

Rupprecht-Gymnasium München

Studienseminar für Physik 2002/2004

SEMINARARBEIT

im Rahmen der Referendarsausbildung
für Mathematik und Physik
am Gymnasium

Die Eisenbahn als Gegenstand des Physikunterrichts

Autor: StRef Thomas Gabler
Seminarlehrer: StD Leitner
Abgabe: 20. August 2003

Inhaltsverzeichnis

Anhang 1: Eisenbahn-Aufgaben für den Physikunterricht.....	2
Anhang 2: Unterrichtsmaterialien zu den vorgestellten Unterrichtseinheiten.....	2
1. Zielsetzung und Eingrenzung des Themas.....	3
2. Sinnvolle Eisenbahn-Themen für den Physikunterricht.....	4
2.1 Jahrgangsstufe 8.....	4
2.2 Jahrgangsstufe 9.....	4
Das Ausdehnungs-Problem bei lückenlos verschweißten Schienen.....	6
2.3 Jahrgangsstufe 10.....	7
2.4 Jahrgangsstufe 11.....	7
2.4.1 Einfache lineare Bewegungen, Newtonsche Gesetze, Energie: Beschleunigung einer Drehstromlok.....	8
2.4.2 Einfache Krummlinige Bewegungen: Zentrierung von Eisenbahn-Radsätzen auf dem Gleis.....	9
2.4.3 Einfache krummlinige Bewegungen: Kurvenüberhöhung, Neigetechnik.....	10
2.5 Jahrgangsstufe 12.....	11
Elektromagnetische Schwingungen: Induktive Zugsicherung.....	11
3. Eisenbahn-Themen in der Praxis: Zwei kleine Unterrichtseinheiten für die Jahrgangsstufe 10.....	12
3.1 <i>Die Lenzsche Regel beim ICE 3</i>	12
3.1.1 Fachlicher Hintergrund und Einordnung in den Lehrplan.....	12
3.1.2 Methodische und didaktische Überlegungen.....	13
3.1.3 Fazit.....	14
3.2 <i>Warum ruckeln manche Elloks beim Anfahren?</i>	15
3.2.1 Fachlicher Hintergrund und Einordnung in den Lehrplan.....	15
3.2.2 Methodische und didaktische Überlegungen.....	16
3.2.3 Fazit.....	19
4. Zusammenfassung und Ausblick.....	19
5. Literaturverzeichnis.....	20

1. Zielsetzung und Eingrenzung des Themas

Die Eisenbahn, im 19 und frühen 20. Jahrhundert ein Wegbereiter der modernen Technik, hat heute viel von ihrem früheren Ansehen in der Gesellschaft verloren. Zwar ist sie aus dem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken, insbesondere im öffentlichen Nahverkehr vieler Großstädte, doch in die Schlagzeilen gerät sie fast nur noch durch Pannen und Unglücke.

War früher „Lokomotivführer“ weit oben auf der Hit-Liste der Berufswünsche junger Buben, so findet sich heute dort viel häufiger der Flugzeug-Pilot wieder. Einer der Hauptgründe für die schlechte Stellung der Bahn im Zusammenwirken der Verkehrsträger ist auch die harte Konkurrenz des Flugzeugs, dessen Flughäfen der Staat baut und dessen Treibstoff steuerfrei geliefert wird, während die Bahn nach wie vor ihre Verkehrswege im wesentlichen selbst finanzieren muss.

Viele verbinden mit der Eisenbahn die Zeit der Dampflokomotiven; für sie ist die „Große Ära der Eisenbahn“ mit der Ausmusterung der letzten Dampfloks Ende der Siebziger Jahre zu Ende gegangen. Man muss nur einmal an einem Bahnhof Großeltern mit ihren kleinen Enkeln beobachten: Meist stellt der Opa irgendwann die Frage: „Na, wie macht der Zug?“, und der Enkel antwortet pflichtgemäß „Tsch-tsch-tsch“, während am Bahnsteig eine Diesellok lautstark röhrend ihren Zug beschleunigt...

Interessanterweise findet diese Sicht der Bahn auch im Physikunterricht ihren Niederschlag: In den meisten Schulbuchreihen wird der Eisenbahn nur an einer einzigen Stelle größerer Raum eingeräumt: Bei der Funktionsweise der Dampfloks. Ansonsten findet man in der Regel höchstens noch Geschwindigkeits-Aufgaben vom Typ „ein Zug fährt von A nach B“.

Mit dieser Arbeit möchte ich zeigen, dass auch die moderne Eisenbahn eine Vielzahl interessanter Themen und Aspekte für den Physikunterricht beisteuern kann. Aus diesem Grund habe ich mich auf Nachkriegs-Bahn Technik beschränkt und Dampflokomotiven komplett außen vor gelassen. Ein weiterer Grund für diese Einschränkung ist die Tatsache, dass die heutigen Schüler in einer Zeit aufwachsen, in der man Dampfloks höchstens noch bei Museumsfahrten oder im Modell beobachten kann.

Ebenso außen vor (mit einer kleinen Ausnahme) bleiben soll die Magnetschwebbahn Transrapid, weil sie keine Eisenbahn im klassischen Sinn ist, und weil sie meiner Meinung nach in Deutschland wegen ihrer Inkompatibilität zum bestehenden Schienennetz, ihrer hohen Kosten, ihres höheren Energieverbrauchs und ihrer fast ausschließlichen Eignung für Personentransporte auch mittelfristig keine wesentliche Rolle spielen wird.

Diese Arbeit gliedert sich in drei Teile: Zunächst möchte ich eine Reihe von Eisenbahn-Themen vorstellen, die sich meiner Meinung nach gut für einen Einsatz im Physikunterricht eignen. Dabei habe ich vor allem darauf Wert gelegt, Themen auszuwählen, die besonders typisch für die Eisenbahn sind, die also bei anderen Verkehrsmitteln nicht oder nicht in diesem Ausmaß auftreten.

Im zweiten Teil berichte ich von zwei kleinen Unterrichtseinheiten, die ich im Rahmen des Zweigschuleinsatzes entworfen und durchgeführt habe.

2. Sinnvolle Eisenbahn-Themen für den Physikunterricht

In diesem Abschnitt möchte ich erörtern, an welchen Stellen im aktuell gültigen Physik-Lehrplan Eisenbahn-Themen sinnvoll eingesetzt werden können. Dazu werde ich für jede Jahrgangsstufe eine Reihe von besonders geeigneten Eisenbahn-Themen, die auch im Rahmen einer kleinen Unterrichtseinheit behandelt werden können, ausführlich vorstellen. Zusätzlich werde ich etwas knapper auf Themen eingehen, die kurz im Laufe einer Unterrichts-Einheit angesprochen werden könnten oder Stoff für Physik-Aufgaben bieten. Zu einigen dieser Themen habe ich Aufgaben erstellt, die im Anhang dieser Arbeit zu finden sind.

Orientiert habe ich mich bei dieser Erörterung am Lehrplan für die mathematisch-naturwissenschaftliche Ausbildungsrichtung, weil dieser am umfassendsten ist und den Stoff der anderen Ausbildungsrichtungen mit abdeckt.

Noch ein Wort zu den Addita der 10. und 11. Jahrgangsstufe: Bei keinem der zur Wahl stehenden Addita sehe ich vernünftige Einsatzmöglichkeiten von Bahn-Themen

Der Lehrplan der 13. Jahrgangsstufe, der ganz auf Atom- und Kernphysik zugeschnitten ist, bietet natürlich ebenfalls keine vernünftigen Einsatzmöglichkeiten für Eisenbahn-Themen.

2.1 Jahrgangsstufe 8

Die achte Jahrgangsstufe ist recht arm an Eisenbahn-relevanten Themen. Im Rahmen der mechanischen Phänomene könnte man eine der eingangs erwähnten Aufgaben zur mittleren Geschwindigkeit einsetzen, die man auch in diversen Physikbüchern finden kann. Interessanter wäre es natürlich, die benötigten Angaben direkt aus Bahn-Fahrplänen oder Kursbüchern zu ziehen, so dass die Schüler zusätzlich den Umgang mit Tabellen üben können.

Die Zusammensetzung von Kräften ist bei der Eisenbahn wenig interessant, da in Zügen die Kräfte meist immer in die gleiche Richtung wirken. Denkbar wäre es, die Verteilung der Zugkräfte auf die Kupplungen eines Zuges mit zehn Wagen berechnen zu lassen, der von zwei gleichen Loks gezogen wird.

Die Druckluftbremse der Bahn im Rahmen des Kapitels „Druck in Flüssigkeiten und Gasen“ zu behandeln, macht wenig Sinn, weil sie sehr weit über das vom Lehrplan verlangte hinausgeht und der Druckbegriff dort nur einen sehr kleinen Aspekt des Ganzen ausmacht.

2.2 Jahrgangsstufe 9

Die Reibung ist ein ganz zentrales Thema für die Eisenbahn, stellt sie doch ihren größten Vorteil gegenüber dem Auto, gleichzeitig aber auch eines der Haupt-Erschwernisse für den Betrieb. Bei der Eisenbahn ist die Rollreibung extrem niedrig (Die Fahrwiderstandszahl eines Zuges beträgt ca. $0,002^1$). Im Verhältnis dazu ist die Haftung (im Eisenbahn-Jargon: Kraftschluss) sehr hoch: Bei trockenen Schienen können Werte bis $0,39$ erreicht werden, bei nassen, schmierigen Schienen immerhin noch $0,18^2$. Durch diesen großen Unterschied können 80 Tonnen schwere Loks bis zu 2000 Tonnen schwere Züge befördern.

Bei schlechtem Wetter kann es jedoch, gerade bei älteren Lokomotiven, leicht zum Schleudern (Durchdrehen) der Treibräder kommen, was zu Schäden an den Gleisanlagen führen kann. Im Herbst blockieren des öfteren die Bremsen der Wagen auf den vom Laub schmierig gewordenen Schienen, so dass die Räder Flachstellen bekommen und die Wagen aus dem Verkehr gezogen werden müssen.

Natürlich bietet sich das Gebiet „mechanische Energie“ sehr für Bewegungsaufgaben an. Insbesondere bietet es sich an, herauszustellen, dass die Bewegungsenergie bei der Bahn signifikant höher ist als im Straßenverkehr.

Für die klassischen Bremsweg-Aufgaben mit dem Ansatz „Kinetische Energie gleich Reibungsarbeit“ sollte man die Bahn jedoch nicht ohne weiteres heranziehen, weil die so errechneten Bremswege viel zu gering ausfallen. Zum einen dauert die Einleitung einer Bremsung sehr lange (um Zerrungen im Zugverband zu verhindern, vergehen vom Betätigen des Bremsventils bis zum vollen Ansprechen der Bremsen bei Schnellzügen 2-3 Sekunden, bei schweren Güterzügen durchaus 20-30 Sekunden). Zudem nutzen Reisezüge die theoretisch mögliche Bremskraft aus Gründen der Fahrgast-Sicherheit bei Weitem nicht aus, die Verzögerung ist auf ca. $1,2 \frac{m}{s^2}$ begrenzt.³ Es wäre aber sicher sinnvoll, im Zusammenhang mit Bremswegaufgaben auf die sehr langen Bremswege von Zügen hinzuweisen (das Signalsystem der Bahn ist für Regelbremswege von bis zu 1000 m ausgelegt).

Die Formel „Leistung gleich Kraft mal Geschwindigkeit“ ist wohl den wenigsten Schülern geläufig. Gerade bei modernen Elektroloks lässt sie sich sehr schön einüben, weil diese ab einer bestimmten Geschwindigkeit (dem *Dauerpunkt*) mit konstanter Leistung beschleunigen⁴ (siehe dazu auch den entsprechenden Abschnitt zur 11. Klasse).

Beim Abschnitt „Technische Nutzung Innerer Energie in Energiewandlern“ wird in der Regel auch der Dieselmotor behandelt. Die Motoren von Dieselloks unterscheiden sich nur durch wenige Details von Lkw-Motoren:

- Lok-Dieselmotoren haben natürlich deutlich mehr Hubraum (ca. 100 Liter) und Leistung (2000 - 3000 kW).⁵
- Sie müssen vor dem Anlassen aktiv vorgeschmiert werden (das Heulen der Schmierölpumpe ist in der Regel gut zu hören)

Bei der Kraftübertragung muss man zwei Fälle unterscheiden: Westdeutsche Dieselloks haben meist hydraulische Kraftübertragung, die mit Sicherheit den Umfang des Additums „Strömungslehre“ der 11. Klasse sprengen würde, der Rest der Welt fährt dieselektrisch, das heißt der Motor treibt einen Generator an, der Strom für elektrische Fahrmotoren erzeugt.⁶

Ob diese Besonderheiten die spezielle Behandlung der Diesellok rechtfertigen, wage ich stark zu bezweifeln.

Zum Themenkomplex „Ausdehnung bei Erwärmung“ gehört folgendes wichtige Thema:

Das Ausdehnungs-Problem bei lückenlos verschweißten Schienen

Eine der am häufigsten gestellten Fragen (nicht nur von Schülern) zur Eisenbahntechnik (siehe Homers Eisenbahn-FAQ⁷) beschäftigt sich mit der Längenausdehnung von Schienen. Das Eisenbahn-Magazin hat diesem Problem vor kurzem sogar einen eigenen Artikel gewidmet. Da die Erklärung recht einfach zu verstehen ist und keine spezielle Fachkenntnis benötigt, bietet sich dieses Thema an, im Unterricht angesprochen zu werden.

Stahlschienen dehnen sich bei Erwärmung aus und ziehen sich bei Abkühlung zusammen. Um die entstehenden Längenunterschiede auszugleichen, wurden die Schienen früher an den Schienenstößen (d.h. an den Enden der einzelnen Schienenstücke) nur mit seitlichen Laschen verschraubt, so dass zwischen den Enden eine je nach Temperatur größere oder kleinere Lücke entstand, die das eisenbahn-typische charakteristische, rhythmische Rattern erzeugten.

Bei modernen Gleisanlagen sind die Schienen aus Rücksicht auf Sicherheit und Fahrkomfort lückenlos verschweißt. Da sich Stahl bei Erwärmung ausdehnt und bei Abkühlung zusammenzieht, muss diese Längenänderung irgendwie abgefangen werden.

Die Lösung des Problems steckt in der massiven Gleisbettung. Der Schotter, in dem die Schwellen stecken, ist mit speziellen Maschinen so verdichtet (Eisenbahner sagen „gestopft“), dass sich die einzelnen Schotterkörner gegenseitig verkanten und so den Schwellen ein sehr stabiles Bett bieten. Die Schwellen unterstützen diesen Halt zusätzlich: Holzschwellen sind etwas nachgiebig, so dass sich der Schotter in die Schwellen hinein drücken kann, die moderneren (weil langlebigeren) Betonschwellen werden nach unten hin breiter. Auf den modernsten Schnellfahrstrecken (Berlin-Wolfsburg und Köln-Frankfurt) wird sogar eine „feste Fahrbahn“ verwendet, d.h. die Schienen werden auf extrem genau gefertigten Betonplatten befestigt.

Da die Schienen auf dem Oberbau in sehr kurzem Abstand befestigt sind, können sie im Normalfall nicht zur Seite hin ausweichen, so dass sie mechanisch gestaucht oder gedehnt werden.

Die Dehnung kann man im Unterricht anhand eines Drahtes demonstrieren: Ein Stück Draht wird erwärmt und anschließend straff eingespannt. Kühlt man nun den Draht ab, erhöht sich zwar seine Spannung, wie man durch anzupfen demonstrieren kann, aber er reißt nicht.

Um die Kräfte, die im Gleis wirken, möglichst gering zu halten, dürfen Schienen nur bei mittleren Temperaturen verschweißt werden. Deshalb finden diese Arbeiten im Sommer nur nachts statt, im Winter müssen die Schienen vor dem Verschweißen mit Gasbrennern vorgewärmt werden.

So kommt es nur gelegentlich an besonders heißen Sommertagen zu Gleisverwerfungen, wenn der Oberbau eines Gleises marode geworden ist, zum Beispiel durch Abrieb an den Schotterkörnern. Im Winter treten gelegentlich Schienenbrüche auf, wenn ein Schienenstück Materialermüdung zeigt. Diese werden zunächst mit Schraublaschen gesichert und später (bei höheren Temperaturen) erneut verschweißt.⁸

2.3 Jahrgangsstufe 10

Der Lehrplan der 10. Jahrgangsstufe ist in der mathematisch-naturwissenschaftlichen Ausbildungsrichtung ganz auf die Elektrik zugeschnitten, so dass die passenden Eisenbahn-Themen aus dem Bereich der elektrischen Zugförderung stammen.

Der Bereich „elektrische Arbeit und Leistung“ bietet sich natürlich ebenso wie sein mechanisches Pendant aus der 9. Jahrgangsstufe besonders für Rechenaufgaben an.

Der Lehrplan schreibt für die 10. Jahrgangsstufe ein Unterrichtsprojekt zum Themenkreis „Ambivalenz der Technik“ vor. Einer der Themenvorschläge ist maßgeschneidert für ein Thema, bei dem die Eisenbahn zwar nicht unbedingt die Hauptrolle spielt, aber immerhin gut abschneidet: Der Vergleich verschiedener Fortbewegungsmittel aus energetischer Sicht. Da die Bahn eines der umweltfreundlichsten, aber leider auch eines der unbeliebtesten Verkehrsmittel ist, wäre es gut, die Bahn einmal in einem guten Licht darzustellen.

Für leistungsstarke Klassen könnte man im Rahmen der Behandlung des Transformators noch die Frage in den Raum stellen, warum die Deutsche Bahn diese seltsame Stromversorgung mit Wechselstrom von 15 kV bei einer Frequenz von 16,7 Hz gewählt hat:

In der Anfangszeit der elektrischen Zugförderung hatten die Ingenieure mit einem großen Problem zu kämpfen: In den Ankern vielpoliger Wechselstrommotoren liegen stromdurchflossene Wicklungen direkt neben solchen, die gerade keinen Kontakt zu den Bürsten besitzen, und das auf einem gemeinsamen Eisenkern. Da der Motor mit Wechselstrom betrieben wird, wird also in den unbenutzten Windungen eine Spannung induziert. Schließen nun die Bürsten diese Wicklung mit der bisher stromdurchflossenen kurz, kommt es zu einem starken Funken, dem sogenannten *Bürstenfeuer*. Je höher die Frequenz des verwendeten Wechselstroms ist, desto schlimmer ist das Bürstenfeuer, so dass man zu dieser niedrigen Frequenz gegriffen hat (Dass es genau 16,7 Hz sind, liegt daran, dass man diese mit rotierenden Umformern mit Polverhältnis 3:1 aus 50 Hz gewinnen kann).

Zwei weitere lohnende Eisenbahn-Themen habe ich zu kleinen Unterrichtseinheiten ausformuliert und im Rahmen des Zweigschuleinsatzes erprobt. Sie folgen später im Praxisteil:

- *Warum ruckeln manche Elloks beim Anfahren?*
- *Die Lenzsche Regel beim ICE 3*

2.4 Jahrgangsstufe 11

Der Lehrplan der 11. Jahrgangsstufe ist eine wahre Fundgrube für den Eisenbahn-Freund. Mit Ausnahme des Bereichs Gravitation könnte man bei sämtlichen Abschnitten des Fundamentums Eisenbahn-Themen unterbringen.

Im Rahmen des Themenkomplexes „Schwingungen und Wellen“ könnte man folgendes Thema ansprechen: Wenn zwei ICE-Züge zusammengekuppelt verkehren, müssen die zu hebenden Stromabnehmer so gewählt werden, dass sie möglichst weit auseinander liegen, weil der vordere Stromabnehmer die Oberleitung zu Schwingungen anregt, die sich als (gedämpfte) Transversalwelle im Fahrdraht fortpflanzen, so dass der hintere Stromabnehmer bei zu kurzem Abstand Kontaktprobleme bekäme.⁹

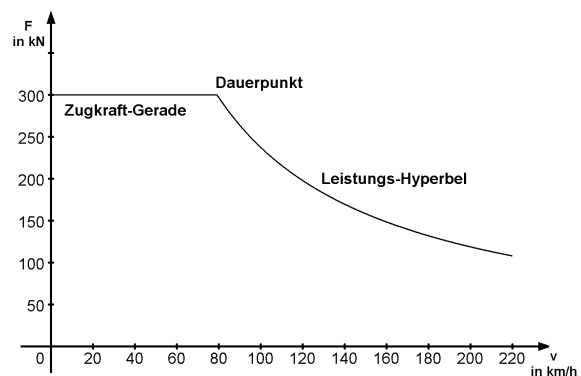
Folgende drei Themen halte ich für besonders geeignet:

2.4.1 Einfache lineare Bewegungen, Newtonsche Gesetze, Energie: Beschleunigung einer Drehstromlok

Beschleunigungsvorgänge von Straßenfahrzeugen haben oft das Problem, dass sie eigentlich nicht wirklich gleichförmig sind, weil das abgegebene Drehmoment eines Verbrennungsmotors nur in einem sehr engen Drehzahlbereich konstant ist. Durch die Schaltvorgänge wird die Beschleunigung zusätzlich noch unterbrochen, so dass man in der Schule oft sehr modellhaft rechnen muss.

Moderne Elektroloks dagegen wandeln den zugeführten Strom intern in Drehstrom mit stufenlos regelbarer Frequenz und speisen damit Drehstrom-Asynchron-Fahrmotoren, die über den gesamten Drehzahlbereich konstante Leistung und durch die elektronische Regelung den Kraftschluss Rad/Schiene voll ausnutzen können.¹⁰

Das Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm einer solchen Lok gliedert sich in zwei Bereiche: Unterhalb einer bestimmten Geschwindigkeit, die man als Dauerpunkt bezeichnet, ist die Zugkraft konstant, der begrenzende Faktor ist die Haftung Rad/Schiene (der sogenannte Kraftschluss). Oberhalb dieser Geschwindigkeit ist die Zugkraft proportional zu $\frac{1}{v}$, weil die maximale Leistungsabgabe erreicht ist (begrenzt durch die Belastbarkeit der elektrischen Bauelemente und die maximal zulässige Stromstärke in der Oberleitung).¹¹



F-v-Diagramm einer modernen Drehstromlok (z.B. Baureihe 101 oder 182) bei idealen Bedingungen

Während Beschleunigungsvorgänge unterhalb des Dauerpunkts leicht zu berechnen sind, kann man für die Zeit, die ein Zug benötigt, um auf eine Geschwindigkeit oberhalb des Dauerpunkts zu beschleunigen, eine recht einfache Formel herleiten, wenn man den Luftwiderstand vernachlässigt, was bis etwa 200 km/h noch sehr gute Näherungswerte liefert:

P = Leistung der Lok, F_0 = maximale Zugkraft, v_D = Dauerpunkts-Geschwindigkeit

Um bis zum Dauerpunkt zu beschleunigen, benötigt der Zug die Zeit t_1 :

$$t_1 = \frac{v_D}{a}, \quad v_D = \frac{P}{F_0}, \quad a = \frac{F_0}{m} \Rightarrow t_1 = \frac{P \cdot m}{(F_0)^2}$$

Für die weitere Beschleunigung vom Dauerpunkt bis zur Geschwindigkeit v benötigt er die Zeit t_2 :

$$\Delta E_{\text{kin}} = P \cdot t_2 \Rightarrow t_2 = \frac{1}{P} \left(\frac{m}{2} v^2 - \frac{m}{2} v_D^2 \right) = \frac{m}{2P} \left(v^2 - \left(\frac{P}{F_0} \right)^2 \right) = \frac{m}{2} \left(\frac{v^2}{P} - \frac{P}{F_0^2} \right)$$

Für die Gesamtzeit gilt somit:

$$t_{\text{ges}} = \frac{m}{2} \left(\frac{v^2}{P} - \frac{P}{F_0^2} \right) + \frac{m}{2} \cdot \frac{2P}{F_0^2} = \frac{m}{2} \left(\frac{v^2}{P} + \frac{P}{F_0^2} \right)$$

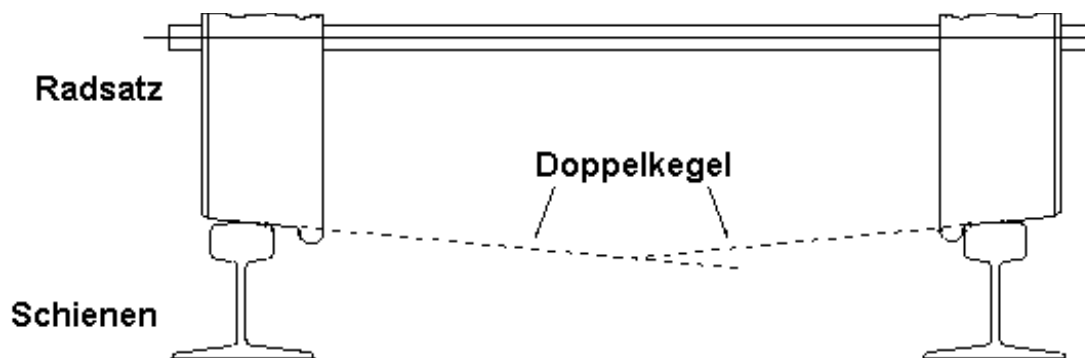
2.4.2 Einfache Krummlinige Bewegungen: Zentrierung von Eisenbahn-Radsätzen auf dem Gleis

Folgender Sachverhalt ist geeignet, den Unterschied zwischen Bahn- und Winkelgeschwindigkeit zu verdeutlichen:

Ein weit verbreiteter Irrglaube ist, dass sich Schienenfahrzeuge nur aufgrund ihrer Spurkränze auf den Schienen halten. Wäre dies so, müssten die Spurkränze der Räder ständig an den Schienenflanken schleifen, was einen ungeheuren Verschleiß zur Folge hätte.

Tatsächlich werden die Spurkränze nur in sehr engen Kurven und beim Befahren von Weichen gebraucht. Man hört dies gut anhand des kreischenden Geräuschs, das diese beim Anlaufen an den Schienen verursachen (Fahrzeuge, die auf kurvenreichen Strecken unterwegs sind, haben deswegen meist eine Spurkranz-Schmiereinrichtung).

Im Normalfall jedoch sorgt ein anderes Prinzip für die Zentrierung des Fahrzeugs im Gleis:



Eisenbahnräder sind konisch, sie werden von innen nach außen schmaler. Zudem sind sie starr auf der Achse befestigt, so dass beide Räder einer Achse mit gleicher Winkelgeschwindigkeit rotieren müssen. Driftet nun der Radsatz etwas nach rechts, erhält das rechte Rad aufgrund des nun größeren wirksamen Durchmessers eine größere Bahngeschwindigkeit als das linke Rad, dessen wirksamer Durchmesser sich verringert hat; der Radsatz leitet also selbstständig eine Linkskurve ein. Driftet er nun aufgrund dessen nach links, wiederholt sich das Geschehene in anderer Richtung. Der Radsatz pendelt also immer leicht hin und her, im Idealfall beschreibt er eine Sinuskurve.

In Kurven wird der Radsatz ohnehin durch die Zentrifugalkraft nach außen gedrängt, so dass sich auf der Kurven-Außenseite der effektive Raddurchmesser vergrößert und auf der Innenseite verkleinert, was die Kurvenfahrt zumindest unterstützt. Wenn die Kurve zu eng wird, läuft schließlich der Spurkranz an der Schiene an.

Man sieht also: Die starre Kopplung der Räder bei der Bahn ist kein Anachronismus, sondern gewollt und wichtig.

Im Unterricht lässt sich dieses Phänomen anhand eines einfachen Versuchs demonstrieren: Zwei Plastikbecher werden an ihrer Öffnung zusammengeklebt, als Schienen dienen z.B. zwei Holzplatten im Abstand von 10 cm. Lässt man diesen Doppelkegel abrollen, kann man schön beobachten, wie sein Schwerpunkt eine Schlangenlinie beschreibt.¹²

2.4.3 Einfache krummlinige Bewegungen: Kurvenüberhöhung, Neigetechnik

Die bei Kurvenfahrten auftretenden Kräfte waren seit jeher ein wichtiges Thema für die Eisenbahn. Die Höchstgeschwindigkeit eines Zuges in einer bestimmten Kurve ist weniger durch Sicherheitsaspekte begrenzt, sondern viel mehr durch den Komfort der Fahrgäste bzw. die Sicherheit des Ladeguts. Während Zentrifugalbeschleunigungen von $2,0 \frac{m}{s^2}$ vom Gleis sicher verkraftet werden, empfinden manche Passagiere Seitenbeschleunigungen von mehr als $1,0 \frac{m}{s^2}$ bereits als unangenehm.¹³

Bereits sehr früh ging man deswegen dazu über, in Kurven die Außenschiene anzuheben. Arthur Fürst schrieb 1918:

„Ein sehr viel wirksameres Mittel [als Entgleisungs-Schutzschienen] gegen Entgleisungsgefahr und Fliehkraftdruck ist jedoch die für schärfere Krümmungen überall vorgeschriebene Überhöhung des Gleises.

Um die Fahrzeuge möglichst kräftig nach dem Mittelpunkt der Krümmung zu drängen, hebt man die Außenschiene an.“¹⁴

Bei der DB ist heute eine maximale Überhöhung von 150 mm zulässig.¹⁵ Damit lässt sich für jeden Kurvenradius die optimale Kurvengeschwindigkeit bestimmen, bei der die vom Fahrgast gefühlte Seitenbeschleunigung gerade verschwindet. Die Berechnung ist nicht besonders schwierig, sie eignet sich also gut für den Physikunterricht.

Will man die Kurvengeschwindigkeit weiter steigern, muss man die höhere Zentrifugalbeschleunigung im Fahrzeug selbst kompensieren, was zur Entwicklung von Fahrzeugen mit aktiver oder passiver Wagenkasten-Neigeeinrichtung (kurz Neigetechnik oder NeiTech) führte.

Bei der passiven Neigetechnik, die derzeit nur der spanische Talgo Pendular besitzt, der in Deutschland als Nachtzug unterwegs ist, sind die Wagenkästen an ihren Enden an U-förmigen Jochen aufgehängt, so dass sie aufgrund der Zentrifugalkraft selbsttätig zur Kurven-Außenseite hin pendeln. Der maximale Neigungswinkel beträgt $3,5^\circ$, er wird nur zur Komfortsteigerung genutzt.

Alle anderen Neigezüge besitzen aktive Neigetechnik, bei der mittels Beschleunigungs- und Lagesensoren der optimale Neigewinkel ermittelt und der Wagenkasten mittels Hydraulik oder Elektromotoren entsprechend geneigt wird. Hier sind Neigungswinkel von bis zu 8° möglich, was eine deutliche Geschwindigkeitssteigerung in Kurven erlaubt. In Deutschland sind im wesentlichen zwei aktive Neigesysteme im Einsatz: Die hydraulische Fiat-„Pendolino“-Technik wird vor allem in den elektrischen Neige-ICEs (Baureihe 411, 415) eingesetzt, während die meisten Regional-verkehrs-Dieseltriebwagen mit der deutschen „AEG Neicontrol E“ ausgerüstet sind, die von der Geschütz-Niveauregulierung des Kampfpanzers Leopard II abgeleitet wurde.¹⁶

Da diese Fahrzeuge eigentlich nur den effektiven Überhöhungswinkel verändern, ist die Berechnung der zulässigen Kurvengeschwindigkeiten auch hier recht einfach. Es bietet sich also an, eine Vergleichsrechnung mit und ohne Neigetechnik zu machen. Da man zur Zeit immer wieder etwas über Neigetechnik in der Zeitung liest (und sei es, weil sie wieder einmal nicht funktioniert), bietet sich diese Technik sehr für den Unterricht an.

2.5 Jahrgangsstufe 12

Im Zusammenhang mit elektrischen und magnetischen Feldern ist es interessant zu erwähnen, dass die Felder von Bahn-Oberleitungen so stark sein können, dass in benachbarten Häusern das Bild von Fernsehern und Computer-Röhrenmonitoren zittern und Farbverfälschungen aufweisen kann.¹⁷ Die Computer-Monitore der Fahrkarten-Ausgabe im Untergeschoss des Münchener Hauptbahnhofs, die direkt über den Gleisen der S-Bahn liegt, haben deswegen Abschirmhauben aus Blech. Dies zeigt eindrucksvoll die große Reichweite elektromagnetischer Felder selbst bei geringen Frequenzen.

Ansonsten bietet sich eigentlich nur noch ein Themenbereich für die 12. Jahrgangsstufe an:

Elektromagnetische Schwingungen: Induktive Zugsicherung

Um zu verhindern, dass ein Lokführer ein halt zeigendes Signal übersieht und ungebremst in einen besetzten Gleisabschnitt fährt, setzen viele Bahngesellschaften Zugsicherungssysteme auf der Basis von Schwingkreisen ein. Das von der Deutschen Bahn und den Österreichischen Bundesbahnen benutzte System heißt Induktive Zugsicherung oder kurz Indusi.

Bei der Indusi befindet sich bei jedem Hauptsignal ein kleiner, meist gelber Kasten unmittelbar außen an der rechten Schiene (im Bahnjargon „Gleismagnet“ genannt). In seinem Inneren befindet sich ein Schwingkreis mit einer Resonanzfrequenz von 2000 Hz. Wenn das Signal die Vorbeifahrt erlaubt, ist dieser kurz geschlossen und damit unwirksam. Zeigt das Signal dagegen Halt, ist der Schwingkreis „scharf“.

Auf der Lok befindet sich knapp über Schienen-Niveau ebenfalls ein Schwingkreis, der dauernd mit 2000 Hz schwingt (der sogenannte „Fahrzeugmagnet“). Bei der Vorbeifahrt am halt zeigenden Signal wird der Schwingkreis am Signal zum Schwingen angeregt, d.h. es wird Energie an ihn abgegeben. Dieser Energieabfall im Lok-Schwingkreis registriert das Steuergerät und löst eine Zwangsbremmung aus.



Fahrzeugmagnet an der Museumslok E 10 121



Indusi-Gleismagnet

Das Indusi-System kennt noch zwei weitere Frequenzen, nämlich 1000 Hz und 500 Hz, die bei Annäherung an ein halt zeigendes Signal weitere Überwachungsfunktionen auslösen (siehe Aufgabe für die 11. Klasse). Eine detaillierte Erklärung des ganzen Indusi-Systems würde für Unterrichtszwecke wohl zu weit gehen, da man fünf verschiedene Bauformen (I54, I60, I60R, PZ80 und PZB90) mit jeweils drei verschiedenen Zuggattungen unterscheiden müsste.¹⁸

3. Eisenbahn-Themen in der Praxis: Zwei kleine Unterrichtseinheiten für die Jahrgangsstufe 10

3.1 Die Lenzsche Regel beim ICE 3

Zur Vertiefung der Lenzschen Regel und um weitere Aspekte des Themas aufzuzeigen, habe ich diese kurze Unterrichtseinheit eingebaut.

3.1.1 Fachlicher Hintergrund und Einordnung in den Lehrplan

Der ICE 3 ist derzeit das modernste und im Planbetrieb schnellste Fahrzeug der Deutschen Bahn. Aus physikalischer Sicht ist bemerkenswert, dass sowohl sein Antrieb, als auch zwei seiner drei Bremssysteme auf der Lenzschen Regel basieren.



Angetrieben wird der ICE 3 wie alle ICE-Züge von Drehstrom-Asynchron-Fahrmotoren. Bei diesen Motoren erzeugt der Drehstrom im Anker ein magnetisches Drehfeld, d.h. die magnetischen Pole umkreisen den Anker. Durch die Bewegung des Magnetfelds wird im Läufer, der in wesentlichen eine simple Blechtrommel ist (*Kurzschlussläufer*) ein Strom induziert. Aufgrund der Lenzschen Regel folgt der Läufer dem Statorfeld, weil der Induktionsstrom am kleinsten ist, wenn die Drehzahldifferenz (*Schlupf* genannt) möglichst klein ist.¹⁹

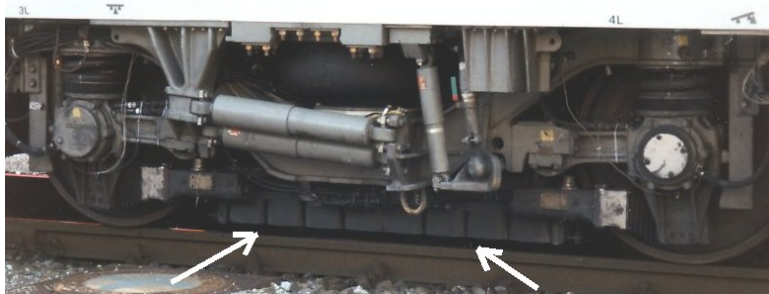
Das einzige „Lenz-freie“ Bremssystem, das der ICE 3 mit jedem normalen Zug gemeinsam hat, ist die durchgehende druckluftbetätigte Scheibenbremse. Da sie sehr verschleißbehaftet ist, wird sie nur zur Unterstützung der beiden anderen Bremssysteme eingesetzt, beziehungsweise dort, wo die anderen Systeme nicht zugelassen sind (bei der Einfahrt in einen Kopfbahnhof ist die Verwendung dynamischer Bremsen aus Sicherheitsgründen verboten²⁰).

Wie fast alle elektrischen Triebfahrzeuge kann auch der ICE 3 seine Fahrmotoren zum Bremsen verwenden. Die Motoren werden als Generator verwendet, der erzeugte Strom wird in die Oberleitung zurückgespeist, so dass er für andere Züge zur Verfügung steht. Auf diese Weise können bei Hochgeschwindigkeitszügen etwa 10% der beim Beschleunigen aus der Fahrleitung entnommenen Energie zurück gewonnen werden²¹. Die Bremswirkung ergibt sich natürlich aus der Lenzschen Regel, denn wo Strom erzeugt wird, muss Arbeit geleistet

werden. Da beim ICE 3 jede zweite Achse angetrieben ist, ist seine generatorische Bremse stark genug, um bei normalen Betriebsbremsungen den Löwenanteil der Bremsleistung zu übernehmen.²²

Da die Schüler bereits vom Fahrraddynamo her wissen, dass ein Generator die Fortbewegung hemmt, ist dieses Bremssystem problemlos zu verstehen.

Zusätzlich besitzt der ICE 3 als einziges planmäßig eingesetztes DB-Fahrzeug eine elektrische Wirbelstrombremse (die anderen Hochgeschwindigkeits- und Schnellzüge haben Magnetschienenbremsen wie bei der Straßenbahn²³). Diese befinden sich an jedem nicht angetriebenen Drehgestell zwischen den Achsen, direkt über den Schienen. Sie bestehen aus mehreren nebeneinander angeordneten starken Elektromagneten.



Beim Einsatz der Wirbelstrombremse wird diese bis knapp über Schienenoberkante abgesenkt und die Magnete werden mit Strom versorgt. Ähnlich dem Waltenhofschens Pendel werden in der Schiene Wirbelströme induziert, die aufgrund der Lenzschen Regel für eine starke Bremswirkung sorgen.²⁴

In „Galileo 10/I“ ist auf Seite 151 ein Informationstext zum Bremssystem des ICE zu finden. Dort wird auch im Zusammenhang mit der Wirbelstrombremse nur allgemein vom ICE gesprochen, was so nicht stimmt, denn der ICE 1, ICE 2 und die ICEs mit Neigetechnik haben, wie schon erwähnt, gewöhnliche Magnetschienenbremsen.

Wie bereits eingangs erwähnt, wurde diese Unterrichtseinheit unmittelbar nach der Behandlung der Lenzschen Regel durchgeführt, und zwar wiederum in der 10a des Werner-von-Siemens-Gymnasiums Weißenburg. Die Schüler kannten also bereits die Lenzsche Regel sowie diverse Anwendungen derselben, wie die Wirbelstrombremse beim Pendel.

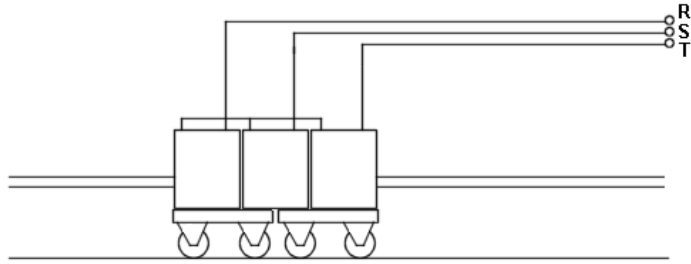
3.1.2 Methodische und didaktische Überlegungen

Zum Einstieg in die Einheit wählte ich als Motivation das oben gezeigte Bild des ICE 3 mit der Überschrift „Der ICE 3 - ohne Lenz nichts los!“

Für das Niveau der 10. Klasse ist das Drehstrom-Antrieb sicher schwer zu verstehen, deswegen wollte ich diesen Abschnitt nicht zu sehr vertiefen und führte lediglich einen ähnlich funktionierenden Versuch vor:

Auf zwei kleinen Rollwagen wurden drei Leybold-Spulen mit gleicher Windungszahl mittels Klebeband so montiert, dass die Öffnungen der Spulen zueinander zeigten und die Anschlüsse oben lagen. Die linken Pole der Spulen wurden miteinander verbunden, die rechten mit je einem Anschluss der Drehstrom-Kleinspannung der im Physiksaal vorhandenen Schalttafel. Nun wurde noch eine sehr lange Stativstange an ihren Enden so eingespannt, dass sie waagrecht durch den „Tunnel“ der drei Spulen führte, ohne diese zu berühren.

Sobald die Spannung angelegt wird, rollt der Wagen sehr rasch zu einem Ende der Stange. Polt man nun zwei der drei Anschlüsse um, ändert er seine Bewegungsrichtung.



Das hier vorgeführte Prinzip ist im Grunde das Antriebsprinzip des Transrapid (Linearmotor). Ein Kollege nannte diesen Versuch daher „Transrapid für Arme“...

Biegt man nun die Stange gedanklich zu einem Ring und hält die Spulen statt der Stange fest, so erhält man das Antriebsprinzip des Drehstrom-Asynchronmotors.

Um das Verständnis zu erleichtern, wählte ich folgende Erklärung: Das Magnetfeld wandert im Inneren der Spulen ständig vom vorderen zum hinteren Spulenende; die Stange möchte aufgrund der Lenzschen Regel dem Magnetfeld folgen. Da sie aber eingespannt ist, bewegt sich stattdessen der Wagen.

Die Überleitung zum Bremssystem wurde als kleine Ideensammlung betrieben: „Wie kann ein Zug seine Geschwindigkeit aktiv verringern?“

Die generatorische Bremse lässt sich mit der Analogie zum Fahrraddynamo leicht erklären: Auch dort spürt man einen mechanischen Widerstand, wenn ein Verbraucher angeschlossen ist. Beim ICE 3 ist der Verbraucher lediglich ein anderer Zug, der gerade Energie aus der Oberleitung entnimmt.

Für die Erklärung der Wirbelstrombremse wurde obiges Foto, sowie die gut gemachte Skizze aus „Galileo 10/I“ herangezogen.

3.1.3 Fazit

Wenn es ein Schienenfahrzeug gibt, mit dem man bei Eisenbahn-uninteressierten Schülern noch halbwegs Interesse hervorrufen kann, dann ist das sicherlich der ICE. Dies hat sich hier wieder bewahrheitet, die Schüler waren durchaus motiviert.

Der Versuch mit dem „Taschen-Transrapid“ stieß auf allgemeine Heiterkeit und musste mehrfach wiederholt werden.

An der Ideensammlung für eine Zug-Bremse beteiligte sich ein guter Teil der Klasse, neben Scherz-Antworten wie „Anker werfen“ wurden natürlich auch die gewöhnlichen (Scheiben-) Bremsen genannt. Nur wenige Schüler wussten, dass Elloks ihre Motoren zum Bremsen benutzen können. Einige kannten von der Straßenbahn her die Magnetschienenbremsen, doch auf das Wirbelstromprinzip kam niemand.

Leider war die Motivation dann bei der Besprechung der Wirbelstrombremse eher mau, die Mitarbeit beschränkte sich auf wenige Schüler, Rückfragen kamen keine.

Diese Unterrichtseinheit sollte aus meiner Erfahrung nicht zu breit getreten werden und lediglich zur letzten Abrundung des Themas „Lenzsche Regel“ verwendet werden.

3.2 Warum ruckeln manche Elloks beim Anfahren?

Den meisten Schülern ist klar, dass Elloks von Elektromotoren angetrieben werden, die ihren Strom letztlich aus der Oberleitung beziehen. Doch wie wird die Antriebsleistung reguliert? Zu diesem Thema habe ich eine kleine Unterrichtseinheit entworfen und in meiner 10. Klasse durchgeführt.

3.2.1 Fachlicher Hintergrund und Einordnung in den Lehrplan

Bei Elloks muss man heute drei wesentliche Bauarten unterscheiden:

- Loks mit Stufenschaltwerk und Reihenschluss-Fahrmotoren
- solche mit Thyristor-Phasenanschnitt-Steuerung (auch *Chopper-Steuerung* genannt) und Mischstrommotoren (in Deutschland im wesentlichen nur in S-Bahn-Zügen bis Anfang der 90er Jahre eingesetzt) und
- Umformerloks mit Drehstrom-Asynchron-Fahrmotoren (praktisch alle neu gebauten Loks ab 1985).²⁵

Während die letzten beiden Bauarten Kenntnisse der Elektronik voraussetzen, die deutlich über das Schulniveau hinausgehen (Thyristor, Phasenanschnitt, Vierquadrantensteller), ist die erste und älteste Bauform gut für die Schule geeignet.

Die konventionelle Schaltwerkstechnik ist inzwischen stark auf dem Rückzug; im Fernverkehr werden schon fast nur noch Drehstrom-Fahrzeuge eingesetzt. Im lokbespannten Nahverkehr dagegen dominieren nach wie vor die konventionell betriebenen Loks der Baureihen 110 und 111, sowie die aus der ehemaligen DDR stammenden Maschinen der Baureihe 143, die aber keine „reinrassigen“ Schaltwerksloks sind.²⁶



Baureihe 110



Baureihe 111



Baureihe 143

Die Baureihen 111 und 143 stammen aus den späten 70er und frühen 80er Jahren, werden also noch mindestens 15 Jahre im Einsatz stehen, so dass diese Unterrichtseinheit durchaus noch etliche Jahre lang aktuell bleiben wird.

Wie in allen Elloks wird auch bei Loks mit Stufenschaltwerk die Fahrleitungsspannung im Haupttransformator auf eine für die Fahrmotoren geeignete Spannung heruntertransformiert. Dazu besitzt der Transformator sekundärseitig eine Vielzahl von Anzapfungen, so dass die Windungszahl der Sekundärspule in Stufen (meist etwa 28-30) verändert werden kann. Das Umschalten zwischen zwei Trafo-Anzapfungen übernimmt das Stufenschaltwerk, das aus zwei Stufen-Walschaltern mit je einem vorgeschalteten Lastschalter besteht. Die Lastschalter sorgen dafür, dass die Stufenwähler während des Schaltvorgangs spannungslos sind.

Da sich die Fahrmotorspannung und damit die Zugkraft der Lok beim Wechsel von einer Stufe zur anderen sprunghaft ändert, spürt man bei diesen Loks beim Anfahren ein mehr oder weniger starkes Ruckeln. Die bereits erwähnte Baureihe 143 gleicht die Zugkraftsprünge mit einer zusätzlichen Anschnittsteuerung aus.²⁷

Durchgeführt wurde diese Unterrichtseinheit in der Klasse 10a des Werner-von-Siemens-Gymnasiums Weißenburg im Rahmen des Lehrplanabschnitts „Induktion im ruhenden Leiter“, im Anschluss an die ausführliche Behandlung des Transformators. Die Schüler kannten zu diesem Zeitpunkt bereits den Elektromotor und wussten, wie Stromstärke und Spannung am Transformator mit den Windungszahlen der Spulen zusammenhängen.

3.2.2 Methodische und didaktische Überlegungen

Für die Schule mussten zwei didaktische Vereinfachungen vorgenommen werden, um das Problem nicht zu sehr vom Lehrplan abschweifen und ausufern zu lassen:

- Normalerweise besteht der Transformator einer solchen Lok aus zwei hintereinander geschalteten Transformatoren, die auf einem gemeinsamen Eisenkern sitzen und sich dadurch gegenseitig beeinflussen: Der Stelltrafo besitzt nur eine geringe Übersetzung, ihm ist das Stufenschaltwerk nachgeschaltet. Erst nach der Stufenwahl wird im Leistungstransformator die eigentliche Fahrmotorspannung erzeugt. Vorteil dieser Zweiteilung ist, dass die Stromstärke im Schaltwerk und damit der Kontaktverschleiß geringer ausfällt.²⁸ Für den Unterricht habe ich vorbildwidrig eine Niederspannungssteuerung angenommen, bei der nur ein einteiliger Transformator vorhanden ist.
- Der Stufenwähler ist doppelt vorhanden, damit die nächste Fahrstufe bereits vorab angewählt werden kann und der eigentliche Umschaltvorgang (Lastschalter!) so kurz wie möglich ist.²⁹ Für die Schule reicht es, einen einzigen Stufenwähler anzunehmen, wie es bei einigen Loks geringerer Leistung auch der Fall ist. Ebenso wurde auf den Lastschalter verzichtet.

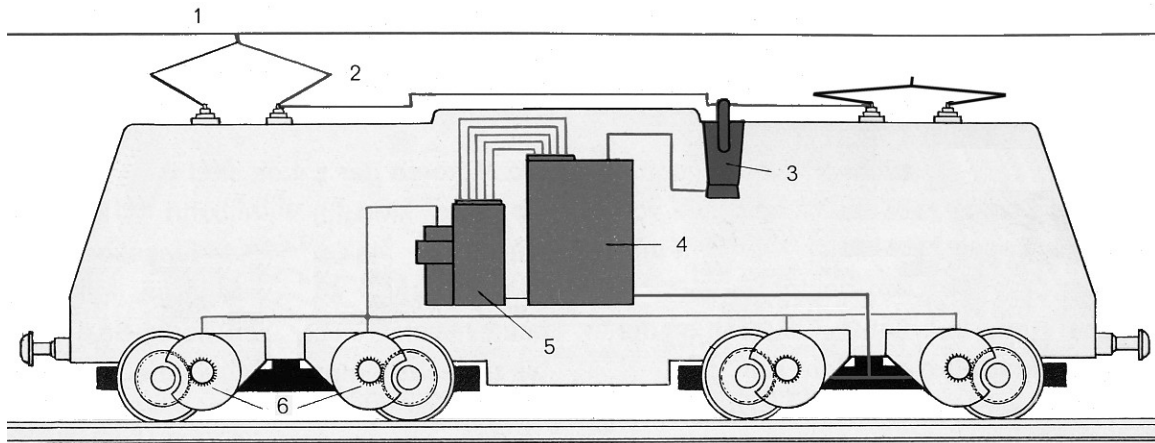


Stufenschaltwerk einer schweren Güterzuglok der Baureihe 150. Links sind die Anschlüsse für die 28 Trafo-Anzapfungen zu sehen, rechts (hinter dem Schild) die beiden Lastschalter.

Da die Schüler der 10a wenig Begeisterung für die Eisenbahn zeigten, aber etliche von ihnen mit der Bahn zur Schule fahren, wurde als Einstieg das schon weiter oben beschriebene Anfahr-Ruckeln Ellok-bespannter Züge gewählt. Die Fragestellung lautete also: „Warum ruckeln viele Züge mit Elloks beim Anfahren?“

Um die Ursache des Ruckelns verstehen zu können, müssen die Schüler wissen, wie eine solche Lok eigentlich funktioniert. Anhand einer Folie wurde also der prinzipielle elektrische Aufbau erarbeitet, der übrigens für jede der drei möglichen Ellok-Bauformen gilt (bei Drehstromloks ist der Trafo allerdings unterflur zwischen den Drehstellen montiert).

Schöner wäre natürlich, den Aufbau am Vorbild zu demonstrieren. Leider verhält sich die DB oft nicht sehr kooperativ, wenn es um technische Details von Fahrzeugen oder Führungen für Laien geht. Allerdings wäre es wohl auch schwierig und zeitaufwändig, 30 Schüler durch den engen Maschinenraum einer Ellok zu schleusen. Im Deutschen Museum ist eine Altbau-Ellok der Baureihe E 16 mit entfernter Seitenwand ausgestellt, bei der man den Haupttransformator, das Schaltwerk an der Maschinenraum-Rückwand und die Fahrmotoren schön sehen kann.



(Bild: Modifizierte Abbildung aus U. Schefold: „Mein erstes Buch der Eisenbahn“, München: Südwest-Verlag 1980, S.86)

Der Strom fließt von der Oberleitung (1) über den Stromabnehmer (2) und den Hauptschalter (3) zum Transformator (4) und von dort über die Schienen zurück zum Kraftwerk. An die Sekundärseite des Transformators ist die (wie auch immer geartete) Leistungssteuerung (5) angeschlossen, die den Fahrstrom für die vier bis sechs Fahrmotoren bereitstellt.

Um zum Schaltwerk hinzuführen, wurde zunächst im lockeren Lehrer-Schüler-Gespräch erörtert, welche Möglichkeit es gibt, die am Fahrmotor anliegende Spannung und damit dessen Leistungsabgabe zu regeln, wenn man als Eingangsgröße eine Wechselspannung von 15 kV gegeben hat.

Als Möglichkeiten wurden untersucht:

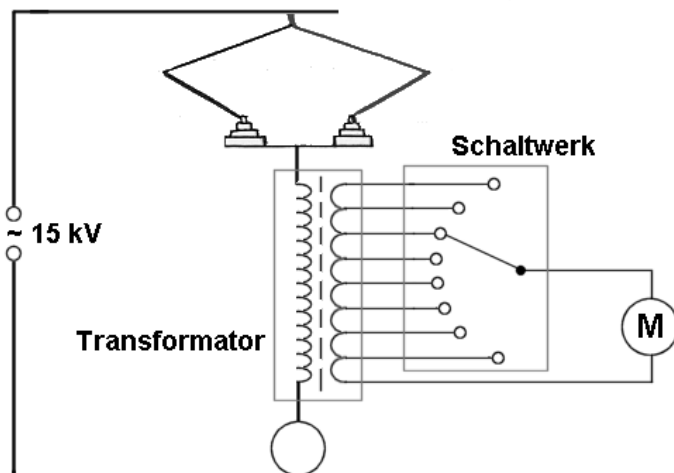
- Regelbare Vorwiderstände oder Spannungsteiler
- Schaltung der Motoren verändern (Reihen-/Parallelschaltung)
- Verändern des Übersetzungsverhältnisses am Trafo

Die Verwendung von Widerständen wäre zwar denkbar, diese würden aber Energie sinnlos „verheizen“, so dass die Lok einen schlechten Wirkungsgrad hätte.

Eine Umschaltung zwischen Reihen- und Parallelschaltung der Fahrmotoren würde bei vier Motoren lediglich drei Fahrstufen ergeben, wenn an allen Motoren die gleiche Spannung anliegen soll (Alle in Reihe, je zwei in Reihe, alle parallel).

Um die Windungszahl der Sekundärspule des Transformators verändern zu können, braucht man neben den beiden Enden der Spule noch weitere Zwischenabgriffe, zwischen denen man umschalten können muss. Die Umschaltung geschieht im sogenannten Schaltwerk. Wie man anhand der Zeichnung schon sieht, sind Transformator und Schaltwerk über viele Leitungen verbunden, die zu jeweils einem Abgriff der Sekundärwicklung gehören.

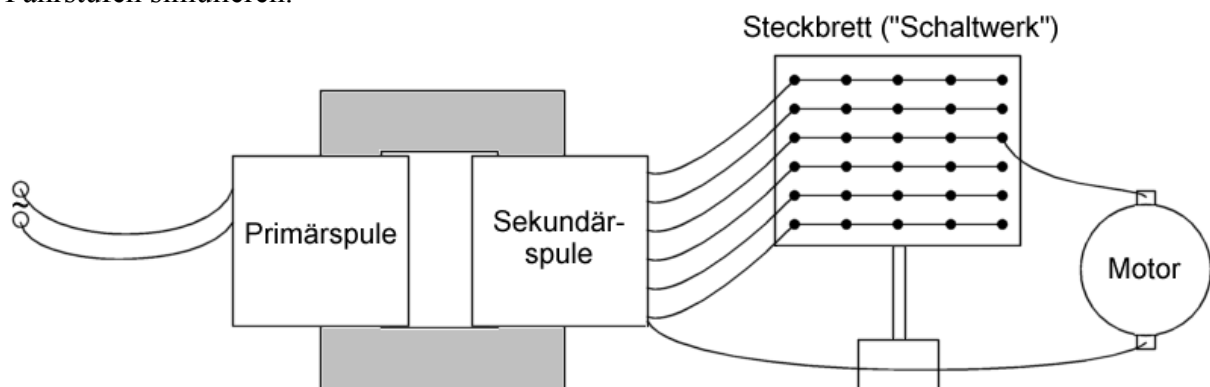
Das nebenstehende Bild diente (wiederum auf Folie) dazu, die Funktionsweise des Schaltwerks zu erläutern. Die Schüler erhielten die Zeichnung als Kopie, um die Zeit für das doch recht zeitauf-wändige Abzeichnen ins Heft zu sparen. Eventuell könnte man durch eine andere Anordnung des Motors noch andeuten, dass er das Rad am unteren Bildrand antreibt; mir war aber ein klar gegliedertes Schaltbild wichtiger.



Anhand dieser Zeichnung wurde dargelegt, dass es beim Umschalten von einer Stufe zur nächsten zu einer schlagartigen Spannungsänderung kommt, so dass der Motor schlagartig mehr Leistung abgibt, was sich als Ruck bemerkbar macht.

Da am Werner-von-Siemens-Gymnasium eine Trafo-Spule mit einer Vielzahl von Abgriffen zur Verfügung stand, konnte ich auch einen kleinen Demonstrations-Versuch aufbauen. Als Schaltwerk diente ein Steckbrett mit mehreren parallelen Leiterbahnen, ein Messkabel war der Stufenwähler. Ein kleiner Wechselstrom-Experimentiermotor diente als Fahrmotor. Die großen Wechselstrom-Demonstrationsmotoren sind hier nicht so gut geeignet, weil sie durch ihre hohe Reibung eine recht hohe Anlaufspannung besitzen.

In Schulen, die keine Spule mit vielen Abgriffen besitzen, könnte man auf eine Hilfskonstruktion zurückgreifen: Wenn man das Joch des Transformators durch einen weiteren, umgedrehten U-Kern ersetzt, kann man auf der Sekundärseite eine weitere Standard-Spule anbringen und so dank der vorhandenen Mittelabgriffe immerhin vier Fahrstufen simulieren.



Abschließend blieb noch eine (Schüler-)Frage zu diskutieren: Warum ist das Ruckeln besonders beim Anfahren zu spüren?

Im Gespräch wurden zwei Ursachen erarbeitet: Zum einen muss die Lok beim Anfahren erst einmal den Zug *losbrechen*, also die Haftreibung in den Achslagern überwinden, so dass gleich mehrere Fahrstufen durchlaufen werden (meist 4-8), zudem machen sich bei langsamer Fahrt noch keine anderen Störeinflüsse (Schaukeln, Rumpeln etc.) bemerkbar.

3.2.3 Fazit

Aufgrund der konkreten Problemstellung aus der täglichen Erfahrungswelt der Schüler war die Klasse gut bei der Sache. Am Zusammentragen von Ideen für eine Spannungsregelung und deren Untersuchung auf Praxistauglichkeit beteiligten sich viele. Die Erklärung scheint gut verstanden worden zu sein, so dass ich diese Unterrichtseinheit durchaus als gelungen bezeichnen kann. Ich werde sie auf jeden Fall wieder einsetzen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Wie man sieht, bietet auch die moderne Eisenbahn vielfältige Einsatzmöglichkeiten für den Physikunterricht. Natürlich ist klar, dass man nicht alle diese hier angebotenen Themen im Unterricht verwirklichen sollte, denn Schüler reagieren schnell gelangweilt darauf, wenn immer auf dem selben Thema herumgeritten wird; aber ab und zu würde ein kleiner Ausflug in die Welt der Eisenbahn den Unterricht sicher bereichern.

Vielleicht würde das auch helfen, das Unwissen und die Fehlvorstellungen über die Eisenbahn in der Öffentlichkeit etwas zu reduzieren, denn in mittlerweile zehn Jahren als regelmäßiger Bahn-Pendler habe ich von anderen Fahrgästen schon die abenteuerlichsten Erklärungen von Verspätungsursachen und deren „einfacher“ Behebung mithören müssen. Die Hoffnung, dass Journalisten je lernen werden, dass der Zugführer in aller Regel nicht den Zug fährt, sondern die Fahrkarten kontrolliert, habe ich indes längst aufgegeben...

5. Literaturverzeichnis

Allgemeine Schulphysik-Literatur:

1. Bayerisches Staatsministerium für Unterricht, Kultus, Wissenschaft und Kunst:
Lehrplan für das bayerische Gymnasium - Fachlehrplan für Physik, München 1991
2. Deger u.a.: Galileo 9 - das anschauliche Physikbuch, München: Oldenbourg Verlag
2000
3. Deger u.a.: Galileo 10/I - das anschauliche Physikbuch, München: Oldenbourg Verlag
2001
4. H. Kuchling: Taschenbuch der Physik, Leipzig: Fachbuchverlag 1996

Eisenbahn-Literatur:

5. M. Benzenberg u.a.: 100 Jahre elektrische Eisenbahn, Starnberg: Josef Keller Verlag
1979
6. A. Braun: DB-Fahrzeuge - Lokomotiven und Triebwagen der Deutschen Bahn,
München: GeraMond 1997
7. Bahn-Extra 9602 - Wie funktionieren sie eigentlich, die Diesel- und Elloks?,
München: GeraNova Verlag 1996
8. A. Fürst: Die Welt auf Schienen, unveränderter Nachdruck der Ausgabe des Albert
Langen Verlags, München 1918, München: transpress Verlag 2002
9. I. und K. D. Holzborn: Kleine Typenkunde deutscher Triebfahrzeuge, Stuttgart:
transpress Verlag 1999
10. W. Klee: Die Baureihen 101, 145, 152 und 182, Eisenbahn-Journal-Sonderausgabe
1/2001, Fürstfeldbruck: Hermann Merker Verlag 2001
11. V. Kottenhahn: Die Züge mit Neigetechnik der Deutschen Bahn, in:
Eisenbahntechnische Rundschau 5/2000, Darmstadt: HESTRA-Verlag 2000
12. E. Krummheuer, ICE Intercity Experimental, München: ELV-Verlag 1986
13. W. Messerschmidt: Lokomotivtechnik im Bild, Stuttgart: transpress Verlag 2003
14. H. J. Obermayer: Diesellokomotiven, Augsburg: Weltbild-Verlag 1994
15. E. Preuß: Schienen ohne Ende, in: eisenbahn magazin 4/2003, Düsseldorf: Alba-
Verlag 2003

Internet-Seiten zur Eisenbahn:

16. S. Albert, Schirmung niederfrequenter Magnetfelder,
<http://www.sam-products.de/abschirmung/fachbeitraege.htm>
17. W. Bürger: Eisenbahnräder,
<https://www.wissenschaft-online.de/abo/spektrum/archiv/6226>
18. C. Hölscher u.a.: Dokumentation zum Zugsimulator Zusi, <http://www.zusi.de>
19. H. Metschulat (Webmaster): FAQ Eisenbahn,
<http://www.sgs.wh.tu-darmstadt.de/homer/efaq/>
20. D. Schollbach: ICE-Fanpage, <http://www.ice-fanpage.de>

- ¹ H.Kuchling, taschenbuch der Physik, S. 608
- ² W. Klee: Die Baureihen 101, 145, 152 und 182, S. 20
- ³ nach C. Hölscher, Zusi-Dokumentation
- ⁴ Klee, S. 20
- ⁵ H. J. Obermayer, Diesellokomotiven, S. 212
- ⁶ Bahn-Extra 9602, S. 23ff
- ⁷ <http://www.sgs.wh.tu-darmstadt.de/homer/efaq>
- ⁸ nach E. Preuß, Schienen ohne Ende, S. 43f
- ⁹ H. Metschulat - FAQ Eisenbahn: Technik-Fahrzeuge
- ¹⁰ Klee, S. 20
- ¹¹ Klee, S. 20, S. 40
- ¹² nach W. Bürger, Eisenbahnräder
- ¹³ V. Kottenhahn: Die Züge mit Neigetechnik der Deutschen Bahn, S. 295ff
- ¹⁴ A. Fürst: Die Welt auf Schienen, S. 186
- ¹⁵ Kottenhahn, S. 295ff
- ¹⁶ I. und K. D. Holzborn: Kleine Typenkunde deutscher Triebfahrzeuge, S. 86f und S. 112f
- ¹⁷ S. Albert, Schirmung niederfrequenter Magnetfelder
- ¹⁸ nach Hölscher, Zusi-Dokumentation
- ¹⁹ Kuchling, S. 471f
- ²⁰ Hölscher, Zusi-Dokumentation
- ²¹ E. Krummheuer, Intercity Experimental ICE, S. 158
- ²² D. Schollbach, ICE-Fanpage
- ²³ Hölscher, Zusi-Dokumentation
- ²⁴ Deger u.a., Galileo 10/I, S. 151
- ²⁵ Bahn-Extra 9602, S. 56ff
- ²⁶ A. Braun, DB-Fahrzeuge, S. 38f
- ²⁷ Braun, S. 38f
- ²⁸ Bahn-Extra 9602, S. 56, S. 92 und S. 96
- ²⁹ Bahn-Extra 9602, S. 56