

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 3

Rückblick und Perspektive

ISBN 3 - 7896 - 0513 - 1

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1993

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Alltagsbezogener Physikunterricht am Beispiel "Automobil"

1. Vorbemerkung

Der Physikunterricht leidet häufig darunter, daß die im Unterricht erarbeiteten physikalischen Gesetze nicht oder nur selten auf Themen des Alltags oder der Technik angewendet werden. Allzu häufig beziehen sich die im Unterricht üblichen "Anwendungen" nur auf banale Einsetz- oder Umstellaufgaben, die hypothetische, unrealistische Situationen voraussetzen. Ein Grund für diesen Mangel ist, daß die üblichen Schulbücher und Aufgabensammlungen Realdaten zu Alltags- und Technikproblemen dem Lehrer kaum zur Verfügung stellen. Der Lehrer muß sich daher selbst um die Beschaffung dieser Daten bemühen, was zunächst einen zusätzlichen Aufwand und damit eine Hemmschwelle bedeutet.

Im folgenden soll gezeigt werden, daß es sich lohnt, diese Hemmschwelle zu überwinden, und wie man Realdaten erhalten und für den Unterricht aufbereiten kann. Anhand des Themas "Zusammenhang zwischen maximaler Motorleistung und Höchstgeschwindigkeit bei einem Automobil" soll exemplarisch gezeigt werden, wie man die von Firmen zur Verfügung gestellten Rohdaten und die bisher gelernten physikalischen Gesetze für einen alltagsbezogenen Physikunterricht aufbereitet und einsetzt. Bei der Beschaffung von Rohdaten haben sich Automobilfirmen als besonders hilfsbereit gezeigt.

Allerdings werden in Datensätzen der Firmen oft in der Technik übliche, im Physikunterricht aber unübliche Bezeichnungen, Einheiten und Fachbegriffe verwendet. Außerdem sind die Datensätze oft nicht vollständig. Der Lehrer muß daher zunächst eine entsprechende Übersetzung anfertigen und gegebenenfalls aus anderen Firmenschriften fehlende Daten sinnvoll ergänzen. Die Übersetzung kann dabei in Zusammenarbeit mit den Schülern erfolgen. Dies hat den Vorteil, daß sie lernen, Firmenschriften eigenständig zu lesen.

Von der Seite des Physikunterrichts müssen oft die in Firmenschriften angegebenen physikalischen Zusammenhänge aufbereitet werden. Hier bietet sich an, nach direkten Herleitungen oder Begründungen unter der Voraussetzung der bisher erarbeiteten Gesetze zu suchen.

In dem gewählten Beispiel soll gezeigt werden, wie der gesuchte Zusammenhang zwischen maximaler Motorleistung und Höchstgeschwindigkeit für den Unterricht aufbereitet werden kann. In der Literatur [5] wird der Zusammenhang zwischen maximaler Motorleistung und Höchstgeschwindigkeit in der unbegründeten Form $P_{\max} \sim v^3$ angegeben. Dieses Vorgehen entspricht nicht der hier vertretenen Intention. Gerade bei diesem Thema bietet sich die Chance, mit einfachen, im Physikunterricht schon geübten Vorgehensweisen und mit den Daten der Firmenschriften den oben angegebenen Zusammenhang mit Schülern zu erarbeiten. Dabei ist es sogar möglich, den noch fehlenden Proportionalitätsfaktor anzugeben und zu erkennen, von welchen Faktoren er abhängt. Hierzu müssen folgende Punkte ge-

nauer diskutiert werden:

- Kräfte beim fahrenden Automobil,
- Leistung und Geschwindigkeit,
- Luftwiderstand,
- Bestimmung des Rollreibungskoeffizienten μ .

2. Kräfte beim fahrenden Automobil

Zur Aufstellung der bei einer Autofahrt wirkenden Kräfte werden die üblichen Randbedingungen wie normale Fahrt auf horizontaler Straße und Windstille vorausgesetzt. Dann bestimmen nur die Zugkraft F_Z , der Luftwiderstand F_L und der Rollwiderstand F_R die Bewegung des Autos (n. [4], S. 97 - 101). Die Richtung dieser Kräfte wird durch das Vorzeichen gekennzeichnet (gleiche Wirkungslinie der drei Kräfte). Nach dem zweiten Newtonschen Gesetz gilt:

$$F_Z - F_L - F_R = m \cdot a \quad (1)$$

In der Masse m sind mit m_W die Masse des Autos samt Insassen berücksichtigt und mit $\lambda \cdot m_W$ näherungsweise der Anteil, der bei Beschleunigung der sich drehenden Bauteile wie Gelenkwellen, Bremsen, Reifen, Räder, Getriebe usw. auftritt. λ wird "Drehmomentzuschlag" und $\lambda \cdot m_W$ "Rollenersatzmasse" genannt [1]. Damit gilt :

$$m = (1 + \lambda) \cdot m_W .$$

Der Drehmomentzuschlag ist vom jeweiligen Gang abhängig. In der Literatur findet sich der Durchschnittswert $\lambda = 0,035$ (n. [1], S.29). Dieser kleine Wert berechtigt, den Beitrag der rotierenden Teile zur Beschleunigung in unseren folgenden Betrachtungen zu vernachlässigen und in dieser Näherung $m \approx m_W$ zu setzen.

3. Leistung und Geschwindigkeit

Fährt das Fahrzeug auf horizontaler Straße mit konstanter Höchstgeschwindigkeit v_{\max} , so ist in Gleichung (1) die Beschleunigung $a = 0$ zu setzen und die konstante, maximale Zugkraft $F_{Z\max} = F_L + F_R$ aufzubringen. Für die maximale Zugleistung $P_{Z\max}$ gilt dann:

$$P_{Z\max} = F_{Z\max} \cdot v_{\max} = (F_L + F_R) \cdot v_{\max} . \quad (2)$$

Ferner besteht zwischen P_Z und der Motorleistung P_M der Zusammenhang:

$$P_Z = \eta_G \cdot \eta_A \cdot P_M , \quad (3)$$

wobei η_G der Wirkungsgrad des Getriebes und η_A der Wirkungsgrad des Achsantriebs ist. Mit der am Ausgang des Getriebes zur Verfügung stehenden Leistung P_G gilt:

$$P_G = \eta_G \cdot P_M \text{ und } P_Z = \eta_A \cdot P_G = \eta_A \cdot \eta_G \cdot P_M .$$

Aus den Gleichungen (2) und (3) erhält man damit:

$$\eta_G \cdot \eta_A \cdot P_{M\max} = (F_L + F_R) \cdot v_{\max} , \quad (4)$$

wobei $P_{M\max}$ die für die Höchstgeschwindigkeit v_{\max} aufzubringende Motorleistung ist.

Die beiden Wirkungsgrade, Motorleistung, Luftwiderstand und Rollreibung nehmen für jede Geschwindigkeit charakteristische Werte an. Die Daten zur Überprüfung von Gl. (4) erhält man durch folgende Überlegungen aus den Firmenschriften:

- Bei einem Auto liegen die Wirkungsgrade im Intervall $0,92 < \eta < 0,98$ (n.[1], S.19), so daß in guter Näherung $\eta_G \cdot \eta_A = 1$ gesetzt werden kann.
- Die maximale Motorleistung wird - unabhängig vom Autotyp - annähernd gemäß der Motorkennlinie in. Abb. 1 bei der Höchstgeschwindigkeit erreicht.

LEISTUNG UND DREHMOMENT

HERSTELLER	ADAM OPEL AG
TYP	VECTRA - A / CAVALIER
MOTOR	C 20 NE VERDICHTUNG 9.2
NENNLEISTUNG	85 KW BEI 5200 MIN ⁻¹
DREHMOMENT	170 NM BEI 2600 MIN ⁻¹
MODELLJAHR	1991
	MESSUNG NACH 80/1269/EWG Einschließlich 89/491/EWG

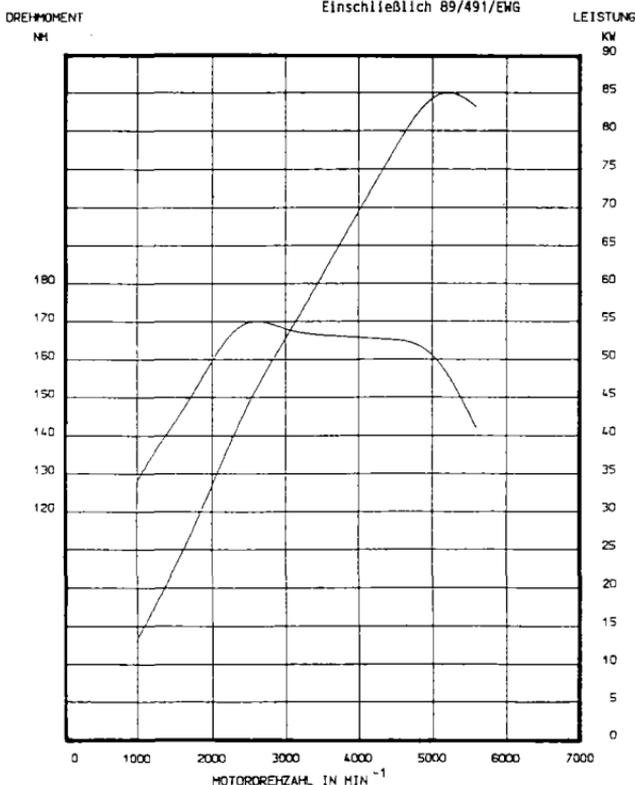


Abb.1: Leistung und Drehmoment in Abhängigkeit von der Motordrehzahl beim Opel Vectra-A/Cavalier.

Verkleinertes Originaldiagramm mit daher schlecht lesbaren Achsenbeschriftungen. Aufgetragen ist auf der linken vertikalen Achse das Drehmoment in Nm beginnend mit 50 Nm im Skalenabstand von 10 Nm und auf der rechten die Leistung in kW beginnend bei 0 im Skalenabstand von 5 kW. Die Motordrehzahl ist auf der horizontalen Achse beginnend bei 0 im Skalenabstand von 1000 Umdrehungen pro Minute angegeben.

Damit folgt: $P_{M_{\max}} \approx (F_L + F_R) \cdot v_{\max}$. (5)

Die maximale Motorleistung läßt sich somit aus dem Luft- und dem Rollreibungswiderstand und der maximalen Geschwindigkeit abschätzen und mit den von den Firmen angegebenen Daten vergleichen.

4. Luftwiderstand und Rollwiderstand

Der Luftwiderstand ergibt sich aus den aerodynamischen Kennwerten der Karosserie und der Fahrgeschwindigkeit. Abb. 2 zeigt am Beispiel des Audi 100 III, daß der Luftwiderstandsbeiwert c_w ab einer Geschwindigkeit von ca. 70 km/h annähernd konstant ist. Bei Windstille gilt:

$$F_L = 0,5 \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2, \quad (6)$$

wobei ρ die Dichte der Luft und v die Momentangeschwindigkeit kennzeichnet. Mit A ist die maximale Querschnittsfläche senkrecht zur Fahrtrichtung gemeint, die in Firmenschriften auch Projektionsfläche genannt wird.

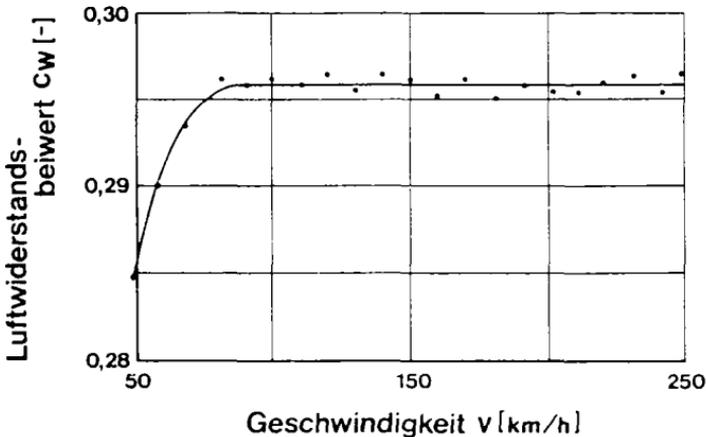


Abb. 2: Luftwiderstandsbeiwert c_w des Audi 100 III in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit [2; S.30].

Verkleinertes Originaldiagramm mit der Geschwindigkeit auf der horizontalen Achse angegeben in km/h (im Original findet man die veraltete, in der Technik leider noch übliche Schreibweise der Einheit).

Der Rollwiderstand berechnet sich nach:

$$F_R = \mu \cdot m \cdot g, \quad (7)$$

wobei μ der Rollreibungskoeffizient ist. Wie in verschiedenen Firmenschriften (z.B. in [4], S. 99) ausgeführt ist, hängt μ von Reifengröße, Bauart der Reifen, Reifendruck, Belastung, Vorspur, Sturz und Geschwindigkeit ab. Für ein gegebenes Auto und somit für einen bestimmten Reifensatz sind diese Einflußvariablen bis auf Reifendruck und Geschwindigkeit konstant.

Die Abhängigkeit des Rollreibungskoeffizienten von Reifendruck und Geschwindigkeit läßt sich durch Ausrollversuche experimentell bestimmen. Hierauf wird im folgenden genauer eingegangen, da bei diesen Versuchen im Unterricht erarbeitete Gesetzmäßigkeiten direkt Anwendung finden. Wir beziehen uns dabei auf eine bei der Firma Opel durchgeführten Studienarbeit [1].

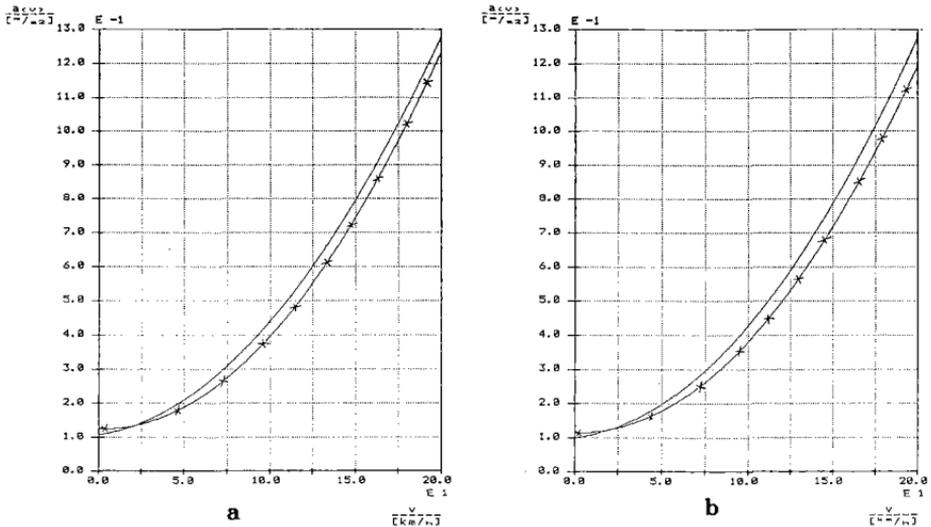


Abb. 3 a u. b: Verzögerung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei einem Ausrollversuch mit einem Opel Corsa bei 1,7 bar (3a) und 2,4 bar (3b) Reifeninnen-
druck (n. [1], S.42).

Verkleinertes Originaldiagramm. Die Beschleunigung ist auf der vertikalen Achse beginnend bei 0 im Skalenabstand 10^{-1} m/s^2 angegeben. Die Geschwindigkeit ist auf der horizontalen Achse beginnend bei 0 im Skalenabstand 25 km/h angegeben. Die Angaben im Text und in Abb. 3 beziehen sich auf die durch Kreuze (x) gekennzeichnete Kurve, die bei einer Autobahnfahrt gewonnen wurde. Die durchgezogene Kurve wurde aus Messungen auf einer Versuchsstrecke erhalten.

In einem Ausrollversuch wird jeweils bei einem bestimmten Reifendruck das Auto bis auf Höchstgeschwindigkeit beschleunigt, um es anschließend auf horizontaler Straße ausrollen zu lassen.

Während des Ausrollens ist die Zugkraft $F_Z = 0$, so daß aus Gl. (1) und (6) folgt:

$$-0,5 \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 - \mu \cdot m \cdot g = m \cdot a \quad (8)$$

Für ein bestimmtes Auto sind in Gl. (8) die Masse m , die Projektionsfläche A , der Widerstandsbeiwert c_w und die Dichte der Luft bekannt, so daß der gesuchte Rollreibungskoeffizient μ aus einem a - v -Diagramm bestimmt werden kann, das wiederum aus s - t -Messungen folgt. Hierzu wird an die Tachowelle des Autos ein Impulsgeber angeschlossen, der pro Radumdrehung 2000 Impulse abgibt. Die Impulsfolge wird mit einem nachgeschalteten Rechner permanent ausgewertet, der bei bekanntem Radumfang und der vom Rechner automatisch gelieferten Zeit das jeweilige a - v -Diagramm direkt auf einen Drucker ausgibt. Die Meßapparatur befindet sich auf dem Rücksitz. Für einen Opel Corsa sind in Abb. 3a

und 3b das so erhaltene a-v-Diagramm und in Abb. 4 das mit Gl. (8) daraus folgende μ -v-Diagramm für zwei charakteristische Reifendrucke dargestellt.

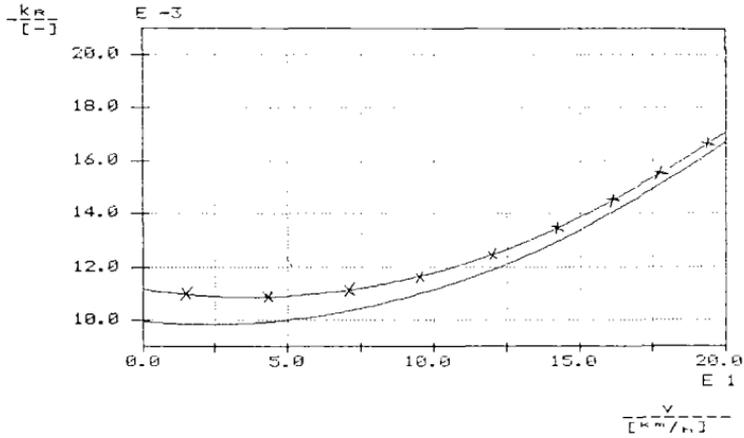


Abb. 4: Rollreibungskoeffizient in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei einem Opel Corsa und einer Autobahnfahrt.

Die durchgezogene Kurve bezieht sich auf 2,4 bar und die durch Kreuze gekennzeichnete auf 1,7 bar Reifennendruck (n. [1], S 60).

Verkleinertes Originaldiagramm mit dem Rollreibungskoeffizienten μ auf der vertikalen Achse beginnend bei 9,5 im Skalenabstand von $2 \cdot 10^{-3}$ und der Geschwindigkeit auf der horizontalen Achse im Skalenabstand 50 km/h beginnend bei 0.

In Abb. 3 ist auffallend, daß das Auto nicht bis auf den Wert $a = 0$ verzögert wird. Für $v = 0$ bleibt eine Restverzögerung, die auf den Einfluß der Rollreibung zurückzuführen ist.

Aus Abb. 4 ergeben sich für den "Opel Corsa" folgende charakteristischen Merkmale:

- μ nimmt zunächst etwas mit der Geschwindigkeit ab und dann nichtlinear zu;
- bei einem höheren Reifendruck ist μ kleiner als bei einem niedrigeren;
- μ liegt etwa zwischen 0,010 und 0,017 bei den vorausgesetzten Reifen.

Opel Corsa

c_w -Wert	0,357	
Frontfläche in m^2	1,72	
Masse in kg	1045	
μ bei $v = 0$ km/h	0,011	} jeweils bei einem Reifendruck von 1,7 bar
μ bei $v = 100$ km/h	0,012	
μ bei $v = 200$ km/h	0,017	

v	F_L	F_R
$v = 0$ km/h	0	113 N
$v = 100$ km/h	0308 N	123 N
$v = 200$ km/h	1232 N	174 N

Tab 1: Charakteristische Daten für den Opel Corsa [1]

In Tab. 1 sind die zur Berechnung des Luftwiderstands F_L und der Rollreibung F_R notwendigen Daten für den vorausgesetzten Opel Corsa angegeben und die damit erhaltenen Werte für F_L und F_R jeweils für drei verschiedene Geschwindigkeiten [1]:

Man erkennt, daß bei maximaler Geschwindigkeit der Luftwiderstand ca. siebenmal größer ist als der Rollwiderstand und daß damit für das gestellte Thema in erster Näherung der Rollwiderstand gegenüber dem Luftwiderstand in Gleichung (5) vernachlässigt werden kann, so daß sich für den gesuchten Zusammenhang zwischen maximaler Motorleistung und Geschwindigkeit folgende vereinfachte Beziehung ergibt:

$$P_{Mmax} \approx 0,5 \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v_{max}^3 \quad (9)$$

5. Überprüfung des Zusammenhangs zwischen maximaler Motorleistung und Höchstgeschwindigkeit

Der in Gl. (9) angegebene Zusammenhang gestattet eine erste interessante Anwendung. Die Automobilfirmen stellen häufig einen gegebenen Autotyp mit unterschiedlichen Motoren aus, was unterschiedliche Höchstgeschwindigkeiten zur Folge hat. Nach Gl. (9) sollte das Verhältnis Q :

$$Q = v_{max}^3 / P_{Mmax} = (0,5 \cdot c_w \cdot \rho \cdot A)^{-1} = T \quad (10)$$

eine für das Modell charakteristische Größe sein, da der Term T bei unveränderter Karosserie konstant ist. Die entsprechende Überprüfung ist besonders einfach, da man die notwendigen Daten bereits aus den bei einem Automobilhändler erhältlichen, üblichen Prospekten entnehmen kann. In der folgenden Tabelle sind einmal die Daten für die Modelle Opel Vectra/Cavalier und Audi 100 Avant aufgeführt und den daraus berechneten Werten für Q :

Opel Vectra/Cavalier

Modell	P in kW	v_{max} in km/h	Q in $10^3(\text{km/h})^3/\text{kW}$
16 SV	60	178	94
C 18 NZ	66	183	93
C 20 NE	85	198	91
20 SEH	95	206	92
C 20 XE	110	217	93

Audi 100 Avant

	74	175	73
2.0 E	85	184	73
2.3 E	98	194	75
2.6 E	110	203	76
2.8 E	128	212	74

Tab. 2: Maximale Motorleistung, Höchstgeschwindigkeit und das Verhältnis Q für den Opel Vectra und Audi Avant bei unterschiedlicher Motorenausstattung

In Tab. 2 erkennt man, daß die Vorhersagen gut erfüllt sind. Die Abweichung vom Mittel-

wert ist kleiner als 3%. Somit findet die hergeleitete Gl. (9) eine Bestätigung durch die experimentellen Daten. Die Kenntnisse der in Q enthaltenen Parameter (s. Gl. (10)) erlaubt ferner abzuschätzen, in welcher Richtung ein Automobilhersteller seine Entwicklung betreiben muß, um z.B. der heute aktuellen Forderung des Marktes: möglichst große Geschwindigkeit bei möglichst kleiner Motorleistung, d.h. geringem Benzinverbrauch gerecht zu werden. Gl. (9) gibt hier die Antwort: ein Auto mit einem großen Q-Wert erfüllt diese Forderung besser als ein Auto mit einem kleineren Q-Wert.

6. Zusammenfassung

Es wurde exemplarisch gezeigt, daß die Einbeziehung von Realdaten und die Anwendung der im Physikunterricht gelernten Gesetze es erlauben, mit einfachen Überlegungen eine im Automobilbau wichtige Beziehung herzuleiten. Die damit verbundenen Aktivitäten können dem Schüler in Ansätzen zeigen, daß eine durch die Technik gestellte Herausforderung mit den im Unterricht gelernten Gesetzmäßigkeiten und Fertigkeiten zu lösen sind. Ferner wurde verdeutlicht, daß Anwendung nicht nur das Einsetzen von Realdaten bedeutet, sondern auch die Auseinandersetzung mit den jeweils zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten. Dazu gehört auch, daß bei der Anwendung physikalischer Gesetzmäßigkeiten Abschätzungen und Näherungen besonders wichtig sind.

Die dargestellten Überlegungen sind im eigenen Unterricht in der 11. Jahrgangsstufe vielfach erprobt. Der Unterricht ist so ausgerichtet, daß generell die Intention verfolgt wird, den Alltagsbezug im oben genannten Sinn im Unterricht einzubeziehen. Dabei bestätigt sich immer wieder, daß die Schüler mit großem Interesse die gestellten Herausforderungen aus dem Alltag bearbeiten und oft auch von sich aus entsprechende Themen vorschlagen. Dies macht beiden Beteiligten mehr Spaß als sich mit den sterilen Aufgabensammlungen herumzuschlagen. In diesem Sinn meinen wir, daß es sich lohnt, die vielleicht anfangs vorhandene Hemmschwelle zu überwinden.

5. Literatur:

- [1] Walter, M.: Rollwiderstands-Messungen auf der Rundbahn eines Prüffeldes und unter Normalbedingungen in der Ebene. Studienarbeit im Fachbereich Maschinenbau, Fachhochschule Wiesbaden, durchgeführt bei der Adam Opel AG, 1987.
- [2] Die Aerodynamik des neuen Audi 100. Eine Audi Dokumentation.
- [3] Uffelman, F.: Das Seitenwindverhalten bei Personenkraftwagen. In: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, H 12 1986.
- [4] Hucho, W.-H. (Hrsg.): Aerodynamik des Automobils. Vogel-Verlag, Würzburg 1981.
- [5] Jordan, J.: Autoprospekte im Physikunterricht. In: PdN-Ph 3(38) 1989, S. 25-26.