

Abb. 1.14 Wirkungsgradkennfeld einer PSM

die Motoren. In beiden Fällen haben die elektrisch kommutierten Motoren Vorteile, wobei die Bürstenmotoren deutlich preisgünstiger sind.

1.3 Verbrauchsoptimierung

Der Antriebsstrang hat wesentlichen Einfluss auf Komfort, Verbrauch und Sportlichkeit (Dynamik) eines Fahrzeugs. Stand bislang vor allem der Motor im Mittelpunkt des Interesses, so konzentriert sich die Aufmerksamkeit verstärkt auf das Getriebe. Der Motor kann noch so dynamisch und verbrauchsgünstig sein, der Gesamteindruck des Antriebsstrangs wird nicht optimal sein, wenn optimale, verbrauchsgünstige Betriebspunkte aufgrund der verfügbaren Übersetzungen nicht nutzbar sind oder das Getriebe zu hohe Verlustleistung hat. Durch die stetige Forderung der Reduktion des CO_2 -Ausstoßes gibt es verschiedene Ansätze zur Verbesserung des Antriebsstrangs und damit zu einem geringeren Treibstoffverbrauch [3].

Lastpunktverschiebung bedeutet, den Betriebspunkt der eingesetzten VKM in einen Bereich mit einem höheren Wirkungsgrad (niedrigem spezifischem Verbrauch) zu verlegen. Der Zeitanteil der Betriebszyklen, in welchen die VKM im Bereich von geringem spezifischem Kraftstoffverbrauch betrieben wird, sollte so groß wie möglich sein. In diesem Zusammenhang werden zwei Effekte genutzt:

- **Downsizing** der VKM – Verkleinerung des Hubraums bei gleichzeitiger Erhöhung des Mitteldrucks, z. B. durch Aufladung.⁵ Somit wird gleichbleibende Leistung bei geringerem Verbrauch oder erhöhte Leistung bei gleichbleibendem Verbrauch erzielt. Dies erfordert selbstverständlich angepasste Getriebesysteme.
- **Downspeeding** – Getriebeabstufung mit größerer Gangspreizung und dadurch deutlich abgesenktem Drehzahlniveau. Durch motorische Maßnahmen kann das Potenzial zur Drehzahlabsenkung vergrößert werden (Stichwort „low-end torque“). Die Möglichkeiten werden durch moderne Getriebetechnologie erst nutzbar, da die elektronische Steuerung für zügige bzw. dynamische und gleichzeitig komfortable Schaltungen sorgt.

Die **Optimierung der VKM** selbst ermöglicht die Reduktion der CO₂-Emissionen. Der Schwerpunkt in der Dieseleentwicklung ist, die gute Effizienz beizubehalten und die immer schärferen Abgasgesetzgebungen einzuhalten. Neue Verbrennungstechnologien kombiniert mit neuen Versorgungssystemen (Hochdruckeinspritzung und Zylinderabschaltung) versprechen diese Ziele zu erreichen. Entwicklungsschwerpunkt im Bereich Benzinmotoren ist die weitere Reduzierung der Drosselverluste in der Teillast, z. B. durch Abgasrückführung, variablen Ventiltrieb oder Direkteinspritzung.

Mit der **Reduzierung der Verlustleistung** ergibt sich eine weitere Möglichkeit. Dabei steht der Grundsatz im Vordergrund, dass jede Leistung bzw. jedes Moment, welches nicht zum Antrieb verwendet wird, vermieden oder so gering wie möglich gehalten werden muss. Dies gilt für Motor, Getriebe und den gesamten Antriebsstrang sowie alle Nebaggregate und betrifft die Verluste durch Reibung, Schmierung, Kühlung, Aktuatoren, Lenkhilfepumpe etc. In diese Kategorie fällt auch die Start-Stopp-Funktion, sie vermeidet die Verluste im Leerlaufbetrieb der VKM durch Abstellen. Die technischen Anforderungen und Erweiterungen, die zur Implementierung dieser Funktion erforderlich sind, werden in Kap. 4, 5 und 7 erörtert.

1.3.1 Verbrauchsermittlung

Zur Beurteilung und Interpretation der Verbrauchskennwerte ist es erforderlich, die entsprechenden Messmethoden und Vorschriften zu kennen. Insbesondere die Bewertung der unterschiedlichen Getriebearten weicht voneinander ab, was bei der Interpretation der Werte unbedingt zu berücksichtigen ist. Auch lassen sich die Angaben der unterschiedlichen globalen Regionen nicht miteinander vergleichen. In Europa wird nach dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ, oder englisch NEDC – New European Driving Cycle) gemessen, in Nordamerika ist der FTP75-Zyklus verbindlich vorgeschrieben. Schließlich verwendet Japan auch eigene Zyklen (10–15). Allen Zyklen ist gemeinsam, dass unterschiedliche Fahrzustände abgebildet werden, die möglichst repräsentativ die durch-

⁵ Der Mitteldruck ist der über den Arbeitszyklus eines Kolbens gemittelte Druck im Zylinder und ein direktes Maß für das Drehmoment.

schnittlichen Fahrgewohnheiten in der jeweiligen Region abbilden sollen. Leider zeigt sich in den realen Kraftstoffverbräuchen, dass die für die Fahrzeughomologation ermittelten Werte, die auch in den Katalogen angegeben und für die Fahrzeugbesteuerung herangezogen werden, in der Praxis kaum erreicht werden können.

Die Umweltrandbedingungen der Messungen sind genau definiert und vor der Messung sind die Fahrzeuge zu konditionieren. Die genauen Vorschriften und Vorgehensweisen sind nicht Gegenstand dieses Werkes, für weitere Details sei auf die einschlägige Literatur verwiesen, die Regelungen können [4] entnommen werden.

Abb. 1.15 zeigt den NEDC. Er ist synthetisch erstellt und besteht aus einem Stadtanteil, der insgesamt viermal durchfahren wird, und einem Überlandanteil. Die gesamte Dauer beträgt 1180 s, und die zurückzulegende Strecke beträgt 11 km. Die Beschleunigung im Überlandteil auf 100 km/h muss abgeschlossen sein, bevor ein optionaler 6. Gang geschaltet werden darf, der maximale Zeitanteil in einem solchen Gang ist 7,1 %. Der Vergleich zwischen einem Handschalt- und einem Automatikgetriebe zeigt, dass das letztere häufiger in höhere Gänge schaltet.

Im Hinblick auf die Beurteilung von Verbrauchswerten und Optimierungspotenzialen ist jedoch die prinzipiell unterschiedliche Behandlung von Handschaltgetrieben und automatisch schaltenden Getrieben wichtig. Bei einem Fahrzeug mit Handschaltung ist der Fahrer ein wesentlicher Faktor für den Verbrauch, da er die Übersetzungen bzw. Gänge und die Zeitpunkte der Wechsel definiert. Daher sind für die Handschaltgetriebe die Fahrgänge in den Zyklen fest vorgegeben, hingegen kann bei allen automatisch schaltenden Getrieben die Fahrstufe durch die Getriebesteuerung frei gewählt werden. Eine intelligente Wahl der Schaltkennlinien kann also verbrauchsmindernd wirken, ebenso wie ein intelligenter Fahrer bei einem Handschaltgetriebe. Die Definition der Schaltkennlinien wird in Abschn. 5.4 erläutert.

1.3.2 Lastpunktverschiebung

In Abschn. 1.2.3 ist aufgezeigt, dass der Motor den höchsten Wirkungsgrad (geringsten spezifischen Kraftstoffverbrauch) in der Nähe der Volllastlinie hat. Daher ist es sinnvoll, den Betriebspunkt entlang der Leistungshyperbel weit in Richtung der Volllastlinie des Motors zu verschieben. Bei einem Stufengetriebe werden durch die Übersetzungen der Gänge die möglichen Punkte auf der Hyperbel vorgegeben (vgl. Abb. 1.10). Wird bei einem Handschaltgetriebe eine längere Getriebeübersetzung verwendet, kann der Nutzen nur dann realisiert werden, wenn der Fahrer durch frühzeitiges Hochschalten diese Betriebspunkte auch wählt. Bei einem Beschleunigungswunsch ist zur Erreichung akzeptabler Fahrleistungen eine Rückschaltung erforderlich. Dieses häufige Schalten wird oft als unkomfortabel empfunden. Außerdem werden in den Fahrzeugvergleichen der Automobilpresse immer wieder Elastizitätswerte angegeben, also Zeiten, die benötigt werden, um in einem fixierten Gang die Geschwindigkeit von einem vorgegeben Wert um einen bestimmten Betrag zu erhöhen. Mit der Einführung automatischer Schaltungen lassen sich

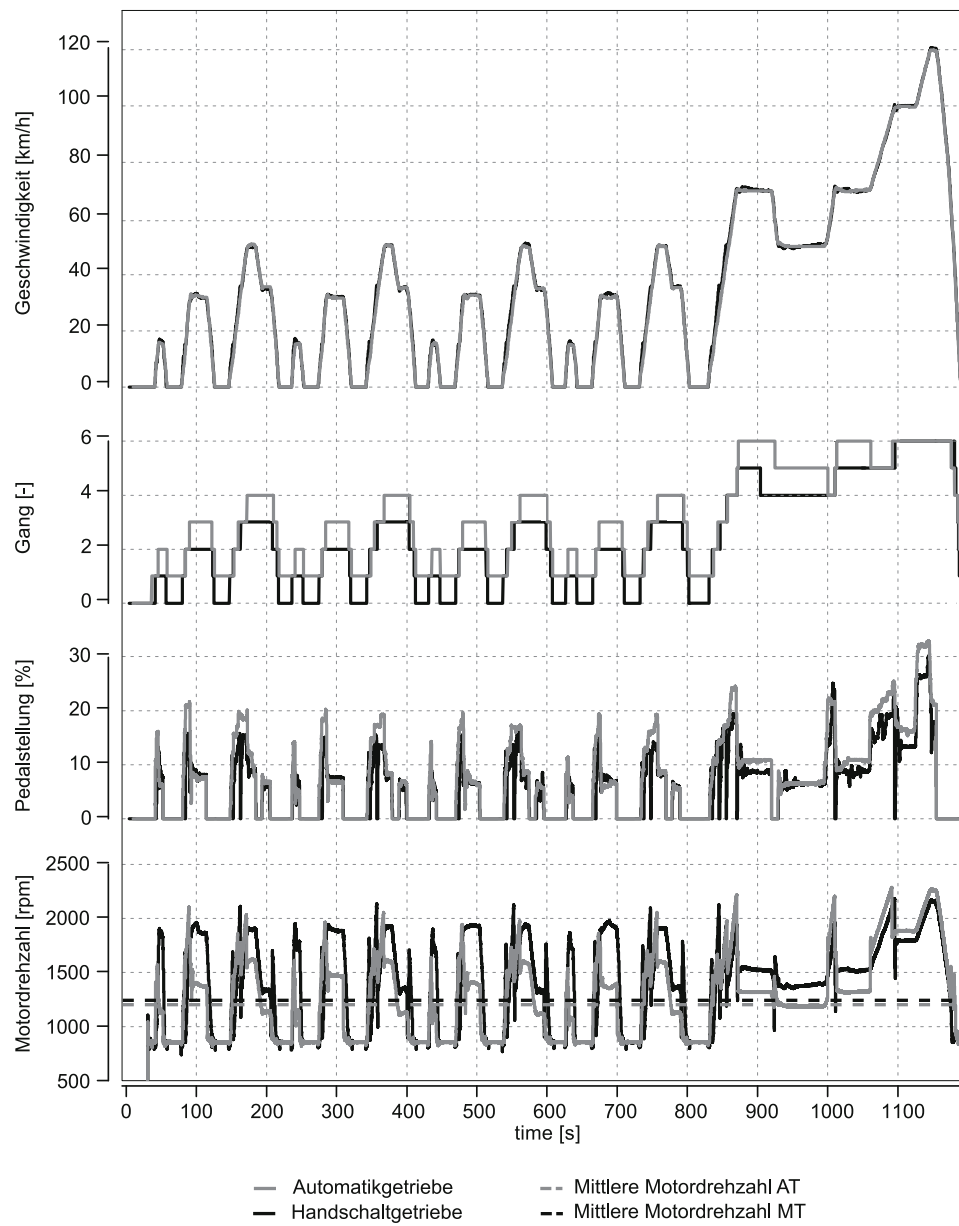


Abb. 1.15 Verbrauchszyklus NEDC

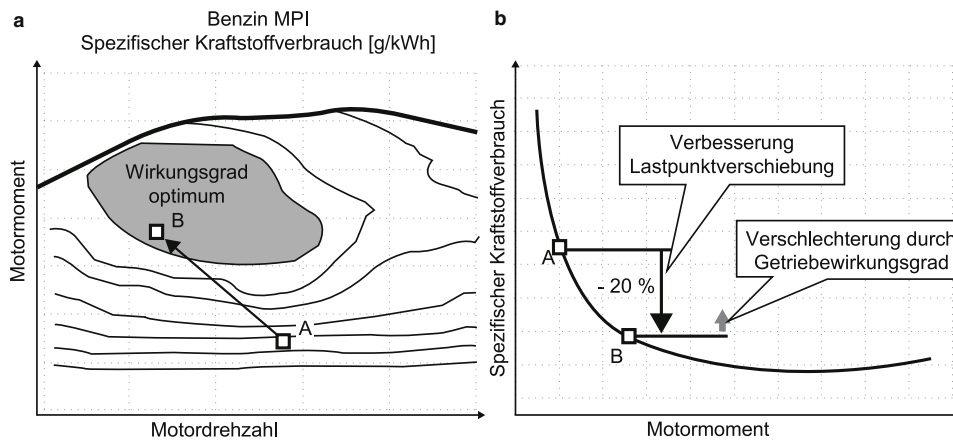


Abb. 1.16 Einsparungspotenzial für Treibstoffverbrauch durch Lastpunktverschiebung (a) und Auswirkung auf die Effizienz (b)

die empfundenen Komfortnachteile kompensieren, dabei liegt die Schalthäufigkeit bei automatisch schaltenden Getrieben signifikant höher als bei Handschaltgetrieben.

In jüngster Zeit haben sich auch Schaltempfehlungsanzeigen etabliert, meist in Verbindung mit Start-Stopp-Systemen. Sie zeigen dem Fahrer visuell an, wann ein besserer Betriebspunkt durch eine Schaltung nutzbar ist.

Durch die Automatisierung der Schaltvorgänge wird die Verlustleistung des Getriebes erhöht. Aus diesem Grund fällt der effektive Verbrauchsvorteil etwas geringer aus. Dies ist in Abb. 1.16 dargestellt. Die Arbeit, die der Fahrer beim Handschaltgetriebe verrichten muss, um einen Gangwechsel durchzuführen (Betätigung des Schalthebels und der Kupplung), erledigt beim automatisch schaltenden Getriebe die Aktuatorik (vgl. Kap. 4 und 5), was einen Teil des Mehrenergiebedarfs des Getriebes gegenüber der Handschaltung verursacht. Je nach Getriebekonzept treten noch weitere Verluste auf, die aus der Bauart und den verwendeten Komponenten bedingt sind, wie z. B. mehrere Kupplungen, Wandler und reibschlüssige Leistungsübertragung.

Wesentlichen Einfluss auf die Potenziale durch Lastpunktverschiebung haben auch die eingesetzten Motoren. Sehr deutlich wird der Unterschied im Vergleich zwischen Otto- und Dieselmotoren, wie in Abb. 1.17 dargestellt. Um die Motorgröße selbst auszublen- den, wird hier die Auftragung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs über dem Mitteldruck gewählt. Letzterer ist proportional zum Motormoment, ein direkter Vergleich mit der Darstellung in Abb. 1.16b ist also möglich. Für den besten Verbrauch sollte ein Betriebspunkt im Minimum der Verläufe angestrebt werden. Durch die unterschiedliche Charakteristik der beiden Motoren ergibt sich bei einem Ottomotor ein deutlich größeres Einsparpotenzial im Vergleich zum Dieselmotor. Dies liegt am allgemein flacheren Verlauf des spezifischen Kraftstoffverbrauchs über dem Mitteldruck von Dieselmotoren in dieser Darstellungsform. Der Ottomotor hat in der Teillast – verglichen mit dem Dieselmotor – einen

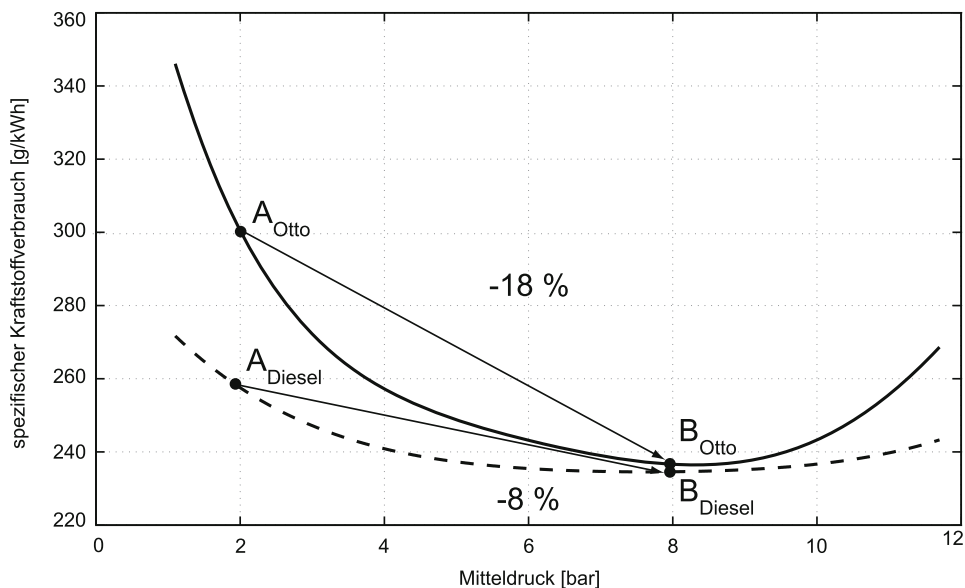


Abb. 1.17 Einsparungspotenzial für Treibstoffverbrauch durch Lastpunktverschiebung im Vergleich von Otto- und Dieselmotorkonzepten

hohen spezifischen Verbrauch und damit einen schlechten Wirkungsgrad. Dies ist insbesondere auf die Drosselung im Ansaugtrakt zurückzuführen. Der Dieselmotor, der keine solche Drosselung aufweist, hat hingegen auch bei Teillast einen relativ guten Wirkungsgrad.

Abb. 1.18 zeigt mögliche Lastpunktverschiebungen aus einem beispielhaften Punkt des Betriebszyklus für Saugmotoren mit unterschiedlichem Hubvolumen [5–7]. Die Verläufe der maximalen Momente sind über der Drehzahl aufgetragen. Im Ausgangspunkt ist der (spezifische) Verbrauch der potenteren VKM höher als der der schwächeren VKM. Für beide wird nun ein neuer Betriebspunkt nahe der Vollastlinie identifiziert, bei dem der (spezifische) Verbrauch jeweils verringert ist. Dabei fallen Momentenzuwachs und Drehzahlabenkung bei der stärkeren VKM höher aus. Dennoch bleibt bei gleicher Motorentechnologie ein Verbrauchsneutteil für die größere VKM.⁶

Kern der Lastpunktverschiebung ist die Verringerung der Zeitanteile des Betriebszyklus, in denen die VKM im Teillastbereich und damit bei schlechtem spezifischem Verbrauch betrieben wird. Um die geforderten Verbrauchsziele zu erreichen, muss eine Übersetzung bereitgestellt werden, die die Drehzahlabenkung entsprechend ermöglicht.⁷

⁶ Einzig durch effizientere Verbrennungstechnologie oder Aufladung können zusätzliche Potenziale genutzt werden (Stichwort Downsizing).

⁷ Deshalb werden für drehmomentstärkere Motoren aus Verbrauchsgesichtspunkten höhere Spreizungen erforderlich, vgl. Abschn. 1.5.