

Differenzierte Analyse von Downsizing-Konzepten



Beim Downsizing wird ein Saugmotor durch einen hubraumkleineren Motor mit Aufladung ersetzt. In der Vergangenheit wurde Downsizing zur Leistungssteigerung eingesetzt, heute jedoch stellt es zunehmend ein Konzept zur Kraftstoffverbrauchsreduzierung dar. Eine detaillierte Analyse von General Motors zeigt die Gründe, warum sich mit aufgeladenen Motoren trotz höheren spezifischen Kraftstoffverbrauchs im Fahrzeug niedrigere Strecken-Kraftstoffverbräuche erreichen lassen. Die dabei erzielbare Verbrauchseinsparung hängt neben der Drehmomentcharakteristik von dem Downsizingfaktor und dem Fahrzeuggewicht relativ zum Hubraum ab.

1 Einleitung

Downsizing beschreibt Verfahren, bei denen Motoren mit kleinem Hubraum gleiche Werte bezüglich des Fahrverhaltens erreichen wie hubraumgroße Motoren. Damit diese Technologie nicht zu einem Leistungs- beziehungsweise Drehmomentmangel führt, rüsten einige Hersteller ihre Motoren mit einem Kompressor und/oder einem Turbolader auf. In der Vergangenheit wurde dieses Konzept angewendet, um Fahrzeugen mit begrenztem Packageraum leistungsstarke Antriebe zur Verfügung zu stellen.

Insbesondere bei Fahrzeugkonzepten mit Frontantrieb und einer Motoreinbaulage quer zur Fahrtrichtung schiedens großvolumige Motoren wie Reihen-Sechszylinder- oder V-Motoren mit großem Bankwinkel aus. Eine der GM-Applikationen in Europa war der 2,0-l-Familie-II-Turbomotor im Opel Calibra, der 1991 mit 150 kW und 280 Nm die Leistungs- und Drehmomentwerte des damaligen 3,0-l-Reihensechszylinders (150 kW/270 Nm) erreichte/übertraf.

Im Fokus dieser Entwicklung stand die Steigerung von Leistung und Drehmoment. Ein weiterer Vorteil dieses Konzepts ist das geringere Motorgewicht, welches insbesondere bei Fronteinbaulagen zu einem verbesserten Handling führt. General Motors hat in Europa in der Zwischenzeit ein breites Produktportfolio an aufgeladenen Ben-

zinmotoren erfolgreich in den Markt eingeführt. **Bild 1.**

In den letzten Jahren ist jedoch die Leistungssteigerung bei turbo-aufgeladenen Benzinmotoren in den Hintergrund getreten und Downsizing wird zunehmend zur Senkung des Kraftstoffverbrauches eingesetzt.

In einer Vielzahl von neueren Veröffentlichungen wird von signifikanten Verbrauchsabsenkungen bei gleichzeitig deutlicher Steigerung der Fahrleistungen berichtet.

Die wesentlichen technischen Gründe für diese Verbrauchsabsenkung werden in einer verringerten Motorreibung, geringeren Ladungswechselverlusten sowie dem Betrieb in thermodynamisch günstigeren Betriebspunkten gesehen. Stellt Downsizing somit die Allroundlösung zur Senkung des Kraftstoffverbrauches dar?

2 Physikalische Gesetzmäßigkeit von Downsizing

Bei Downsizing-Konzepten wird ein gegebenener Saugmotor durch einen aufgeladenen Motor kleineren Hubraumes, idealerweise ohne Verlust von Fahrleistung ersetzt. Als Aufladungsaggregate kommen sowohl mechanische Lader als auch Abgasturbolader zum Einsatz. Ist es Ziel, den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren, werden aufgrund der geringeren



1,6 Turbo ECOTEC
110 - 141 kW



2,0 Turbo ECOTEC
147 - 177 kW



2,0 Turbo ECOTEC
110 - 154 kW
Gasoline & BioPower



2,0 Turbo ECOTEC
194 kW
(SIDI turbo)



2,8 Turbo ECOTEC
184 - 206 kW

Bild 1: Turbo-
Motoren von
GM Europe

Tabelle: Motor-Kenndaten

1,4L SIDI turbo		
Bohrung	mm	73,4
Hub	mm	82,6
Hubvolumen	ccm	1398
Verdichtungsverhältnis	–	9,2 : 1
Kraftstoffsystem Hochdruck-Benzindirekteinspritzung geriegelte Hochdruckkraftstoffpumpe (200 bar) Mehrloch-Einspritzdüse		
Ventiltrieb Ein- und Auslass-Nockenwellensteller		
Max. Drehmoment	Nm	230
@ Drehzahl	1/min	1.500 – 4.250
Max. Leistung	kW	103
@ Drehzahl	1/min	4.300 – 6.000



Bild 2: Vollastvergleich zwischen Saug- und Turbomotoren

- geringer Kraftstoffverbrauch
- geringe Rauchwerte.

Die wesentlichen Motorkenndaten sind in der **Tabelle** enthalten. Basierend auf Simulationsergebnissen wurden Nockenprofile und Turbolader derart gewählt, dass bereits ab einer Drehzahl von 1500/min das maximale Drehmoment von 230 Nm ($p_{\text{res}} = 20,6$ bar) vorliegt. Einen wesentlichen Beitrag hierzu trägt die bereits aus [1] bekannte „Scavenging-Strategy“.

Zur Vermeidung von Zylinderwandbenetzung durch den eingespritzten Kraftstoff wurde die Mehrlocheinspritzdüse zentral im Brennraumdach installiert. Durch diese Anordnung konnten auch die Rauchwerte auf extrem niedrigem Niveau gehalten werden. Dieser Motor dient im Folgenden als Basis für die Analyse und Bewertung von Downsizing-Konzepten.

3 Vergleich zwischen Turbomotor und Saugmotor in der Vollast

Am Beispiel des 1,4-l-Motors mit Abgas-turboaufladung, Benzindirekteinspritzung und Doppelnockenwellenverstellung wird im **Bild 2** gezeigt, dass unter stationären Volllastaspekten ein solcher Motor Saugmotoren bis zu einem Hubvolumen von 2,2 l ersetzen kann.

Stationäre Vollastkurven werden in Fahrzeug insbesondere in niedrigen Gängen infolge des verzögerten Lade-

parasitären Verluste zumeist Abgas-turbolader favorisiert. Bei modernen aufgeladenen Benzinmotoren beschreibt die Kombination aus Benzindirekteinspritzung, Nockenwellenversteller auf Ein- und Auslassseite und Abgas-turboaufladung den Stand der Technik. Diese Kombination wurde bereits Ende 2006 bei General Motors in Serie eingeführt [6]. In der hier beschriebenen Studie wird diese Technologie auf einen 1,4-l-Ottomotor der kleinen GM 4-Zylindermotorenfamilie zum Zwecke des Downsizings übertragen. Die wesentlichen Entwicklungsziele waren daher:

- exzellentes Low-End-Torque (LET)
- geringer Anfertigungsbedarf zum Bauteilschutz

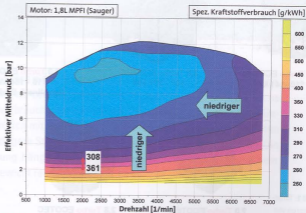


Bild 3: Betriebspunktverschiebung bei Downsizing

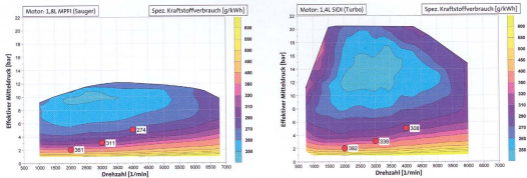


Bild 4: Kennfeldvergleich zwischen dem 1,8-l-Saugmotor und 1,4-l-Turbomotor

druckaufbaus („Turboloch“) meist nicht erreicht. Gegenüber herkömmlichen Turbomotoren mit Saugrohreinjection kann dieses Defizit durch Benzindirekteinspritzung in Kombination mit Doppelnockenwellenstellung, Twin-Scroll Turbolader, Variabilitäten am Turbolader und durch mehrstufige Aufladung deutlich reduziert werden. Die Abgasturboaufladung in Verbindung mit einer E-Maschine (Hybridisierung) kann im Hinblick auf den verzögerten Ladedruckaufbau als besonders günstig angesehen werden [2].

Aufgrund der erwarteten dynamischen Effekte (verzögerter Drehmomentaufbau) und der für Turbomotoren typischen längeren Gesamtübersetzung liegt es nahe, nicht den größtmöglichen Saugmotor sondern den nächst kleineren, den 1,8-l-Saugmotor, für den im Folgenden beschrieben Vergleich zu wählen.

4 Vergleich des Teillastkraftstoffverbrauchs zwischen Turbomotor und Saugmotor

Die Grundidee des Downsizings besteht in der Reduzierung der parasitären Verluste sowie in der Verlagerung der Betriebspunkte in Bereiche höherer Wirkungsgrade. Schematischer lässt sich dieser Sachverhalt in einem Kraftstoffverbrauchskennfeld darstellen, Bild 3. Mit geringer werdender Motordrehzahl und steigender Motorlast (effektivem Mitteldruck) sinkt der spezifische Kraftstoffverbrauch.

Im Kennfeld wird beispielhaft eine Lastpunktverschiebung, von $n = 2000/\text{min}$ und $p_{\text{eff}} = 2,0 \text{ bar}$ auf $n = 3000/\text{min}$ und $p_{\text{eff}} = 2,86 \text{ bar}$, gezeigt, die einer Reduzierung des Hubvolumens von 1,8 Liter auf 1,4 Liter entspricht. Diese theoretische Betriebspunktverschiebung führt

im gezeigten Beispiel zu einer Reduzierung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs um 14,7 %. Aus dieser Betrachtung lässt sich jedoch nicht das Potenzial für Downsizing ableiten, da in unzulässiger Weise folgende Vereinfachungen angenommen wurden:

- Verwendung des gleichen Kraftstoffverbrauchskennfeldes für beide Motoren
- Annahme eines unveränderten Übersetzungsverhältnisses.

5 Kraftstoffverbrauchskennfelder von Turbo- und von Saugmotoren

Bild 4 zeigt die Kraftstoffverbrauchskennfelder für einen 1,8-l-Saugmotor im Vergleich zu einem 1,4-l-Turbomotor. Bei gleichem effektivem Mitteldruck, hier gezeigt für die Betriebspunkte $n = 2000/\text{min}$ / $p_{\text{eff}} = 2,0 \text{ bar}$, $n = 3000/\text{min}$ / $p_{\text{eff}} =$

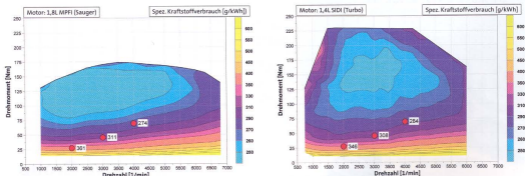


Bild 5: Kennfeldvergleich zwischen einem 1,8-l-Saugmotor und einem 1,4-l-Turbomotor (Basis: Drehmoment)

3,0 bar und $n = 4000/\text{min}$ / $p_{\text{ne}} = 5,0$ bar, liegt der spezifische Kraftstoffverbrauch des Turbomotors zwischen 6 % und 11 % über dem des Saugmotors. Als Ursache dieser Verbrauchsdifferenz werden folgende Sachverhalte gesehen:

- geringeres Verdichtungsverhältnis ($\epsilon = 9,2:1$ vs. $\epsilon = 10,5:1$) - zirka 4 bis 5 %
- erhöhte Ladungswechselarbeit - zirka 1 bis 2 %
- erhöhte spezifische Reiarbeit (kl. Hubraum, größere Ölvolu-menstrom (Kolbenkühlung, Turbolader, Nockenwellenversteller, etc.) - zirka 2 %.

Dieser Vergleich wurde für verschiedene Turbomotoren durchgeführt, wobei sich dieser Nachteil generell bestätigte. Aber auch dieser Vergleich beschreibt noch nicht das Potenzial von Downsizing-Konzepten, da hier eine Betriebspunktverschiebung noch nicht berücksichtigt ist. Für die Betrachtung im Fahrzeug ist nicht der spezifische Kraftstoffverbrauch bei gleichem effektivem Mitteldruck ausschlaggebend. Relevant jedoch ist der Kraftstoffverbrauch bei gleichem Drehmoment an der Kurbelwelle, beziehungsweise bei gleichem Raddrehmoment, falls eine unterschiedliche Übersetzung gewählt wurde. Dieser Vergleich wird im Folgenden in zwei Schritten durchgeführt.

6 Kraftstoffverbrauchsvergleich bei gleichem Kurbelwellen-Drehmoment

Wird der Kraftstoffverbrauchsvergleich bei gleichem Drehmoment durchgeführt, wird der hubraumkleine Motor bei höheren Mitteldrücken betrieben. Es kommt zu einer Lastpunktverschiebung. Es ergibt sich das in **Bild 5** gezeigte Bild. Aus dem ursprünglichen Kraftstoffverbrauchs-nachteil von 6 % bis 11 % ergeben sich nun in den zuvor für den 1,8 l gezeigten Betriebspunkten Kraftstoffverbrauchsvorteile von bis zu 4,2 %, wobei der Kraftstoffverbrauchsvorteil mit Drehzahl und/oder Last (Drehmoment) abnimmt. Um ein besseres Verständnis für diese Abhängigkeit zu erhalten, wurden beide Verbrauchskennfelder durch einander dividiert und man erhält das in **Bild 6** gezeigte Bild, aus dem die Last- und Drehzahlabhängigkeit hervorgeht. Der Bereich unterhalb der „1-Linie“ zeigt Verbrauchsvorteil für den Turbomotor,

oberhalb für den Saugmotor. Im weißen Bereich zwischen 0,98 und 1,02 haben beide Motoren einen ähnlichen Kraftstoffverbrauch. Es ist klar zu erkennen, dass der Verbrauchsvorteil in erster Linie von dem Drehmoment und weniger von der Drehzahl abhängt. Eine weitere Erkenntnis ist, dass es nur bis zu einem bestimmten Drehmoment gelingt, die systemimmanenten spezifischen Nachteile des Turbomotors durch eine Hubraum-proportionale Lastpunktverschie-

bung auszugleichen, beziehungsweise überzukompensieren.

7 Einfluss des Downsizingfaktors auf den Kraftstoffverbrauchsvorteil

Im vorangegangenen Kapitel wurde der Einfluss der Last auf den Kraftstoffverbrauchsvorteil aufgezeigt. Aus dieser Kausalität leitet sich die Frage ab, was der richtige Downsizingfaktor für einen

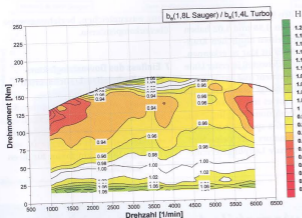


Bild 6: Kraftstoffverbrauchscharakteristik des 1,8-l-Saugmotor relativ zum 1,4-l-Turbomotor

möglichst geringen Kraftstoffverbrauch ist. Als Downsizingfaktor sei der Quotient aus Hubvolumen des Saugmotors zu dem Hubvolumen des aufgeladenen Motors verstanden. Hierzu werden folgende Saugmotoren relativ zu dem 1,4-l-Turbomotor mit Benzindirektspritzung folgende Saugmotoren verglichen:

- 1,4 l MPFI (kleine Vierzylinder-Motorenfamilie)
- 1,6 l MPFI (mittlere Vierzylinder-Motorenfamilie)
- 1,8 l MPFI (mittlere Vierzylinder-Motorenfamilie)
- 2,2 l SIDI (große Vierzylinder-Motorenfamilie).

Das Ergebnis dieses Vergleiches ist in **Bild 7** dargestellt. Dieser Vergleich zeigt, dass sich mit einem aufgeladenen Motor gleichen Hubraums gegenüber der Saugmotorvariante keine Verbrauchsvorteile erzielen lassen. Eine solche Variante ist als reine Performance-Variante zu verstehen. Mit steigendem Hubvolumen des Saugmotors lässt sich ein Betriebsbereich identifizieren, in dem Verbrauchsvorteile erzielt werden können. Dieser Bereich wächst mit größer werdendem Hubvolumen, beziehungsweise Downsizingfaktor. Weitere Vorteile werden erzielt, wenn die Turbomotorvariante einen Saugmotor der nächst größeren Motorfamilie ersetzt. Die Erklärung für diesen Sachverhalt liegt darin, dass von Motorfamilie zu Motorfamilie die parasitären Verluste steigen, da jede Motorfamilie jeweils für ihre leistungsstärkste Variante ausgelegt wird.

Ab einem Downsizingfaktor von zirka 1,3 ergibt sich ein signifikanter Betriebsbereich, in dem nennenswerte Verbrauchsvorteile erzielt werden.

Bild 8 zeigt für den neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) die Betriebsbereiche, die ein 1,4-l-Motor in einem Fahrzeug der Kompaktklasse durchfährt und gibt an, wieviel Kraftstoff, relativ zum Gesamtzyklusverbrauch, in diesen Bereichen jeweils verbraucht wird. Gleichzeitig wird durch die Linien konstanter Leistung aufgezeigt, welche Fahrleistungen dabei abgefordert werden. Hieraus leiten sich folgende wesentlichen Erkenntnisse ab:

- zirka 1/3 des verbrauchten Kraftstoffes wird in Betriebsbereichen verbraucht, in denen der Verbrauch des Turbomotors geringer ist als beim Saugmotor.
- zirka 1/3 des Verbrauchs wird im verbrauchsneutralen Bereich konsumiert
- zirka 1/3 des Verbrauchs wird in dem für den Turbomotor ungünstigeren Betriebsbereich verbraucht.
- 2/3 der Betriebspunkte werden mit Fahrleistung kleiner 15 kW abgedeckt.

Aus diesen Sachverhalten lässt sich ableiten, dass zu einer echten Verbrauchseinsparung zwingend eine weitere Betriebspunktverschiebung erforderlich ist. Diese lässt sich durch eine Verlängerung der Gesamtübersetzung erreichen und wird durch folgende Sachverhalte gerechtfertigt: Die Nennleistung bei Turbomotoren liegt in der Regel zwischen $n = 5000$ und 5500 min – die Nenndrehzahl von Saugmotoren zwischen 5600 und 6500 min – bei gleicher maximaler Leistung erfordert somit ein Turbomotor eine längere Gesamtübersetzung zur Erzielung der gleichen Endgeschwindigkeit.

Bei gleicher Leistung bieten Turbomotoren in der Regel ein deutlich höheres und breiteres Drehmomentplateau als leistungsgleiche Saugmotoren, welches eine längere Übersetzung zur Erzielung gleicher Elastizität erlaubt.

Nachteilig wirkt sich aus, dass bei einer Verlängerung der Gesamtübersetzung auch das Raddrehmoment zum Anfahren in einem Betriebspunkt redu-

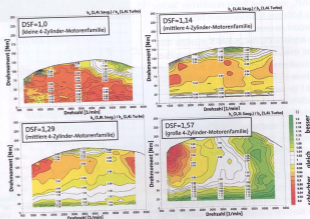


Bild 7: Einfluss des Downsizingfaktors auf die Verbrauchseinsparung

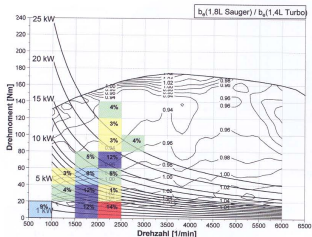


Bild 8: Kraftstoffverbrauchsanteil in Abhängigkeit von Last und Drehzahl im NEFZ

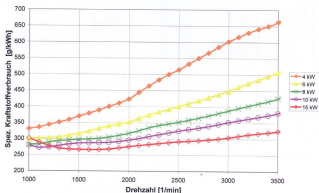


Bild 9: Spezifischer Kraftstoffverbrauch als Funktion der Drehzahlverlagerung) bei konstanter Leistung

ziert, der wegen des verzögerten Ladedruck-/Drehmomentaufbau ohnehin kritisch ist. Dabei handelt es sich um ein Phänomen, das auch von aufgeladenen Dieselmotoren her bekannt ist.

Wird die Gesamtübersetzung verlängert, verschiebt sich der Betriebspunkt für den jeweiligen Fahrzustand entlang der Linie gleicher Leistung hin zu niedrigerer Drehzahl und zu höherem Drehmoment. Die mit einer Verlängerung der Übersetzung einhergehende Verbrauchseinsparung ist in Bild 9 für den NEFZ relevanten Bereich dargestellt. Mit reduzierter Drehzahl sinkt auch der Kraftstoffverbrauch, wobei der Gradient

der Kurven mit steigender Leistung kleiner wird. Die erste Ableitung des Verbrauchs nach der Drehzahl beschreibt den zu erwartenden Verbrauchsvorteil infolge einer Drehzahlreduzierung, wenn gleichzeitig die Leistung konstant gehalten wird (d. h. das Drehmoment proportional zur Drehzahlabenkung erhöht wird). Diese Abhängigkeit ist in Bild 10 dargestellt.

Wird beispielsweise bei einer Drehzahl von $n = 2000$ /min und einem Leistungsbedarf von $P_c = 15$ kW die Gesamtübersetzung um 10 % verlängert, so ergibt sich für diesen Betriebspunkt eine zirka zweiprozentige Verbrauchsabsenkung. Bei 4 kW Leistungsbedarf dagegen reduziert sich der Verbrauch um zirka 8 bis 10 %. Um die Auswirkung des Downsizingkonzepts vollständig zu verstehen, ist es aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge erforderlich, eine komplette Simulation des Zyklusverbrauches durchzuführen.

8 Zyklussimulation – Kraftstoffverbrauch im Europäischen Testzyklus

Bild 11 zeigt das Ergebnis einer Final Drive Variation für den 1,4-Turbomotor, als auch für den 1,8-l-Saugmotor in einem Fahrzeug der Kompaktklasse. Dargestellt ist der Kraftstoffverbrauch im NEFZ über dem Performance Index, einer Kenngröße für Elastizität, Beschleunigungsvermögen und Höchstgeschwindigkeit. Entlang der jeweiligen Kurve wird der Final Drive variiert. Die gestri-

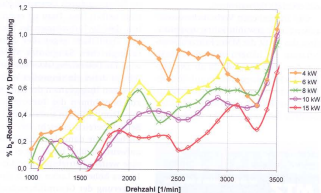


Bild 10: Verbrauchsreduzierung pro Drehzahländerung als Funktion von Drehzahl und Leistung

chelten Linien verbinden jeweils gleichen Final Drive der beide Varianten. Der optimale Punkt liegt möglichst nahe dem Koordinatenursprung, das heißt niedriger Verbrauch bei gleichzeitig kurzer Beschleunigungszeit. Folgende Erkenntnisse lassen sich daraus ableiten:

- mit längerem Final Drive sinkt der Kraftstoffverbrauch, gleichzeitig verschlechtert sich der Performance Index
- die Verlängerung des Final Drives wird durch ein minimal erforderliches Rad Drehmoment in ersten Gang (zum Anfahren), sowie durch „Drive Quality“ Anforderungen (zum Beispiel Drehzahl bei Höchstgeschwindigkeit) begrenzt
- der 1,4-l-Turbomotor offeriert mit gleicher Gesamtübersetzung eine bessere Performance. Der Verbrauchsvorteil beträgt zirka 7 %.
- bei gleicher Performance und längerem Final Drive beträgt der Vorteil zirka 10 %.
- nutzt man ein Getriebe mit dieseltypischer großer Spreizung, so kann der Vorteil Performance-neutral auf zirka 11 % ausgeweitet werden.

Die dargestellten Simulationsergebnisse zeigen die Wichtigkeit einer langen Gesamtübersetzung im Hinblick auf die Reduzierung des Kraftstoffverbrauches im Fahrzeug. Um diese umsetzen zu können, ist es von essentieller Bedeutung, das Drehmoment bei niedrigsten Drehzahlen zu steigern. Beispiele, wie dies zu erreichen ist, wurden bereits zu Beginn des Papers aufgezählt. Der hier vorgestellte 1,4-l-Turbomotor mit Benzindirekteinspritzung und DCVCP hat mit einem Drehmoment von 230 Nm ab $n = 1500$ /min dieses Potenzial ebenfalls dokumentiert.

Die angegebenen Verbrauchsvorteile gelten für die gewählte Fahrzeugapplikation, das heißt die Motor-Fahrzeugkombination. Sie hängen in großem Maße von dem Fahrzeuggewicht ab. Der Einfluss des Fahrzeuggewichtes auf die mögliche Verbrauchsreduzierung ist exemplarisch in Bild 12 dargestellt. Mit steigendem Fahrzeuggewicht werden die

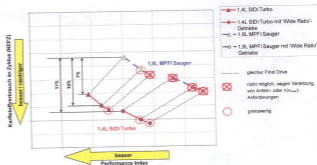


Bild 11: Einfluss des Final Drives auf den Kraftstoffverbrauch (MVEG-BI)

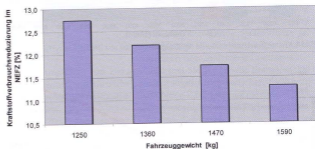


Bild 12: Einfluss des Fahrzeuggewichtes auf das KV-Einsparungspotenzial

Motoren bei höheren Lasten betrieben und das Verbrauchsreduzierungspotenzial sinkt.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Detaillierte Untersuchungen haben gezeigt, dass sich der Kraftstoffverbrauch im Fahrzeug durch Downsizing signifikant senken lässt. Dazu ist es erforderlich, dass das Hubvolumen des Turbomotors signifikant gegenüber dem leistungsgleichen Saugmotor abgesenkt wird. Ein Downsizingfaktor von zirka 1,3 scheint dabei ein sinnvolles Verhältnis zwischen Hubvolumen des Saugmotors zu Hubvolumen des Turbomotors zu sein. Damit wird ein ausreichend großer Betriebsbereich erreicht, bei dem der Turbomotor dann Verbrauchsvorteile aufweist. Darüber hinaus ist es sinnvoll, eine weitere Betriebspunktverlagerung hin zu höheren Lasten durch eine Verlängerung der Gesamtübersetzung zu bewirken. Da eine Verlängerung der Ge-

samtübersetzung zu einer Reduzierung des Raddrehmomentes beim Anfahren führt, ist es erforderlich das Drehmoment des Turbomotors schon bei niedrigsten Drehzahlen zu steigern. Benzindirekteinspritzung in Verbindung mit Doppelnockenwellenverstellung und Abgasurboaufladung stellt hierfür eine geeignete Technologie dar. Für den hier vorgestellten Vergleich zwischen einem 1,4-l-Turbomotor und einem 1,8-l-Saugmotor konnten die CO₂-Emissionen (Verbrauch) um zirka 11 % reduziert werden. Das Potenzial sinkt, wenn entweder das Fahrzeuggewicht steigt oder das Hubvolumen des Motors im Verhältnis zum Fahrzeuggewicht zu klein gewählt wird.