

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....XXI

Tabellenverzeichnis ..... XXVII

1 Fahrwiderstand und Motorleistung ..... 1

1.1 Welche Leistung benötigt die A-Klasse bei einer Geschwindigkeit von 180 km/h? ..... 1

1.2 Wie groß ist der Benzinverbrauch in l/(100 km) bei 180 km/h? ..... 4

1.3 Welche Leistung wird bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h benötigt? Wie groß ist dann der effektive Motorwirkungsgrad, wenn der Benzinverbrauch 5 l/(100 km) beträgt? ..... 6

1.4 Was ist beim Pkw wichtiger: der Rollwiderstand oder der Luftwiderstand? 7

1.5 Was sind typische Zahlenwerte, um den Leistungsbedarf eines Pkw zu berechnen? ..... 9

1.6 Könnte man mit einem modernen Fahrzeug einen Kraftstoffverbrauch von 1 l/(100 km) realisieren? ..... 9

2 Kraftstoffe und Stöchiometrie ..... 13

2.1 Wie viel CO<sub>2</sub> wird von einem Auto produziert, das einen Kraftstoffverbrauch von 5 l/(100 km) hat? ..... 14

2.2 BMW gibt den Kraftstoffverbrauch seines 6-Zylinder-Ottomotors im M3 CSL mit 11,9 l/(100 km) an. Gleichzeitig behauptet BMW, dass die CO<sub>2</sub>-Emission des Motors 287 g/km betrage. Passt das zusammen? ... 14

2.3 Ein Fahrzeug wird wahlweise mit einem Otto- und einem Dieselmotor angeboten. Beide Varianten haben einen Kraftstoffverbrauch von 5 l/(100 km). Sind die beiden Motoren dann „gleich gut“? ..... 16

2.4 Was sind die wesentlichen Unterschiede zwischen Otto- und Dieselmotoren? ..... 17

2.5 Warum benötigt ein Dieselmotor Luftüberschuss, während ein Ottomotor mit einem stöchiometrischen Gemisch auskommt? ..... 23

|          |                                                                                                                                                                                                            |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6      | Warum funktioniert die ottomotorische Verbrennung nur bei einem Luftverhältnis von etwa 1, während der Dieselmotor mit nahezu jedem Luftverhältnis betrieben werden kann? . . . . .                        | 23        |
| 2.7      | Welche Vorteile hat der direkt einspritzende Ottomotor gegenüber dem mit Saugrohreinspritzung? . . . . .                                                                                                   | 25        |
| 2.8      | Welches Luftvolumen wird benötigt, um 1 Liter Benzin zu verbrennen? .                                                                                                                                      | 26        |
| 2.9      | Was passiert bei der Verbrennung, wenn man dem Kraftstoff zu viel oder zu wenig Luft zur Verfügung stellt? . . . . .                                                                                       | 29        |
| 2.10     | Wie lange reichen eigentlich noch die Erdölvorräte? . . . . .                                                                                                                                              | 30        |
| 2.11     | Sind die Pkw wirklich die Hauptverursacher der CO <sub>2</sub> -Emissionen? . . .                                                                                                                          | 32        |
| 2.12     | Kann sich im Winter hinter einem Wasserstoffbus Glatteis bilden? . . .                                                                                                                                     | 33        |
| 2.13     | Ist ein Pkw mit einer Wasserstoff-Brennstoffzelle eigentlich CO <sub>2</sub> -frei? .                                                                                                                      | 35        |
| 2.14     | Wie ist das mit der CO <sub>2</sub> -Strafsteuer für Neufahrzeuge? . . . . .                                                                                                                               | 37        |
| 2.15     | Warum haben Erdgasfahrzeuge eine kleinere Reichweite als Benzinfahrzeuge? . . . . .                                                                                                                        | 38        |
| 2.16     | Lohnt es sich, E10 zu tanken? . . . . .                                                                                                                                                                    | 39        |
| 2.17     | Welche Schadstoffe findet man im Abgas eines Verbrennungsmotors? . .                                                                                                                                       | 40        |
| 2.18     | Wie sind die Emissionsgrenzwerte für Pkw in Europa? . . . . .                                                                                                                                              | 43        |
| 2.19     | Wie kann man aus den Abgaskonzentrationen, die mit einem Abgasmessgerät gemessen werden, auf das Luftverhältnis schließen? . .                                                                             | 44        |
| 2.20     | Wie viel AdBlue benötigt man, um die NO <sub>x</sub> -Emissionen von Pkw zu reduzieren? . . . . .                                                                                                          | 45        |
| <b>3</b> | <b>Motorleistung und Mitteldruck . . . . .</b>                                                                                                                                                             | <b>49</b> |
| 3.1      | Ist es normal, dass ein mit Ethanol betriebener Motor einen höheren Verbrauch als beim Betrieb mit Benzin hat? Kann man überhaupt nach einer Umrüstung die gleiche Leistung aus dem Motor holen? . . . . . | 49        |
| 3.2      | Könnte man die Maximalleistung eines Motors nicht einfach dadurch erhöhen, dass man mehr Kraftstoff einspritzt? . . . . .                                                                                  | 51        |
| 3.3      | Was bedeutet eigentlich eine Angabe von 200 g/(kWh)? . . . . .                                                                                                                                             | 52        |
| 3.4      | Ist ein 100-kW-Motor ein guter Motor? . . . . .                                                                                                                                                            | 53        |
| 3.5      | Welchen Kraftstoffmassenstrom benötigt ein 100-kW-Motor? . . . . .                                                                                                                                         | 54        |
| 3.6      | Welchen Luftmassenstrom benötigt ein 100-kW-Motor? . . . . .                                                                                                                                               | 56        |
| 3.7      | Welches Hubvolumen benötigt man für einen 100-kW-Motor? . . . . .                                                                                                                                          | 57        |
| 3.8      | Welche Zahlenwerte für den effektiven Mitteldruck haben typische Saug-Otto- und Saug-Dieselmotoren? . . . . .                                                                                              | 61        |
| 3.9      | Wie kann man den Ladungswechsel verbessern? . . . . .                                                                                                                                                      | 63        |
| 3.10     | Wie kann man bei einem bestehenden Motorkonzept die Leistung um 50 % steigern? . . . . .                                                                                                                   | 66        |
| 3.11     | Warum hat ein Saug-Dieselmotor eine kleinere Leistung als ein hubraumgleicher Saug-Ottomotor? . . . . .                                                                                                    | 67        |

|          |                                                                                                                                                            |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.12     | Könnte man die Leistung eines Motors nicht dadurch erhöhen, dass man den Ventilhub vergrößert und damit die Zylinderladung erhöht? . . . . .               | 68        |
| 3.13     | Welche Bedeutung hat der Begriff der Kolbenflächenleistung? . . . . .                                                                                      | 70        |
| <b>4</b> | <b>Motorthermodynamik . . . . .</b>                                                                                                                        | <b>73</b> |
| 4.1      | Warum gibt es überhaupt noch Verbrennungsmotoren? Ist das nicht eine uralte Technik? . . . . .                                                             | 73        |
| 4.2      | Welchen thermischen Wirkungsgrad kann ein Ottomotor bestenfalls haben? . . . . .                                                                           | 76        |
| 4.3      | Welchen thermischen Wirkungsgrad kann ein Dieselmotor bestenfalls haben? . . . . .                                                                         | 79        |
| 4.4      | Stimmt es, dass ein Ottomotor eine Gleichraumverbrennung und ein Dieselmotor eine Gleichdruckverbrennung hat? . . . . .                                    | 83        |
| 4.5      | Wie kann man die Idealprozesse mit Hilfe von Excel berechnen und grafisch darstellen? . . . . .                                                            | 85        |
| 4.6      | Warum endet im Diagramm mit dem Wirkungsgrad des Gleichdruckprozesses die Linie bei einem Verdichtungsverhältnis von etwa 4 . . . . .                      | 89        |
| 4.7      | Kann man die Kenngröße „Mitteldruck“ auch verstehen? . . . . .                                                                                             | 90        |
| 4.8      | Warum haben Ottomotoren im Teillastbetrieb einen relativ schlechten Wirkungsgrad? . . . . .                                                                | 95        |
| 4.9      | Wie sehen die $p$ - $V$ -Diagramme von Verbrennungsmotoren wirklich aus? . . . . .                                                                         | 97        |
| 4.10     | Wie ändert sich die Kompressionslinie im $p$ - $V$ -Diagramm, wenn man das Verdichtungsverhältnis, das Hubvolumen oder den Saugrohrdruck ändert? . . . . . | 100       |
| 4.11     | Wie kann man bei Ottomotoren auf die Drosselklappe verzichten? . . . . .                                                                                   | 103       |
| 4.12     | Wie groß sind die Reibungsverluste bei einem Verbrennungsmotor? . . . . .                                                                                  | 104       |
| 4.13     | Wie groß ist der Reibmitteldruck handelsüblicher Motoren? . . . . .                                                                                        | 105       |
| 4.14     | Wie groß ist der Wirkungsgrad eines Motors bei Leerlauf? . . . . .                                                                                         | 106       |
| 4.15     | Wie stark geht bei einem 4-Zylinder-Ottomotor die abgegebene Motorleistung zurück, wenn in einem Zylinder die Zündung ausfällt? . . . . .                  | 108       |
| 4.16     | Kann man die Kenngrößen von Motoren aus den Testberichten in Zeitschriften berechnen oder abschätzen? . . . . .                                            | 109       |
| 4.17     | Nach welchen Kriterien kann man Verbrennungsmotoren auslegen? . . . . .                                                                                    | 114       |
| 4.18     | Welche Bedeutung haben die Kennfelder von Verbrennungsmotoren? . . . . .                                                                                   | 116       |
| 4.19     | In manchen Veröffentlichungen fehlen genaue Zahlenangaben zum Kraftstoffverbrauch. Kann man diese trotzdem irgendwie ermitteln? . . . . .                  | 118       |
| 4.20     | Warum sehen die Linien konstanter Motorleistung im Motorenkennfeld wie Hyperbeln aus? . . . . .                                                            | 120       |
| 4.21     | Kann man zur Leistungserhöhung eines Verbrennungsmotors nicht einfach das Zylinderhubvolumen entsprechend vergrößern? . . . . .                            | 122       |

|          |                                                                                                                                              |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.22     | Könnte man einen 3-Wege-Katalysator nicht elektrisch beheizen, damit er nach dem Kaltstart schneller auf Betriebstemperatur kommt? . . . . . | 124        |
| 4.23     | Wie wählt man eine passende Einspritzdüse für einen Ottomotor aus? . .                                                                       | 125        |
| 4.24     | Wie ändern sich die Motorverluste im Kennfeld eines Verbrennungsmotors? . . . . .                                                            | 126        |
| 4.25     | Welche Rückschlüsse kann man aus dem Druck im Innern der Motorzylinder (Zylinderdruckindizierung) über das Motorverhalten ziehen? . . . . .  | 130        |
| 4.26     | Wie kann man aus dem Druck im Innern eines Zylinders auf die Verbrennung schließen (Druckverlaufsanalyse)? . . . . .                         | 136        |
| 4.27     | Wozu dient eine doppelt-logarithmische Darstellung? . . . . .                                                                                | 143        |
| <b>5</b> | <b>Motormechanik . . . . .</b>                                                                                                               | <b>147</b> |
| 5.1      | Wie schnell bewegt sich der Kolben eines Verbrennungsmotors? . . . . .                                                                       | 147        |
| 5.2      | Welche Beschleunigungskräfte muss der Kolben eines Pkw-Motors bei einer Drehzahl von 6000/min aushalten? . . . . .                           | 151        |
| 5.3      | Warum werden sportliche Motoren als kurzhubige Motoren gebaut? . .                                                                           | 152        |
| 5.4      | Warum haben große Motoren immer kleine Nenndrehzahlen? . . . . .                                                                             | 153        |
| 5.5      | Stimmt es, dass die größte Kolbengeschwindigkeit dann auftritt, wenn Pleuelstange und Kurbelkröpfung einen rechten Winkel bilden? . . . . .  | 154        |
| 5.6      | Warum sind Mehrzylindermotoren laufruhiger als Einzylindermotoren? .                                                                         | 155        |
| 5.7      | Wieso entlasten hohe Drehzahlen den Kolbenbolzen? . . . . .                                                                                  | 161        |
| 5.8      | Wie kann man die Ventilhubkurven eines Hubkolbenmotors auslegen? .                                                                           | 162        |
| 5.9      | Können sich die Ventile und der Kolben in der Nähe des oberen Totpunktes berühren? . . . . .                                                 | 166        |
| 5.10     | Wie kann man aus der Ventilhubkurve die Nockengeometrie bestimmen? .                                                                         | 167        |
| 5.11     | Warum baut ein Motorentuner stärkere Ventildfedern ein? . . . . .                                                                            | 169        |
| 5.12     | Welchen Einfluss haben geometrische Änderungen des Tuners auf das Hubvolumen und auf das Verdichtungsverhältnis? . . . . .                   | 171        |
| <b>6</b> | <b>Fahrzeugdynamik . . . . .</b>                                                                                                             | <b>175</b> |
| 6.1      | Warum haben sportliche Fahrzeuge einen schlechten Kraftstoffverbrauch? . . . . .                                                             | 175        |
| 6.2      | Wie groß ist der Kraftstoffverbrauch nach dem Kaltstart? . . . . .                                                                           | 176        |
| 6.3      | Wie groß ist der Leerlaufverbrauch eines Fahrzeuges? . . . . .                                                                               | 178        |
| 6.4      | Kann man den Leerlaufverbrauch eines Fahrzeuges mit einem einfachen Bordcomputer bestimmen? . . . . .                                        | 181        |
| 6.5      | Welche Motorleistung benötigt ein Autofahrer in Deutschland? . . . . .                                                                       | 183        |
| 6.6      | Kann man die Beschleunigungswerte aus Fahrzeugtestberichten nachrechnen? . . . . .                                                           | 184        |
| 6.7      | Wie löst man Differenzialgleichungen numerisch? . . . . .                                                                                    | 190        |

|          |                                                                                                                                |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.8      | In welchem Gang sollte man den Mercedes SL 500 bei 100 km/h fahren, um möglichst viel Sprit zu sparen? . . . . .               | 192        |
| 6.9      | Wie kann man aus dem Kennfeld des TFSI-Motors von Audi den streckenbezogenen Kraftstoffverbrauch des A6 berechnen? . . . . .   | 195        |
| 6.10     | Die Verbrauchskennfelder sehen unterschiedlich und doch ähnlich aus. Kann man sie irgendwie vereinheitlichen? . . . . .        | 201        |
| 6.11     | Wie kann man ermitteln, wie stark ein Motor im Schubbetrieb brems (Teil 1: Messungen mit dem Fahrzeug) . . . . .               | 210        |
| 6.12     | Wie kann man ermitteln, wie stark ein Motor im Schubbetrieb brems (Teil 2: Analyse des Verbrauchskennfeldes) . . . . .         | 215        |
| 6.13     | Wie groß ist der maximale Verbrauch, den der Bordcomputer eines Pkw beim Beschleunigen anzeigt? . . . . .                      | 217        |
| 6.14     | Wie sieht der Fahrzyklus aus, mit dem man den Kraftstoffverbrauch eines Pkw in Europa bestimmt? . . . . .                      | 219        |
| 6.15     | Wie kann man den Europäischen Fahrzyklus nachrechnen? . . . . .                                                                | 221        |
| 6.16     | Wie viel Kraftstoff könnte man im Europäischen Fahrzyklus mit einem Start-Stopp-System sparen? . . . . .                       | 227        |
| 6.17     | Wie viel Kraftstoff könnte man im Europäischen Fahrzyklus mit einem System sparen, das die Bremsenergie rückgewinnt? . . . . . | 228        |
| 6.18     | Sollte man beim Ausrollen-Lassen eines Pkw eher auskuppeln oder nur vom Gas gehen? . . . . .                                   | 229        |
| 6.19     | Wie soll man eigentlich beschleunigen: langsam oder schnell? (Teil 1) .                                                        | 232        |
| 6.20     | Wie soll man eigentlich beschleunigen: langsam oder schnell? (Teil 2) .                                                        | 236        |
| <b>7</b> | <b>Hybrid- und Elektrofahrzeuge . . . . .</b>                                                                                  | <b>239</b> |
| 7.1      | Wie sehr würde in Deutschland der Stromverbrauch steigen, wenn alle Fahrzeuge elektrisch betrieben werden? . . . . .           | 239        |
| 7.2      | Nach welchen Konzepten kann man die Hybridantriebe unterscheiden? .                                                            | 240        |
| 7.3      | Stimmt es, dass Elektrofahrzeuge keine große Reichweite haben können? . . . . .                                                | 242        |
| 7.4      | Wie teuer wäre die Batterie eines Mittelklasse-Pkw, mit dem man 100 km weit elektrisch fahren möchte? . . . . .                | 243        |
| 7.5      | Wie berechnet man den Kraftstoffverbrauch bei einem Plug-in-Fahrzeug? . . . . .                                                | 244        |
| 7.6      | Wie sehen die Fahrzeugantriebskonzepte in zehn Jahren aus? . . . . .                                                           | 246        |
| <b>8</b> | <b>Aufladung von Verbrennungsmotoren . . . . .</b>                                                                             | <b>249</b> |
| 8.1      | Welche Aufladekonzepte gibt es? . . . . .                                                                                      | 249        |
| 8.2      | Nimmt ein Kompressor dem Motor nicht viel Leistung weg? . . . . .                                                              | 253        |
| 8.3      | Wie kann man zu einem Saugmotor einen passenden Kompressor suchen? . . . . .                                                   | 255        |

|                                     |                                                                                                                           |            |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.4                                 | Kann man irgendwie berechnen, wie groß der Massenstrom ist, der bei einem ATL-Motor durch das Wastegate strömt? . . . . . | 258        |
| 8.5                                 | Was versteht man unter einer Sensitivitätsanalyse? . . . . .                                                              | 261        |
| 8.6                                 | Wie legt man einen Turbolader aus? . . . . .                                                                              | 264        |
| 8.7                                 | In welchem Kennfeldbereich benötigt ein Turbomotor ein Wastegate? . .                                                     | 267        |
| <b>Stoffwertetabellen . . . . .</b> |                                                                                                                           | <b>273</b> |
| <b>Stichwort-Tabellen . . . . .</b> |                                                                                                                           | <b>275</b> |
| <b>Literatur . . . . .</b>          |                                                                                                                           | <b>285</b> |
| <b>Sachverzeichnis . . . . .</b>    |                                                                                                                           | <b>287</b> |