

Physik für Auto-Enthusiasten

Warum Autos beschleunigen, Kurven fahren, bremsen, Grip aufbauen, gegen den Luftwiderstand kämpfen, heiß werden und schnell fahren

Dr. Yves J. Hilpisch¹

8. August 2026 (Vorentwurf)

¹Kontakt: <https://linktr.ee/dyjh>. Webseite <https://hilpisch.com>. Recherche, Strukturierung, Ausarbeitung und Visualisierungen wurden durch verschiedene LLMs als Co-Schreibwerkzeug unter menschlicher Anleitung unterstützt.

Vorwort — Das Auto als Physik-Labor

Ein Auto ist eine außergewöhnliche Konzentration von Physik, verpackt in eine vertraute Maschine. Translation und Rotation, Kräfte und Beschleunigung, Impuls, Energieumwandlung, Reibung, Wärme, Fluiddynamik, Schwingungen, Elektrizität und Magnetismus, Regelung und Steuerung — all das wirkt jedes Mal mit, wenn Sie fahren, verborgen hinter dem Lenkrad.

Betrachten Sie, was bereits während einer kurzen, unspektakulären Fahrt passiert:

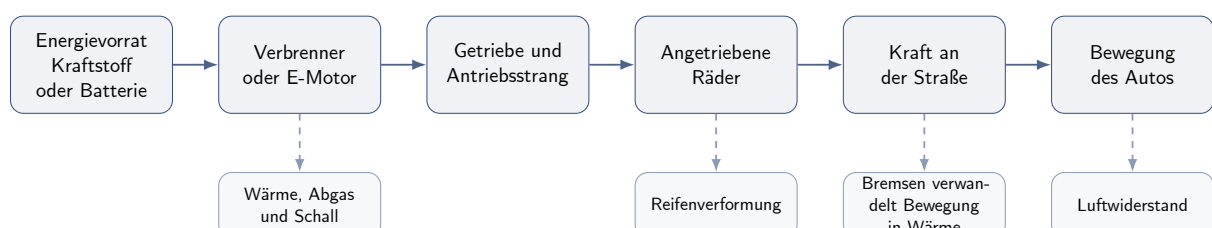
1. chemische oder elektrische Energie liegt an Bord gespeichert;
2. ein Motor wandelt sie in mechanische Leistung um;
3. ein Antriebsstrang überträgt das Drehmoment auf die angetriebenen Räder;
4. die Reifen drücken gegen die Straße — und die Straße drückt zurück;
5. eine große Masse wird beschleunigt;
6. die Luft leistet Widerstand, zunächst leise, dann mit Nachdruck;
7. die Reifen verformen sich und geben Energie als Rollwiderstand ab;
8. Lenkbewegungen biegen die Bahn in Kurven;
9. Federn und Dämpfer absorbieren die Unebenheiten der Straße;
10. Bremsen verwandeln die hart erkämpfte kinetische Energie zurück in Wärme.

Jedes Kapitel dieses Buches greift einen Faden dieses Geflechts auf und folgt ihm, bis ein vertrautes Automobilphänomen physikalisch offensichtlich wird. Das Versprechen lautet:

Am Ende dieses Buches werden Pferdestärken, Bremswege, Getriebeübersetzungen, Luftwiderstandsbeiwerte, Reifengrip, Abtrieb, regenerative Bremsen und Fahrwerk-dämpfung keine isolierten Automobilbegriffe mehr sein. Sie werden Teile eines kohärenten physikalischen Bildes sein.

Die Karte unten zeigt das gesamte Buch auf einer Seite: Ein Auto ist eine Energie- und Kraftmaschine, und jedes Kapitel untersucht einen Teil dieses Flusses — die Hauptkette von gespeicherter Energie zur Bewegung oder einen der vielen Nebenwege, auf denen Energie als Wärme, Schall, verformter Gummi oder verdrängte Luft verloren geht.

Ein Auto ist eine Energie- und Kraftmaschine



Wie man dieses Buch liest

Lesen Sie es als geführte Tour von vorn bis hinten, oder schlagen Sie es bei *Pferdestärke*, *Bremsen*, *Aerodynamik* oder *Fahrwerk* auf und genießen Sie das jeweilige Kapitel für sich. Abbildungen führen, Formeln folgen: Jede wichtige Beziehung wird gezeigt, bevor sie geschrieben wird, und Gleichungen erscheinen nur dort, wo sie eine bereits verstandene Idee verdichten. Farbige Kästen enthalten die wiederkehrenden Stilmittel — *Garagenphysik* (eine kurze Rechnung mit plausiblen Zahlen), *Was Sie spüren* (Physik als Empfindung), *Geschwindigkeit ändert alles* (die nichtlinearen Überraschungen), *Mythos vs. Physik* (eine populäre Vereinfachung, korrigiert), *Streckenrand-Notiz*, *Probieren Sie es gedanklich* und *Eine Gleichung zum Merken*.

Die Referenzflotte

Einige generische Archetypen tauchen im gesamten Buch auf, wenn ein Vergleich hilft. Ihre Zahlen sind bewusst rund und *illustrativ* — sie beschreiben kein konkretes Serienfahrzeug:

Auto A — leichter Sportwagen. Etwa 1 200 kg und 150 kW (200 PS); Heckantrieb, kleine Stirnfläche.

Auto B — Sportlimousine. Etwa 1 800 kg und 330 kW (450 PS); Allradantrieb.

Auto C — sportliches Elektroauto. Etwa 2 200 kg und 450 kW (600 PS); kräftiges Drehmoment schon bei niedriger Geschwindigkeit, rekuperatives Bremsen.

Ob die Energie aus Kraftstoff oder aus einer Batterie kommt — Verbrennungsmotor (ICE), Elektrofahrzeug (EV) oder Hybrid —, die Physik bleibt dieselbe. Genau darum geht es.

Für wen dieses Buch ist

Dieses Buch richtet sich an Auto-Enthusiasten ohne formale Physikausbildung; an Fahrer, die leistungsstarke Fahrzeuge, Sportwagen, Elektroautos oder den Motorsport lieben und wissen wollen, *warum* die Dinge funktionieren; und an technisch neugierige Leser, die ahnen, dass ein Auto ein besserer Physik-Lehrer sein könnte als ein Klotz, der eine schiefe Ebene hinunterrutscht. Es setzt nur Grundrechenarten, den Umgang mit Prozentsätzen, sehr elementare Algebra und die Bereitschaft voraus, eine einfache Gleichung anzuschauen, wenn sie tatsächlich etwas klärt. Es setzt keine Analysis voraus. Leser mit Ingenieurhintergrund und Studierende, die einen intuitiven Begleiter zur einführenden Mechanik suchen, sind ebenso willkommen.

Stil und Vorgehen

Drei Gewohnheiten prägen jedes Kapitel. *Auto zuerst, Physik zweitens*: Jedes Kapitel beginnt mit einer Frage, die ein Fahrer tatsächlich stellen könnte, niemals mit einem Gesetz. *Intuition vor Formel*: Die Idee wird in Worten und Bildern erklärt, bevor sie in Symbole verdichtet wird. *Leicht, aber korrekt*: Der Tonfall ist entspannt, die Physik nicht. Wo ein einfaches Modell nur eine erste Näherung ist — Reifenreibung ist das Paradebeispiel —, sagt das Buch das auch. Der technisch versierte Leser findet die vollständige mathematische Entwicklung all dessen, was hier verwendet wird, im Begleitband *Newtonian Physics — A Self-Contained Introduction with Mathematical Foundations*; dieses Buch greift diese Physik wieder auf, spricht aber die Sprache des Automobils. Wenn ein populärer Glaube mit den Fakten kollidiert, schlagen wir uns auf die Seite der Fakten — fröhlich und ohne Pedanterie.

Notation und Konventionen

Die formale Grundlage dieses Buches ist das Internationale Einheitensystem (SI): Meter, Sekunden, Kilogramm, Newton, Joule und Watt. Aber dies ist ein Autobuch; deshalb wird jede relevante Größe routinemäßig in die Einheiten übersetzt, die Fahrer tatsächlich verwenden: Kilometer pro Stunde, Kilowatt, Pferdestärken, Newtonmeter und Kilowattstunden. Die folgenden Umrechnungen werden ständig verwendet; Anhang B stellt sie ausführlicher zusammen.

Geschwindigkeit: km/h und m/s

Die Physik rechnet in Metern pro Sekunde; Tachometer arbeiten in Kilometern pro Stunde. Die Brücke bildet die exakte Regel

$$\text{km/h} \div 3,6 = \text{m/s} \quad \text{und} \quad \text{m/s} \times 3,6 = \text{km/h}.$$

Drei Anker decken den interessanten Bereich ab: $100 \approx 27,8$, $200 \approx 55,6$ und $300 \approx 83,3 \text{ m/s}$.

Leistung, Energie und Drehmoment

- Leistung: $1 \text{ kW} = 1\,000 \text{ W}$; $1 \text{ PS} \approx 0,735 \text{ kW}$ (metrische Pferdestärke); die imperiale mechanische Pferdestärke ist nahe, aber nicht identisch: $1 \text{ hp} \approx 0,746 \text{ kW}$.^a Dieses Buch verwendet kW mit PS in Klammern.
- Energie: das Joule (J), mit $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$ — eine besonders praktische Einheit für Batterien.
- Drehmoment: Newtonmeter (Nm); Drehzahl in Umdrehungen pro Minute (U/min), umgerechnet mit $\omega = 2\pi \text{ U/min}/60$, wenn Radiant pro Sekunde benötigt werden.
- Beschleunigung: Meter pro Quadratsekunde, oft verglichen mit $1 g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$.

^aIn englischsprachigen Quellen: *mechanical horsepower*.

Symbole auf einen Blick

Die wiederkehrenden Größen in der Reihenfolge ihres Auftretens: t Zeit; x Position; v Geschwindigkeit; a Beschleunigung; m Masse; F Kraft; p Impuls; K kinetische Energie; P Leistung; τ Drehmoment; ω Winkelgeschwindigkeit; N Normalkraft; μ Reibungskoeffizient; r Radius bzw. Reifenradius; h Höhe (z.B. des Schwerpunkts); L Radstand; ρ Luftdichte; C_D Luftwiderstandsbeiwert; A Stirnfläche; C_{rr} Rollwiderstandsbeiwert; k Federsteifigkeit; I Massenträgheitsmoment; U potenzielle Energie. Skalare sind kursiv; der seltene Vektor erscheint fett, z.B. $\mathbf{v}$.

Die Referenzflotte

Wenn ein Vergleich hilft, nutzt das Buch drei generische Archetypen, die im Vorwort vorgestellt wurden: Auto A (leichter Sportwagen, $\sim 1\,200\text{ kg}$, $\sim 150\text{ kW}$), Auto B (Sportlimousine, $\sim 1\,800\text{ kg}$, $\sim 330\text{ kW}$) und Auto C (sportliches Elektroauto, $\sim 2\,200\text{ kg}$, $\sim 450\text{ kW}$). Alle Zahlen sind illustrativ, gerundet und gehören zu keinem konkreten Serienfahrzeug.

Danksagung

Mein Dank gilt der KI-Forschungsgemeinschaft, deren Arbeit die Entwicklung moderner KI-Systeme vorangetrieben hat. Sie hat Projekte wie dieses Buch überhaupt erst möglich und zu einer erfreulichen Erfahrung gemacht. Es ist ein Privileg, diese Phase raschen Fortschritts mitzuerleben — und einen kleinen Beitrag dazu zu leisten.

Ich bin kein Automobilingenieur von Beruf, aber Autos und Physik haben mich gepackt, solange ich mich erinnern kann. Der Einsatz moderner KI-Systeme ermöglicht es mir, Bücher zu schreiben — und beim Schreiben von ihnen zu lernen —, die ich mir schon immer gewünscht habe. Stil und Präsentation spiegeln meine Vorlieben und Erfahrungen wider: Auto zuerst, Bilder zuerst, klare Prosa und genau so viel Formalismus, wie die Intuition schärft.

Ich bin dankbar für Rückmeldungen zu jedem meiner KI-gestützten Projekte. Kontaktmöglichkeiten finden Sie unter <https://linktr.ee/dyjh>.

Hinweis. Dieses Buch ist ausschließlich für Lehr- und Illustrationszwecke gedacht. Es wurde nicht formal begutachtet oder als Lehrbuch geprüft, und es kann Ungenauigkeiten oder Auslassungen enthalten. Es wird in der Hoffnung geteilt, dass Leser von einer anderen Art der Präsentation dieser Themen für ein breiteres Publikum profitieren mögen, sollte aber nicht als maßgebliche Referenz angesehen werden. Leserinnen und Leser sind eingeladen, wichtige Ergebnisse und Interpretationen mit Standardwerken der Technik oder qualifizierten Lehrkräften gegenzuprüfen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort — Das Auto als Physik-Labor	i
Notation und Konventionen	iii
Danksagung	v
I Bewegung: Was das Auto tatsächlich tut	1
1 Geschwindigkeit ist nicht Beschleunigung	3
1.1 Die Ruhe bei konstanter Geschwindigkeit	3
1.2 Beschleunigung: die Änderung, die Sie tatsächlich spüren	4
1.3 Bremsen und Lenken sind ebenfalls Beschleunigung	6
1.4 Was das für Autos bedeutet	7
2 Masse, Kraft und der Schub in Ihrem Rücken	8
2.1 Trägheit: Warum sich nichts von selbst ändert	8
2.2 Kraft und Masse: $F = ma$	9
2.3 Woher die Vorwärtskraft wirklich kommt	10
2.4 Was das für Autos bedeutet	11
2.5 In einer Minute	11
3 Impuls und Energie: ähnlich klingend, sehr unterschiedlich	13
3.1 Zwei Maße für „Bewegung“	13
3.2 Impuls: die Größe der Bewegung	14
3.3 Kinetische Energie: der Preis der Geschwindigkeit	15
II Das Auto in Bewegung bringen	16
4 Drehmoment, Pferdestärke und der große Stammtischstreit	18
4.1 Drehmoment: die Drehkraft	18
4.2 Leistung: Arbeit pro Zeit	19
4.3 Die Kurven	20
4.4 Was das für Autos bedeutet	22
4.5 In einer Minute	22
5 Getriebe: Kraft gegen Geschwindigkeit tauschen	23
5.1 Das Getriebe als Hebel für Rotation	23
5.2 Von der Kurbelwelle zur Kontaktfläche	24
5.3 Die Treppe	25
5.4 Was das für Autos bedeutet	26

5.5	In einer Minute	26
6	Woher die Leistung kommt: Verbrenner, E-Auto und Hybrid	28
6.1	Zwei Arten, Energie zu tragen	28
6.2	Der Verbrennungsmotor: eine Heizung mit Ambitionen	29
6.3	Der Elektromotor: Drehmoment ab Umdrehung Null	29
6.4	Der Hybrid: eine arrangierte Ehe, die funktioniert	31
6.5	Was das für Autos bedeutet	31
6.6	In einer Minute	31
III	Die vier kleinen Kontaktflächen, die das Geschehen bestimmen	33
7	Reifen, Grip und Reibung	35
7.1	Die Kontaktfläche	35
7.2	Reibung: ein einfaches Gesetz	35
7.3	Der Reibungskreis: ein Budget für alles	36
7.4	Schlupf: das kleine Geheimnis des Gummis	37
7.5	Was das für Autos bedeutet	38
7.6	In einer Minute	39
8	Beschleunigung, Lastverlagerung und warum Autos hinten runterhängen	40
8.1	Das Kräftepaar	40
8.2	Die Formel	41
8.3	Warum sich die Karosserie bewegt (und warum das nicht der Punkt ist)	42
8.4	Was das für Autos bedeutet	42
8.5	In einer Minute	43
9	Bremsen: Geschwindigkeit in Wärme verwandeln	44
9.1	Die Physik des Anhaltens	44
9.2	Wohin die Energie geht: Wärme	45
9.3	Die EV-Ausnahme: Energie bunkern	46
9.4	Was das für Autos bedeutet	47
9.5	In einer Minute	47
IV	Kurvenfahrt: Geschwindigkeit ohne Gerade	49
10	Warum ein Auto Kraft braucht, um eine Kurve zu fahren	51
10.1	Kurvenfahrt ist Beschleunigung	51
10.2	Das Kurvenbudget	52
10.3	Was das für Autos bedeutet	54
10.4	In einer Minute	54
11	Untersteuern, Übersteuern und Gier	55
11.1	Wie ein Reifen lenkt: der Schräglaufwinkel	55
11.2	Lastverlagerung, nun seitlich	56
11.3	Die Balance: Welches Ende gibt zuerst auf	57
11.4	Was das für Autos bedeutet	59
11.5	In einer Minute	59

V	Geschwindigkeit ändert alles	60
12	Luftwiderstand: die unsichtbare Mauer	62
12.1	Die Luft hat Masse	62
12.2	Zwei Fahrwiderstände, ein Übergang	63
12.3	Die dritte Potenz: Warum Geschwindigkeit Leistung verschlingt	63
13	Warum Höchstgeschwindigkeit Pferdestärken verschlingt	65
13.1	Das Tauziehen	65
13.2	Warum die letzten Kilometer am meisten kosten	66
13.3	Das Getriebe: der Türsteher	67
13.4	Was das für Autos bedeutet	68
13.5	In einer Minute	68
14	Abtrieb, Auftrieb und Hochgeschwindigkeitsstabilität	69
14.1	Luft nach unten drücken	69
14.2	Wachsen mit dem Quadrat	70
14.3	Last in Kurvengeschwindigkeit verwandeln	71
14.4	Balance: Wo die Kraft landet, ist entscheidend	72
14.5	Der Preis auf der Geraden	73
14.6	Was das für Autos bedeutet	74
14.7	In einer Minute	74
VI	Das Auto beherrschbar machen	75
15	Fahrwerk: Federn, Dämpfer und die Kunst, nicht ewig zu schaukeln	77
15.1	Was die Feder tut	77
15.2	Warum der Dämpfer existiert	78
15.3	Der Dämpfungsbereich	78
15.4	Resonanz: der falsche Rhythmus	79
15.5	Gefedert und ungefedert	80
15.6	Der Zielkonflikt der Steifigkeit	80
15.7	Was das für Autos bedeutet	81
15.8	In einer Minute	81
16	Rotierende Masse, Räder und warum der Ort zählt	83
16.1	Das rollende Rad macht zwei Jobs gleichzeitig	83
16.2	Die echten Kosten zählen	84
16.3	Der Getriebemultiplikator	84
16.4	Ungefederte Masse ist ein Problem für sich	85
16.5	Was das für Autos bedeutet	86
16.6	In einer Minute	86
VII	Energie, Effizienz und Reichweite	88
17	Wohin die Energie geht	90
17.1	Verluste gibt es immer	90
17.2	Steigungen: Energie speichern und zurückgewinnen	91
17.3	Den Fluss rückwärts lesen	92
17.4	Was das für Autos bedeutet	93
17.5	In einer Minute	93

18 Die Physik hinter den Zahlen	94
18.1 Ein Sprint, zwei Geschichten	94
18.2 Die Karte, die höflich lügt	95
18.3 Die Entschlüsselungstabelle	96
18.4 Was das für Autos bedeutet	97
18.5 In einer Minute	97
19 Epilog — Die nächste Fahrt wird sich anders anfühlen	99
 VIII Referenzanhänge	 100
A Die 15 Gleichungen, die ein Auto-Enthusiast kennen sollte	102
B Einheiten ohne Schmerz	104
B.1 Geschwindigkeit: km/h und m/s	104
B.2 Leistung: kW, PS und hp	104
C Zehn Überschlagsrechnungen fürs Auto	105
D Mythen-Index	107
Glossar	109
Bibliographie und Anmerkungen	111
Hinweis	113

Abbildungsverzeichnis

1.1	Zwei Maßstäbe für km/h und m/s	4
1.2	Geschwindigkeit und Beschleunigung bei einem harten Start	5
1.3	Geschwindigkeit und Beschleunigung sind verschiedene Dinge	7
2.1	gleiche Kraft, andere Masse	9
2.2	Kraft und Gegenkraft an der Kontaktfläche	10
2.3	Frei-Körper-Diagramm eines beschleunigenden Autos	11
3.1	Impuls wächst linear, kinetische Energie quadratisch	14
3.2	Kinetische Energie bei 50, 100, 150 und 200 km/h	15
4.1	Drehmoment ist Kraft mal Hebelarm	19
4.2	Drehmoment- und Leistungskurven eines Turbomotors	21
5.1	Ein Zahnradpaar tauscht Geschwindigkeit gegen Drehmoment	24
5.2	Radkraft gegen Geschwindigkeit in den Gängen 1–5	25
6.1	Zwei typische Drehmomentverläufe: Verbrenner und Elektromotor	30
6.2	Tank-zu-Rad- und Batterie-zu-Rad-Wirkungsgrad	30
7.1	Reibungskoeffizient nach Oberfläche	36
7.2	Der Reibungskreis: ein Budget für alle Richtungen	37
7.3	Grip gegen Schlupf: warum ABS existiert	38
8.1	Warum ein Auto beim Beschleunigen hinten einfedert	41
8.2	Achslasten: statisch, bremsend, beschleunigend	42
9.1	Bremsweg wächst mit dem Quadrat der Geschwindigkeit	45
9.2	Energie, die die Bremsen schlucken müssen: 100–0 km/h	46
10.1	Lenken ist Beschleunigung zum Mittelpunkt hin	52
10.2	Kurvengeschwindigkeitsgrenze gegen Radius, trocken und nass	53
11.1	Der Schräglaufwinkel: wie ein Reifen Seitenkraft erzeugt	56
11.2	Querkraft gegen Schräglaufwinkel	56
11.3	Drei Wege durch dieselbe Kurve	58
12.1	Rollwiderstand gegen Luftwiderstand	63
12.2	Leistung gegen Geschwindigkeit: der kubisch wachsende Bedarf	64
13.1	Höchstgeschwindigkeit entsteht, wenn benötigte und verfügbare Leistung sich treffen	66
13.2	Die teuren letzten km/h	67

14.1 Wie ein Flügel Abtrieb erzeugt	70
14.2 Abtrieb wächst mit dem Quadrat der Geschwindigkeit	71
14.3 Abtrieb hebt die Kurvengrenze	72
15.1 Eine Ecke eines Autos: das Viertelauto-Modell	78
15.2 Karosseriebewegung nach einem Stoß für drei Dämpfungsniveaus	79
15.3 Resonanz: warum Rhythmus mehr zählt als Größe	80
16.1 Das rollende Rad: null am Boden, doppelte Geschwindigkeit oben	84
16.2 Rotierende Teile wirken wie Zusatzmasse — und die Gänge entscheiden, wie viel	85
17.1 Wohin die Energie bei stabilen 120 km/h geht	91
17.2 Bergauf wird Energie gespeichert; bergab entscheidet, wer sie zurückbekommt	92
18.1 Ein Sprint, zwei unterschiedliche Physikgeschichten	95
18.2 Leistung je Tonne ordnet die Höchstgeschwindigkeit nicht	95

Teil I

Bewegung: Was das Auto tatsächlich tut

Überblick Teil I

Bevor irgendetwas erklärt werden kann, muss es beschrieben werden. Kapitel 1 trennt die beiden Größen, die die Alltagssprache gern verwechselt — Geschwindigkeit und Beschleunigung — und zeigt, warum sich eine ruhige Autofahrt und ein harter Start so unterschiedlich anfühlen. Kapitel 2 fragt dann, was ein Auto tatsächlich nach vorn schiebt, und führt die Partnerschaft zwischen Kraft und Masse ein. Kapitel 3 gibt dem schnellen, schweren Auto seine beiden Visitenkarten: Impuls und kinetische Energie — ähnlich klingende Ideen mit sehr unterschiedlichen Konsequenzen.

Kapitel 1

Geschwindigkeit ist nicht Beschleunigung

Mit 200 km/h auf einer leeren, geraden Autobahn zu fahren, kann sich seltsam ruhig anfühlen. Der Motor summt, die Landschaft gleitet vorbei, der Kaffee im Becherhalter bleibt ungestört. Und doch drückt ein Ampelstart von 0 auf 100 km/h in vier Sekunden — also auf die halbe Geschwindigkeit — Sie in den Sitz und lässt Ihren Beifahrer nach dem Haltegriff greifen. Wenn Geschwindigkeit allein das Drama wäre, müsste die Autobahnfahrt klar gewinnen. Tut sie nicht. Etwas anderes ist am Werk, und dieses Etwas ist Gegenstand dieses Kapitels.

Die Frage

Warum kann 100 km/h sich völlig ruhig anfühlen, während *der Weg von 0 auf 100 km/h* dramatisch wirken kann?

Symbole auf einen Blick

t Zeit [s]; x Position [m]; Δx zurückgelegte Strecke [m]; Δt verstrichene Zeit [s]; v Geschwindigkeit [m/s oder km/h]; a Beschleunigung [m/s²]; $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$, die Erdbeschleunigung, als praktischer Maßstab verwendet.

Auf einen Blick

Geschwindigkeit sagt Ihnen, wie schnell Sie sich bewegen. Beschleunigung sagt Ihnen, wie rasch sich Ihre Geschwindigkeit ändert — der Größe *oder* der Richtung nach. Ihr Körper meldet Beschleunigung, niemals Geschwindigkeit. Fahren, Starten, Bremsen und Lenken fühlen sich unterschiedlich an, weil sie unterschiedliche Beschleunigungsgeschichten sind, nicht unterschiedliche Geschwindigkeitsgeschichten.

1.1 Die Ruhe bei konstanter Geschwindigkeit

Stellen Sie sich eine lange, gerade, gut asphaltierte Autobahn vor und ein Auto, das stabil bei 200 km/h liegt. Die Tachonadel steht. Abgesehen vom Windgeräusch und dem möglichen Bußgeldbescheid, mit dem Sie sich gedanklich auseinandersetzen, passiert nichts Spektakuläres — und die Physik stimmt zu. Das Auto legt pro Zeiteinheit eine konstante Strecke zurück, und genau das bedeutet das Wort *Geschwindigkeit*:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t},$$

die zurückgelegte Strecke geteilt durch die dafür benötigte Zeit. Bei 200 km/h schluckt das Auto 200 Kilometer pro Stunde, oder — in den Einheiten, die die Physik bevorzugt — etwa 55,6 Meter pro Sekunde.

Warum zwei Einheiten für dieselbe Idee? Tachometer sprechen Kilometer pro Stunde, weil Fahrer in Strecken und Reisezeiten denken; die Physik spricht Meter pro Sekunde, weil Kräfte, Energien und Leistungen im Internationalen Einheitensystem (SI) sauber zusammenpassen. Die Übersetzung ist eine exakte Division, zusammengefasst in Abbildung 1.1: Kilometer pro Stunde geteilt durch 3,6 ergibt Meter pro Sekunde.

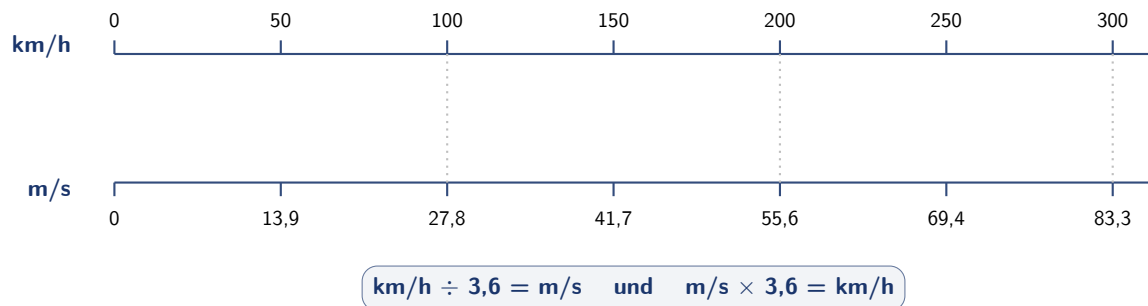


Abbildung 1.1: Dieselbe physikalische Geschwindigkeit auf zwei Skalen. Die Umrechnungsregel ist exakt: $1 \text{ km/h} = 1/3,6 \text{ m/s}$. Drei Anker lohnen sich zu merken: $100 \approx 27,8$, $200 \approx 55,6$ und $300 \approx 83,3 \text{ m/s}$.

Garagenphysik

Die drei Umrechnungen, die es sich zu merken lohnt, weil sie im Buch immer wiederkehren:

- $100 \text{ km/h} \approx 27,8 \text{ m/s}$;
- $200 \text{ km/h} \approx 55,6 \text{ m/s}$;
- $300 \text{ km/h} \approx 83,3 \text{ m/s}$.

Bei 200 km/h legen Sie fast 56 Meter pro Sekunde zurück — mehr als die Länge eines olympischen Schwimmbeckens, in jeder einzelnen Sekunde. Und dennoch spüren Sie in einem gut gebauten Auto fast nichts. Ihre Sinne können konstante Geschwindigkeit überhaupt nicht erfassen; sie nehmen nur Geräusche, Vibrationen und das Blickfeld wahr. Ein Fahrgast in einem flüsterleisen Zug bei 300 km/h mit zugezogenen Vorhängen hätte keine Ahnung, dass der Zug fährt.

Die ruhige Fahrt ist also keine Täuschung durch weiche Federung oder gute Sitze. Konstante Geschwindigkeit ist für Ihren Körper tatsächlich ein Nicht-Ereignis. Die interessante Frage ist, was passiert, wenn sich die Geschwindigkeit *ändert*.

1.2 Beschleunigung: die Änderung, die Sie tatsächlich spüren

Die Ampel wird grün, der Fahrer gibt Vollgas. Jetzt wandert die Tachonadel, statt stillzustehen, und Sie werden fest in den Sitz gedrückt. Die Größe, die die Stimmung verändert hat, ist die Beschleunigung: die Rate, mit der sich die Geschwindigkeit ändert,

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

Ein Auto, das 100 km/h — das sind 27,8 m/s — vier Sekunden nach dem Start erreicht, hat im Mittel eine Beschleunigung von

$$a_{\text{avg}} = \frac{27,8 \text{ m/s}}{4 \text{ s}} \approx 6,9 \text{ m/s}^2 \approx 0,7 g.$$

Bei diesem letzten Vergleich lohnt es sich, kurz innezuhalten. Wir messen alltägliche Beschleunigungen gegen g , die Beschleunigung, die Ihnen die Schwerkraft im freien Fall geben würde, weil unsere Körper $1 g$ genau kennen. Ein munterer Familienwagen, der in zehn Sekunden von 0 auf 100 km/h beschleunigt, kommt im Mittel auf etwa $0,28 g$; ein ernsthafter Sportwagen, der in vier Sekunden startet, auf $0,7 g$; die schnellsten Serienfahrzeuge überschreiten für einen Moment $1 g$. Der Druck in Ihrem Rücken ist die physische Signatur dieser Zahl.

Zwei Feinheiten verbergen sich hinter der Wendung „im Mittel“. Erstens ist 0–100 km/h in vier Sekunden eine *mittlere* Beschleunigung: Sie vergleicht zwei Geschwindigkeiten mit der Stoppuhr und ignoriert alles dazwischen. Zweitens ist die *augenblickliche* Beschleunigung bei einem echten Start alles andere als konstant. Sie erreicht früh ihren Höhepunkt — wenn Reifen, Getriebe und Leistungsentfaltung am besten zusammenarbeiten — und fällt ab, sobald die Geschwindigkeit steigt. Abbildung 1.2 zeigt den Verlauf eines harten Starts: Die Geschwindigkeitskurve steigt steil und beginnt dann abzuflachen, während die Beschleunigungskurve hoch beginnt und abklingt. Die gestrichelte Sekante im linken Bild ist der Mittelwert; die Kurve selbst ist die Wahrheit.

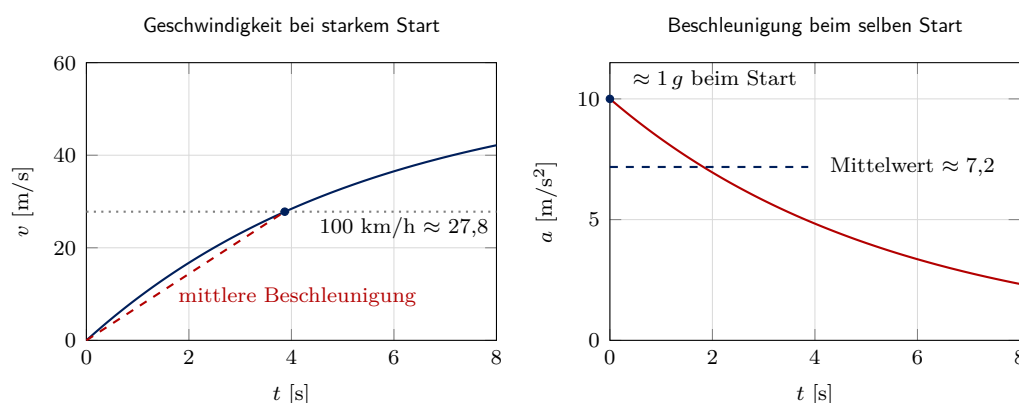


Abbildung 1.2: Ein harter Start (illustrative Kurve). Links: Die Geschwindigkeit steigt zunächst rasch und ebnet sich dann ab; die gestrichelte Sekante zeigt die *mittlere* Beschleunigung über den 0–100 km/h-Sprint. Rechts: Die augenblickliche Beschleunigung ist am Anfang am höchsten und klingt mit steigender Geschwindigkeit ab — ein Grund, warum 0–100-km/h- und 100–200-km/h-Zeiten unterschiedliche Geschichten erzählen.

Was Sie spüren

Während eines Starts fühlt es sich so an, als würde eine mysteriöse Kraft Sie rückwärts in den Sitz drücken. Nichts Derartiges existiert. Ihr Körper tendiert schlicht dazu, das weiterzutun, was er gerade tat — relativ zur Straße stillzusitzen — während der Sitz, fest mit dem beschleunigenden Auto verbunden, *Sie* nach vorne drückt. Der Druck in Ihrem Rücken ist der Sitz, der seine Aufgabe erfüllt: Ihren Körper zusammen mit dem Auto zu beschleunigen. Kapitel 2 macht aus dieser Empfindung ein Gesetz.

Probieren Sie es gedanklich

Ein Nachtzug gleitet auf einer perfekt geraden, perfekt glatten Strecke mit konstanten 300 km/h. Beschleunigen Sie? Und einen Moment später, wenn der Lokführer sanft von 300 auf 280 km/h bremst, beschleunigen Sie dann? (Antworten: nein, und ja — lesen Sie weiter, falls Sie das überrascht.)

1.3 Bremsen und Lenken sind ebenfalls Beschleunigung

Hier trennen sich Alltagssprache und Physik. Im Showroom bedeutet „Beschleunigung“ schneller werden. In der Physik ist Beschleunigung *jede* Änderung der Geschwindigkeit — und die Geschwindigkeit hat sowohl eine Größe (die Schnelligkeit) als auch eine Richtung. Drei vertraute Situationen zählen daher ebenfalls als Beschleunigung, und Abbildung 1.3 stellt sie nebeneinander:

- **Bremsen.** Die Geschwindigkeit schrumpft, während sie in dieselbe Richtung zeigt, also zeigt der Beschleunigungsvektor *rückwärts*, gegen die Bewegung. Ingenieure sagen manchmal „Verzögerung“; Physiker sagen einfach, die Beschleunigung ist negativ. Eine entschlossene Notbremsung erreicht rund 0,8–1,0 *g* — stärker, als die meisten Autos beschleunigen können.
- **Lenken.** Ein Auto, das mit konstanten 80 km/h durch eine Kurve fegt, hat eine konstante Schnelligkeit, aber eine sich ändernde Geschwindigkeit, weil die Richtung ständig rotiert. Die Beschleunigung zeigt zur Innenseite der Kurve, und Kapitel 10 wird zeigen, dass sie mit dem *Quadrat* der Kurvengeschwindigkeit wächst — eines der folgenreichsten Quadrate in diesem Buch.
- **Starten.** Der intuitive Fall: Schnelligkeit und Beschleunigung zeigen in dieselbe Richtung, und der Tacho steigt.

Nur die vierte Szene in Abbildung 1.3 — stabile Geschwindigkeit auf einer geraden Straße — hat überhaupt keine Beschleunigung. Beachten Sie, was das bedeutet: von Fahren, Starten, Bremsen und Lenken ist die *ruhige* Variante das Fahren, unabhängig davon, ob die Fahrt bei 50 oder bei 250 km/h stattfindet.

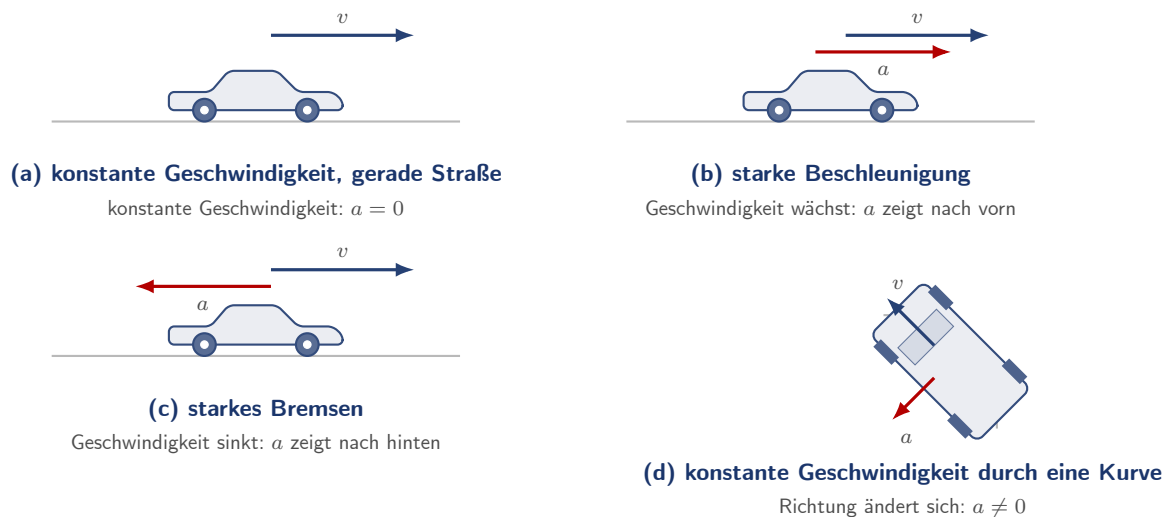


Abbildung 1.3: Vier alltägliche Fahrscenen. (a) Fahren mit konstanter Geschwindigkeit: Die Geschwindigkeit v ist hoch, aber die Beschleunigung a ist null. (b) Starten: a zeigt nach vorne, in Bewegungsrichtung. (c) Bremsen: a zeigt entgegen der Bewegung. (d) Lenken mit konstanter Geschwindigkeit: Die Richtung von v ändert sich, daher beschleunigt das Auto zur Innenseite der Kurve, obwohl sich die Tachonadel nicht bewegt.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Hohe Geschwindigkeit bedeutet hohe Beschleunigung.“ **Physik:** Ein Auto oder Zug kann sich sehr schnell bewegen und dabei praktisch keine Beschleunigung erfahren — genau das ist eine konstante Fahrt. Umgekehrt kann ein Auto im Schritttempo heftig beschleunigen: Jeder harte Start beginnt bei $v = 0$. Geschwindigkeit beschreibt, wo die Nadel steht; Beschleunigung beschreibt, was die Nadel *tut*. Die beiden sind unabhängig, und sie zu verwechseln ist einer der häufigsten Denkfehler in Autogesprächen.

1.4 Was das für Autos bedeutet

Warum geben Hersteller überhaupt 0–100 km/h-Zeiten an? Weil eine einzige Zahl — Sekunden aus dem Stand auf 100 km/h — eine mittlere Beschleunigungsangabe ist, die sich jeder Fahrer vorstellen kann. Sie ist ehrlich, soweit sie geht, aber sie verdichtet die gesamte Geschichte aus Abbildung 1.2 zu einem einzigen Datenpunkt. Zwei Autos mit identischen 0–100-Zeiten können sie völlig unterschiedlich zustande bringen: eines brutal am Anfang und atemlos später, das andere stetig aufbauend. Spätere Kapitel werden diese Form entschlüsseln — Traktion und Getriebe in Kapitel 5 und 7, die schwindende Kraft bei hoher Geschwindigkeit in Kapitel 13 und den Grund, warum sich Elektroautos aus dem Stand so heftig anfühlen, in Kapitel 6.

Merken Sie sich vorerst den Maßstab: eine Beschleunigung von etwa 7 m/s^2 bedeutet physikalisch

Kapitel 2

Masse, Kraft und der Schub in Ihrem Rücken

Ihr Motor kann nicht an der Straße ziehen. Ihre Reifen können es. Öffnen Sie die Motorhaube und bewundern Sie, was Sie wollen: zwischen der Mechanik und dem Asphalt liegen vier Gummistücke, jedes etwa handteller groß, und alles, was das Auto je tut — jeder Start, jeder Stopp, jede Kurve — wird über sie ausgehandelt. Dieses Kapitel fragt, woher die Kraft, die ein Auto beschleunigt, tatsächlich kommt, und warum die Antwort mit der Straße zu tun hat, die *Sie* drückt.

Die Frage

Was bringt ein Auto tatsächlich zum Beschleunigen?

Symbole auf einen Blick

m Masse [kg]; F Kraft [N]; F_{net} resultierende (Gesamt-)Kraft [N]; a Beschleunigung [m/s^2]; N Normalkraft, der senkrechte Druck zwischen Straße und Reifen [N]; $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$.

Auf einen Blick

Beschleunigung braucht eine resultierende Kraft, und Masse widersteht Beschleunigung: $F_{\text{net}} = ma$. Die Vorwärtskraft kommt nicht daher, dass der Motor gegen die Luft drückt; sie gelangt über die Reifen, von der Straße, gemäß Newtons drittem Gesetz.

2.1 Trägheit: Warum sich nichts von selbst ändert

Kapitel 1 endete mit einer ruhigen Beobachtung: Ein Auto, das mit konstanter Geschwindigkeit fährt, hat null Beschleunigung. Newtons erstes Gesetz ist der Grund, warum ein solcher Zustand natürlich und nicht wundersam ist. Ein Körper tut weiter, was er gerade tut — stillstehen oder sich mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig bewegen — sofern keine *resultierende äußere Kraft* auf ihn wirkt. Geparkte Autos laufen nicht davon; fahrende Autos beschleunigen oder verzögern nicht spontan. (Ein reales fahrendes Auto *würde* langsamer werden, weil Luft- und Rollwiderstand an ihm zerren; bei konstanter Geschwindigkeit muss der Motor lediglich diese Verluste ausgleichen. Kapitel 17 führt diese Rechnung weiter aus.)

Die Eigenschaft, die jeder Änderung der Bewegung widersteht, ist die *Trägheit*, und ihr quantitatives Maß ist die *Masse*. Ein schwereres Auto lässt sich schwerer in Bewegung setzen, schwerer stoppen und schwerer wenden — nicht wegen einer mysteriösen zusätzlichen Eigenschaft, sondern weil seine Masse größer ist. Diese einfache Tatsache prägt den Automobilbau

stärker als jede Stilmode: Jedes Kilogramm, das einem Auto hinzugefügt wird, belastet jeden Start, jeden Stopp und jede Kurve.

2.2 Kraft und Masse: $F = ma$

Newtons zweites Gesetz verdichtet die ganze Geschichte in drei Symbole:

$$F_{\text{net}} = ma.$$

In Worten: Die Beschleunigung eines Autos ist gleich der *resultierenden* Kraft, die auf es wirkt, geteilt durch seine Masse. Verdoppeln Sie die Kraft, verdoppeln Sie die Beschleunigung; verdoppeln Sie die Masse, halbieren Sie sie. Kraft wird in Newton (N) gemessen: Ein Newton ist die Kraft, die nötig ist, um ein Kilogramm mit einem Meter pro Quadratsekunde zu beschleunigen. Ein kleiner Apfel, von der Schwerkraft gezogen, drückt mit etwa einem Newton auf Ihre Hand; 6 000 N sind also ungefähr der Gravitationszug von sechstausend Äpfeln — oder, weniger bildhaft, von etwa 610 kg erwachsener Menschheit.

Garagenphysik

Nehmen Sie eine resultierende Antriebskraft von 6 000 N — eine plausible Größe für ein munteres Auto bei niedriger Geschwindigkeit — und wenden Sie sie auf zwei verschiedene Fahrzeuge an, wie in Abbildung 2.1 gezeigt:

- **Leichter Sportwagen**, $m = 1\,200\text{ kg}$: $a = F/m = 6\,000/1\,200 = 5,0\text{ m/s}^2 \approx 0,51\text{ g}$. Könnte diese Kraft gehalten werden, so würde 0–100 km/h $27,8/5,0 \approx 5,6$ Sekunden dauern.
- **Schweres SUV**, $m = 2\,400\text{ kg}$: $a = 6\,000/2\,400 = 2,5\text{ m/s}^2 \approx 0,25\text{ g}$, und 0–100 km/h würde etwa 11,1 Sekunden dauern.

Gleiche Kraft, doppelte Masse, genau halbe Beschleunigung. Reale Autos können die Spitzkraft nicht bis 100 km/h halten — Getriebe, Leistungsgrenzen und Luftwiderstand sorgen dafür, wie Kapitel 5 und 13 zeigen werden — aber der Vergleich macht das Gesetz greifbar.

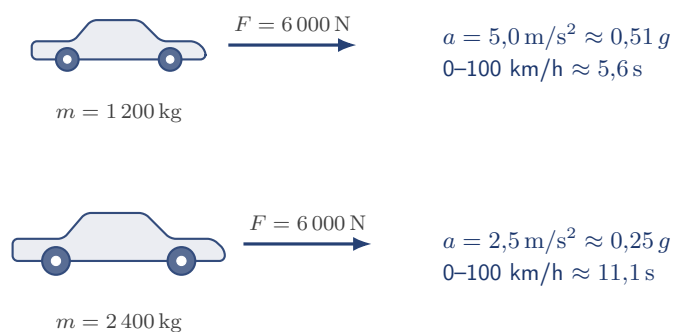


Abbildung 2.1: Dieselbe resultierende Kraft von 6 000 N — gleich lange Pfeile — ausgeübt auf zwei verschiedene Autos. Halbierung der Masse verdoppelt die Beschleunigung: $F = ma$ in seiner praktischsten Form. (Die 0–100-km/h-Zeiten setzen voraus, dass die Kraft konstant gehalten werden kann; Kapitel 5 und 13 erklären, warum reale Antriebsstränge das nicht ganz schaffen.)

Was Sie spüren

Was macht der Sitz bei einem $0,7\text{ g}$ -Start tatsächlich mit Ihnen? Er drückt Ihren Körper nach vorne mit $F = ma$. Ein 80 kg schwerer Fahrer bei $0,7\text{ g}$ braucht etwa 550 N vom Sitz — das Gewicht eines ausgewachsenen Schweins, durch Schaumstoff und Polster hindurch. Das ist der Schub in Ihrem Rücken: keine mysteriöse Rückwärtskraft, sondern der Sitz, der Sie zusammen mit dem Auto beschleunigt, genau wie es Newtons zweites Gesetz verlangt.

2.3 Woher die Vorwärtskraft wirklich kommt

Hier liegt der subtilste Punkt des Kapitels, und der befreiendste, sobald er erkannt ist. Der Motor oder E-Motor dreht eine Welle; das Getriebe und das Differenzial leiten diese Drehung an die angetriebenen Räder; die Räder drehen sich. Nichts davon bewegt das Auto für sich genommen auch nur einen Millimeter. Das Auto bewegt sich wegen dessen, was dort geschieht, wo Reifen und Straße aufeinandertreffen. Abbildung 2.2 zeigt den entscheidenden Vorgang: Der drehende Reifen drückt *rückwärts* auf die Straßenoberfläche, und — gemäß Newtons drittem Gesetz — drückt die Straße *vorwärts* mit einer gleich großen, entgegengesetzten Kraft auf den Reifen. Dieser Vorwärtsdruck von der Straße ist die äußere Kraft in $F_{\text{net}} = ma$.

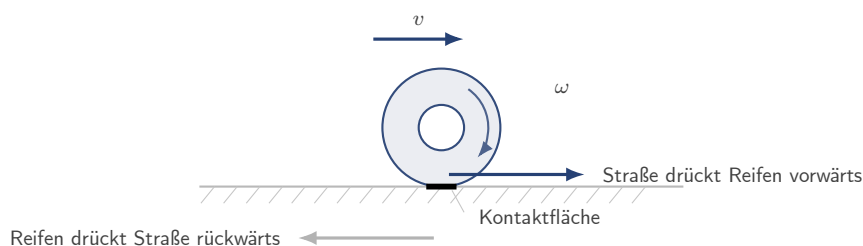


Abbildung 2.2: Newtons drittes Gesetz am angetriebenen Rad. Der rotierende Reifen drückt *rückwärts* auf die Straße; die Straße drückt *vorwärts* auf den Reifen. Dieser Vorwärtsdruck — nicht der Motor — ist die äußere Kraft, die das Auto beschleunigt, und er tritt durch eine Kontaktfläche ein, die kaum größer ist als die Handfläche.

Die Unterscheidung ist keine Pedanterie. Auf einem Stück perfektem, reibungsfreiem Eis kann der Motor brüllen und die Räder können sich wütend drehen — und das Auto bleibt stehen, weil die Straße nicht mehr zurückdrücken kann. Kein Grip, keine Kraft, keine Beschleunigung. Der Antriebsstrang *ermöglicht* den Druck; die Straße *liefert* ihn. Kapitel 7 dreht sich ganz um die Grenzen dieser Lieferung.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Der Motor schiebt das Auto vorwärts.“ **Physik:** Der Motor drückt nur auf Teile des Autos selbst — Kolben, Wellen, Zahnräder. Innere Drücke können das Auto so wenig beschleunigen, wie das Ziehen an den eigenen Schnürsenkeln Sie vom Boden abhebt. Die äußere Kraft, die das Auto beschleunigt, kommt von der Straße, die auf die angetriebenen Reifen wirkt. Die eigentliche Aufgabe des Motors ist es, die Räder rückwärts auf die Straße drücken zu lassen, damit die Straße das Auto vorwärts drückt.

Abbildung 2.3 setzt das vollständige Kräftebild eines beschleunigenden Autos zusammen. Vertikal passiert nichts Aufregendes: die Normalkräfte der Straße an den vier Rädern addieren sich zum Gewicht mg , und das Auto schwebt weder noch sinkt es. Horizontal beginnt die Geschichte dieses Buches: wenn die Antriebskraft an den angetriebenen Rädern den Luftwider-

stand (und die kleinen Rollverluste) übersteigt, zeigt die resultierende Kraft nach vorne und das Auto beschleunigt. Wenn sie sich ausgleichen, fährt das Auto konstant — schnell oder langsam, die Physik aus Kapitel 1 ist ihr egal. Wenn der Widerstand größer als der Antrieb ist, oder die Bremsen zupacken, zeigt die resultierende Kraft nach hinten und das Auto wird langsamer.

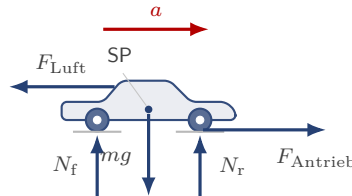


Abbildung 2.3: Die Kräfte an einem beschleunigenden Auto. Vertikal halten die Normalkräfte an den Rädern zusammen dem Gewicht mg die Waage. Horizontal beschleunigt das Auto, während die Antriebskraft an den angetriebenen Rädern den Luftwiderstand übersteigt. Beachten Sie, wo jede Kraft angreift: Die Traktion tritt auf Straßenniveau ein — ein Detail, das in Kapitel 8 wichtig wird.

Probieren Sie es gedanklich

Stellen Sie sich Ihr Auto auf einer riesigen, perfekt reibungsfreien Eisfläche vor. Sie treten das Gaspedal voll durch. Was passiert? Und was sagt Ihre Antwort darüber, woher die beschleunigende Kraft kommt? (Die Räder drehen sich; der Drehzahlmesser fliegt; der Tacho bleibt bei null. Kraft braucht etwas, gegen das sie drücken *kann*.)

2.4 Was das für Autos bedeutet

Das Gesetz $F = ma$ erklärt leise mehrere Dinge, die jeder Enthusiast bereits weiß. Es erklärt, warum Hersteller so obsessiv geringes Gewicht anstreben: Jedes entfernte 100 kg ist ein kostenloses Beschleunigungs-Upgrade, überall, jederzeit. Es erklärt, warum ein mäßig motorisiertes, aber leichtes Auto — unser Archetyp Auto A — temperamentvoller wirken kann als ein schwereres Auto mit größerem Motor: Was Ihren Rücken erreicht, ist Kraft *pro Kilogramm*. Und es erklärt die ewige Eskalation der Leistungszahlen: Sobald Autos schwerer werden, erfordert die Beibehaltung derselben Beschleunigung proportional mehr Kraft, also mehr Drehmoment, mehr Leistung, größere Bremsen und stärkere Reifen — die wiederum Masse hinzufügen. Der Lieblingskreislauf der Industrie ist, von der anderen Seite betrachtet, eine Spirale.

Es leitet auch die beiden Fragen ein, die den Rest von Teil II organisieren. Wenn Kraft das ist, was zählt, was sagt Ihnen die *Drehmoment*-Kennzahl des Motors eigentlich, und was hat *Leistung* damit zu tun? Das sind die nächsten zwei Kapitel.

Eine Gleichung zum Merken

$$F_{\text{net}} = ma$$

Die Beschleunigung eines Autos ist die resultierende auf es wirkende Kraft, geteilt durch seine Masse. Alles, was Autos schnell macht — Motoren, E-Maschinen, Getriebe, Reifen, leichte Materialien — ist letztlich ein Weg, die linke Seite zu erhöhen oder die rechte zu senken.

2.5 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- Ein Auto behält seine Geschwindigkeit, sofern keine resultierende Kraft wirkt; Masse ist das Maß seiner Änderungsunwilligkeit.
- $F_{\text{net}} = ma$: doppelte Kraft, doppelte Beschleunigung; doppelte Masse, halbe Beschleunigung.
- Der Motor kann das Auto nicht durch die Luft drücken; die Straße drückt die angetriebenen Reifen nach vorne, gemäß Newtons drittem Gesetz.
- Kein Grip, keine Kraft: auf reibungsfreiem Eis erzeugt Vollgas Lärm, nicht Bewegung.
- Der Druck des Sitzes in Ihrem Rücken ist $F = ma$, angewandt auf Ihren eigenen Körper.

Kraft sagt, wie Beschleunigung im Moment passiert. Aber ein schnelles, schweres Auto *trägt* auch etwas mit sich — etwas, das schmerzhaft relevant wird, wenn Sie anhalten oder ausweichen müssen. Das nächste Kapitel gibt diesem Etwas seine beiden Namen: Impuls und kinetische Energie.

Kapitel 3

Impuls und Energie: ähnlich klingend, sehr unterschiedlich

Zwei identische Autos rollen auf ein Hindernis zu, eines mit 50 km/h, eines mit 100 km/h. Fragen Sie irgendjemanden, welcher Aufprall schlimmer ist, und die Antwort lautet: das schnellere Auto. Fragen Sie, *wie viel* schlimmer, sagen die meisten: doppelt so schlimm. Die Physik widerspricht, und die Größe des Widerspruchs — ein Faktor von vier — ist eine der folgenreichsten Zahlen im gesamten Fahrbetrieb. Um zu sehen, woher sie kommt, müssen wir dem, was ein fahrendes Auto „dabei hat“, eine präzise Bedeutung geben. Es gibt zwei verschiedene Antworten, und sie zu verwechseln ist die Quelle endloser Stammtischdebatten.

Die Frage

Was hat ein fahrendes Auto in seiner Bewegung gespeichert — und warum wird alles mit steigender Geschwindigkeit so schnell so viel schlimmer?

Symbole auf einen Blick

p Impuls [kg m/s]; E_{kin} kinetische Energie [J]; m Masse [kg]; v Geschwindigkeit [m/s]; F Kraft [N]; Δt Zeitintervall [s]; d Strecke [m]. Ein Joule (J) ist die Energie, die nötig ist, um 1 kg mit 1 m/s^2 über 1 m zu beschleunigen; Energien fahrender Autos werden bequem in Megajoule (MJ) gemessen.

Auf einen Blick

Ein fahrendes Auto hat einen Impuls $p = mv$, der proportional zur Geschwindigkeit wächst und *Stöße und Kraftstöße* (Kraft mal Zeit) bestimmt. Es hat außerdem eine kinetische Energie $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2$, die mit dem *Quadrat* der Geschwindigkeit wächst und *Bremswege, Kraftstoff und Zerstörung* (Kraft mal Weg) bestimmt. Doppelte Geschwindigkeit: doppelter Impuls, vierfache Energie.

3.1 Zwei Maße für „Bewegung“

Ein schwerer Lkw, der über einen Parkplatz kriecht, und ein Motorrad, das auf der Autobahn vorbeifliegt, sind beide „in Bewegung“, aber intuitiv tragen sie sehr unterschiedliche Mengen an *Wumms* mit sich. Die Physik präzisiert diese Intuition mit nicht nur einer, sondern zwei Größen, weil zwei unterschiedliche praktische Fragen beantwortet werden müssen:

- „Wie schwer ist es, diese Bewegung in einer bestimmten *Zeit* zu ändern?“ — die Frage, die bei Kollisionen zählt, wo eine Kraft für einen kurzen Moment wirkt.

- „Wie viel *Arbeit* muss verrichtet werden, um diese Bewegung zu erzeugen oder zu zerstören?“ — die Frage, die für Beschleunigungsläufe, Bremswege und Kraftstofftanks zählt.

Die erste Frage beantwortet der *Impuls*; die zweite die *kinetische Energie*. Beide enthalten Masse und Geschwindigkeit, aber in unterschiedlichen Kombinationen — und dieser Unterschied, zusammengefasst in Abbildung 3.1, treibt alles in diesem Kapitel.

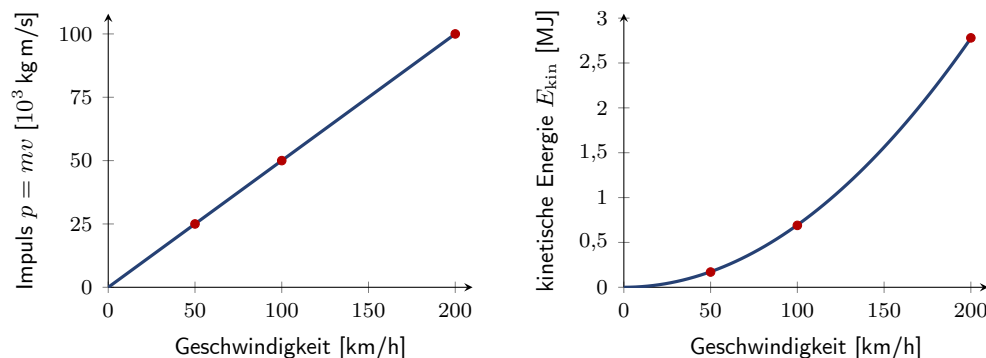


Abbildung 3.1: Impuls und kinetische Energie eines 1800 kg-Autos (Auto B) als Funktion der Geschwindigkeit. Der Impuls wächst direkt proportional zur Geschwindigkeit; die kinetische Energie wächst mit deren *Quadrat*. Von 50 auf 200 km/h vervierfacht sich der Impuls, aber die Energie versechzehnfacht sich. Die roten Punkte markieren 50, 100 und 200 km/h.

3.2 Impuls: die Größe der Bewegung

Impuls ist einfach Masse mal Geschwindigkeit:

$$p = mv.$$

Es ist ein *Vektor*: er hat die Richtung der Bewegung, nicht nur eine Größe. Unsere Referenzlimousine, Auto B (1800 kg), trägt

$$p = 1800 \times 13,9 \approx 25\,000 \text{ kg m/s}$$

bei 50 km/h, genau doppelt so viel (50 000) bei 100 km/h, und viermal so viel (100 000) bei 200 km/h. Der Impuls wächst Schritt für Schritt mit der Geschwindigkeit: noch nichts Überraschendes.

Der Impuls wird durch das *Kraftstoß*-Gesetz gerechtfertigt, das nur eine Umformulierung von Newtons zweitem Gesetz ist: Um den Impuls eines Autos um Δp zu ändern, braucht man eine Kraft, die über die Zeit wirkt,

$$\Delta p = F \Delta t.$$

Dies ist das Gesetz der Kollisionen. Bei jedem Unfall ist die Impulsänderung durch die beteiligten Geschwindigkeiten festgelegt; die Heftigkeit des Ereignisses hängt davon ab, wie *schnell* diese Änderung geschieht. Stoppen Sie den Impuls eines Autos in 0,1 s (Wandaufprall), sind die Kräfte enorm; verteilen Sie dieselbe Impulsänderung auf 1 s (Crashtonne), sinken sie um den Faktor zehn. Knautschzonen, Airbags und verformbare Hindernisse sind allesamt Vorrichtungen zum Umgang mit dem Kraftstoß: Sie erkaufen Zeit. Wir kommen darauf zurück, wenn wir besprechen, was passiert, wenn etwas schiefeht; merken Sie sich vorerst: „Impuls gleich Kraft mal Zeit“.

Da der Impuls ein Vektor ist, ändert auch das *Lenken* ihn. Ein Auto, das mit konstanter Geschwindigkeit in einer Kurve fährt, behält sein mv , dreht aber dessen Richtung — eine Impulsänderung, die kontinuierlich durch Reifenkraft bezahlt werden muss. Kapitel 10 präsentiert die Rechnung.

3.3 Kinetische Energie: der Preis der Geschwindigkeit

Die kinetische Energie ist das zweite Maß für Bewegung:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2.$$

Hier gibt es keine Richtung — Energie ist eine reine Zahl — aber ein entscheidendes neues Merkmal: das *Quadrat*. Auto B bei 50 km/h trägt etwa 0,17 MJ; bei 100 km/h schon 0,69 MJ; bei 200 km/h volle 2,78 MJ, wie Abbildung 3.2 zeigt. Jede Verdopplung der Geschwindigkeit *vervierfacht* die Energie.

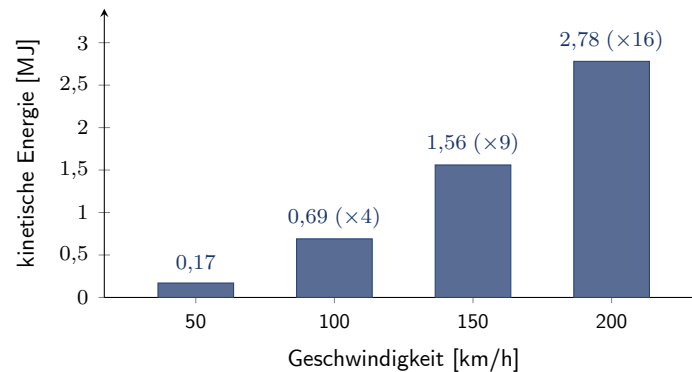


Abbildung 3.2: Kinetische Energie von Auto B (1 800 kg) bei vier Geschwindigkeiten, mit dem Vielfachen bezogen auf 50 km/h in Klammern. Gleiche Schritte auf dem Tacho bedeuten immer größere Energiesprünge. Dieses quadratische Wachstum ist der Grund, warum hohe Geschwindigkeit überproportional teuer zu erreichen, wegzubremsten und — bei einem Unfall — zu überleben ist.

Warum sollte Sie das Quadrat kümmern? Weil Energie die Währung ist, in der drei praktische Dinge bezahlt werden: Beschleunigen (der Motor oder die Batterie muss E_{kin} liefern), Bremsen (die Bremsen müssen genau diese Energiemenge als Wärme aufnehmen) und Unfälle (die Struktur muss sie in der Zeit und Strecke absorbieren, die die Knautschzone bietet). Der Energiepreis der Geschwindigkeit wächst nicht linear, sondern quadratisch.

Geschwindigkeit ändert alles

Das Quadrat in $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2$ ist die wichtigste „unfaire“ Regel in der Autophysik. Von 50 auf 100 km/h zu gehen, verdoppelt nicht die Energie, die Sie loswerden müssen — es vervierfacht sie: von 0,17 auf 0,69 MJ. Auch in der Stadt beißt es: 50 km/h statt 30 km/h bedeutet $(50/30)^2 \approx 2,8$ -mal so viel kinetische Energie.

Teil II

Das Auto in Bewegung bringen

Überblick Teil II

Dieser Teil folgt der Leistung vom Motor an die Straße. Kapitel 4 entscheidet den großen Stammtischstreit zwischen Drehmoment und Pferdestärke. Kapitel 5 zeigt, wie ein Getriebe Drehzahl gegen Radkraft tauscht, ohne ein einziges zusätzliches Watt zu erzeugen. Kapitel 6 tritt einen Schritt zurück und betrachtet den Verbrennungsmotor, den Elektromotor und das Hybridauto als drei Antworten auf dieselbe Frage: Wie wird gespeicherte Energie in Kraft an der Straße umgewandelt.

Kapitel 4

Drehmoment, Pferdestärke und der große Stammtischstreit

Es ist eine der ältesten Fragen unter Autoenthusiasten. Die eine Seite tippt auf das Datenblatt: „Pferdestärken verkaufen Autos, aber Drehmoment gewinnt Rennen.“ Die andere Seite schüttelt den Kopf: „Drehmoment ist bedeutungslos ohne Drehzahl — nur Leistung zählt.“ Beide Seiten zitieren Rennfahrer, beide Seiten fühlen sich durch ihr letztes Überholmanöver bestätigt, und beide haben halb recht. Die Physik entscheidet die Frage, und das Urteil ist interessanter, als beide Seiten erwarten.

Die Frage

Drehmoment oder Leistung — was macht ein Auto wirklich schnell?

Symbole auf einen Blick

τ Drehmoment [N m]; r Hebelarm [m]; ω Winkelgeschwindigkeit [rad/s]; n Drehzahl [U/min]; P Leistung [W, kW]; F Kraft [N]; v Geschwindigkeit [m/s]. Umrechnungen: $\omega = 2\pi n/60$; 1 PS $\approx$ 0,735 kW; 1 hp $\approx$ 0,746 kW; 1 kW $\approx$ 1,36 PS.

Auf einen Blick

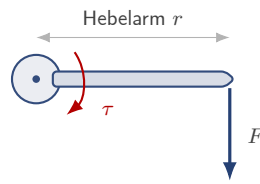
Drehmoment beschreibt eine *Drehwirkung*: Kraft mal Hebelarm, $\tau = F \cdot r$. Leistung ist *Arbeit pro Zeit*: $P = \tau \omega = F \cdot v$. Was ein Auto bei jeder bestimmten Geschwindigkeit beschleunigt, ist die Kraft an seinen angetriebenen Rädern — und bei passendem Getriebe wird diese Kraft durch die *Motorleistung* geteilt durch die Fahrgeschwindigkeit bestimmt. Leistung entscheidet den Streit; die Drehmomentkurve bestimmt, wie sich die Leistung anfühlt.

4.1 Drehmoment: die Drehkraft

Jeder, der mit einer festsitzenden Radmutter gekämpft hat, kennt Drehmoment intuitiv. Die Schraube interessiert nicht, wie stark Sie drücken; sie interessiert, wie stark Sie drücken *mal der Abstand vom Mittelpunkt*, an dem Sie drücken. Dieses Produkt ist das Drehmoment:

$$\tau = F \cdot r,$$

gezeigt in Abbildung 4.1. Drücken Sie mit 100 N am Ende eines 0,25 m langen Schraubenschlüssels, spürt die Schraube 25 N m; verdoppeln Sie die Länge des Schlüssels, liefert dieselbe Anstrengung 50 N m. (Radmuttern werden übrigens typischerweise mit etwa 110 N m angezogen — eine Zahl, die Ihre Arme bereits kennen.)



Drehmoment $\tau = F \cdot r$ — gleicher Druck, längerer Hebel, mehr Drehwirkung

Abbildung 4.1: Drehmoment ist Kraft mal Hebelarm: $\tau = F \cdot r$. Derselbe Druck erzeugt die doppelte Drehwirkung an einer Radmutter, wenn der Schraubenschlüssel doppelt so lang ist. Die Drehmomentangabe eines Motors ist genau dies: die Drehwirkung, die seine Kurbelwelle liefert, gemessen in Newtonmetern (Nm).

Die Drehmomentangabe eines Motors beschreibt genau diese Drehwirkung, gemessen an der Kurbelwelle. Ein moderner Turbomotor liefert vielleicht 360 Nm: Würden Sie einen ein Meter langen Hebel an die Kurbelwelle montieren, würde er mit dem Gewicht von etwa 37 kg auf eine Badezimmerwaage drücken. Drehmoment ist das, was der Motor *erzeugt*; was die *Räder* erhalten, hängt vom Getriebe ab, das Drehzahl gegen Drehmoment nach Belieben tauscht — diese Umwandlung erläutert Kapitel 5. Also kann das Drehmoment allein, angegeben an der Kurbelwelle, nicht sagen, wie stark das Auto zieht. Etwas fehlt, und das Fehlende ist *wie schnell die Welle rotiert*.

4.2 Leistung: Arbeit pro Zeit

Kapitel 3 hat festgelegt, dass Geschwindigkeit mit Energie bezahlt wird: $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2$. Leistung ist schlicht die *Rate*, mit der Energie geliefert wird — Energie pro Sekunde, gemessen in Watt (oder Kilowatt oder Pferdestärken). Zwei äquivalente Formeln sind für Autos wichtig:

$$P = \tau \omega \quad \text{und} \quad P = F \cdot v.$$

Die erste gehört zu Dingen, die sich drehen (Kurbelwellen, Motoren): Drehmoment mal Winkelgeschwindigkeit. Die zweite gehört zu Dingen, die sich bewegen (Autos): Triebkraft mal Fahrgeschwindigkeit. Es ist dasselbe Gesetz, gesehen von den beiden Enden des Antriebsstrangs.

Hier kommt die Einsicht, die den Stammtischstreit beendet. Bei Vollgas liefert ein Motor ungefähr seine Nennleistung. Die Kraft, die das Auto schiebt, ist dann

$$F = \frac{P}{v},$$

was bedeutet: *bei einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit wird die Beschleunigung, die ein Auto aufbringen kann, durch seine Leistung bestimmt* — nicht durch seine Drehmomentkennzahl. Drehmoment ohne Drehzahl ist ein halbes Produkt; Leistung ist das ganze Produkt.

Garagenphysik

Auto B (1 800 kg, 330 kW) bei Vollgas, und für den Moment ignorieren wir Luftwiderstand und Verluste (Kapitel 12 und 17 werden sie zurückbringen). Bei 100 km/h = 27,8 m/s ist die verfügbare Triebkraft

$$F = \frac{P}{v} = \frac{330\,000}{27,8} \approx 11\,900\,\text{N} \quad \Rightarrow \quad a = \frac{F}{m} \approx 6,6\,\text{m/s}^2 \approx 0,67\,g.$$

Dieselbe Leistung bei 50 km/h würde die doppelte Kraft erlauben, 23 800 N — nur dass die Reifen sie nicht übertragen können: 1 800 kg auf Reifen mit Reibungskoeffizient nahe 1,0 tragen höchstens etwa 17 700 N (Kapitel 7). Bei niedriger Geschwindigkeit sind die *Reifen* der Engpass; bei hoher Geschwindigkeit ist es die *Leistung*. Irgendwo dazwischen liegt der Übergang, und ein großer Teil des sportlichen Fahrens spielt sich um diesen Punkt.

Beachten Sie, was $F = P/v$ für die Form der Beschleunigung impliziert: sobald das Auto leistungsbegrenzt ist — sobald Traktion, Getriebe und Drehmomentdecken nicht mehr binden — fällt die verfügbare Kraft mit $1/v$, sodass die Beschleunigung mit steigender Geschwindigkeit abklingt, bevor überhaupt der Luftwiderstand ins Spiel kommt. (Bei sehr niedriger Geschwindigkeit würde die Formel unendliche Kraft versprechen; die Grenzen der Realität, allen voran die Reifen, greifen ein.) Der Stoß in Ihrem Rücken ist am Anfang der Auffahrt am stärksten und am Ende am schwächsten, und jetzt wissen Sie, warum.

Was Sie spüren

Der „Stoß“, den Sie in einem bestimmten Gang spüren, folgt der Drehmomentkurve des Motors: Er schwillt zum Drehmoment-Maximum hin an und klingt dann Richtung Drehzahlgrenze ab. Aber der *über die Gänge hinweg* verfügbare Stoß bei bestimmter Fahrgeschwindigkeit folgt der Leistung: Bei 100 km/h ist es egal, in welchem Gang Sie sind, solange der Motor dort dreht, wo seine Leistung gipfelt. Deshalb funktioniert ein Zurückschalten vor dem Überholen: Das Getriebe dreht den Motor schneller, in einen Bereich, in dem mehr *Leistung* verfügbar ist. Das Motordrehmoment ändert sich üblicherweise ebenfalls mit der Drehzahl, aber es ist das neue Produkt aus Drehmoment und Drehzahl, frisch multipliziert mit der kürzeren Übersetzung, das die zusätzliche Radkraft liefert.

4.3 Die Kurven

Reale Motoren liefern weder konstantes Drehmoment noch konstante Leistung; sie liefern *Kurven*, wie Abbildung 4.2 für einen typischen modernen Turbomotor in der Leistungsklasse von Auto A zeigt. Das Drehmoment steigt früh, bildet im mittleren Bereich ein Plateau (360 N m bei 3 800 U/min hier) und sackt Richtung Drehzahlgrenze ab, wenn der Motor zu „atmen“ kämpft. Die Leistung, da sie Drehmoment mal Drehzahl ist, steigt über den Drehmomentgipfel hinaus und erreicht ihren Höhepunkt später — etwa 159 kW nahe 4 500 U/min in diesem Beispiel — bevor sie abfällt, wenn der Drehmomentabfall den Drehzahlgewinn überwiegt.

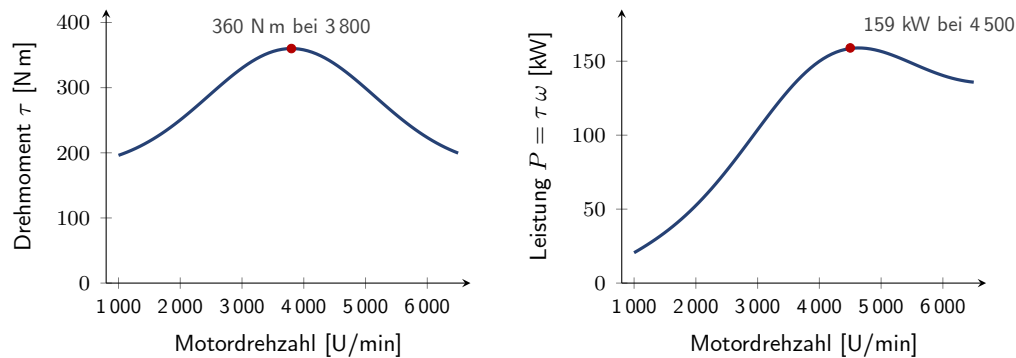


Abbildung 4.2: Drehmoment und Leistung eines typischen modernen Turbomotors in der Leistungsklasse der 150 kW-Einheit von Auto A. Das Drehmoment erreicht früh sein Maximum — hier 360 N m bei 3800 U/min. Die Leistung, das Produkt aus Drehmoment und Drehzahl, erreicht ihr Maximum später: etwa 159 kW nahe 4500 U/min. Beide Kurven fallen zur Drehzahlgrenze hin ab — ein Grund, warum Hochschalten vor der Drehzahlgrenze oft am schnellsten ist (Kapitel 5).

In diesen Kurven leben die Motorcharaktere. Ein saugmotorischer Sportmotor hält sein Drehmoment hoch und atmet am besten nahe der Drehzahlgrenze: spitz, mitreißend, er verlangt schnelles Fahren. Ein Turbomotor glättet sein Drehmoment früh zum Plateau: mühelos, muskulös, entspannt. Ein Elektromotor schreibt die Form vollständig neu — volles Drehmoment ab null Drehzahl, kein Getriebe nötig (Kapitel 6). Dieselbe Physik, unterschiedliche Persönlichkeiten.

Streckenrand-Notiz

Wann ist der richtige Zeitpunkt zum Hochschalten? Die Physik gibt eine präzise Regel: für maximale Beschleunigung bleiben Sie im aktuellen Gang, bis die *nach* dem Schalten verfügbare Radkraft — bei der niedrigeren Drehzahl, in die der nächste Gang fällt — die *vorher* verfügbare Radkraft übersteigt. Da der nächste Gang das Drehmoment mit einem kleineren Verhältnis multipliziert, geschieht diese Kreuzung normalerweise irgendwo hinter dem Leistungsmaximum, aber Getriebespreizung und Form der Leistungskurve entscheiden von Fall zu Fall: die Spitzenleistung ist ein wichtiger Bezugspunkt, kein universeller Schaltpunkt. Die Drehzahlgrenze ist schlicht der Punkt, an dem die Ingenieure der Hardware nicht mehr trauen.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Pferdestärken verkaufen Autos, Drehmoment gewinnt Rennen.“ **Physik:** Nehmen Sie zwei Motoren. Motor eins: 350 N m bei 3800 U/min, also $350 \times 3800 \times 2\pi/60 \approx 139$ kW. Motor zwei: nur 250 N m, aber bei 7000 U/min, also ≈ 183 kW. Mit den richtigen Getrieben beschleunigt der „drehmomentschwache“ Motor den „drehmomentstarken“ bei jeder Fahrgeschwindigkeit aus, weil sein Drehmoment mit 84 % mehr Drehzahl daherkommt. Drehmoment sagt Ihnen die Größe jedes Stoßes; Leistung — Drehmoment mal wie oft die Stoße kommen — sagt Ihnen, wie schnell das Auto fährt. Rennen gewinnt Leistung, wenn sie gut geliefert wird.

Probieren Sie es gedanklich

Zwei Autos haben identische Spitzenleistung, aber ein Motor macht das doppelte Drehmoment bei halber Drehzahl. Welches Auto ist schneller? (Keines, bei passendem Getriebe: Das Getriebe wandelt niedrige Drehzahl mit großem Drehmoment in hohe Drehzahl mit kleinerem Drehmoment an den Rädern, und $P = \tau\omega$ ist auf beiden Seiten dasselbe. Was sich unterscheidet, ist das Gefühl, das Getriebe und der Drehzahlbereich, in dem der Stoß lebt.)

4.4 Was das für Autos bedeutet

Sie können jetzt ein Datenblatt wie ein Ingenieur lesen. *Spitzenleistung* setzt die Obergrenze für die Beschleunigung bei hoher Geschwindigkeit und zusammen mit dem Luftwiderstand die Höchstgeschwindigkeit (Kapitel 13). *Die Drehzahl des Leistungsmaximums* sagt Ihnen etwas über den Charakter des Motors und darüber, wie hoch Sie ihn drehen müssen. *Das Drehmomentplateau* sagt Ihnen, wie elastisch sich das Auto im Alltag anfühlt — wie selten Sie zurückschalten müssen. Der schnellste einzelne Näherungswert für das Tempo ist die *Leistung je Tonne*: 150 kW für 1 200 kg bei Auto A sind 125 kW/t; 330 kW für 1 800 kg bei Auto B sind 183 kW/t; 450 kW für 2 200 kg bei Auto C sind 205 kW/t. Ein Blick, eine Division, und die Hierarchie unserer kleinen Flotte ist offensichtlich.

Eine Gleichung zum Merken

$$P = \tau \omega = F \cdot v$$

Leistung ist Drehmoment mal Drehzahl am Motor und Kraft mal Geschwindigkeit an den Rädern. Sobald Traktion und Getriebe nicht mehr begrenzen, wird die Beschleunigung bei bestimmter Fahrgeschwindigkeit durch die verfügbare Leistung begrenzt — daher ist Leistung, nicht Drehmoment, die Zahl, die die Diskussion gewinnt.

4.5 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- Drehmoment beschreibt eine Drehwirkung: $\tau = F \cdot r$, gemessen in Newtonmetern — Ihre Arme kennen es von Radmuttern.
- Leistung ist Arbeit pro Zeit: $P = \tau \omega$ an der Kurbelwelle, $P = F \cdot v$ an den Rädern.
- Sobald leistungsbegrenzt, ist die ideale Beschleunigungsobergrenze $a = P/(mv)$; Luftwiderstand reduziert die tatsächliche Beschleunigung weiter. Die Drehmomentkurve prägt das Gefühl.
- Hochschalten, wenn der nächste Gang nach dem Drehzahlabfall mehr Radkraft bietet — nahe am Leistungsmaximum, aber die Kurven und Getriebespreizung entscheiden.
- Leistung je Tonne (kW/t) ist der schnellste brauchbare Näherungswert für das Tempo eines Autos.

Ein Held dieses Kapitels hat bislang still im Hintergrund gearbeitet: das Getriebe, das Kurbelwellen-Drehmoment-und-Drehzahl nach Bedarf in Rad-Drehmoment-und-Drehzahl umwandelt. Es verdient ein eigenes Kapitel — und es erklärt, warum der erste Gang Sie in den Sitz presst, während der fünfte es nie tun wird.

Kapitel 5

Getriebe: Kraft gegen Geschwindigkeit tauschen

Der erste Gang presst Sie in den Sitz. Der fünfte Gang, bei demselben Gaspedal, schubst Sie kaum. Derselbe Motor, dasselbe Auto, derselbe rechte Fuß — grundverschiedener Stoß. Das Gerät, das dafür verantwortlich ist, verrichtet keine eigene Arbeit und fügt keine Energie hinzu; es tauscht lediglich *Drehzahl gegen Drehmoment*. Das Getriebe ist die Wechselstube des Antriebsstrangs, und sein Wechselkurs ist Gegenstand dieses Kapitels.

Die Frage

Wie verwandelt ein Getriebe einen Motor in einen harten Stoß bei niedriger Geschwindigkeit und in mühelose Geschwindigkeit bei niedriger Kraft — und warum braucht ein Auto überhaupt mehrere Gänge?

Symbole auf einen Blick

i Getriebeübersetzung (dimensionslos); τ_{eng} , τ_{wheel} Drehmoment an Kurbelwelle und Rädern [Nm]; n Drehzahl [U/min]; r_{wheel} Reifenradius [m]; F_{wheel} Antriebskraft an den Kontaktflächen [N].

Auf einen Blick

Ein Zahnradpaar multipliziert das Drehmoment und teilt die Drehzahl durch denselben Faktor, wobei die Leistung im Wesentlichen unverändert bleibt. Die Radkraft ist Motordrehmoment mal *Gesamtübersetzung* (Getriebe mal Achsantrieb), geteilt durch den Reifenradius. Niedrige Gänge sind lange Hebel: riesige Kraft, bescheidene Geschwindigkeit. Hohe Gänge sind kurze Hebel: bescheidene Kraft, hohe Geschwindigkeit.

5.1 Das Getriebe als Hebel für Rotation

Kapitel 4 begann mit einem Schraubenschlüssel: ein längerer Hebel verwandelt denselben Druck in mehr Drehwirkung. Ein Zahnradpaar tut genau dies für kontinuierliche Rotation, wie Abbildung 5.1 zeigt. Ein kleines Zahnrad, das ein doppelt so großes antreibt, halbiert die Drehzahl und verdoppelt das Drehmoment — die Zähne sind einfach ein Hebelarm, der nie aufhört zu wirken. Leistung bleibt im Handel erhalten:

$$\tau_{\text{in}} \omega_{\text{in}} = \tau_{\text{out}} \omega_{\text{out}} \quad (\text{minus ein paar Prozent Reibungsverluste}).$$

Die *Getriebeübersetzung* i gibt das Tauschverhältnis an: $i = 3,6$ bedeutet, die Eingangswelle dreht sich 3,6-mal für jede Ausgangsdrehung, und das Ausgangsdrehmoment ist das 3,6-fache

des Eingangsrehmoments.

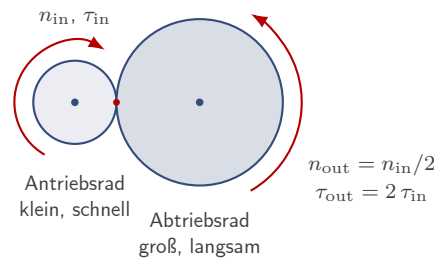


Abbildung 5.1: Ein Zahnradpaar ist ein Hebel für Rotation. Das kleine Eingangszahnrad dreht sich zweimal, während sich das große Ausgangszahnrad einmal dreht; das Ausgangsdrehmoment ist verdoppelt (minus kleiner Verluste). Die Leistung — Drehmoment mal Drehzahl — bleibt auf beiden Seiten gleich. Ein Getriebe verkettet solche Paare; der Achsantrieb fügt eine weitere feste Reduktion hinzu.

Ein kompletter Antriebsstrang verkettet zwei solcher Reduktionen: die wählbare im Getriebe (erster bis sechster Gang, sagen wir) und eine feste an der angetriebenen Achse, den *Achsantrieb*. Die Gesamtübersetzung ist deren Produkt — und dieses Produkt ist das, was Ihr Rücken spürt.

5.2 Von der Kurbelwelle zur Kontaktfläche

Die Kraft, die das Auto tatsächlich beschleunigt, fällt aus einer kurzen Kette von Multiplikationen heraus:

$$F_{\text{wheel}} = \frac{\tau_{\text{eng}} \times i_{\text{gear}} \times i_{\text{final}}}{r_{\text{wheel}}}.$$

Garagenphysik

Nehmen Sie den Motor aus Abbildung 4.2 (360 N m an seinem Gipfel) in einem Auto wie Auto A, mit erstem Gang 3,6:1, Achsantrieb 3,4:1 und Rädern mit Radius 0,32 m:

$$F_{\text{wheel}} = \frac{360 \times 3,6 \times 3,4}{0,32} \approx 13\,800 \text{ N}$$

— mehr als das gesamte Gewicht des Autos von $1\,200 \times 9,81 \approx 11\,800 \text{ N}$! Die Hinterreifen eines heckgetriebenen Autos können das nicht übertragen: Beim Start tragen sie ungefähr 60% des Gewichts (Kapitel 8 erklärt die Radlastverlagerung), sie stützen höchstens $0,6 \times 11\,800 \times 1,0 \approx 7\,000 \text{ N}$, bevor sie durchdrehen. Der erste Gang ist also *traktionsbegrenzt*, nicht motorbegrenzt. Nun der dritte Gang, 1,55:1: die Radkraft wird $360 \times 1,55 \times 3,4 / 0,32 \approx 5\,900 \text{ N}$, eine ehrliche $a \approx 5\,900 / 1\,200 \approx 4,9 \text{ m/s}^2 \approx 0,5 g$. Derselbe Motor, dasselbe Drehmoment — ein Drittel des Stoßes. Das ist das Getriebe, das tauscht.

Was Sie spüren

Das ist der Grund, warum sich der Start heftig anfühlt und das Hochschalten mitten im Rennen sanft. Im ersten Gang kommt das Motordrehmoment an den Rädern mit mehr als dem Zwölffachen an; im fünften Gang ist der Multiplikator kaum drei. Der Sitz meldet nur $F = ma$, und F wird durch die Hebellänge gesetzt, die Sie mit dem Schalthebel gewählt haben. Einen niedrigeren Gang zu wählen, *heißt*, einen längeren Schraubenschlüssel zu wählen.

5.3 Die Treppe

Warum nicht ein Gang, oder zwei? Weil ein Motor seine beste Leistung in einem schmalen Drehzahlband liefert (Abbildung 4.2), während das Auto vom Schrittempo bis zur Höchstgeschwindigkeit ziehen muss — um den Faktor dreißig oder mehr. Die Lösung ist eine Treppe von Übersetzungen, und Abbildung 5.2 zeichnet sie: für jeden Gang die verfügbare Radkraft bei jeder Fahrgeschwindigkeit, aus der eigenen Drehmomentkurve des Motors abgeleitet.

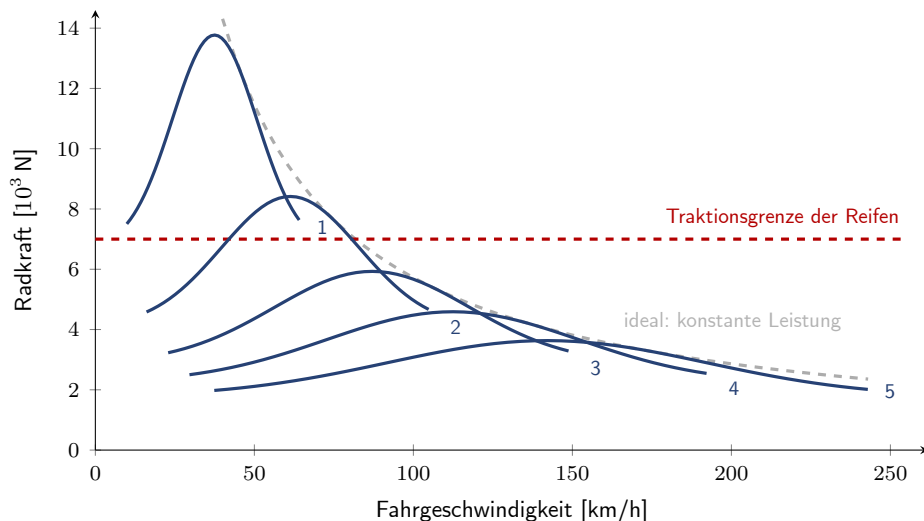


Abbildung 5.2: Die Treppe der Antriebskraft: Radkraft gegen Fahrgeschwindigkeit für den Motor aus Abbildung 4.2 in den Gängen 1–5 (mit einem Achsantrieb von 3,4:1 und Rädern von 0,32 m). Jeder Gang hebt die Drehmomentkurve des Motors auf eine andere Höhe und dehnt sie über einen anderen Geschwindigkeitsbereich. Die gestrichelte graue Hyperbel ist das ideale $F = P/v$ konstanter Leistung, dem ein perfektes stufenloses Getriebe folgen würde; die gestrichelte rote Linie ist die Traktionsgrenze der Reifen, die den höchsten Teil des ersten Gangs auf trockenem Asphalt unbrauchbar macht — und auf nassem noch viel mehr.

Lesen Sie die Abbildung langsam; sie gibt viel zurück. Jede Kurve ist derselbe Motor, gesehen durch einen anderen Hebel. Der erste Gang überragt die anderen, endet aber bei 64 km/h; der fünfte erreicht 243 km/h, bietet aber nur einen sanften Schub. Die Spitzen der Kurven berühren gerade die gestrichelte graue Hyperbel $F = P/v$ — die Signatur konstanter Leistung aus Kapitel 4. Ein hypothetisches ideales Getriebe (ein perfekt gefahrener CVT) würde den Motor kontinuierlich auf seinem Leistungsmaximum halten und diese Hyperbel exakt nachzeichnen. Reale Getriebe nähern sich ihr in Stufen an, weshalb mehr, dichter gestaffelte Übersetzungen den Motor häufiger in der Nähe seines Bestpunkts halten.

Die gestrichelte rote Linie ist der stille Held des Kapitels: die *Gripplgrenze der Reifen* aus unserer Garagenrechnung. Alles darüber ist Fantasie — die Reifen drehen durch, bevor die Kraft ankommt. Die hohe linke Flanke des ersten Gangs ist nur teilweise nutzbar, weshalb das Anfahren eines starken Autos eine Übung in Zurückhaltung ist und heckgetriebene Sportwagen eher die Räder durchdrehen lassen, als die Beschleunigung zu liefern, die ihre Motoren theoretisch ermöglichen könnten.

Streckenrand-Notiz

Auf nasser Strecke halbiert sich der Grip, und die Decke in Abbildung 5.2 sinkt auf die halbe Höhe. Erfahrene Fahrer reagieren, indem sie *früh hochschalten* — in einen höheren Gang. Höherer Gang, kürzerer Hebel, weniger Raddrehmoment: die Kurve rutscht unter die gesenkte Decke. Dieselbe Physik in umgekehrter Richtung ist der Grund, warum ein sanfter rechter Fuß im ersten Gang auf Schnee besser ist als ein beherzter.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Mehr Gänge machen ein Auto schneller.“ **Physik:** Mehr Übersetzungen erlauben es dem Motor, häufiger in der Nähe seines Leistungsmaximums zu *bleiben*, was hilft — aber jeder Hochschalt kostet einen Bruchteil einer Sekunde unterbrochener Antriebskraft, und jenseits von sieben oder acht gut gewählten Übersetzungen schrumpfen die Gewinne Richtung CVT-Ideal, dem sie nachstreben. Ein Acht-Gang-Getriebe ist nicht automatisch schneller als ein gutes Sechs-Gang-Getriebe; und ein einstufiges Elektroauto, dessen Motor überall sein Drehmoment macht, braucht überhaupt keine Treppe (Kapitel 6).

Probieren Sie es gedanklich

Warum können Sie im fünften Gang nicht aus dem Stand anfahren? (Der fünfte Gang multipliziert das Motordrehmoment nur um insgesamt etwa 3,2 — etwa ein Viertel der Hebelkraft des ersten Gangs. Die Radkraft wäre beim Einkuppeln nur einige hundert Newton, und der Motor, unter die Leerlaufdrehzahl gezogen, stirbt ab. Der erste Gang existiert, weil Motoren bei nahezu null Drehzahl nicht atmen können; Elektromotoren können es, weshalb Elektroautos die Frage überspringen.)

5.4 Was das für Autos bedeutet

Sie können jetzt die Übersetzungstabelle eines Datenblatts entschlüsseln: weit gespreizte Übersetzungen bedeuten entspanntes Fahren, aber größere Sprünge in der Radkraft zwischen den Gängen; enge Übersetzungen halten den Stoß aufrecht, kosten mehr Schaltvorgänge. Sie wissen auch, warum die Höchstgeschwindigkeit manchmal im vierten statt im fünften Gang erreicht wird: Wenn der fünfte Gang so lang übersetzt ist, dass der Motor seine Leistungsspitze gegen den Luftwiderstand nicht erreicht, gewinnt der kürzere Gang (Kapitel 13 bestimmt die Höchstgeschwindigkeit sauber). Und Sie haben das konzeptionelle Werkzeug für die Frage des nächsten Kapitels: ICE, EV oder Hybrid — woher kommt das Drehmoment tatsächlich, und warum sehen ihre Antriebsstränge so verschieden aus?

Eine Gleichung zum Merken

$$F_{\text{wheel}} = \frac{\tau_{\text{eng}} \times i_{\text{gear}} \times i_{\text{final}}}{r_{\text{wheel}}}$$

Die Radkraft ist Motordrehmoment, multipliziert mit jeder Übersetzung auf dem Weg, geteilt durch den Reifenradius. Gänge tauschen Drehzahl gegen Drehmoment; Leistung ist die Währung, die unverändert hindurchgeht.

5.5 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- Ein Zahnradpaar ist ein drehender Hebel: Drehmoment hoch, Drehzahl runter, Leistung erhalten.
- Radkraft = Motordrehmoment $\times$ Gesamtübersetzung $\div$ Reifenradius; der erste Gang multipliziert mit 12 oder mehr, der höchste Gang mit etwa 3.
- Die Treppe der Antriebskraft zeigt die Kraft jedes Gangs über seinen Geschwindigkeitsbereich; die Gipfel berühren die Leistungs-Hyperbel $F = P/v$.
- Die Traktionsgrenze der Reifen begrenzt die nutzbare Kraft: starke Autos sind im ersten Gang traktionsbegrenzt und schalten im Nassen früh hoch.
- Mehr Gänge nähern das Ideal besser an, aber mit abnehmendem Ertrag; Elektroautos umgehen die Treppe vollständig.

Bisher war der Motor eine Blackbox, die Drehmomentkurven ausspuckt. Zeit, sie zu öffnen: Verbrennung, Elektrizität und die hybride Ehe — und warum jede ihre eigene Stoßform hervorbringt.

Kapitel 6

Woher die Leistung kommt: Verbrenner, E-Auto und Hybrid

Jede Kraftkennzahl in den vorangegangenen Kapiteln musste irgendwo erzeugt werden. Dieses „Irgendwo“ unterscheidet sich tiefgreifend zwischen Verbrennungsmotor, Elektromotor und der arrangierten Ehe der beiden — und doch speisen alle drei dieselbe Physik stromabwärts: Drehmoment an den Rädern, Kraft an den Kontaktflächen, Beschleunigung einer Masse. Dieses Kapitel öffnet die Blackbox und vergleicht, wie jeder Antriebsstrang Energie speichert, sie umwandelt und seine charakteristische Stoßform liefert.

Die Frage

Verbrenner, E-Auto oder Hybrid: Woher kommt die Leistung tatsächlich, und warum fühlen sich die Antriebsstränge so verschieden an?

Symbole auf einen Blick

E gespeicherte Energie [MJ oder kWh; 1 kWh = 3,6 MJ]; η (eta) Wirkungsgrad, der Anteil der Eingangsenergie, der an den Rädern ankommt; P Leistung [kW]; τ Drehmoment [N m].

Auf einen Blick

Kraftstoff ist ein erstaunlich dichter Energieträger, Batterien sind es nicht — aber der Verbrennungsmotor vergeudet den Großteil seines Vorteils als Wärme, während der elektrische Antriebsstrang fast alles liefert, was er speichert. Und ihre Drehmomentverläufe unterscheiden sich grundlegend: Der Motor braucht Drehzahlen und Gänge; der E-Motor liefert maximale Drehwirkung schon ab der ersten Umdrehung.

6.1 Zwei Arten, Energie zu tragen

Ein Liter Benzin speichert etwa 34 MJ — ungefähr 9,4 kWh. Pro Kilogramm enthält Kraftstoff etwa 12 kWh/kg; ein moderner Batteriepack schafft vielleicht 0,15–0,20 kWh/kg. Das ist ein Faktor von etwa sechzig zugunsten des Kraftstoffs, und genau deshalb ist Reichweitenangst ein EV-Thema, während ein 50-Liter-Tank still 470 kWh chemische Energie enthält.

Garagenphysik

Energie an Bord, und Energie, auf die es ankommt. Ein 50l-Tank: $50 \times 9,4 \approx 470$ kWh chemische Energie. Die Batterie von Auto C: 75 kWh — sechsmal weniger. Aber wenden Sie die Wirkungsgradketten aus Abbildung 6.2 an: Der Tank liefert $470 \times 0,28 \approx 132$ kWh an die Räder, die Batterie $75 \times 0,88 \approx 66$ kWh. An den Rädern, wo die Physik abrechnet, beträgt das Verhältnis nur zwei zu eins. Die Betankungsgeschwindigkeit bleibt jedoch der Trumpf der Chemie: 40 Liter in etwa einer Minute sind ein Energiefluss von über 20 MW — kein Ladegerät kommt da mit (ein schnelles schafft 0,25–0,35 MW).

6.2 Der Verbrennungsmotor: eine Heizung mit Ambitionen

Ein Benzinmotor ist eine schnelle Folge kontrollierter Verbrennungsvorgänge. Dabei drücken heiße, expandierende Gase auf die Kolben; jeder Kolbenshub wird über eine Pleuelstange auf die Kurbelwelle übertragen, und die Summe dieser Schübe ergibt die Drehmomentkurve aus Abbildung 4.2. Zwei Konsequenzen prägen jedes ICE-Auto. Erstens arbeitet der Motor nur in einem schmalen Drehzahlband — er kann nicht sinnvoll bis null Drehzahl arbeiten, und seine sichere obere Drehzahl ist begrenzt — daher Kupplung und Getriebe (Kapitel 5). Zweitens wird der größte Teil der Kraftstoffenergie nie zu Bewegung: Sie geht als heißes Abgas und Kühlerwärme verloren. Der Spitzenwirkungsgrad eines guten modernen Motors liegt nahe 40% an seinem günstigsten Punkt; gemittelt über reales Fahren liegt der Tank-zu-Rad-Wirkungsgrad nahe 25–30% — eine repräsentative Größenordnung für den Vergleich, wie Abbildung 6.2 zeigt; der exakte Wert schwankt mit Arbeitspunkt, Fahrzyklus, Temperatur und Nebenverbrauchern.

6.3 Der Elektromotor: Drehmoment ab Umdrehung Null

Das Drehmoment eines Elektromotors entsteht aus Magnetfeldern, die am Rotor ziehen — Felder, die im Stillstand einwandfrei arbeiten. Das Ergebnis ist die Drehmomentform aus Abbildung 6.1: volles Drehmoment ab null Drehzahl, ein flaches Plateau, bis die Batteriespannung keinen Spielraum mehr hat, dann ein sanfter Konstantleistungs-Abfall — bis 15 000 U/min oder darüber. Kein Leerlauf, keine Kupplung, üblicherweise ein einziger fester Gang (Kapitel 5 erklärte, warum die Treppe überflüssig wird). Und der Antriebsstrang ist ein Geizhals: Batterie-zu-Rad-Wirkungsgrad um 85–90% unter repräsentativen Bedingungen — die gleiche Größenordnungs-Einschränkung gilt — wobei der Motor beim Zurückgehen als Generator arbeitet: rekuperatives Bremsen (Kapitel 9).

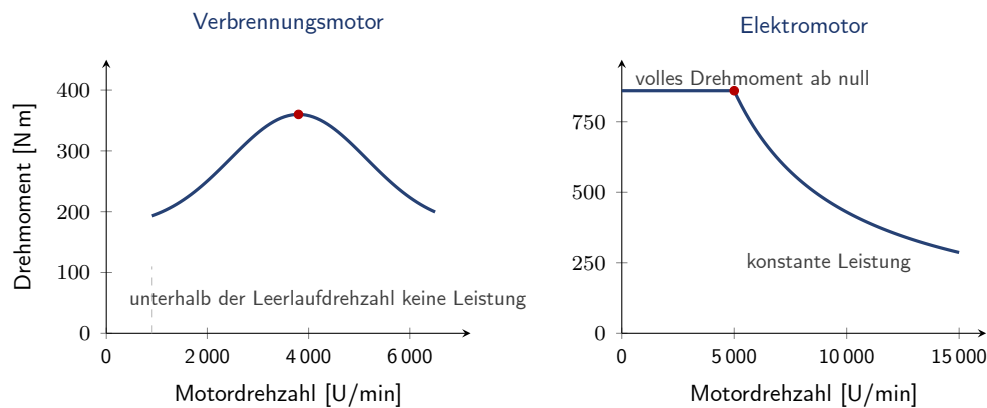


Abbildung 6.1: Zwei typische Drehmomentverläufe, auf dieselbe Idee hin aber in unterschiedlichen Maßstäben gezeichnet. Links: Der Verbrennungsmotor aus Abbildung 4.2 — unterhalb der Leerlaufdrehzahl nicht nutzbar, ausgeprägtes Drehmomentmaximum, begrenzter Drehzahlbereich bis 6500 U/min. Rechts: Ein E-Motor der Leistungsklasse von Auto C — maximales Drehmoment ab der ersten Umdrehung, dann ein Konstantleistungs-Abfall, der noch bei 15000 U/min zieht. Die rechte Form ist der Grund, warum ein EV keine Kupplung und gewöhnlich kein Getriebe braucht.

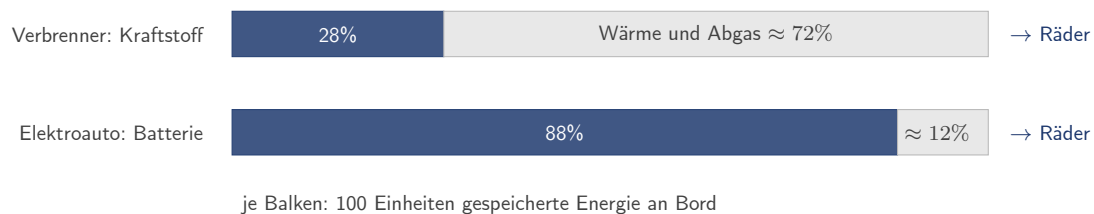


Abbildung 6.2: Von 100 Einheiten gespeicherter Energie liefert ein Verbrenner-Antriebsstrang grob 25–30 an die Räder; ein elektrischer Antriebsstrang grob 85–90. Der Verbrennungsmotor ist vor allem eine Heizung mit Nebengeschäft Antrieb — Kapitel 17 folgt der Wärme. (Richtungsweisende moderne Flottenwerte; einzelne Autos variieren.)

Was Sie spüren

Dies ist die physikalische Wurzel des „EV-Stoßes“, der Erstfahrer überrascht. Ein ICE-Auto bei 30 km/h in einem hohen Gang wartet auf Drehzahlen; das EV ist bereits bei seinem maximalen Drehmoment. Die Reaktionslücke, die Sie in einem Verbrenner zwischen Pedaldruck und Schub spüren — Zurückschalten, Drehzahl aufbauen, Drehmoment schwillt an —, schrumpft im EV auf die Schaltgeschwindigkeit eines Wechselrichters. Sofortiges Drehmoment ist kein Tuning-Trick; es ist die Form der Kurve.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Elektroautos sind nur in der Stadt schnell; für echte Geschwindigkeit braucht man einen Motor.“ **Physik:** Die Beschleunigung bei jeder Geschwindigkeit ist $P/(mv)$ (Kapitel 4), und Auto C trägt 450 kW — der elektrische Stoß klingt nicht früh ab. Was hingegen stimmt: Mit einem einzigen festen Gang begrenzt die Motordrehzahl irgendwann die Höchstgeschwindigkeit, und der Luftwiderstand (Kapitel 12) besteuert die Reichweite bei hoher Geschwindigkeit brutal. Elektroautos tauschen etwas Spitze gegen sofortige Reaktion überall sonst; das ist eine Designentscheidung, keine physikalische Grenze.

6.4 Der Hybrid: eine arrangierte Ehe, die funktioniert

Ein Hybrid verbindet beide Maschinen und lässt einen Computer vermitteln. Der Verbrennungsmotor bleibt möglichst nahe an seinem Wirkungsgradoptimum, während der Elektromotor seine Drehmomentlücken füllt, das Auto in Bewegung setzt, Bremsenergie zurückgewinnt und die Schaltvorgänge glättet. Der physikalische Gewinn ist real: Der Motor muss nicht mehr an Ampeln im Leerlauf stehen (null Drehzahl ist für einen E-Motor problemlos), nicht mehr unwirtschaftlich im Verkehr schleichen und seine Energie nicht mehr als Bremswärme verschwenden. Im Stadtverkehr — dem ungünstigsten Einsatzgebiet des Verbrenners und dem günstigsten des E-Motors — ist der Vorteil des Hybrids am größten, weshalb die Technologie zuerst Taxis eroberte und später auch Sportwagen. Leistungshybride fügen eine weitere Wendung hinzu: Das sofortige Drehmoment des E-Motors überdeckt das Turboloch, sodass der Verbrennungsmotor auf Spitzenleistung abgestimmt werden kann, während der Antriebsstrang dennoch unmittelbar reagiert.

Probieren Sie es gedanklich

Warum würgt ein Elektroauto an der Ampel nicht ab, ein Verbrenner aber schon? (Abwürgen bedeutet, dass die Drehmomentanforderung das übersteigt, was der Motor bei nahezu null Drehzahl liefern kann. Das Motordrehmoment bei null Drehzahl liegt bei seinem *Maximum*, also gibt es nichts, was absterben könnte; der Verbrennungsmotor unterhalb der Leerlaufdrehzahl liefert überhaupt nichts.)

6.5 Was das für Autos bedeutet

Ein modernes Datenblatt zu lesen dauert nun Sekunden. ICE: Suchen Sie das Drehmomentplateau und das Leistungsmaximum — sie beschreiben Charakter und Tempo. EV: Achten Sie auf die Spitzenleistung und darauf, ob sie dauerhaft verfügbar ist (viele Elektroautos geben eine Kurzzeitkennzahl an); Drehmoment ist fast immer „genug, ab null“. Hybrid: Die Systemleistung ist selten die Summe beider Maschinen, weil ihre Spitzen unter unterschiedlichen Bedingungen auftreten — jetzt wissen Sie, warum. Und gleichgültig, welchen Antriebsstrang Sie bevorzugen, der Schluss von Teil II bleibt bestehen: Gespeicherte Energie wird zu Radkraft, Radkraft wird zu Beschleunigung, und alles — jedes letzte Newton — muss durch vier handtellergröße Gummistücke hindurch. Dorthin führt als Nächstes Teil III.

Eine Gleichung zum Merken

$$E_{\text{wheels}} = \eta \times E_{\text{stored}}$$

Wirkungsgrad ist der Anteil gespeicherter Energie, der die Räder erreicht: $\eta \approx 0,25\text{--}0,30$ für Verbrenner, $\approx 0,85\text{--}0,90$ für Elektroautos. Er verwandelt das sechzigfache Energiedichte-Defizit der Batterie in ein praktisch zweifaches.

6.6 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- Kraftstoff speichert $\sim 12\text{ kWh/kg}$; Batterien $\sim 0,2\text{ kWh/kg}$ — aber der Wirkungsgrad gleicht die Lücke größtenteils aus: $2\times$, nicht $60\times$, an den Rädern.
- Der Verbrennungsmotor vergeudet $\sim 70\%$ seiner Energie als Wärme und arbeitet nur in einem schmalen Drehzahlband: daher Kupplung und Getriebe.

- Der Elektromotor liefert maximales Drehmoment von null Drehzahl bis in einen breiten Bereich: kein Abwürgen, keine Kupplung, gewöhnlich ein Gang.
- Hybride gewinnen, indem jede Maschine ihr schlechtestes Betriebsgebiet vermeidet.
- Tanken bei 20 MW-Äquivalent bleibt der unschlagbare Trumpf der Chemie.

Teil III

Die vier kleinen Kontaktflächen, die das Geschehen bestimmen

Überblick Teil III

Alles, was ein Auto tut — beschleunigen, bremsen, lenken — wird durch vier Kontaktflächen ausgehandelt, die kaum größer sind als Ihre Hände. Kapitel 7 führt die Reibung und die Traktionsgrenze ein, die keine Pferdestärkekennzahl außer Kraft setzen kann. Kapitel 8 erklärt, warum starkes Beschleunigen die Hinterreifen belastet und Bremsen die Vorderreifen belastet, obwohl sich das Gewicht des Autos nicht geändert hat. Kapitel 9 verfolgt die kinetische Energie in die Bremsscheiben und fragt, wo all diese Geschwindigkeit tatsächlich bleibt.

Kapitel 7

Reifen, Grip und Reibung

Alles, was dieses Buch besprochen hat — Motorleistung, Getriebe, Impuls, Energie — muss durch ein letztes Tor, bevor es zu Bewegung wird: vier Gummistücke, jedes etwa handteller groß, auf denen die gesamte Verhandlung zwischen Auto und Straße stattfindet. Motoren sind stark und Bremsen sind kräftig; Reifen entscheiden, wie viel von beidem Sie nutzen dürfen. Dieses Kapitel handelt von den Regeln dieser Verhandlung.

Die Frage

Warum kann ein Auto nur so stark beschleunigen, bremsen oder lenken — und was setzt die Grenze?

Symbole auf einen Blick

N Normalkraft, die Reifen und Straße zusammendrückt [N]; μ (mu) Reibungskoeffizient, dimensionslos; F_x, F_y Längs- und Querkraft am Reifen [N]; Schlupf: der kleine Geschwindigkeitsunterschied zwischen Reifenoberfläche und Straße, in %.

Auf einen Blick

Die Kontaktfläche kann höchstens $F_{\max} = \mu N$ Kraft übertragen, in jede Richtung — Beschleunigen, Bremsen, Lenken oder jede Kombination, aufgeteilt nach dem Reibungskreis. Maximaler Grip braucht ein paar Prozent Schlupf; jenseits des Gipfels rutscht der Reifen und der Grip fällt. Auf trockenem Asphalt $\mu \approx 0,9$; auf Eis $\approx 0,15$.

7.1 Die Kontaktfläche

Heben Sie eine Ecke des Autos an und schauen Sie den Reifen an: nur eine handteller große Fläche berührt tatsächlich die Straße, vom Gewicht des Autos flach gegen den Asphalt gedrückt. Vier solcher Flächen — nennen wir es zusammen ein Blatt A4 Papier — übertragen jede Kraft, die das Auto je nutzen wird. Die 450 kW des Motors, die Megajoule pro Sekunde der Bremsen, der Lenkstoß aus Kapitel 10: all das fließt durch diese vier Flächen. Es ist keine Übertreibung, Reifen als die wichtigste Komponente für die Fahrleistung des Autos zu bezeichnen.

7.2 Reibung: ein einfaches Gesetz

Das klassische Reibungsmodell ist wunderbar einfach. Die maximale Kraft, die ein Kontakt vor dem Rutschen übertragen kann, ist proportional dazu, wie stark die beiden Oberflächen aneinander gepresst werden:

$$F_{\max} = \mu N,$$

wobei N die Normalkraft ist — für ein Auto auf ebener Straße sein Gewicht mg — und μ der Reibungskoeffizient, eine Eigenschaft der beiden Oberflächen, die sich treffen. Abbildung 7.1 liefert die Zahlen, die das Leben eines Fahrers beherrschen.

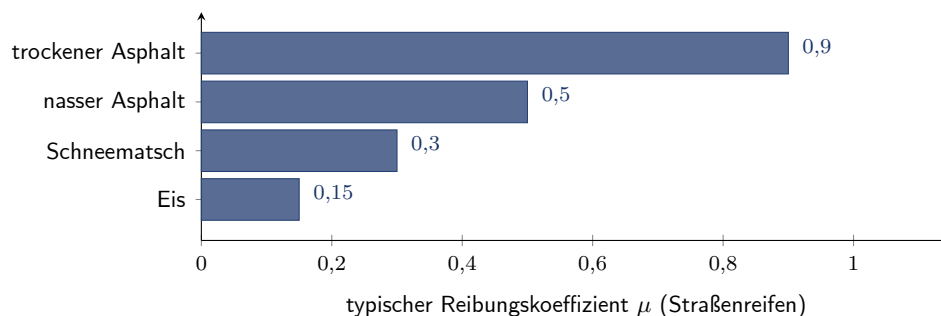


Abbildung 7.1: Typische Spitzen-Reibungskoeffizienten zwischen einem Straßenreifen und vier Oberflächen. Die Regel $F_{\max} = \mu N$ verwandelt jeden Balken direkt in eine Leistungsgrenze: Auf trockenem Asphalt kann ein Auto mit etwa $0,9g$ beschleunigen, bremsen oder lenken; auf Eis kaum $0,15g$. Renn-Slicks auf trockenem Asphalt übersteigen $\mu \approx 1,2\text{--}1,5$, weil weiche Mischungen mehr als Coulomb-Reibung tun — sie verzahnen und haften.

Eine verblüffend nützliche Identität folgt. Die maximale Beschleunigung jeder Art ist $a_{\max} = F_{\max}/m = \mu mg/m = \mu g$: *die physikalische Gripgrenze eines Autos in g ist einfach der Reibungskoeffizient*. Trockener Asphalt, $\mu \approx 0,9$: bis zu $0,9g$ von allem. Eis, $\mu \approx 0,15$: $0,15g$, weshalb auf Eis alles in Zeitlupe passiert.

Garagenphysik

Wie schnell kann die Physik ein Auto überhaupt auf 100 km/h bringen? Auto B ($1\,800\text{ kg}$, Allrad, trockener Asphalt, $\mu = 0,9$) kann sein gesamtes Gewicht für Traktion nutzen: $F_{\max} = 0,9 \times 1\,800 \times 9,81 \approx 15\,900\text{ N}$, also $a_{\max} \approx 8,8\text{ m/s}^2$ und

$$t_{0-100} \geq \frac{27,8}{8,8} \approx 3,2\text{ s}.$$

Kein Motor-Upgrade kann diese Zahl übertreffen — nur mehr μ (Slicks) oder klügere Lastverteilung. Ein heckgetriebenes Auto nutzt nur den Anteil des Gewichts an der Hinterachse, also liegt seine Startgrenze niedriger — genau der Grund, warum leistungsstarke Autos den Allradantrieb beim Start lieben.

7.3 Der Reibungskreis: ein Budget für alles

Hier ist die Regel, die jeden lebhaften Fahrmoment regiert. Die Kontaktfläche hat kein separates Budget für Bremsen und Lenken; sie hat *ein* Budget, μN , das in jede Richtung genutzt werden kann:

$$F_x^2 + F_y^2 \leq (\mu N)^2.$$

Abbildung 7.2 zeichnet das Budget als Kreis. Am Limit bremsen, und nichts bleibt zum Lenken übrig; am Limit lenken, und nichts bleibt zum Bremsen. Beides kombinieren — Trail-Braking in eine Kurve — bedeutet, an der Kante des Kreises entlangzugleiten und genau 100% zu beanspruchen. Deshalb verunsichert Bremsen in einer schnellen Kurve ein Auto, weshalb der geschickte Fahrer mit dem Bremsen fertig ist, bevor er einlenkt, und warum die besten Fahrer beides bewusst mischen. Kapitel 11 kommt darauf zurück, was passiert, wenn Vorder- und Hinterachs-Budgets sich nicht einig sind.

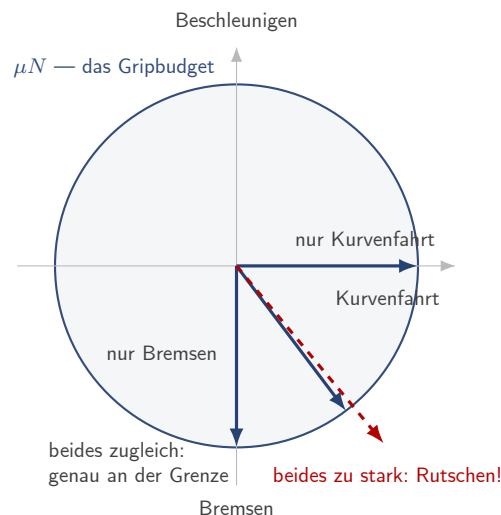


Abbildung 7.2: Die Kontaktfläche kann höchstens μN Kraft in *jede* Richtung liefern: $F_x^2 + F_y^2 \leq (\mu N)^2$. Allein Bremsen oder allein Lenken kann das gesamte Budget verbrauchen; beides gleichzeitig heißt, es zu teilen. Mehr als das Budget zu verlangen — der gestrichelte Pfeil — ist keine Bitte, die der Reifen höflich ablehnen kann: Er rutscht.

Was Sie spüren

Sie spüren den Kreis, wenn ein Schlagloch mitten in der Kurve oder ein Bremsstoß plötzlich mehr von den Vorderreifen verlangt, als sie haben: die Lenkung wird leicht und das Auto schiebt geradeaus. Diese Leichtigkeit ist keine Unschärfe — es ist das Reibungsbudget, das in Lenkrichtung null erreicht. Sanft lupfen, etwas Budget an die Vorderachse zurückgeben, und die Lenkung wird wieder wach.

7.4 Schlupf: das kleine Geheimnis des Gummis

Coulombs Gesetz hat eine Wendung, wenn die Oberflächen Gummi enthalten. Ein Reifen, der optimal greift, rollt nicht perfekt; er *kriecht* — der Gummi in der Kontaktfläche wird ein wenig geschert, ein paar Prozent Unterschied zwischen Radgeschwindigkeit und Fahrbahngeschwindigkeit. Der Grip steigt mit diesem Schlupf steil an, gipfelt um 5–10% und fällt dann ab, wenn die Kontaktfläche tatsächlich zu rutschen beginnt, wie Abbildung 7.3 zeigt. Ein blockiertes, rutschendes Rad sitzt tief am rechten Abhang: weniger Bremskraft *und* keine Lenkautorität. Das ist der gesamte Grund, warum ABS existiert — nicht um Sie magisch kürzer anzuhalten, sondern um jedes Rad nahe dem roten Punkt pulsieren zu lassen, wo der Grip am größten ist und die Lenkung weiterhin funktioniert. Die Traktionskontrolle tut dasselbe in Beschleunigungsrichtung.

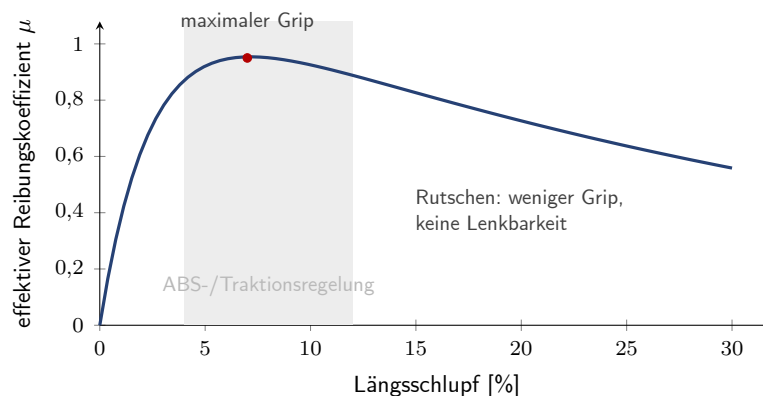


Abbildung 7.3: Das Geheimnis des Gummis: Maximaler Grip braucht ein wenig Schlupf — ein paar Prozent Unterschied zwischen Radgeschwindigkeit und Fahrbahngeschwindigkeit. Jenseits des Gipfels rutscht der Reifen und der Grip *fällt*; ein blockiertes Rad brems schlechter und kann nicht lenken. ABS und Traktionskontrolle existieren, um den Reifen nahe dem roten Punkt tanzen zu lassen.

Streckenrand-Notiz

Rennfahrer sprechen davon, dass Reifen „kommen“ — Grip steigt, wenn der Gummi seine Arbeitstemperatur erreicht — und dass Druck die Form der Kontaktfläche verändert. Beides ist echte Physik jenseits des einfachen μN -Modells: Die Temperatur der Mischung verändert die Haftung, und der Reifendruck verändert, wie sich die Last über die Kontaktfläche verteilt. Das Modell in diesem Kapitel ist die verlässliche erste Näherung; die Paddock-Künste sind Korrekturen zweiter Ordnung.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Breitere Reifen greifen immer mehr, weil mehr Gummi auf der Straße ist.“
Physik: Im einfachen Gesetz $F_{\max} = \mu N$ taucht die Fläche überhaupt nicht auf — doppelte Breite bei halbem Druck pro Quadratzentimeter, gleiche Kraft. Reale Reifen sind zur Breite freundlicher: Eine breitere Kontaktfläche läuft kühler, kann weichere Mischungen nutzen und leidet weniger unter der *Lastempfindlichkeit* des Gummis (Grip wächst etwas langsamer als die Last). Also greifen breitere Reifen oft tatsächlich besser — aber durch Materialphysik, nicht weil Fläche allein mehr Grip erzeugt.

Probieren Sie es gedanklich

Sie bremsen am absoluten Limit in einer Geraden, ABS summt. Ein Hindernis erscheint leicht links. Wie viel Lenkung können Sie hinzufügen, ohne das Budget der Vorderreifen zu überschreiten? (Sehr wenig, wenn der Reifen tatsächlich seine volle kombinierte Kraftkapazität nutzt. Mehr Querkraft zu verlangen bedeutet, etwas Längskraft abzugeben — genau deshalb verwaltet ABS den Schlupf um sein Optimum herum, statt ein blockiertes Rad zuzulassen, und bewahrt so die Lenkautorität selbst beim harten Bremsen.)

7.5 Was das für Autos bedeutet

Reifendenken erklärt Datenblatt-Rätsel und Einfahrtsentscheidungen gleichermaßen. Warum tragen Supersportwagen riesige Hinterreifen? Weil Leistung jenseits von μN an der angetriebenen Achse nutzlos ist. Warum verwandeln Winterreifen ein Auto? Weil Mischung und Profil den

μ auf kalten, nassen und verschneiten Oberflächen erhöhen — oft die wirksamste Fahrdynamik-Maßnahme überhaupt. Und warum beginnt jede ernsthafte Rundenzeit mit den Reifen? Weil alles andere in diesem Buch — Motor, Bremsen, Abtrieb, Fahrwerk — letztlich eine Art ist, die Kontaktflächen nach Kraft zu fragen, und die Kontaktflächen antworten nur innerhalb ihres Budgets.

Eine Gleichung zum Merken

$$F_x^2 + F_y^2 \leq (\mu N)^2$$

Die Kontaktfläche hat ein Kraftbudget, das in jede Richtung oder Kombination verwendbar ist. Jede Fahrgrenze — Start, Bremsen, Lenken — ist dieser Kreis mit anderen eingesetzten Zahlen.

7.6 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- Alle Kräfte zwischen Auto und Straße gehen durch vier handtellergröße Gummistücke.
- Das Budget der Kontaktfläche ist μN : etwa $0,9\times$ das Gewicht auf trockenem Asphalt, $0,15\times$ das Gewicht auf Eis; die Gripgrenze eines Autos in g entspricht näherungsweise μ .
- Bremsen und Lenken teilen sich ein Budget — den Reibungskreis; beides gleichzeitig zu nutzen bedeutet, sie gegeneinander abzuwägen.
- Spitzengriff braucht ein paar Prozent Schlupf; ABS und TC existieren, um den Reifen auf diesem Gipfel zu halten.
- Reifen sind oft die wirksamste Fahrdynamik-Maßnahme: Sie setzen den Wert von μ , und μ setzt alles.

Eine Feinheit wurde stillschweigend beiseitegelegt: die Last N an jedem Rad wurde als fester Anteil des Gewichts behandelt. Sie ist es nicht — Beschleunigen, Bremsen und Lenken *verlagern* alle Last zwischen den Rädern, und damit die Größe des Budgets jedes Reifens. Diese Lastverlagerung ist das nächste Kapitel.

Kapitel 8

Beschleunigung, Lastverlagerung und warum Autos hinten runterhängen

Starten Sie ein starkes Auto hart und es richtet sich auf wie ein Schnellboot: die Nase hebt sich, das Heck setzt sich ab. Bremsen Sie hart und das Gegenteil geschieht — die Nase taucht. Das Auto gewinnt oder verliert nicht an Gewicht; im Inneren bewegt sich nichts als ein paar Millimeter Federweg. Und dennoch ändern sich die Achslasten dramatisch. Diese stille Umverteilung — *Lastverlagerung* — entscheidet, welche Reifen hart arbeiten dürfen und welche nicht, jedes Mal, wenn das Auto schneller wird, langsamer wird oder sich dreht.

Die Frage

Warum entlastet Beschleunigung die Vorderachse und belastet die Hinterachse — und warum ist das für den Grip wichtig?

Symbole auf einen Blick

h Höhe des Schwerpunkts (SP) über der Straße [m]; L Radstand, Abstand zwischen Vorder- und Hinterachse [m]; ΔN verlagerte Last [N]; a Beschleunigung [m/s²]; N_f , N_r Vorder- und Hinterachslast [N].

Auf einen Blick

Die Antriebskraft wirkt auf Straßenniveau; die Trägheit des Autos wirkt auf Schwerpunkthöhe. Der Versatz h zwischen beiden bildet ein nickendes Kräftepaar, das die Last zwischen den Achsen um $\Delta N = mah/L$ verschiebt. Da das Gripbudget jedes Reifens μN ist (Kapitel 7), verschiebt die Lastverlagerung auch den *Grip* — nach hinten beim Beschleunigen, nach vorn beim Bremsen.

8.1 Das Kräftepaar

Schieben Sie einen Aktenschrank auf Bodenhöhe und er rutscht; schieben Sie ihn auf Brusthöhe und er kippt. Der Unterschied ist nicht die Kraft, sondern die *Höhe*. Ein Auto lebt dieselbe Physik im Kleinen: Der Vorwärtsdruck der Straße tritt auf Höhe der Kontaktflächen ein, auf Straßenniveau, während die Masse des Autos — seine Änderungsunwilligkeit aus Kapitel 2 — auf Schwerpunkthöhe wirkt, etwa auf Knie-bis-Hüfthöhe. Abbildung 8.1 zeigt die Geometrie: Vorwärtskraft unten, Trägheit oben, und dazwischen ein *Kräftepaar*, das versucht, das Auto mit der Nase nach oben zu drehen.

Das Auto kippt natürlich nicht. Stattdessen wird das Kräftepaar von den Achsen beantwortet: Die Vorderräder drücken etwas weniger auf die Straße, die Hinterräder etwas mehr, bis die

Drehmomente im Gleichgewicht sind. Diese Umverteilung *ist* die Lastverlagerung. Das Absenken der Karosserie, das Sie sehen — Nase hoch, Heck runter —, sind nur die Federelemente, die den neuen Lasten nachgeben; es ist das sichtbare Symptom, nicht die Ursache.

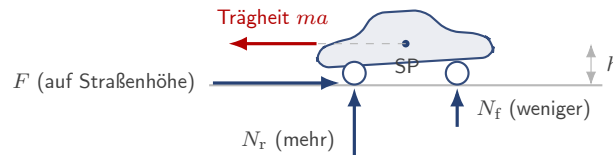


Abbildung 8.1: Warum ein Auto beim Beschleunigen hinten einfedert. Die Straße schiebt das Auto auf Bodenhöhe nach vorne; die Trägheit des Autos widersteht auf der Höhe h des Schwerpunkts. Der Versatz zwischen beiden erzeugt ein nickendes Kräftepaar, das die Vorderachse entlastet und die Hinterachse um $\Delta N = mah/L$ belastet. Härtere Federn verringern das sichtbare Nicken, nicht die Verlagerung selbst.

8.2 Die Formel

Das Drehmomentgleichgewicht um die Räder liefert die verlagerte Last direkt:

$$\Delta N = \frac{m a h}{L}.$$

Vier Hebel: schwereres Auto, stärkere Beschleunigung, höherer Schwerpunkt, kürzerer Radstand — jeder erhöht die Verlagerung. (Die gleiche Formel mit Querschleunigung und *Spurweite* beschreibt das Lenken; Kapitel 11 greift das auf.)

Garagenphysik

Auto B: $m = 1800 \text{ kg}$, $h = 0,55 \text{ m}$, $L = 2,8 \text{ m}$, also trägt jede Achse statisch die Hälfte des Gewichts, $8,8 \text{ kN}$.

- **Bremsen mit $0,9 g$:** $\Delta N = 1800 \times 8,8 \times 0,55/2,8 \approx 3,1 \text{ kN}$ verlagert sich *nach vorn*: die Vorderachse trägt $8,8 + 3,1 = 11,9 \text{ kN}$ (68% des Autos), die Hinterachse nur $5,7 \text{ kN}$.
- **Beschleunigen mit $0,8 g$:** $\Delta N \approx 2,8 \text{ kN}$ verlagert sich *nach hinten*: die Hinterachse trägt $11,6 \text{ kN}$, die Vorderachse nur $6,1 \text{ kN}$.

Abbildung 8.2 zeichnet alle drei Zustände nebeneinander.

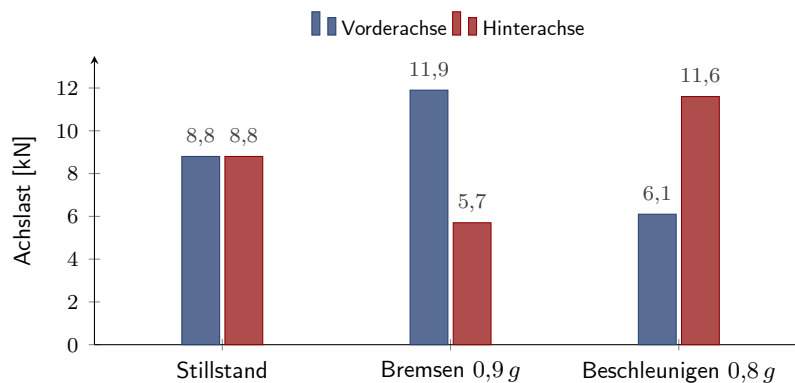


Abbildung 8.2: Achslasten von Auto B (1 800 kg, Radstand 2,8 m, Schwerpunkthöhe 0,55 m): im Stand, beim Bremsen mit 0,9 g und beim Beschleunigen mit 0,8 g . Hartes Bremsen verlagert über 3 kN auf die Vorderachse — daher erledigen vordere Bremsen und Vorderreifen den Großteil des Anhaltens. Beschleunigen kehrt es um — daher startet Heckantrieb so gut.

Verbinden Sie das nun mit Kapitel 7: Das Gripbudget jeder Achse ist μ mal *ihre eigene* Last. Beim harten Bremsen wächst das Budget der Vorderachse auf $\mu \times 11,9$ kN, während das der Hinterachse auf $\mu \times 5,7$ kN schrumpft. Deshalb sind vordere Bremsscheiben größer, Teil der Grund, warum Vorderreifen oft schneller verschleifen (Lenkung und, bei Fronttrieblern, Vortrieb tragen ihren Teil bei), und warum eine blockierte Hinterachse beim Bremsen tückisch ist: Die Hinterachse hat wenig Last übrig, erreicht also früh ihr kleines Budget — und ein rutschendes Heck will um das Auto herumkommen (Kapitel 11).

8.3 Warum sich die Karosserie bewegt (und warum das nicht der Punkt ist)

Die Karosserie nickt, weil die Federn unter den neuen Lasten einfedern. Es liegt nahe zu schließen, dass eine Versteifung des Fahrwerks die „Lastverlagerung verringern“ würde — und hier liegt eine der hartnäckigsten Verwechslungen der Boxengasse.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Härteres Fahrwerk verringert die Lastverlagerung.“ **Physik:** Schauen Sie auf die Formel: $\Delta N = mah/L$ enthält Masse, Beschleunigung, Schwerpunkthöhe und Radstand — keine Federsteifigkeit. Bei stationärer Beschleunigung sind die Achslasten allein durch diese bestimmt; härtere Federn verringern nur, wie weit die Karosserie *rotiert*, während sie die gleichen Lasten erreicht. Steifigkeit verändert die *Bewegung*, nicht die *Verlagerung*. (Federn verändern, wie *schnell* die Verlagerung geschieht und wie sie in Kurven zwischen Vorder- und Hinterachse aufgeteilt wird — Kapitel 11 und 15 gehen dorthin.)

Ingenieure spielen Geometrie-Tricks mit den Aufhängungslenkern — *Anti-Squat* und *Anti-Dive* —, die die Antriebskraft durch die Aufhängungsarme leiten, sodass die Kraft selbst, nicht die Federn, die Karosserie waagrecht hält. Die Lastverlagerung geschieht trotzdem (die Physik besteht darauf); die Karosserie hört nur auf, darüber zu nicken.

8.4 Was das für Autos bedeutet

Die Lastverlagerung erklärt eine Reihe von Automobilfakten, die Sie bereits kannten, aber vielleicht nie verbunden haben. *Heckantrieb* startet hart, weil Beschleunigung die angetriebene

Achse genau dann belastet, wenn sie Grip braucht — das Kräftepaar hilft. *Dragster* machen Wheelies, weil h groß und a enorm ist: Wenn ΔN die gesamte Vorderachslast übersteigt, verlassen die Vorderräder tatsächlich den Boden — der dramatische Grenzfall der Formel. *Vorderradbremsen* dominieren, weil Bremsen die Last nach vorn verlagert. *Niedrige, lange* Autos verlagern weniger: Sportwagen sitzen teilweise deshalb tief, und SUVs neigen und tauchen mehr, weil ihr h groß ist. Und da der Reifengrip etwas *langsamer* als die Last wächst (Lastempfindlichkeit, Kapitel 7), kostet das Verlagern der Last immer etwas Gesamt-Grip — ein Verlust, den Kapitel 11 in die ganze Geschichte von Unter- und Übersteuern verwandelt.

Was Sie spüren

Die tauchende Nase beim Bremsen, das absackende Heck beim Anfahren, die sanfte Karoserieneigung im Kreisverkehr: Alles drei ist dieselbe Formel, in verschiedene Richtungen gelesen. Sobald Sie sie als *Last, die sich zwischen Budgets bewegt* spüren, fahren Sie mit der Verlagerung statt gegen sie — erst kräftig bremsen, dann nach und nach die Lenkung einblenden, während das Budget der Vorderreifen frei wird.

Probieren Sie es gedanklich

Ein Auto bremst am absoluten Limit der Vorderachse. Ist die Hinterachse ebenfalls an ihrem Limit? (Nicht unbedingt. Da die Normallast der Hinterachse gefallen ist, kann die Hinterachse weniger Bremskraft aufnehmen, bevor sie blockiert — genau deshalb ist die Bremskraftverteilung zur Vorderachse hin verzerrt und muss mit steigender Verzögerung weiter nach vorn wandern, eine Aufgabe, die die elektronische Bremskraftverteilung automatisiert.)

Eine Gleichung zum Merken

$$\Delta N = \frac{m a h}{L}$$

Zwischen den Achsen verlagerte Last: Masse mal Beschleunigung mal Schwerpunktshöhe, geteilt durch den Radstand. Hohe, schwere, kurze Autos verlagern am meisten; der Grip folgt der Last.

8.5 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- Die Kraft tritt auf Straßenniveau ein; die Trägheit wirkt auf Schwerpunktshöhe; der Versatz nickt das Auto und verschiebt die Achslasten.
- $\Delta N = mah/L$: bei $0,9g$ Bremsen wächst die Vorderachslast von Auto B von 50% auf 68% des Autogewichts.
- Die Gripbudgets wandern mit: belastete Achse, größeres μN ; unbelastete Achse, kleineres.
- Härtere Federn verändern die Karosseriebewegung, nicht die stationäre Verlagerung.
- Die Formel erklärt Heckantriebs-Starts, große Vorderradbremsen, Wheelies und warum niedrig und lang gut ist.

Bremsen verdienen ein eigenes Kapitel: Es ist das Spiegelbild der Beschleunigung, das Schnellste, was die meisten Autos können, und — durch die Energie-Brille aus Kapitel 3 — eine Geschichte darüber, wie Megajoule zu Wärme werden.

Kapitel 9

Bremsen: Geschwindigkeit in Wärme verwandeln

Hier ist eine Tatsache, die jede Datenblatt-Diskussion neu kalibriert: Ihre Bremsen sind stärker als Ihr Motor. Nicht ein bisschen stärker, sondern viel stärker. Der Motor von Auto B kann durch den ersten Gang die Räder höchstens mit etwa 14 kN schieben; seine Bremsen, die über alle vier Kontaktflächen wirken, können 16 kN ziehen, sobald das Pedal zupackt. Beschleunigung baut Geschwindigkeit langsam und liebevoll auf; Bremsen kann sie in drei Sekunden auslöschen. Dieses Kapitel ist die Physik dieser Auslöschung — woher die Kraft kommt, wohin die Energie geht, und warum Bremsen glühen.

Die Frage

Was passiert physikalisch, wenn Sie hart bremsen — und warum werden die Bremsen heiß?

Symbole auf einen Blick

a_b Bremsverzögerung [m/s^2]; d Anhalteweg [m]; E_{kin} kinetische Energie [J]; P_{brake} Bremsleistung [W]; ΔT Temperaturanstieg [$^\circ\text{C}$].

Auf einen Blick

Bremsen baut kinetische Energie mit reifenbegrenzter Kraft ab: $d = v^2/(2a_b)$. Die Brems Scheiben wandeln diese Energie in Wärme um — eine einzige Bremsung aus 100 km/h kann einen Satz Scheiben um mehr als 150°C erhitzen. Elektroautos leiten den größten Teil der Energie stattdessen zurück in die Batterie.

9.1 Die Physik des Anhaltens

Die Bremskraft gehorcht demselben Budget wie jede andere Reifenkraft: $F \leq \mu N$ (Kapitel 7). Wenn alle vier Räder bremsen, summiert sich N zum Gewicht des Autos, also ist die erreichbare Verzögerung wieder einfach $a_b \approx \mu g$ — etwa $0,9g$ auf trockenem Asphalt mit guten Reifen. Kapitel 8 fügt eine wichtige Verfeinerung hinzu: Beim Bremsen verlagert sich die Last nach vorn, also erledigen die vorderen Bremsen den größten Teil der Arbeit — daher ihre größeren Scheiben.

Die Strecke folgt aus der Energie, nicht aus der Kraft: $\frac{1}{2}mv^2$ mit einer konstanten Kraft

$F = ma_b$ zu entfernen erfordert eine Strecke

$$d = \frac{v^2}{2a_b}.$$

Abbildung 9.1 zeichnet sie: die Parabel aus Kapitel 3, jetzt mit Konsequenzen. Aus 50 km/h dauert eine entschlossene Bremsung 12 m; aus 100 km/h das Vierfache; aus 200 km/h das Sechzehnfache — fast 200 m, zwei Fußballfelder. Die gestrichelte Linie addiert eine halbe Sekunde Reaktionszeit: Bei 100 km/h werden weitere 14 m zurückgelegt, bevor die Bremsen überhaupt zupacken.

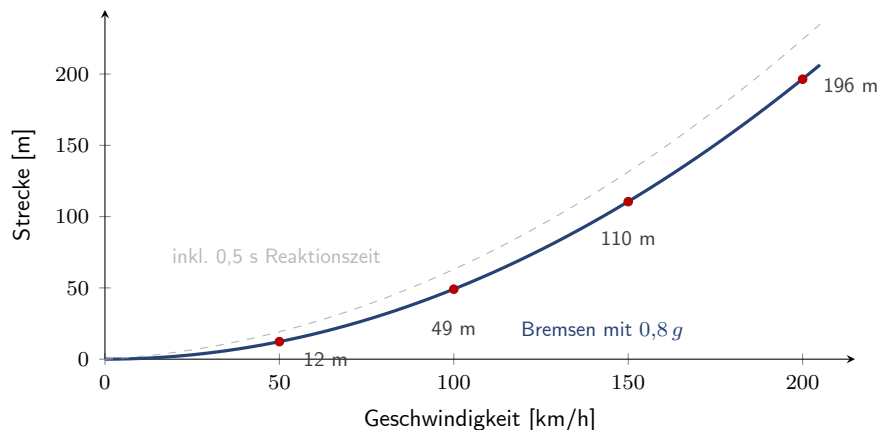


Abbildung 9.1: Bremsweg gegen Geschwindigkeit bei konstantem $0,8 g$ — bereits eine entschlossene Bremsung auf trockenem Asphalt. Die Parabel ist v^2 sichtbar gemacht (Kapitel 3): doppelte Geschwindigkeit, vierfache Strecke. Die gestrichelte Linie addiert $0,5 s$ Reaktionszeit, die nur linear wächst — und dennoch den Unterschied bei Stadtgeschwindigkeit dominiert.

Was Sie spüren

Eine vollständige ABS-Bremsung fühlt sich ruppig an, weil sie es ist: $0,9 g$ bedeutet, dass Ihr 80 kg schwerer Oberkörper mit seinem eigenen Gewicht auf den Gurt drückt. Das pulsierende Pedal ist Abbildung 7.3 in Aktion — das System löst und bremst jedes Rad viele Male pro Sekunde, hält die Reifen am Grip-Gipfel, wo ein blockiertes Rad langsamer wäre *und* nicht lenkbar.

9.2 Wohin die Energie geht: Wärme

Die Reibungskraft ist nur die Reifenhälfte der Geschichte. Zwischen Bremsbelag und Scheibe verschwindet die kinetische Energie nicht — sie wird zu *Wärme*. Und die Mengen sind brutal, wie Abbildung 9.2 zeigt: Auto B, das mit 100 km/h ankommt, trägt 0,69 MJ; Anhalten heißt, alles davon in vier Stahlscheiben zu kippen.

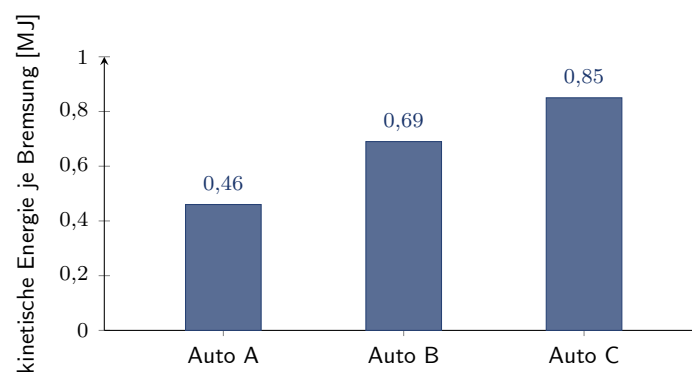


Abbildung 9.2: Was eine Bremsung aus 100 km/h in die Bremsen jedes Flottenautos kippt. Die Masse ist der Multiplikator: Das Batteriegewicht von Auto C belastet seine Bremsen fast doppelt so stark wie das von Auto A. In einem EV kann der Motorgenerator bei moderater Bremsung stattdessen einen erheblichen Anteil dieser Energie zurückgewinnen — das ist rekuperatives Bremsen.

Garagenphysik

Wie heiß macht eine einzige Bremsung? Auto B aus 100 km/h: 694 kJ in ungefähr 8 kg Stahlscheibe (spezifische Wärme $\approx 500 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$):

$$\Delta T = \frac{694\,000}{8 \times 500} \approx 174^\circ\text{C}$$

— in etwa 3,5 Sekunden, eine mittlere Heizleistung von $694/3,5 \approx 200 \text{ kW}$. Aus 200 km/h ist es die vierfache Energie: nahezu 700°C , wenn die Scheiben sie allein aufnehmen müssten. (Luftströmung trägt viel davon ab — deshalb gibt es Bremskanäle.) Wiederholen Sie das, und Beläge, Flüssigkeit und Gummidichtungen erreichen ihre Grenzen: Das Pedal wird lang und weich. Das ist *Bremsfading* — kein Kraftproblem (die Reifen haben noch Grip), sondern ein Temperaturproblem.

Streckenrand-Notiz

Streckenfahren ist Bremsen-Wärmemanagement. Fahrer lernen, *einmal* zu bremsen — hart und spät —, statt die Bremsen schleifen zu lassen: dieselbe Energie in kürzerer Zeit, mit mehr Luftstrom bei Geschwindigkeit, um sie abzuführen. Bremskanäle, belüftete Scheiben und hitzebeständige Flüssigkeit existieren alle, um die thermische Decke anzuheben. Wenn Kommentatoren sagen, ein Auto „frisst seine Bremsen“, meinen sie die Arithmetik dieses Kapitels.

9.3 Die EV-Ausnahme: Energie bunkern

Ein Elektromotor arbeitet ebenso gern rückwärts: Als Generator wandelt er Bewegung zurück in Batterieladung. Dies ist *rekuperatives Bremsen*, und es verändert das Fazit des Kapitels für EVs — bei moderater Bremsung kann der Motorgenerator einen erheblichen Anteil der 0,85 MJ aus Abbildung 9.2 zurückgewinnen, statt Scheiben zu erhitzen (Kapitel 17 rechnet die Ersparnis zusammen). Die Reibungsbremsen bleiben für harte Bremsungen wesentlich — die Rekuperationsleistung ist durch das begrenzt, was Motor, Wechselrichter und Batterie in diesem Moment akzeptieren, sodass bei einer Vollkraft-100–0-Bremsung die Scheiben den größten Teil der Arbeit tun — sowie für kriechende Manöver, weshalb EV-Scheiben vor Rost strotzen können, weil sie selten benutzt werden. Ein-Pedal-Fahren — beim Lupfen kräftig verzögern — ist schlicht

Rekuperation, die aufs Gaspedal abgebildet ist.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Größere Bremsen stoppen Sie kürzer.“ **Physik:** Der Anhalteweg wird durch die *Reifen* bestimmt: $d = v^2/(2\mu g)$ — die Brems-Hardware taucht nicht auf. Größere Scheiben und Sättel bringen vor allem *Wärmekapazität und Standfestigkeit*: derselbe kurze Stopp, zwanzig Mal hintereinander, ohne Fading. Der erste Stopp gehört den Reifen; der zwanzigste den Bremsen.

Probieren Sie es gedanklich

Ein Lkw und ein Sportwagen bremsen nebeneinander aus 100 km/h, beide mit guten Reifen. Wer hält kürzer? (Ungefähr gleich: $d = v^2/(2\mu g)$ enthält keine Masse. Was sich unterscheidet, ist die Wärme: Die Bremsen des Lastwagens müssen viel mehr Energie aufnehmen — weshalb Lastwagen an langen Gefällen unter Bremsfading leiden und die Motorbremse nutzen.)

9.4 Was das für Autos bedeutet

Sie können jetzt Brems-Hardware wie ein Ingenieur lesen: Scheibendurchmesser und Belüftung sprechen für *Wärme*, nicht für Anhalteweg; Reifenbreite und -mischung sprechen für *Weg*; Brems-Bias nach vorn spricht für Kapitel 8. Und Sie tragen die eine überlebenswichtige Zahl dieses Kapitels mit sich: der Anhalteweg wächst mit dem *Quadrat*. Jedes „nur 20 schneller“ ist eine Parabel, keine Linie.

Eine Gleichung zum Merken

$$d = \frac{v^2}{2 a_b} \approx \frac{v^2}{2\mu g}$$

Der Anhalteweg wächst mit dem Quadrat der Geschwindigkeit und schrumpft nur durch den Reifengrip. Die Masse taucht nicht auf — sie kürzt sich zwischen der zu entfernenden Energie und der Reibung, die sie entfernt.

9.5 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- Bremsen sind stärker als Motoren: Alle vier Kontaktflächen gegen μN können mehr Kraft übertragen als der Antriebsstrang im ersten Gang.
- Der Weg ist $v^2/(2\mu g)$: doppelte Geschwindigkeit, vierfache Straße; Reaktionszeit addiert sich linear oben drauf.
- Bremsen ist Wärme: ein 100–0-Stopp in Auto B heizt die Scheiben $\sim 174^\circ\text{C}$ mit im Mittel 200 kW.
- Fading ist thermisch, nicht reibungsbedingt — große Bremsen bringen Standfestigkeit; Reifen verkürzen den Weg.
- EVs bunkern die Energie: bei moderaten Bremsungen gewinnt die Rekuperation einen erheblichen Anteil zurück, schont die Scheiben und verlängert die Reichweite.

Bisher zeigte jede Kraft entlang der Straße. Der nächste Teil dreht das Lenkrad — im wahrsten Sinne des Wortes: Warum braucht ein Auto *Kraft*, nur um eine Kurve zu fahren, selbst bei völlig konstanter Geschwindigkeit?

Teil IV

Kurvenfahrt: Geschwindigkeit ohne Gerade

Überblick Teil IV

Ein Auto, das mit konstanter Geschwindigkeit durch eine Kurve fährt, beschleunigt in jeder Sekunde. Kapitel 10 erklärt, warum Kurvenfahrt eine kontinuierliche nach innen gerichtete Kraft erfordert und warum die nötige Kraft mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst. Kapitel 11 betrachtet dann die Rotation: warum ein Auto manchmal breit läuft, manchmal ausbricht und warum die Verteilung des Grips ebenso wichtig ist wie seine Größe.

Kapitel 10

Warum ein Auto Kraft braucht, um eine Kurve zu fahren

Der Tacho sagt, nichts passiert: konstante 80 km/h durch die lange Autobahnkurve. Und dennoch rutscht Ihr Körper sanft gegen die Seitenpolsterung, und Kleingeld wandert über das Armaturenbrett. Der Tacho lügt durch Weglassen — er berichtet *Schnelligkeit*, und Lenken bei konstanter Schnelligkeit ist immer noch Beschleunigung. Kapitel 1 führte diese Unterscheidung ein; dieses Kapitel liefert die Rechnung.

Die Frage

Warum braucht ein Auto Kraft, nur um eine Kurve zu fahren — und wie viel?

Symbole auf einen Blick

r Kurvenradius [m]; v Geschwindigkeit [m/s]; a_c Zentripetalbeschleunigung (zum Mittelpunkt gerichtet) [m/s²]; F_c Zentripetalkraft [N].

Auf einen Blick

Ein Auto auf einer Kreisbahn beschleunigt zum Mittelpunkt hin mit $a_c = v^2/r$, selbst bei konstanter Geschwindigkeit. Die Reifen müssen $F_c = mv^2/r$ seitlich aufbringen — aus demselben Reibungsbudget wie Bremsen und Beschleunigen. Die schnellstmögliche Kurvengeschwindigkeit ist $v_{\max} = \sqrt{\mu g r}$.

10.1 Kurvenfahrt ist Beschleunigung

Geschwindigkeit ist ein Vektor: Sie hat eine Richtung sowie eine Größe. Ändern Sie die Richtung — biegen Sie den Pfad —, ändert sich die Geschwindigkeit, auch wenn die Schnelligkeit gleich bleibt; und jede Änderung der Geschwindigkeit ist eine Beschleunigung. Für gleichförmige Kreisbewegung ist das Ergebnis eine der hübschesten Formeln der Mechanik: Die Beschleunigung zeigt zum Kreismittelpunkt und hat die Größe

$$a_c = \frac{v^2}{r}.$$

Abbildung 10.1 zeigt die Geometrie von oben: Geschwindigkeit tangential zum Pfad, Kraft zur Mitte. Die Kraft ist real und muss von irgendwo physisch kommen — den Reifen, die sich gegen die Straße verformen. Auf Blitzeis ($\mu \rightarrow 0$) existiert keine seitliche Kraft, und das Auto gehorcht Newtons erstem Gesetz mit herzerreißender Treue: Es fährt geradeaus.

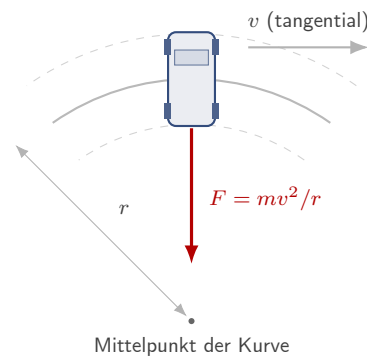


Abbildung 10.1: Ein Auto in einer gleichförmigen Kurve bewegt sich auf einem Kreis mit Radius r mit konstanter Geschwindigkeit — und beschleunigt dennoch, weil sich seine *Richtung* ändert. Die Beschleunigung zeigt zum Mittelpunkt der Kurve, und die Reifen müssen die entsprechende Kraft $F = mv^2/r$ seitlich liefern. Keine Kraft, kein Bogen: Auf Blitzeis fährt das Auto einfach geradeaus.

Garagenphysik

Auto B durch einen Kreisverkehr mit $r = 50$ m bei 60 km/h (16,7 m/s):

$$a_c = \frac{16,7^2}{50} = 5,6 \text{ m/s}^2 \approx 0,57 g, \quad F_c = 1800 \times 5,6 \approx 10\,000 \text{ N}$$

— das Gewicht eines kleinen Autos, seitlich durch die vier Kontaktflächen ausgeübt. Und die Decke? Mit $\mu = 0,9$ liegt die schnellstmögliche Runde dieses Kreisverkehrs bei $v_{\max} = \sqrt{0,9 \times 9,81 \times 50} = 21 \text{ m/s} \approx 76 \text{ km/h}$. Der Kreisverkehr interessiert sich nicht für Ihren Motor.

10.2 Das Kurvenbudget

Beachten Sie, was die Formel verlangt: Die Seitenkraft wächst mit dem *Quadrat* der Geschwindigkeit und fällt nur umgekehrt mit dem Radius. Das hat drei praktische Konsequenzen.

Erstens, *Geschwindigkeit ist die teure Variable*. Nehmen Sie die Kurve mit 80 statt 60 km/h, steigt die Reifenkraft um $(80/60)^2 = 1,78$ — nicht um ein Drittel, sondern um fast das Doppelte. Dies ist der zweite Auftritt des v^2 -Gesetzes aus Kapitel 3, und nicht der letzte: Aerodynamik (Kapitel 12) folgt.

Geschwindigkeit ändert alles

Jeder Fahrer hat gespürt, wie eine Kurve „plötzlich“ innerhalb einer kleinen Geschwindigkeitserhöhung von einfach zu unmöglich wechselt. Diese abrupte Grenze entsteht, wenn v^2 auf den Reibungskreis trifft: Bei 90% des Limits nutzen Sie $0,9^2 = 81\%$ des Budgets und fühlen sich entspannt; bei 110% brauchen Sie 121% — und kein Talent, keine Technik, kein Stoßgebet liefert das fehlende Fünftel. In den letzten wenigen km/h vor dem Limit steckt die gesamte Sicherheitsreserve.

Zweitens, *Radius ist die billige Variable*: Die Kraft fällt nur mit $1/r$, also hilft ein größerer Radius bescheiden. Dies ist die gesamte physikalische Grundlage der Ideallinie: weit anfangen, innen schneiden, weit herausgehen, verwandelt einen engen Bogen in einen viel größeren — ein größeres effektives r , also mehr Geschwindigkeit bei derselben Reifenkraft.

Drittens, *Grip verteilt sich nach $\sqrt{2}$ -artigen Strafen*: Abbildung 10.2 vergleicht trocken und nass. μ zu halbieren halbiert nicht die Kurvengeschwindigkeit — es multipliziert sie mit $\sqrt{0,5} \approx$

0,71 — aber es halbiert die *Reserve*, und die Reserve ist es, was Fehler verbrauchen.

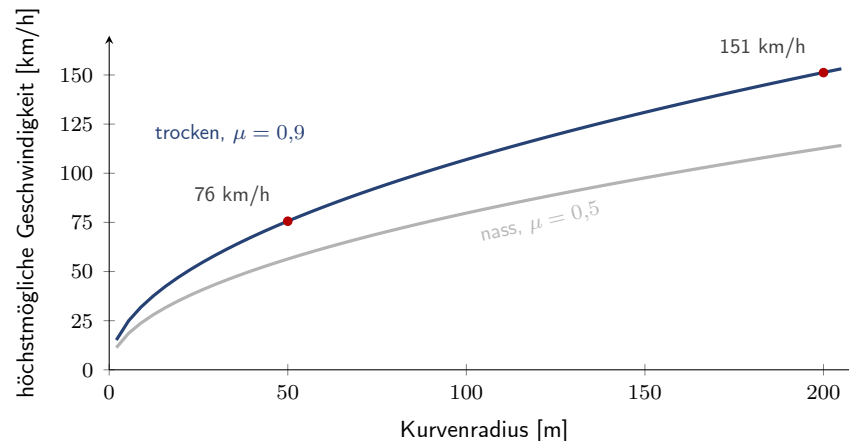


Abbildung 10.2: Die schnellstmögliche Geschwindigkeit durch eine Kurve, $v_{\max} = \sqrt{\mu gr}$, für trockenen und nassen Asphalt. Zwei Lehren: Die Geschwindigkeit wächst nur mit der *Quadratwurzel* des Radius — ein doppelt so großer Radius erlaubt nur 41% mehr Geschwindigkeit — und Regen kostet überall etwa 30%, weil Halbierung von μ die Geschwindigkeit durch $\sqrt{2}$ teilt.

Was Sie spüren

Bei $0,9g$ in einer Kurve drückt Ihr Körper mit nahezu seinem vollen Gewicht seitlich gegen den Sitz. Ihre Arme belasten das Lenkrad, Ihr Kopf driftet zum Fenster, und alles, was nicht festgeschraubt ist, wandert. Nichts davon ist eine nach außen gerichtete Kraft — es ist die Trägheit Ihres Körpers, die geradeaus weiter will (Kapitel 2), während das Auto um Sie herum nach innen beschleunigt. Sie spüren den *Sitz*, der Sie zum Mittelpunkt drückt, genau wie Sie ihn bei der Beschleunigung nach vorne drücken spürten.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Ein schweres Auto fährt schlechter durch Kurven, weil sein Gewicht die Reifen überwältigt.“ **Physik:** Im idealen Modell kürzt sich die Masse genau: $F_c = mv^2/r$ gegen $F_{\max} = \mu mg$ lässt $v_{\max} = \sqrt{\mu gr}$ — kein m irgendwo. Ein Lkw und ein Sportwagen teilen sich auf denselben Reifen dieselbe theoretische Kurvengeschwindigkeit. Reale schwere Autos fahren tatsächlich schlechter durch Kurven, aber durch die Seitentüren: Reifen sind *lastempfindlich* (Grip wächst langsamer als Last, Kapitel 7), höhere Fahrzeuge verlagern mehr Last (Kapitel 8), und Bremsen sowie Fahrwerke leiden. Masse ist wichtig — nur nicht über die Schlagzeilenformel.

Probieren Sie es gedanklich

Sie sind Beifahrer in einem Auto, das am Grip-Limit nach links lenkt. In welche Richtung drückt Sie die Tür, und was drückt Sie „nach außen“? (Die Tür drückt Sie *nach innen* — zum Mittelpunkt der Kurve hin — und liefert so Ihre Zentripetalkraft. Nichts drückt Sie nach außen; Ihre Trägheit versucht lediglich weiter geradeaus zu fahren, was relativ zum drehenden Auto so wirkt, als würden Sie nach außen geworfen.)

10.3 Was das für Autos bedeutet

Die stationäre Kurvengeschwindigkeit ist eine Eigenschaft von *Reifen, Radius und Oberfläche* — nicht vom Motor, und idealerweise nicht von der Masse. Das ordnet viel Marketing neu: Kurven-g-Zahlen sind Reifentests; Skidpad-Zahlen messen mehr μ als das Auto. Was *ist* dann das Auto? Die Balance — welches Ende zuerst sein Budget aufbraucht, und ob das sanft oder giftig geschieht. Diese Balance hat Namen, die Sie kennen: Untersteuern und Übersteuern. Nächstes Kapitel.

Eine Gleichung zum Merken

$$a_c = \frac{v^2}{r}, \quad v_{\max} = \sqrt{\mu g r}$$

Kurvenfahrt ist Beschleunigung zum Mittelpunkt hin. Die maximal mögliche Geschwindigkeit wächst nur mit der Quadratwurzel aus Radius und Grip — Schnäppchen gibt es keine.

10.4 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- Lenken bei konstanter Geschwindigkeit ist immer noch Beschleunigung: $a_c = v^2/r$ zum Mittelpunkt hin.
- Die Reifen bezahlen aus demselben Reibungsbudget wie Bremsen und Beschleunigung (Kapitel 7).
- Die Kraft wächst mit v^2 : die letzten 10% Geschwindigkeit vor dem Limit fressen ein Fünftel des Budgets.
- Größerer Radius hilft nur mit $1/r$ — daher die Ideallinie.
- Im Ideallimit kürzt sich die Masse: Die Kurvengrenze kommt von den Reifen, nicht von den Pferdestärken.

Kapitel 11

Untersteuern, Übersteuern und Gier

Jedes Auto am Grip-Limit tut eines von zwei Dingen: Es pflügt Richtung Kurvenaußen, egal wie stark Sie lenken (Untersteuern), oder sein Heck tritt heraus und versucht, das Auto zu drehen (Übersteuern). Dieselben Reifen, dieselbe Straße, derselbe Fahrer — gegensätzliche Fehler. Der Unterschied ist keine Magie oder Markencharakter; er ist die Antwort auf eine präzise Frage: *welche Achse erschöpft ihr Reibungsbudget zuerst?* Dieses Kapitel baut diese Antwort vom Schräglaufwinkel auf.

Die Frage

Was entscheidet, ob ein Auto breit pflügt oder sich dreht — und warum ist eines davon so viel unheimlicher?

Symbole auf einen Blick

α Schräglaufwinkel [°]; F_{lat} Querkraft des Reifens [N]; a_{lat} Querbesehleunigung [m/s²]; t Spurweite (Abstand zwischen linken und rechten Rädern) [m]; Gier: Drehung um die Hochachse des Autos.

Auf einen Blick

Ein lenkender Reifen arbeitet mit einem Schräglaufwinkel und sättigt jenseits 8–12°. Das Lenken verlagert Last seitlich ($\Delta N = ma_{\text{lat}}h/t$), und weil Reifengrip langsamer als Last wächst, verliert das Ende des Autos, das mehr Verlagerung trägt, schneller den Grip. Vorderes Ende zuerst: Untersteuern (stabil). Hinteres Ende zuerst: Übersteuern (instabil). ESP existiert, um die daraus folgende Gier zu kontrollieren.

11.1 Wie ein Reifen lenkt: der Schräglaufwinkel

Schauen Sie einen rollenden, lenkenden Reifen von oben an, und Sie finden etwas Seltsames: Er rollt nicht exakt dorthin, wohin er zeigt. Die Radebene zielt leicht *nach außen*; die tatsächliche Geschwindigkeit liegt wenige Grad *nach innen*. Der Unterschied ist der *Schräglaufwinkel* α , gezeigt in Abbildung 11.1. Innerhalb der Kontaktfläche werden Profilblöcke gerade abgelegt, von der Straßenhaftung seitlich geschleppt und schnappen zurück, wenn sie sich abheben — ihre elastische Scherung, summiert über die Fläche, ist die Seitenkraft. Es ist der Längsschlupf aus Abbildung 7.3, um neunzig Grad gedreht, und er verhält sich ähnlich: Die Kraft steigt steil mit dem Winkel, gipfelt und sättigt dann, wie Abbildung 11.2 zeigt. Lenkpräzision lebt im linearen Teil; die Grenze des Lenkens liegt im Plateau.

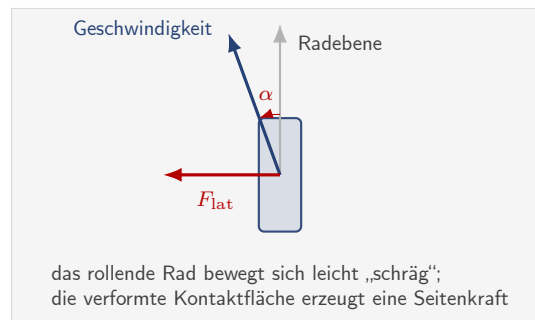


Abbildung 11.1: Wie ein rollender Reifen lenkt: Die Radebene zeigt in eine Richtung, die tatsächliche Geschwindigkeit liegt wenige Grad nach innen versetzt — der *Schräglaufwinkel* α . Die Kontaktfläche wird ständig seitlich geschert, und ihr elastischer Widerstand ist die Querkraft. Ohne Schräglaufwinkel keine Lenkkraft.

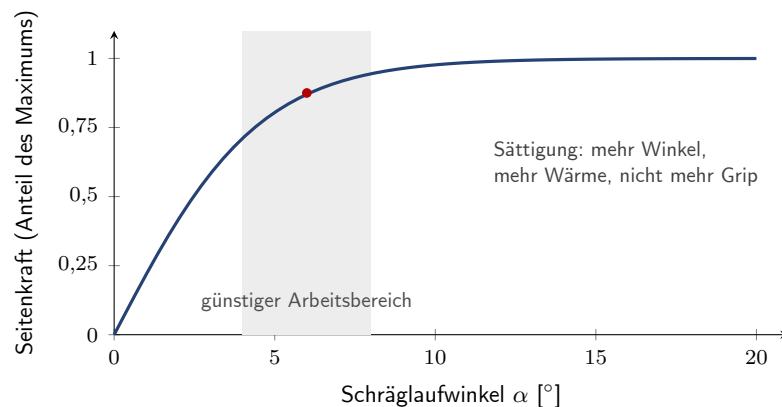


Abbildung 11.2: Querkraft gegen Schräglaufwinkel (schematisch, Kraft auf ihr Maximum normiert). Zunächst nahezu linear — weshalb sich Lenkung präzise anfühlt — dann sättigend um 8–12°. Geübte Fahrer halten den Reifen im schattierten Band; jenseits davon rutscht der Reifen mehr und greift nicht stärker.

11.2 Lastverlagerung, nun seitlich

Kapitel 8 verlagerte Last zwischen vorn und hinten; Lenken verlagert sie zwischen links und rechts, mit derselben Art Formel, wobei die Spurweite an die Stelle des Radstands tritt:

$$\Delta N = \frac{m a_{\text{lat}} h}{t}.$$

Garagenphysik

Auto B in einer Kurve mit $0,8\,g$ ($h = 0,55\,\text{m}$, $t = 1,6\,\text{m}$):

$$\Delta N = \frac{1\,800 \times 7,85 \times 0,55}{1,6} \approx 4\,900\,\text{N}$$

— mehr als ein Viertel des Autogewichts wandert zu den äußeren Rädern, die nun $13\,700\,\text{N}$ tragen, während das innere Paar nur $3\,900\,\text{N}$ behält. Wenn das innere Paar null erreicht, steht das Auto am Rand des Überschlagens; die statische Schwelle ist $a_{\text{lat}} = g t / (2h)$, etwa $1,46\,g$ für Auto B, aber kaum $1,1\,g$ für ein hohes SUV mit $h = 0,75\,\text{m}$ — einer der Gründe, warum SUVs elektrische Stabilitätskontrolle so eifrig mitführen. (Hohe, schmale Fahrzeuge kippen um; niedrige, breite rutschen zuerst. Die Physik bevorzugt das Rutschen.)

Nun die entscheidende Feinheit aus Kapitel 7: Reifengrip wächst *langsamer* als Last (Lastempfindlichkeit). Teilen Sie die Last einer Achse gleichmäßig auf, erzeugt sie maximalen Gesamt-Grip; verlagern Sie Last auf eine Seite, fällt der Gesamt-Grip der Achse — der beladene Reifen gewinnt weniger als der unbeladene verliert. Lenken gibt also zweimal Geld aus: einmal für die Zentripetalkraft, einmal für das Ungleichgewicht. Eine Präzisierung ist hier wichtig: $\Delta N = m a_{\text{lat}} h / t$ gibt die *gesamte* Seitenverlagerung des Fahrzeugs über die Spurweite an; Aufhängungsgeometrie und Vorder-Hinter-Aufteilung der Wanksteifigkeit bestimmen, wie viel davon jede Achse trägt. Und weil Vorder- und Hinterachse die Verlagerung selten gleich aufteilen (verschiedene Federn, Stabilisatoren, Reifengrößen), geht einem Ende zuerst die Puste aus.

11.3 Die Balance: Welches Ende gibt zuerst auf

Abbildung 11.3 zeichnet beide Fehler. *Untersteuern*: Die Vorderachse sättigt zuerst. Das Auto folgt einem weiteren Bogen, als die Lenkung verlangt — „pflügen“. Es fühlt sich sicher an, weil es sicher ist: Die Gier dämpft sich selbst, die Geschwindigkeit baut sich ab, die benötigte Kraft sinkt. Hersteller stimmen Straßenfahrzeuge aus genau diesem Grund auf Untersteuern am Limit ab. *Übersteuern*: Die Hinterachse sättigt zuerst. Das Heck rutscht heraus, das Auto giert *über* den Lenkbefehl hinaus — und hier liegt das Gemeine: Mehr Gier bedeutet einen größeren Schräglaufwinkel hinten, was jenseits des Gipfels noch weniger Heck-Grip bedeutet. Die Situation nährt sich selbst. Sie einzufangen erfordert Gegenlenken (Lenken in den Rutsch), schneller als die Gier aufbaut.

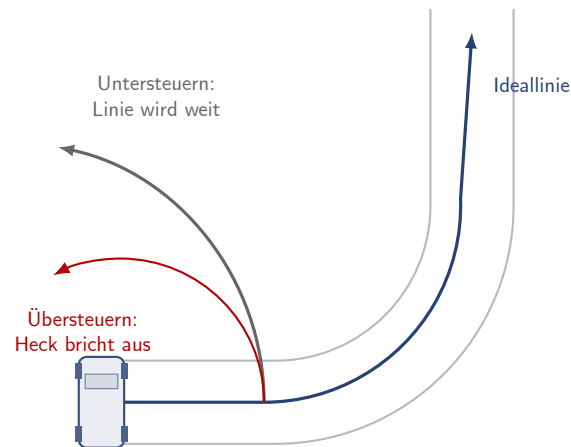


Abbildung 11.3: Drei Wege durch dieselbe Linkskurve. Auf der vorgesehenen Linie folgt das Auto dem Bogen des Fahrers. Bei Untersteuern sättigen die Vorderreifen zuerst: Der Bogen weitet sich, egal wie stark Sie weiter lenken. Bei Übersteuern sättigen die Hinterreifen zuerst: Das Heck tritt heraus und das Auto giert über die Lenkung hinaus — früh erkannt ein Rutschen, spät erkannt ein Dreher.

Zwei alltägliche Auslöser verdienen Erwähnung. *Power-Übersteuern*: In einem heckgetriebenen Auto gibt das Gaspedal einen Teil des Reibungsbudgets der Hinterreifen für den Antrieb aus (Kapitel 7), weniger bleibt zum Lenken — drücken Sie das Pedal mitten in der Kurve, und das Heck tritt heraus. *Lift-off-Übersteuern*: Plötzliches Lupfen mitten in der Kurve verlagert Last nach vorn (Kapitel 8) und schrumpft das Heckbudget genau dann, wenn es vollständig beansprucht ist. Beide Effekte ergeben sich direkt aus der Physik der vorherigen Kapitel.

Streckenrand-Notiz

Trail-Braking — ein wenig Bremskraft mit in die Kurve tragen — spielt den Budgettausch bewusst: Vorderreifen teilen sich Bremsen und Lenken, das Heck bleibt leicht und beweglich, und das Auto dreht. Es ist der Reibungskreis samt Lastverlagerung, choreografiert. ESP tut dasselbe mit den Händen eines Computers: einzelne Räder abbremesen, um Giermomente zu erzeugen, die einen entstehenden Dreher verhindern, etwa zehnmal schneller als jeder Fahrer.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Übersteuern ist eine Krankheit des Heckantriebs.“ **Physik:** Antriebsräder entscheiden, *wo* das Gaspedal das Budget beansprucht, mehr nicht. Ein frontgetriebenes Auto, das mitten in der Kurve abrupt lupft, verlagert Last von seiner Hinterachse und kann genauso eifrig ausbrechen; ein gut abgestimmtes Heckantriebs-Auto untersteuert sanft am Limit. Die Balance wird durch Lasten, Reifen, Federn und Stabilisatoren an jedem Ende gesetzt — die angetriebene Achse schreibt nur eine Zeile in dieses Hauptbuch.

Probieren Sie es gedanklich

Sie fahren schwungvoll in einer Kurve mit gleichmäßigem Gas, vorderes und hinteres Budget beide nahe 100%. Was passiert, wenn Sie in einem heckgetriebenen Auto mehr Gas geben — und warum bleibt die *Vorderachse* gepflanzt? (Die kombinierte Kraft $F_x^2 + F_y^2$ hinten würde μN_r übersteigen; das Budget vorne wird vom Gaspedal nicht berührt. Das Heck rutscht zuerst: Power-Übersteuern.)

11.4 Was das für Autos bedeutet

Sie sprechen jetzt die Sprache der Handling-Tests. „Sicheres, vorhersehbares Untersteuern“ ist eine Abstimmungswahl, kein Naturgesetz; „Rotation beim Einlenken“ ist kontrolliertes Übersteuern; „Snap-Übersteuern“ ist eine Hinterachse, deren Grip jenseits des Schräglauf-Gipfels von einer Klippe fällt. Und die Datenblatt-Einträge, die die Balance prägen — Gewichtsverteilung, Reifenbreite vorn gegen hinten, Stabilisatoren — sind alles Wege zu entscheiden, *welches Ende zuerst aufgibt, und wie höflich*. Mit dem Verständnis des Lenkens wendet sich Teil V der Kraft zu, die am schnellsten von allen wächst: der Luft selbst.

Eine Gleichung zum Merken

$$\Delta N = \frac{m a_{\text{lat}} h}{t}$$

Seitliche Lastverlagerung: Masse mal Kurvenbeschleunigung mal Schwerpunktshöhe, geteilt durch Spurweite. Sie entlastet die inneren Räder, und — durch Lastempfindlichkeit — gibt Grip für das Ungleichgewicht aus. Welches Ende zuerst aufgibt, ist der Charakter des Autos.

11.5 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- Reifen lenken über den Schräglaufwinkel; die Seitenkraft sättigt jenseits 8–12°.
- Lenken verlagert Last nach außen: $\Delta N = m a_{\text{lat}} h / t$; lastempfindliche Reifen verlieren Gesamt-Grip bei ungleichmäßiger Last.
- Vorn sättigt zuerst: Untersteuern — weiter Bogen, selbststabilisierend, die Wahl der Hersteller.
- Hinten sättigt zuerst: Übersteuern — Gier nährt sich selbst; Gegenlenken oder Dreher.
- Gas und Lupfen verschieben die Balance jeweils, über den Reibungskreis und die Lastverlagerung.

Teil V

Geschwindigkeit ändert alles

Überblick Teil V

Bei hoher Geschwindigkeit ist der Hauptgegner nicht mehr die Masse des Autos, sondern die Luft selbst. Kapitel 12 stellt den aerodynamischen Widerstand und sein unbittliches quadratisches Wachstum mit der Geschwindigkeit vor. Kapitel 13 erhöht den Einsatz nochmals: die Leistung, die nötig ist, um Luft beiseite zu schieben, wächst mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit — daher frisst Höchstgeschwindigkeit Pferdestärken. Kapitel 14 zeigt, wie Flügel und Spoiler dieselbe Luftströmung in zusätzlichen Grip verwandeln — zu einem Preis.

Kapitel 12

Luftwiderstand: die unsichtbare Mauer

Halten Sie Ihre Hand bei 100 km/h aus dem Fenster, und die Luft drückt sie spürbar zurück — und das ist nur eine Hand, vielleicht $0,01 \text{ m}^2$. Das Auto bietet zweihundert Mal diese Fläche. Luft fühlt sich bei Schrittgeschwindigkeit nach nichts an und bei Tempo wie eine Mauer; diesen Wandel zu verstehen — und seine rücksichtslose Mathematik — erklärt, warum Autos wie Tränen geformt sind, warum die Tankanzeige auf der Autobahn so viel schneller fällt und warum die Höchstgeschwindigkeit die teuerste Zahl auf dem Datenblatt ist.

Die Frage

Warum wächst der Luftwiderstand so brutal mit der Geschwindigkeit?

Symbole auf einen Blick

ρ (rho) Luftdichte [kg/m^3 , etwa 1,2 auf Meeresniveau]; c_d Luftwiderstandsbeiwert, dimensionslos; A Stirnfläche [m^2]; F_D aerodynamischer Widerstand [N]; f_{rr} Rollwiderstandsbeiwert, dimensionslos ($\approx 0,01$ für Autoreifen).

Auf einen Blick

Der Luftwiderstand gehorcht $F_D = \frac{1}{2} \rho c_d A v^2$: Die Kraft wächst mit dem *Quadrat* der Geschwindigkeit, also wächst die *Leistung*, ihn zu überwinden, mit der *dritten Potenz*. Der Rollwiderstand, grob konstant bei $f_{rr} mg$, dominiert unterhalb $\sim 80 \text{ km/h}$; darüber regiert die Luft.

12.1 Die Luft hat Masse

Luft ist nicht nichts: Ein Kubikmeter wiegt etwa 1,2 kg. Ein fahrendes Auto muss ständig Luft beiseite schieben — einem Strom von Luft Impuls und kinetische Energie verleihen — und gemäß Newtons drittem Gesetz drückt sie zurück. Das Ergebnis wird von der Widerstandsgleichung erfasst:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho c_d A v^2.$$

Warum das Quadrat? Weil die Geschwindigkeit zweimal zuschlägt: Ein schnelleres Auto trifft *mehr Luft pro Sekunde*, und es muss *jedes* Luftpaket *härter* stoßen. Mehr Luft, härter gestoßen: $v \times v$. (Sie sind diesem Quadrat in der kinetischen Energie begegnet, Kapitel 3; es ist dieselbe Physik in einem anderen Mantel.)

Zwei autoabhängige Faktoren stehen in der Mitte. Die *Stirnfläche* A ist die Fläche, die das Auto von vorn betrachtet bietet — etwa $2,2 \text{ m}^2$ für eine Limousine. Der *Luftwiderstandsbeiwert* c_d misst, wie leicht die Form durch die Luft gleitet: Ein Backstein liegt nahe 1; kastige Klassiker

bei 0,4–0,5; moderne Limousinen bei 0,25–0,30; die windschnittigsten EVs bei etwa 0,20. Ihr Produkt $c_d A$ — die „Widerstandsfläche“ — ist die entscheidende Größe.

12.2 Zwei Fahrwiderstände, ein Übergang

Luft ist nicht der einzige Widerstand. Reifen verformen sich beim Rollen, und diese Verformung frisst eine ungefähr konstante Kraft, $F_{rr} = f_{rr} mg$ — etwa 177 N für Auto B. Abbildung 12.1 zeichnet beide Lasten: die flache Rollwiderstands-Linie und die steigende Widerstands-Parabel, die sich nahe 80 km/h kreuzen. Stadtfahren ist meist ein Kampf gegen die Reifen; Autobahnfahren ist ein Kampf gegen die Luft.

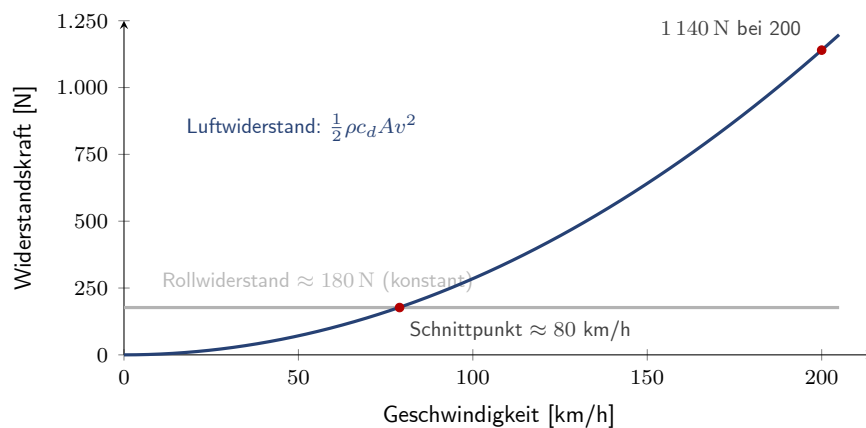


Abbildung 12.1: Die beiden Fahrwiderstände von Auto B. Der Rollwiderstand ist nahezu konstant; der Luftwiderstand wächst mit v^2 und überholt ihn um 80 km/h. Unterhalb dieser Geschwindigkeit dominieren die Rollverluste der Reifen die Kraftstoffrechnung; oberhalb davon hat die Luft vollständig übernommen.

Garagenphysik

Auto B ($c_d = 0,28$, $A = 2,2 \text{ m}^2$, also $c_d A \approx 0,616 \text{ m}^2$):

- Bei 50 km/h: $F_D = \frac{1}{2} \times 1,2 \times 0,616 \times 13,9^2 \approx 71 \text{ N}$ — weniger als die Hälfte des Rollwiderstands. Zählt kaum.
- Bei 100 km/h: $\approx 285 \text{ N}$ — bereits 60% mehr als der Rollwiderstand.
- Bei 200 km/h: $\approx 1\,140 \text{ N}$ — über sechsmal der Rollwiderstand. Die unsichtbare Mauer.

12.3 Die dritte Potenz: Warum Geschwindigkeit Leistung verschlingt

Kraft ist nur die halbe Geschichte. Die *Leistung*, die nötig ist, um eine Geschwindigkeit zu halten, ist Kraft mal Geschwindigkeit (Kapitel 4), also wächst die aerodynamische Leistungsrechnung mit $v^2 \times v = v^3$. Abbildung 12.2 zeichnet die Gesamtsumme für Auto B: 13 kW reichen bei 100 km/h, aber 200 km/h brauchen 73 kW und 300 km/h brauchen 229 kW. *Die Hälfte mehr Geschwindigkeit, mehr als dreimal so viel Leistung.* Diese Würfel-Mauer ist die einzelne wichtigste Kurve im Schnellfahren.

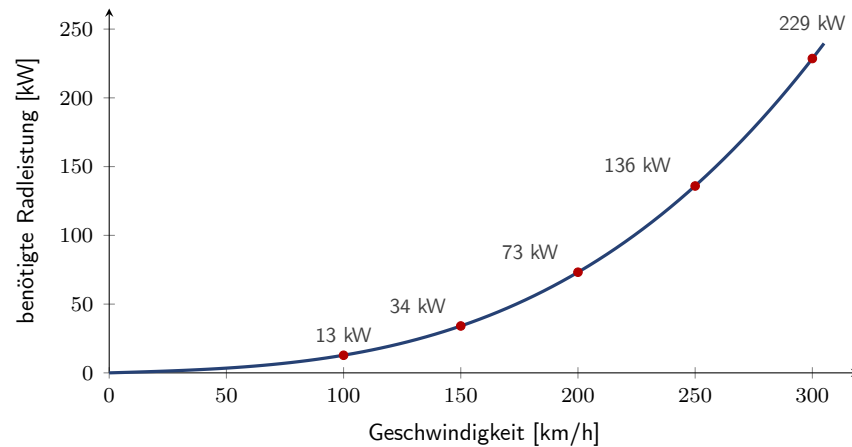


Abbildung 12.2: Die Leistung, die nötig ist, um Auto B durch die Luft und entlang der Straße zu schieben, an den Rädern. Weil der Widerstand mit v^2 wächst und Leistung Kraft mal Geschwindigkeit ist, wächst der Bedarf mit v^3 : 200 km/h verlangen 73 kW, aber 300 km/h verlangen 229 kW — 50% mehr Geschwindigkeit, mehr als dreimal so viel Leistung. Wo diese Kurve die verfügbare Leistung eines Motors kreuzt, liegt die Höchstgeschwindigkeit: Kapitel 13.

Geschwindigkeit ändert alles

Die dritte Potenz bestraft Optimismus überall. 10% schneller fahren? $1,1^3 = 33\%$ mehr Leistung zahlen — und pro Kilometer etwa 20% mehr Kraftstoff. Das ist der Grund, warum der Unterschied zwischen 130 und 160 km/h an der Zapfsäule so sichtbar ist und warum die EV-Reichweite bei Autobahntempo einbricht.

Kapitel 13

Warum Höchstgeschwindigkeit Pferdestärken verschlingt

„Wie schnell fährt es?“ ist die Frage, die Nicht-Enthusiasten zuerst stellen und Ingenieure zuletzt beantworten. Höchstgeschwindigkeit ist kein Merkmal, das ein Auto *hat*; sie ist das Ergebnis eines Tauziehens zwischen allem, was antreibt, und allem, was widersteht — ausgefochten am Gipfel der Würfelmauer aus Kapitel 12. Dieses Kapitel verfolgt diesen Kampf und erklärt, warum das Ergebnis Pferdestärken überproportional verschlingt.

Die Frage

Was setzt tatsächlich die Höchstgeschwindigkeit eines Autos?

Symbole auf einen Blick

$v_{\max}$ Höchstgeschwindigkeit [m/s, km/h]; P_{avail} verfügbare Leistung an den Rädern [kW];
 $c_d A$ Widerstandsfläche [m²]; f_{rr} Rollwiderstandsbeiwert.

Auf einen Blick

Die Höchstgeschwindigkeit liegt dort, wo die *benötigte* Leistung — $\frac{1}{2}\rho c_d A v^3 + f_{rr} m g v$ — gleich der *verfügbaren* Leistung an den Rädern ist. Da der Bedarf kubisch in v ist, wird mehr Höchstgeschwindigkeit pro Verdopplung dreimal teurer; und weil das Getriebe das Leistungsmaximum des Motors bei dieser Geschwindigkeit treffen muss, kann das Getriebe $v_{\max}$ auch dann senken, wenn die Physik mehr erlauben würde.

13.1 Das Tauziehen

Beschleunigen Sie sanft, und das Kräftegleichgewicht aus Kapitel 2 verrichtet seine Arbeit. Aber wenn die Geschwindigkeit wächst, verdoppelt sich der Widerstands- v^2 ständig, während die verfügbare Kraft des Antriebs $F = P/v$ (Kapitel 4) ständig *sinkt*. Das Ende kommt dort, wo sich beide treffen:

$$\underbrace{\frac{1}{2}\rho c_d A v^3 + f_{rr} m g v}_{\text{benötigte Leistung}} = \underbrace{P_{\text{avail}}}_{\text{Radleistung}} .$$

Abbildung 13.1 zeichnet den Kampf für alle drei Flottenautos. Die Bedarfskurven steigen kubisch; die verfügbare Leistung (Spitzenmotorleistung minus etwa 12 % Antriebsverlust — 10 % für das EV) liegt flach. Der Schnittpunkt ist die Höchstgeschwindigkeit.

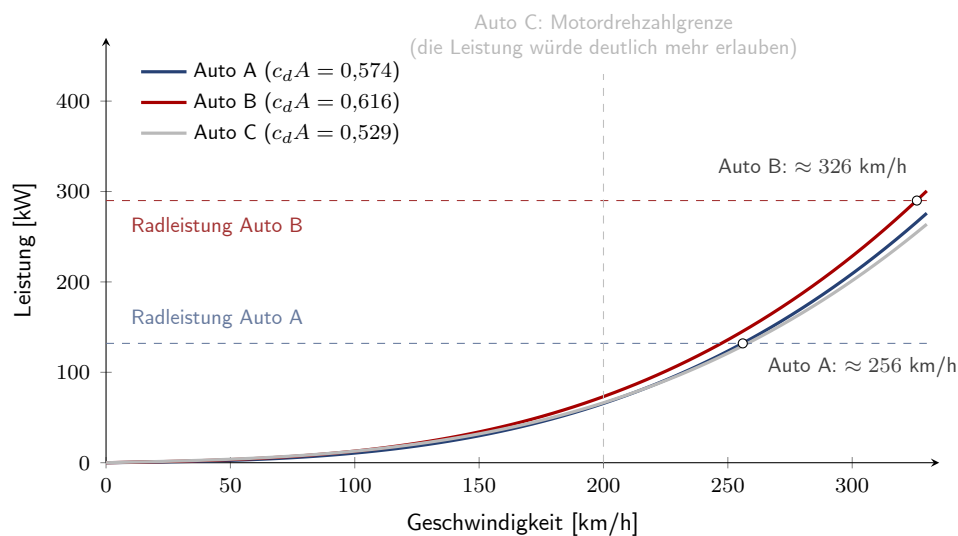


Abbildung 13.1: Die Höchstgeschwindigkeit ist ein Schnittpunkt. Die durchgezogenen Kurven geben die Leistung, die jedes Flottenauto an den Rädern braucht (Kapitel 12); die gestrichelten Linien geben, was der Antriebsstrang liefert (Spitzenleistung minus Verluste). Wo sie sich treffen, endet die Beschleunigung. Auto C zeigt die elektrische Wendung: Sein einziger Gang geht bei rund 200 km/h aus den Drehzahlen, weit unter dem, was seine 450 kW durch die Luft drücken könnten.

Garagenphysik

Die Schnittpunkte: Auto A (150 kW, $c_dA = 0,574 \text{ m}^2$) balanciert bei etwa 256 km/h; Auto B (330 kW, $c_dA = 0,616 \text{ m}^2$) bei etwa 326 km/h. Beachten Sie den Stachel: Auto B hat 120 % mehr Leistung als Auto A und fährt nur 27 % schneller. Kubikwurzeln sind so: $v_{\max} \propto P^{1/3}$. Um *doppelt* so schnell zu fahren, brauchen Sie ungefähr *achtmal* so viel Leistung — die Aerodynamik erlaubt es.

13.2 Warum die letzten Kilometer am meisten kosten

Die dritte Potenz konzentriert ihre Grausamkeit am Gipfel. Abbildung 13.2 zeigt den Bedarf von Auto B bei drei Geschwindigkeiten: 73 kW bei 200, 136 kW bei 250 und 251 kW bei 310 km/h. Jeder zusätzliche km/h bei hoher Geschwindigkeit kostet mehrere Kilowatt; die Lieblingszahl des Marketings frisst Kilowatt um Kilowatt, zu einem steigenden Preis. Das ist der Grund, warum Autos jenseits der 300 oft vor allem Ingenieurstatements sind — und warum das Entfernen eines Limiters oder das Hinzufügen von 10 kW nichts ändert, was Sie bemerken würden.

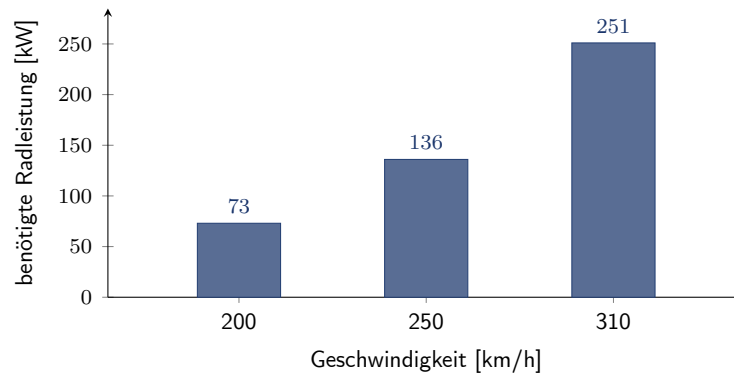


Abbildung 13.2: Der Radleistungsbedarf von Auto B bei 200, 250 und 310 km/h. Der Schritt von 250 auf 310 — ein Geschwindigkeitsgewinn von 24% — kostet einen Leistungsgewinn von 85%. Deshalb ist „wie schnell fährt es?“ die teuerste Zeile auf dem Datenblatt.

Was Sie spüren

Fahren Sie ein Auto auf seine Höchstgeschwindigkeit zu, und die Ankunft verlangsamt sich zu einem Kriechen: 250 kommt willig, 270 braucht eine Gerade, 285 braucht Geduld und ein leichtes Gefälle. Sie spüren, wie die Kraftkurven konvergieren — die verfügbare Kraft P/v sackt zur Widerstands-Parabel hin ab, bis nur noch Zentimeter Tageslicht zwischen ihnen bleiben. Die Beschleunigung hört nicht auf; sie verdunstet.

13.3 Das Getriebe: der Türsteher

Das physikalische Gleichgewicht ist nötig, aber nicht hinreichend — die *Gänge* müssen die Leistung auch übertragen können. Die Höchstgeschwindigkeit kann nur erreicht werden, wenn ein Gang den Leistungsbereich des Motors bei $v_{\max}$ nutzbar macht (Kapitel 5); ein langer „Spar“-Höchstgang kann die Widerstandskurve schneiden, bevor der Motor sein Leistungsmaximum erreicht, und das Auto gibt früh auf. Viele Autos sind deshalb im zweithöchsten Gang am schnellsten. Elektronische Begrenzer fügen eine weitere Schicht hinzu (250 km/h ist eine bekannte freiwillige Grenze). Und Auto C illustriert die elektrische Version dieses Problems: Bei einem einzigen festen Übersetzungsverhältnis erreicht sein Motor nahe 200 km/h die maximale Drehzahl — wie Abbildung 13.1 zeigt, würden seine 450 kW viel mehr erlauben, aber es gibt keinen weiteren Gang. (Deshalb haben manche EVs Zwei-Gang-Getriebe.)

Mythos vs. Physik

Mythos: „Höchstgeschwindigkeit dreht sich nur um Pferdestärken.“ **Physik:** Die benötigte Leistung ist $\frac{1}{2}\rho c_d A v^3$: 10% weniger Widerstandsfläche und derselbe Motor erreichen etwa 3,4% mehr Geschwindigkeit — äquivalent zu 10% mehr Leistung, aber permanent, ohne Mehrverbrauch und bei jeder Geschwindigkeit wirksam. Le-Mans-Prototypen und Solarrennwagen werden von dieser Identität geformt: Leistung steigert Geschwindigkeit nach dem Würfelgesetz; Stromlinienform tut es im großen Stil.

Probieren Sie es gedanklich

Zwei Autos haben denselben Motor. Eines ist ein windschnittiges Coupé ($c_d A = 0,60 \text{ m}^2$), eines ein kastiges SUV ($c_d A = 0,90 \text{ m}^2$). Ungefähr wie viel schneller ist das Coupé am oberen Ende? (Der Bedarf skaliert mit $c_d A$, also skaliert $v_{\max}$ mit $(c_d A)^{-1/3}$: Das Coupé gewinnt $(0,90/0,60)^{1/3} \approx 1,14$ — etwa 14%. Wenn das SUV 230 km/h erreicht, kommt das Coupé auf ≈ 263 .)

Streckenrand-Notiz

In Le Mans trimmen die Teams Flügel zurück, um auf den langen Geraden Widerstand zu sparen, und akzeptieren weniger Abtrieb in den Kurven; in Monaco schrauben sie alles steiler. Dieselben Autos, gegensätzliche Entscheidungen — weil der Widerstand-Abtrieb-Handel (Kapitel 14) kein Gratisessen kennt, nur das passende Menü für jede Strecke.

13.4 Was das für Autos bedeutet

Die Höchstgeschwindigkeit ist das Ergebnis von vier Faktoren: Leistung (Teil II), Getriebe (Kapitel 5), Widerstandsfläche (Kapitel 12) und — bei EVs — Drehzahlgrenzen des Motors (Kapitel 6). Lesen Sie ein Datenblatt entsprechend: Die Leistung sagt Ihnen das *Potenzial*, c_d und Stirnfläche sagen Ihnen den *Preis*, und die Übersetzungstabelle zeigt, ob das Auto dieses Potenzial auch nutzen kann. Als Nächstes geht es um die andere Aufgabe der Luft: nicht dem Auto zu widerstehen, sondern es auf die Straße zu drücken.

Eine Gleichung zum Merken

$$\frac{1}{2} \rho c_d A v_{\max}^3 + f_{rr} m g v_{\max} = P_{\text{avail}}$$

Die Höchstgeschwindigkeit ist die Wurzel dieser Gleichung: kubische Aerodynamik plus Rollwiderstand gleich Radleistung. Mehr Leistung hilft wie eine Kubikwurzel; weniger Widerstand hilft genauso und spart dabei Kraftstoff.

13.5 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- $v_{\max}$ ist dort, wo benötigte Leistung (kubisch in v) verfügbare Radleistung trifft.
- Doppelte Höchstgeschwindigkeit braucht ungefähr achtfache Leistung; 250 $\rightarrow$ 310 km/h kostet Auto B +85%.
- Das Getriebe muss den Leistungsbereich bei $v_{\max}$ nutzbar machen; Spargänge und Begrenzer können die Höchstgeschwindigkeit senken.
- Ein-Gang-EVs sind oft drehzahl-begrenzt weit unter ihrem aerodynamischen Potenzial.
- Widerstandsreduktion ist so gut wie Leistung für die Höchstgeschwindigkeit — und besser überall sonst.

Kapitel 14

Abtrieb, Auftrieb und Hochgeschwindigkeitsstabilität

Halten Sie Ihre Hand bei Autobahngeschwindigkeit flach aus dem Fenster und kippen Sie sie leicht. Ihre Hand wird zurückgestoßen — und, je nach Winkel, nach oben oder unten gedrückt. Ihre Hand ist gerade ein Flügel geworden, und die Kraft, die Sie spüren, ist dieselbe Physik, die einen Rennwagen auf die Straße presst. Ein Flügel ist nichts weiter als eine durchdachte, verfeinerte Version dieser gekippten Hand — und er kann einem Auto mehr Grip geben, ohne ein einziges Kilogramm auf die Waage zu legen, vorausgesetzt, das Auto bewegt sich.

Die Frage

Warum helfen Flügel in Kurven, aber schaden auf Geraden?

Symbole auf einen Blick

F_L aerodynamischer Auftrieb/Abtrieb [N]; c_L Auftriebsbeiwert (Vorzeichen durch Konvention gesetzt); A Referenzfläche [m²]; ρ Luftdichte [kg/m³]; v Geschwindigkeit [m/s].

Auf einen Blick

Ein Flügel lenkt Luft nach unten und erhält einen gleich großen, entgegengesetzten Druck auf das Auto: Abtrieb. Er gehorcht $F_L = \frac{1}{2}\rho c_L A v^2$ — null im Stand, ernst zu nehmen erst bei Geschwindigkeit. Abtrieb erhöht die Normallast auf den Reifen, was deren Grip-Limit erhöht, also steigen die Kurvengeschwindigkeiten. Aber Luft umzulenken kostet Energie: zusätzlicher Widerstand ist die Rechnung, und auf den Geraden wird diese Rechnung fällig.

14.1 Luft nach unten drücken

Flügel werden üblicherweise mit gekrümmten Oberflächen und schneller strömender Luft erklärt. Dieses Bild ist nicht falsch, aber es verbirgt das Wesentliche. Das Wesentliche ist Impuls (Kapitel 3): Ein Flügel nimmt Luft, die sich horizontal bewegt, und schickt sie mit einer Abwärtskomponente weg. Luft, die mit Abwärtsanteil abströmt, wurde nach unten gedrückt — also drückt die Luft gemäß Newtons drittem Gesetz auf den Flügel zurück, nach oben für ein Flugzeug, nach unten für den umgekehrten Flügel eines Autos. Abbildung 14.1 zeigt den Austausch.

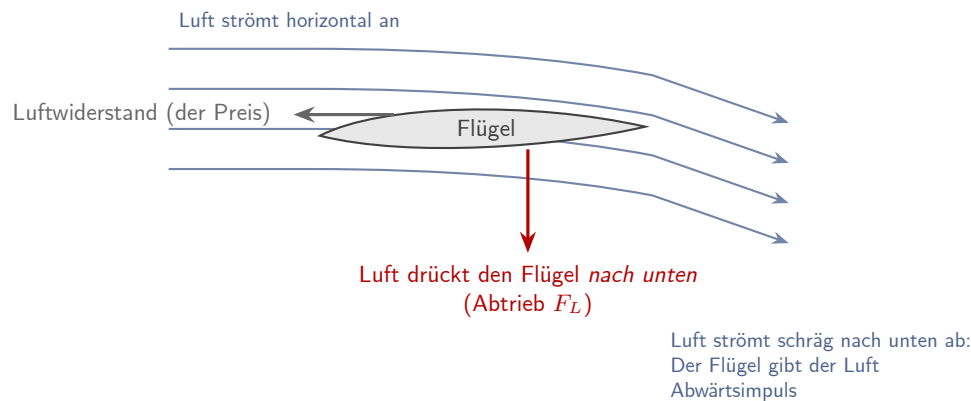


Abbildung 14.1: Abtrieb ist Impulsaustausch, invertiert. Ein Flügel lenkt den vorbeiströmenden Luftstrom nach unten ab — die Luft verlässt ihn mit Abwärtsimpuls, den sie zuvor nicht hatte. Gemäß Newtons drittem Gesetz (Kapitel 2) drückt die Luft den Flügel entgegengesetzt: nach unten auf das Auto. Luft abzulenken kostet ebenfalls Energie, was das Auto als zusätzlichen Widerstand spürt — Abtrieb ist nicht kostenlos.

Deshalb fühlt sich Abtrieb wie Schummeln an: Es ist eine kontaktfreie Kraft. Es wurde kein Gewicht hinzugefügt; nichts auf der Waage änderte sich; und dennoch werden die Reifen stärker auf die Straße gedrückt. Und er ist auch nicht *kostenlos*. Der Luft ständig einen Abwärtsimpuls zu geben, kostet Energie, und das Auto zahlt dafür mit Widerstand. Jeder Rennflügel bewegt sich im Zielkonflikt zwischen zusätzlichem Grip und geopferter Geschwindigkeit.

14.2 Wachsen mit dem Quadrat

Abtrieb gehorcht demselben v^2 -Gesetz wie der Widerstand (Kapitel 12):

$$F_L = \frac{1}{2} \rho c_L A v^2.$$

Alles aus Kapitel 12 über das Quadrat gilt hier, mit einer Umkehrung: Widerstand ist der Feind, der mit v^2 wächst, Abtrieb ist der Verbündete, der mit v^2 wächst. Bei 50 km/h produziert selbst ein großer Flügel kaum mehr als einen Rundungsfehler; bei 200 km/h produziert er das Sechzehnfache. Abbildung 14.2 zeigt drei Aerodynamik-Pakete: einen Straßen-Sportwagen mit dezentem Spoiler, einen GT-Rennwagen und einen Formelwagen.

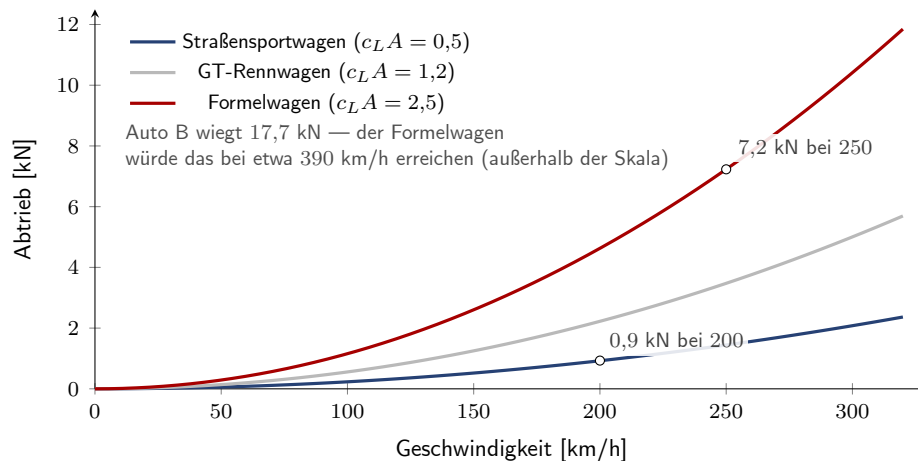


Abbildung 14.2: Abtrieb gegen Geschwindigkeit für drei Aerodynamik-Pakete. Wie der Widerstand gehorcht Abtrieb $F_L = \frac{1}{2}\rho c_L A v^2$: im Stand ist er null, bei Stadtgeschwindigkeit ein Rundungsfehler, und erst jenseits etwa 150 km/h wird er zu einer Kraft, die es wert ist, engineeringmäßig behandelt zu werden. Bei 250 km/h drücken die Flügel des Formelwagens ihn mit rund 7 kN nach unten — wie ein kleines Auto auf dem Dach geparkt.

Zwei Konsequenzen folgen. Erstens, Flügel sind bei den Geschwindigkeiten, bei denen die meisten Straßenfahrten stattfinden, *irrelevant* — ein Spoiler an einem Stadtauto ist Schmuck, nicht Ingenieurskunst. Zweitens, aerodynamischer Grip kommt genau dort an, wo gewöhnlicher Grip am meisten vermisst wird: in den schnellen Kurven, in denen v^2/r am meisten von den Reifen verlangt (Kapitel 10). Die Physik liefert genau dann Hilfe, wenn der Einsatz am höchsten ist — wenn Sie schnell genug sind, um sie zu bezahlen.

14.3 Last in Kurvengeschwindigkeit verwandeln

Grip skaliert mit Last (Kapitel 7): Ein mit Kraft N auf die Straße gedrückter Reifen kann bis zu μN seitlich liefern. Abtrieb erhöht N *ohne* die Masse m zu erhöhen, mit der die mv^2/r -Anforderung der Kurve skaliert — und diese Asymmetrie ist das ganze Spiel. Die Kurvengrenze aus Kapitel 10 wird zu

$$v_{\max} = \sqrt{\mu r \left(g + \frac{F_L}{m} \right)}.$$

Eine Modellierungsanmerkung: Behandeln Sie F_L hier als den Abtrieb, der *bei der betrachteten Geschwindigkeit* verfügbar ist. Eine vollständige aerodynamische Rechnung setzt $F_L(v) = \frac{1}{2}\rho c_L A v^2$ ein und macht die Kurvengeschwindigkeitsgleichung selbstkonsistent statt einstufig — die qualitative Schlussfolgerung ändert sich nicht. Abbildung 14.3 wendet es auf Auto B in der vertrauten 50 m-Kurve an: Ohne Abtrieb liegt die Grenze bei 76 km/h; mit 5 kN, die nach unten drücken — was ein ernsthafter Flügel bei solchen Geschwindigkeiten erzeugt — steigt sie auf 86 km/h; mit 10 kN auf 95 km/h.

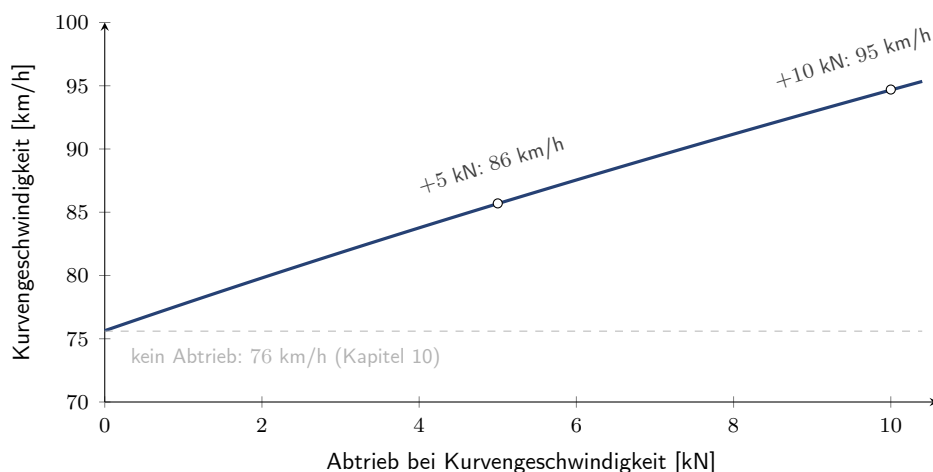


Abbildung 14.3: Kurvengeschwindigkeit von Auto B durch die vertraute 50 m-Kurve aus Kapitel 10, als Funktion des aerodynamischen Abtriebs, der auf die Reifen drückt. Grip skaliert mit der Reifenlast, und Abtrieb fügt Last hinzu, ohne Masse zum Beschleunigen: $v_{\max} = \sqrt{\mu r (g + F_L/m)}$. Reale Flügel lassen F_L mit v^2 wachsen, also verstärken sich die wahren Gewinne mit der Geschwindigkeit — weshalb Aerodynamik in schnellen Kurven am wichtigsten ist.

Garagenphysik

Bauen Sie ein GT-Paket ($c_L A = 1,2$) an Auto B und rechnen Sie bei 250 km/h: $F_L = \frac{1}{2} \times 1,2 \times 1,2 \times 69,4^2 \approx 3470$ N Abtrieb. In der 50 m-Kurve, wenn die Aerodynamik auch nur 2 kN bei der Kurvengeschwindigkeit hält: $v = \sqrt{0,9 \times 50 \times (9,81 + 2000/1800)} \approx 80$ km/h statt 76. Vier km/h klingt wenig — bis Sie sich erinnern, dass sich die Geschwindigkeit beim Kurvenausgang über die gesamte folgende Gerade verstärkt.

Eine ehrliche Einschränkung: Reale Reifen sind *lastempfindlich*. Doppelte Last, und der Grip wächst, aber nicht ganz doppelt so stark — der Koeffizient μ sackt leicht ab, wenn der Reifen härter arbeiten muss. Abtrieb gewinnt trotzdem klar (der Massenterm bleibt unangetastet), aber die letzten paar Prozent theoretischen Gewinns verdunsten in der Kontaktfläche. Das ist ein Grund, warum Renningenieure messen statt annehmen.

14.4 Balance: Wo die Kraft landet, ist entscheidend

Eine einzelne Abtriebszahl ist nicht genug; *wo* sie ansetzt, entscheidet über das Verhalten des Autos. Abtrieb wirkt am aerodynamischen *Druckmittelpunkt*, und seine Position relativ zum Schwerpunkt setzt die *Aero-Balance* — den Anteil des Gesamtabtriebs, den die Vorderachse gegenüber der Hinterachse trägt. Verlagern Sie die Balance nach vorn, gewinnen die Vorderreifen im Verhältnis zu den hinteren: Das Auto lenkt eifriger ein und tendiert zum Übersteuern (Kapitel 11). Verlagern Sie sie nach hinten, wird das Heck stabiler und das Auto tendiert zum Untersteuern. Rennteams stimmen Flügel, Splitter und Diffusoren so ab, dass diese Balance einige Prozent hinter der statischen Gewichtsverteilung liegt — nahe genug, um neutral zu bleiben, gerade weit genug verschoben, um stabil zu sein.

Auftrieb ist dieselbe Physik mit umgekehrtem Vorzeichen, und gewöhnliche Straßenaautos erzeugen reichlich davon: Eine typische Limousinenkarosserie erzeugt bei Autobahngeschwindigkeit einige hundert Newton *Auftrieb*. Deshalb kann sich ein unverändertes Auto in schnellen Kurven leicht und nervös anfühlen — die Reifen werden buchstäblich entlastet. Selbst bescheidene Spoiler, die oft nur den Auftrieb aufheben statt echten Abtrieb zu erzeugen, verändern daher die Hochgeschwindigkeitsstabilität.

Was Sie spüren

In einem Auto mit echter Aerodynamik gibt Ihnen das Lenkrad das Quadratgesetz direkt. Dieselbe Kurve, die sich bei 120 unsicher anfühlt, wirkt bei 180 wie festgeklebt — die Lenkung wird schwerer, das Fahrwerk ruhiger, und der Grip scheint aus dem Nichts zu kommen. Sie spüren, wie sich die Normallast der Reifen erhöht, während die Masse des Autos genau gleich bleibt.

14.5 Der Preis auf der Geraden

Am Tauziehen aus Kapitel 13 hat sich nichts geändert. Ein Flügel, der 5 kN Abtrieb mit einem Auftriebs-Widerstands-Verhältnis von 3 erzeugt, fügt etwa 1,7 kN Widerstand hinzu; bei 250 km/h erfordert dieser Widerstand rund 115 kW Motorleistung — ein Drittel der Leistung von Auto B, nur um den Flügel in seinem Arbeitsbereich zu halten. Der Kurvengewinn wird jedes Mal mit Höchstgeschwindigkeit bezahlt. Daher der sichtbare Kompromiss im Motorsport: schmale Flügel dort, wo die Geraden lang sind, und große Flügel dort, wo die Kurven eng sind. Aktive Aerodynamik — Flügel, die sich auf der Geraden flach anlegen und sich für die Kurve aufrichten — versucht schlicht, diesen Zielkonflikt während der Runde zu entschärfen.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Abtrieb ist kostenloser Grip.“ **Physik:** Abtrieb bringt zusätzlichen Grip, aber nicht ohne Gegenleistung. Der Flügel erzeugt für jedes Newton Abtrieb auch Widerstand, der Motor muss diesen Widerstand mit Leistung überwinden, und das Würfelgesetz aus Kapitel 13 stellt die Rechnung aus. Wie hoch der Preis ist, variiert stark mit Vorrichtung und Betriebspunkt — Flügelstreckung, Bodeneffekt, Diffusorbeitrag —. Gute Aerodynamik ist daher die Kunst, möglichst viel nützliche Last für möglichst wenig Widerstand zu erzeugen. Die richtige Aussage ist besser als der Mythos: Abtrieb ist Grip gegen Leistung — und in Kurven ist Grip meist mehr wert als Leistung.

Probieren Sie es gedanklich

Ihre Limousine ($m = 1500$ kg, Kurve $r = 80$ m, $\mu = 0,9$) erhält einen Flügel, der 1 kN Abtrieb bei Kurvengeschwindigkeit erzeugt. Wie weit bewegt sich die Grenze? (Von $\sqrt{0,9 \times 80 \times 9,81} \approx 95$ km/h zu $\sqrt{0,9 \times 80 \times (9,81 + 1000/1500)} \approx 98$ km/h. Drei km/h umsonst — abgesehen von der Widerstandsrechnung auf den Geraden.)

Streckenrand-Notiz

Die berühmte Behauptung, ein Formelwagen könne „verkehrt herum durch einen Tunnel fahren“, ist eine wörtliche Anwendung von Abbildung 14.2 auf das richtige Auto: Ein moderner Formelwagen wiegt nur etwa 7,9 kN ($m \approx 800$ kg), und mit seinem Unterboden erreicht sein Gesamt- $c_L A$ ungefähr 4 — also gleicht der Abtrieb das Gewicht nahe 200 km/h aus und übersteigt es bei höherem Tempo deutlich. (Die rote Kurve der Abbildung, die nur die Flügel eines Autos mit dem Gewicht von Auto B vergleicht, bräuchte etwa 390 km/h; das geringere Gewicht und der Unterboden des Rennwagens schließen den Großteil dieser Lücke.) Es wurde nie versucht — Tunnel mit Decken, die für Rennwagenlasten ausgelegt sind, sind selten — aber die Rechnung ist solide und veranschaulicht im Motorsport besonders klar, dass Abtrieb eine reale Kraft und keine Metapher ist.

14.6 Was das für Autos bedeutet

Straßenwagen-Aerodynamik ist meistens *Auftriebsmanagement*: flache Böden, sorgfältige Unterbodenströmung, kleine Spoiler und aktive Kühlerarbeit zielen darauf ab, die Reifenlast bei Geschwindigkeit nicht verdampfen zu lassen, bei möglichst geringem Widerstand. Wenn ein Datenblatt das nächste Mal mit Abtrieb prahlt, stellen Sie die zwei physikalischen Fragen: *bei welcher Geschwindigkeit* (das Quadratgesetz macht große Zahlen billig) und *bei welchem Widerstand* (der Handel ist universell). Als Nächstes: die Hardware, die die Reifen auf die Straße drückt, wenn die Straße selbst zurückschlägt — Federn und Dämpfer.

Eine Gleichung zum Merken

$$F_L = \frac{1}{2} \rho c_L A v^2$$

Abtrieb ist die Widerstandsgleichung, sinnvoll zweckentfremdet: Nach unten gelenkte Luft drückt das Auto auf die Straße, erhöht Reifenlast und Kurvengriff, während ihr Geschwindigkeitsterm in Kapitel 12 den Preis auf jeder Geraden erhöht.

14.7 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- Ein Flügel lenkt Luft nach unten; Newtons drittes Gesetz drückt das Auto im Gegenzug herunter.
- Abtrieb wächst mit v^2 : vernachlässigbar in der Stadt, entscheidend in schnellen Kurven.
- Er erhöht die Reifenlast ohne die Masse zu erhöhen, also steigt die Kurvengrenze — abzüglich eines kleinen Verlusts durch die Lastempfindlichkeit.
- Die Aero-Balance (vorn gegen hinten) stimmt Untersteuern und Übersteuern bei Geschwindigkeit ab.
- Abtrieb kostet Widerstand; das Verhältnis variiert mit der Vorrichtung — gute Aero maximiert Last pro Einheit Widerstand.

Teil VI

Das Auto beherrschbar machen

Überblick Teil VI

Zwischen Straße und Fahrer sitzt eine Maschine, die Unebenheiten aufnehmen, die Karosseriebewegung kontrollieren und die Reifen in Kontakt mit dem Boden halten muss. Kapitel 15 erklärt, warum ein Auto sowohl Federn als auch Dämpfer braucht und warum härter nicht automatisch besser ist. Kapitel 16 betrachtet Masse, die sich dreht — Räder, Reifen, Bremsen — und fragt, ob ein Kilogramm am Rand wirklich dasselbe ist wie ein Kilogramm im Sitz.

Kapitel 15

Fahrwerk: Federn, Dämpfer und die Kunst, nicht ewig zu schaukeln

Lassen Sie eine Stahlkugel auf den Boden fallen, und sie springt. Lassen Sie sie in ein Honigglas fallen, und sie bleibt sofort liegen. Das Fahrwerk eines Autos ist die bewusste Kombination dieser beiden Verhaltensweisen: eine Feder, die springt, und ein Dämpfer, der das Springen stoppt. Eine Feder ohne Dämpfer würde jede Bodenwelle viel zu lange in Erinnerung behalten; ein Dämpfer ohne Feder wäre ein starrer Karren mit aufwendiger Begründung.

Die Frage

Warum braucht ein Auto sowohl eine Feder als auch einen Dämpfer?

Symbole auf einen Blick

F Federkraft [N]; k Federrate [N/m]; x Verschiebung [m]; f_n Eigenfrequenz [Hz]; ζ Dämpfungsverhältnis [-].

Auf einen Blick

Die Feder trägt das Gewicht des Autos, nimmt Stöße auf und speichert dabei Energie, wenn sie einfedert ($F = -kx$). Der Dämpfer wandelt diese Energie in Wärme um, sodass die gespeicherte Bewegungsenergie schnell verschwindet, statt lange nachzuschwingen. Zusammen verfolgen sie zwei miteinander konkurrierende Ziele: die Reifen auf die Straße zu drücken (Grip) und die Karosserie ruhig zu halten (Komfort). Steifigkeit und Dämpfung sind die Stellschrauben; jedes Auto ist ein Kompromiss.

15.1 Was die Feder tut

Nehmen Sie eine Ecke eines Autos bis zur Physik auseinander, und Sie erhalten Abbildung 15.1: eine schwere *gefederte* Masse (die Karosserie), die auf einer Feder ruht, eine leichte *ungefederte* Masse (Rad, Bremse, Nabe), die an der Straße anliegt, und ein Dämpfer, der quer über beide gespannt ist.

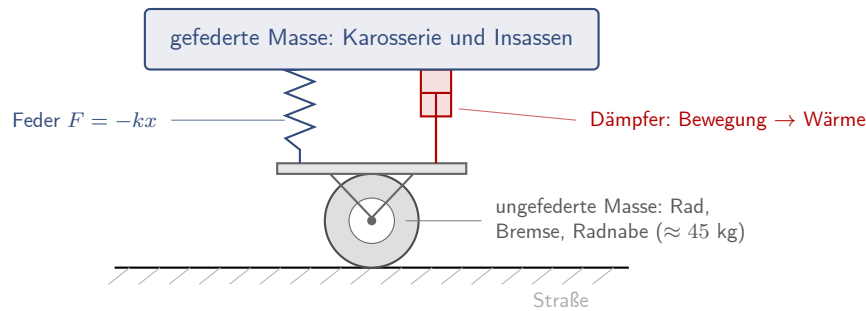


Abbildung 15.1: Eine Ecke eines Autos, auf ihre Physik reduziert: Die *gefederte* Masse (Karosserie und Insassen, ≈ 1620 kg von Auto B mit 1800 kg) ruht auf einer Feder, der die *ungefederte* Masse (Rad und Bremse, ≈ 45 kg pro Ecke) folgt, und der Dämpfer sitzt parallel zur Feder. Die Feder entscheidet, wie kräftig die Karosserie gestoßen wird, wenn sich das Rad bewegt; der Dämpfer entscheidet, wie lange die resultierende Bewegung dauert.

Die Feder gehorcht dem Hookeschen Gesetz:

$$F = -k x,$$

sie drückt proportional zur Eindrückung zurück. Ihre zwei Aufgaben sind es, die Karosserie zu tragen — jede Eckfeder von Auto B trägt im Stillstand etwa 4 kN — und es dem Rad zu erlauben, sich zu bewegen, ohne die Karosserie zu bewegen: Wenn das Rad über eine Welle fährt, federt die Feder ein, statt die Kabine hochzukatapultieren. Aber das Einfedern speichert Energie ($\frac{1}{2}kx^2$), und gespeicherte Energie muss irgendwohin (Kapitel 3). Freigesetzt, wirft sie die Karosserie wieder nach oben; die Karosserie überschießt, die Feder dehnt sich, zieht sie wieder herunter — und das Auto schaukelt.

15.2 Warum der Dämpfer existiert

Ein schaukelndes Auto ist eine Physik-Demonstration, kein Fahrzeug: Während die Karosserie schwingt, schwankt auch die Reifenlast, und der Grip (Kapitel 7) steigt und fällt mit jedem Zyklus. Die Aufgabe des Dämpfers ist es, die gespeicherte Energie verschwinden zu lassen — als Wärme. Innen zwingt ein Kolben Öl durch kleine Löcher; je schneller sich das Fahrwerk bewegt, desto stärker widersteht der Dämpfer. Er wandelt geordnete Bewegung in warmes Öl um, einen Stoß nach dem anderen. Stoßdämpfer an einem hart gefahrenen Auto werden tatsächlich heiß; diese Wärme sind Ihre Stöße im Ruhestand.

15.3 Der Dämpfungsbereich

Abbildung 15.2 zeigt einen Stoß, der auf drei Arten beantwortet wird. Zu wenig Dämpfung (abgenutzte Stoßdämpfer sind der typische Fall), und die Karosserie schwingt sekundenlang weiter. Zu viel, und das Fahrwerk bewegt sich kaum noch — die Karosserie erholt sich so langsam, dass die nächste Welle vor der Erholung kommt, und jede kleine Unebenheit wird starr übertragen. Dazwischen liegt das Ziel: eine saubere Bewegung, kein Echo.

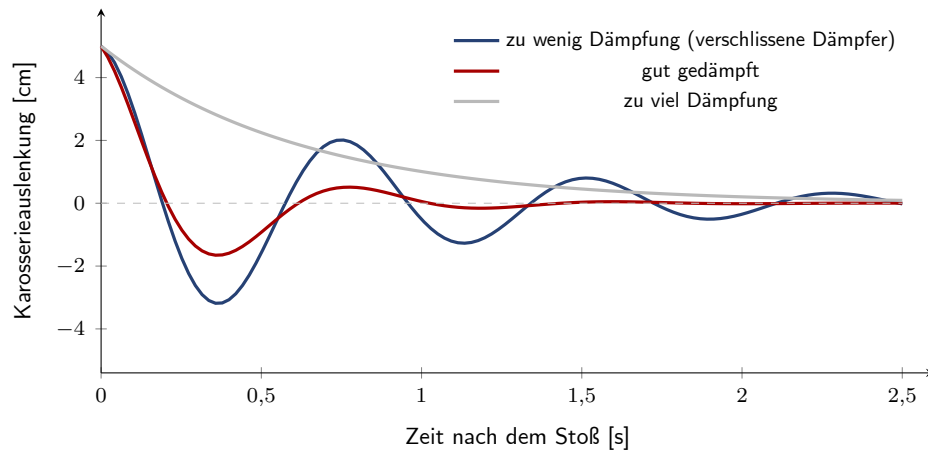


Abbildung 15.2: Ein Stoß, drei Autos. Bei zu wenig Dämpfung schwingt die Karosserie sekundenlang weiter — die Energie der Feder schwankt hin und her, weil nichts sie entfernt. Bei guter Dämpfung stirbt die Bewegung in einer einzigen glatten Rückkehr. Bei zu viel kriecht die Karosserie langsam zurück und das Fahrwerk wirkt bei jeder kleinen Welle hart. Die Feder bestimmt *wie weit*; der Dämpfer bestimmt *wie lange*.

Garagenphysik

Jede Ecke von Auto B trägt 405 kg gefederter Masse auf einer Feder von etwa $k = 30 \text{ kN/m}$. Die Eigenfrequenz ist

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{30\,000}{405}} \approx 1,4 \text{ Hz},$$

etwa eineinhalb Schwingungen pro Sekunde — bewusst nahe am Rhythmus eines gehenden Menschen, der Frequenz, die unser Körper am wenigsten als störend empfindet. Eine 5 cm-Einfederung speichert $\frac{1}{2} \times 30\,000 \times 0,05^2 \approx 38 \text{ J}$ pro Ecke; nach einem harten Stoß müssen die Dämpfer still den Wert aller vier Ecken in Wärme verwandeln, mehrere Male pro Sekunde.

Was Sie spüren

Sie können Dämpfung mit Ihrem Gesäß diagnostizieren. Ein Auto, das nach einer Bodenwelle zweimal weiter nickt — *boing, boing* — ist unterdämpft. Ein Auto, das einmal nachschwingt und dann ruhig ist, fühlt sich diszipliniert an. Und ein Auto, das auf rauem Asphalt ständig zittert, ohne sich je zu setzen, hat zu viel des Guten: Dämpfer so steif, dass die Federn kaum zum Zug kommen.

15.4 Resonanz: der falsche Rhythmus

Fahrwerke haben eine Eigenfrequenz, und Straßen singen manchmal darauf. Wenn Stöße rhythmisch nahe f_n ankommen — Waschbrett-Schotter, gleichmäßig verteilte Betonfugen —, landet jeder Stoß im Takt der Bewegung, und die Schwingung baut sich auf (Abbildung 15.3). Bei leichter Dämpfung verstärkt sich die Schwingung um ein Vielfaches; bei starker Dämpfung kollabiert der Gipfel. Das ist der Grund, warum sich ein Auto bei 60 km/h fein anfühlen kann und bei 80 km/h auf demselben Wellblech unheimlich: Sie haben die Straße durch Geschwindigkeitsänderung auf das Fahrwerk abgestimmt. Das ist auch der Grund, warum Dämpfer, nicht härtere Federn, die Kur sind — Versteifung verschiebt die Resonanz lediglich auf eine neue Geschwindigkeit.

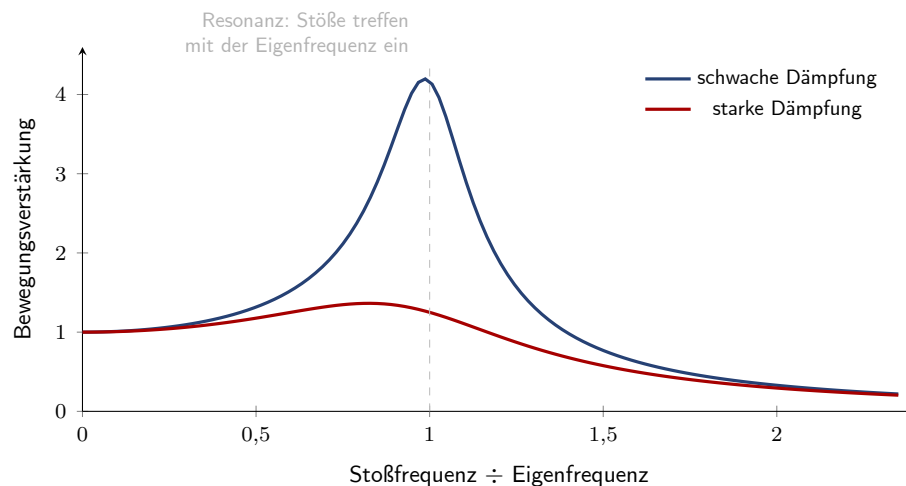


Abbildung 15.3: Wie stark ein Fahrwerk rhythmische Stöße verstärkt, gegen Stoßfrequenz geteilt durch die Eigenfrequenz des Fahrwerks. Nahe 1 — Waschbrett-Schotter, Betonfugen bei genau der falschen Geschwindigkeit — bauen sich schon kleine Stöße zu großen Bewegungen auf, und schwache Dämpfung lässt den Gipfel um ein Vielfaches wachsen. Starke Dämpfung flacht den Gipfel ab: Das, nicht die Steifigkeit, zähmt die Resonanz.

15.5 Gefedert und ungefedert

Das Rad kann nicht auf die Karosserie warten. Zwischen Straße und Feder sitzt die ungefederte Masse — Rad, Reifen, Bremse, Nabe —, und sie muss jeder Unebenheit sofort folgen, oder die Kontaktfläche verlässt die Straße. Die Physik erklärt, warum Renningenieure leichte Räder besitzen verfolgen: Ein schweres Rad, von einer Welle hochgeschleudert, trägt Impuls mv , den die Feder nur langsam absorbieren kann; ein leichtes Rad folgt der Oberfläche wie eine Fingerspitze. Jedes unterhalb der Feder gesparte Kilogramm ist mehr wert als ein oberhalb gespartes — was Kapitel 16 vorbereitet.

15.6 Der Zielkonflikt der Steifigkeit

Warum nicht einfach knüppelharte Federn einbauen und Karosserieneigung ein für alle Mal erledigen? Weil die Feder auch die Reifen betreut. Auf glattem Asphalt kann größere Steifigkeit Plattform- und Geometriekontrolle verbessern — die Karosserie bleibt flach, der Sturz bleibt, die Reifen arbeiten gleichmäßig. Aber auch dort ist es ein Abstimmungshandel, kein Gesetz: Steifigkeit bestimmt auch, wie die Lastverlagerung verteilt wird und wie hart die Reifen beansprucht werden. Und auf jeder realen Straße zwingt eine übermäßig steife Feder die *Karosserie* zu springen, was das Rad hätte tun sollen — ein Reifen, dessen Last zittert, liefert weniger durchschnittlichen Grip als einer, der stetig gedrückt wird. Weichere Federn halten die Kontaktfläche treu zum Asphalt, zum Preis von Neigen und Tauchen. Komfort und Grip auf rauen Straßen, so stellt sich heraus, wollen dasselbe; nur die Pose auf glattem Asphalt will Steifigkeit.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Hartes Fahrwerk bedeutet besseres Handling.“ **Physik:** Härteres Fahrwerk bedeutet *flacheres* Handling — weniger Wanken, schnellere Reaktion —, was sich auf glattem Asphalt wie Grip anfühlt. Aber Grip kommt von der Kontaktfläche (Kapitel 7), und auf unvollkommenen Straßen entlastet ein unnachgiebiges Fahrwerk die Reifen tausende Male pro Minute. Rallye-Autos, die schnellsten Maschinen auf den schlechtesten Oberflächen, fahren langes, geschmeidiges Fahrwerk genau aus diesem Grund. Steifigkeit kontrolliert die Karosserie; Nachgiebigkeit füttert die Reifen; der Dämpfer vermittelt.

Probieren Sie es gedanklich

Zwei ansonsten identische Autos überqueren dieselbe Waschbrettstrecke: eins bei 40 km/h, wo die Riffel-Frequenz deutlich unter f_n liegt, eins bei der Geschwindigkeit, bei der der Stoßrhythmus 1,4 Hz erreicht. Welches verliert zuerst Grip, und warum? (Das zweite. Nahe der Resonanz wird die Radbewegung verstärkt (Abbildung 15.3), die Reifenlast schwankt, und der Durchschnittsgrip fällt. Langsamer werden ist nicht nur Vorsicht — es verstimmt die Straße.)

Streckenrand-Notiz

Ein Formelwagen-Fahrwerk sieht unmöglich steif aus, weil es so ist: Bei 250 km/h drücken die Flügel aus Kapitel 14 mehrere zusätzliche Tonnen auf die Federn, und nur sehr hohe Federraten halten die kritische Bodenfreiheit innerhalb von Millimetern ein. Die Nachgiebigkeit kommt von der einzigen übrigen Feder — der Reifenflanke. Schauen Sie sich Zeitlupenaufnahmen an: Die Karosserie bewegt sich kaum, während die Flanken den ganzen Weg machen. Dieselbe Physik, am anderen Ende des Reglers.

15.7 Was das für Autos bedeutet

Jeder Fahrkomfort-Test ist ein Dämpfungsbericht in Verkleidung: „schwammig“ bedeutet unterdämpft, „hektisch“ bedeutet überdämpft, „beherrscht“ bedeutet, dass beide Eigenschaften im Gleichgewicht sind. Und das ungefederte Budget — Räder, Bremsen — entscheidet, wie treu die Reifen einer schlechten Straße folgen können. Als Nächstes wiegen wir ein Kilogramm dort, wo es am meisten zählt: rotierend an der Ecke des Autos.

Eine Gleichung zum Merken

$$F = -k x$$

Die Feder drückt proportional zur Einfederung zurück und speichert dabei Energie mit jedem Stoß; der Dämpfer gibt diese Energie als Wärme aus. Federn bestimmen, wie weit sich die Karosserie bewegt — Dämpfer, wie lange.

15.8 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- Die Feder trägt die Last und absorbiert Stöße ($F = -kx$); sie speichert Energie, sie entfernt sie nicht.
- Der Dämpfer wandelt Schwingungsenergie in Wärme; ohne ihn hallt jeder Stoß sekundenlang nach.

- Gute Dämpfung ist eine Einstellung: zu wenig schaukelt, zu viel zittert, genau richtig kommt einmal zurück.
- Rhythmische Stöße nahe der Eigenfrequenz ($\approx 1,4\text{ Hz}$) resonieren — Dämpfung, nicht Steifigkeit, zähmt sie.
- Leichte ungefederte Masse hält Reifen auf der Straße; steife Federn dienen glatten Straßen, geschmeidige dienen realen.

Kapitel 16

Rotierende Masse, Räder und warum der Ort zählt

Fragen Sie in einem Forum, was ein Satz Leichtbau-Räder wert ist, und Sie werden eine selbstbewusst falsche Antwort hören: „Ein Kilogramm am Rad entspricht vier am Sitz.“ Die Wahrheit ist interessanter als der Slogan. Masse, die sich dreht, hat eine zweite kinetische Energie, Masse unterhalb der Federn bekommt Stöße ungefiltert ab, und Masse, die durch das Getriebe gedreht wird, wird mit dem Quadrat der Übersetzung verstärkt. Ort und Rotation zählen beide — nur nicht um einen magischen Faktor von vier.

Die Frage

Ist ein Kilogramm am Rad dasselbe wie ein Kilogramm im Sitz?

Symbole auf einen Blick

K_{rot} Rotationsenergie [J]; I Massenträgheitsmoment [kg m^2]; ω Winkelgeschwindigkeit [rad/s]; R Reifenradius [m]; i Gesamtübersetzung [-].

Auf einen Blick

Ein rollendes Rad bewegt sich *und* dreht sich, also speichert es $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$: Es wirkt beim Beschleunigen wie etwa 1,5–1,7 Kilogramm pro echtem Kilogramm. Teile, die durch die Gänge gedreht werden, wirken wie $I(i/R)^2$ — Hunderte Kilogramm im ersten Gang, eine Handvoll im höchsten Gang. Und ungefederte Masse hat eine separate fahrwerkliche Strafe (Kapitel 15). Drei verschiedene Abzüge, ein fauler Mythos.

16.1 Das rollende Rad macht zwei Jobs gleichzeitig

Betrachten Sie ein rollendes Rad so, wie es ein Physiker tut (Abbildung 16.1): Der Mittelpunkt bewegt sich mit v , der Rand dreht sich darum mit $v = \omega R$, der oberste Punkt rast mit $2v$, und die Kontaktfläche — der einzige Teil, der nützliche Arbeit tut — ruht augenblicklich. Jedes Kilogramm dieses Rads zahlt also zwei Energiesteuern gleichzeitig: $\frac{1}{2}mv^2$, weil es mit dem Auto reist, und $\frac{1}{2}I\omega^2$, weil es sich dreht.

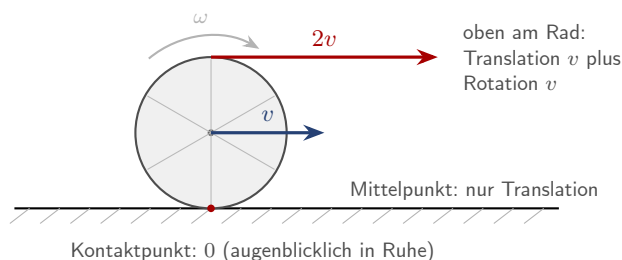


Abbildung 16.1: Ideales Rollen kombiniert Translation und Rotation: Jeder Punkt des Rades bewegt sich mit dem Auto bei v und dreht sich um den Mittelpunkt mit der Umfangsgeschwindigkeit $v = \omega R$. Die beiden addieren sich oben ($2v$), löschen sich in der Kontaktfläche (augenblicklich in Ruhe — weshalb ein Reifen greifen kann, ohne zu rutschen), und lassen den Mittelpunkt bei v . Ein Rad trägt daher zwei kinetische Energien gleichzeitig: $\frac{1}{2}mv^2$ für die Bewegung, $\frac{1}{2}I\omega^2$ für das Drehen.

Für ein Rad-Reifen-System der Masse m_w und des Radius R beträgt das Massenträgheitsmoment ungefähr $I \approx 0,7 m_w R^2$ (zwischen mR^2 eines Reifens und $\frac{1}{2}mR^2$ einer Scheibe). Da $\omega = v/R$, ergibt sich die Rotationsenergie zu $\frac{1}{2}(0,7m_w)v^2$: Das Drehen fügt etwa 70% zum Energieappetit jedes Rad-Kilogramms hinzu. Der ehrliche Slogan lautet also: *ein Kilogramm am Rad kostet beim Beschleunigen etwa 1,7* — nicht vier.

16.2 Die echten Kosten zählen

Garagenphysik

Die vier Räder von Auto B mit je 20 kg: Die Translation schlägt mit 80 kg zu Buche, die Rotation fügt $0,7 \times 80 = 56$ hinzu, also beschleunigen die Räder wie 136 kg Masse. Gegenüber den 1 800 kg des Autos entspricht das einer Mehrbelastung von 7,5 % bei jeder Beschleunigung — und 2 kg weniger pro Rad geben etwa 13,6 kg davon zurück. Real, lohnend und weit entfernt vom Faktor vier aus dem Forum, der 32 versprochen hätte.

Der Mythos entstand wahrscheinlich durch Verwechslung mit einem anderen, größeren Effekt: Teilen, die *durch das Getriebe* gedreht werden.

16.3 Der Getriebemultiplikator

Motor, Schwungrad, Kupplung und Getriebewellen drehen sich nicht mit Radgeschwindigkeit — sie drehen sich i -mal schneller, wobei i die Gesamtübersetzung ist (Kapitel 5). Die Energie geht mit ω^2 , also skaliert ihre *reduzierte* Masse mit i^2 :

$$m_{\text{reflected}} = I \frac{i^2}{R^2}.$$

Abbildung 16.2 rechnet die Zahlen von Auto B durch: Mit $I \approx 0,15 \text{ kg m}^2$ für den rotierenden Kern des Motors macht ihn der erste Gang ($i = 12,2$) zu 219 kg zusätzlichem Auto; der fünfte Gang macht ihn zu 15. Die stetigen 56 kg der Räder reisen unter allen Gängen mit.

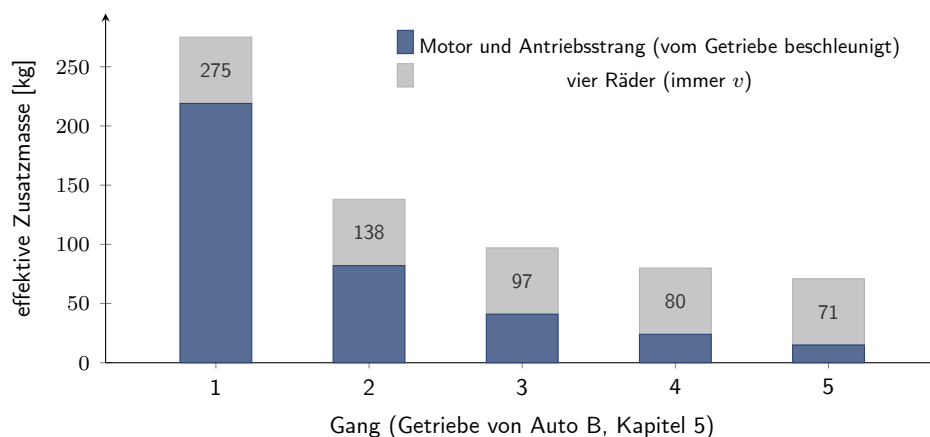


Abbildung 16.2: Masse, die hochgedreht werden muss, wirkt beim Beschleunigen wie Zusatzmasse, und das Übersetzungsverhältnis entscheidet, wie viel. Die vier Räder rollen immer mit Fahrgeschwindigkeit: etwa 56 kg effektive Masse, unabhängig vom Gang. Motor und Antriebsstrang drehen sich i -mal schneller als die Räder, daher skaliert ihre reduzierte Masse mit i^2 : über 200 kg im ersten Gang, ein Bruchteil davon im fünften. Der erste Gang gewinnt trotzdem das Beschleunigungsduell, weil seine Drehmomentvervielfachung (Kapitel 5) die zusätzliche Trägheit überwiegt — aber der Energieaufwand durch Rotation ist real und wird dort am höchsten, wo die Drehzahlen am schnellsten steigen.

Zwei alltägliche Beobachtungen folgen. Beim Hochdrehen im Leerlauf bewegt der Motor nur seine *eigene* reduzierte Masse — sonst nichts —, weshalb die Drehzahl so eifrig hochschnellt. Und beim Start im ersten Gang ist der Beitrag der rotierenden Masse am größten, genau wenn Sie maximale Beschleunigung verlangen. (Der erste Gang gewinnt trotzdem; seine 12×-Kraftverstärkung übertrumpft die zusätzliche Trägheit von 219 kg.)

Was Sie spüren

Fahren Sie dasselbe Auto mit schweren Zubehörfelgen und dann mit leichten Schmiederädern. Der Unterschied ist weder Einbildung noch bloß ein Effekt der Waage: Die Reaktion beim Start ist etwas schärfer, die Fahrt über scharfe Kanten etwas ruhiger, die Bremswege sind etwas kürzer. Jeder Effekt beträgt nur wenige Prozent — aber sie addieren sich, und alle führen auf dieselben beiden Grundgleichungen zurück: $\frac{1}{2}mv^2$ und $\frac{1}{2}I\omega^2$.

16.4 Ungefederte Masse ist ein Problem für sich

Verwechseln Sie den Energieaufwand durch Rotation nicht mit dem Aufwand, den Stöße verursachen. Radmasse ist auch *ungefedert* (Kapitel 15): Sie muss jeder Unebenheit augenblicklich folgen, und die Trägheit eines schweren Rads macht es träge, sich in Bewegung zu setzen oder wieder anzuhalten, sodass die Kontaktfläche über rauem Asphalt entlastet wird. Diese Strafe hat nichts mit Rotation zu tun — ein nicht rotierendes schweres Rad würde sie vollständig zahlen — sondern damit, wie treu der Reifen der Straße folgt. Leichte Räder zahlen sich doppelt aus: einmal bei der Energie, einmal an der Kontaktfläche.

Bremsen schließen den Kreis: Jedes Joule, das in einem drehenden Rad gespeichert ist, ist ein Joule, das die Bremsen später absorbieren müssen (Kapitel 9). Rotierende Masse wird dreimal geliehen — beim Beschleunigen, beim Stoß-Folgen und beim Anhalten.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Ein Kilogramm Radgewicht entspricht vier Kilogramm Karosseriegewicht.“

Physik: Für das Rad selbst ist der Faktor etwa 1,7 — bestimmt durch die Geometrie ($I \approx 0,7mR^2$), nicht durch Marketing. Größere Faktoren erscheinen nur bei Teilen, die durch niedrige Übersetzungen beschleunigt werden, und sie schrumpfen beim Hochschalten mit dem Quadrat der Übersetzung. Die eigentliche Zusatzbelastung: Radmasse zählt auch im *Fahrwerk*, wo kein einfacher Faktor sie erfasst. Echte Physik schlägt runde Zahlen.

Probieren Sie es gedanklich

Zwei identische Autos beschleunigen auf 100 km/h; eines trägt 40 kg Sand im Kofferraum, das andere 10 kg zusätzliche Radmasse pro Ecke. Welches ist langsamer? (Das Auto mit den schwereren Rädern: Die 40 kg Sand entsprechen 40 kg zusätzlicher translatorischer Masse; die zusätzlichen Radmassen wirken hier wie etwa $4 \times 1,7 \times 10 = 68$ kg. Bonusfrage: Welches verliert auf einer Waschbrettstrecke zusätzlich Grip? Wieder das Auto mit den schwereren Rädern — der Sand ist gefedert.)

Streckenrand-Notiz

Leichte Schwungräder sind die praktische Anwendung von Abbildung 16.2: Bei Übersetzungen im ersten Gang um 12 verwandeln sich alle vom Schwungrad abgesparten $0,1 \text{ kg m}^2$ in ≈ 15 kg reduzierte Masse während des Starts. Der Preis ist Fahrbarkeit — weniger gespeicherte Rotationsenergie bedeutet leichteres Abwürgen und holprigeren Niedrigdrehzahl-Lauf. Rennwagen akzeptieren es; Ihr Arbeitsweg würde es nicht.

16.5 Was das für Autos bedeutet

Datenblätter listen nie Massenträgheitsmomente, und doch prägen sie, wie sich ein Auto anfühlt: Rad- und Reifengewicht (Energie plus ungefedert), Schwungradmasse (Reaktion versus Glätte), selbst die Größe der Bremsscheiben spielt doppelt hinein: als Masse und als rotierende Masse. Lesen Sie „Leichtbau-Räder“ als kleinen, aber realen dreifachen Vorteil — und den „Faktor vier“ als Erinnerung daran, dass Geometrie, Getriebe und Federn jeweils ihre eigene Abrechnung verlangen. Als Nächstes: wohin all diese Energie *geht*, sobald das Auto auf Geschwindigkeit ist.

Eine Gleichung zum Merken

$$K_{\text{rot}} = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Rotierende Masse speichert Energie genauso wie bewegte Masse. Für rollende Teile fügt $\omega = v/R$ einen festen Zuschlag hinzu; für übersetzungsgetriebene Teile multipliziert $\omega = i v/R$ ihn mit i^2 . Wo Masse sitzt — und wie schnell sie sich drehen muss — zählt ebenso viel wie die Zahl auf der Waage.

16.6 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- Ein rollendes Rad bewegt sich *und* dreht sich: Die Kontaktfläche ruht, während der oberste Punkt $2v$ macht.
- Radmasse kostet beim Beschleunigen etwa $1,7 \times (I \approx 0,7mR^2)$ — nicht $4 \times$.

- Übersetzungsgetriebene rotierende Teile wirken als $I\dot{\theta}^2/R^2$: $\approx 219 \text{ kg}$ im ersten Gang von Auto B, 15 im fünften.
- Ungefederte Masse ist eine separate Strafe: Sie bestimmt, wie treu Reifen Unebenheiten folgen.
- Alles, was hochgedreht wurde, muss später gestoppt werden: Rotierende Masse steuert Beschleunigung, Fahrt und Bremsen gleichermaßen.

Teil VII

Energie, Effizienz und Reichweite

Überblick Teil VII

Der letzte Teil zoomt auf die vollständige Energiebilanz heraus. Kapitel 17 fragt, warum Fahren mit konstanter Geschwindigkeit dennoch Energie verbraucht, und verfolgt die Verluste durch Luft, Reifen, Antriebsstrang und Steigungen. Kapitel 18 schließt das Buch, indem ein Datenblatt so gelesen wird, wie es ein Physiker tun würde, und Pferdestärken, Drehmoment, Beschleunigungszeiten, Bremswege und Luftwiderstandsbeiwerte zu einem kohärenten Bild verbindet.

Kapitel 17

Wohin die Energie geht

Hier ist ein Rätsel. Ein Auto, das stabil mit 120 km/h fährt, beschleunigt nicht, also ist nach Kapitel 2 die resultierende Kraft null. Keine resultierende Kraft, keine resultierende Arbeit — und dennoch fällt die Tankanzeige und der Batterieprozensatz sinkt. Wohin geht die Energie? Die Antwort ist die wiederkehrende Lektion dieses Buches, von der anderen Seite gesehen: Das Auto ist eine Maschine, die Energie elegant *verliert*, und die Reisegeschwindigkeit ist die Rate, mit der diese Verluste ausgeglichen werden müssen.

Die Frage

Warum erfordert das Halten der Geschwindigkeit Energie, wenn das Auto nicht beschleunigt?

Symbole auf einen Blick

P Leistung [kW]; F_{drive} , $F_{\text{resistance}}$ Antriebs- und Widerstandskräfte [N]; C_{rr} Rollwiderstandsbeiwert [-]; $\Delta U = mgh$ Gravitations-Potentialenergie [J]; η Wirkungsgrad [-].

Auf einen Blick

Konstante Geschwindigkeit bedeutet Kräftegleichgewicht, nicht Energiegleichgewicht: $F_{\text{drive}} = F_{\text{resistance}}$, und der Motor muss kontinuierlich $P = Fv$ liefern, weil Luftwiderstand, Rollwiderstand und Nebenverbraucher jede Sekunde Energie abziehen. Diese Verluste entstehen hintereinander im Antriebsstrang und im Motor — jeder mit seinem eigenen Wirkungsgrad. An Steigungen wird Energie gespeichert und bergab wieder frei; nur das EV erhält den Großteil davon zurück.

17.1 Verluste gibt es immer

Bei konstanter Geschwindigkeit schließt sich das Kräftegleichgewicht aus Kapitel 13: Antriebskraft gleich der Summe aus Luftwiderstand (Kapitel 12), Rollwiderstand $F_{rr} \approx C_{rr}mg$ (Kapitel 7) und dem kleinen Anteil aus Lagern und Nebenverbrauchern. Aber null *resultierende* Kraft bedeutet nicht null *Energiefluss* — jede Widerstandskraft wirkt über die zurückgelegte Strecke und zieht $P = Fv$ jede Sekunde ab. Die Aufgabe des Motors bei gleichmäßiger Fahrt besteht nicht darin, das Auto zu beschleunigen, sondern die Verluste auszugleichen. Und oberhalb der Räder kommen zwei weitere Verluste hinzu: Getriebe und Differenzial beanspruchen ihre paar Prozent, und der Motor selbst — der größte Verlustposten eines Verbrennerautos — wandelt den Großteil der Kraftstoffenergie direkt in Wärme um (Kapitel 6).

Abbildung 17.1 zeichnet das vollständige Bild für Autos B und C bei 120 km/h, unter Verwendung der repräsentativen Wirkungsgrade aus Kapitel 6 (33% Motor, 88% für die Antriebs-

strangkette — illustrative Werte, die mit Arbeitspunkt, Temperatur und Nebenverbrauchern schwanken). Der Kontrast ist scharf: Das Verbrennerauto wirft für jede Einheit, die am Rad ankommt, zwei Einheiten als Motorwärme weg; das Elektroauto verliert unter denselben Annahmen kaum eine von zehn. Beachten Sie auch, was bei beiden übrig bleibt: Bei gleichmäßiger Fahrt werden die *straßenseitigen* Verluste von der Aerodynamik dominiert — von der mit v^2 wachsenden Kraft, der Teil V drei Kapitel gewidmet hat.

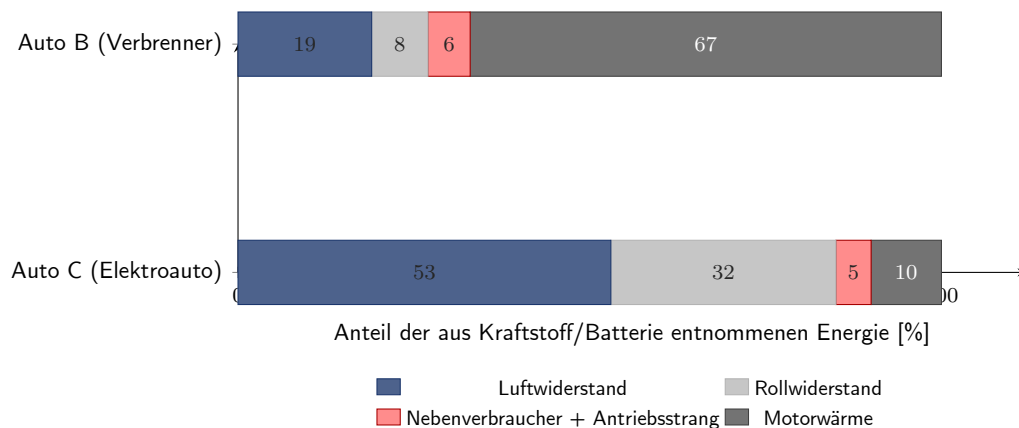


Abbildung 17.1: Hundert Energieeinheiten, die bei stabilen 120 km/h gezogen werden, aufgeteilt unter repräsentativen Wirkungsgrad-Annahmen (Kapitel 6). Beim Verbrenner-Auto verlassen zwei Drittel als Motorwärme das Spiel, bevor sie überhaupt die Räder erreichen; das nützliche Drittel teilt sich zwischen Luftverschieben und Reifenverformung. Das Elektroauto kehrt das Bild um: Fast neun Zehntel erreichen die Straße, und — weil seine windschnittige Form auf dieselbe v^2 -Luft trifft — ist Aerodynamik das dominante Ziel. Physik, nicht Vorliebe, legt beide Torten fest.

Garagenphysik

Auto B bei 120 km/h: Widerstand $= \frac{1}{2} \times 1,2 \times 0,616 \times 33,3^2 \approx 411$ N, Rollen ≈ 177 N, also brauchen die Räder $(411 + 177) \times 33,3 \approx 19,6$ kW. Plus 1 kW für Nebenverbraucher und geteilt durch den Wirkungsgrad des Antriebsstrangs von 0,88: Der Motor muss ≈ 23 kW liefern. Bei einem realistischen Wirkungsgrad von 33% setzt der Kraftstoff dafür etwa 71 kW frei — so viel wie ein Haushalt voller Heizungen —, um eine Limousine auf Autobahngeschwindigkeit zu halten. Auto C braucht für dieselbe Aufgabe nur etwa 22 kW aus seiner Batterie.

17.2 Steigungen: Energie speichern und zurückgewinnen

Schwerkraft ist das eine Leck, das Einzahlungen zurückgibt. Bergauf wird $\Delta U = mgh$ als potentielle Energie gespeichert — real, gebunkert, rückgewinnbar. Abbildung 17.2 stellt Auto B auf einen 500-m-Pass: 8,8 MJ, etwa 2,5 kWh, zur Kraftstoffrechnung des Aufstiegs addiert, zusätzlich zu allem, was Straße und Luft bereits berechneten.

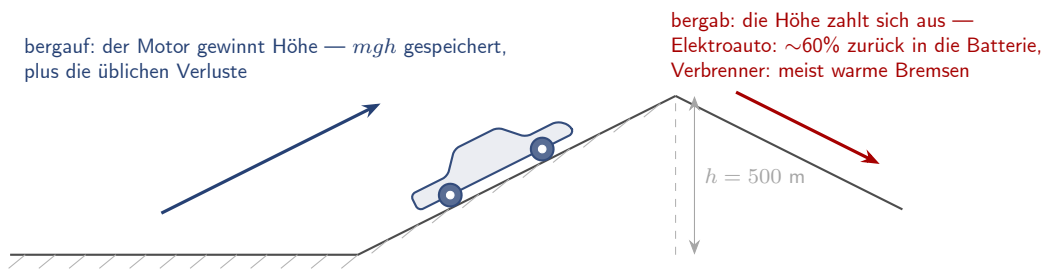


Abbildung 17.2: Ein Berg ist ein Energiekonto. Auto B speichert auf einem 500 m-Aufstieg $mgh \approx 8,8 \text{ MJ} \approx 2,5 \text{ kWh}$ an potenzieller Energie — zusätzlich zu jedem Joule, das Straße und Luft bereits gefordert haben. Beim Abstieg wird diese Energie wieder frei, aber der Empfänger ist verschieden: Das rekuperative Bremsen eines EVs leitet den Großteil zurück in die Batterie, während ein Verbrennerauto sie an die Bremscheiben (Kapitel 9) und die Luft abgibt. Bergstraßen machen diese Energiebilanz besonders anschaulich.

Beim Abstieg trennen sich die Antriebskonzepte (Kapitel 6). Das Verbrennerauto kann die Fahrt nur verlangsamen: Die Motorbremse drückt Luft durch die Zylinder, und die Bremsen verwandeln den Rest in Wärme (Kapitel 9). Das EV lässt seinen Motor rückwärts als Generator laufen und gibt den Großteil der Einlage zurück — typischerweise etwa 60 % nach den Verlusten von Motor, Wechselrichter und Batterie — an die Batterie. Derselbe Berg, dasselbe mgh , eine andere Energiebilanz.

Was Sie spüren

Fahren Sie ein EV durch Berge mit eingeschaltetem Verbrauchsdisplay, und die Physik wird greifbar: Die Kilowattstunden fließen bergauf — doppelt oder dreimal so viele wie auf ebener Straße — und strömen bergab zurück; die Reichweitenschätzung erholt sich scheinbar wie durch Magie. Es ist keine Magie, sondern mgh , die einzige Größe im gesamten Energiekonto, die in beide Richtungen wirkt.

17.3 Den Fluss rückwärts lesen

Das Flussdiagramm erklärt auch zwei vertraute Beobachtungen. Stadtverkehr bestraft das Verbrennerauto doppelt: Der Motor arbeitet im Leerlauf und beim Kriechen weitab von seinem Wirkungsgradoptimum, während jedes Bremsen (Kapitel 9) kinetische Energie vernichtet, die ein EV hätte zurückgewinnen können. Bei Autobahngeschwindigkeit verschieben sich die Verhältnisse: Die v^3 -Dominanz des Luftwiderstands (Kapitel 13) übertrifft jeden Wirkungsgradvorteil, und selbst der effiziente Antriebsstrang eines EV kann der Physik der Luftverdrängung nicht entkommen. Die Effizienz verändert die Konstanten; die Exponenten gehören der Natur.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Eine gleichmäßige Fahrt verbraucht kaum Energie — nur das Beschleunigen tut das.“ **Physik:** Beschleunigung ist ein einmaliger Kauf von kinetischer Energie; gleichmäßiges Fahren ist ein Abo. Bei 120 km/h summieren sich die Verluste von Auto B auf $\approx 20 \text{ kW}$ an den Rädern — die gesamte kinetische Energie eines 0–100 km/h-Sprints (0,69 MJ, Kapitel 3) wird bei gleichmäßiger Fahrt alle 35 Sekunden erneut umgesetzt. Der Sprint fühlt sich dramatisch an; das Abo bezahlt am Ende der Tank.

Probieren Sie es gedanklich

Die Batterie von Auto C fasst 75 kWh. Für die Fahrt bei 120 km/h werden ≈ 22 kW benötigt. Wie weit kann es kommen, und warum schrumpft die reale Zahl im Winter? ($75/22 \times 120 \approx 410$ km im idealisierten Energiekonto. Im Winter kommt die Kabinenheizung hinzu — mehrere kW zusätzlicher Verbrauch —, und kalte Batterien nehmen sowohl weniger Energie auf als auch geben sie weniger ab. Die Verluste fallen dann stärker ins Gewicht.)

Streckenrand-Notiz

Langstreckenrennen sind dieses Kapitel mit Stoppuhr: Das Le-Mans-Regelbuch begrenzt *Energie pro Stint*, nicht nur den Kraftstoffverbrauch. Deshalb optimieren die Ingenieure jeden Pfeil in Abbildung 17.1 — von Motorwirkungsgraden über 40% bis zu Hybridsystemen, die sowohl Brems- als auch Abgasenergie zurückgewinnen, und Karosserien, die pro Runde weniger Widerstand bezahlen. Es gewinnen die Teams mit den kleinsten Verlusten.

17.4 Was das für Autos bedeutet

Jedes Effizienzmerkmal eines modernen Autos schließt eine dieser Lücken: Lange Übersetzungen und Zylinderabschaltung verringern den Durst des Motors bei niedriger Last; windschnittige Spiegel und Unterbodenplatten verringern den Luftwiderstand; Reifen mit niedrigem Rollwiderstand entlasten die Kontaktfläche; Rekuperation und Wärmepumpen helfen in der Stadt und bei Kälte. Sie besitzen nun die vollständige Karte — und können ein Datenblatt so lesen, wie es ein Ingenieur tut. Das ist die Aufgabe des letzten Kapitels.

Eine Gleichung zum Merken

$$F_{\text{drive}} = F_{\text{resistance}}, \quad P = F v$$

Gleichmäßiges Fahren ist ein Gleichgewicht der Kräfte, nicht der Energien: Die Antriebskraft gleicht die Verluste aus, während der Motor dauerhaft Fv liefert. Geschwindigkeit ist in Newtons Universum frei; in unserem wird sie an der Tankstelle abgerechnet.

17.5 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- Stabile Geschwindigkeit bedeutet $F_{\text{drive}} = F_{\text{resistance}}$ — und eine konstante Leistungsrechnung $P = Fv$, um die Verluste auszugleichen.
- Bei 120 km/h gehen unter repräsentativen Annahmen zum Wirkungsgrad zwei Drittel der Kraftstoffenergie von Auto B als Motorwärme verloren; nahezu 90% der Batterieenergie von Auto C erreichen die Straße.
- Bei gleichmäßiger Fahrt dominiert die Aerodynamik den größten straßenseitigen Verlust; in der Stadt fallen Rollen und Nebenverbraucher stärker ins Gewicht.
- Steigungen speichern bergauf mgh ; EVs gewinnen den Großteil beim Abstieg zurück, Verbrenner-Autos wandeln ihn in Bremswärme um.
- Beschleunigung ist ein einmaliger Kauf; gleichmäßiges Fahren ist ein Abo — und dieses Abo bezahlt der Tank.

Kapitel 18

Die Physik hinter den Zahlen

Jeder jemals am Stammtisch ausgetragene Autostreit wurde mit Datenblattzahlen ausgetragen: Pferdestärken, Drehmoment, 0–100, Höchstgeschwindigkeit, Querschleunigung. Nach siebzehn Kapiteln sind diese Zahlen keine Trivia mehr — jede ist eine verdichtete Antwort auf eine physikalische Frage, die Sie jetzt bewusst stellen können. Dieses abschließende Kapitel entschlüsselt sie: was jede Zahl misst, welche Physik sie meldet, und genau wo sie aufhört, die Wahrheit zu sagen.

Die Frage

Was sagen die vertrauten Auto-Datenblattzahlen tatsächlich — und was verbergen sie?

Symbole auf einen Blick

P Leistung [kW]; τ Drehmoment [Nm]; m Masse [kg]; $c_d A$ Widerstandsfläche [m²]; μ Reibungskoeffizient [–]; E gespeicherte Energie [kWh].

Auf einen Blick

Keine einzelne Spezifikation erzählt die ganze Geschichte, weil jede in einem anderen physikalischen Regime lebt: Beschleunigungszahlen mischen Traktion, Getriebe und Leistung; Höchstgeschwindigkeit mischt Leistung, Widerstandsfläche und Getriebe; Bremsen und Querschleunigung berichten mehr über Reifen als über Hardware. Spezifikationen werden erst sinnvoll, wenn man die Physik kennt, die sie verbindet.

18.1 Ein Sprint, zwei Geschichten

Beginnen wir mit der meistzitierten Zahl überhaupt: 0–100 km/h. Abbildung 18.1 zeigt, warum sie in einem ausreichend starken Auto zwei Messungen sind, die als eine verkleidet auftreten. Unterhalb von etwa 60–70 km/h beschleunigt Auto B an der *Traktionsgrenze*: Reifen (Kapitel 7), angetriebene Achsen und die Startregelung entscheiden, und der Motor wird absichtlich unterfordert. Darüber übernimmt die *Leistungsgrenze* $a = P/(mv)$ (Kapitel 4). Wo der Übergang liegt, hängt vom Auto ab: Ein 100 kW-Fließheck kann von Anfang an leistungsbegrenzt sein, während ein 700 kW-Allrad-Elektroauto seine Traktionsgrenze weit in den Geschwindigkeitsbereich hinein ausdehnen kann. Für starke Autos wird 0–100 also stark von Traktion, angetriebenen Rädern, Getriebe und Startregelung geprägt, während 100–200 sehr viel stärker ein Test von Leistung je Tonne und Aerodynamik ist. Ein Auto kann das eine gewinnen und das andere verlieren — und das Datenblatt wird Ihnen nur das erste zeigen.

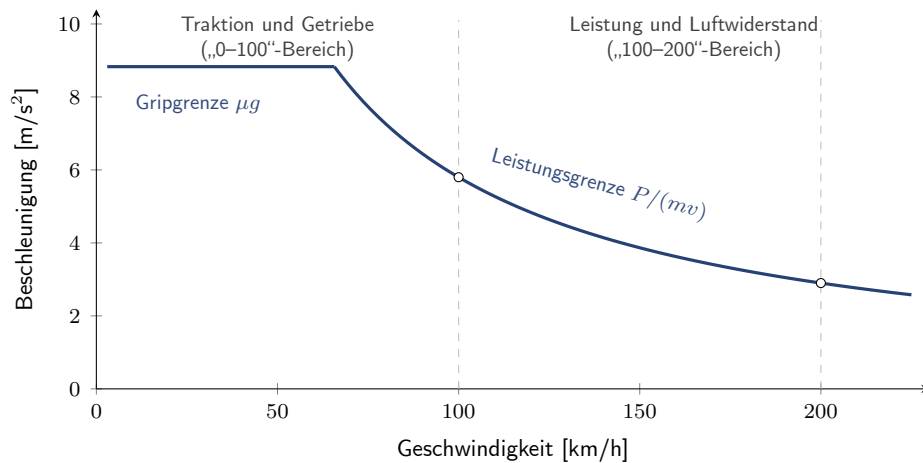


Abbildung 18.1: Die Beschleunigung von Auto B gegen Geschwindigkeit, idealisiert. Unterhalb von etwa 66 km/h entscheiden Reifen und Getriebe: Der Motor hat mehr zu geben, als die Kontaktfläche übertragen kann, also liegt die Beschleunigung an der Traktionsgrenze. Darüber ist Leistung die bindende Grenze und die Beschleunigung fällt mit $P/(mv)$. Deshalb sind „0–100“ und „100–200“ verschiedene Physikfragen in denselben Einheiten — und weshalb Datenblätter, die nur das erste zitieren, das zweite verbergen.

18.2 Die Karte, die höflich lügt

Oder nehmen Sie die zwei Zahlen, die das Marketing gern gemeinsam präsentiert: Leistung je Tonne und Höchstgeschwindigkeit. Abbildung 18.2 zeigt unsere Flotte. Leistung je Tonne ordnet sie A, B, C; bei der Höchstgeschwindigkeit lautet die Reihenfolge B, A, C. Keine der beiden Zahlen lügt — sie beantworten einfach verschiedene Fragen. Die Höchstgeschwindigkeit folgt dem Würfelgesetz in $P/(\rho c_d A)$ (Kapitel 13); Widerstandsfläche und Getriebe begrenzen sie, und der einstufige Antriebsstrang von Auto C kappt sie direkt. Die Lektion lässt sich verallgemeinern: *Jede Datenblattzahl ist eine Projektion des Autos auf eine Achse, und Projektionen verbergen Dimensionen.*

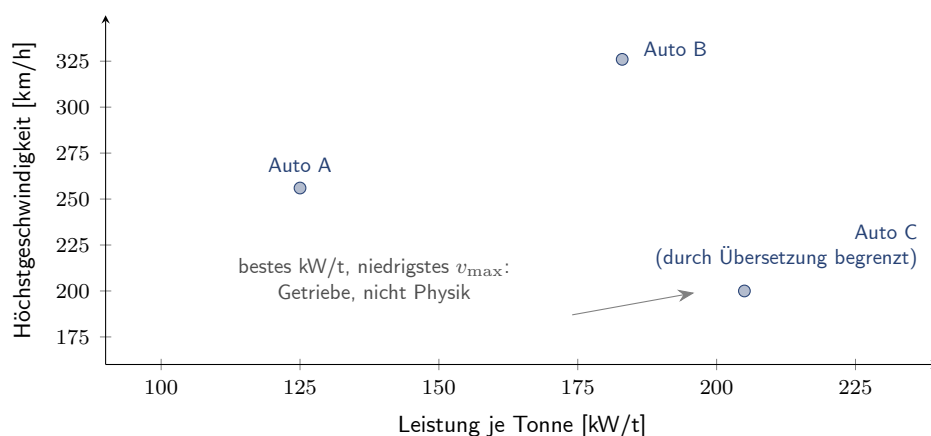


Abbildung 18.2: Die Flotte auf den beiden Achsen, die Datenblätter am meisten lieben. Leistung je Tonne ordnet die Autos A, B, C — bei der Höchstgeschwindigkeit lautet die Reihenfolge B, A, C. Das Würfelgesetz aus Kapitel 13 spreizt das Verbrennerpaar (256 gegenüber 326 km/h bei 46% mehr Leistung je Tonne), während der einstufige Antriebsstrang von Auto C die Höchstgeschwindigkeit trotz des besten Verhältnisses bei 200 km/h begrenzt. Zwei ehrliche Zahlen, drei unterschiedliche Geschichten.

18.3 Die Entschlüsselungstabelle

Tabelle 18.1 sammelt die Entschlüsselung für die üblichen Verdächtigen. Lesen Sie sie als Taschenausgabe des Buches: Die mittlere Spalte ist die Physik, die letzte Spalte das Kleingedruckte.

Tabelle 18.1: Das Datenblatt entschlüsselt. Jede Zahl ist ein Fenster zu einem Stück Physik — und eine Mauer um alles andere.

Zahl	Physik dahinter	Was sie Ihnen nicht sagt
Leistung [kW]	$P = \tau\omega = Fv$: die verfügbare Energierate für Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit (Kapitel 4)	Wo im Drehzahlbereich sie liegt; Antriebsverluste; ob das Getriebe sie liefern kann
Drehmoment [N m]	Kraft an der Kurbelwelle; mit Gängen in Radkraft multipliziert (Kapitel 5)	Alles ohne die Drehzahl und Übersetzungen — Drehmoment ist Hebelkraft, nicht Geschwindigkeit
0–100 [s]	Traktion, Start, Getriebe, dann Leistung (Abbildung 18.1)	Überholtempo bei Geschwindigkeit (100–200); Schaltqualität; Oberflächenabhängigkeit
Leistung je Tonne [kW/t]	Die Steigung der Leistungsgrenze, $a = P/(mv)$	Widerstandsfläche, Getriebe, Traktion; wo das Leistungsband liegt
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	$P_{\text{avail}} = \frac{1}{2}\rho c_d A v^3 + f_{rr} m g v$ (Kapitel 13)	Wie man zu 90% davon kommt; ob Getriebe oder Limiter sie deckelt
Bremsweg 100–0 [m]	$v^2/(2a)$ mit $a \approx \mu g$: meist Reifen und ABS (Kapitel 9)	Wärmefestigkeit beim fünften Stopp; Pedalgefühl; Nassverhalten
Querbeschleunigung [g]	μ auf einer Kreisbahn bei einem Radius und einer Geschwindigkeit (Kapitel 10)	Balance (Unter- vs. Übersteuern, Kapitel 11); Verhalten bei Lastwechseln
c_d	Form-Effizienz der Luftströmung (Kapitel 12)	Nichts allein — nur $c_d A$ setzt die Kraft
Masse [kg]	Trägheit in jeder Gleichung dieses Buches	Wo sie sitzt: Schwerpunkthöhe (Kapitel 8), Rotation (Kapitel 16)
Reifengröße	Kontaktfläche, effektiver Getrieberadius, Flankenfeder (Kapitel 7)	Mischung und Konstruktion — die Chemie, die μ setzt
Batterie [kWh]	Gespeicherte Energie; Reichweite $\approx E/(P/v)$ (Kapitel 17)	Nutzbar vs. Brutto-Kapazität; Ladeleistung; Kälte-Verlust
Effizienz [kWh/100 km]	Die Summe aller Verluste: Luft, Rollen, Antriebsstrang, Nebenverbraucher	Bei welcher Geschwindigkeit und Temperatur sie gemessen wurde
Abtriebsangaben	$F_L = \frac{1}{2}\rho c_L A v^2$ (Kapitel 14)	Die Geschwindigkeit der Behauptung und die Widerstands-Rechnung im Anhang

Garagenphysik

Entschlüsseln Sie die Zeile von Auto B: „330 kW, 580 N m, 0–100 in 4,5 s, $v_{\text{max}} = 250$ km/h (limitiert).“ Leistung und Masse sagen, dass die Leistungsgrenze $a = 290/1,8/27,8 \approx 5,8$ m/s² bei 100 km/h zulässt. Drehmoment 580 N m $\times$ erste Übersetzung $12,24 \div 0,32$ m ≈ 22 kN an den Rädern — jenseits der 15,9 kN, die die Reifen übertragen können ($\mu m g$), also ist der Start traktionsbegrenzt, genau wie Abbildung 18.1 vorhersagt. Und „(limitiert)“ sagt Ihnen, dass die Physik ≈ 326 (Kapitel 13) zulassen würde — die Zahl auf dem Datenblatt ist die eines Anwalts, nicht eines Ingenieurs.

Mythos vs. Physik

Mythos: „Mehr Leistung bedeutet immer ein schnelleres Auto.“ **Physik:** Schneller *wo*? Mehr Leistung hebt die Leistungsgrenze, also verbessert sie die Beschleunigung bei hoher Geschwindigkeit und die Höchstgeschwindigkeit. An der Traktionsgrenze bringt sie nichts — kein zusätzliches Kurvenfahren, kein zusätzliches Bremsen und kein zusätzliches Startvermögen, sobald der Start traktionsbegrenzt ist (unterhalb dieser Grenze verkürzt mehr Leistung tatsächlich den Sprint). Der vollständige Satz lautet: Mehr Leistung macht ein Auto genau dort schneller, wo Leistung der bindende Engpass ist — und nirgendwo sonst.

Probieren Sie es gedanklich

Zwei Autos melden identische 0–100-Zeiten. Eines ist eine 300 kW-Allradlimousine; das andere ein 180 kW-Heckantriebs-Leichtbau. Welches würden Sie für einen rollenden 100–200 km/h-Zug wählen, und welches für einen engen Autocross? (Die Limousine für den Zug — dort regiert die Leistungsgrenze. Der Leichtbau für den Autocross — niedrige Geschwindigkeiten liegen oft an der Traktionsgrenze, und weniger Masse heißt weniger mv^2/r , die die Reifen in jeder Kurve liefern müssen.)

Streckenrand-Notiz

Rennserien kennen dieses Kapitel auswendig: BoP-Reglements justieren Leistung, Masse und manchmal Flügelwinkel, um das Feld zusammenzudrücken — denn keine einzelne Zahl kontrolliert die Rundenzeit, die Regulierer justieren mehrere Physik-Regler zugleich. Wenn ein Auto trotz schlechterer Eckdaten gewinnt, suchen Sie die Achse, die niemand veröffentlicht hat: Reifen-Aufwärmung, Widerstand oder wie tief im Rennen die Bremsen noch funktionieren.

18.4 Was das für Autos bedeutet

Sie können jetzt ein Datenblatt so lesen, wie es seine Autoren heimlich tun: als eine Reihe von Hinweisen auf Kräfte, Energien und Einschränkungen, jeweils mit einem Verfallsdatum. Leistung ist Potenzial, Drehmoment ist Hebelkraft, 0–100 ist eine Traktionsgeschichte, Höchstgeschwindigkeit ist eine Aero-Getriebe-Geschichte, und jede „g“-Zahl ist eine Reifenrezension in Verkleidung. Die Zahlen haben nie gelogen; sie haben nur nie behauptet, die ganze Geschichte zu erzählen. Das verlangte Physik — die Sie nun haben.

Eine Gleichung zum Merken

$$P = F v$$

Der Generalschlüssel des Datenblatts: Leistung ist Kraft mal Geschwindigkeit, also ist jede Leistungszahl diese Identität, betrachtet aus einem anderen Winkel — Traktion bei niedrigem v , Würfel-Gesetz des Widerstands bei hohem v , Getriebe dazwischen.

18.5 In einer Minute

Das Kapitel in fünf Aufzählungspunkten:

- 0–100 und 100–200 sind in starken Autos verschiedene Physik: Traktion und Getriebe unten, Leistung und Widerstand oben — der Übergang wandert mit dem Auto.

- Leistung je Tonne ordnet das Sprinttempo; die Höchstgeschwindigkeit setzt Leistung gegen Widerstandsfläche; keine der beiden Zahlen ersetzt die andere.
- Bremswege und Querschleunigung sagen oft mehr über die Reifen als über den Namen auf der Motorhaube.
- Drehmoment ohne Drehzahl und Übersetzungen ist Hebelkraft ohne Drehpunkt — $P = Fv$ ist der Schlüssel, der sie verbindet.
- Lesen Sie jede Spezifikation als eine Projektion: eine Achse einer hochdimensionalen Maschine.

Kapitel 19

Epilog — Die nächste Fahrt wird sich anders anfühlen

Nehmen Sie eine gewöhnliche Fahrt: aus der Einfahrt, die Straße hinunter, auf die Hauptstraße, durch einen Kreisverkehr, über einen Hügel und ein Stück Autobahn. Nichts Besonderes — außer dass Sie sie jetzt mit anderen Augen betrachten.

Der Start aus der Einfahrt ist nicht mehr bloße Bewegung: Die Straße schiebt die Reifen nach vorn, die Masse widersetzt sich der Beschleunigung, und der Sitz beschleunigt Ihren Körper. Das Bremspedal vor dem Kreisverkehr ist ein Energiewandler, der die Geschwindigkeit des Autos in Wärme in den Bremsscheiben verwandelt. Mitten in der Kurve spüren Sie, wie sich die Last verlagert und wie die Reifen über ihre kleinen Kontaktflächen mit dem Asphalt verhandeln. Auf der Autobahn stemmt sich das Auto gegen eine unsichtbare Luftwand, deren Widerstand mit dem Quadrat Ihrer Geschwindigkeit wächst, während die benötigte Leistung mit deren dritter Potenz steigt. Über der Kuppe des Hügels speichern die Federn Energie, die die Dämpfer anschließend geduldig abbauen. Darunter verwandelt der Antriebsstrang — Kraftstoff oder Batterie, das ist für diesen Teil fast egal — gespeicherte Energie in Kraft an der Straße und gibt bei jedem Schritt einen Teil davon als Wärme ab.

Das ist der eigentliche Inhalt jedes Datenblatts und jedes Stammtischstreits: keine isolierten Zahlen, sondern eine kohärente Balance aus Kraft, Energie, Impuls, Rotation, Wärme, Luftströmung und Regelung.

Ein Auto ist nicht bloß ein Objekt, das eine Straße hinunterfährt. Es ist eine ständig wechselnde Balance aus Kraft, Energie, Impuls, Rotation, Wärme, Luftströmung und Regelung. Sobald Sie das sehen, wird selbst eine Routinefahrt zu einem kleinen Physik-Experiment.

Genießen Sie das Experiment. Und behalten Sie beide Hände am Lenkrad, während Sie darüber nachdenken.

Teil VIII

Referenzanhänge

Überblick Anhänge

Kompakte Schnellreferenzen für alles, was der Haupttext verwendet.

- **Anhang A** versammelt die fünfzehn Gleichungen, die ein Auto-Enthusiast kennen sollte, jeweils mit Symbolen, einer Bedeutung in einem Satz und einer Auto-Anwendung.
- **Anhang B** macht Einheiten schmerzfrei: km/h und m/s, kW, PS und hp, Nm, Joule und kWh, g und U/min.
- **Anhang C** führt durch zehn Überschlagsrechnungen für Autos, Schritt für Schritt.
- **Anhang D** ist ein alphabetischer Index der Mythen und Vereinfachungen, die im Buch korrigiert werden.

Anhang A

Die 15 Gleichungen, die ein Auto-Enthusiast kennen sollte

Fünfzehn Gleichungen tragen das gesamte Buch. Jeder Eintrag nennt die Beziehung, ihre Symbole, eine Bedeutung in einem Satz und wo sie im Auto ihren Dienst tut.

1. **Mittlere Geschwindigkeit.** $v = d/t$.

Symbole: v Geschwindigkeit [m/s], d Strecke [m], t Zeit [s].

Bedeutung: Geschwindigkeit ist pro Zeiteinheit zurückgelegte Strecke.

Auto: Jeder Tacho, jede Rundenzeit und jede Reichweitenschätzung beginnt hier (Kapitel 1).

2. **Beschleunigung.** $a = \Delta v / \Delta t$.

Symbole: a Beschleunigung [m/s²], Δv Geschwindigkeitsänderung [m/s], Δt Zeitdauer [s].

Bedeutung: Beschleunigung ist, wie schnell sich die Geschwindigkeit selbst ändert — nicht die Geschwindigkeit, die Sie haben.

Auto: Der 0–100 km/h-Sprint ist diese Gleichung mit Stoppuhr (Kapitel 1).

3. **Newtons zweites Gesetz.** $F = ma$.

Symbole: F resultierende Kraft [N], m Masse [kg], a Beschleunigung [m/s²].

Bedeutung: Beschleunigung braucht Kraft, und Masse setzt den Preis.

Auto: Der Schub in Ihrem Rücken, Lastverlagerung, Bremsen — überall (Kapitel 2).

4. **Impuls.** $p = mv$.

Symbole: p Impuls [kg m/s].

Bedeutung: Bewegung hat eine Größe; sie zu ändern erfordert Kraftstoß, Kraft über Zeit.

Auto: Unfallkräfte, und warum Masse und Geschwindigkeit zusammen entscheiden, wie schwer das Anhalten ist (Kapitel 3).

5. **Kinetische Energie.** $K = \frac{1}{2}mv^2$.

Symbole: K kinetische Energie [J].

Bedeutung: Die Energie der Bewegung wächst mit dem *Quadrat* der Geschwindigkeit.

Auto: Bremswege, Unfallheftigkeit, Batterie-Bilanzierung im EV (Kapitel 3).

6. **Leistung als Kraft mal Geschwindigkeit.** $P = Fv$.

Symbole: P Leistung [W].

Bedeutung: Kraft bei Geschwindigkeit zu liefern kostet Leistung proportional zu beidem.

Auto: Warum die Beschleunigung mit steigender Geschwindigkeit nachlässt und warum gleichmäßiges Fahren eine Leistungsrechnung erfordert (Kapitel 4 und 17).

7. **Leistung aus Rotation.** $P = \tau \omega$.

Symbole: τ Drehmoment [N m], ω Winkelgeschwindigkeit [rad/s].

Bedeutung: Drehmoment mal Winkelgeschwindigkeit ergibt Leistung.

Auto: Das ehrliche Lesen jeder Drehmoment- und Leistungskurve eines Motors (Kapitel 4).

8. **Reibungsgrenze.** $F_{\max} \approx \mu N$.

Symbole: μ Reibungskoeffizient [-], N Normalkraft [N].

Bedeutung: Der Grip wird durch die Kraft begrenzt, mit der die Oberflächen aufeinandergepresst werden.

Auto: Jede Beschleunigungs-, Kurven- und Bremsgrenze wird letztlich durch diese Reibungsgrenze bestimmt (Kapitel 7).

9. **Kurvenbeschleunigung.** $a_{\text{lat}} = v^2/r$.

Symbole: r Kurvenradius [m].

Bedeutung: Lenken *ist* Beschleunigung, und sie wächst mit der Geschwindigkeit im Quadrat.

Auto: Warum dieselbe Kurve bei 50 ruhig und bei 100 unmöglich ist (Kapitel 10).

10. **Aerodynamischer Widerstand.** $F_D = \frac{1}{2} \rho c_d A v^2$.

Symbole: ρ Luftdichte [kg/m³], $c_d A$ Widerstandsfläche [m²].

Bedeutung: Die Luft drückt mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zurück.

Auto: Autobahn-Verbrauch und die Form jedes Karosserieblechs (Kapitel 12).

11. **Aerodynamische Leistung.** $P_{\text{aero}} = F_D v = \frac{1}{2} \rho c_d A v^3$.

Bedeutung: Die *Leistung*, die die Luft verlangt, wächst mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit.

Auto: Höchstgeschwindigkeit, und warum die letzten km/h am meisten kosten (Kapitel 13).

12. **Hookesches Gesetz.** $F = -k x$.

Symbole: k Federrate [N/m], x Verschiebung [m].

Bedeutung: Eine Feder drückt proportional zur Eindrückung zurück — und speichert dabei die Energie.

Auto: Federung, Karosseriekontrolle und warum Dämpfer existieren (Kapitel 15).

13. **Rotationsenergie.** $K_{\text{rot}} = \frac{1}{2} I \omega^2$.

Symbole: I Massenträgheitsmoment [kg m²].

Bedeutung: Rotierende Masse speichert Energie genauso wie bewegte Masse.

Auto: Räder, Schwungräder und warum der Ort der Rotation zählt (Kapitel 16).

14. **Rollbedingung.** $v = \omega R$.

Symbole: R Reifenradius [m].

Bedeutung: Ein rollendes Rad bindet seine Drehrate direkt an die Fahrgeschwindigkeit.

Auto: Getriebe-Mathematik, Tacho-Eichung, Reifengrößen (Kapitel 16).

15. **Gravitations-Potentialenergie.** $\Delta U = mgh$.

Symbole: h Höhe [m].

Bedeutung: Bergauf wird Energie gespeichert; bergab wird sie wieder frei.

Auto: Bergpässe, und warum EVs den Weg nach unten lieben (Kapitel 17).

Anhang B

Einheiten ohne Schmerz

Autogespräche mischen Einheitensysteme ohne Entschuldigung: kW hier, Pferdestärken dort, km/h auf dem Display, g im Test. Dieser Anhang ist das kleine Wörterbuch dazu. Die Physik selbst spricht eine Sprache — Meter, Kilogramm, Sekunden —, und jede der folgenden Regeln übersetzt in diese Sprache oder aus ihr heraus.

B.1 Geschwindigkeit: km/h und m/s

Die einzige Umrechnung, die es sich zu merken lohnt:

$$\text{km/h} \div 3,6 = \text{m/s}, \quad \text{m/s} \times 3,6 = \text{km/h}.$$

Anker: $36 \text{ km/h} = 10 \text{ m/s}$; $100 \text{ km/h} \approx 27,8 \text{ m/s}$; $200 \text{ km/h} \approx 55,6 \text{ m/s}$. Jede kinetische-Energie- oder Widerstandsberechnung in diesem Buch rechnet zuerst in m/s um — weil v quadriert oder kubiert auftritt, wäre es in km/h um Tausenderfaktoren daneben.

B.2 Leistung: kW, PS und hp

Das Watt ist die SI-Einheit: $1 \text{ kW} = 1000 \text{ J/s}$. Im Automobilbereich begegnen Ihnen zwei unterschiedliche Pferdestärke-Einheiten, und sie sind *nicht* ganz identisch:

- Metrische Pferdestärke (PS, *Pferdestärke*, cv, pk): $1 \text{ PS} \approx 0,735 \text{ kW}$.
- Imperiale mechanische Pferdestärke (hp): $1 \text{ hp} \approx 0,746 \text{ kW}$.

Schnelle Regeln: $\text{kW} \approx \text{PS} \times 0,735$; $\text{PS} \approx \text{kW} \times 1,36$.

Anhang C

Zehn Überschlagsrechnungen fürs Auto

Zehn Rechnungen, die Sie auf einer Serviette machen können, jede ein durchgerechnetes Beispiel einer Schlüsselgleichung des Buches. Alle verwenden die Flotte: Auto B ist die 1800-kg-Limousine ($c_d A = 0,616 \text{ m}^2$), Auto C das 2200-kg-EV mit einer 75 kWh-Batterie.

1. Mittlere Beschleunigung eines 0–100-Laufs

$a = \Delta v / \Delta t$. Umrechnung: $100 \text{ km/h} = 27,8 \text{ m/s}$. Für einen 4 s-Sprint: $a = 27,8/4 \approx 6,9 \text{ m/s}^2 \approx 0,7 g$. Fühl-Check: zwei Drittel dessen, was die Schwerkraft im freien Fall mit Ihnen macht, horizontal. (Kapitel 1)

2. Radkraft aus Drehmoment und Getriebe

$F = \tau \cdot i / R$. Mit 360 N m Motordrehmoment, der Gesamtübersetzung des ersten Gangs $i = 12,24$ (Kapitel 5) und dem Reifenradius 0,32 m: $F = 360 \times 12,24 / 0,32 \approx 13,8 \text{ kN}$. Vergleichen Sie mit der Traktionsgrenze $\mu mg = 0,9 \times 1800 \times 9,81 \approx 15,9 \text{ kN}$: Ein kräftiger erster Gang schöpft fast das gesamte Reibungsbudget aus. (Kapitel 5 und 7)

3. Kinetische Energie bei 200 km/h

$K = \frac{1}{2}mv^2$ mit $v = 55,6 \text{ m/s}$: $K = 0,5 \times 1800 \times 55,6^2 \approx 2,78 \text{ MJ} \approx 0,77 \text{ kWh}$. Von 200 auf 100 abzubremsen wirft drei Viertel davon ab — das Quadrat der Geschwindigkeit ist kein Slogan, es ist Arithmetik. (Kapitel 3)

4. Skalierung des Bremswegs

$s = v^2 / (2\mu g)$. Bei 0,8 g: $100 \text{ km/h} \rightarrow 49 \text{ m}$; Verdopplung auf 200 vervierfacht es: 196 m. Derselbe Vierfachfaktor gilt für die *Energie* — die Bremsen kümmern sich kaum darum, welche Größe Sie betrachten. (Kapitel 9)

5. Querbeschleunigung in einer Kurve

$a_{\text{lat}} = v^2 / r$. Durch eine 50 m-Kurve bei 76 km/h (21,1 m/s): $a = 21,1^2 / 50 \approx 8,9 \text{ m/s}^2 \approx 0,91 g$. Das entspricht genau der Gripgrenze von Auto B auf trockenem Asphalt — Kurvenradius und Geschwindigkeit wurden dafür passend gewählt (Abbildung 14.3 zeigt, was Abtrieb zusätzlich ermöglicht). (Kapitel 10)

6. Widerstandskraft bei 200 km/h

$F_D = \frac{1}{2}\rho c_d A v^2 = 0,5 \times 1,2 \times 0,616 \times 55,6^2 \approx 1\,140\text{ N}$ — über sechsmal der Rollwiderstand (177 N). Die Luft ist der Hauptgegner geworden. (Kapitel 12)

7. Aerodynamische Leistung bei 250 km/h

$P = F_D v$ mit $v = 69,4\text{ m/s}$: $F_D = 0,3696 \times 69,4^2 \approx 1\,780\text{ N}$, also $P \approx 124\text{ kW}$ nur für die Luft — 136 kW inklusive Rollen. Bei 125 km/h braucht dasselbe Auto ein Achtel der aerodynamischen Leistung: die dritte Potenz am Werk. (Kapitel 13)

8. Energiekosten eines Bergpasses

$\Delta U = mgh = 1\,800 \times 9,81 \times 500 \approx 8,8\text{ MJ} \approx 2,5\text{ kWh}$, zusätzlich zu den Straßen- und Luftkosten. Für Auto C sind das $\approx 3,3\%$ seiner Batterie allein für die Höhe — bevor ein einziger Meter Straße bezahlt wird. (Kapitel 17)

9. Rotationsenergie der Räder

$K_{\text{rot}} = \frac{1}{2}I\omega^2$ pro Rad mit $I \approx 1,43\text{ kg m}^2$, $\omega = v/R = 86,8\text{ rad/s}$ bei 100 km/h: $\approx 5,4\text{ kJ}$ jedes, $\approx 22\text{ kJ}$ für vier — etwa 3% der Translationsenergie von 690 kJ bei dieser Geschwindigkeit. Klein, real, und der Grund, warum Leichtbau-Räder gespürt statt gemessen werden. (Kapitel 16)

10. Was ein EV beim Abstieg zurückgewinnt

Der 500 m-Pass gibt 8,8 MJ zurück; bei einem realistischen Wirkungsgrad von $\sim 60\%$ für Motor, Wechselrichter und Batterie speichert Auto C davon $\approx 5,3\text{ MJ} \approx 1,5\text{ kWh}$ — etwa 7 km Reichweite, die die Schwerkraft zurückgibt. Beim Verbrenner werden die entsprechenden Megajoule am selben Berg zu Wärme in den Bremsen. (Kapitel 9 und 17)

Anhang D

Mythen-Index

Eine alphabetische Liste der Behauptungen, die dieses Buch korrigiert, jeweils mit der kurzen Antwort und dem Kapitel mit der langen.

„Allradantrieb gibt mehr Grip.“

Allradantrieb *nutzt* den Grip besser: Er verteilt das Traktionsbudget auf vier Reifen statt zwei, sodass die Beschleunigung weniger pro Kontaktfläche beansprucht. Das Budget selbst, μN , bleibt unverändert — Allrad lenkt und bremst auf denselben Reifen nicht besser. (Kapitel 7)

„Größere Bremsen bedeuten kürzere Bremswege.“

Sobald die Bremsen die Räder blockieren (oder ABS auslösen), setzt der *Reifen* — nicht der Sattel — die Grenze. Größere Bremsen bringen vor allem *Standfestigkeit*: Wärmekapazität gegen Fading beim fünften Stopp, nicht einen kürzeren ersten. (Kapitel 9)

„Die Fliehkraft eines Autos wirft Sie in der Kurve nach außen.“

Es gibt keine nach außen gerichtete Kraft am Auto: Die einzige horizontale Kraft sind die Reifen, die *nach innen* drücken und mv^2/r liefern. Was Sie spüren, ist Ihr Körper, der geradeaus weiter will, während das Auto um ihn herum dreht. (Kapitel 2 und 10)

„Abtrieb ist kostenloser Grip.“

Abtrieb ist bezahlter Grip: Flügel bringen für jedes Newton Abtrieb zusätzlichen Widerstand mit, und der Motor muss diesen Widerstand auf der Geraden nach dem Würfelgesetz überwinden. Die dafür eingesetzte Leistung ist in Kurven meist gut angelegt. (Kapitel 14)

„Elektroautos sind wegen ihres Drehmoments schnell.“

Sofortige *Reaktion* ist real, aber was die Beschleunigung trägt, ist Leistung, $P = Fv$ — und Elektroautos sind oft früh leistungs- und drehzahlbegrenzt, mit Einzelgetriebe, das die Höchstgeschwindigkeit kappt. Die Drehmomentkurve erklärt also nur einen Teil der Geschichte. (Kapitel 6 und 13)

„Schwerere Autos sind sicherer, weil sie schwerer sind.“

Schwerere Autos tragen mehr kinetische Energie ($\frac{1}{2}mv^2$) und mehr Impuls in jeden Stopp und Unfall. Bei einer Kollision zweier Fahrzeuge begünstigt die größere Masse tendenziell die Insassen des schwereren Fahrzeugs — zulasten der Insassen des leichteren. Brems- und Kurvengrenzen ($F \approx \mu mg$) sind in erster Ordnung dagegen massenblind. Sicherheit lebt in Struktur und Systemen, nicht auf der Waage. (Kapitel 3 und 9)

„Viel Drehmoment bedeutet ein schnelles Auto.“

Drehmoment ist Hebelkraft; ohne Drehzahl sagt es nichts über Geschwindigkeit. $P = \tau\omega$ verbindet beides zur Größe, die Autos beschleunigt, und die Gänge übersetzen das

Drehmoment in Radkraft. Ein Diesel mit 500 Nm kann langsamer sein als ein Benziner mit 350. (Kapitel 4)

„Niederquerschnittsreifen fahren immer besser.“

Sie sprechen direkter an, weil sich die Flanke weniger biegt. Gleichzeitig fehlt oft die Nachgiebigkeit, die die Kontaktfläche auf realen Straßen sauber auf dem Asphalt hält; häufig kommen sie zudem mit straffer abgestimmten Fahrwerken. Das ist ein Kompromiss, kein automatisches Upgrade. (Kapitel 7 und 15)

„Mehr Leistung bedeutet immer ein schnelleres Auto.“

Mehr Leistung hilft dort, wo sie der begrenzende Faktor ist: oberhalb der Traktionsgrenze und gegen den kubisch wachsenden Luftwiderstand. In Kurven, beim Bremsen und bei einem traktionsbegrenzten Start bringt sie dagegen nichts; dort bestimmen die Reifen die Grenze. (Kapitel 18)

„Ein Kilogramm am Rad entspricht vier im Sitz.“

Etwa 1,7, aus $I \approx 0,7 mR^2$ — Geometrie, nicht Marketing. Der größere Faktor gehört zu Teilen, die durch niedrige Übersetzungen beschleunigt werden, und die separate Strafe der ungefederten Masse ist eine eigene Fahrwerksfrage. (Kapitel 16)

„Ein Spoiler ist gleich Abtrieb.“

Nur wenn er Luft nach unten bewegt: Die meisten Straßenauto-Spoiler heben lediglich den *Auftrieb* auf, und viele sind Schmuck. Abtrieb gehorcht $\frac{1}{2}\rho c_L A v^2$ — null bei Stadtgeschwindigkeit, was auch immer die Broschüre sagt. (Kapitel 14)

„Steifes Fahrwerk bedeutet besseres Handling.“

Steifer bedeutet *flacher*, was sich auf glattem Asphalt wie Grip anfühlt. Auf realen Straßen entlädt übermäßige Steifigkeit die Reifen tausende Male pro Minute und kostet Grip. Dämpfung, nicht Steifigkeit, zähmt die Resonanz. (Kapitel 15)

„Höchstgeschwindigkeit dreht sich nur um Pferdestärken.“

Die benötigte Leistung ist $\frac{1}{2}\rho c_d A v^3$: 10% weniger Widerstandsfläche ermöglichen eine ähnliche Steigerung der Höchstgeschwindigkeit wie 10% mehr Leistung — dauerhaft und mit Kraftstoffersparnis obendrein. Getriebe und Begrenzer können sie unter diesen Wert drücken. (Kapitel 13)

„Breitere Reifen geben automatisch mehr Reibung.“

Coulombs μN hat keinen Flächenterm; Breite hilft durch Wärmemanagement, Druckverteilung und Verschleiß, nicht durch eine simple Vergrößerung des Grips. Die Gummimischung bestimmt maßgeblich den Reibwert μ ; die Breite beeinflusst vor allem diese praktischen Eigenschaften. (Kapitel 7)

Glossar

Kurze, alphabetisch geordnete Definitionen zum schnellen Nachschlagen. Querverweise zeigen auf die Kapitel, in denen ein Konzept prominent vorkommt. (Dieses Glossar wächst zusammen mit dem Manuskript.)

Beschleunigung Änderungsrate der Geschwindigkeit, $a = \Delta v / \Delta t$; umfasst auch Bremsen und Lenken, nicht nur schneller werden; siehe Kapitel 1.

Luftdichte Masse pro Volumen Luft, $\rho \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$ auf Meeresniveau; skaliert die aerodynamischen Kräfte; siehe Kapitel 12.

Allradantrieb (AWD) Antriebsstrang, der alle vier Räder antreiben kann; verteilt die Antriebskraft, schafft aber keine zusätzliche Reibung; siehe Kapitel 7.

Bremsweg Weg, der beim Verzögern unter Bremsung zurückgelegt wird; wächst mit dem Quadrat der Geschwindigkeit; siehe Kapitel 9.

Schwerpunkt (SP) Die massengemittelte Position des Autos; seine Höhe steuert die Lastverlagerung; siehe Kapitel 8.

Reibungskoeffizient Dimensionslose Größe μ im ersten Modell $F_{\max} \approx \mu N$; nützliche Näherung, kein vollständiges Reifenmodell; siehe Kapitel 7.

Kontaktfläche Der kleine Bereich, in dem jeder Reifen tatsächlich die Straße berührt; der einzige Ort, an dem Antriebs-, Brems- und Lenkkräfte ins Auto eintreten; siehe Kapitel 7.

Dämpfer Fahrwerkselement („Stoßdämpfer“), das der Bewegung widersteht und Schwingungsenergie in Wärme verwandelt; bestimmt, wie lange Schwingungen dauern; siehe Kapitel 15.

Abtrieb Aerodynamische Kraft, die das fahrende Auto zur Straße drückt; wächst mit dem Quadrat der Geschwindigkeit und kostet üblicherweise Widerstand; siehe Kapitel 14.

Widerstandsfläche Das Produkt $c_d A$ aus Luftwiderstandsbeiwert und Stirnfläche; die Größe, die tatsächlich die aerodynamische Kraft setzt; siehe Kapitel 12.

Luftwiderstandsbeiwert Dimensionslose Zahl C_D , die bewertet, wie gleitfähig eine Form ist; multipliziert mit der Stirnfläche A setzt sie den aerodynamischen Widerstand; siehe Kapitel 12.

Reibungskreis Anschauliches Budget der kombinierten Längs- und Querkraftfähigkeit eines Reifens; siehe Kapitel 7.

Pferdestärke (PS) Metrische Einheit der Leistung, $1 \text{ PS} \approx 0,735 \text{ kW}$; die imperiale „hp“ weicht leicht ab; siehe Kapitel 4 und Anhang B.

Kinetische Energie Energie der Bewegung, $K = \frac{1}{2} m v^2$; die Größe, die Bremsen absorbieren müssen; siehe Kapitel 3 und 9.

Lastverlagerung Änderung der Reifen-Normalkräfte unter Beschleunigung oder Bremsung, proportional zu mah/L ; das Gewicht des Autos selbst bewegt sich nicht; siehe Kapitel 8.

Massenträgheitsmoment Rotationsträgheit um eine Achse, I ; erscheint in $K_{\text{rot}} = \frac{1}{2}I\omega^2$ und im Gierverhalten; siehe Kapitel 11 und 16.

Impuls Masse mal Geschwindigkeit, $p = mv$; die Größe, die Kollisionen austauschen; siehe Kapitel 3.

Normalkraft Kontaktkraft senkrecht zur Straße, N ; setzt zusammen mit μ das Gripbudget; siehe Kapitel 7.

Über-/Untersteuern Verhältnis der seitlichen Gripreserven von Vorder- und Hinterachse: Das Auto dreht stärker oder schwächer, als die Lenkung vorgibt; siehe Kapitel 11.

Leistung Arbeit pro Zeit, $P = Fv$ für ein fahrendes Auto und $P = \tau\omega$ für eine rotierende Welle; siehe Kapitel 4.

Leistung je Tonne Leistung geteilt durch Fahrzeugmasse [kW/t]; bestimmt die Höhe der Beschleunigungsgrenze bei hohen Geschwindigkeiten, $a = P/(mv)$; siehe Kapitel 18.

Rekuperatives Bremsen Rückgewinnung eines Teils der kinetischen Energie als elektrische Energie beim Verzögern; begrenzt durch Leistung, Batterie und Traktion; siehe Kapitel 6 und 9.

Resonanz Aufschaukelung von Bewegung, wenn Störungen bei der Eigenfrequenz eines Systems eintreffen; bei Fahrwerken um 1–1,5 Hz; gezähmt durch Dämpfung, nicht durch Steifigkeit; siehe Kapitel 15.

Rollwiderstand Kraft, die dem Rollen widersteht, ungefähr $F_{rr} \approx C_{rr}mg$; dominiert von der Reifenverformung; siehe Kapitel 17.

Schräglaufwinkel Winkel zwischen der Zeigerichtung eines Rads und seiner tatsächlichen Bewegungsrichtung; die Quelle der Reifen-Querkräfte; siehe Kapitel 11.

Gefederte/ungefederte Masse Oberhalb der Fahrwerksfedern getragene Masse (Karosserie) gegenüber unterhalb (Räder, Bremsen, Nabe); geringe ungefederte Masse hält die Reifen treu zur Straße; siehe Kapitel 15.

Drehmoment Drehkraft an einer Welle, gemessen in Nm; mit Getriebe multipliziert wird sie zur Radkraft; siehe Kapitel 4 und 5.

Traktionsgrenze Die maximale Kraft, die ein Reifen vor dem Rutschen übertragen kann; siehe Kapitel 7.

Geschwindigkeit Änderungsrate der Position, mit Richtung; Schnelligkeit ist deren Betrag; siehe Kapitel 1.

Raddrehmoment Drehmoment, das nach Getriebe und Achsantrieb an den angetriebenen Rädern ankommt; geteilt durch den Reifenradius ergibt es die Antriebskraft; siehe Kapitel 5.

Gier Drehung des Autos um seine Hochachse; siehe Kapitel 11.

Bibliographie und Anmerkungen

Diese kompakte Bibliographie bevorzugt lesbare, weit verfügbare Quellen. Jeder Eintrag enthält eine kurze Anmerkung zu Umfang und Stil. Die interne technische Grundlage dieses Buches ist der physikalische Begleitband; die ingenieurwissenschaftlichen Titel unten sind Standardreferenzen für Leser, die tiefer einsteigen möchten.

Interne Referenz

- **Y. J. Hilpisch, *Newtonian Physics — A Self-Contained Introduction with Mathematical Foundations* (Begleitband).** Entwickelt die Mechanik, die im gesamten Buch verwendet wird — Kinematik, Newtons Gesetze, Reibung und Widerstand, Arbeit, Energie und Leistung, Impuls, Drehmoment und Rotation, Schwingungen und Dimensionsanalyse — mit vollständigen mathematischen Herleitungen und zusätzlichen Automobil-Beispielen.

Fahrdynamik

- **T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE International.** Die Standard-Einführung für Ingenieure in Beschleunigen, Bremsen, Lenken und Fahrwerk; der natürliche nächste Schritt nach diesem Buch.
- **W. F. Milliken und D. L. Milliken, *Race Car Vehicle Dynamics*, SAE International.** Tief, praktisch und datengetrieben; die Referenz für Lastverlagerung, Reifen und Gierverhalten am Limit.
- **G. Genta, *Motor Vehicle Dynamics: Modeling and Simulation*, World Scientific.** Eine systematische, modellbasierte Behandlung, die einfache Punktmassenmodelle mit vollständiger Fahrzeugsimulation verbindet.

Reifen und Aerodynamik

- **H. B. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*, Butterworth-Heinemann.** Die definitive Darstellung, warum reale Reifen über das einfache μN -Bild hinausgehen, einschließlich Lastempfindlichkeit und Schlupf.
- **W.-H. Hucho (Hrsg.), *Aerodynamics of Road Vehicles*, SAE International.** Die klassische Ingenieur-Referenz zu Widerstand, Auftrieb und aerodynamischem Design von Autos.
- **J. Katz, *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, Bentley Publishers.** Zugänglich und anschaulich; hervorragend zu Flügeln, Abtrieb und dem Zielkonflikt zwischen Abtrieb und Widerstand.

Antriebsstrang und Energie

- **Bosch Automotive Handbook, Wiley.** Die enzyklopädische Schreibtisch-Referenz für alles von den Verbrennungsgrundlagen bis zu Fahrerassistenzsystemen.
- **J. Larminie und J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, Wiley.** Klare Behandlung von Batterien, Elektromotoren und der Energiebilanz von EVs.

Physik-Hintergrund

- **R. Feynman, R. Leighton und M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Bd. I.** Große Perspektiven auf Energie, Bewegung und Kraft; unerreicht für Intuition.
- **D. Morin, *Introduction to Classical Mechanics*.** Anspruchsvoll und geistreich; hervorragend geeignet, um die Ideen dieses Buches in Rechenpraxis zu überführen.

Hinweis

Dieses Buch wird ausschließlich zu allgemeinen Informations- und Unterhaltungszwecken bereitgestellt. Der Text, die Abbildungen und die durchgerechneten Beispiele wurden nach bestem Wissen und Gewissen erstellt, um die Ideen der Physik zugänglich und unterhaltsam zu machen; sie stellen keine professionelle, wissenschaftliche, ingenieurtechnische oder pädagogische Beratung dar und sollten nicht als Ersatz für fachkundige Unterweisung, begutachtete Lehrbücher oder Ihre eigenen sorgfältigen Berechnungen herangezogen werden. Obwohl alle angemessenen Anstrengungen unternommen wurden, um Genauigkeit und Klarheit sicherzustellen, übernehmen Autor und Verlag keine Gewähr — weder ausdrücklich noch stillschweigend — für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Eignung für einen bestimmten Zweck des in diesem Band enthaltenen Materials. Die Leserinnen und Leser übernehmen die volle Verantwortung für alle Schlussfolgerungen, die aus dem hier präsentierten Material gezogen werden, oder für Handlungen, die daraufhin unternommen werden.

Alle in diesem Buch zitierten Fahrzeugzahlen — Massen, Leistungen, Drehmomente, Luftwiderstandsbeiwerte, Beschleunigungen und Bremswege — sind illustrative Werte für generische Archetypen, keine Spezifikationen realer Serienfahrzeuge. Nichts in diesem Buch ist Fahrunterricht oder Sicherheitsberatung: Die Physik erklärt, was Autos tun, nicht was Sie tun sollten. Fahren Sie stets innerhalb Ihrer Fähigkeiten, befolgen Sie die Verkehrsregeln und konsultieren Sie die Dokumentation des Fahrzeugherstellers sowie qualifizierte Fachleute für jede Modifikation, Wartung oder Sicherheitsfrage.

Recherche, Strukturierung, Ausarbeitung und Visualisierungen wurden durch verschiedene LLMs als Co-Schreibwerkzeug unter menschlicher Anleitung unterstützt.