

Sicherheit im Auto – Elementare Kinematik im Kontext anwenden

Rainer Müller

1 Sicherheit im Auto als Kontext

Die Verkehrssicherheit hat als Kontext im Kinematik-Unterricht der Jahrgangsstufen 10 oder 11 eine fest etablierte Tradition. Die Schülerinnen und Schüler sind in diesem Alter als beginnende aktive Verkehrsteilnehmer von dem Thema direkt betroffen. Leider trägt der Kontext oft nicht sehr weit: Mehr als Bremswege, Bremszeiten und Überholwege werden meist nicht behandelt. Hinzu kommt, dass die reine Kinematik einen der physikalisch unergiebigsten Teile der Mechanik darstellt: Das Wort „Kraft“, der zentrale Begriff der Mechanik, wird in der Regel nicht erwähnt. Nicht ohne Grund wird in der neueren physikdidaktischen Diskussion dafür plädiert, den Zugang zur Mechanik über die Dynamik zu gewinnen [1].

In diesem Artikel soll eine wesentliche Erweiterung des Kontextes „Sicherheit im Auto“ vorgestellt werden. Sicherheitsvorrichtungen wie Knautschzone, Sicherheitsgut, Airbag und Gurtstraffer lassen sich in einem einheitlichen Konzept mit den elementaren Grundlagen der Kinematik verstehen. Der Kraftbegriff steht in einer sehr „handfesten“ Weise im Mittelpunkt der Betrachtung: Die durchgehende Forderung an alle Sicherheitseinrichtungen lautet: Die Kräfte, die bei einem Unfall auf den menschlichen Körper wirken, sollen klein gehalten werden. Nach dem Newtonschen Gesetz erreicht man dies durch maximale Vergrößerung der Abbremszeit und damit des Bremsweges. Damit ist man auf der Ebene der Kinematik, mit der man die oben genannten Sicherheitseinrichtungen quantitativ diskutieren kann. Ohne dass im Text im einzelnen eigens darauf hingewiesen wird, bietet der hier vorgestellte Kontext viele Möglichkeiten, die im Physikunterricht oft schwer „unterzubringende“ prozessbezogene Kompetenz „Bewerten“ zu üben.

2 Unfall ohne Sicherheitsgurt

Ohne Sicherheitsgurte hat man bei einem Autounfall schlechte Chancen. Ein nicht angeschnallter Fahrer prallt aufgrund des Trägheitsgesetzes bei einem Unfall gegen das Lenkrad oder die Windschutzscheibe. Die Folgen eines solchen Unfalls (für das Lenkrad) in Zeiten, als man der Sicherheit im Auto noch wenig Aufmerksamkeit schenkte, sind in Abb. 1 gezeigt. Dass der Fahrer schwere Verletzungen davongetragen hat, kann man sich ausmalen.

Kann man sich bei einem Unfall mit den Armen abstützen?

So mancher denkt vielleicht trotz Anschnallpflicht noch insgeheim, dass man sich im Falle eines Unfalls ja mit den Armen am Lenkrad abstützen und die Wucht des Aufpralls abfangen könne. Zwar hört und liest man immer wieder, dass dies nicht möglich sei. Aber wohlmeinenden Ratschlägen von Erwachsenen schenkt man ja oft wenig Glauben. Mit dem Newtonschen Bewegungsgesetz kann man physikalisch begründen, warum sich auch der Stärkste mit den Armen nicht vor einem Aufprall aufs Lenkrad bewahren kann.



Abbildung 1: Ein Unfall 1958: Die Kräfte zwischen Körper und Lenkrad waren so stark, dass das Lenkrad zerbrochen ist

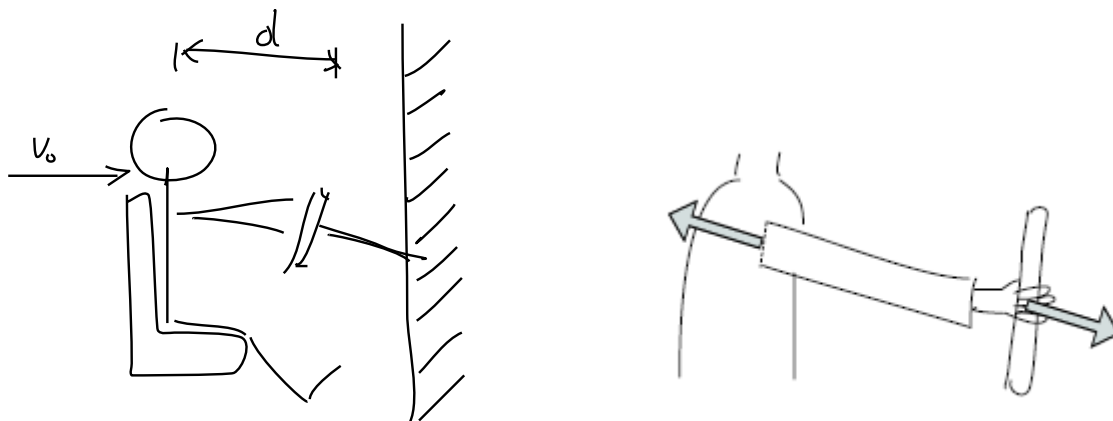


Abbildung 2 (a) Unfallsituation, (b) Die Arme üben eine Kraft auf das Lenkrad und eine Kraft auf den Rumpf aus

Sehen wir uns die in Abb. 2 (a) gezeigte Situation an: Ein Auto prallt frontal auf ein Hindernis. Wir betrachten den Zeitpunkt, zu dem das Auto (inklusive Lenkrad) schon zur Ruhe gekommen ist, die Fahrerin sich aber noch mit der ursprünglichen Geschwindigkeit v_0 weiterbewegt. Sie versucht, mit den Armen ihren Körper abzubremsen, indem sie sich am Lenkrad abstützt. Sie hofft, dass die so erzielte Beschleunigung ausreicht, um sie noch vor dem Lenkrad auf die Geschwindigkeit Null zu bringen.

Wenn wir die Newtonschen Gesetze anwenden wollen, müssen wir die wirkenden Kräfte identifizieren. Das entscheidende Element sind die Arme der Fahrerin (Abb. 2 (b)). Sie üben auf der einen Seite eine Kraft aufs Lenkrad aus (die für die Bewegung der Fahrerin irrelevant ist, denn sie wirkt ja aufs Lenkrad). Auf der anderen Seite üben sie eine Kraft auf den Rumpf der Fahrerin aus, die diese abbremst.

Aufgabe: Schätze die Kraft ab, die deine Arme maximal aufbringen können.

Lösung: Die maximale Kraft, die deine Arme aufbringen können, ist durch die Belastbarkeit der Armmuskeln begrenzt. Die Größe dieser maximalen Muskelkraft kann man durch folgende Überlegung abschätzen: Die Gewichtskraft deines Körpers beträgt $F_G = m \cdot g$. Deine Beine tragen das leicht; die Arme schaffen es gerade eben auch, etwa beim Handstand oder Liegestütz. Du wirst den Liegestütz aber kaum schaffen, wenn jemand auf deinem Rücken sitzt, wenn also die Arme die doppelte Gewichtskraft aufbringen müssten (ausprobieren!). Die maximale Kraft beim Abstützen entspricht also dem ein- bis zweifachen der Gewichtskraft des Körpers. Die entsprechende Beschleunigung beträgt (gemäß $a = F/m$) dem ein- bis zweifachen der Erdbeschleunigung g . Man sagt, dass die Stützkraft deiner Arme für eine Beschleunigung von 1–2 g ausreicht.

Kinematik des Abbremsens

Nehmen wir an, dass die Arme während des gesamten Vorgangs den Rumpf mit konstanter Kraft abbremsen. Die Beschleunigung a ist dann konstant und negativ. Die beiden einzigen Gleichungen, die wir als Voraussetzung benötigen, sind die beiden kinematischen Gleichungen

$$\begin{aligned}x(t) &= \frac{1}{2}at^2 + v_0t, \\v(t) &= at + v_0.\end{aligned}\tag{1}$$

Die Fahrerin versucht, sich so abzustützen, dass sie ihre Geschwindigkeit bis zum Lenk-
rad (also nach der Strecke $d \approx 40$ cm auf den Wert Null gebracht hat. Mit den Formeln
(1) kann man diese Bedingung wie folgt ausdrücken:

$$\begin{aligned}d &= \frac{1}{2}at_{\text{brems}}^2 + v_0t_{\text{brems}}, && \text{(in der Zeit } t_{\text{brems}} \text{ die Strecke } d \text{ zurückgelegt)} \\0 &= at_{\text{brems}} + v_0. && \text{(Geschwindigkeit Null nach der Zeit } t_{\text{brems}} \text{)}\end{aligned}\tag{2}$$

Das sind zwei Gleichungen für die bisher noch unbekannte Zeitdauer des Abbremsvor-
gangs t_{brems} und die Beschleunigung a , die dazu notwendig ist. Es sind dieselben Glei-
chungen, mit denen man üblicherweise den Bremsweg d berechnet. Es ergibt sich $t_{\text{brems}} =$
 $-v_0/a$ bzw.

$$d = -\frac{v_0^2}{2a}.$$

Auflösen dieser Gleichung nach a ergibt die Beschleunigung, die die Arme aufbringen
müssen, damit der Körper innerhalb der Strecke d abgebremst werden kann:

$$a = -\frac{v_0^2}{2d}.\tag{3}$$

Aufgabe: Berechne mit Gl. (3), ob du stark genug bist, dich bei einem Aufprall mit $v_0 =$
50 km/h = 14 m/s mit den Armen abzufangen.

Lösung: Einsetzen von v_0 und $d = 40$ cm in Gl. (3) ergibt

$$a = 240 \text{ m/s}^2 \approx 25 g.$$

Die 1–2 g , die du mit deinen Armen aufbringen kannst, müssen mit den fast 25 g vergli-
chen werden, die bei 50 km/h zum Abstützen nötig wären. Keine guten Aussichten für ei-
nen Unfall. Diese Berechnung liefert eine gute Begründung fürs Anschlallen.

Aufgabe: Schätze ab, bei welcher Geschwindigkeit man sich gerade noch mit den Händen abstützen kann.

Lösung: Löse Gl. (3) nach v_0 auf und setze $a = -1 g$ ein:

$$\begin{aligned}v_0 &= \sqrt{-2ad} \\ &= \sqrt{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,4 \text{ m}} = 2,8 \text{ m/s} = 10,1 \text{ km/h}\end{aligned}$$

Diese erschreckend niedrige Geschwindigkeit illustriert noch einmal eindrücklich, wie groß die bei einem Unfall auftretenden Beschleunigungen und Kräfte in Wirklichkeit sind. Dabei ist in unserer Rechnung noch nicht einmal berücksichtigt, dass man im Falle eines Unfalls sicher nicht sofort und optimal reagieren wird.

Manchmal sind auf Veranstaltungen zur Verkehrssicherheit sogenannte Gurtschlitten zu sehen. Dabei handelt es sich um einen Schlitten, der eine Rampe hinunterfahren kann. An ihrem Fuß wird er zur Simulation eines Unfalls aus einer Geschwindigkeit von 11 km/h abrupt gestoppt. Wenn man Gelegenheit hat, einen solchen Gurtschlitten auszuprobieren, kann man die obige Abschätzung empirisch überprüfen.

3 Das Newtonsche Bewegungsgesetz und die Sicherheit im Auto

Die grundlegende Funktionsweise aller Vorrichtungen zum Schutz der Insassen (wie Knautschzone, Sicherheitsgurt oder Airbag) kann man physikalisch aus einem einzigen Prinzip heraus verstehen: dem Newtonschen Bewegungsgesetz. Alles ist darauf ausgelegt, die Kraft auf die Insassen möglichst klein zu halten. Es soll vermieden werden, dass auf einen Körperteil eine Kraft wirkt, die so groß ist, dass es zu äußeren oder inneren Verletzungen kommt.

Sicherheitsgurte sind nicht nur dazu da, den Fahrer bei einem Unfall abzubremesen (das würde das Lenkrad schon besorgen), sondern ihn *möglichst sanft* abzubremesen. Zusätzlich sollte die auf den Körper wirkende Kraft gleichmäßig auf eine möglichst große Fläche A verteilt werden.

Dieser Leitgedanke ist ausreichend, um all das zu verstehen, was die Ingenieure in den Entwicklungsabteilungen der Automobilindustrie konstruiert haben, um uns im Fall eines Unfalls vor Verletzungen zu bewahren. Im Folgenden soll gezeigt werden, dass die Funktionsweise hoch komplexer technischer Systeme auf einfachen physikalischen Prinzipien beruht.

Wie man die Kraft auf die Insassen klein hält

Ausgehend vom Newtonschen Bewegungsgesetz

$$F = m (\Delta v / \Delta t) \quad (4)$$

kann man untersuchen, auf welche Weise man die zum Abbremsen der Insassen nötige Kraft klein halten kann. Auf manche Parameter hat man Einfluss, auf andere nicht. Zum Beispiel kann man die Masse der Insassen nicht beeinflussen. Solange die Apelle gegen das Rasen nichts nutzen, kann man auch die Größe der Geschwindigkeitsänderung nicht beeinflussen. Es bleibt (neben dem Verteilen der Kraft auf eine größere Fläche) die Abbremszeit $\Delta t = t_{\text{brems}}$ als einziger Parameter, den man durch konstruktive Maßnahmen beeinflussen kann. Die technischen Vorkehrungen zum Schutz der Insassen laufen daher auf ein Verlängern der Abbremszeit hinaus.

Merksatz: Um die Verletzungsgefahr für die Insassen bei einem Unfall möglichst gering zu halten, muss man die Zeit Δt zum Abbremsen der Körper möglichst verlängern und die auftretenden Kräfte gleichmäßig auf eine möglichst große Fläche verteilen.

Abbremszeit ohne Sicherheitsgurt

Dass in der Abbremszeit in der Tat der entscheidende Faktor liegt, erkennt man, wenn man noch einmal Abb. 1 betrachtet und sich überlegt, wie groß Δt bei diesem Unfall wohl gewesen ist. Nach dem Trägheitgesetz bewegt sich ein nicht angeschnallter Fahrer nach der Kollision ungebremst weiter, bis er auf das Lenkrad stößt. Beim Aufprall aufs Lenkrad besitzt er noch nahezu die ursprüngliche Geschwindigkeit. Der Aufprall dauert nur wenige Millisekunden. Das bedeutet Beschleunigungen von mehreren Hundert g und entsprechend große Kräfte, die auf den Körper wirken.

Wenn der Körper wie in Abb. 1 dann auch noch vom Lenkrad abgebremst wird, ist die ohnehin schon große Kraft auf eine sehr kleine Fläche konzentriert. Die Verletzungsgefahr ist bei einem solchen Unfall auch schon bei geringen Geschwindigkeiten sehr groß.

Mit Sicherheitssystemen verlängert sich die Zeit, in der die abbremsenden Kräfte auf den Körper wirken auf etwa 250 ms (eine Viertel Sekunde). Die Sicherheitssysteme sorgen dafür, dass das Abbremsen des Körpers früher beginnt und später aufhört. Gl. (4) sagt uns, dass dann die auf den Körper wirkende Kraft entsprechend kleiner ist.

4 Die Knautschzone

Das große Problem eines nicht angeschnallten Fahrer ist, dass er nur sehr lose mit dem Auto verbunden ist und deshalb nicht kontrolliert abgebremst werden kann. In den fünfziger Jahren, als man sich der Risiken beim Autofahren bewusster wurde, kamen deshalb zwei wesentliche Neuerungen auf: der Sicherheitsgurt und das Konzept der Knautschzone.

Der Nutzen des Sicherheitsgurts ist evident: Er "befestigt" den Fahrer am Sitz, so dass er zusammen mit dem Auto abgebremst wird. Gehen wir in Gedanken zunächst einmal ganz radikal vor und „fesseln“ den Fahrer so an den Sitz, dass er während des ganzen Unfalls fest auf ihm sitzenbleibt. Hilft diese Maßnahme, die Abbremszeit zu verlängern?



Abbildung 3: Frontalaufprall ohne und mit Knautschzone

Weil wir der Fahrer mit dem Auto fest verbunden haben, ist seine Abbremszeit nun die gleiche wie die des Autos, also die Zeitspanne zwischen der ersten Berührung mit dem Hindernis und dem vollständigen Stillstand. Sie hängt von der Konstruktion des Autos ab, die mehr oder weniger günstig sein kann.

Stabiler = sicherer?

Bis in die fünfziger Jahre glaubte man, ein Auto sei um so sicherer, je steifer es ist. Bei einem Unfall sollte es sich so wenig wie möglich verformen. Abb. 3 (a) zeigt einen Crashtest mit einem derart konzipierten Auto. Im Vergleich mit dem modernen Auto in Abb. 3 (b) erkennt man das sehr viel „stabilere“ Verhalten beim Aufprall auf die Wand.

Wenn man annimmt, dass sich das Auto um etwa 10 cm verformt, kann man nach Gl. (3) die auftretenden Beschleunigung berechnen (Aufgabe). Bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 50 km/h liegt sie bei etwa 100 g. Das ist schon wesentlich geringer als beim ungeschützten Aufprall aufs Lenkrad, und vor allem kontrollierter. Die Kräfte werden besser verteilt, wenn der Fahrer nicht aufs Lenkrad prallt, sondern in schonender Weise am Sitz festgeschnallt ist. Obwohl dies schon einen Fortschritt gegenüber der Abwesenheit jeglicher Sicherheitsmaßnahmen darstellt, kann man bei solch hohen Beschleunigungen noch nicht von einem Schutz des Fahrers reden. Immerhin waren die Beschleunigungen bei einem Unfall noch so groß, dass teilweise die Sitze aus den Verankerungen gerissen wurden.

Knautschzone und Abbremszeit

Mit der Entwicklung der Knautschzone änderten sich die Vorstellungen davon, wie ein sicheres Auto zu konstruieren sei, grundlegend. Man erkannte, dass es zum Schutz der Insassen genügt, wenn das Auto eine stabile Fahrgastzelle besitzt, die sich bei einem Unfall kaum verformt. Front- und Heckbereiche dürfen und sollen sich bei einem Unfall verformen, wie es in Abb. 3 (b) zu sehen ist.

Ein Auto mit Knautschzone sieht nach einem Unfall wesentlich mitgenommener aus als ein stabiles Gefährt aus der „guten alten Zeit“. Welche Vorteile hat es dann, die Karosserie vorne und hinten relativ weich zu gestalten? Durch das „Knautschen“ der Karosserie dauert es länger, bis das Auto endgültig zum Stillstand kommt. Die Abbremszeit Δt wird größer, und das bedeutet eine geringere Beschleunigung für den Fahrer.

Mit Gl. (3) lässt sich die Beschleunigung bei einem Auto mit Knautschzone ausrechnen (Aufgabe): Wenn das Auto mit 50 km/h aufprallt und dabei die Knautschzone um 50 cm deformiert wird, wird die Beschleunigung bei etwa 20 g liegen. Im Vergleich mit dem „steifen“ Auto beträgt die Beschleunigung, die der Fahrer aushalten muss, nur ein Fünftel. Das ist ein großer Unterschied, der lebensrettend sein kann.

Bei modernen Autos wird die Karosserie um 40 bis 70 cm deformiert. Bei der Entwicklung des Autos wird im Voraus in Computersimulationen und Versuchen sorgfältig geplant, wie sich die Karosserie in verschiedenen Unfallsituationen verformen soll. Um detailgetreu verfolgen zu können, auf welche Weise sich die einzelnen Karosserieteile biegen, knicken und deformieren, müssen auf leistungsfähigen Computern äußerst komplexe Simulationen durchgeführt werden. Zunehmend wird auch die Sicherheit von anderen Verkehrsteilnehmern berücksichtigt, etwa Fußgängern oder Radfahrern.

5 Sicherheitsgurte

Materialien für Sicherheitsgurte

Bisher haben wir den Fahrer gedanklich fest am den Sitz befestigt. Intuitiv vermutet man: Am besten wäre es, ihn gleichsam mit Eisenketten an den Sitz zu fesseln, denn je beständiger er dort befestigt ist, desto besser für ihn.

Das ist nicht ganz richtig. Zwar wäre die Eisenkette immer noch sehr viel besser als gar nicht auf dem Sitz gehalten zu werden. Aber wie im Fall der Knautschzone ist auch hier das völlig Starre nicht das Beste. Es geht ja darum, die Abbremszeit des Körpers zu verlängern, und das schafft man durch Verlängerung des Abbremsweges. Durch die Knautschzone haben wir 50 cm zusätzlichen Abbremsweg gewonnen. Die 40 cm bis zum Lenkrad lassen wir aber ungenutzt, wenn wir den Fahrer starr an den Sitz fesseln. Man kann diesen zusätzlichen Abbremsweg wenigstens teilweise ausnutzen, indem man eine etwas flexiblere Befestigung wählt.

In der Realität wird der Fahrer ja bekanntlich von den Sicherheitsgurten am Sitz gehalten. Mit der obigen Überlegung kann man eine physikalisch begründete Empfehlung für die Wahl des Materials geben, aus dem die Sicherheitsgurte gefertigt werden. Es soll nicht ganz unnachgiebig sein, sondern sich bei Belastung etwas dehnen können. Die industriell eingesetzten Materialien dehnen sich bei einem Unfall um bis zu 15%. Weil sie das nur einmal können, soll man die Sicherheitsgurte nach einer entsprechenden Belastung ersetzen.

Beim Entwurf des Rückhaltesystems wird man aus Sicherheitsgründen natürlich nicht die vollen 40 cm ausnutzen können. Man muss ja auch berücksichtigen, dass verschiedene Fahrer durch ihre verschiedenen Massen die Gurte unterschiedlich dehnen. Aber wenn man es durch richtige Wahl des Gurtmaterials schafft, den Gesamt-Abbremsweg des Fahrerkörpers von 50 cm auf 70 cm zu erhöhen, hat man die Beschleunigung, die er aushalten muss, auf $50/70 = 70\%$ der ursprünglichen Belastung vermindert.

Moderne Autos verlassen sich für diese Aufgabe oft nicht allein auf die Dehnbarkeit des Materials, sondern besitzen einen **Gurtkraftbegrenzer**. Er „verteilt“ die Kraft, die der Sicherheitsgurt auf den Körper ausübt, über eine größere Zeitspanne, indem er kontrolliert Gurtband freigibt.

Automatikgurte

Das technisch optimale Rückhaltesystem bestünde nach dem bisher Erarbeiteten darin, den Fahrer mit einem einigermaßen dehnbaren Material am Sitz festzubinden, wobei der Körper möglichst großflächig erfasst werden soll (um die auftretenden Kräfte möglichst gleichmäßig zu verteilen). Statt ihn mit Eisenketten anzubinden sollten wir ihn also lieber mit einer Art Plastik-Frischhaltefolie am Sitz festwickeln.

Leider ist das Einwickeln in Frischhaltefolie der Bewegungsfreiheit abträglich, und so hätte ein solches System wenig Chancen, sich auf dem Markt durchzusetzen. Die Dreipunkt-Automatikgurte entspringen einem Kompromiss zwischen Bewegungsfreiheit und Sicherheit. Ihre geringe Fläche wird zum Teil dadurch kompensiert, dass die Kräfte auf relativ belastbare Stellen des Körpers ausgeübt werden. Sie blockieren nur im Fall großer Beschleunigungen und stören deshalb den Fahrer normalerweise nicht sehr.

Der Blockierungsmechanismus: Das Trägheitsgesetz wird wieder gebraucht

Das Gurtband ist auf einer Spindel aufgewickelt. Im Normalbetrieb wird Gurtband freigegeben, wenn sich der Fahrer nach vorn beugt. Durch Federkraft wird es wieder zurückgezogen. Allerdings soll bei einem Unfall kein Gurtband freigegeben werden. Die Spindel soll blockieren. Deshalb wird beim Automatikgurt eine Art Sensor benötigt, der nur im Notfall dafür sorgt, dass die Spindel blockiert wird.

Diese Aufgabe kann mit einem ganz einfachen Mechanismus gelöst werden, dessen Prinzip in Abb. 4 skizziert ist. Seine Funktion beruht auf dem Trägheitsgesetz. Die entscheidende Rolle spielt ein Pendel, an dessen Ende sich eine Sperrklinke befindet. In der Ruhelage des Pendels ist die Sperrklinke nicht eingerastet, so dass sich die Gurtspindel frei drehen kann.

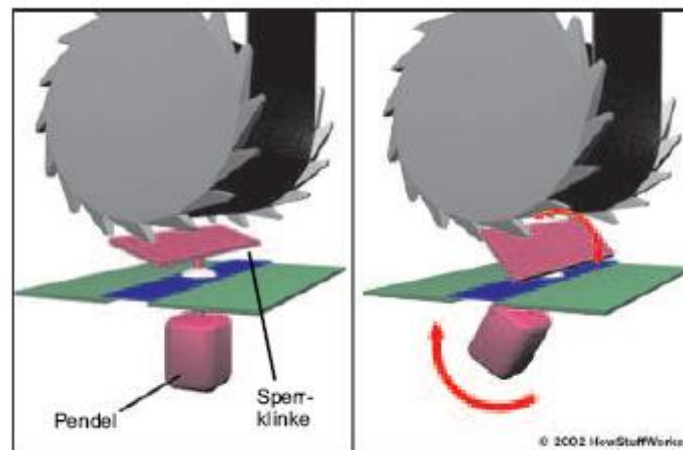


Abbildung 4: Blockierungsmechanismus für die Gurtspindel

Bei einem Unfall wird das Auto sehr plötzlich abgebremst, mitsamt der Achse, an der das Pendel befestigt ist. Nach dem Trägheitsgesetz schwingt der Pendelkörper gegenüber der Achse nach vorn, was dazu führt, dass am anderen Ende die Sperrklinke in den Zahnkranz der Spindel einrastet. Dadurch ist die Spindel blockiert.

6 Gurtstraffer

Mit der Einführung des Automatikgurts gewinnt man zwar Bequemlichkeit für den Fahrer, aber man hat sich auch eine Komplikation geschaffen. Denn wenn man die gewonnene Bewegungsfreiheit nutzt und ein Stück entfernt von der Rückenlehne sitzt, geht bei einem Unfall wertvoller Abbremsweg verloren. Um dies zu kompensieren, hat man den **Gurtstraffer** entwickelt. Er strafft im Fall einer Kollision den Sicherheitsgurt und sorgt so dafür, dass der Rumpf in Richtung Rückenlehne zurückgezogen wird (Abb 5).

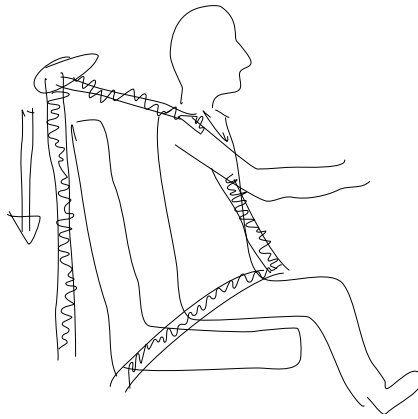


Abbildung 5: Wirkungsweise eines Gurtstraffers

Das Abbremsen des Rumpfs soll möglichst früh beginnen, und deshalb muss der Gurtstraffer sehr schnell arbeiten. Die Verlängerung der Abbremszeit ist ja das Hauptanliegen, und dabei ergänzen sich Gurtstraffer und Knautschzone: Der Gurtstraffer sorgt dafür, dass das Abbremsen früher beginnt, die Knautschzone dafür, dass es später aufhört. Damit alles sehr schnell geht, funktioniert der Gurtstraffer pyrotechnisch, das heißt mit Explosivstoffen.

Wenn Ihr Auto einen Gurtstraffer besitzt, kann es sein, dass sich darin eine technische Seltenheit verbirgt: einen Wankelmotor. Abb.6 zeigt eine Schemadarstellung dieser Form des Gurtstraffers. Bei einem Unfall werden die Zündpillen gezündet, und der Explosionsdruck versetzt den Kolben in Rotation. Innerhalb einer Hunderstel Sekunde wird das Gurtband auf der Spindel straff gezogen.



Abbildung 6: Gurtstraffer mit Wankelmotor

7 Die Bewegung des Fahrers relativ zum Auto

Sehen wir uns nun an, wie sich der Fahrer relativ zum Innenraum der Fahrgastzelle bewegt. Das ist vor allem für das Auslösen des Airbags wichtig, mit dem wir uns im folgenden Abschnitt beschäftigen werden. Denn wenn der Airbag gezündet wird, muss der Kopf des Fahrers vom Lenkrad ausreichend entfernt sein. Sonst kann der Explosionsdruck des Airbags zu schweren Verletzungen führen.

Wie bewegt sich der Fahrer relativ zur Fahrgastzelle? Als wir ihn starr am Sitz befestigt hatten, mussten wir uns um seine Bewegung im Wageninnern keine Sorgen machen.

Durch die Fesselung des Fahrers an den Sitz verlief der Abbremsvorgang von Fahrgastzelle und Fahrer vollkommen synchron. Es gab keine Relativbewegung.

Unterschiedliche Beschleunigungen von Fahrer und Fahrgastzelle

Mit der Einführung von dehnbaren Gurten und Gurtkraftbegrenzern hat sich das geändert. Der Fahrer erfährt nun eine *andere* Beschleunigung als die Fahrgastzelle. (Genau das war der Grund, weshalb wir die Gurte dehnbar gemacht haben: Der Fahrer sollte sanfter abgebremst werden).

Die Beschleunigungen von Fahrer und Fahrgastzelle lassen sich mit Gl. (3) aus dem Abbremsweg berechnen. Für das Auto hatten wir einen Abbremsweg von 50 cm angenommen (Deformation der Knautschzone). Wenn wir wieder von einer Aufprallgeschwindigkeit von 50 km/h = 14 m/s ausgehen, ergibt sich für die Beschleunigung des Autos.

$$a_{\text{Auto}} = -\frac{v_0^2}{2d_{\text{Auto}}} = -\frac{(13,9 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 0,5 \text{ m}} = -193 \text{ m/s}^2 = -19,7g. \quad (5)$$

Die Beschleunigung des Fahrers erhält man genauso, nur dass wir jetzt von 20 cm zusätzlichem Abbremsweg ausgehen, also insgesamt von 70 cm:

$$a_{\text{Fahrer}} = -\frac{v_0^2}{2d_{\text{Fahrer}}} = -\frac{(13,9 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 0,7 \text{ m}} = -138 \text{ m/s}^2 = -14g. \quad (6)$$

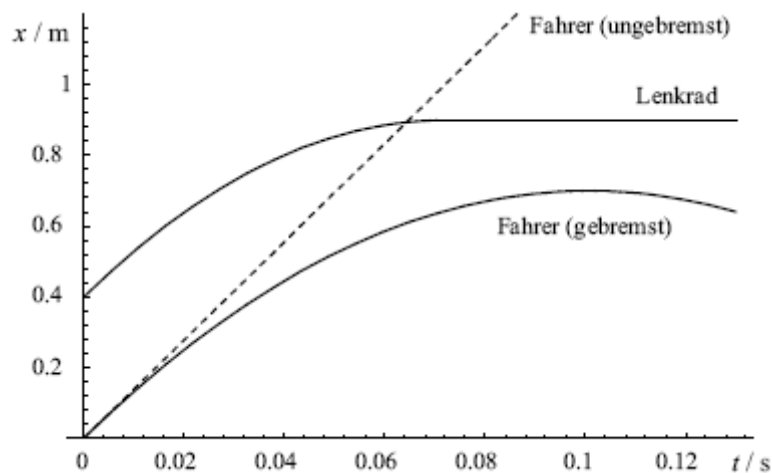


Abbildung 7: Zeit-Weg-Diagramme für Fahrer und Lenkrad. Die gestrichelte Linie gilt für einen nicht angeschnallten Fahrer

Zeit-Weg-Diagramme für Fahrer und Lenkrad

Mit diesen Angaben können wir die Bewegung von Fahrer und Lenkrad quantitativ beschreiben. Wir nehmen an, dass die abbremsenden Kräfte während des gesamten Vorgangs gleichmäßig wirken, so dass die Beschleunigung konstant ist. Mit dieser Annahme können wir die Bewegung durch das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung aus Gl. (1) beschreiben.

Natürlich kann dies nur eine Näherung an die tatsächlichen Verhältnisse darstellen. So wird etwa vernachlässigt, dass der Sicherheitsgurt erst nach ca. 2 Hundertstel Sekunden eine Kraft auf den Fahrer ausübt (wenn der Gurtstraffer den Gurt gespannt hat).

Aber mit diesen vereinfachenden Annahmen erhalten wir schon verwertbare Daten, ohne gleich für viel Geld eine Serie von Crash-Tests durchführen zu müssen.

Aufgabe: Interpretiere die mit Gl. (1) berechneten Zeit-Weg-Diagramme für Fahrer und Lenkrad (Abb 7).

Lösung: Der Aufprall erfolgt zur Zeit $t=0$. Der Fahrer befindet sich zu dieser Zeit an der Position $x=0$ (auf seinem Sitz). Das Lenkrad befindet sich 40 cm weiter vorn (an der Position $x = 0,4$ m).

Die obere durchgezogene Kurve gibt die Position des Lenkrads wieder. Es wird zusammen mit der ganzen Fahrgastzelle mit der Beschleunigung a_{Auto} abgebremst. In den ersten 7 Hundertstel Sekunden nach dem Aufprall wird die Knautschzone verformt. Dann ist das Auto zum Stillstand gekommen; die Position des Lenkrads verändert sich danach nicht mehr (für diesen Teil der Kurve wurde $x = \text{const.}$ gesetzt; Gl. (1) gilt hier also nicht).

Weil der Fahrer mit der geringeren Beschleunigung a_{Fahrer} abgebremst wird, kommt er erst 3 Hundertstel Sekunden später zur Ruhe, bei $t = 0,10$ s. Seine Entfernung vom Lenkrad beträgt in diesem Moment 20 cm. (Das ist kein Ergebnis, sondern die Ausgangsannahme der Berechnung.) Danach setzt eine Rückwärtsbewegung ein, und der Fahrer fällt zurück in seinen Sitz.

Die gestrichelte Linie gibt die Bewegung eines nicht angeschnallten Fahrers wieder, der sich nach dem Trägheitsgesetz ungebremst mit konstanter Geschwindigkeit weiterbewegt. Er prallt nach 6,5 Hundertstel Sekunden auf das Lenkrad.

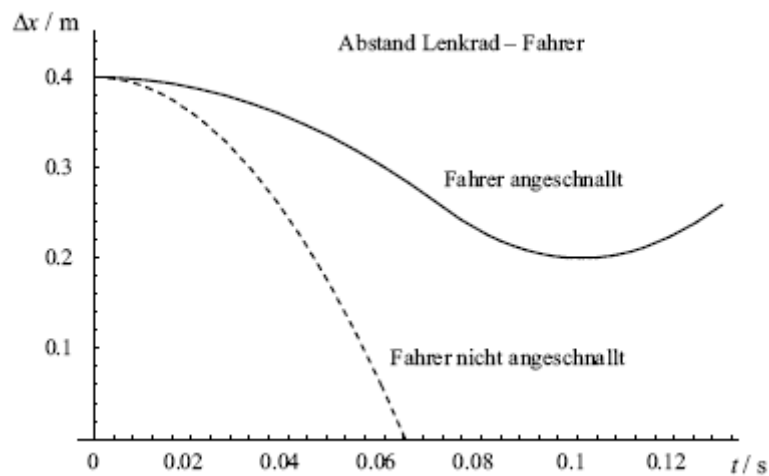


Abbildung 8: Abstand zwischen Fahrer und Lenkrad (durchgezogene Kurve). Die gestrichelte Linie gilt wieder für einen nicht angeschnallten Fahrer

Unsere Ausgangsfrage war, wie sich der Fahrer relativ zum Lenkrad bewegt. In Abb. 8 ist der Abstand zwischen Fahrer und Lenkrad als Funktion der Zeit dargestellt (d. h. die Differenz der beiden durchgezogenen Kurven aus Abb. 7).

Aufgabe: Interpretiere das Diagramm in Abb. 8.

Lösung: Der Abstand zwischen Fahrer und Lenkrad verändert sich in den ersten 5 Hundertstel Sekunden um weniger als 10 cm (die beiden durchgezogenen Kurven in Abb. 7 verlaufen anfangs fast parallel). Das bedeutet, dass der Fahrer bis zu diesem Zeitpunkt seine Sitzposition kaum verändert und sich erst anschließend nennenswert in Richtung auf das Lenkrad bewegt.

Die gestrichelte Kurve zeigt den Abstand zum Lenkrad für einen nicht angeschnallten Fahrer. Er nähert sich dem Lenkrad sehr viel schneller und ist schon nach 5 Hundertstel Sekunden nur 20 cm davon entfernt.

7 Airbags

Bei allen technischen Sicherheitsvorrichtungen, die wir bisher besprochen haben, blieb eines unberücksichtigt: der Kopf des Fahrers. Für ihn gibt es keinen Sicherheitsgurt. Er bewegt sich bei einem Unfall nach dem Trägheitsgesetz weiter, bis er davon abgebremst wird, dass der Hals an ihm zieht und eine Kraft ausübt. Die Folge der Belastung, die die Halsmuskeln durch diesen unschönen Abbremsvorgang erfahren, ist das bekannte Schleudertrauma.

Hier kann das letzte Glied in der Kette der Sicherheitseinrichtungen wenigstens teilweise Abhilfe schaffen: der **Airbag**. Im Prinzip handelt es sich um einen Luftsack, der im Ruhezustand im Lenkrad verstaut ist und bei einem Unfall schlagartig aufgeblasen wird. Er bremst den Kopf und auch den Rumpf des Fahrers einigermaßen sanft ab. Dabei verhindert er auch einen Aufprall auf das Lenkrad.

Ursprünglich wurde der Airbag nicht nur als Ergänzung, sondern als Alternative zum Sicherheitsgurt entwickelt. In den USA war die Anschnallquote recht gering, es gab lange Zeit auch keine Anschnallpflicht. Um die Insassen auf andere Weise zu schützen, wurde der Airbag entwickelt. Wegen der immer noch niedrigen Anschnallquote werden auch heute noch werden Airbags für den amerikanischen Markt sehr viel "straffer" eingestellt als in Europa, damit sie auch nicht angeschnallte Insassen ohne die Unterstützung durch den Sicherheitsgurt abfangen können.

Zeit zum Aufblasen

Wie beim Gurtstraffer muss auch beim Airbag alles sehr schnell gehen. Aber wie schnell genau? Wenn wir einen Airbag konstruieren wollen, müssen wir den Entwicklungsingenieuren eine präzise Vorgabe angeben, wie viel Zeit er zum Aufblasen benötigen darf.

Aufgabe: *Gib eine physikalische begründete Abschätzung für die Zeit, die ein Airbag zum Aufblasen benötigen darf.*

Lösung: *Diese Information haben wir mit unseren bisherigen Überlegungen schon gewonnen; wir müssen sie nur aus Abb. 7 oder 8 ablesen. Innerhalb der ersten 4-5 Hundertstel Sekunden, hat der Fahrer seine Sitzposition gegenüber dem Lenkrad noch kaum verändert hat. In dieser Zeit, muss das Aufblasen des Airbags abgeschlossen sein.*

Länger darf es nicht dauern. Der Airbag muss vollständig aufgeblasen sein, bevor der Fahrer in ihn hineintaucht. Andernfalls bekommt der Kopf des Fahrers den Explosionsdruck des sich entfaltenden Airbags zu spüren – und das kann womöglich zu größeren Verletzungen führen als der eigentliche Unfall.

Funktionsweise der Airbags

Fünf Hundertstel Sekunden bis zum vollständigen Aufblasen – das ist also die Rahmenbedingung. In dieser Zeit muss eine Menge passieren. Sehen wir uns die Vorgänge im Einzelnen an.

Zuerst muss über Beschleunigungssensoren überhaupt festgestellt werden, dass ein Unfall vorliegt. Beschleunigungssensoren sind mikromechanisch hergestellte Bauteile, die ein Signal abgeben, wenn große Beschleunigungen auftreten [2]. Wenn die Beschleuni-

gungssensoren ein Signal geben, darf der Airbag aber noch nicht gleich gezündet werden. Es muss festgestellt werden, ob es sich tatsächlich um einen Unfall handelt oder doch nur um unsanftes Fahren über einen Bordstein oder ein Schlagloch. Dazu wird der zeitliche Verlauf der Beschleunigung durch Auswertelgorithmen mit gespeicherten typischen Mustern verglichen, die in Versuchen ermittelt wurden. Dies alles muss innerhalb der ersten zwei Hundertstel Sekunden nach dem Aufprall passieren. Dann wird das Zündsignal an Gurtstraffer und Airbags geschickt, und es bleiben noch drei Hundertstel Sekunden für das Aufblasen der Airbags.

Drei Hundertstel Sekunden ist eine kurze Zeit. Denn in dieser Spanne muss das Gas zum Aufblasen erst einmal erzeugt, der Luftsack damit gefüllt und die Abdeckung durchstoßen werden. Wie beim Gurtstraffer geschieht das Aufblasen des Airbags pyrotechnisch. Man benutzt einen chemisch sehr schnell reagierenden Feststoff, bei dessen Verbrennung eine definierte Menge Gas frei wird, das den Luftsack aufbläst. Es gibt auch Hybridsysteme, bei denen ein komprimiertes Gas freigesetzt wird und nur die Zündung pyrotechnisch erfolgt.

Der Airbag ist nun nach etwa 5 Hundertstel Sekunden aufgeblasen und der Fahrer taucht in hinein. Nach 8-9 Hundertstel Sekunden ist die maximale Belastung erreicht, danach bewegt sich der Fahrer wieder nach hinten (Abb.7). Danach wird der Airbag sehr schnell wieder entleert, damit der Fahrer noch handlungsfähig bleibt und durch den Luftsack im Fahrerraum nicht behindert wird. Der ganze Vorgang ist nach einer Zehntel Sekunde beendet. Er dauert nicht länger als ein Wimpernschlag, und für den Fahrer erscheint er nur als ein kurzer weißer "Lichtblitz".

Die Sicherheitstechnik im Auto wird ständig weiter entwickelt. Ein wichtiger Schritt war z. B. die Einführung von Seiten- und Kopfairbags, denn bei immerhin 20% der Unfälle handelt es sich um einen Seitenaufprall. Hier muss der Airbag die gesamte Schutzwirkung übernehmen, denn seitlich gibt es keine Knautschzone.

Literatur:

[1] R. Wodzinski, H. Wiesner, *Einführung in die Mechanik über die Dynamik*, Physik in der Schule (1994) S.164-168, S. 202-207, S. 331-335

[2] R. Berger, B. Nitz, *Physik des Sensors eines Antiblockiersystems*. MNU 56/3, (2003) S. 146-149