicht dargestellt) zeigt sich unverändert. Bei den für die Messungen verwendeten Fahrzeugen gelten diese Aussagen sowohl für den Außenluft- als auch für den Umluftbetrieb, ein quantitativer Unterschied ist kaum auszumachen.

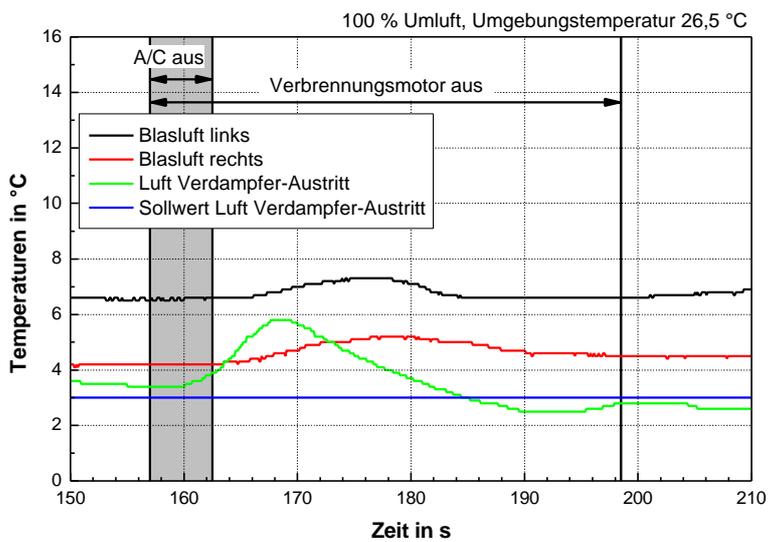
Es sei an dieser Stelle bemerkt, dass sich der angesprochene Anstieg der Blaslufttemperatur bei moderateren Umgebungstemperaturen erst entsprechend später einstellen würde. Je nach Dauer des Fahrzeugstillstands ist eine aktive Stopp-Klimatisierung gegebenenfalls nicht erforderlich. Die Aktivierung der Stopp-Funktion ist im Klimasteuergerät entsprechend auf Umgebungstemperatur und Dauer des Fahrzeugstillstands zu applizieren.



Ohne Stopp-Klimatisierung



Stopp-Klimatisierung bei Zufuhr von 100 % Außenluft



Stopp-Klimatisierung im reinen Umluftbetrieb

Bild 11: Wesentliche Temperaturen des Klimasystems während des Fahrzeugstillstands mit und ohne Stopp-Klimatisierung.

5.2 Leistungsbilanzen der Versuchsträger während der Stopp-Klimatisierung

In Bild 12 und Bild 13 ist jeweils die elektrische Leistungsbilanz der beiden untersuchten hybriden Antriebskonzepte für den Betriebsfall der Stopp-Klimatisierung dargestellt. Die zugrunde liegenden Messungen wurden an verschiedenen Tagen bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen durchgeführt, so dass die Kälteleistung und die mechanische Last des Klimakompressors jeweils unterschiedlich war (etwa $1500 \text{ W}_{\text{mech}}$ im Fall des Versuchsträgers 1, etwa $1000 \text{ W}_{\text{mech}}$ beim Versuchsträger 2). Aus diesem Grund ist nur die prozentuale Aufteilung der Leistungsflüsse wirklich vergleichbar. Die Leistungsaufnahme der eingesetzten Entwicklungssteuergeräte ist bei den dargestellten Flussdiagrammen herausgerechnet.

Ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Leistungsbilanzen besteht nur in den Antriebsverlusten des Klimakompressors, da dessen elektrischer Antrieb bei den beiden Versuchsträgern in stark unterschiedlicher Weise realisiert ist. Der Versuchsträger 1 (Verbrennungsmotor mit riemengetriebenem Startergenerator und von der Kurbelwelle trennbarer Riemenscheibe) weist gegenüber dem Versuchsträger 2 (leistungsverzweigendes Dual-E-Getriebe) eine deutlich erhöhte Verlustleistung des gesamten Kompressorantriebs auf. Die höheren Antriebsverluste resultieren hier zum einen aus dem schlechteren Wirkungsgrad des Startergenerators gegenüber den E-Maschinen des Dual-E-Getriebes, zum anderen aber auch aus den zusätzlichen Verlusten der Riemenebene. Neben der eigentlichen Riemenverluste sorgen hier die trennbare Riemenscheibe und die mechanische Kühlmittelpumpe für Wirkungsgradverluste.

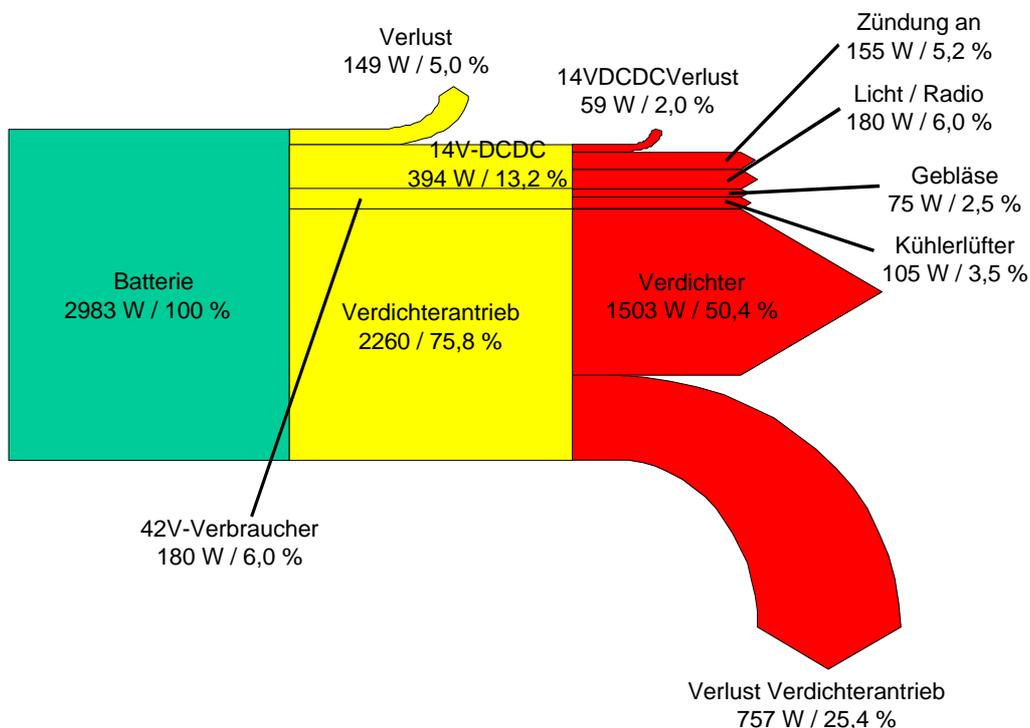


Bild 12: Leistungsbilanz der Stopp- oder Standklimatisierung beim Versuchsträger 1.

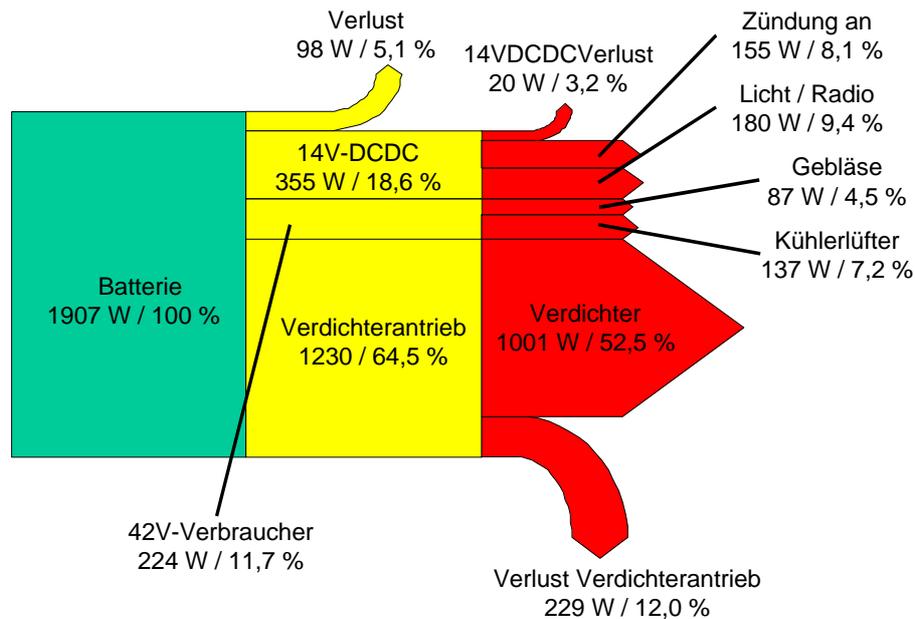


Bild 13: Leistungsbilanz der Stopp- oder Standklimatisierung beim Versuchsträger 2

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Selbstverpflichtung der europäischen Automobilindustrie zur Erreichung definierter Ziele beim Flottenverbrauch fördert die Einführung von Hybridfahrzeugen und Fahrzeugen mit Start-Stopp-Funktion. Die damit verbundenen Kraftstoff-Einsparpotenziale werden mit 4 und 6 % (Start-Stopp-Funktion) und 25 % (Hybridfahrzeug) angegeben.

Wird der Verdichter der Kälteanlage direkt vom Fahrmotor angetrieben, würde dies zu Einbußen beim Klimakomfort in den Stopp-Phasen mit ausgeschaltetem Fahrmotor führen. Vor allem im Kühlbetrieb ist diese Komfortbeeinträchtigung von den Fahrzeuginsassen wahrnehmbar.

In einer Studie der Forschung und Vorausbildung der Robert Bosch GmbH wurden die energetischen Potenziale verschiedener verbrennungsmotor-unabhängiger Klimasysteme untersucht und mit den Wirkungsgraden des konventionellen Systems verglichen.

Die elektrische Standklimatisierung ist der konventionellen, verbrennungsmotorisch angetriebenen Standklimatisierung energetisch etwa gleichwertig. Im Fahrbetrieb hingegen erzielt das verbrennungsmotorisch angetriebene Klimasystem den höchsten Gesamtwirkungsgrad. Eine attraktive Lösung ist daher die Kombination beider Antriebsarten.

Es wurden zwei Technologieträger mit unterschiedlichen hybriden Fahrzeugantriebskonzepten aufgebaut, die über ein elektrisch und/oder verbrennungsmotorisch angetriebenes CO₂-Klimasystem verfügen. Abhängig von der eingesetzten Batterietechnologie ist mit diesen Fahrzeugen neben der Standklimatisierung auch eine Vorklimatisierung möglich.

Die Technologie der Hybridfahrzeuge und der Brennstoffzellen bieten die Plattform und elektrische Infrastruktur für ausschließlich elektrisch angetriebene Klimasysteme. Für diese Fahrzeuge bieten "Hermetik-Verdichter", vor allem in Verbindung mit CO₂-Klimakreisläufen, zusätzliche Vorteile und sind auch eine echte Alternative zu elektrisch/mechanisch angetriebenen ("hybriden") Verdichtern.

7 Literatur

- [1] *Bosch Kraftfahrtechnisches Handbuch*
Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 24. Auflage, 2002

- [2] *Tagungsbericht zum 2. Braunschweiger Symposium „Hybridfahrzeuge und Energiemanagement“ vom 04. Februar 2004*
in: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 4/2004, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2004

- [3] *Studie: Hybrid und Diesel favorisiert*
in: Automobilwoche vom 29.03.2004

- [4] Fried, O./ Bargende, M. / Hötzer, D.:
Kraftstoff-Einsparpotenziale für elektromechanisch angetriebene Antriebsstränge im realen Fahrbetrieb
4. Internationales Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren,
Stuttgart, 20.-22.02.2001

- [5] Baker et al:
R152a Refrigeration System for Mobile Air Conditioning
SAE-Paper 2003-01-0731, SAE World Congress, Detroit, 03.-06.03.2003

- [6] Wertenbach, Jürgen:
Energy Analysis of Refrigerant Cycles
VDA Winter Meeting, Saalfelden, 18.02.2004

- [7] Heidrich, T. et. al.:
COMET - The Overall Vehicle Control of a Mild Hybrid Vehicle for More Comfort and Less Fuel Consumption
FISITA, Barcelona 2004