

»Trägheitsnavigation« – ein Physik-Informatik-Projekt

Verfasser: StD Dr. Wolfgang Riemer, August-Bebel-Straße 80, 50259 Pulheim

In seinem Artikel »Ein Klassenversuch zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung« (vgl. MNU 49 (1996) H. 5, S. 287) verspricht H. Lüdicke demjenigen positive Erwähnung in der Abi-Zeitung, der die Beschleunigung von Autos in seinem Unterricht untersucht. Die gewünschten Daten wurden in einem fächerübergreifenden Mittelstufenprojekt erhoben. Eine Erwähnung in der Abiturzeitung blieb bisher aus.

1 Hintergrund

Jeder weiß, daß man beim Beschleunigen eines Autos auf Grund der Trägheit des eigenen Körpers in den Rücksitz gepreßt wird, beim Abbremsen »fliegt« man nach vorne. Die Idee der Trägheitsnavigation besteht darin, daß man die Trägheitskraft F , die auf eine Masse m wirkt, ununterbrochen mißt und hieraus über die Newtonsche Gleichung $a = F/m$ die Beschleunigung ermittelt. Die Änderung der momentanen Geschwindigkeit ist $\Delta v = a \cdot \Delta t$, die der momentanen Position ist $\Delta s = v \cdot \Delta t$. Über $v_{neu} = v_{alt} + \Delta v$, $s_{neu} = s_{alt} + \Delta s$ erhält man »online« (in dem Mittelstufenkurs im nachhinein mit Tabellenkalkulation) Ort und Geschwindigkeit. In der Oberstufe schreibt man $v(t) = \int a(t) dt$, $s(t) = \int v(t) dt$.

In Flugzeugen, U-Booten und beim Tunnelbohren geschieht das ganze natürlich dreidimensional. Rotationen werden durch Einsatz von Kreiseln (»Gyrometern«) berücksichtigt. Ein professionelles dreidimensionales Sensorkpaket kostet DM 150 000. In der Software stecken 15 Mannjahre [1].

2 Unterricht

In Physik-Informatikkursen (Klassen 9 und 10) wurden eindimensionale Bewegungen mit einem »ein-

fachen« Beschleunigungssensor [2, 3] untersucht. Solch ein Sensor liefert Spannungen, die der Beschleunigung proportional sind. Als Einstieg in das Thema diente die Zeitlupe-Aufnahme einer Feder in einem Aufzug, in die anschließend die vom Sensor gelieferten Daten eingeblendet wurden. Mit einem A/D-Wandler [4] und einem kleinen Meßprogramm (zwei Seiten Pascal-Quellcode im Umfang einer »Mannstunde«) wird die Beschleunigung 3000mal je Sekunde gemessen, die Mittelwerte werden z. B. 10mal je Sekunde in einem Laptop-Computer gespeichert und nach Beendigung der Messung als Spalte in eine Tabellenkalkulation eingelesen. Es wurden Fahrten im Aufzug der Schule, in Bundesbahn-Zügen, Straßenbahnen und einem Auto protokolliert und anschließend gemeinsam ausgewertet. Der Vergleich der ausschließlich aus den Beschleunigungsdaten ermittelten zurückgelegten Wegstrecke mit der tatsächlich gefahrenen Strecke ist äußerst spannend.

Die Rechnungen mit Tabellenkalkulation sind für Schülerinnen und Schüler der Mittelstufe von angemessenem Schwierigkeitsgrad. Aber auch in Kursen der Oberstufe erscheint die Bedeutung der Integralrechnung in einem völlig veränderten und sehr persönlichen Licht, wenn neben der Fläche unter der

	A	B	C	D	E
1	no	t in s	a in m/s^2	v in km/h	s in m
2	83	7,530	0,00	0,02	0,02
3	84	7,621	0,03	0,03	0,02
4	85	7,712	0,59	0,22	0,02
5	86	7,802	1,18	0,61	0,03
6	87	7,893	0,68	0,83	0,04
7	88	7,984	0,44	0,97	0,06
8	89	8,074	0,95	1,29	0,09
9	90	8,165	0,90	1,58	0,12
10	91	8,256	0,57	1,77	0,16
11	92	8,347	0,74	2,01	0,20
12	93	8,437	0,81	2,27	0,25
13	94	8,528	0,64	2,48	0,31
14	95	8,619	0,60	2,68	0,37
15	96	8,709	0,65	2,89	0,44
16	97	8,800	0,50	3,05	0,51
17	98	8,891	0,39	3,18	0,59
18	99	8,981	0,37	3,30	0,67
19	100	9,072	0,30	3,40	0,75
20	101	9,163	0,10	3,43	0,84
21	102	9,254	0,15	3,48	0,93
22	103	9,344	0,08	3,51	1,01
23	104	9,435	0,05	3,53	1,10
24	105	9,526	0,04	3,54	1,19
25	106	9,617	-0,02	3,54	1,28
26	107	9,707	0,05	3,55	1,37
27	108	9,798	0,01	3,55	1,46

Tab. 1. Beschleunigung eines Aufzuges in 2,268 s auf 3,55 km/h, Steighöhe 1,44 m

Normalparabel auch die Meßergebnisse einer soeben durchgeführten Aufzugfahrt zum Unterrichtsthema werden.

Das Meßprogramm wurde in den Kursen der Mittelstufe als Fertigprodukt eingesetzt, man kann es in Informatikkursen zum zentralen Thema machen. Wer Assembler-Programmierung unterrichten möchte, findet hier ein lohnendes Projektthema.

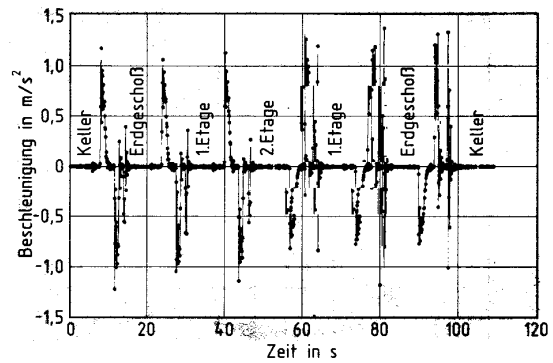


Abb. 1. Beschleunigungen während einer Aufzugfahrt

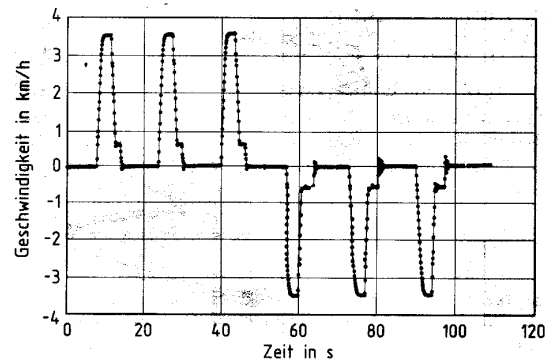


Abb. 2. Geschwindigkeiten während einer Aufzugfahrt

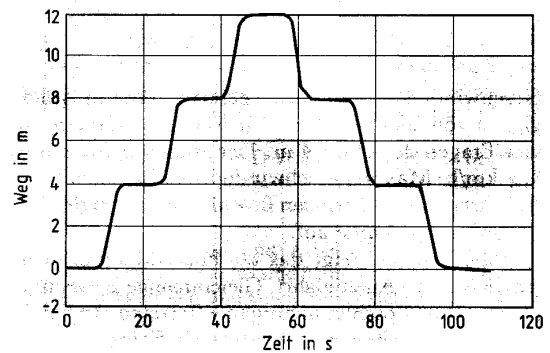


Abb. 3. Zurückgelegter Weg während einer Aufzugfahrt

3 Fahrt mit dem Schulaufzug

Tabelle 1 zeigt einen Ausschnitt aus dem Kalkulationsblatt zu einer Aufzugfahrt. Geschwindigkeit (Spalte D) und zurückgelegter Weg (Spalte E) wurden im Unterricht aus den gemessenen Zeiten (Spalte B) und Beschleunigungen (Spalte C) berechnet.

Der Aufzug beschleunigte in ca. 2 Sekunden auf ca. 3,5 km/h und stieg dabei um ca. 1,44 m. Die Abbildungen 1 bis 3 veranschaulichen Beschleunigung,

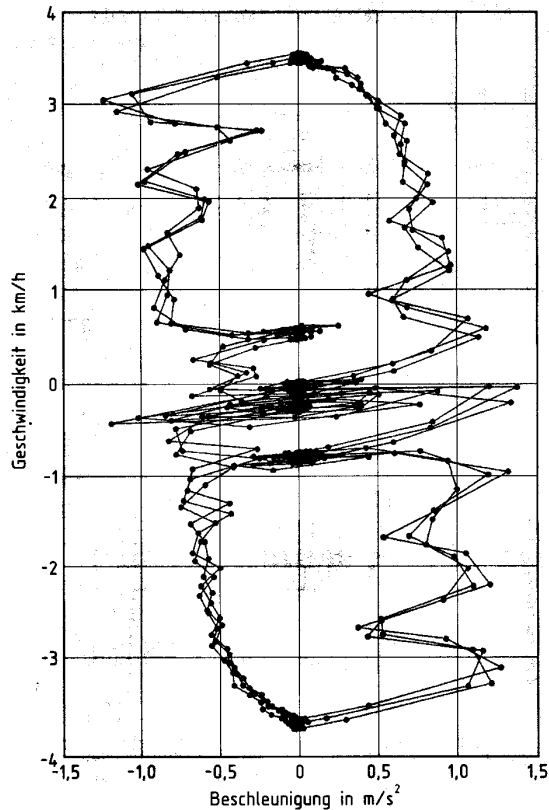


Abb. 4. Beschleunigung-Geschwindigkeit-Phasendiagramm

Geschwindigkeit und zurückgelegten Weg in Abhängigkeit von der Zeit. Wie man erkennt, hat die Schule vier Etagen der Höhe 4 m. Der Aufzug fährt mit ca. 3,5 km/h Maximalgeschwindigkeit. Es treten beim Anfahren und Abbremsen Beschleunigungen der Größenordnung $\pm 1 \text{ m/s}^2$ auf.

Abbildung 4 zeigt das a - v -Phasendiagramm der (periodischen) Aufzugsfahrt. Gleichmäßige Bewegungsphasen ohne Beschleunigung ($a = 0$) treten auf bei den Geschwindigkeiten $\pm 3,5 \text{ km/h}$ (volle Fahrt), kurz vor Stillstand ($\pm 0,7 \text{ km/h}$) und natürlich beim Stillstand.

4 Fahrt mit der S-Bahn

In den Abbildungen 5 und 6 ist die Fahrt zwischen zwei S-Bahn Haltestellen protokolliert. Man erkennt die konstante Beschleunigung beim Anfahren und ebenso die Unregelmäßigkeiten beim Bremsvorgang, die aus dem punktgenauen Anhalten resultieren.

Die Messung ergibt eine Fahrstrecke von 895 m zwischen Köln Chorweiler-Zentrum und Chorweiler-

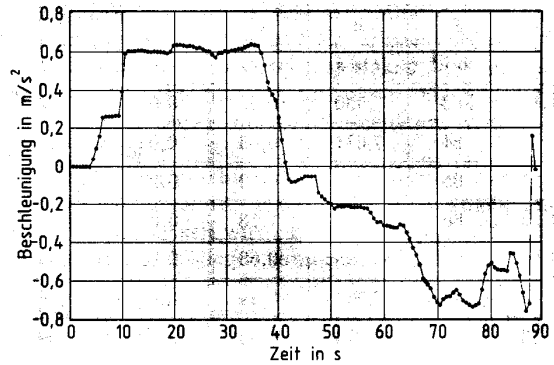


Abb. 5. Beschleunigung einer S-Bahn

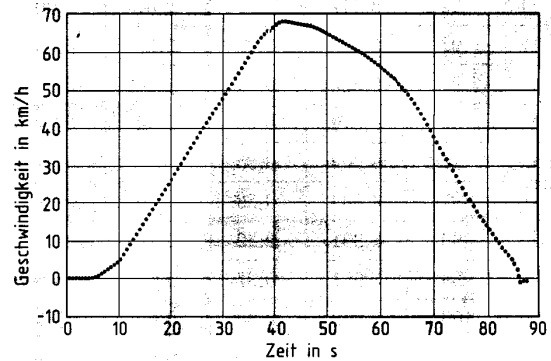


Abb. 6. Geschwindigkeit einer S-Bahn

Nord. Das stimmt mit den Angaben eines Meßtischblattes überein.

5 Beschleunigung und Vollbremsung (Auto), Leistung

Die Abbildungen 7 und 8 veranschaulichen das Beschleunigungs- und Bremsverhalten eines VW-Passat (Baujahr 85, 55 kW Nennleistung). Man benötigt etwa 15 Sekunden (274 m), um auf 100 km/h zu beschleunigen (durchschnittliche Beschleunigung ca. $1,85 \text{ m/s}^2$). Bei der Vollbremsung erreicht man Werte in der Nähe der Erdbeschleunigung (10 m/s^2). Dort, wo die Räder blockieren (quietschende Reifen), reduziert sich die Beschleunigung auf ca. 6 m/s^2 . Der Sinn des ABS wird deutlich. Der Bremsweg betrug in diesem Beispiel 46 m.

Abbildung 9 zeigt die gemessene Leistung $P(t)$ in Abhängigkeit von der Zeit. Sie wurde aus den gemessenen Beschleunigungen $a(t)$, der Masse $m = 1050 \text{ kg}$, der effektiven Stirnfläche $c_w A = 0,7 \text{ m}^2$ und dem Rollwiderstandsbeiwert $c_r = 0,01$ nach der Formel

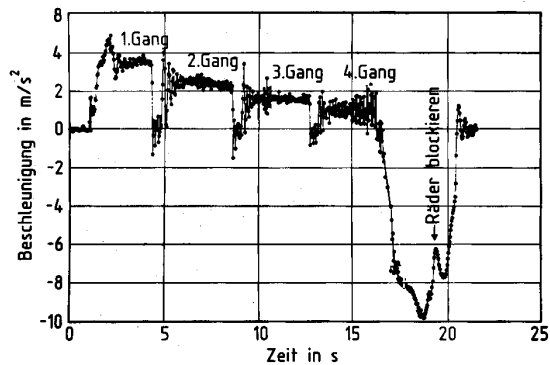


Abb. 7. Beschleunigung bei Vollgas und Vollbremsung (VW-Passat)

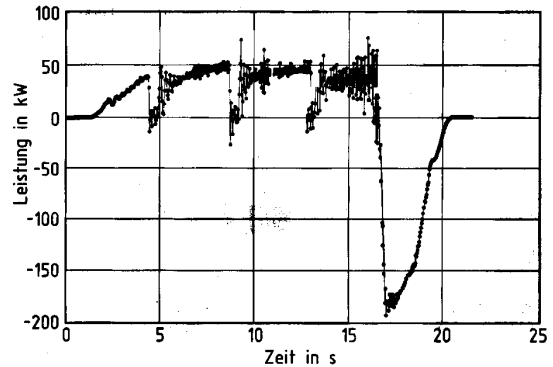


Abb. 9. Leistung bei Beschleunigung und Vollbremsung (VW-Passat)

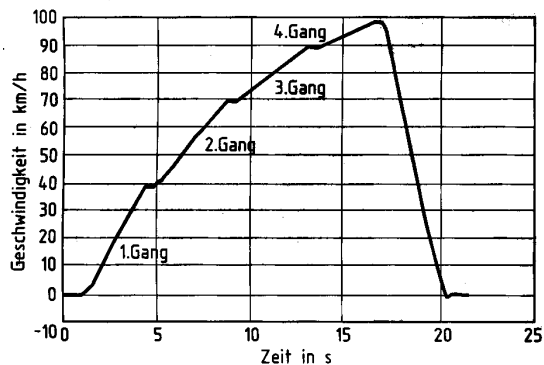


Abb. 8. Geschwindigkeitsverlauf (VW-Passat) mit Schaltvorgängen

$P(t) = v(t)(ma(t) + mgc, + 0,5c_w A \rho_{Luft} v^2(t))$ gemäß [6] berechnet. Ab dem zweiten Gang beschleunigt der Passat in Übereinstimmung mit der Aussage Lüdickes - tatsächlich mit konstanter Leistung (nahezu 50 kW). Die Nennleistung nach Fahrzeugbrief sollte 55 kW betragen, aber das untersuchte Modell war schon 10 Jahre alt - und auch der Wirkungsgrad fordert seinen Tribut.

Natürlich kann man die Messungen am Auto auch mit Hilfe eines normalen Fahrrad-Tachos durchführen. Der Tacho-Magnet läßt sich über einen Draht zw-

ischen Reifen und Felgen festklemmen, den Magnet-schalter kann man mit einem Winkel am Stoßdämpfer befestigen. Zur Aufzeichnung kann man das in [6] erwähnte Programm verwenden. Natürlich versagt diese Methode beim Blockieren der Räder.

Quellen

- [1] Nach Rücksprache mit Herrn LANG, Firma HELASYSTEM, Jahrholzweg 18, 82284 Grafrath.
- [2] Der Sensor AMD 2 der Firma HELASYSTEM mißt im Bereich ± 2 g und kostet DM 900,-.
- [3] Der Sensor QA700 der Firma ALLIEDSIGNAL AEROSPACE ist durch einen Widerstand frei skalierbar. Bezugsquelle: MWS Microwellensysteme GmbH, Postfach 1246, 82207 Herrsching. Preis: 2750,- DM, Schulen und Institute erhalten Rabatt, man kann den Sensor auch ausleihen. Dieser Sensor wird in der Boing 707 verwendet. Er zeichnet sich durch eine sehr geringe Drift aus.
- [4] Ein schneller 12-Bit A/D Wandler (C1290) ist bei CONRAD-Electronics, Claus-Conrad-Str. 1, 92240 Hirschau mit Basic-Programm für unter DM 100,- erhältlich.
- [5] Das Meßprogramm und Arbeitsblätter zum Thema »Trägheitsnavigation« sind beim Autor gegen 20,- DM in Briefmarken und einen frankierten Rückumschlag erhältlich.
- [6] W. RIEMER: Radeln mit dem Computer im Rucksack. - MNU 48 (1995) 80-87. □