

# Soll man Autos aus Aluminium bauen? Ein Beispiel für „Fermi-Probleme“ in der Schule

**Rainer Müller**

Didaktik der Physik, Universität München, Schellingstr. 4, D-80799 München

## 1. Einleitung

Viele Probleme, die in der heutigen Welt für die Menschen von Bedeutung sind, weisen einen so hohen Komplexitätsgrad auf, daß man als Einzelner nicht in der Lage ist, sie bis in die Details zu durchschauen. In besonderem Maße macht man diese Erfahrung im Umweltbereich. Die Spanne an nicht ohne weiteres zu beantwortenden Fragen reicht hier von der Klimaproblematik bis zur Entscheidung, ob man Milch in Glasflaschen oder Pappkartons kaufen soll.

Das Kennzeichnende an dieser Situation ist die Einbuße des selbständigen Urteilens, das die Menschen (verstanden als Bürger einer Demokratie) hinnehmen müssen. In immer mehr Bereichen sieht sich der Laie auf das Urteil von Experten angewiesen, das er hinnehmen muß, ohne es überprüfen zu können. Für die Bürger bedeutet dies den teilweisen Verlust ihrer politischen Autonomie. Der Soziologe Ulrich Beck hat das, bezogen auf die Einschätzung von Risiken, folgendermaßen ausgedrückt: „Die Wissenschaft »stellt Risiken fest«, und die Bevölkerung »nimmt Risiken wahr«. Abweichungen zeigen das Maß der »Irrationalität« und »Technikfeindlichkeit« an“ [1]. Es besteht nicht nur die Notwendigkeit, sich auf das Urteil anderer zu verlassen – im Extremfall wird der einzelne Bürger von Politikern und Experten aus der Diskussion ausgeschlossen.

Die Schule – und speziell der Physikunterricht – kann versuchen, dieser Abhängigkeit entgegenwirken. Denn neben dem Vermitteln von physikalischem Grundwissen gehört es auch zu den Aufgaben des Physikunterrichts, die Art und Weise deutlich zu machen, mit der Physiker an Probleme herangehen. Dazu gehören folgende Fähigkeiten:

- Problemstrukturen durchschauen,
- Komplexität reduzieren,
- Abschätzungen vornehmen,
- Größenordnungen beurteilen.

Wenn die Probleme auf ihre Grundstruktur reduziert worden sind, werden nicht nur einfachere Abschätzungen von Größenordnungen möglich. Oft hilft die Reduktion der Komplexität auch, grundlegende Zusammenhänge besser zu erfassen.

Eine spezielle Art dieser Vorgehensweise findet man bei den sogenannten *Fermi-Problemen*. Hier wird eine scheinbar nicht ohne Spezialwissen zu beantwortende Frage (anscheinend) fast ohne Eingangsdaten größenordnungsmäßig richtig abgeschätzt wird. Berühmt wurde Fermis Abschätzung, wie viele Klavierstimmer es in Chicago gibt. Die Kunst dabei ist, auf die richtige Weise zum Kern des Problems vorzustoßen und unbekannte Größen dadurch zu erschließen, daß man sie auf plausible Weise mit (möglicherweise sogar aus dem Alltag) bekannten verknüpft.

In der vorliegenden Arbeit geht es um die Frage, ob es ökologisch sinnvoll ist, Autos mit Aluminiumkarosserie zu bauen. Man muß zur Beantwortung dieser Frage zwei Aspekte abwä-

gen: Auf der einen Seite benötigt man zur Herstellung von Aluminium sehr viel Energie, und es wird eine große Menge des Treibhausgases  $\text{CO}_2$  emittiert. Auf der anderen Seite ist ein Aluminiumauto leichter als ein vergleichbares Auto mit Stahlkarosserie. Es verbraucht daher weniger Benzin und emittiert im Betrieb entsprechend weniger  $\text{CO}_2$ . Die Frage ist: Welcher Effekt überwiegt? Im folgenden soll gezeigt werden, wie diese scheinbar nur mit Spezialwissen zu beantwortende Frage in der Art eines Fermi-Problems auf Teilfragen zurückgeführt werden kann, die sich mit ein wenig Schulphysik und Alltagserfahrungen beantworten lassen.

## 2. Autos aus Aluminium?

Die Herstellung von Aluminium ist sehr energieaufwendig. Die im Rohmaterial Bauxit enthaltenen Aluminium-Hydroxide werden mit Natronlauge ausgelöst und durch Erhitzen (Kalzinieren) in Aluminiumoxid überführt. Der energieaufwendigste Herstellungsschritt ist die anschließende Elektrolyse, in der das reine Aluminium gewonnen wird. Ein Vergleich kann die benötigte Energiemenge deutlich machen: Zur Herstellung eines  $10 \times 10$  cm großen Stücks Alufolie (Dicke 0,02 mm) ist ein Primärenergieumsatz von  $1,4 \cdot 10^5$  J notwendig. Wäre man vor dem Benutzen dieses Alufolie-Stückchens gezwungen, Ziegelsteine auf einen 1 m hohen Tisch zu heben, bis man die zur Herstellung benötigte Energie als mechanische Arbeit aufgebracht hätte: Man müßte 14 000 kg Steine heben.

Daneben werden bei der Aluminiumherstellung große Mengen Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) emittiert, denn Sauerstoff, der bei der Elektrolyse an der Anode gebildet wird, oxidiert die Anodenkohle zu CO und  $\text{CO}_2$ . Letzteres trägt als Treibhausgas zur weltweiten Klimaerwärmung bei. Diese Fakten fordern zum überlegten Umgang mit dem Material Aluminium auf. Bevor man sein Pausenbrot in Alufolie einpackt (die man anschließend wegwirft), sollte man überlegen, ob es Butterbrotpapier nicht auch tut (noch besser ist natürlich eine Brotdose).



Abb. 1: Auto mit Aluminiumkarosserie

Trotzdem werden in jüngster Zeit Autos mit Aluminiumkarosserie angeboten (z. B. der Audi A8, Abb. 1). Das Argument, das für ein solches Auto spricht, ist die Gewichtseinsparung, die wegen der sehr viel kleineren Dichte von Aluminium erreicht werden kann. Dadurch verbraucht ein Aluminiumauto weniger Benzin. Entsprechend reduzieren sich die im Betrieb umgesetzte Energie und die  $\text{CO}_2$ -Emission.

Sieht man vom Preis ab, ist die Frage, vor der ein potentieller Käufer steht: *Ist es ökologisch sinnvoll, ein Aluminiumauto zu kaufen? Können die günstigeren Betriebsdaten den Mehraufwand bei der Herstellung kompensieren?* Zunächst scheint es so, als sei die Frage von einem Laien nicht ohne weiteres zu beantworten. Einmal mehr wäre man auf das Urteil von Experten angewiesen.

Im folgenden soll gezeigt werden, daß dies nicht notwendig der Fall sein muß. Im Stil der Fermi-Probleme kann man sehr wenigen Angaben abschätzen, wann es sich lohnt, Aluminiumautos zu bauen. Die meisten Angaben, die wir dazu benötigen werden, kann man mit Hilfe alltäglicher Erfahrungen grob schätzen. Die einzigen Tabellenwerte, die wir benötigen, sind:

Tabelle 1:

	<b>Aluminium</b>	<b>Stahl</b>
<b>Dichte:</b>	2698 kg / m <sup>3</sup>	7840 m <sup>3</sup> .
<b>Primärenergieaufwand:</b>	69,0 kWh / kg Material	6,31 kWh / kg Material
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung</b>	16,1 kg CO <sub>2</sub> / kg Material	1,65 kg CO <sub>2</sub> / kg Material

Daneben wird noch die Dichte von Benzin (0,75 kg / l) benötigt. Alles weitere ergibt sich dann aus den physikalischen Abschätzungen, die wir vornehmen werden.

Eine erste qualitative Einschätzung wägt die Vor- und Nachteile einer Aluminiumkarosserie ab:

*Nachteile:* Hoher Energiebedarf bei der Herstellung

Hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung

*Vorteile:* Gewichtseinsparung, dadurch verringerter Benzinverbrauch, geringerer Energiebedarf, geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen im Betrieb

Die Frage, die wir im folgenden zu klären haben, ist: *Können die günstigeren Betriebsdaten den Mehraufwand bei der Herstellung kompensieren?*

Die für das Aluminium günstigen Aspekte machen sich im Betrieb bemerkbar. Das heißt: Ab einer gewissen Zahl  $x$  von gefahrenen Kilometern ist der herstellungsbedingte Mehraufwand an Energie bzw. CO<sub>2</sub> wettgemacht. Wird während der Lebensdauer des Autos eine Strecke von weniger als  $x$  km zurückgelegt, wäre eine Stahlkarosserie ökologisch sinnvoller. Im allgemeinen werden sich für Energieumsatz und CO<sub>2</sub>-Emission verschiedene Werte von  $x$  ergeben. Um sie abzuschätzen, arbeiten wir Schritt für Schritt die folgenden Einzelfragen ab:

### a) Energiebilanz

1. Wieviel Energie wird bei der Herstellung zusätzlich benötigt?
2. Wieviel Energie wird im Betrieb eingespart?
  - Wieviel Benzin wird pro 100 km eingespart?
  - Was ist der Energieinhalt von 1 l Benzin?
  - Ab wieviel gefahrenen Kilometern spart ein Aluminiumauto Energie?

### b) CO<sub>2</sub>-Bilanz

1. Wieviel CO<sub>2</sub> wird bei der Herstellung zusätzlich emittiert?
2. Wieviel weniger CO<sub>2</sub> wird im Betrieb emittiert?
  - Wieviel CO<sub>2</sub> wird beim Verbrennen von 1 l Benzin freigesetzt?
  - Ab wieviel gefahrenen Kilometern wird weniger CO<sub>2</sub> emittiert?

### 3. Energiebilanz einer Aluminiumkarosserie

#### 3.1 Energie-Mehraufwand bei der Herstellung

a) *Wieviel Material wird eingespart?*

Die Karosserie eines Autos (Abb. 2) macht etwa 25% seiner Gesamtmasse aus. Setzt man die Gesamtmasse des Autos mit etwa 800 kg an, sind das 200 kg. Die Dichte von Aluminium liegt bei 35% der Dichte von Stahl. Die theoretisch mögliche Massenreduktion liegt also bei 65%. In der Praxis ist dieser Wert allerdings unrealistisch, da man auch Stabilitäts- und Sicherheitsfragen berücksichtigen muß. Mit dem dadurch erhöhten Materialaufwand erreicht man in der Praxis eine Reduktion der Karosseriemasse um 40 – 50%, also etwa 100 kg.



Abb. 2: Aluminiumkarosserie

b) *Wieviel Energie wird bei der Herstellung zusätzlich benötigt?*

Mit den Daten aus Tabelle 1 zum Primärenergieaufwand für Stahl und Aluminium können wir nun abschätzen, um wieviel energieaufwendiger es ist, eine Karosserie aus Aluminium herzustellen. Die Energiedifferenz ist:

$$\begin{aligned}\Delta E &= \text{Energieaufwand (Aluminium)} - \text{Energieaufwand (Stahl)} \\ &= \text{Differenz von (Masse} \cdot \text{Primärenergieinhalt /kg)} \\ &= 100 \text{ kg} \cdot 69 \text{ kWh /kg} - 200 \text{ kg} \cdot 6,3 \text{ kWh/kg} \\ &= 20 \cdot 10^9 \text{ J}\end{aligned}$$

Ein Aluminiumauto benötigt also bei der Herstellung etwa 20 GJ mehr Energie als ein Stahlauto. Um ökologische Vorteile zu bringen, muß es diese Energiemenge im Betrieb wieder einsparen.

#### 3.2 Energieeinsparung im Betrieb

a) *Wieviel Benzin wird pro 100 km eingespart?*

Um die Energieeinsparung im Betrieb abzuschätzen, müssen wir herausfinden, wieviel Benzin durch die reduzierte Masse eingespart wird. Aus dem Alltag weiß man, daß schwerere Autos mehr Benzin verbrauchen. Die einfachste Annahme ist, daß der Benzinverbrauch der Masse proportional ist:

Annahme: Benzinverbrauch  $B \sim$  Masse  $m$

Dann führt eine Reduktion der Masse um  $\Delta m$  zu einem um  $\Delta B$  reduzierten Benzinverbrauch,

und es gilt:

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta m}{m}.$$

Setzen wir konkrete Zahlenwerte ein: Oben ergab sich bei einer Masse von 800 kg eine Massenreduktion  $\Delta m = 100$  kg. Für den Benzinverbrauch setzen wir  $B = 8$  l / 100 km ein. Damit erhält man:

$$\begin{aligned}\Delta B &= 0,125 \cdot 8 \text{ l / 100 km} \\ &= 1 \text{ l / 100 km}\end{aligned}$$

In der Praxis ergibt sich ein Wert von 0,5 l / 100 km. Obwohl es bei der vorliegenden Abschätzung nur um Größenordnungen gehen soll, kann man trotzdem sagen, woher die Diskrepanz zwischen errechnetem und praktischem Wert stammt. Die Annahme, daß der Benzinverbrauch (und damit der Energieumsatz) proportional zur Masse ist, stimmt nämlich nur für die Beschleunigungsphasen, in denen die beschleunigende Kraft proportional zur Masse ist. Fährt das Auto z. B. mit konstanter hoher Geschwindigkeit, dient die vom Motor übertragene Kraft dagegen nur zur Überwindung des Luftwiderstands. Die Luftwiderstandskraft ist aber unabhängig von der Masse des Autos (s. nächster Abschnitt), so daß in diesem Fall durch die Massenreduktion überhaupt kein Benzin gespart wird.

Die erreichbare Benzinersparnis hängt damit vom Fahrverhalten ab, so daß die obige Betrachtung höchstens eine grobe Abschätzung liefern kann. Immerhin kommt man dem betrachteten Wert im Rahmen der hier angestrebten Genauigkeit nahe.

### b) Energieinhalt von Benzin

Im vorangehenden Abschnitt wurde die *Benzinersparnis* abgeschätzt, die sich aus der reduzierten Masse ergibt. Gesucht ist aber die *Energieeinsparung*. Um sie zu bestimmen, benötigen wir den Energieinhalt von Benzin. Obwohl es zunächst so aussieht, als müßte man diesen Wert in Tabellenwerken nachschlagen, kann auch hier eine einfache physikalische Überlegung weiterhelfen.

Man kann den Energieinhalt von Benzin aus dem bekannten Benzinverbrauch von Autos abschätzen, wenn man die mechanische Arbeit bestimmt, die mit 1 l Benzin geleistet werden kann. Wie schon erwähnt, muß bei 100 km/h im wesentlichen der Luftwiderstand überwunden werden. Die Luftwiderstandskraft ist

$$F_L = c_w \cdot \frac{\rho}{2} A v^2.$$

Dabei ist  $\rho = 1,3$  kg / m<sup>3</sup> die Luftdichte und  $A$  die Frontfläche des Autos, für die wir 4 m<sup>2</sup> ansetzen. Der  $c_w$ -Wert ist eine aus der Autowerbung vertraute Größe; man kann  $c_w \approx 0,3$  annehmen.

Die auf einer Strecke von 100 km gegen die Luftwiderstandskraft zu leistende Arbeit ist

$$\begin{aligned}E_{100 \text{ km}} &= F_L \cdot d = F_L \cdot 100 \text{ km} \\ &= 6,0 \cdot 10^8 \text{ J}.\end{aligned}$$

Diese Energie wird von 8 l Benzin geliefert, wobei der Wirkungsgrad eines Ottomotors nur etwa 25% beträgt. Den Energieinhalt pro Liter Benzin erhalten wir also, wenn wir die gerade berechnete Energie durch 8 l teilen und das Ergebnis mal vier nehmen (nur mit einem Viertel der im Benzin enthaltenen Energie wird die oben berechnete Arbeit verrichtet).

Es ergibt sich für den *Energieinhalt pro Liter Benzin*:

$$W_{\text{Benzin}} = 6,0 \cdot 10^8 \text{ J} \cdot 4 / 8 \text{ l} = 30 \text{ MJ / l.}$$

Dieses Ergebnis stimmt mit dem Tabellenwert überein.

### 3.3 Ab welcher gefahrenen Wegstrecke lohnt sich ein Aluminiumauto?

Mit den nun zusammengetragenen Teilergebnissen können wir eine Abschätzung für die Frage geben, wann ein Aluminiumauto zu einer Energieeinsparung führt, d. h. ab welcher gefahrenen Strecke  $x$  die Energieeinsparung im Betrieb den Mehraufwand bei der Herstellung überwiegt. Kurz formuliert lautet die zu erfüllende Bedingung:

$$\text{Energieeinsparung (Benzin)} > \text{Energieaufwand (Herstellung)}$$

Die nach einer gefahrenen Strecke von  $x$  km durch den reduzierten Benzinverbrauch eingesparte Energie ist:

$$\begin{aligned} E &= \text{gesparte Liter Benzin} \cdot \text{Energieinhalt / Liter} \\ &= x \cdot 0,5 \text{ l / 100 km} \cdot 30 \text{ MJ / l} \\ &= x \cdot 150 \text{ kJ / km.} \end{aligned}$$

Pro Kilometer benötigt ein Aluminiumauto also 150 kJ weniger Energie. Die insgesamt eingesparte Energie soll größer sein als  $20 \cdot 10^9 \text{ J}$  (Energie-Mehraufwand bei der Herstellung). Daraus ergibt sich die Bedingung:

$$\begin{aligned} x \cdot 150 \text{ kJ / km} &> 20 \cdot 10^9 \text{ J} \\ \text{oder} \quad x &> 130\,000 \text{ km} \end{aligned}$$

Als Ergebnis erhalten wir also: **Wenn das Auto während seiner Lebensdauer mehr als 130 000 km fährt, spart man durch eine Aluminiumkarosserie Energie ein.**

Bevor wir die Relevanz dieses Ergebnisses diskutieren, wenden wir uns zunächst der CO<sub>2</sub>-Bilanz zu.

## 4. CO<sub>2</sub>-Bilanz einer Aluminiumkarosserie

### 4.1 Wieviel CO<sub>2</sub> wird bei der Herstellung zusätzlich emittiert?

Aus Tabelle 1 können wir entnehmen, daß bei der Herstellung von Aluminium mehr CO<sub>2</sub> freisetzt als bei der Stahlherstellung. Die CO<sub>2</sub>-Masse, die bei der Herstellung von 100 kg Aluminium mehr emittiert wird als bei der Herstellung von 200 kg Stahl ist:

$$\begin{aligned} \Delta m_1 &= \text{CO}_2\text{-Emission (Aluminium)} - \text{CO}_2\text{-Emission (Stahl)} \\ &= \text{Differenz von (Masse} \cdot \text{CO}_2\text{-Emission / kg)} \\ &= 100 \text{ kg} \cdot 16,1 - 200 \text{ kg} \cdot 1,65 \\ &= 1280 \text{ kg} \end{aligned}$$

Die zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emission bei der Herstellung beträgt also 1280 kg. Diese Menge muß durch die geringere Emission im Betrieb wieder eingespart werden.

## 4.2 CO<sub>2</sub> -Einsparung im Betrieb

Sowohl der Energieumsatz als auch die CO<sub>2</sub>-Emission sind proportional zur der verbrauchten Benzinmenge. Deshalb können wir auf unsere obige Abschätzung der Benzineinsparung zurückgreifen. Wir müssen nur noch herausfinden, wieviel CO<sub>2</sub> beim Verbrennen von 1 l Benzin emittiert wird. Auch diesen Wert muß man nicht nachschlagen, eine einfache Überlegung führt zu einer guten Abschätzung.

### a) CO<sub>2</sub>-Erzeugung beim Verbrennen von 1 l Benzin

Um herauszufinden, wieviel CO<sub>2</sub> beim Verbrennen von Benzin frei wird, erinnern wir uns, daß Benzin aus Kohlenstoffketten C<sub>m</sub>H<sub>n</sub> verschiedener Länge besteht. Der Wasserstoff spielt für die CO<sub>2</sub>-Emission keine Rolle. Da ein Wasserstoffatom nur 1/12 der Masse eines Kohlenstoffatoms besitzt, vernachlässigen wir den Wasserstoff im Benzin ganz und nehmen an, daß Benzin vollständig aus Kohlenstoff besteht. Dann wird die Abschätzung einfach: Jedes Kohlenstoffatom (Masse 12 u) verbindet sich mit zwei Sauerstoffatomen (Masse 16 u) zu einem CO<sub>2</sub>-Molekül.

Aus jedem C-Atom im Benzin wird entsteht also ein CO<sub>2</sub>-Molekül der Masse

$$m(\text{CO}_2) = (1 + 2 \cdot 16/12) m(\text{C}) = 3,7 m(\text{C})$$

Also: 1 kg Benzin verbrennt in unserem vereinfachten Modell zu 3,7 kg CO<sub>2</sub>.

Die Angabe, die wir benötigen ist die emittierte CO<sub>2</sub>-Menge pro *Liter* verbranntem Benzin. Wir brauchen also noch die Dichte von Benzin (0,75 kg / l), um zu dem Ergebnis zu gelangen:

*Bei der Verbrennung von 1 l Benzin werden 2,75 kg CO<sub>2</sub> emittiert.*

Die Übereinstimmung der Abschätzung mit dem Tabellenwert von 2,4 kg CO<sub>2</sub> / l ist recht gut.

## 4.3 Ab welcher gefahrenen Strecke spart ein Aluminiumauto CO<sub>2</sub>?

Mit diesen Werten können wir herausfinden, ab welcher gefahrenen Strecke  $x$  die CO<sub>2</sub>-Einsparung beim Betrieb die Zusatzemission bei der Herstellung überwiegt. Die zu erfüllende Bedingung ist also

$$\text{CO}_2\text{-Einsparung (Betrieb)} > \text{Zusatzemission (Herstellung)}$$

Die CO<sub>2</sub>-Einsparung im Betrieb ist:

$$\begin{aligned} \Delta m_2 &= \text{gesparte Liter Benzin} \cdot \text{CO}_2\text{-Emission / Liter} \\ &= x \cdot 0,5 \text{ l} / 100 \text{ km} \cdot 2,4 \text{ kg} / \text{l} \\ &= x \cdot 1,2 \text{ kg} / 100 \text{ km}. \end{aligned}$$

Pro 100 km emittiert also ein Aluminiumauto 1,2 kg CO<sub>2</sub> weniger als ein Auto mit Stahlkarosserie. Die Umwelt wird geschont, wenn auf der gefahrenen Strecke von  $x$  km mehr CO<sub>2</sub> eingespart wird als die 1280 kg, die bei der Herstellung zusätzlich emittiert wurden. Das führt zur Bedingung

$$\begin{aligned} x \cdot 1,2 \text{ kg} / 100 \text{ km} &> 1280 \text{ kg} \\ \text{oder} \quad x &> 100\,000 \text{ km} \end{aligned}$$

Das Ergebnis ist also: **Ab einer gefahrenen Strecke von 100 000 km führt eine Aluminiumkarosserie zu reduzierter CO<sub>2</sub>-Emission.**

## 5. Relevanz der Ergebnisse und Fazit

Wir haben abgeschätzt, welche Gesamtstrecke ein Auto während seiner Lebensdauer zurücklegen muß, damit eine Aluminiumkarosserie Energie spart bzw. zu reduzierter CO<sub>2</sub>-Emission führt. Die gefundenen Kilometerzahlen liegen in einem Bereich, der von einem durchschnittlichen Auto während seiner normalen Lebenszeit durchaus zurückgelegt wird. Die gefundenen Ergebnisse legen nahe, daß es ökologisch sinnvoll ist, Autos mit einer Aluminiumkarosserie zu versehen.

Man muß mit einem solchen Schluß auf der Basis der vorliegenden Berechnungen jedoch sehr vorsichtig sein. Die vorangehenden Abschätzungen können ohne weiteres um einen Faktor 2 oder mehr „danebenliegen“. Berücksichtigt man diesen Faktor, erhält man für die Mindestfahrstrecke ein Intervall von 65 000 km bis 260 000 km (Energie) bzw. 50 000 km bis 200 000 km (CO<sub>2</sub>). Ob das obere Ende des Intervalls von einem Durchschnittsauto erreicht wird, ist schon zweifelhaft.

Wenn die sich ergebenden Werte so dicht an der Grenze des ökologisch sinnvollen liegen, ist man auf vertiefende Betrachtungen angewiesen, die in der Regel dann doch von Experten durchgeführt werden müssen. Beispielsweise muß berücksichtigt werden, daß Aluminium aufwendiger geformt und geschweißt werden muß als Stahl. Auch die Oberflächenbehandlung der beiden Materialien unterscheidet sich. Nicht zuletzt muß man auch die Recyclingeigenschaften der beiden Materialien berücksichtigen.

Ein weiterer Aspekt, den man bei diesem Beispiel aufzeigen kann, ist das Problem der *Bewertung* von Umweltrisiken. Daß die beiden km-Angaben für Energie und CO<sub>2</sub> so dicht zusammen liegen, ist Zufall. Es hätte sich auch durchaus ergeben können, daß Energie schon ab einer Strecke von 20000 km gespart wird, die CO<sub>2</sub>-Emissionen aber erst ab 500 000 km verringert werden. Was dann? In dieser Situation muß man Äpfel mit Birnen vergleichen und die verschiedenen Aspekte des Problems *bewerten* und *einschätzen*. Diese wichtige Aufgabe kann von der Physik nicht mehr geleistet werden. In der Notwendigkeit, im Grunde unvergleichbare Dinge gegeneinander abzuwägen, zeigt sich eine der Hauptschwierigkeiten beim Erstellen verlässlicher Ökobilanzen.

Doch eines sollte bei dem diskutierten „Fermi-Problem“ exemplarisch aufgezeigt worden sein: Der Physikunterricht kann das Bewußtsein für den reflektierten Umgang mit grundlegenden Zusammenhängen wecken. Er kann so dazu beitragen, daß den Problemen der modernen Welt etwas von ihrer Komplexität genommen wird. Der einzelne Bürger, von der demokratischen Gesellschaft aufgefordert, zu diesen Problemen Stellung zu nehmen, steht ihnen möglicherweise etwas weniger ratlos gegenüber.

Auch weiterhin wird er sich in der Regel auf das Urteil der Experten verlassen (denn in der Tatsache, daß Fachleute eine vertiefte Kenntnis von Sachverhalten besitzen können, liegt ja eine Errungenschaft der Wissenschaften). Aber er kann diese Expertenmeinung hinterfragen und sie kritisch einschätzen. Die geistige Emanzipation, die mit dieser Fähigkeit zum selbständigen Urteilen einhergeht, kann einen Schritt auf dem Weg zur Mündigkeit im Kantschen Sinn bedeuten.

### Literatur:

[1] U. Beck, *Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne*, Suhrkamp, Frankfurt 1986.