

Demonstration des Dopplereffektes mit Ultraschall

Abb.1



In Abbildung 1 ist eine Modelleisenbahn zu sehen. Auf dieser ist ein Ultraschallsender angebracht, und sie fährt hin und her. Rechts auf den Holzklötzen ist der Ultraschallempfänger zu sehen, welcher an einen Frequenzzähler angeschlossen ist und somit die Frequenzverschiebung misst.

Im Folgenden werden beschrieben:

- 1) Erklärung des Dopplereffektes mit Beispielmessung
- 2) Anschluss der Pendelzugsteuerung
- 3) Nachbau von Ultraschallsender und –Empfänger
- 4) Überprüfung der Ergebnisse durch eine unabhängige Geschwindigkeitsmessung

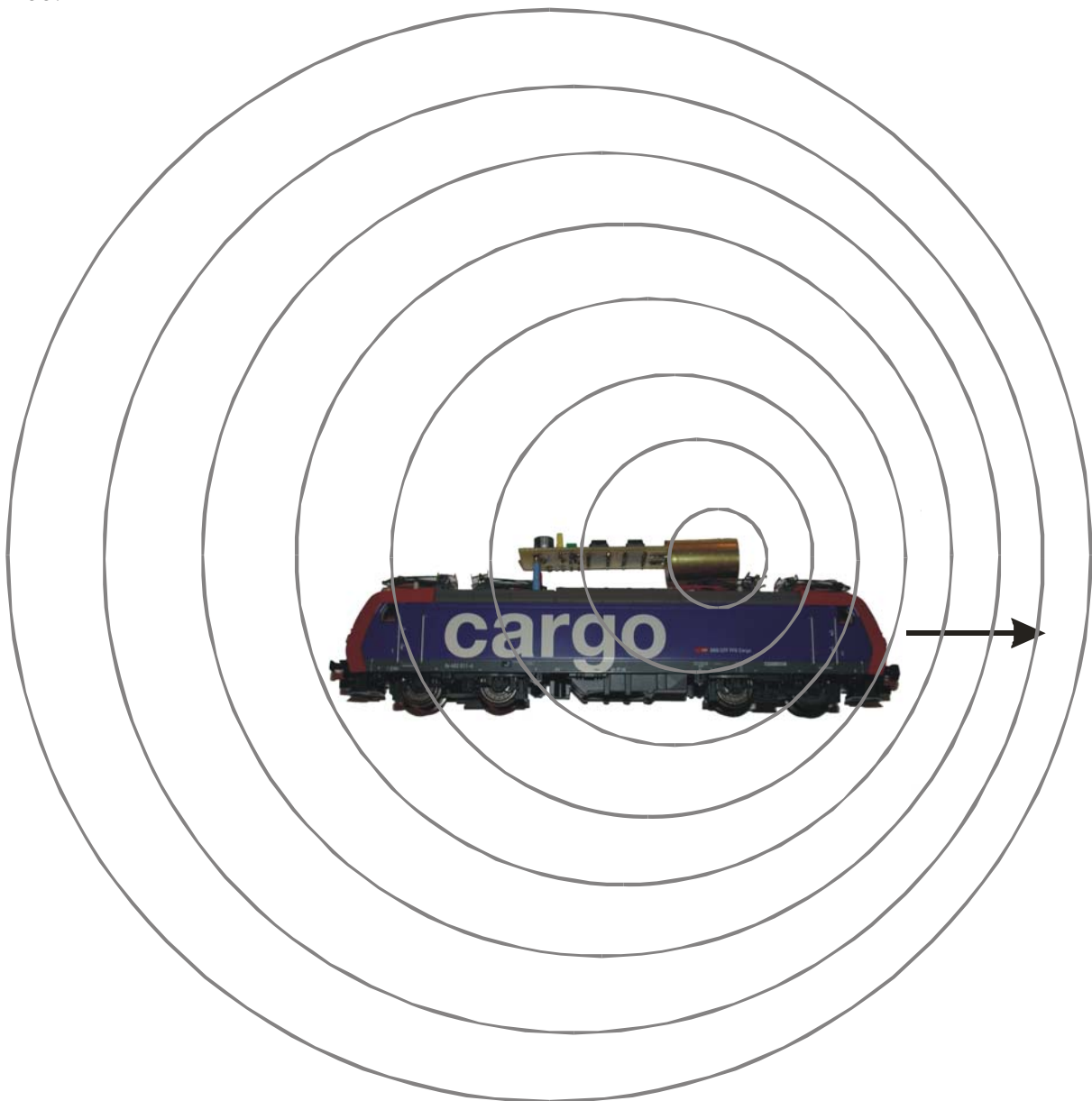
1) Erklärung des Dopplereffektes mit Beispielmessung:

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle hängt vom Medium ab, nicht jedoch von der Bewegung des Senders oder Empfängers.

Bewegt sich der Empfänger auf den Sender zu, so durchläuft er öfter Wellenberge und –täler als wenn er stehen würde. Bewegt sich der Sender auf den Empfänger zu, so verkürzt sich der Abstand zwischen Wellenbergen (bzw. -tälern), da der Sender diesen naheilt (vgl. Abbildung 2).

Somit ist also beim Aufeinanderzubewegen von Sender und Empfänger die empfangene Frequenz größer als im Sender.
 Bewegen sich Empfänger und Sender voneinander weg geschieht das Gegenteil, die empfangene Frequenz ist kleiner.
 Dieser so genannte Dopplereffekt tritt z.B. bei einem vorbeifahrendem Krankenwagen mit angestellter Sirene auf. Die Töne sind höher beim Herannahen und tiefer beim Entfernen. Der Effekt ist nach dem Physiker Andreas Christian Doppler (1803-1853) benannt.

Abb. 2



In unserem Fall bewegt sich der Sender und der Empfänger ruht.
 Es gilt daher die Formel:

$$f_E = \frac{f_S}{1 \mp \frac{v_S}{c}} \quad ; \text{ Das obere Vorzeichen gilt beim Annähern, das untere beim Entfernen.}$$

c ... Schallgeschwindigkeit ($344 \frac{m}{s}$ in Luft bei 20°C)

f_S ... Sendefrequenz (40000 Hz)

f_E ... Empfangsfrequenz

Daraus lässt sich die Geschwindigkeit ermitteln:

$$v_S = c \cdot \left(1 - \frac{f_S}{f_E} \right)$$

(Genau genommen ist v_S wieder vorzeichenbehaftet, wegen des Richtungssinnes.)

Beträgt die abgelesene Frequenz z.B. 40025 Hz, so ergibt sich eine Geschwindigkeit des

$$\text{Zuges von } v_S = 344 \frac{m}{s} \cdot \left(1 - \frac{40000 \text{ Hz}}{40025 \text{ Hz}} \right) = 0,215 \frac{m}{s}$$

Anwendung findet dieses Verfahren bei der Dopplersonographie. Damit wird die Geschwindigkeit des Blutes gemessen und dargestellt, um z.B. Gefäßverengungen zu diagnostizieren.

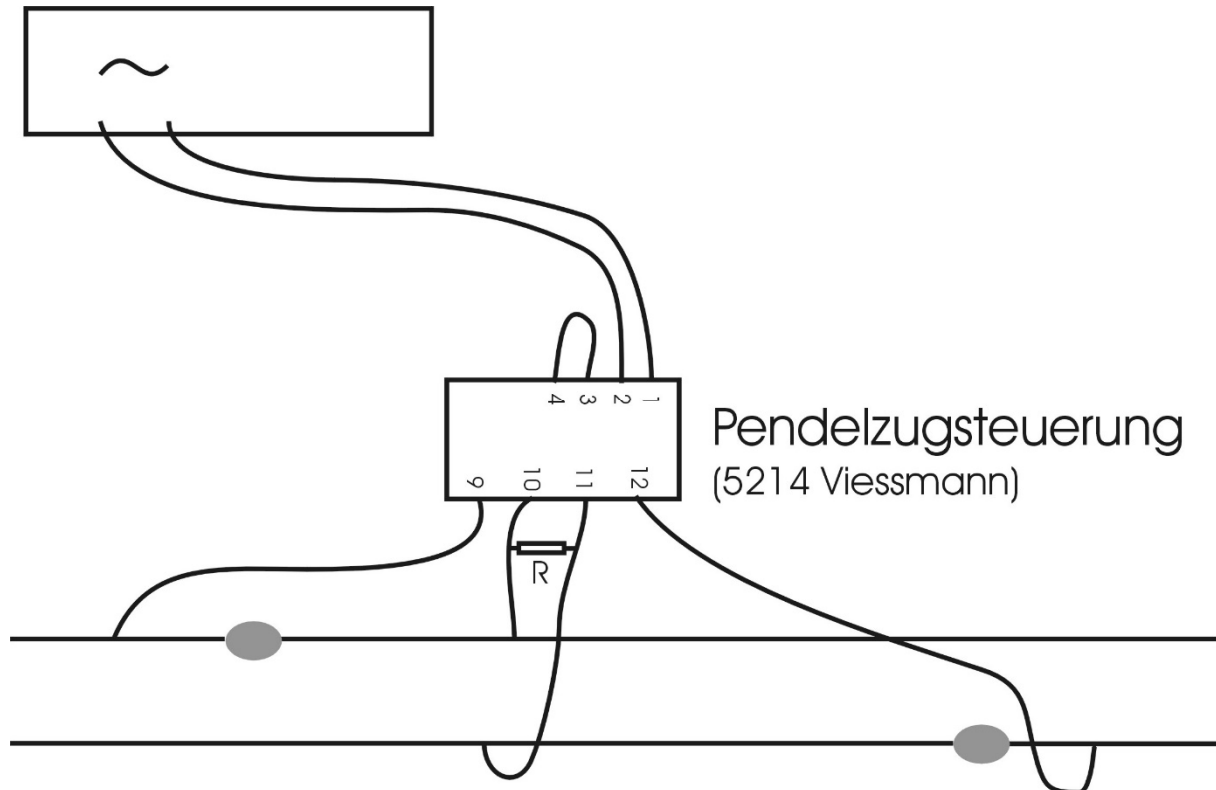
Das Licht eines Sterns, der von einem umlaufendem Planet ein wenig hin- und herbewegt wird, ändert sich ein wenig in der Frequenz – also Farbe, so dass auf diese Weise Planeten

entdeckt werden können (die Formel für Licht ist aber eine andere: $v = c \frac{\frac{f_E^2}{f_S^2} - 1}{\frac{f_E^2}{f_S^2} + 1}$).

2) Anschluss der Pendelzugsteuerung:

Die Pendelzugsteuerung bewirkt, dass die Lok hin und her fährt.

Abb. 3



Vom Modellbahngeschäft (z.B. „Modellbahn-Service“ Lotter Straße 37 in Osnabrück) ist zu **erwerben**: Die Lok (z.B. für H0), passende Schienen, 4 Anschlüsse, 2 Isolierstücke, 2 Prellböcke, etwas Draht sowie die Pendelzugsteuerung (z.B. 5214 Viessmann). Weiterhin benötigt wird ein Netzgerät (in diesem Fall 15 V Wechselspannung liefernd). Kostenpunkt ohne Netzgerät etwa **185 €** (davon kostet die Lok 80,- €).

Durchführung:

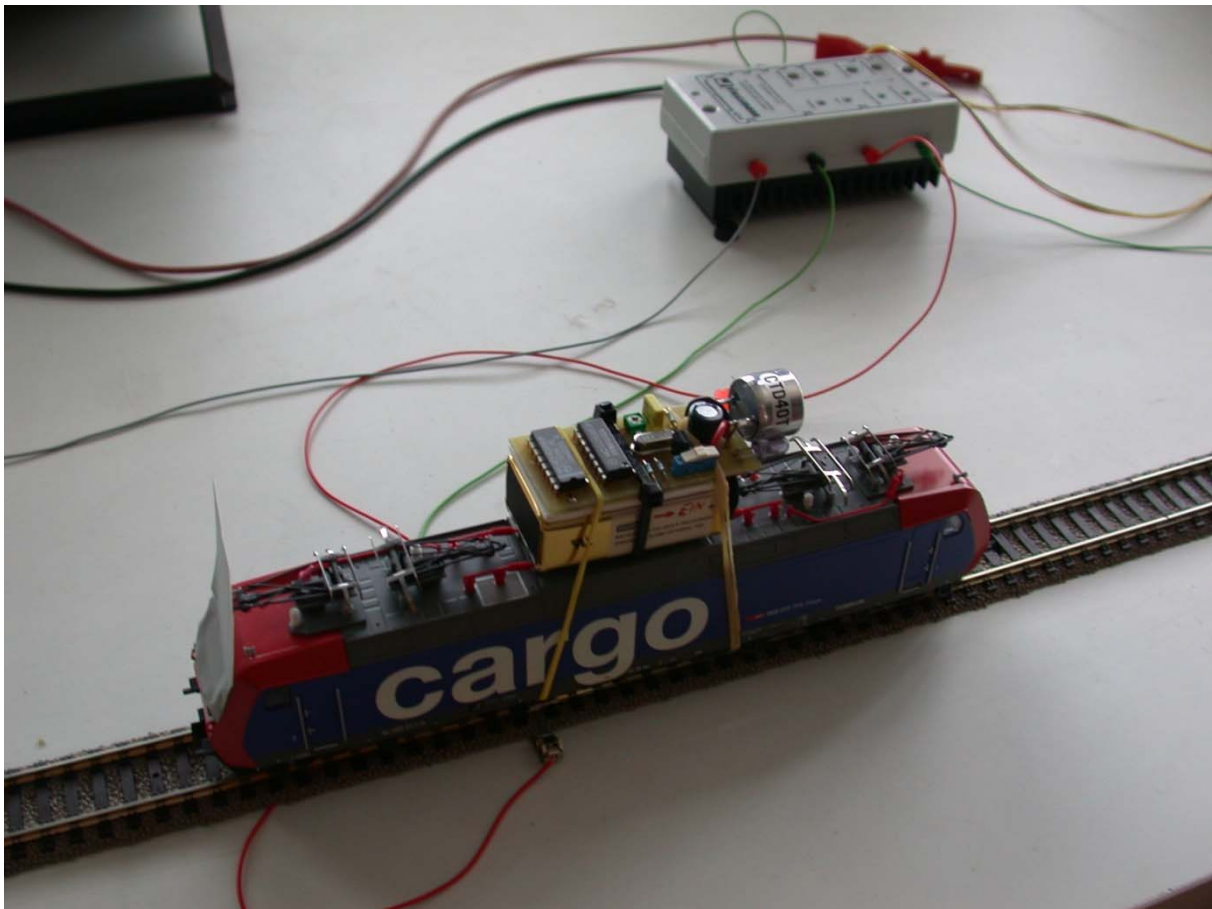
- Die Schiene wird durch die zwei Isolierstücke elektrisch unterbrochen (grau in Abbildung 3), dadurch erkennt die Pendelzugsteuerung wann die Lok am jeweiligen Ende ist und kann diese somit steuern.
- beschalten (für diesen Fall siehe Abbildung 3)
- Falls die Schienenspannung eine Störfrequenz aufweist, fährt der Zug etwas unregelmäßig – dies lässt sich durch Parallelschalten eines Widerstandes von $R = 33 \text{ Ohm}$ (12 V) verhindern (vgl. Abbildung 3).
- Schiene und Prellböcke sollten am Tisch befestigt werden (z.B. mit Tesafilm an den Enden).
- Anschluss des Netzgerätes z.B. mit Krokodilklemmen. Dieses hier auf 15 V Wechselspannung einstellen.
- Konfiguration der Pendelzugsteuerung (die Steuergrößen sind aufgedruckt): Aufenthaltszeit jeweils = 0; Beschleunigung maximal; Geschwindigkeit so einstellen, dass der Zug nicht an die beiden Prellböcke stößt (hängt auch von der Betriebsspannung und von der Position der Isolationsstücke ab).
- Der Empfänger wird in Höhe des Senders hinter dem Ende der Schiene angebracht und an einen Frequenzzähler angeschlossen. (Es wurde der Digitalzähler Phywe 11748.93 verwendet. -Beispielsweise sollte sich alternativ der „1 GHz Frequenzzähler FC3380“ der Firma Lämmeler-Elektronik www.ictechnik.de zu 249,- € eignen.)

- Sender und Empfänger haben einen Betriebsschalter und eine LED, die den Betrieb anzeigt. Der Sender wird mit zwei Gummis auf der Modelleisenbahn befestigt, ohne dass diese Räder und Schiene berühren (vgl. Abbildung 4).

P.S.: Befindet sich der Aufbau in einer Vitrine gibt es Störungen der Frequenzmessung, wohl durch die Reflexion der Ultraschallwellen an den Scheiben. Dies ließ sich verhindern durch folgende drei Maßnahmen:

- 1) Um den Ultraschallsender ist ein kleines Röhrchen gelegt (siehe Abbildung 2), somit wird das seitliche Abstrahlen vermindert.
- 2) An einer bestimmten Stelle (Versuch und Irrtum) wurde links und rechts von der Schiene je ein Holzklötzchen aufgestellt. Wahrscheinlich werden so störende Wellen geblockt.
- 3) Die Empfindlichkeit des Frequenzmessers (hier durch die Elektronikwerkstatt gebaut) wurde optimiert.

Abb.4



3) Nachbau von Ultraschallsender und –Empfänger:

Sender und Empfänger wurden durch die Elektronikwerkstatt der Universität Osnabrück gebaut. Vorteile sind:

- Batteriebetrieb, somit Sender kabellos
- stabilisierte Sendefrequenz
- Empfängerverstärker mit auf Sendefrequenz optimierter Bandbreite
- aufbereitetes Signal für Frequenzzähler

Werden die Platinen nicht selber geätzt, können sie z.B. bei

<http://www.pcb-pool.com/>

erworben werden, anhand von Targetdateien.

Ohne Bestückungsdruck kosten beispielweise 6 Sätze pro Satz 18,70 €

oder mit Bestückungsdruck pro Satz 24,66 €

(Ein Satz = Empfängerplatine plus Senderplatine)

Die Targetdateien gibt es bei Daniel Schwarz: daschwar@uos.de

Mit dem kostenlosen Programm „Target 3001“ von <http://ibfriedrich.com/index.htm>

kann man sie anschauen und ggf. bearbeiten.

(Z.B. Ansicht – Zur Platine, Ansicht – Ebenen: Gewünschtes mit Häkchen versehen)

Stückliste:

Bauteil Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Conrad.de Bestellnummer	Einzelpreis [€]	Bemerkung
Senderplatine:					
1x	Platine 60x25mm	Eins. Kupfer 100x60	52 35 55	1,38	zum selber Ätzen
C1	Kondensator	Elektrolyt 47uF / 25V	44 60 81	0.10	
C2	Kondensator	100pF, Ker.-Scheibe	45 17 46	0,18	
C3	Kondensator- Trimmer	6-50pF	44 74 08	0,68	
D1	LED gelb	3mm, low current	15 62 25	0,15	
IC1	C 4060	Binärzähler mit Oszillator.	17 33 04	0.71	
IC2	C 4049	TTL Treiber	17 28 98	0.60	
Q1	Quarz	5,12 MHz	16 86 45	0.54	
R1	Widerstand	2k2, 0.6W	41 82 93	0.10	
R2	Widerstand	1M, 0.6W	41 86 17	0.10	
R3	Widerstand	3,3k, 0,6W	41 83 15	0.10	
S1	Schalter	Schiebeschalter Mini	70 80 62	1.32	
1x	Ultraschallsender	MA 40 S= SQ 40 T	18 22 73	5,74	
1x	Blockbatterie	9V- Block	65 80 14	3.50	
1x	Batterieclip	für 9V-Block	62 46 91	0.38	
2x	IC Fassung	16 pol.	18 95 29	0.18	
Empfängerplatine:					
1x	Platine 60x25mm	Eins. Kupfer 100x60	52 35 55	1,38	zum selber Ätzen
C1	Kondensator	Elektrolyt 47uF / 25V	44 60 81	0.10	
C2	Kondensator	2,2 nF, FKS	45 98 46	0,18	
C3	Kondensator	100pF, Ker.-Scheibe	45 17 46	0,18	
C4	Kondensator	100pF, Ker.-Scheibe	45 17 46	0,18	
C5	Kondensator	0,01µF, FKS	45 98 95	0,18	
C6	Kondensator	1,5nF, FKS	45 98 31	0,18	
D1	LED rot	3mm, low current	15 62 26	0,15	
IC1	Operationsverstärker	TL071, FET- Eing.	18 14 47	0.69	
R1	Widerstand	2k7, 0,6W	41 83 07	0.10	
R2	Widerstand	100k, 0,6W	41 84 98	0.10	
R3	Widerstand	100k, 0,6W	41 84 98	0.10	
R4	Widerstand	18k, 0,6W	41 84 04	0.10	
R5	Widerstand	510R, 0,6W	42 07 00	0.10	
R6	Widerstand	3k3, 0,6W	41 83 15	0.10	
R7	Widerstand	390R, 0,6W	41 82 00	0.10	
R8	Widerstand	3k3, 0,6W	41 83 15	0.10	

S1	Schalter	Schiebeschalter Mini	70 80 62	1.32	
1x	Ultraschallempfänger	MA 40 R= SQ 40 R	18 22 81	5,74	
1x	Blockbatterie	9V- Block	65 80 14	3.50	
1x	Batterieclip	für 9V-Block	62 46 91	0.38	
1x	IC Fassung	8 pol.	18 95 02	0.14	

Schaltung der Senderplatine:

Abb. 5

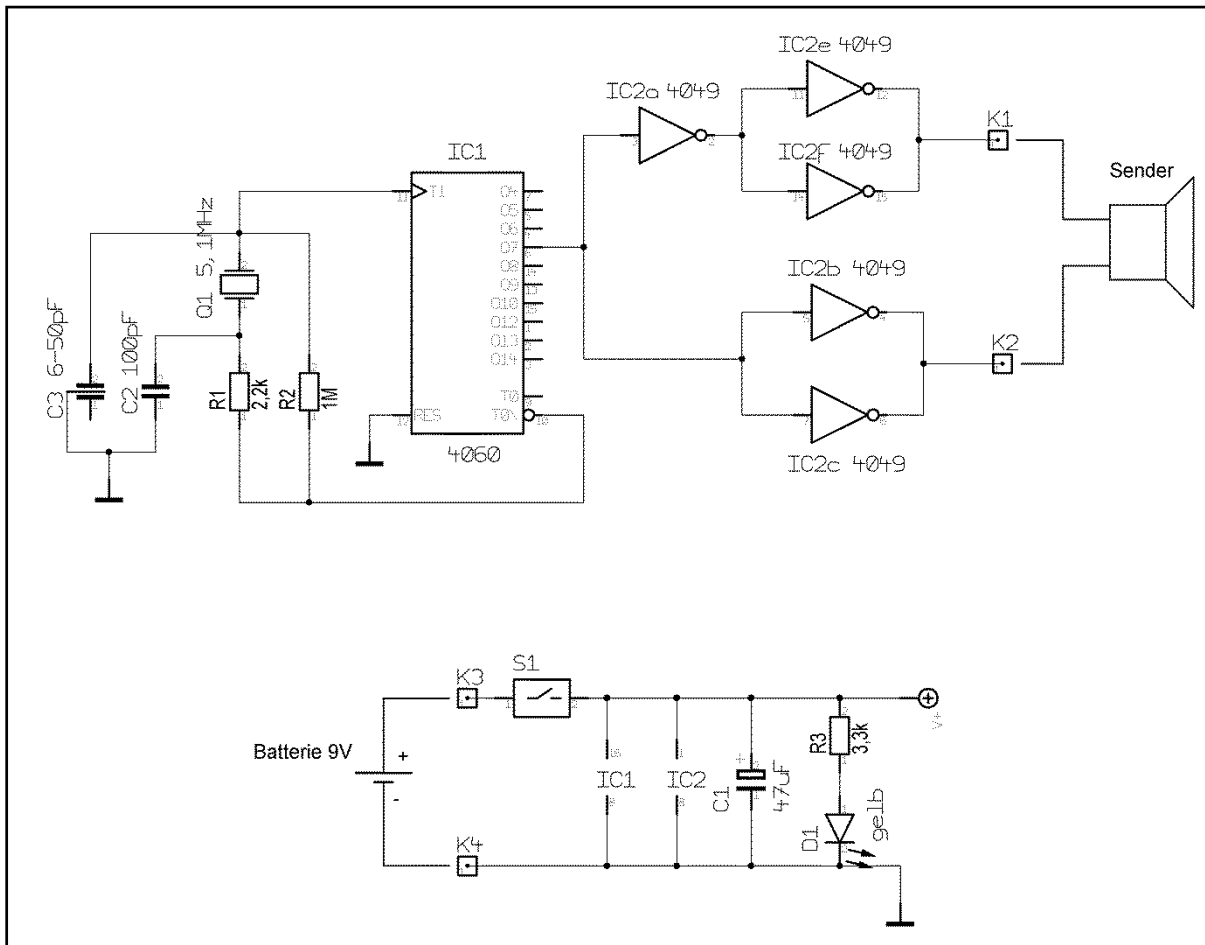
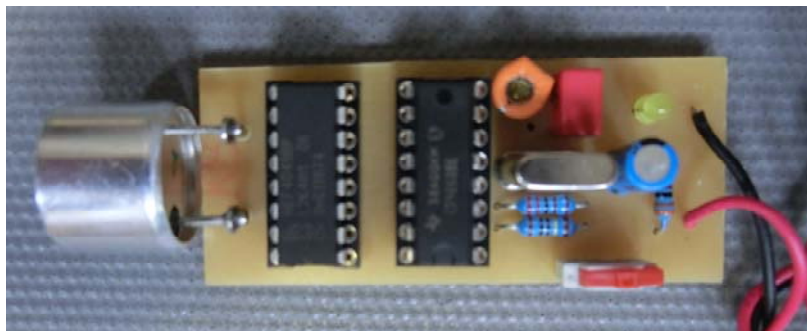
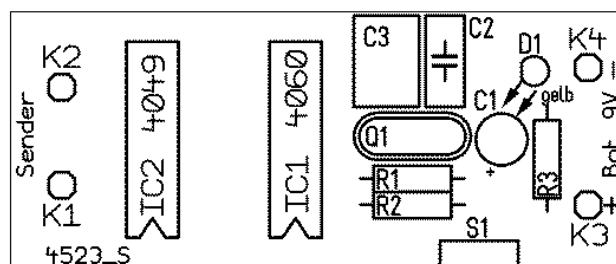


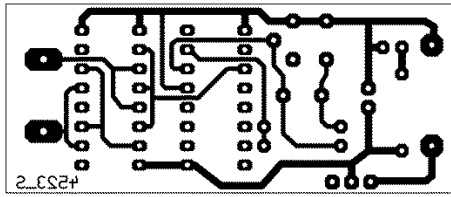
Foto Sender:



Bestückungsplan Sender:



Leiterplattenlayout Sender (1:1) 60x25mm:



Schaltung der Empfängerplatine:

Abb. 6

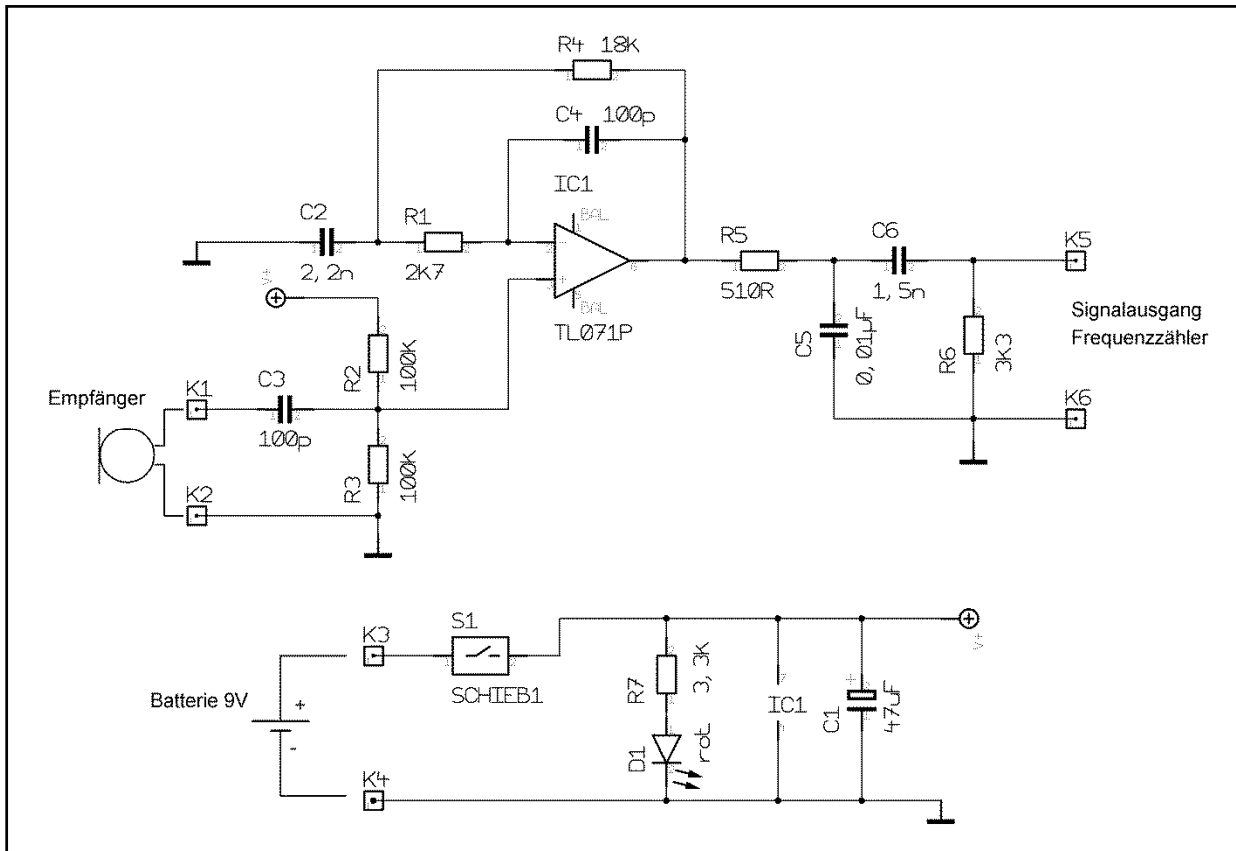
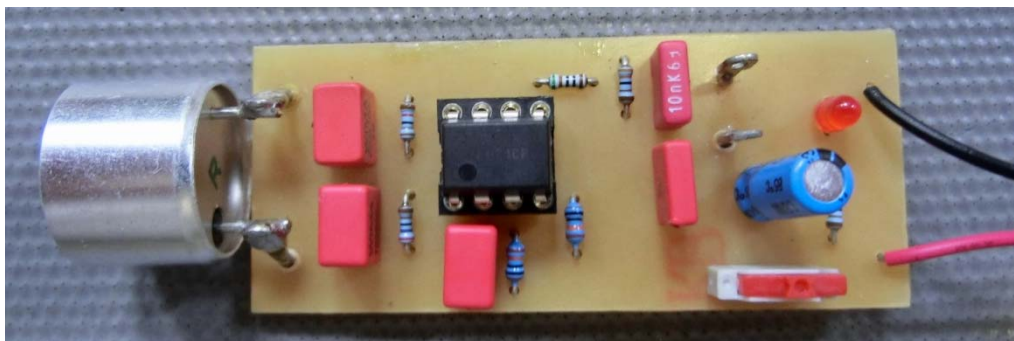
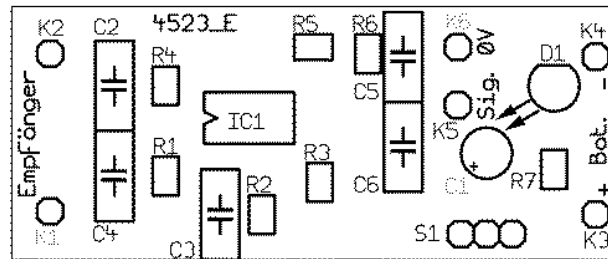


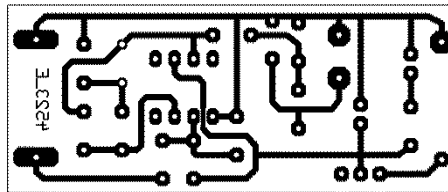
Foto Empfänger:



Bestückungsplan Empfänger:

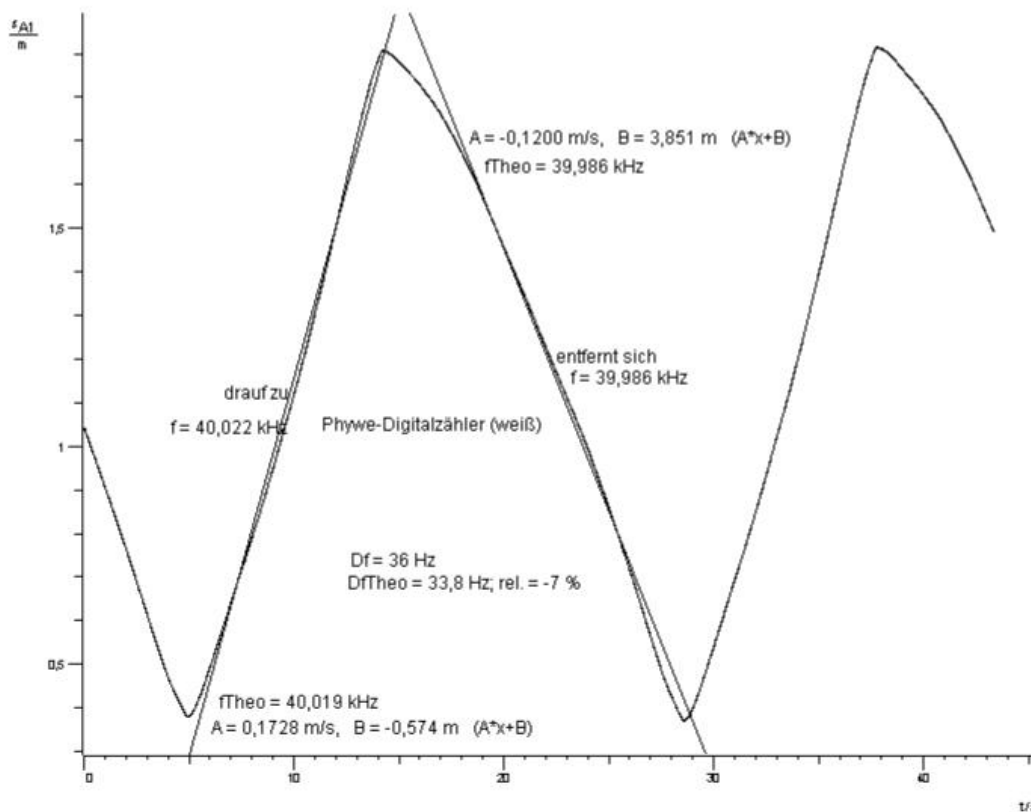


Leiterplattenlayout Empfänger (1:1) 60x25mm:



4) Überprüfung der Ergebnisse durch eine unabhängige Geschwindigkeitsmessung:

Abb. 7



Im Diagramm (Abbildung 7) sieht man den mit dem Laser-Bewegungssensor gemessenen Weg über der Zeit.

Das Mittelstück von Draufzubewegung (links) und Wegbewegung (rechts) wurde jeweils mit einer Ausgleichsgeraden versehen (Sensor-CASSY). Die Anstiege A sind die Geschwindigkeiten. Mit diesen wurden die theoretisch zu erwartenden Frequenzen f_{Theo} berechnet. Die tatsächlich gemessenen Frequenzen f (mit dem Digitalzähler; auch etwa im Mittelstück der Schiene) sind angegeben.

Um ein sinnvolles Maß für den Messfehler zu erhalten, wurden die jeweiligen Frequenzen subtrahiert ($Df = f_1 - f_2$ und $Df_{\text{Theo}} = f_{\text{Theo}_1} - f_{\text{Theo}_2}$).

Der relative Fehler beträgt -7%, d.h. er liegt im Rahmen der Messgenauigkeit. Diese rührt insbesondere daher, dass die Lok nicht genau mit konstanter Geschwindigkeit fährt.

Hierfür zusätzlich benötigte Geräte:

- Der Weg wurde mit dem Laser-Bewegungssensor S Leybold 524073 aufgenommen, welcher an das Sensor-CASSY Leybold 524010USB angeschlossen wurde.
Der Sensor kostet 399,- € das CASSY mit Software kostet 945,- €
Die retroreflektierende Folie, die das Licht in sich selbst zurückwirft (am Zug befestigt), gibt's zum Sensor dazu.

AG Physik-Didaktik

Wir danken M. Frenzel und der Elektronikwerkstatt für deren Unterstützung.

Bei Fragen wenden Sie sich bitte an Herrn Schwarz (daschwarz@uos.de).