

Editorial

## Zeitgeschichte

Eine der schönsten Erfolgsgeschichten der Technik hat ihren Ursprung im Hochschwarzwald: Die Firma Junghans in Schramberg. Aus der im Jahr 1861 gegründeten Fabrik für Uhrenteile wurde in gerade einmal vier Jahrzehnten der größte Uhrenhersteller der Welt – mit damals sensationellen 3.000 Mitarbeitern. Diesen Erfolg verdanke Junghans zunächst (nach dem Vorbild der ersten amerikanischen Uhrenhersteller) der Fertigung standardisierter Uhrwerke, die ab 1867 von Uhrmachern nur noch mit Zifferblättern versehen und in dekorative Uhrengehäuse eingebaut werden mussten. Seit 1876 befeuerten Wecker Produktion und Umsatz, und 1928 kamen Armbanduhren ins Sortiment.

Nach einem Ausflug in die Produktion von Zündern während des zweiten Weltkriegs kehrte Junghans 1946 wieder zu seiner Kernkompetenz zurück. 1961 produzierte Junghans mit 6.000 Mitarbeitern 20.000 Uhren – pro Tag (!). Doch auch die Entwicklung der ersten deutschen Quarzuhr im Jahr 1971 konnte den Rückgang des Absatzes in den Folgejahren nicht aufhalten.

Junghans setzte erneut auf Innovationen und stellte 1986 die erste funkgesteuerte Tischuhr vor. Es folgten 1990 die erste digitale und 1991 die erste analoge Funkarmbanduhr. 1995 brachte Junghans die erste Funkarmbanduhr mit Solarbetrieb auf den Markt, 2004 die erste Multifrequenz-Funk-Armbanduhr. Aber auch diese Innovationen konnten den wirtschaftlichen Niedergang nicht aufhalten, denn batteriebetriebene Armbanduhren, Wecker und Wanduhren wurden zu billigen Massenprodukten.

Dirk Fox, Stefan Falk

Erst mit der Rückbesinnung auf mechanische Präzisionsuhren unter einem neuen Eigner gelang Junghans 2009 ein Comeback: Die Neuauflage der vom [Bauhaus-Designer Max Bill](#) in den 60er Jahren entworfenen [mechanischen Armbanduhren](#) – als Handaufzug, Automatik, Chronoscope und Funkuhr – brachte den Umschwung.

Im Juni 2018 wurde feierlich das [Junghans-Uhrenmuseum](#) eröffnet – im renovierten denkmalgeschützten Terrassenbau, errichtet 100 Jahre zuvor von Philipp Jakob Manz (1861-1936), in dem damals auf neun Etagen Fensterarbeitsplätze für hunderte Junghans-Uhrmacher untergebracht waren.

Heute beheimatet das liebevoll wiederhergerichtete Gebäude eine riesige Uhrenaussstellung mit vielen hundert seltenen Exponaten, von der [Holzräder- bis zur Funkuhr](#).

Den nachhaltigsten Eindruck hat bei mir allerdings ein Exponat hinterlassen, das beweist, dass die Kritik an ungenügender Technikvermittlung eine lange Geschichte hat: Anfang des 20. Jahrhunderts brachte Junghans den Bausatz „Tick-Tack!“ („Der kleine Uhrmacher“) heraus, mit dem Kinder eine funktionsfähige Jockele-Uhr konstruieren konnten. Schon vor 125 Jahren traute man Kindern zu, die Funktionsweise einer Uhr durch deren Konstruktion zu begreifen: Wäre es da nicht längst an der Zeit für einen fischertechnik-Uhrenbaukasten?

Schöne Weihnachten  
euer ft:pedia-Team

P.S.: Am einfachsten erreicht ihr uns unter [ftpedia@ftcommunity.de](mailto:ftpedia@ftcommunity.de) oder über die Rubrik [ft:pedia](#) im [Forum](#) der ft-Community.

## Inhalt

Zeitgeschichte.....	2
Ein neuer Weihnachtsstern mit 12 Zacken.....	4
Winkelsteine auf der Drehscheibe.....	7
Der adaptive Greifer.....	9
Augmented Reality – selbstgemacht.....	15
Unimog-Update 2024 – ferngesteuert (6).....	20
Die fischertechnik-Magnetschwebbahn.....	27
Abstandsmessung mit Magnetostriktion.....	42
Alternativen zum Silberling-Relais – Teil 2.....	58
Steuern und Regeln für Heim und Industrie mit LOGO! 8.....	70
Open Roberta mit dem TXT 4.0.....	72
Drehbewegungssensoren.....	76
Der ft-RPI-sa – ein moderner BASIC-Controller für fischertechnik (1).....	82

## Termine

Was?	Wann?	Wo?
<a href="#">Modellschau Münster</a>	19.01.2025	Kardinal-von-Galen-Gymnasium
<a href="#">Clubdag De Bilt</a>	08.02.2025	Kultur- und Begegnungszentrum HF Witte

## Impressum

<http://www.ftpedia.de>

**Herausgeber:** Dirk Fox, Ettlinger Straße 12-14,  
76137 Karlsruhe und Stefan Falk, Siemensstraße 20,  
76275 Ettlingen

**Autoren:** Florian Bauer, Christian Bergschneider, Axel Chobe, Arnoud van Delden, Stefan Falk, Dirk Fox, Stefan Fuss, Stephan Kallauch, Robert Lippmann, Claus Ludwig, Lutz Mänche, Volker Paelke, Jeroen Regtien, Florian Schäffer.

**Copyright:** Jede unentgeltliche Verbreitung der unveränderten und vollständigen Ausgabe sowie einzelner Beiträge (mit vollständiger Quellenangabe: Autor, Ausgabe, Seitenangabe ft:pedia) ist nicht nur zulässig, sondern ausdrücklich erwünscht. Die Verwertungsrechte aller in ft:pedia veröffentlichten Beiträge liegen bei den jeweiligen Autoren.

Modell

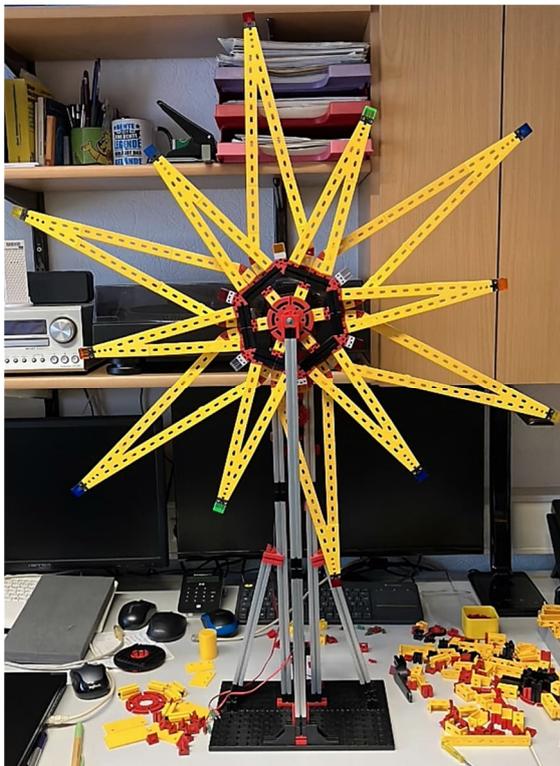
## Ein neuer Weihnachtsstern mit 12 Zacken

Lutz Mänche

*Nach zwei Jahren wurde es mal Zeit, einen neuen, noch schöneren Weihnachtsstern für's Fenster zu bauen.*



*Abb. 1: Schleifspuren*

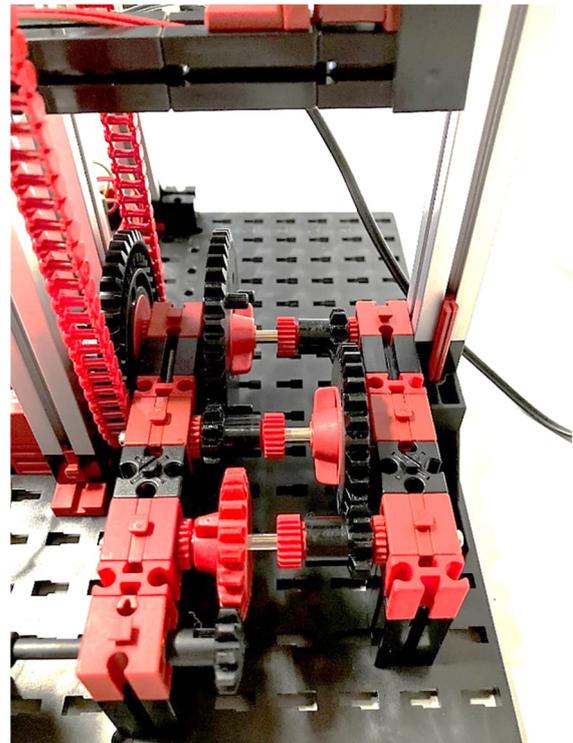


*Abb. 2: Der Kreis im Stern noch in Schwarz*

Beim Auseinandernehmen des alten Sterns aus ft:pedia 4/2022 [1] stellte ich an zwei Bauteilen Schleifspuren fest. Kein Wunder,

das alte Modell ist ca. 300 Stunden gelaufen.

Der Aufbau von Drehkranz und Schleifring ist gleich geblieben. Hier war der Aufbau noch mit schwarzen BS30 ausgeführt; das hat nicht gut ausgesehen (Abb. 2). Deshalb jetzt in Gelb. Das Getriebe habe ich wegen der Gardine am Fenster auf die Grundplatte gebaut (Abb. 3). Das Zahnrad Z40 unten treibt über die Kette den Drehkranz Z60 oben an. Das Modell läuft jetzt viel ruhiger. Noch ein bisschen Filz unter die Grundplatte, und alles ist gut.



*Abb. 3: Getriebe auf der Grundplatte*



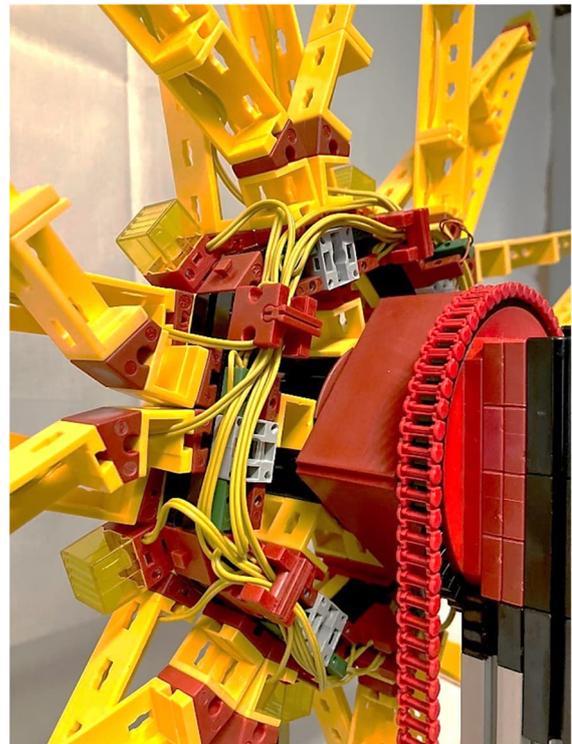
*Abb. 4: Drehkranz oben*



*Abb. 5: Beleuchtung*

An den Maker Beam über dem Getriebe habe ich noch eine LED angebaut; damit werden die gelben Statikteile von unten etwas angestrahlt (Abb. 5).

Die 18 Leuchtsteine wurden von mir mit LEDs und Vorwiderstand bestückt, wie ich es in der ft:pedia 1/2022 beschrieben habe [2]. Somit spare ich 36 Stecker. LEDs und Vorwiderstände stammen von fischerfriendsman.



*Abb. 6: Verdrahtung (1)*

Es sind ca. 9 m Doppellitze zwischen den Streben verlegt worden. Der innere, der mittlere und der äußere Kreis an LEDs können unabhängig voneinander geschaltet werden. Abb. 8 zeigt den beleuchteten inneren Kreis.

Das Modell hat eine Höhe von 1 m und der zwölfzackige Stern hat einen Durchmesser von 80 cm. So passt das bei mir genau ins Fenster.

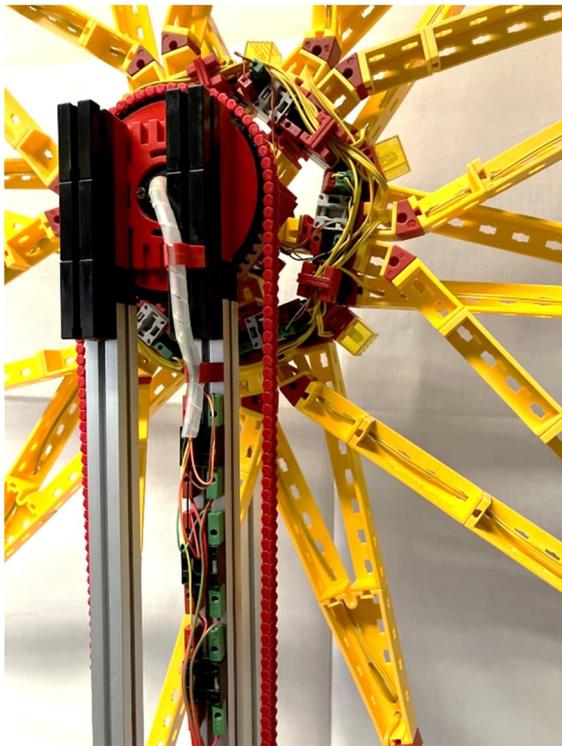


Abb. 7: Verdrahtung (2)



Abb. 8: Der innere Kreis leuchtet



Abb. 9: Das komplette Modell, beleuchtet

## Quellen

- [1] Lutz Mänche: *Ein Stern für Weihnachten*. [ft:pedia 4/2022](#), S. 4–6.
- [2] Lutz Mänche: *fischertechnik-Roboter mit Arduino (Teil 5): Elegante Leuchtsteine und gepimpte LKW*. [ft:pedia 1/2022](#), S. 44–47.

Tipps &amp; Tricks

## Winkelsteine auf der Drehscheibe

Stefan Falk

*Nur eine Kleinigkeit – Winkelsteine 30° auf einer Drehscheibe, um darauf mit vier anstatt sechs Anbaumöglichkeiten weiterzumachen.*

Auf der Drehscheibe ([31019](#)) kann man ja bekanntlich in sechs Nuten weitere Bausteine einschieben:

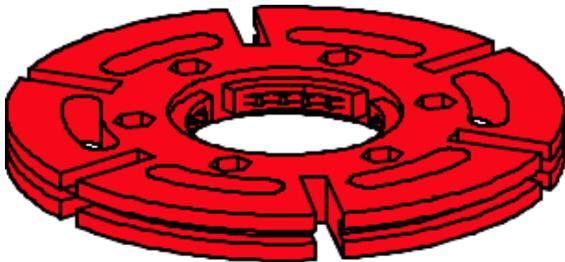


Abb. 1: Drehscheibe [31019](#)

Wenn man nun „vierspurig anstatt sechsspurig“ weiterbauen möchte, und zwar so, dass die vier Anbaumöglichkeiten symmetrisch sind und einen wohldefinierten Abstand haben, geht das z. B. mit den Winkelsteinen 30° (Abb. 2).

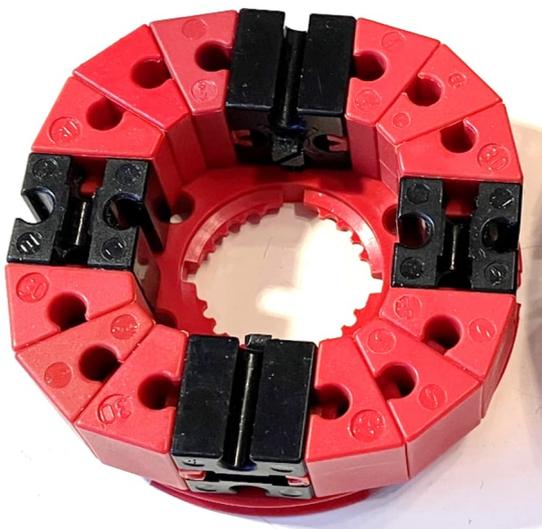


Abb. 2: Aufbau mit den aktuellen Winkelsteinen 30°

Je zwei Bausteine 15 werden in gegenüberliegende Nuten der Drehscheibe gesteckt. Jeweils drei Winkelsteine 30° ergeben einen Versatz um genau 7,5 mm in jede Richtung, nur müssen die beiden weiteren Bausteine 15 quer eingebaut werden, weil unten ja keine Nut existiert.

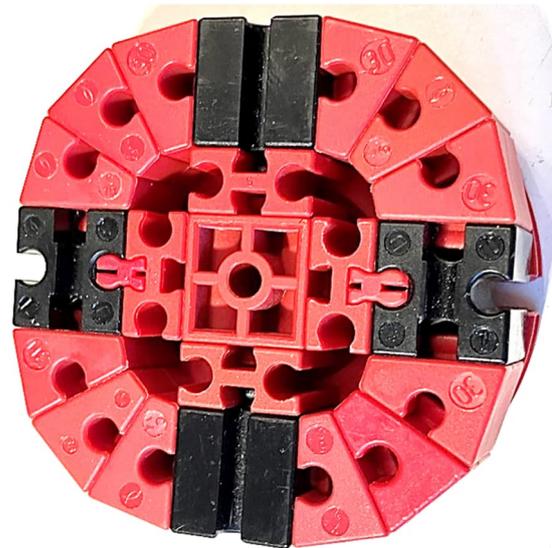


Abb. 3: Der Abstand zwischen den Bausteinen 15 beträgt genau 30 mm, alles ist symmetrisch

Mit der älteren Ur-Version des Winkelsteins 30° [1] geht das auch. Die sind aber etwas kleiner als die aktuellen, sodass die Figur zwar immer noch symmetrisch ist, die Abstände aber etwas weniger als 30 mm betragen – man vergleiche die Abb. 2 und 4.



*Abb. 4: Aufbau mit den älteren, kleineren Winkelsteinen 30° - man beachte, dass die Bausteine 15 im Vergleich zu Abb. 2 näher am Mittelpunkt zu liegen kommen.*

## Quellen

- [1] Stefan Falk: *Varianten des Winkelsteins 30°*. Im [Bilderpool der ft Community](#), 2009.

## Tipps &amp; Tricks

## Der adaptive Greifer

Stephan Kallauch

*Für komplexe Greifprozesse hat Festo einen adaptiven Greifer entwickelt – der als „Schlüsselanhänger“ erworben und mit einem kleinen 3D-Adapter in fischertechnik-Modellen genutzt werden kann.*

### Einleitung

„Greifen“ ist für Industrieroboter eine Standardaufgabe. Häufig wiederkehrende Abläufe, ständig gleiche Bearbeitungsschritte und Werkstücke, die in hoher Stückzahl gefertigt werden, erfordern nur bei der Planung anfänglich kreativen Aufwand, vor allem wenn es um das Greifen von klar definierten Körpern geht, die im besten Fall immer die gleiche Größe und Lage haben.

Was aber, wenn ein Greifprozess komplexer ist? Wenn das Greifgut empfindlich ist? Oder die Umgebung kaum Platz lässt, weil das Werkstück eventuell aus einer engen Verpackung gehoben werden muss? Oder Form und Lage nicht klar definiert sind und der Greifer trotzdem sicher und schnell greifen und das Werkstück zuverlässig und

schnell von einer Position in die nächste heben muss?

Hier sind sogenannte adaptive Greifwerkzeuge die optimale Lösung. Ein Hersteller, der hier seit Jahrzehnten führend immer bessere Techniken zum Greifen entwickelt hat, ist die Firma FESTO aus Esslingen. Für ihren adaptiven Gripper-Finger bedienen sie sich des sogenannten Fin-Ray-Effektes, den sich die Entwickler in der Natur bei Fischflossen abgeschaut haben. Das Skelett der Flossen ist so gebaut, dass sich die Flosse mechanisch entgegen der Kraft wölbt, die auf die Oberfläche ausgeübt wird. Bei der Flosse spart der Effekt Energie beim Vortrieb. Beim Greiffinger sorgt dieser Mechanismus für eine vorteilhafte Verformung: Er schmiegt sich fest und mit relativ gleichmäßiger Flächenpressung um das zu greifende Teil und hält es durch seine

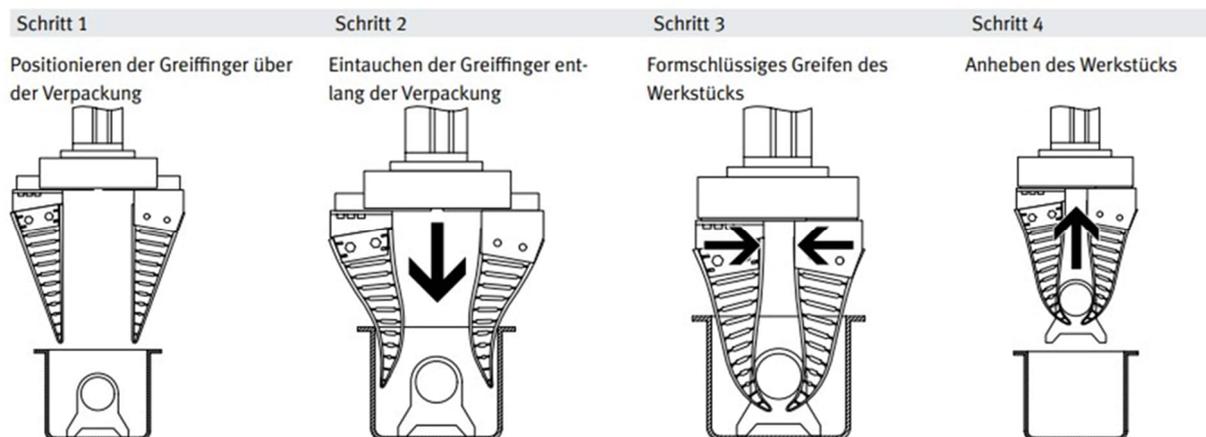


Abb. 1: Schritte des Greifvorgangs eines zweifach-Grippers (Quelle: Festo)

adaptive Form fest, ohne punktuelle Spannungen zu erzeugen, auch wenn der Körper gewölbt oder anderweitig unförmig sein sollte (Abb. 1).



Abb. 2: Adaptiver Greifer, YouTube-Video [1]



Abb. 3: Greifer von Festo [2]

Nun stellt sich auch dem einen oder anderen fischertechniker immer wieder das Problem, dass ein Modell etwas greifen soll, sei es in einem Industriemodell oder bei einem Wettkampfroboter für den RoboCup. Dem Hobbytechniker ist der käuflich erwerbliche Industriegreifer mit seiner ganzen Halstechnik aber in der Regel schlichtweg zu teuer. Oder einfach zu perfekt – warum soll man ein fertiges Industrieprodukt kaufen, wenn man es doch mit fischertechnik selbst bauen kann? Das hat Peter Damen im Jahr 2013 wohl auch gedacht und herrliche Modelle geschaffen, die zahlreich im Bilderpool zu finden sind (Abb. 4) [4].

Eines haben diese genialen Modelle alle gemein: Um den Fin-Ray-Effekt schön abzubilden, mussten sie in erheblicher Größe gebaut werden, damit die Kunststoffteile im Verhältnis zu den wirkenden Kräften und Momenten ausreichend flexibel sind. In dieser Größe taugen solche Greifmechanismen zwar für herrliche Modelle, die organisch anmutende Bewegungen aus der Unterwasser- und Vogelwelt nachahmen, wie Peter seinerzeit auf geniale Weise nachgewiesen hat. Für Wettbewerbsroboter wären diese jedoch viel zu groß.

Doch diese mechanischen Wunderteile gibt es von Festo selbst auch ganz günstig – als Give-Away auf Messen: Dort werden sie dem interessierten Besucher als Schlüsselanhänger geschenkt (Abb. 6). Sie sind im Sinterdruck-Verfahren hergestellt, entsprechen genau dem Industriemodell von vor 10 Jahren (Abb. 5) und wurden lediglich um eine Öse für den Schlüsselring ergänzt:

Die Bezugsquelle „Messe-Give-Away“ für den Schlüsselanhänger ist zugegebenermaßen nicht besonders zuverlässig: Man kann vor einem Messebesuch zwar ein Ausstellerverzeichnis einsehen, aber die Werbepartikel der Aussteller sind dort nicht aufgelistet. Schön, dass Festo einen Promotion-Artikel-Online-Shop [5] betreibt, in dem man die Greifer-Schlüsselanhänger käuflich erwerben kann. Im Zehnerpack für

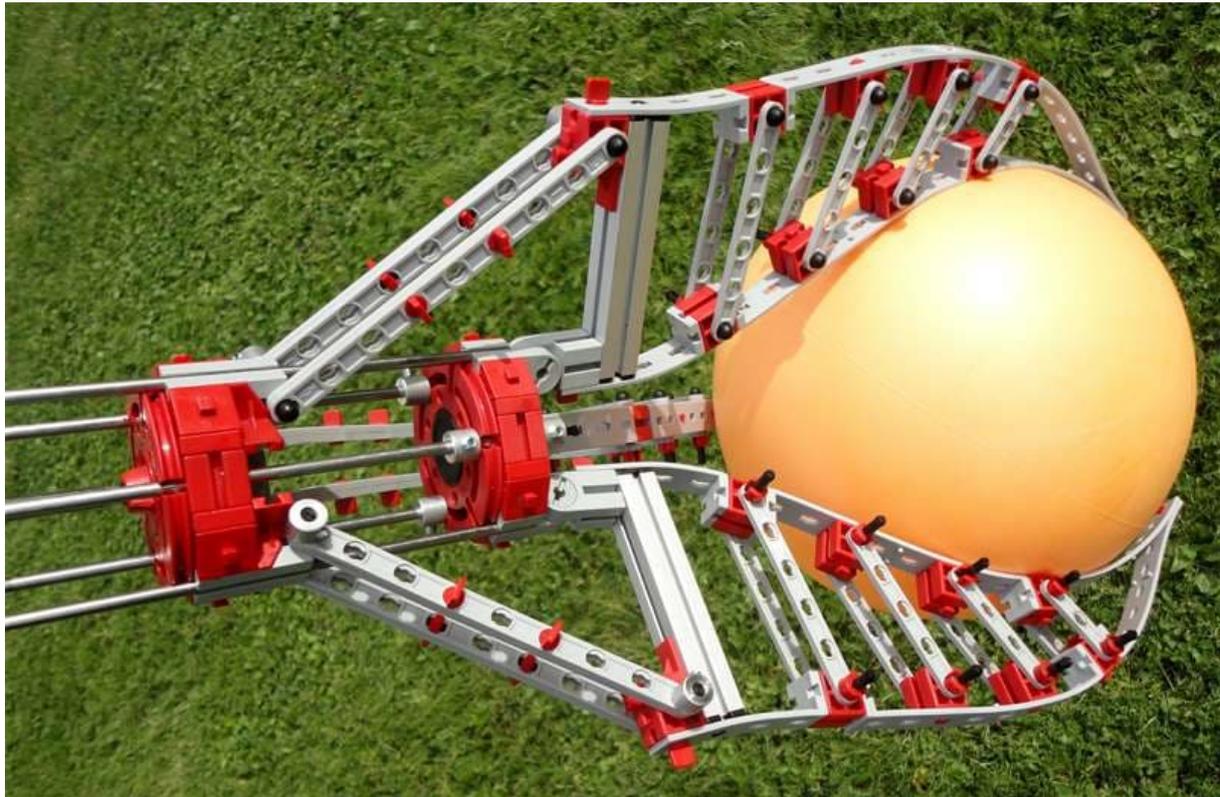


Abb. 4: Adaptiver Greifer aus fischertechnik von Peter Damen [4]

ca. 60 € kommt man zu einem Stückpreis von etwa 6 € an diese hochwertigen Greiffinger.

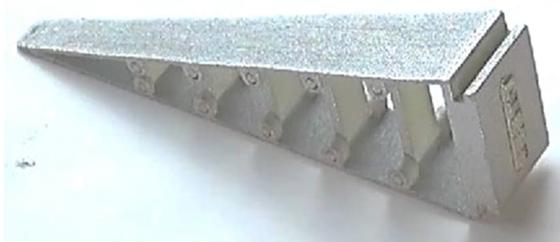


Abb. 5: Ursprünglicher Original-Gripper

Das „echte“ Gripperprodukt von Festo (Abb. 7) kann auch online gekauft werden, z. B. bei der Firma Landefeld in Kassel [6]. Es ist aber ein Vielfaches teurer (80 mm, um die 50 €/Gripper), zudem muss man sich auch Gedanken zur Befestigung machen. Jeroen Regtien hat dafür schon ein funktionierendes 3D-Druckteil entworfen (Abb. 13). Man erhält sehr griffige Profigriffinger, die bestimmt zuverlässiger greifen als die günstigeren Schlüsselanhänger.

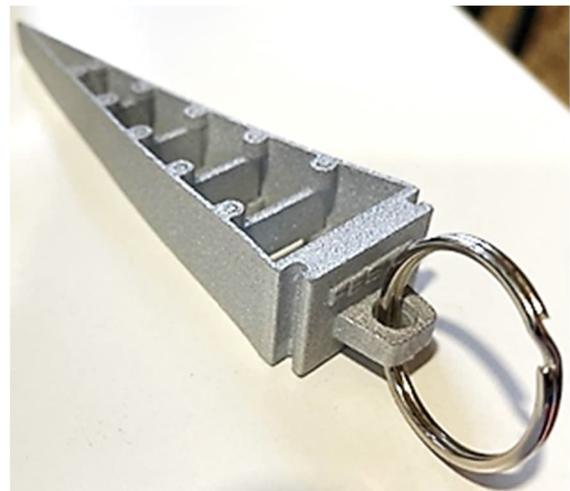


Abb. 6: Aktueller Schlüsselanhänger

Die günstigste Variante ist, den Greifer selbst zu drucken; jedoch ist die Qualität des Festo-Produktes schwerlich zu erreichen. Glücklicherweise, wer einen 3D-Drucker zuhause hat und sich einen einfachen Adapter drucken kann (Abb. 8). Zwei dieser Adapterhälften bilden zusammengesteckt einen stabilen Übergang und machen den Schlüsselanhänger fischertechniktauglich.

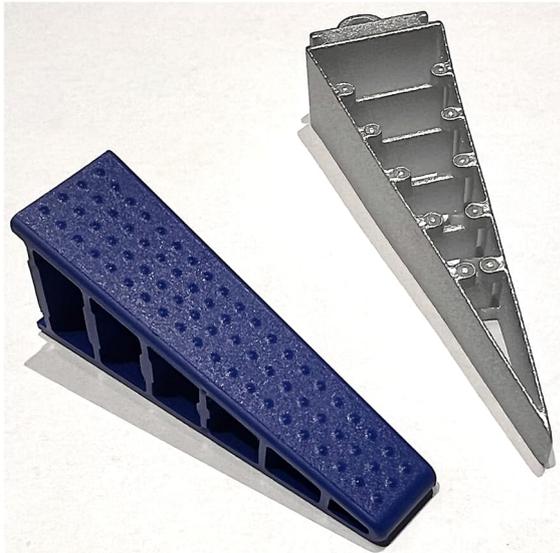


Abb. 7: Neuer Gripper (blau, 60 mm) im Größenvergleich zum Schlüsselanhänger



Abb. 8: Festo-fischertechnik-Adapter (gerade)

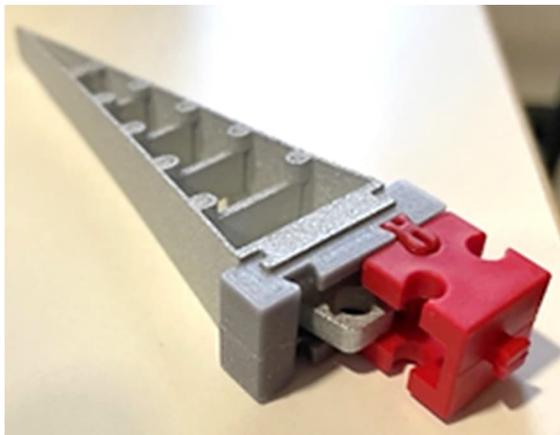


Abb. 9: Aufbau mit erhaltener Schlüsselringöse

So kann er z. B. für den nächsten Kinderzimmeraufräumroboter beim Karlsruher Schul-Robotik-Cup eingesetzt werden. In Abb. 10 ist ein Montagevorschlag zu sehen, der die Schlüsselringöse erhält. Wenn man kein Problem mit „Modden“ hat, liegt es nahe, dieses Hindernis mit Knippex und Feile einfach zu entfernen.

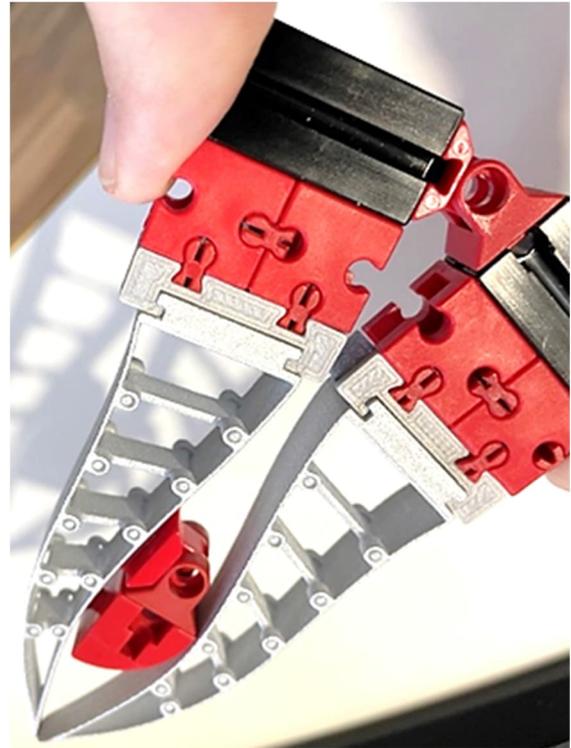


Abb. 10: Beispielhafter Einsatz für rotierende Greifer

Gerade bei linear schließenden Greifervarianten bietet es sich an, die Greiffinger um  $8^\circ$  zu neigen, damit die Greifflächen parallel verlaufen (Abb. 11).

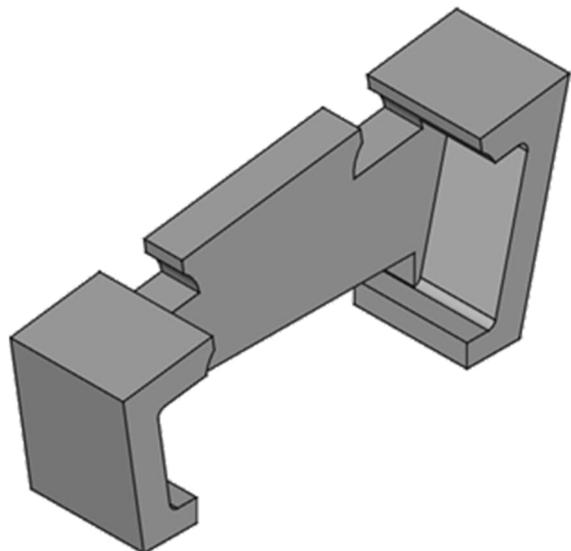


Abb. 11: Adapter mit  $8^\circ$ -Neigung

In diesem Fall kann das Schlüsselringauge ebenfalls erhalten bleiben – schön zu sehen beim Greifersystem aus dem „Mini Servo

System“ von Jan Hanson („juh“) im Forum der ft:Community (Abb. 11, 12).



Abb. 12: Schräger Adapter im Mini-Servo-Greifer von Jan Hanson

Neben den Greifern mit zwei Fingern gibt es eine Variante mit drei, die noch toleranter bei unterschiedlichen Greifsituationen sind (Abb. 14) [7].

Mechanisch ist diese Variante zwar schön anzuschauen, hat jedoch den großen Nachteil, dass die Rastachse an der Kupplung keine Zugkräfte aufnehmen kann. Da die Spannung der Gripper jedoch eine relativ große Zugspannung in der Achse erzeugt, gilt es, die Mechanik so umzubauen, dass eine Druckkraft in der Achse entsteht.

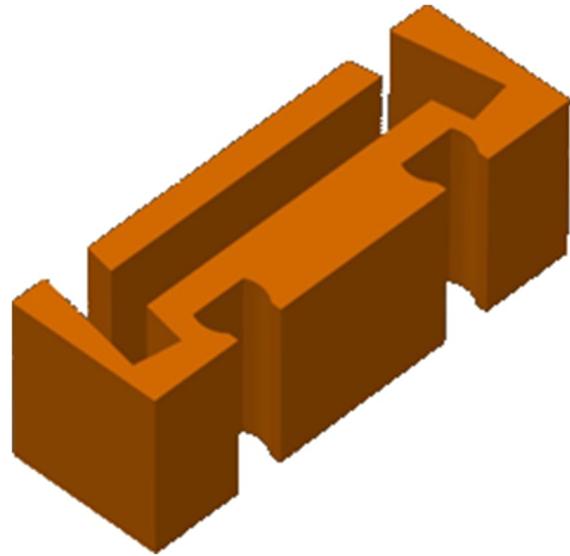


Abb. 13: Gerader Adapter von Jeroen Regtien für Original-Gripper von Festo (60 mm, siehe Abb. 7)

Jetzt ist es an Euch: Nutzt gerne die oben genannten Steilvorlagen und veröffentlicht eure Lösungen mit funktionierenden Greifmechanismen mit Fin-Ray-Effekt im Bilderpool der ft-Community!

## Quellen

- [1] Malte Ahlers: *Adaptive gripper based on FESTO FinGripper fingers*. Auf [YouTube](#), 2011.
- [2] BIONIKON – Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e.V.: *GUYF: Wie ein Elefant und ein Fisch zusammenarbeiten können? Durch die Bionik!* Auf [YouTube](#), 2016.
- [3] BIONIKON – Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e.V.: *Fin-Ray-Effekt*. Website mit dem Video [2], auf [green-up-your-future.de](#).
- [4] Peter Damen: *Adaptive Greifer*. Im [Bilderpool der ft:Community](#), 2013.
- [5] Plan Concept GmbH: *Fin\_ray Schlüsselanhänger*. Auf [promotion.festo.shop](#).
- [6] Landefeld Druckluft und Hydraulik GmbH, [Homepage](#).

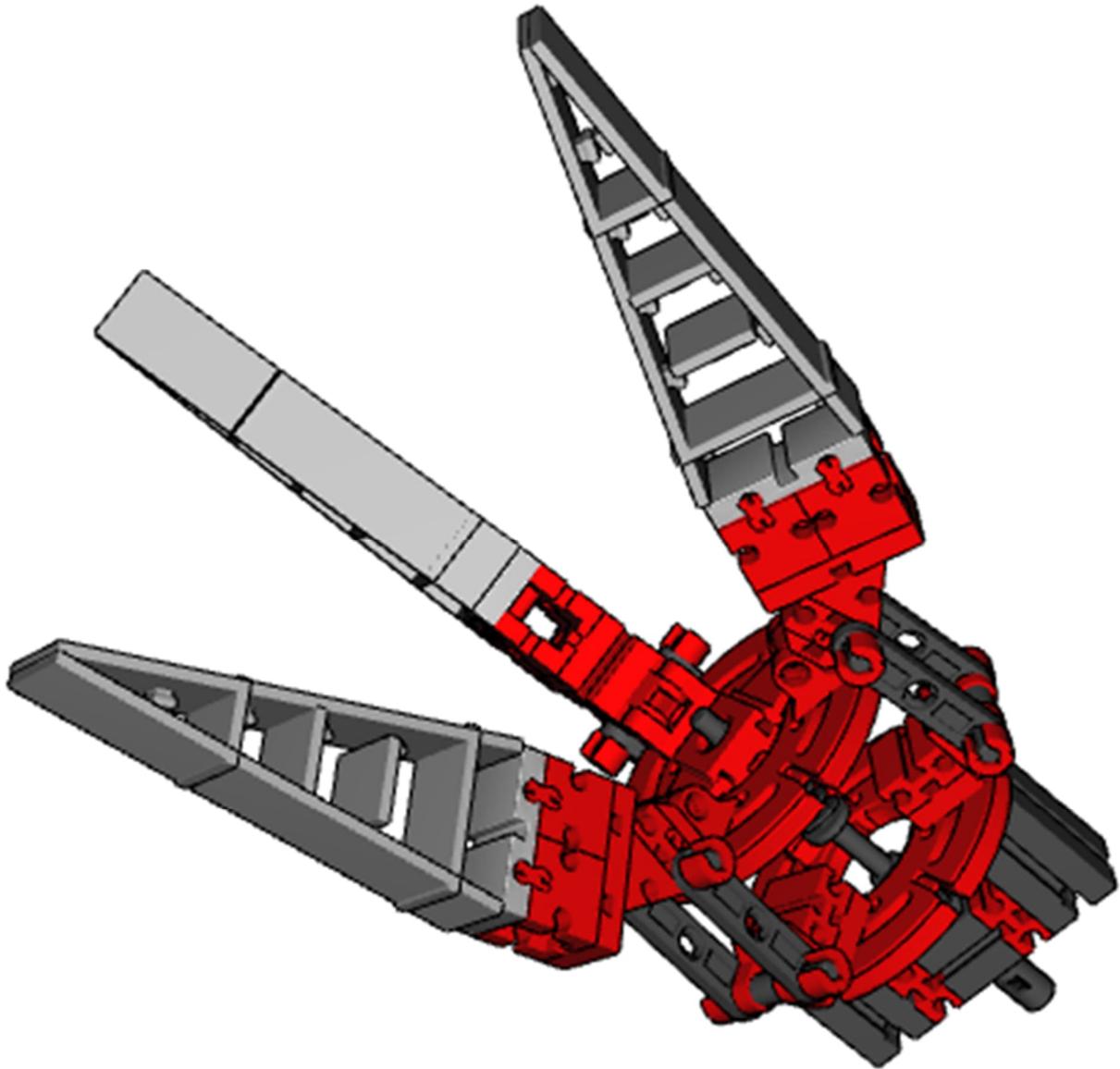


Abb. 14: Greifer frei nach dem sechsfach-Greifer von Ludger Mäsing [7]

[7] Ludger Mäsing: ‚6-Finger-Greifer‘  
mechanisch. Im [Bilderpool der  
ft:Community](#), 2008.

[8] Stephan Kallauch: *Fin-Ray-Gripper-  
Adapter*. STL-Dateien mit den  
geraden und schrägen Adaptern bei  
den [Downloads zu diesem Beitrag](#)  
auf der ft:Community, 2024.

Modell

## Augmented Reality – selbstgemacht

Volker Paelke

*Es gibt unterschiedliche Definitionen von Augmented Reality. Am weitesten verbreitet ist die von Ronald Azuma, einem Pionier der AR-Forschung [1]. Nach dieser Definition müssen drei Kriterien erfüllt sein, um von Augmented Reality zu sprechen: Kombination von realer und virtueller Welt, Interaktivität in Echtzeit und räumliche Verankerung (Registrierung). In diesem Beitrag wird der Fokus auf die Kombination und räumliche Verankerung gelegt, während die Interaktivität unberücksichtigt bleibt – auch wenn sie, insbesondere im ursprünglichen Szenario von Pepper's Ghost, durchaus möglich ist.*

### Einleitung

Augmented Reality (AR), auf Deutsch „erweiterte Realität“, beschreibt die Verbindung der physischen Welt mit virtuellen Elementen. Ihr Ziel ist es, raumbezogene Informationen verständlicher und intuitiver zugänglich zu machen, indem sie genau dort erscheinen, wo sie gebraucht werden: in der realen Umgebung. So kann ein Pfeil auf dem Boden in einer Navigations-App den Weg weisen oder eine Montageanleitung direkt an einem fischertechnik-Modell angezeigt werden, das gerade aufgebaut wird.

Viele haben sicherlich Augmented Reality schon einmal selbst genutzt, eventuell ohne es bewusst wahrzunehmen. Beispiele wären die Jagd auf virtuelle Monster in der echten Welt mit dem Smartphone oder ein Einrichtungsplaner, mit dem man Möbel virtuell in einem Raum platzieren kann, bevor man sie kauft. Auch in Museen begegnet man AR immer häufiger – sei es, um statische Exponate interaktiv zu machen oder historische Orte und Artefakte mit virtuellen Rekonstruktionen und Erklärungen zu ergänzen.

Gerade bei größeren Augmented-Reality-Installationen in Museen bleibt oft unklar, wie der AR-Effekt technisch umgesetzt

wird – die Integration wirkt auf den Betrachter fast „magisch“. In diesem Beitrag wird das dahinterstehende Prinzip erklärt, das auf einem alten „Zaubertrick“ basiert, und mit fischertechnik nachgebaut.



Abb. 1: fischertechnik-Figur trifft Geist

### Was braucht man für Augmented Reality?

Augmented Reality definiert sich als Kombination der realen Welt mit virtuellen, typischerweise bildlichen, Inhalten. Die virtuellen Inhalte werden dabei nahtlos in die physische Umgebung integriert. Weiterhin sind die virtuellen Objekte dreidimensional positioniert und korrekt zur realen Welt

ausgerichtet („registriert“), verhalten sich also bei Bewegungen des Benutzers so, als wären sie tatsächlich fest an einem Ort.

Für die nahtlose Integration virtueller Inhalte in die reale Welt gibt es drei gängige Ansätze: „Video-See-Through“, „Optical-See-Through“ und projektionsbasierte Augmented Reality.

Bei Augmented Reality Systemen, die auf dem „Video-See-Through“-Prinzip basieren, erfasst eine Kamera die Umgebung. Dieses Kamerabild wird „live“ auf dem Bildschirm angezeigt und die virtuellen Objekte oder Informationen werden perspektivisch korrekt als Computergrafik über das Kamerabild gelegt, sodass sie in die reale Umgebung eingebettet erscheinen. Damit lässt sich Augmented Reality auf Smartphones, Tablets, aber auch VR Brillen umsetzen. Aktuell basieren die meisten AR Anwendungen auf diesem Prinzip. Beispiele lassen sich leicht auf einem Smartphone ausprobieren.

„Optical See-Through“ Augmented Reality ermöglicht es, die reale Welt direkt durch ein (teilweise) transparentes Display zu sehen. Die virtuellen Inhalte werden optisch auf dieses Display projiziert, sodass sie scheinbar in der realen Umgebung „schweben“. Diese Form der visuellen Integration wird häufig in speziellen AR-Brillen eingesetzt, findet aber auch Anwendung in Museen. Im Folgenden wird dieses Konzept genauer beleuchtet.

Projektionsbasierte Augmented Reality nutzt Lichtprojektionen, um virtuelle Inhalte direkt auf physischen Oberflächen in der realen Welt darzustellen. Hierfür werden keine Displays oder Headsets benötigt; stattdessen werden Bilder, Animationen oder Informationen direkt auf Objekte, Wände oder Fassaden projiziert. Dafür ist typischerweise eine feste Installation der Projektoren erforderlich, was den Einsatz auf bestimmte Orte beschränkt (und hier nicht weiter betrachtet werden soll).

## Optical-See-Through und ein alter „Zaubertrick“

Optische Tricks wurden bereits früh zu Unterhaltungszwecken und als Zaubertricks genutzt. Berühmt wurde der „Pepper’s Ghost“ Effekt: Ein Illusionstrick, der erstmals in den 1860er-Jahren von John Henry Pepper populär gemacht wurde.

Ursprünglich für Theatervorführungen entwickelt beruht der Effekt auf der Reflexion von Licht auf einer Glasscheibe. Ein für das Publikum nicht direkt sichtbares Objekt oder – in unserem Beispiel – ein als Geist verkleideter Schauspieler befindet sich in einem dunklen Raum neben der Bühne und bleibt für das Publikum unsichtbar. Die Glasscheibe ist so ausgerichtet, dass sie Licht aus diesem Raum in Richtung der Zuschauer reflektiert. Wird der „Geist“ nun beleuchtet, erscheint seine Reflexion für die Zuschauer so, als befände sich der Geist direkt auf der Bühne. Wenn die Schauspieler auf der Bühne entsprechend instruiert sind, können sie aus Sicht des Publikums scheinbar mit dem Geist interagieren – der Geist ist allerdings nur für das Publikum sichtbar und nicht für die Schauspieler.

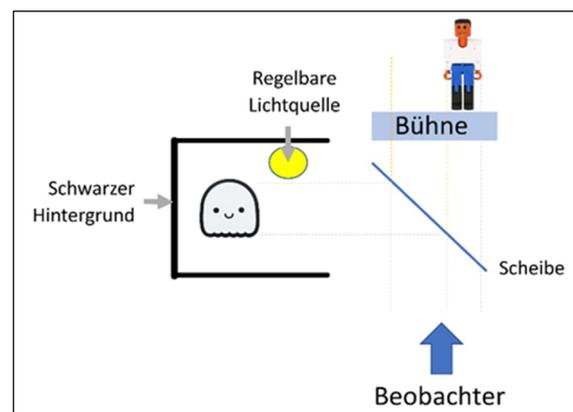


Abb. 2: Funktions-skizze Pepper's Ghost

Abb. 2 zeigt eine einfache Illustration dieses Tricks. Eine ausführliche Beschreibung einschließlich zeitgenössischer Illustrationen findet sich auf Wikipedia [2]. Heute wird der „Pepper’s Ghost“-Effekt neben Augmented Reality auch weiterhin in Zau-

bershows, Theaterperformances, Themenpark-Attraktionen oder in den „Bühnenshows“ verstorbener oder rein virtueller Künstler verwendet.

## Pepper's Ghost in fischertechnik

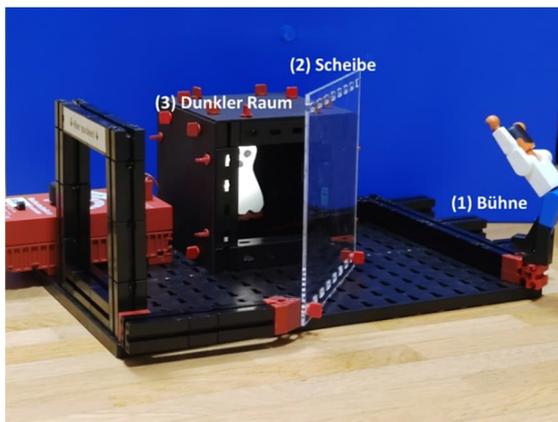


Abb. 3: Aufbau von Pepper's Ghost in fischertechnik

Um einen Pepper's-Ghost-Effekt mit fischertechnik zu erstellen, brauchen wir drei Komponenten: Die „Bühne“ mit den realen Objekten (1), eine transparente Scheibe (2) und einen vom Betrachter nicht direkt einsehbaren dunklen Raum mit dem „Geist“ und einer regelbaren Lichtquelle (3).

Die „Bühne“ besteht im Beispiel (Abb. 3) aus einer Reihe von Bausteinen mit einer fischertechnik-Figur – diese lässt sich natürlich nach Belieben erweitern und individuell gestalten. Wichtig ist jedoch, dass nur der Bereich der Bühne, der durch die Scheibe betrachtet wird, mit einem Geist oder einer anderen Augmentierung versehen werden kann. Für größere Bühnen muss der dunkle Raum entsprechend vergrößert werden, um die Reflexion korrekt einzubetten.

Die Scheibe muss nicht aus Glas bestehen – transparente Kunststoffscheiben oder stabile Folien eignen sich ebenfalls. Sie sollte möglichst klar und frei von Staub oder Kratzern sein, sowie möglichst dünn, um doppelte Spiegelungen zu vermeiden. Für

erste Experimente ist eine alte CD-Hülle ideal: sie ist einfach auf einer fischertechnik-Platte zu montieren, robust und leicht verfügbar (Abb. 4). Allerdings kann der Rahmen störend wirken. Stabile, transparente Folien sind ebenfalls eine gute Alternative, sofern sie fest genug sind, um ohne Rahmen aufrecht zu stehen.

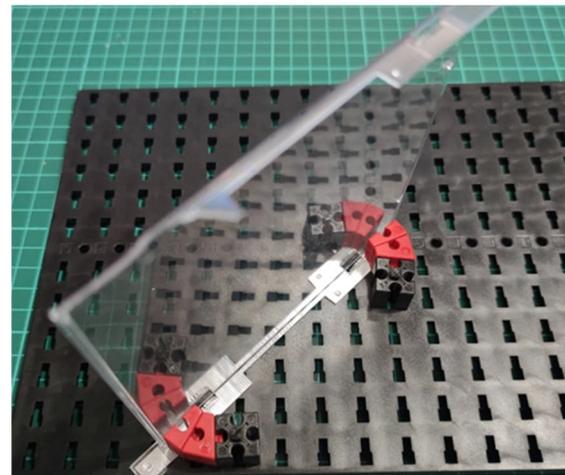


Abb. 4: Alternative: CD Hülle als Scheibe

Im Beispielmmodell aus Abb. 3, das für die fischertechnik-Convention robust gemacht wurde, habe ich eine 2-mm-Acrylglasscheibe verwendet. Die Scheibe wurde mit einem Laser-Cutter bearbeitet, um „statik-kompatible“ Löcher hinzuzufügen, sodass sie wie eine Statikplatte mit S-Riegeln verbaut werden kann. Dies ist jedoch nicht zwingend notwendig; die Scheibe kann auch auf andere Weise befestigt werden.

Beim Aufbau des dunklen Raums gibt es viel Spielraum, jedoch sollten einige Punkte berücksichtigt werden:

- Der Raum muss ausreichend groß sein, um Platz für den „Geist“ (oder andere Objekte) zu bieten.
- Eine Beleuchtung muss eingebaut werden, bestehend aus einem oder mehreren Lämpchen oder LEDs.
- Der Raum selbst sollte möglichst dunkel sein, also z. B. aus schwarzen Bausteinen aufgebaut, damit nur die Objekte im

Raum und nicht der Raum selbst als Reflexion sichtbar werden.

- Der Raum sollte möglichst lichtdicht sein, weil sonst das durchscheinende Licht ebenfalls gespiegelt wird.

Im Beispielmmodell aus Abb. 3 wurde ein einfacher Rahmen aus schwarzen Statik-Teilen aufgebaut, in dem sich Beleuchtung und Geist befinden. Der Rahmen wurde dann mit schwarzem Karton weitestgehend lichtdicht verkleidet, wobei nur die Vorderseite unverkleidet blieb.

Der restliche Aufbau ist dann einfach: Die Scheibe wird in einem 45°-Winkel zwischen dem dunklen Raum und der Bühne montiert. Wichtig ist, dass das Geisterobjekt genauso weit von der Scheibe entfernt ist wie die Bühne selbst, um eine korrekte räumliche Ausrichtung (Registrierung) zu gewährleisten (dies ist in Abb. 2 illustriert).

## Funktionen und Erweiterungen

Betrachtet man die Bühne von vorne auf Augenhöhe durch die Scheibe sollte zunächst nur die reale Bühne sichtbar sein, im Beispiel also die fischertechnik-Figur.

Schaltet man die Beleuchtung des dunklen Raums ein, erscheint der Geist.

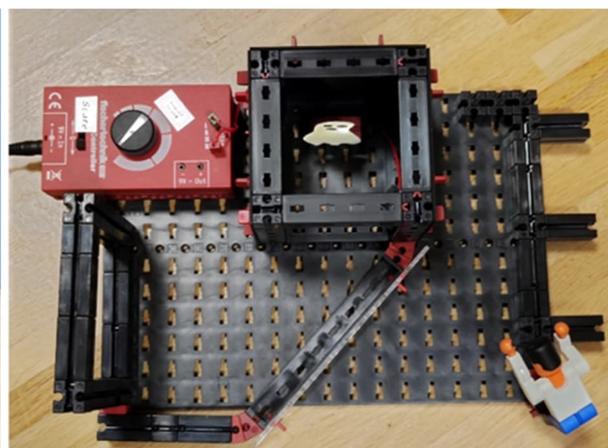


Abb. 5: Komplette Ansicht mit Sucher und Controller

Im Beispiel wurde ein Power Controller genutzt, um den „Schreck-Level“ stufenlos einstellbar zu machen: Indem die Beleuchtung gedimmt wird, kann die Sichtbarkeit bzw. Transparenz des Geists gesteuert werden. Dies ist natürlich optional. Ein „flackerndes“ LED-Teelicht ist für die Beleuchtung eines Geists ebenfalls eine gute Lösung.

Um das Finden der richtigen Perspektive zu erleichtern gibt es beim Beispielmmodell noch einen „Sucher“-Rahmen mit entsprechender Beschriftung.

In Abb. 5 wurde auf der rechten Seite der „Deckel“ entfernt, um in den dunklen Raum schauen zu können.

Das Modell lässt sich leicht zu einem Augmented-Reality-Display umbauen: Der dunkle Raum wird dabei durch ein Display, im Beispiel ein Smartphone, ersetzt. Da das Smartphone-Display selbst leuchtet, entfällt die Notwendigkeit einer separaten Beleuchtung. Es können beliebige Bilder oder Animationen angezeigt werden, wie zum Beispiel der virtuelle Rennwagen in Abb. 6.

Bei der Erstellung der Grafiken oder Animationen sollte man darauf achten, dass der Hintergrund der Grafiken (also alles was nicht augmentiert werden soll) schwarz ist, so bleibt an diesen Stellen die reale Welt sichtbar, da kein Licht reflektiert wird.

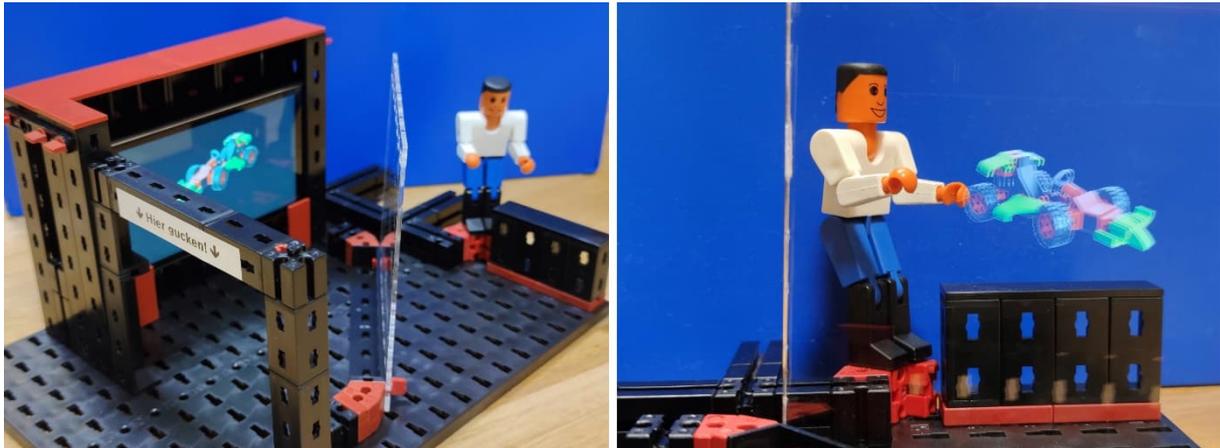


Abb. 6: Als AR-Display mit Smartphone

## Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag zeigt, wie sich mit fischertechnik ein einfaches Augmented-Reality-Display basierend auf dem Pepper's-Ghost-Prinzip erstellen lässt. Es gibt sogar Bausätze, die auf diesem Prinzip basieren und AR-Headsets ermöglichen, in die ein Smartphone eingesetzt wird. Allerdings sind solche Headsets in der Praxis unpraktisch: Der Aufbau aus Smartphone und transparenter Scheibe vor dem Kopf ist voluminös, schwer und wenig ergonomisch.

Kommerzielle Hersteller von Augmented-Reality-Displays nutzen daher keine Scheibe sondern flachere optische Elemente, die denselben Effekt erzielen.



Abb. 7: Ein „optical-see-through“ AR Display: Epson Moverio mit Prismen

Abb. 7 zeigt eine Moverio-Brille des Herstellers Epson. In dieser Brille befinden sich in den verbreiterten Bügeln an der Seite kleine Microdisplays (für jedes Auge eins), deren Bild statt von einer Scheibe von Miniprismen in die Augen des Betrachters reflektiert wird. Da die Prismen, analog zur Scheibe in unserem Model, neben der seitlichen Reflexion auch die gerade Durchsicht ermöglichen, können damit digitale Inhalte direkt vor den Augen eingeblendet werden, während die reale Umgebung weiterhin sichtbar bleibt.

## Referenzen

- [1] Azuma, Ronald T.: *A Survey of Augmented Reality*. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1997, 6(4), S. 355–385.
- [2] Wikipedia: [Pepper's Ghost](#).

Modell

## Unimog-Update 2024 – ferngesteuert (6)

Claus Ludwig

*Eigentlich sollte mit dem fünften Teil zum Thema „Fernsteuerungen“ Schluss sein. Aber, da ich mir für diesen Herbst vorgenommen hatte, meinen vor über 15 Jahren gebauten Unimog zu überarbeiten, dachte ich, vielleicht ist das ja auch für den einen oder die andere interessant. Und so gibt es noch einen sechsten Teil.*



Abb. 1: Unimog-Modell von 2007

### Unimog

Der Unimog ist eine Erfindung der Nachkriegszeit und wird seit über 70 Jahren gebaut – eine echte Erfolgsgeschichte. Die Bezeichnung „Unimog“ steht dabei für Universal-Motor-Gerät. Wie erfolgreich die Geschichte des Unimog ist, sieht man vielleicht auch daran, dass es schon ein Unimog-Museum gibt, obwohl der Unimog immer noch produziert wird [1].

Drei Konstruktionsbestandteile des Unimog sind sicher wesentlich für seinen Erfolg:

- Da wäre zum einen der Allradantrieb mit sperrbaren Differenzialen.
- Dann die extreme Verwindungsfähigkeit durch seinen Leiterraum.
- Und drittens seine sogenannten Portalachsen [2]. Hier sitzt die Achse nicht wie

üblich in der Mitte des Rades, sondern nach oben versetzt. Das führt zu einer höheren Bodenfreiheit; gleichzeitig ergibt sich eine weitere Getriebeuntersetzung in der Radnabe.

Alle drei Konstruktionselemente führen zu einer extremen Geländegängigkeit. Eingesetzt werden Unimogs weltweit und in fast allen Bereichen von Land- und Forstwirtschaft, Kommunalbetrieben, der Feuerwehr, dem THW, der Bahn usw. Unzählige An- und Aufbauten ergänzen den Unimog, und so wird der Name zum Programm.

### Der fischertechnik-Unimog

Der Unimog wurde von mir erstmals 2006/7 gebaut (Abb. 1) und dann eine ganze Zeit auf verschiedenen Ausstellungen in Deutschland und in den Niederlanden gezeigt. Gleichzeitig wurden zahlreiche Bilder in den ftc-Bilderpool hochgeladen.

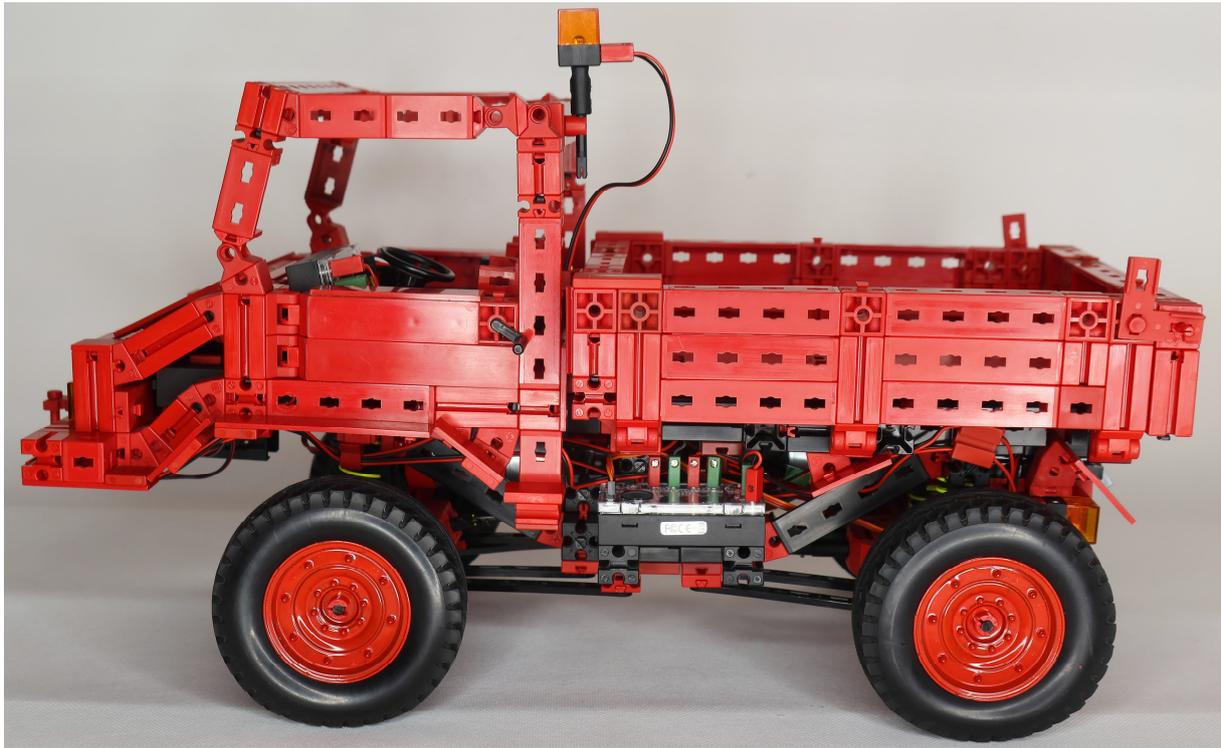
Der Unimog 2024 (Abb. 2-5) sollte kein Neubau werden, sondern eine Überarbeitung des bestehenden Modells mit neuer Steuerung, neuen Rädern, leichten Anpassungen an Rahmen und Aufbau sowie einer harmonischeren Farbabstimmung. Der Rahmen wurde, wie viele andere Teile, vom Vorgänger weitestgehend übernommen. Zur Verbesserung der Festigkeit wurde er nicht nur, wie der alte Rahmen, an einigen Stellen mit Sekundenkleber verklebt, sondern zusätzlich verschraubt.



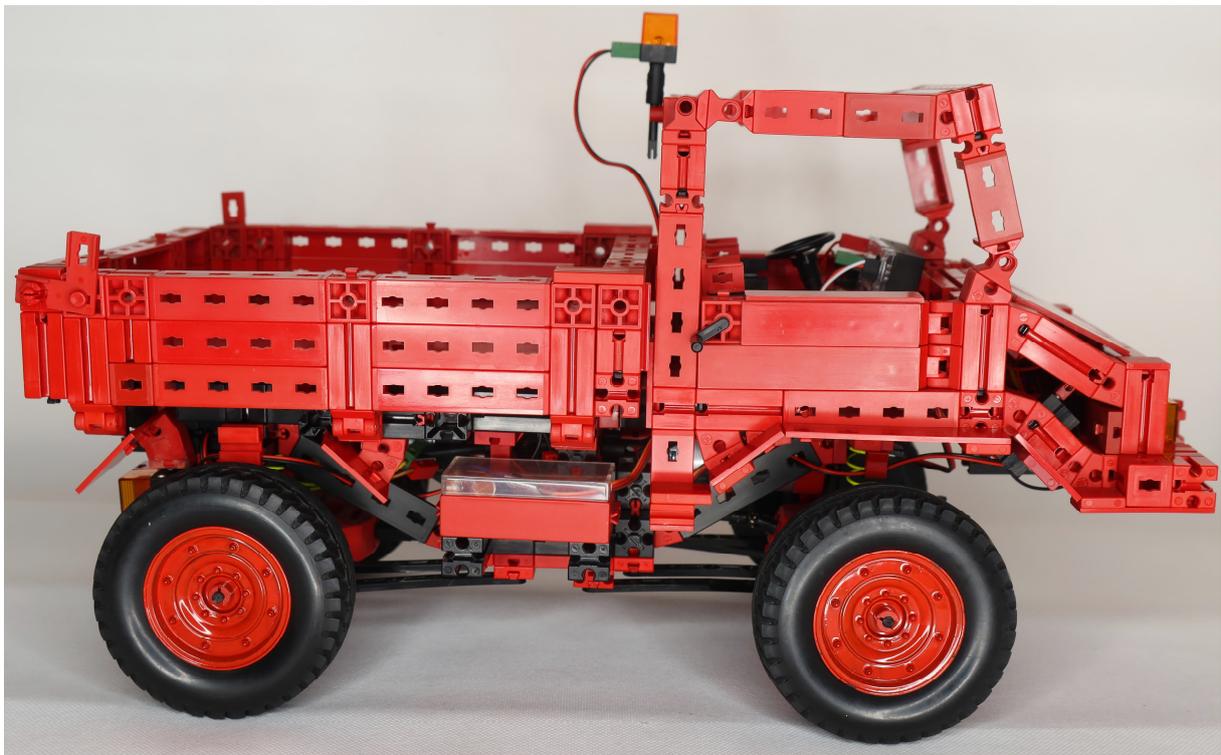
*Abb. 2: Unimog-Modell von 2024 – von rechts vorne*



*Abb. 3: Unimog-Modell von 2024 – von links vorne*



*Abb. 4: Seitenansicht (links)*



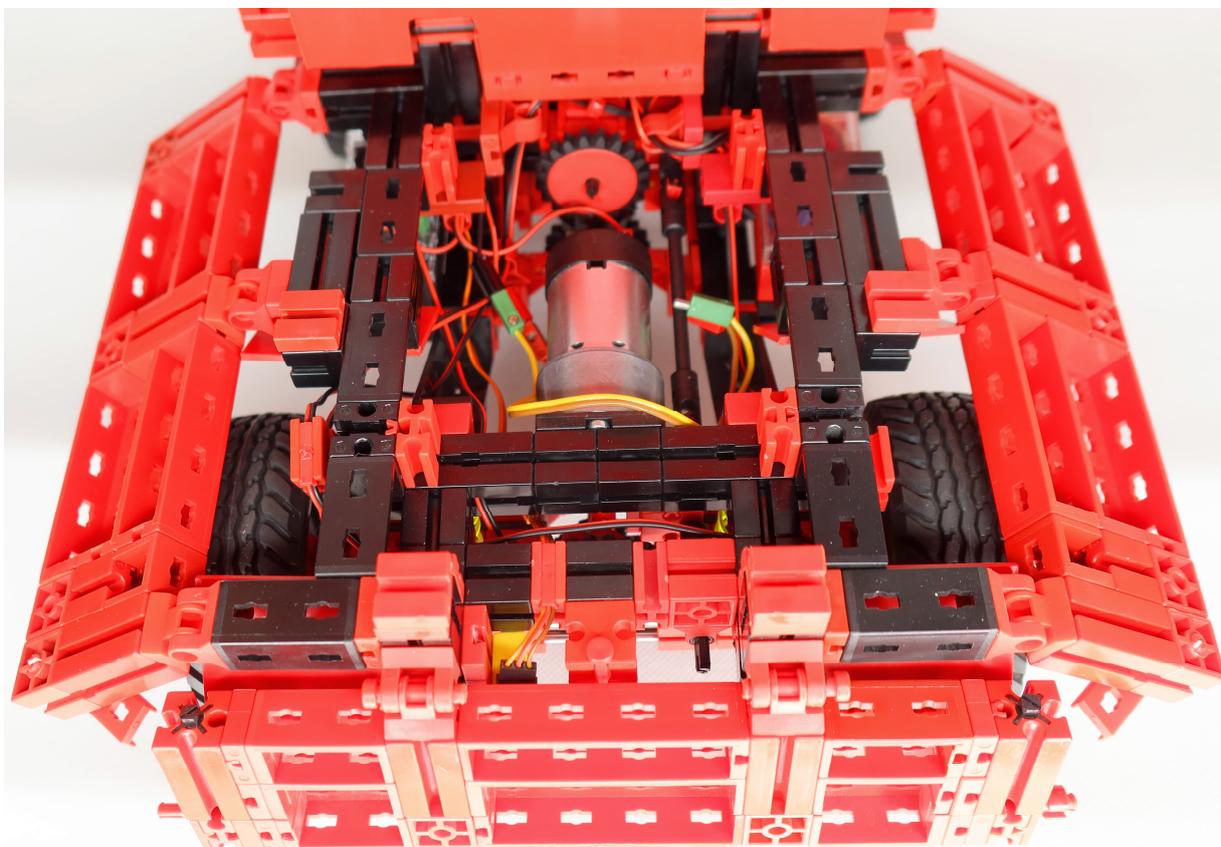
*Abb. 5: Seitenansicht (rechts)*

Neu am Unimog ist jetzt, dass der obere Teil komplett in Rot gebaut ist, während der untere Teil, wo immer es ging, in Schwarz gehalten ist.

Der Unimog hat bewegliche Türen; die Motorhaube kann geöffnet werden. Alle drei Seitenwände der Pritsche können entriegelt und heruntergeklappt werden (Abb. 6).



*Abb. 6: Unimog mit geöffneten Türen, offener Pritsche und heruntergeklappter Windschutzscheibe*



*Abb. 7: Aufgeklappter Pritschenboden*

Eine Besonderheit ist, dass die Dachholme nach hinten weggeklappt werden können und dann die Windschutzscheibe flach auf die Motorhaube gelegt werden kann – die Cabrioversion. Zusätzlich kann der Pritschenbogen hochgeklappt werden, um an den Akku zu gelangen (Abb. 7).

Und noch ein Extra gibt es: in der vorderen Stoßstange ist ein ausklappbarer Motor mit Hubgetriebe versteckt. Hier können später einmal Zusatzgeräte angeschlossen werden. Dazu dienen auch die gelben Steckdosen auf der Vorder- und Rückseite des Unimog, die über die Fernsteuerung gesteuert werden.

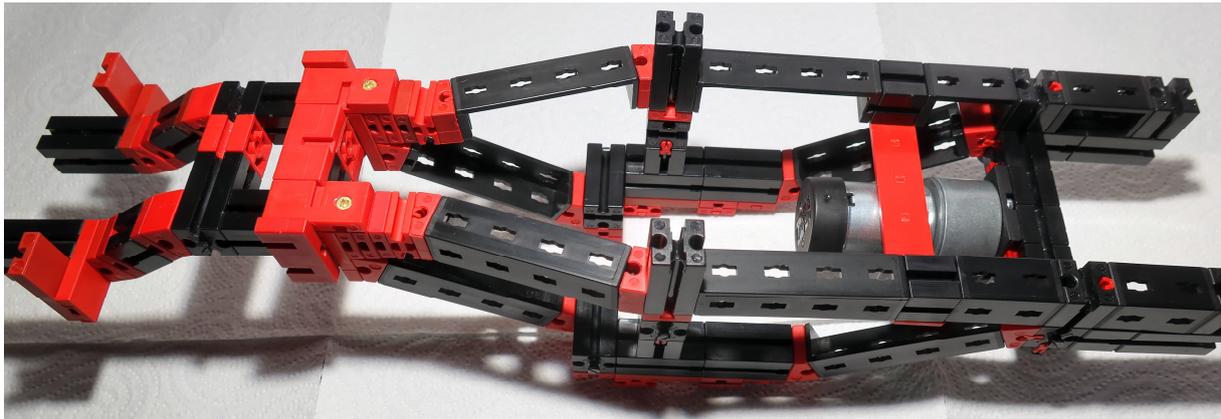


Abb. 8: Rahmen von oben

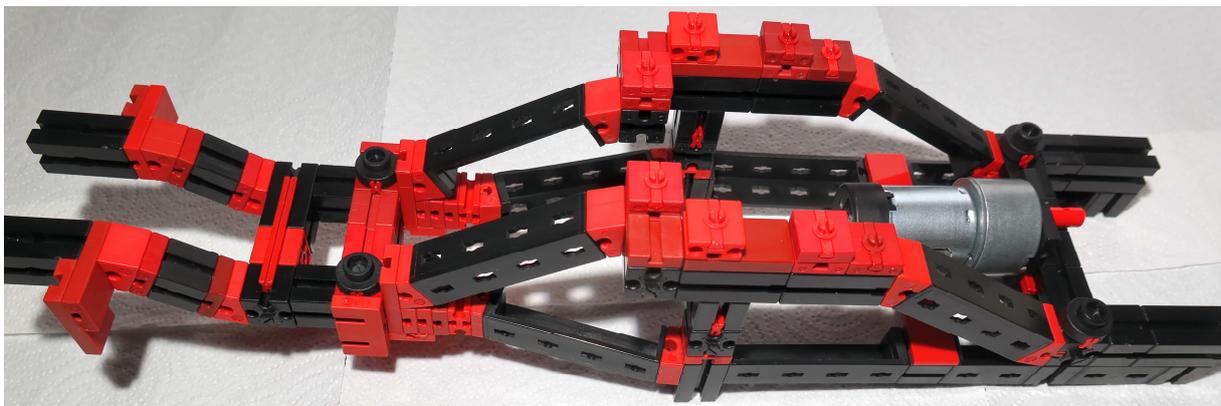


Abb. 9: Rahmen von unten

Abb. 8 und 9 zeigen den Aufbau des Rahmens. Die darin zu sehende rote Bauplatte 15×90 wurde später entfernt und der Rahmen im hinteren Bereich etwas verbreitert. Das war erforderlich, damit genug Platz für den neuen Batteriehalter vorhanden ist.

Für die Räder wurden in der Erst-Version Reifen von Conrad-Electronics verwendet. Diese Reifen sind aber nach meinen Informationen nicht mehr lieferbar. Losgelöst davon passen, nach meiner Ansicht, die jetzt verwendeten Lkw-Reifen von Tamiya viel besser (Abb. 10) [3].



Abb. 10: Reifen von Tamiya [3]

Besonders praktisch bei diesen Felgen finde ich, dass sie auf der Innenseite einen Kranz haben, in den die alten fischertechnik-Reifen 45 gut hineingeklemmt werden können. Damit ist das Befestigen der Räder sehr einfach möglich. Zur Anpassung an das Modell wurden die Felgen mit Modellbaufarbe rot lackiert.

Eine weitere Besonderheit sind die relativ weichen Spiral-Stahlfedern, die ich schon im Modell von 2007 verwendet habe und die wie beim Original für eine sehr gute Geländegängigkeit sorgen [4].

Der Allradantrieb erfolgt über drei Differenziale und wird über einen Powermotor 50:1 (rote Kappe) angetrieben (Abb. 11). Bei den Kardangelenken wurden Teile aus dem Modellbaubereich verwendet, die zum einen mit Sekundenkleber verklebt und mit Draht verstiftet wurden.

Weiter gibt es eine durchgehende Zapfwelle, die von einem Powermotor 8:1 (schwarze Kappe) angetrieben wird und die Anschlüsse an der Vorder- und Rückseite hat.



Abb. 11: Antrieb des Unimog

Für die Stromversorgung sorgen acht Eneloop AA Akkus mit 2550 mAh. Der dazu benutzte Batteriehalter kommt von einem bekannten Internetanbieter.

## Steuerung

Wie schon am Anfang gesagt wird der Unimog mit der aktuellen fischertechnik-Fernsteuerung gesteuert. Zum Einsatz kommen zwei Empfänger und der blaue Pultsender (Abb. 12).



Abb. 12: Unimog mit BT-Fernsteuerung

Für das Rundumblinklicht wird eine ältere fischertechnik-Blinkelektronik verwendet. Die Steuerung der Blink- und Warnblinkfunktion erfolgt über ein Schaltmodul von CTI [5] vom Typ PS4BW. Das Modul ist über ein Y-Kabel parallel zum Lenkservo angeschlossen.

Genutzt werden aktuell 7 Kanäle für den Antrieb, die Lenkung, den Zapfwellenmotor, den Hubtriebemotor, die zwei Steckdosen und einen Servoanschluss (hinten) für weitere Zusatzgeräte. Der achte Kanal steht als Reserve zur Verfügung.

## Maße und Gewichte

Der Unimog wiegt 2,65 kg, die Länge des Unimog beträgt 420 mm, die Breite liegt bei 190 mm und die Höhe beträgt 220 mm (ohne Blinklicht).

## Referenzen

- [1] [Unimog-Museum](#) in Gaggenau.
- [2] [Portalachse](#), wikipedia.de
- [3] [Tamiya-Carson Modellbau](#)
- [4] [Spiralfedern](#), www.conrad.de
- [5] [PS4BW](#), CTI-Modellbau

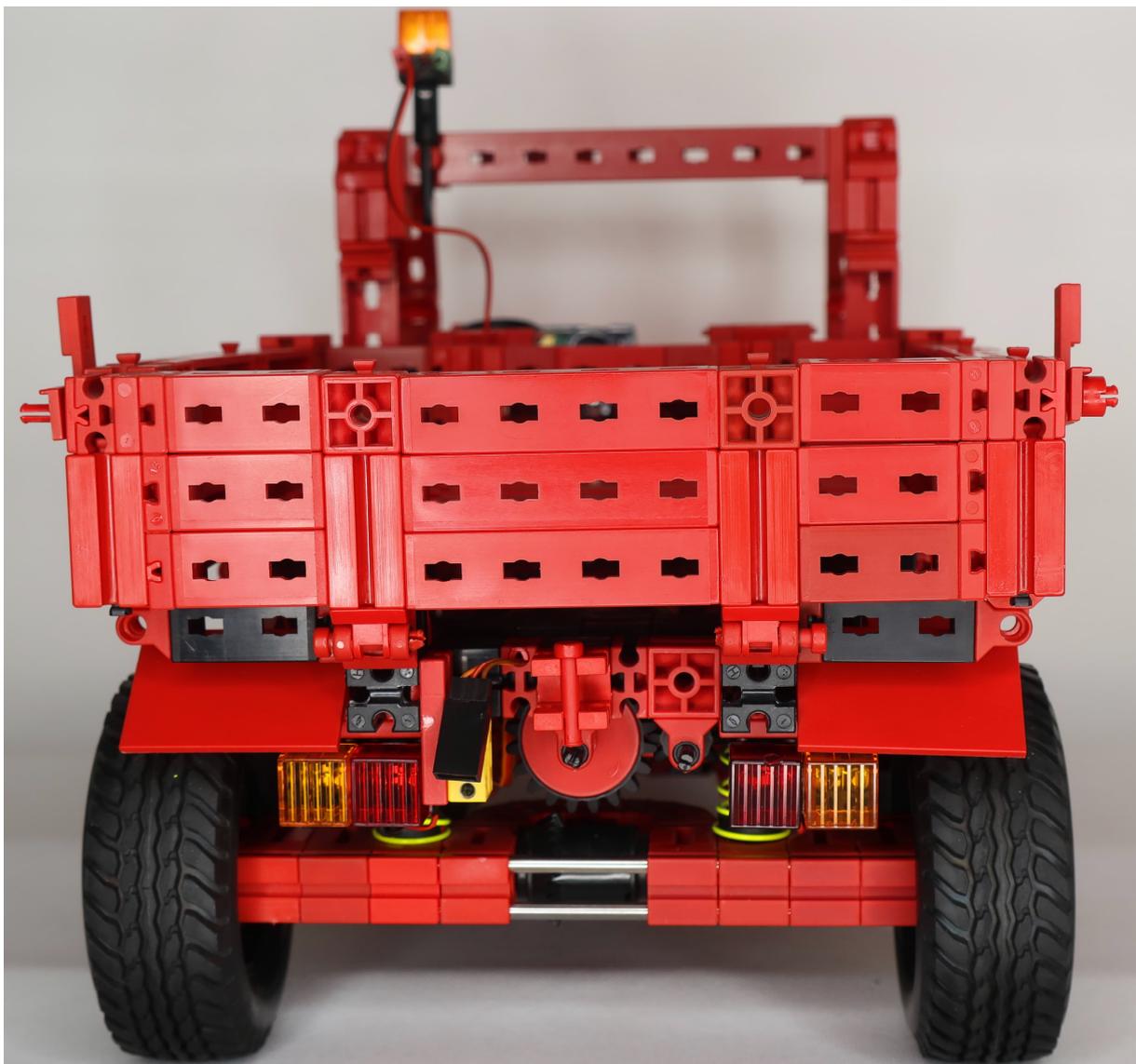


Abb. 13: Heck des Unimog

Modell

## Die fischertechnik-Magnetschwebbahn

Jeroen Regtien

*Der Beitrag gibt einen Überblick über Versuche zur Entwicklung einer Magnetschwebbahn mit fischertechnik, die sowohl die alten fischertechnik-Permanentmagnete als auch modernere Neodym-Typen benutzen.*

### Einleitung

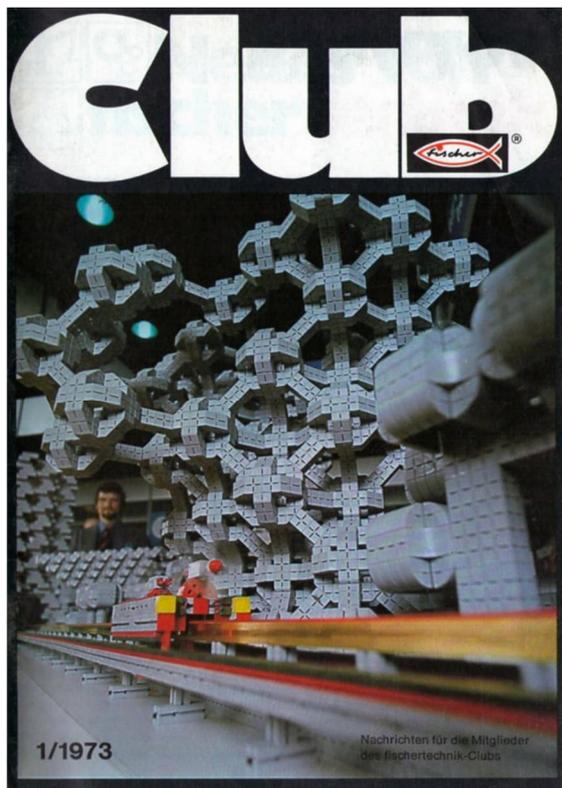


Abb. 1: Club-Heft 1973-1

Wer von den Oldtimern erinnert sich nicht an die Titelseite des Magazins des fischertechnik-Clubs von 1973 [1] mit der Magnetschwebbahn und der beeindruckenden futuristischen Stadt im Hintergrund, die nur aus fischergeometric-Steinen besteht, die damals zum ersten Mal vorgestellt wurden. In der Beschreibung des Titelblattes heißt es: „Dieses faszinierende Modell einer

Stadt der Zukunft wurde mit den fischergeometric-Kästen 1, 2 und 3 gebaut. Kombiniert mit der ersten Spielzeug-Magnetkissen-Bahn, einer fischertechnik-Konstruktion, eröffnet diese Landschaft eine Vision des Jahres 2000.“ Abgesehen von dieser Titelseite (Abb. 1) und dem Faltblatt in den Geometrickästen (Abb. 2) konnte ich keine detaillierteren Bilder dieser Magnetschwebbahn finden.

Allerdings gab es bereits drei Monate zuvor in Club-Heft 1972-4 ein Modell einer eingleisigen Magnetschwebbahn [2], Abb. 3, das vermutlich als Prototyp für das spätere Modell diente. Ich mochte die Herausforderung, sowohl Magnetschwebbahnmodelle als auch die Stadt der Zukunft nachzubauen, experimentierte aber auch ein wenig mit alternativen Konstruktionen. Dennoch habe ich versucht, mich bei der Auswahl der Lösungen so weit wie möglich in der Zeit von 1970 bis 1980 zu bewegen. Die Ergebnisse sind auch in einem YouTube-Video zusammengefasst [3].

Ich konstruierte verschiedene Modelle, die einfach begannen und schrittweise weitere Funktionen erhielten. Der erste Ansatz bestand darin, die grünen Permanentmagnete (31322) zu verwenden. Es gibt drei Typen davon, einen mit T-Riegel und zwei mit einem V-Riegel, die alle die gleiche Teilenummer haben (Abb. 4).



Abb. 2. Packungsbeilage der fischergeometric-Kästen

Bei diesen fischertechnik-Magneten handelt es sich um flache rechteckige Blöcke mit einer Größe von  $15 \times 30 \times 5$  mm. Eine flache Seite ist der magnetische Norden und die andere Seite der magnetische Süden. Dieser Typ wird als axial magnetisierter

Quadmagnet bezeichnet, der sich deutlich von den üblicherweise verwendeten Stabmagneten unterscheidet. Das Magnetfeld dieser flachen Magnete ist in Abb. 5 dargestellt. Ich wusste nie, welcher der Magneten „Norden“ oder „Süden“ ist. Nun,

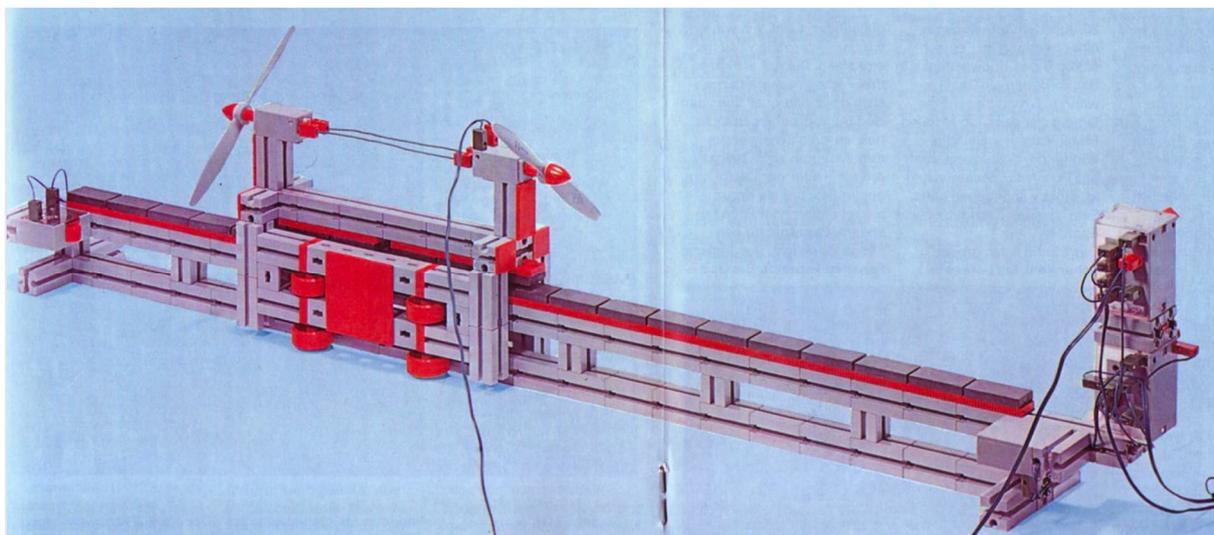


Abb. 3: Mono-Magnetschwebbahn (Club 1972-4)

mit dem Kompass ([36776](#)) des Hobbylabor-Bausatzes ([30626](#), [30850](#)) lässt sich das leicht herausfinden. Der rote Magnet zieht den Südpfeil des Kompasses an, sodass der rote Magnet „Norden“ ist. Die Konvention ist, dass Pfeile auf den Magnetfeldlinien von Norden nach Süden zeigen.



Abb. 4: Grüne T-Riegel und V-Riegel Permanentmagnete ([31322](#))

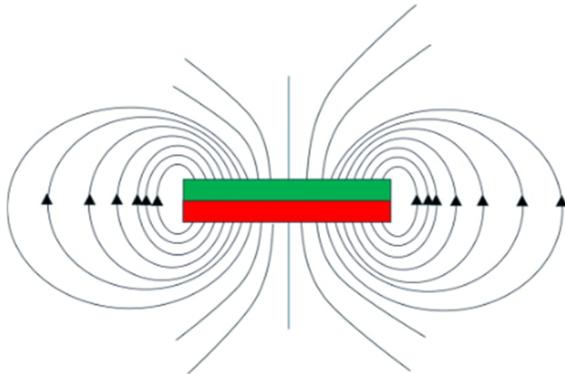


Fig 5. Magnetfeldlinien für axiale Blockmagnete

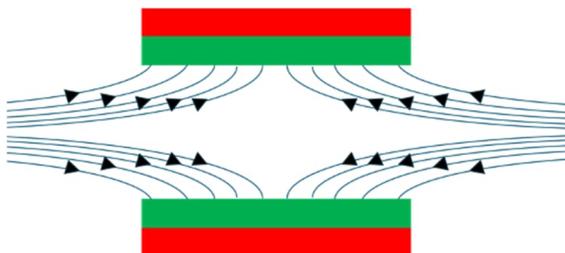


Fig 6. Magnetfeldlinien für zwei abstoßende axiale Blockmagnete

Das Prinzip sieht einfach aus: Man konstruiere eine lineare Schiene mit Magneten, verwende Magnete gleicher Polarität an der Unterseite des Schlittens – und er sollte schweben. Ja, die Magnete stoßen sich gegenseitig mit zunehmender Stärke ab, wenn die Magnete einander näherkommen (Abb. 6), aber sie werden sich auch seitwärts bewegen wollen, weg vom dichten

Magnetfeld in Bereiche mit geringerer Stärke und bevorzugt zu dem Teil des Magneten mit entgegengesetzter Polarität.

Wir müssen daher die seitlichen Bewegungen der Magnete so einschränken, dass der Wagen mit Magneten, aber auch mit so wenig Reibung wie möglich über dem Gleis schwebt, damit wir den Wagen mit einer geringen Kraft hin und her bewegen können. Dies erwies sich als die nächste Herausforderung.

### Einspurig – grüne Magnete

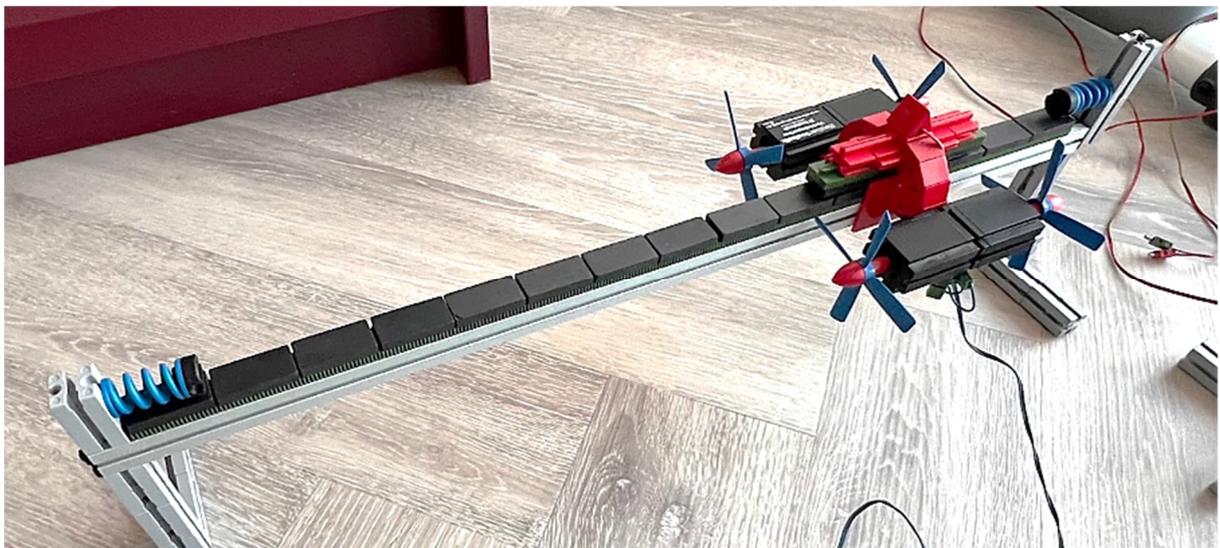
Der erste Prototyp war einfach. Auf eine 50-cm-Alu-Profilstange wurden etwa 16 grüne Magnete geschoben. An den Enden war nur eine Feder. Der Balken wurde mit einigen Pylonen vom Boden abgehoben.

Die Konstruktion des Wagens war aufwändiger, und es wurden mehrere Methoden ausprobiert. In der Mitte jedes Winkels befand sich eine U-förmige Halterung, die kopfüber über der Schiene positioniert war, mit einem oder mehreren grünen Magneten an der Unterseite des U. Zwei oder mehr Platten wurden mit den Beinen des U verbunden, um die Bewegung zur Seite zu verhindern. Das Gewicht des Wagens, insbesondere der Motoren, drückten den Wagen weit genug nach unten, so dass eine Art Gleichgewicht erreicht wurde. Die Herausforderung dabei war, dass die Platten nah genug am Alu-Profil sein mussten, um diese seitliche Bewegung zu vermeiden, aber auch einen kleinen Spalt ließen, um die Reibung zu minimieren. Der Antrieb des Wagens wurde durch den Einbau von Motoren mit Propellern erreicht. Zuerst wurden die Propeller über der Schiene montiert, aber das lieferte zu viel Drehmoment, der Wagen neigte sich zu stark nach vorne. Dann wurden die Motoren tiefer montiert, einer auf jeder Seite (Abb. 7).

Kürzere Propeller ermöglichen es, die Motoren nahe an der Einschienenbahn zu montieren, bieten jedoch einen geringeren Vortrieb als die längeren Propeller. Dies



*Abb. 7: Erster Prototyp mit zwei Motoren und automatischer Richtungsumkehr mit Minischaltern und einem E-Tec-Modul*



*Abb. 8: Zweiter Prototyp mit vier Motoren – U-förmige Halterung mit Platten*

erwies sich immer noch als zu instabil, so dass auf einen Schlitten mit vier Motoren umgestellt wurde: zwei auf jeder Seite, die seitlich an der Magnetschiene montiert waren (Abb. 8 und 9).

Dieses Modell erwies sich als vielversprechend, so dass es eine Grundlage gab, um mit einer längeren Spur, einem größeren Schlitten und einer Elektronik zur Steuerung der sich wiederholenden Bewegung fortzufahren. Da mir die grünen Magnete ausgingen, bat ich die Mitglieder des fischertechnikclub NL mit Erfolg, mir grüne Magnete zu leihen.

## Lehren aus den ersten Prototypen

Die Experimente mit den Prototypen lieferten einige wichtige Lektionen darüber, was zu tun und was zu vermeiden ist. Diese Lektionen sind (in keiner bestimmten Reihenfolge):

***Mittelpunkt der Schwerkraft.*** Da der Wagen stabil über die Magnetschiene schweben muss, die durch Konstruktionsplatten an beiden Beinen des U-Profils an Ort und Stelle gehalten wird, ist ein tieferer Schwerpunkt wichtig. Daher sollten Motoren so niedrig wie möglich angebracht werden, d. h. im Wesentlichen an der Seite

der Magnetschiene. Aufgrund des erforderlichen Gleichgewichts sollte der Motor jedoch auf jeder Seite der Schiene gespiegelt werden. Oder, wenn sich die Motoren oben befinden, muss sich unten unter der Magnetschiene ein Gegengewicht befinden.

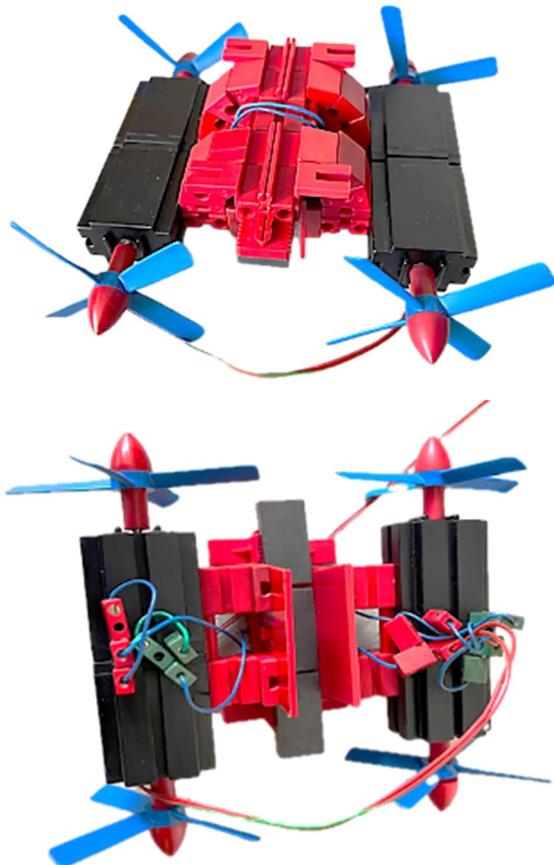


Abb. 9: Ansicht des einspurigen Wagens mit vier Motoren von oben und unten

**Drehmoment.** Wenn beide Motoren am gleichen Ende des Wagens positioniert sind, entsteht bei voller Drehzahl ein Drehmoment, das die Vorderseite des Wagens nach unten und das hintere Ende ohne Motoren nach oben zieht. Wenn der Wagen zu schwer ist, berühren die Magnete des Wagens die Magnete der Schiene, und die gleichmäßige Bewegung stoppt. Dies kann umgangen werden, indem Motoren auf jeder Seite des Wagens angebracht werden. Es gibt ein zweites seitliches Drehmoment, das dadurch verursacht wird, dass der Wagen dem Magnetfeld der Schienen entkommen will. Der Wagen muss daran

gehindert werden, sich seitwärts zu bewegen, was durch Führungen an der Seite des U-Profils erreicht wird, jedoch verursacht dieser Kontakt zwischen den Führungen und der Schiene Reibung.

**Gewicht.** Aufgrund der relativen Schwäche der Magnete vom Typ [31322](#) kann das Gewicht des Wagens zu einem Problem werden. Vier Motoren sind bereits ein großes Gewicht; das Hinzufügen von Batterien und Elektronik (um den Wagen ohne externe Stromversorgung frei bewegen zu können) ist sehr schwer zu erreichen.

**Magnetstärke.** Die grünen Permanentmagnete sind recht schwach; das begrenzt das maximale Gewicht des Wagens. Meiner Erfahrung nach sind mindestens drei bis vier Magnete erforderlich, um den Wagen anzuheben. Die Verwendung von zwei Magneten im Wagen ist zu instabil, um eine zuverlässige Leistung zu erzielen. Die Verwendung stärkerer Magnete als Alternative ist einen Versuch wert.

**Größe des Propellers.** Wenn die Motoren an der Seite des Wagens angebracht sind, ist der Abstand aufgrund von Stabilitätsproblemen begrenzt. Daher waren kürzere Propeller für seitlich eingebaute Motoren notwendig.

**Reibung.** Das bereits erwähnte seitliche Drehmoment, zu enge Führungen an den Seiten der Schiene oder kleine seitliche Verlängerungen aufgrund einer unvollkommenen Montage der Magnete auf der Bodenplatte erzeugen eine Reibung, die eine reibungslose Bewegung des Wagens verhindert. Diese kleinen Effekte können den Unterschied zwischen einem leichtgängigen Wagen, der beschleunigt, oder einer „hinkenden“ Bewegung mit Stopps und Anfahrvorgängen ausmachen.

**Stromversorgung.** Bei kürzeren Gleisen genügt eine Leitung, die sich mit dem Wagen hin und her bewegt. Bei längeren Strecken wird dies zum Problem. Studiert man die beiden oben genannten Fotos des

fischertechnik-Originals genau, so scheinen die Seiten des Alu-Profiles mit einer metallischen Verbindung oder einem Klebeband versehen zu sein. Könnte es sich dabei um ein Material handeln, das Strom leitet? In diesem Fall bräuchte man eine reibungsarme elektrische Gleitverbindung in Form eines Märklin-Schleifers, wie er unter Lokomotiven für die alten Märklin-3-Schienen verwendet wird. Die fischertechnik-Federkontakte ([31306](#), siehe auch [31311](#)) würden sich wahrscheinlich nicht eignen, da diese als Punktkontakt zu viel Reibung erzeugen. Obwohl es großartig wäre, diese Art von elektrischer Verbindung zu haben, habe ich mich angesichts der begrenzten Anzahl von Magneten und der damit begrenzten Länge der Schiene für die Kabelversion entschieden, bin aber immer noch von der kabellosen Variante fasziniert und möchte eines Tages eine Lösung dafür finden.

Angesichts dieser Erkenntnisse und des Wunsches, einen größeren Wagen zu

bauen, wurden zwei alternative Wege eingeschlagen: der erste mit stärkeren Magneten und der zweite mit dem Design auf den Fotos von 1973 und einer Doppelspur, die allerdings noch mehr Magnete benötigte.

## Vortrieb des Propellers

Da die Trial-and-Error-Methode, bei der verschiedene Arten von Propellern verwendet wurden, zu unerwarteten Ergebnissen führte, war es wichtig zu messen, welcher Propellertyp und welche Konfiguration den größten Vortrieb lieferte. Es war daher notwendig, die Kraft zu messen, die von einem rotierenden Propeller ausgeübt wird.

Das fischertechnik-Tensiometer (Federkraftmesser [30325](#) bzw. [35836](#)) ist ein großartiges Werkzeug, um dies auf der Grundlage des Hookeschen Gesetzes zu tun. Ich hatte ein paar herumliegen, habe sie aber nie ernsthaft in einem Modell benutzt, also war dies eine gute Gelegenheit. Sie wurden als Zusatzpackung ft-25 verkauft und mit zwei Federn geliefert, eine für 0-100 Gramm und

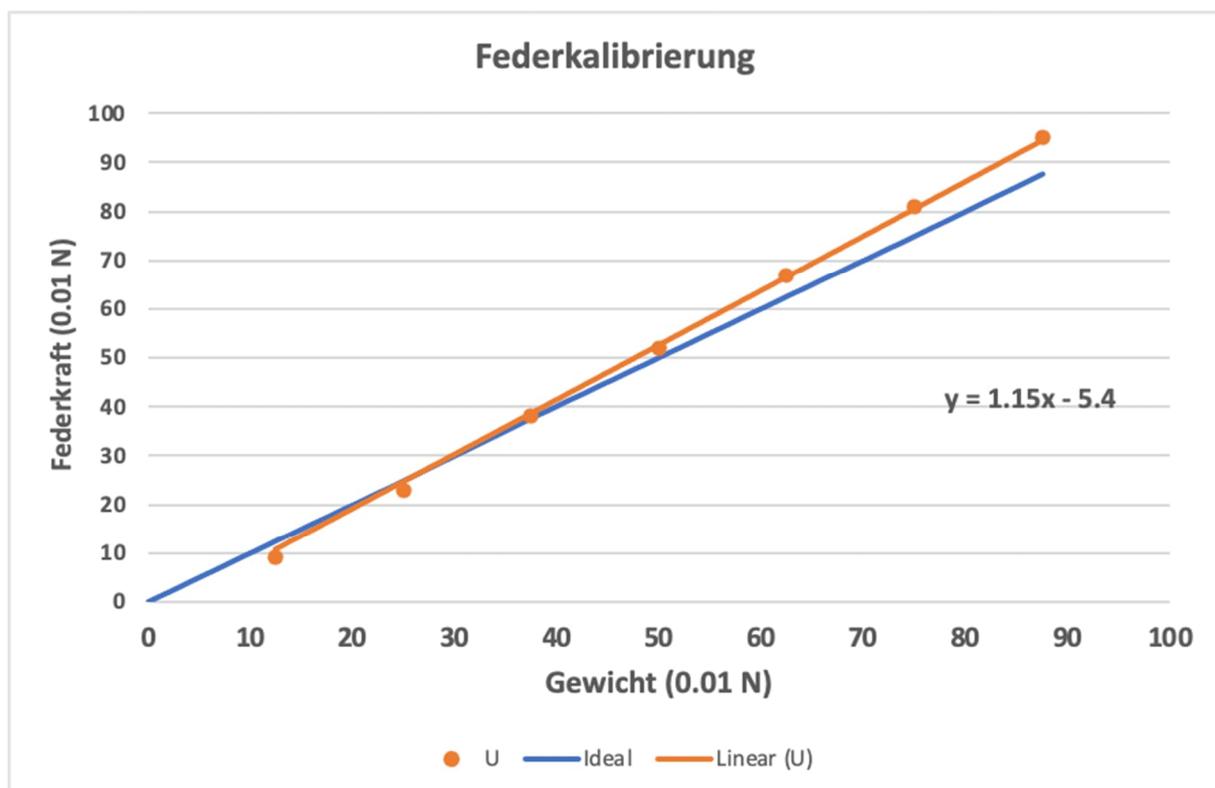


Fig 10. Kalibrierung des Tensiometers [35836](#)

eine für 0-1000 Gramm. Für relative Messungen kann das Tensiometer so verwendet werden, wie es ist; für absolute Messungen ist es wichtig, das Tensiometer zu kalibrieren, da klar war, dass ich bereits etwas Kraft aufwenden musste, bevor sich der Propeller in Bewegung setzte.



Abb. 11: Tensiometer-Messaufbau

Es wurde ein Prüfstand erstellt, an dem das Tensiometer aufgehängt wurde. Dann wurden nacheinander Gewichte von 12,5 Gramm hinzugefügt und der Messwert des Tensiometers registriert. Das Ergebnis der Kalibrierung ist in Abb. 10 visualisiert, und es ist erkennbar, dass es vom Hookeschen Gesetz abweicht – aber wir sehen glücklicherweise eine schöne gerade Linie,

sodass wir sie für unsere Messungen verwenden können.

Dann wurde ein S-Motor an das Tensiometer angeschlossen (Abb. 11) und es wurden zwei Experimente durchgeführt. Zuerst wurde die Beziehung zwischen der Propellerkraft und der Spannung über dem Motor bestimmt. Mit einem Labornetzgerät wurde die Spannung zwischen 7 und 13 Volt variiert und der entsprechende Strom gemessen. Mit dem Tensiometer wurde die vom Propeller ausgeübte Kraft gemessen.

Die Ergebnisse sind in Abb. 12 zu sehen. Die lineare Beziehung zwischen Spannung und Strom ist eindeutig, die Beziehung zwischen Propellerkraft und Spannung weicht vom linearen Verlauf ab und ist leicht logarithmisch. Die verwendete Propellervariante war die mittlere aus Abb. 13. Es wurden verschiedene S-Motoren verglichen; die Unterschiede waren jedoch vernachlässigbar.

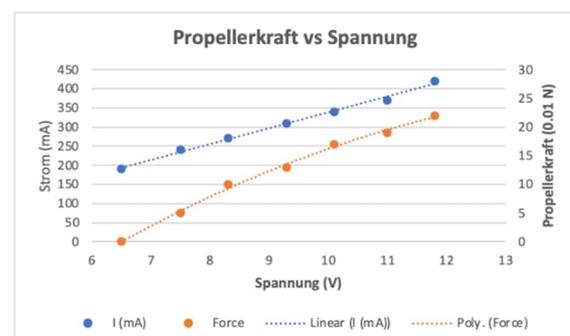


Abb. 12: Propellerkraft in Abhängigkeit von der Spannung

Um die im weiteren Verlauf dieses Beitrags beschriebenen Modelle flüssig laufen zu lassen, wurde eine Versorgungsspannung von weit über 9 Volt benötigt.

Das zweite Experiment bestand darin, verschiedene Propellerkonfigurationen zu vergleichen, um festzustellen, welche Konfiguration die höchste Propellerkraft ergibt. Das Gleichgewicht, der Propellerauftrieb und der Propellerabtrieb wurden gemessen und die Ergebnisse in Abb. 13 dargestellt.

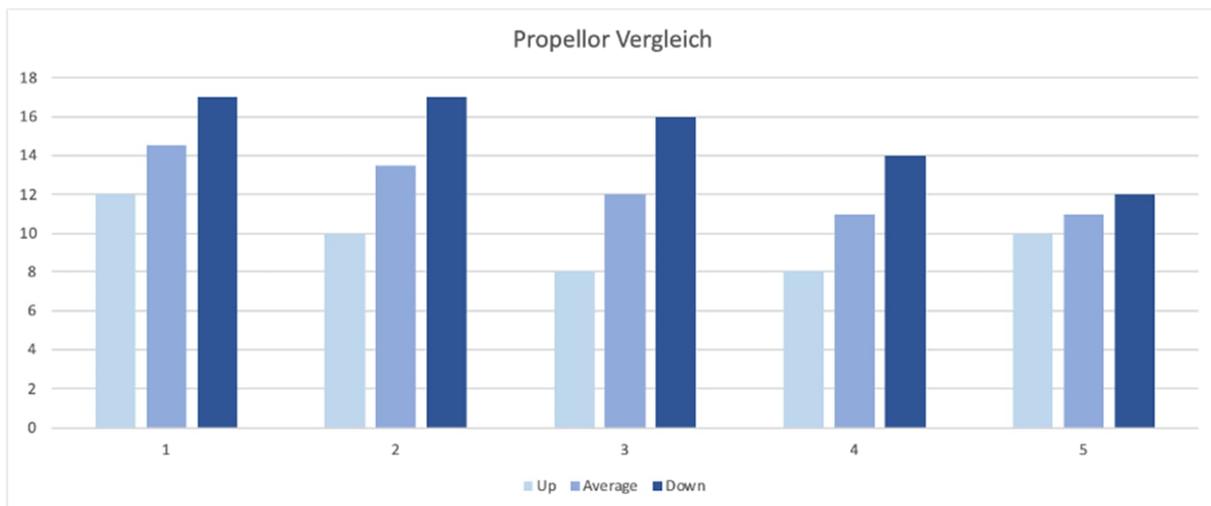


Abb. 13: Die gemessenen Propellerkonfigurationen

Der leistungsstärkste Propeller ist der 120-mm-Zweiblatt-Propeller (32247). Der nächstbeste ist die 100-mm-Version mit der gleichen Teilenummer, gefolgt von der Doppelkonfiguration der 100-mm-Version. Danach kommt die kurze Version mit vier Flügeln (36337) und schließlich die Doppelkonfiguration mit acht Propellerblättern. Überraschenderweise schneiden die Doppelkonfigurationen schlechter ab als die einzelnen Propeller, was ich nicht erwartet hatte.

### Stärke des Magneten

Es wäre interessant, mehr über die Stärke der fischertechnik-Magnete zu erfahren. Mit dem gleichen Tensiometer konstruierte ich einen Testaufbau, bei dem die Kraft zum Trennen der Magneten in Abhängigkeit vom Trennungsabstand gemessen wurde: Ein grüner und ein roter Magnet wurden mit unterschiedlich dicken Nichteisen-Magnet-

abstandshaltern dazwischen getrennt, um das Magnetfeld nicht zu stören. Durch sehr langsames Ziehen am anderen Ende des Tensiometers wurde der Moment bestimmt, in dem sich der Magnet löst. In diesem Augenblick ist die Zugkraft gleich der Magnetkraft für diesen Abstand plus der Schwerkraft des beweglichen Magneten und der verbundenen Teile (Abb. 14).

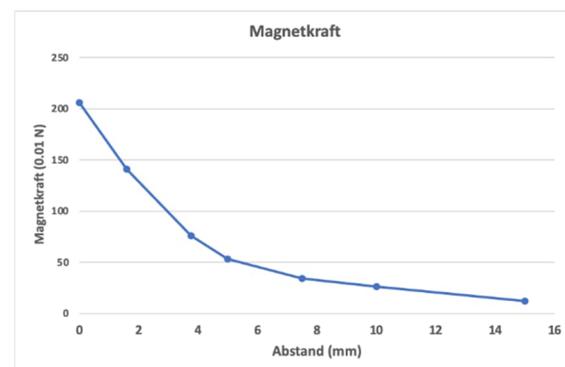


Abb. 14: Kraft zum Lösen des Magneten in Abhängigkeit von der Entfernung

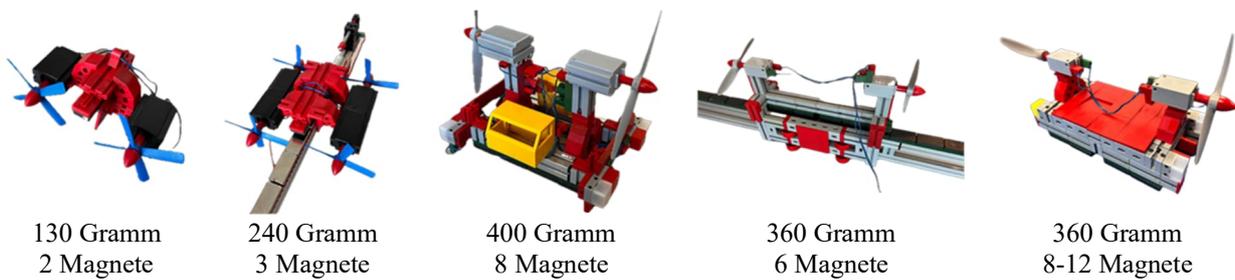


Abb. 15: Unterschiedliche Waggons, die zum Einsatz kamen

Aus diesem Experiment lässt sich ableiten, dass ein einzelner Magnet etwa 200 Gramm heben kann. Daraus leiten wir ab, dass die Abstoßungskraft für zwei gegenüberliegende Magnete in Richtung und Stärke genau umgekehrt ist (wenn das nicht gelten würde, gäbe es sonst eine Möglichkeit, ein Perpetuum Mobile zu bauen). Ein einzelner Magnet kann also 200 Gramm anheben und abstoßen. Da wir einen Abstand von etwa 3-5 mm benötigen, um zu vermeiden, dass der Wagen die Schienen berührt, sollten wir die Masse des Wagens auf etwa 75 g pro Magnet begrenzen, wie sich aus Abb. 14 ableiten lässt. Mit einem S-Motor mit 27 g, einem Magneten mit 12 g und einem einzelnen 30-mm-Stein mit einem Gewicht von ~5 g könnten einige größere Wagen mit einem Gewicht von mehreren hundert Gramm gebaut werden, indem die Anzahl der Magnete unter den Wagen erhöht wird (Abb. 15).

### Alte Magnete, einspurig

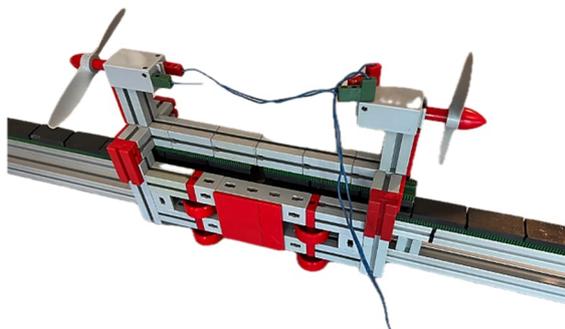


Abb. 16: Rekonstruierter Wagen aus dem Clubheft 1972-4

Die Rekonstruktion des im Clubheft 1972-4 [2] beschriebenen Modells ist in Abb. 16 dargestellt. Dieses Modell bestätigte erneut

einige der Lektionen in Bezug auf die Reibung: Anfangs bewegte sich der Wagen langsam, um die Reibung der acht Räder an der Seite zu überwinden. Mit einigen Anpassungen wurde die Geschwindigkeit akzeptabel, wie im Video zu sehen ist [3].

### Moderne Magnete, einspurig

Wäre es angesichts der relativen Schwäche der fischertechnik-Permanentmagnete vielleicht besser, moderne Neodym-Magnete zu verwenden? Dazu klebte ich zwei Magnete auf je eine Zahnstange 61 (31053) als Basis und montierte diese wiederum auf einem Alu-Profil (Abb. 17).

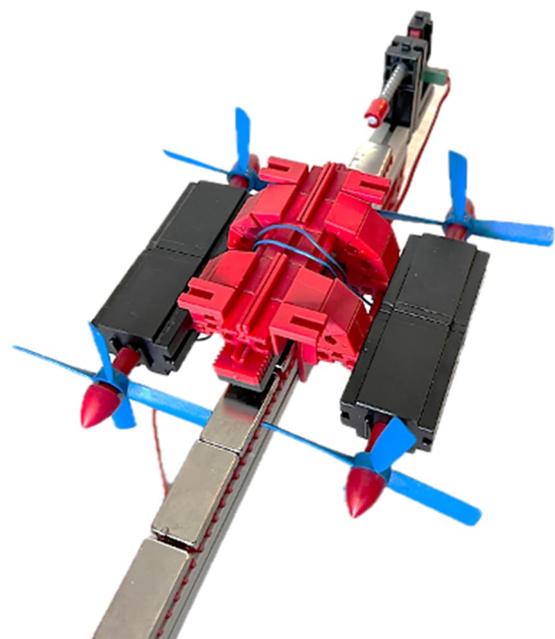


Abb. 17: Neodym-Axialmagnete auf Zahnstangen (31053)



Abb. 18: Doppelspuriger Prototyp

Die Stärke der Magnete wurde zum Problem, da sie sich gegenseitig so stark abstoßen, dass es nahezu unmöglich war, ein schwimmendes Gleichgewicht herzustellen. Daher ersetzte ich die Magnete unter dem Waggon durch rote Permanentmagnete von fischertechnik. Nach einigen Feinabstimmungen fing dieses Modell an, sich sehr schnell zu bewegen – so schnell, dass es schwierig wurde, den Wagen am Ende der Strecke anzuhalten. Es wäre jedoch großartig, mit dieser Art von Strecke eine geschlossene Kreisbahn zu bauen.

### **Alte Magnete – doppelspurig**

Nach eingehender Untersuchung der Fotos aus dem Jahr 1973 gelang es, die Doppelspur und ihren Wagen zu rekonstruieren (Abb. 18, 19). Das Modell besteht aus zwei parallelen Schienen im Abstand von 45 mm, auf denen die Magnete angebracht

sind. In der Mitte und etwa 22,5 mm hoch ist eine Mittelschiene platziert, die den Wagen daran hindert, sich seitlich zu bewegen. Die Schienen sind in regelmäßigen Abständen miteinander verbunden und die obere Schiene muss an der Seite frei von Bauteilen sein, damit das umgekehrte U des Wagens mitgleiten kann. Diese Konstruktion reagierte noch sehr empfindlich auf kleine geometrische Abweichungen: Die mittleren Schienen müssen exakt mittig liegen, um zu vermeiden, dass der Wagen an einer Bewegung gehindert oder zumindest stark verlangsamt wird.

Es wurden zwei Wagen gebaut (Abb. 19), einer auf der Grundlage der früheren Prototypen und eine Rekonstruktion des Wagens von der Titelseite des Clubhefts und der Geometric-Broschüre [1, 2]. Beide bewegten sich gut, aber die neuere Version machte es besser.

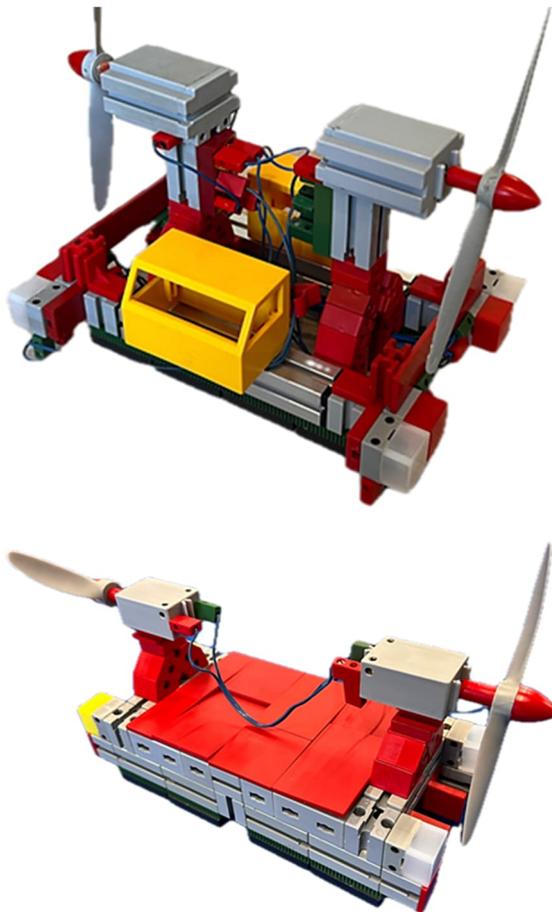


Abb. 19: Zwei zweigleisige Waggons,  
das Original unten

## Endanschlag

Da der Wagen nach Überwindung der Anfahrreibung eine ziemliche Geschwindigkeit entwickeln kann, wird ein Stoppmechanismus benötigt, der den Wagen relativ sanft abbremsst. Ein harter Anschlag würde die Teile am Wagen oder den Endanschlag beschädigen. Der erste Versuch war eine Konstruktion mit einer Feder, die sich aber als zu elastisch erwies; der Wagen würde ein paar Längen zurückfedern. Ein geschlossener Pneumatikzylinder tat dasselbe. Nach Gesprächen mit Arjen Neijzen wurde eine Konstruktion ausprobiert, bei der die Zylinder auf jeder Seite des Gleises mit einem Schlauch verbunden sind (Abb. 20). Ein Halt an einem Ende des Gleises würde also die Zylinder am anderen Ende des Gleises herausschieben, so dass sie bereit wären, den Wagen dort aufzu-

nehmen. Um richtig zu funktionieren, muss sich der Wagen mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, damit er am Anschlag immer den gleichen Impuls hat. In der Realität passiert das selten, aber das Prinzip funktioniert viel besser als die Feder, und so wurde es zu einem festen Bestandteil des Modells.

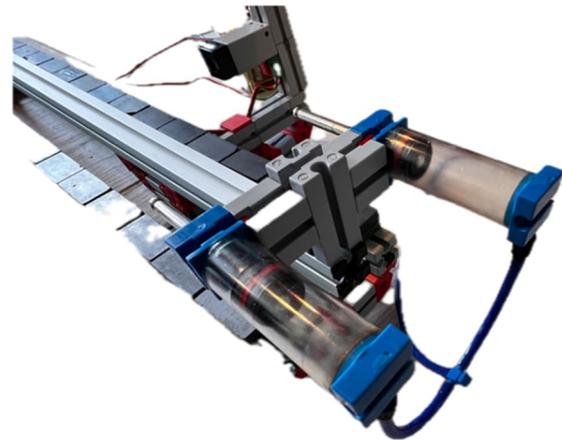


Abb. 20: Endanschlag und Puffer

## Elektronische Steuerung und Stromversorgung

Die Idee war, den Wagen automatisch auf dem Gleis auf und ab fahren zu lassen. Am einfachsten war es, die Weinbergbahnschaltung mit dem E-Tec-Modul ([108227](#)) anzuwenden. Dieses Modul liefert jedoch 1-1,5 V weniger Spannung als die Versorgungsspannung, sodass die Motoren in diesem Fall nicht genügend Leistung erhielten. Ich bin daher auf einen Nachbau der Schaltung mit Relais umgestiegen; so bekommen die Motoren die volle Spannung. Die Weinbergbahnschaltung wurde an anderer Stelle in der ft:pedia [4] ausführlich beschrieben und es gibt mehrere YouTube-Videos vom selben Autor [5].

Nachdem ich diese grundlegende Hin- und Her-Funktion reibungslos zum Laufen gebracht hatte, wollte ich an jedem Ende der Strecke eine Verzögerung hinzufügen. Das war mit den guten alten Silberlingen möglich.



Abb. 21: Silberling-Steuerung

Unter Verwendung von Sensoren (Fotosensor oder Minischalter) für die Signalkunft, zwei Grundbausteinen zur Umwandlung des Sensorsignals in ein logisches Signal, einem Flipflop als Speicher mit Set/Reset durch die beiden Sensoren, zwei Monoflops zum Hinzufügen von Verzögerungen und einigen Relais wurde ein funktionierendes Steuerungssystem mit benutzerdefinierten Verzögerungen an jedem Ende geschaffen (Abb. 21). Ich habe einen Kommentar von Ad van der Weiden erhalten, dass man keine zwei Monoflop-Ausgänge anschließen sollte – das sei eine Abweichung von der üblichen Praxis, und ich sollte stattdessen ein OR-Gatter verwenden. Es hat aber trotzdem funktioniert. Es gab jedoch ein Problem mit den Umgebungslichtverhältnissen. Da ich an beiden Enden der Gleise Fotozellen verwendete, gab es Fälle, in denen starke Sonneneinstrahlung

oder Dunkelheit unterschiedliche Einstellungen der Grundbausteine erforderten.

Dann die Stromversorgung: Wie treibt man den Wagen auf einer langen Magnetschiene an? Wie bereits erwähnt, war das Hinzufügen von Batterien/Akkus und Elektronik aufgrund des zusätzlichen Gewichts und der Notwendigkeit, eine gewichtsausgeglichene Plattform entlang der beiden horizontalen Schienen zu schaffen – ein Ding der Unmöglichkeit. Bei der Verwendung eines Kabels muss dieses mitgeschleppt werden, mit allen Risiken der Reibung oder des Steckenbleibens, und wenn die Schiene mehr als zwei Meter lang ist, wird dies zu einem echten Problem. Bei den verwendeten Gleislängen war eine Kabellösung gerade noch zu bewältigen. Die Spannung wurde jedoch auf 11-12 V erhöht, da dies für einen reibungslosen Betrieb der Wagen erforderlich war.

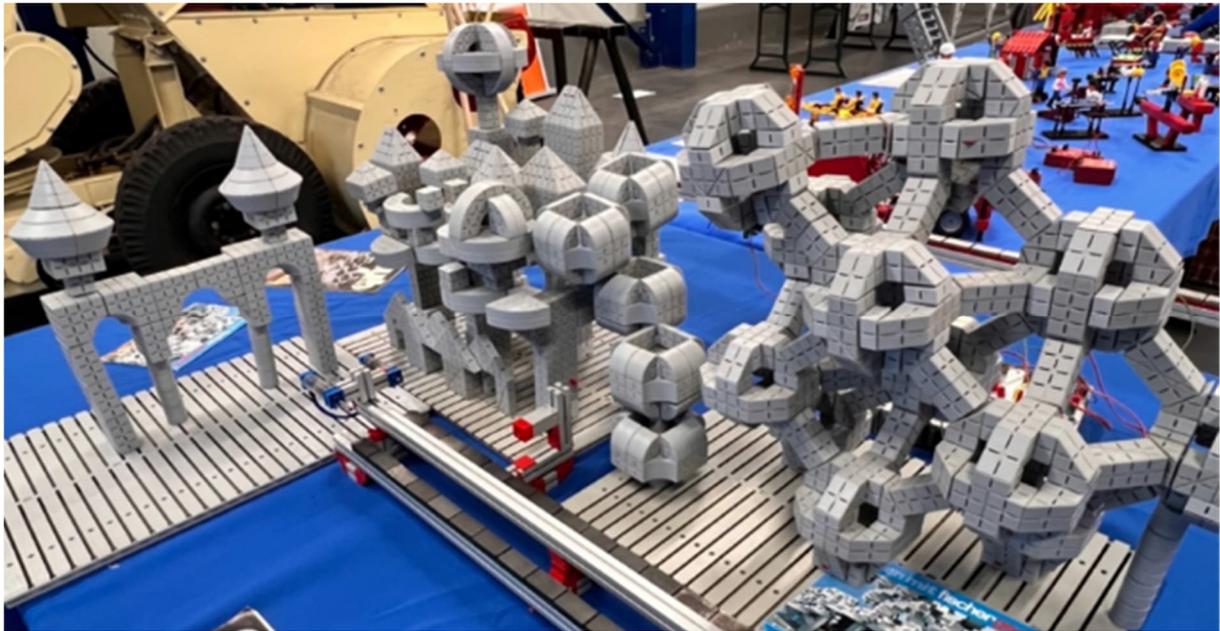


Abb. 22: Wiederaufbau der Stadt der Zukunft

## Stadt der Zukunft

Die Nachbildung der Magnetschwebbahn wäre nicht vollständig ohne die Stadt der Zukunft, die auf den oben genannten Fotos so prominent zu sehen ist. Glücklicherweise hatte ich eine ganze Menge Geometric-Bausteine aus früheren Käufen, die ich zur Erstellung einiger Vögel verwendet habe [7], und ich begann mit der Konstruktion am Beispiel der Bilder. Mir gingen schnell die Steine aus, um die abgerundeten Module nachzubauen, aber ich konnte einige der quadratischen und abgewinkelten Module erstellen. Für den Rest der Steine habe ich meine Fantasie benutzt, um so viele haus- und gebäudeähnliche Strukturen wie möglich zu schaffen. Die Ergebnisse sind in den Abb. 22 bis 24 zu sehen.

Während des Baus gingen mir die roten Geometric-Verbinder aus und ich beschloss, sie (sowie einige zusätzliche rechteckige geometrische Blöcke, die ich benötigte) in 3D zu drucken (Abb. 25). Die STL-Dateien sind auf Thingiverse für Interessierte verfügbar [8].



Abb. 23: Wiederaufbau der Stadt der Zukunft

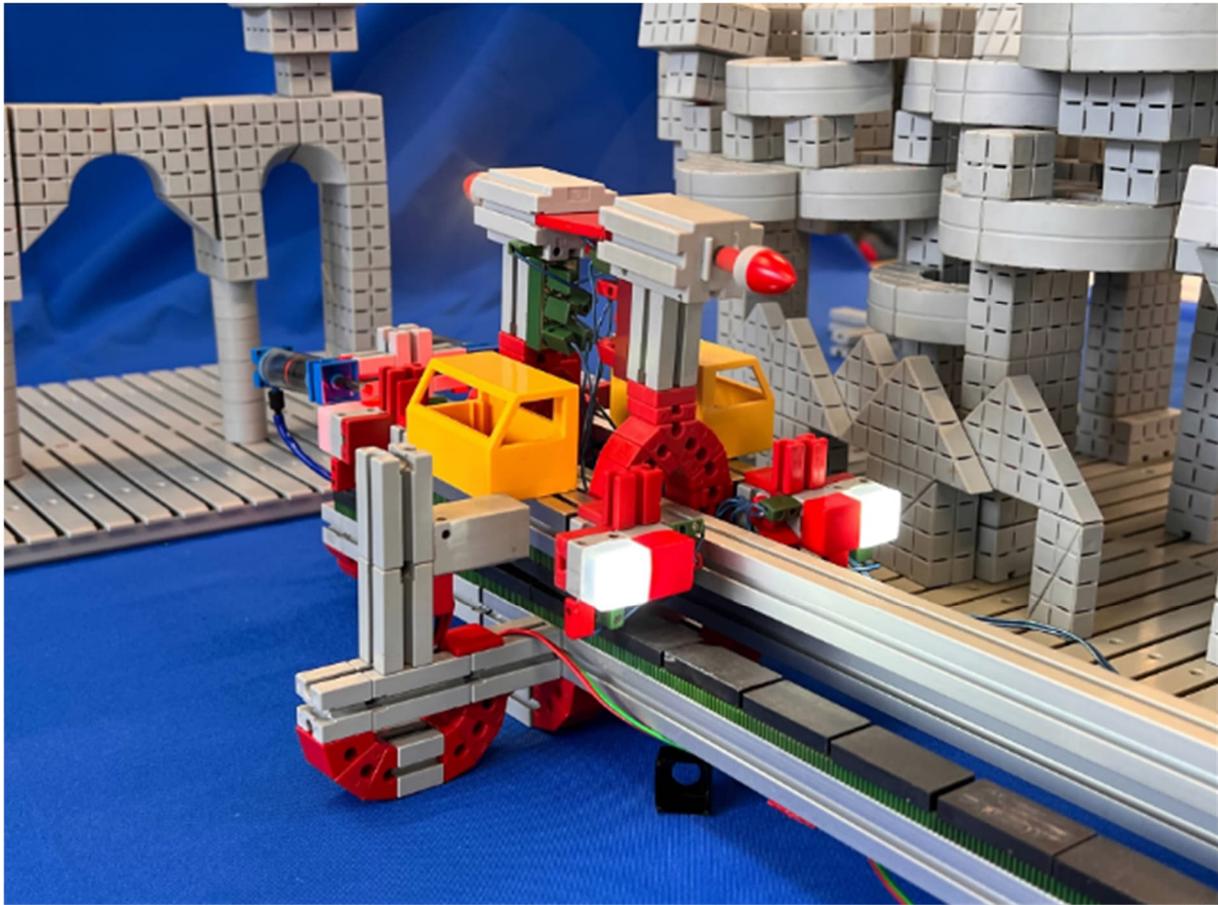


Abb. 24: Wiederaufbau der Stadt der Zukunft

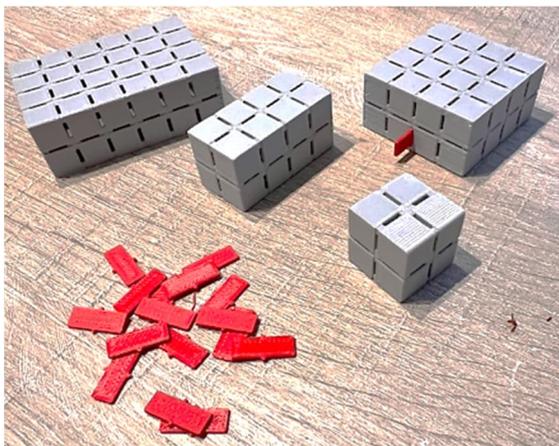


Abb. 25: 3D-gedruckte Geometric-Blöcke und -Verbinder

## Fazit

Dieses Projekt hat Spaß gemacht und ermöglichte eine Reihe von Untersuchungen zu den physikalischen Eigenschaften von fischertechnik-Magneten und -Propellern sowie elektronischen Steuerungs-

systemen. Leider musste ich die Strecke abbauen, da ich die grünen Magnete, die ich mir geliehen hatte, zurückgeben musste, aber die Fotos, dieser Beitrag, das Video und das positive Feedback, das ich in Sinsheim und Schoonhoven erhalten habe, sind eine bleibende Erinnerung an dieses lustige Projekt.

## Quellen

- [1] Fischer-Werke: *Club 1/1973*. Auf [ft-datenbank.de](http://ft-datenbank.de).
- [2] Fischer-Werke: *Club Dezember '72*. Auf [ft-datenbank.de](http://ft-datenbank.de), S. 12-13.
- [3] Jeroen Regtien: *fischertechnik Maglev Track*. Auf [YouTube](https://www.youtube.com/watch?v=...), 2024.
- [4] Stefan Falk: *Motorsteuerungen (7): Weinbergbahn-Schaltung mit Relais*. [ft:pedia 1/2021](http://ft:pedia 1/2021), S. 75–79.

- [5] Stefan Falk: *fischertechnik: Weinbergbahn-Schaltung mit Electronics Modul*. Auf [YouTube](#), 2020.
- [6] Stefan Falk: *fischertechnik: Weinbergbahn-Schaltung mit Relais*. Auf [YouTube](#), 2021.
- [7] Jeroen Regtien: *Geometric Birds*. Auf [YouTube](#), 2023.
- [8] Jeroen Regtien: *fischer Geometric blocks*. Auf [Thingiverse](#), 2024.

Physik

## Abstandsmessung mit Magnetostriktion

Florian Bauer

*In diesem Beitrag wird untersucht, wie eine absolute Positionsmessung auf Basis magnetostriktiver Effekte realisiert werden kann. Zunächst werden das physikalische Messprinzip, der elektromechanische Aufbau und die erforderliche Elektronik detailliert vorgestellt. Anschließend wird eine praktische Anwendung in Form einer Positionsregelung für eine Linearachse aus Fischertechnik präsentiert.*

### Einführung

Bei dem parallelen Tripteron, welches ich in meinem letzten ft:pedia-Beitrag [1] vorgestellt habe, wurden die Positionen der Aktuator-Schlitten mit Hilfe von optischen Reflex-Sensoren gemessen. Im Ausblick hatte ich vorgeschlagen, die Positionsmessung mittels eines selbstgebauten magnetostriktiven Wegaufnehmers zu versuchen.

In der Industrie erfreuen sich diese Sensoren großer Beliebtheit, da sie die absolute Messung einer Position mit hoher Auflösung ermöglichen und zudem berührungsfrei und damit verschleißfrei arbeiten. Abb. 1 zeigt einen solchen Wegaufnehmer der Fa. Temposonics [2].



*Abb. 1: Industrieller magnetostriktiver Wegaufnehmer der Fa. Temposonics für Hydraulikanwendungen mit RS-422 Interface. Zum Betrieb wird noch ein Positionsmagnet benötigt, der über den Sensor-Stab gleitet.*

Ich wollte unbedingt ausprobieren, ob man so einen Wegaufnehmer selber bauen kann. In den Wikipedia-Artikeln [3] und [4] ist das zugrundeliegende Prinzip beschrieben. Und es liest sich so, als ob es eigentlich ganz einfach wäre. In einer Veröffentlichung [17] fand ich einige wichtige Parameter für den Aufbau. Also ran ans Werk!

### Was ist Magnetostriktion?

Unter Magnetostriktion versteht man einen magnetischen Effekt, bei dem sich die mechanischen Dimensionen von bestimmten – vor allem ferromagnetischen – Materialien unter Einfluss eines magnetischen Feldes ändern. Neben speziell dafür designeten Legierungen wie Terfenol-D [5] oder Galfenol [6] zeigen unter anderem auch Nickel und Nickel-Eisen-Legierungen magnetostriktives Verhalten.

Die Magnetostriktion ist unter anderem für folgende Effekte verantwortlich:

- *Joule-Effekt:* Änderung der Materialdimension unter Magnetfeld-Einfluss
- *Wiedemann-Effekt:* Torsion eines stromdurchflossenen Drahtes unter Einwirkung eines externen transversalen Magnetfeldes (Wiedemann-Twist)
- *Mateucci-Effekt:* Änderung der magnetischen Permeabilität durch Torsion (Umkehrung des Wiedemann-Effekts)

- *Villari-Effekt*: Änderung der magnetischen Permeabilität durch mechanische Kraft

In [7] könnt ihr mehr über diese magnetischen Kuriositäten lesen.

1975 hat Jacob Tellermann eine Apparatur zum Patent (US3898555A) [8] angemeldet, mit der man unter Ausnutzung dieser Effekte die Position eines Magneten entlang eines Drahtes messen kann.

Diese Erfindung hat die Basis für magnetostruktive Wegaufnehmer geschaffen. Tellermann hat die Firma Temposonics gegründet, die auch heute noch solche Positions-Sensoren herstellt. [2]

### Wie funktioniert das Ganze?

In Abb. 2 ist das Prinzip veranschaulicht. Man schaltet mit (3) einen kurzen Stromimpuls von ca.  $5 \mu\text{s}$  Dauer auf einen magnetostruktiven Draht (1), der in einer Apparatur eingespannt ist und der durch einen verschiebbaren Ringmagneten (2) läuft.

In der Praxis verwendet man, wie auch im Temposonics-Patent und bei Wikipedia beschrieben, anstelle eines Drahtes einen Hohlleiter aus magnetostruktivem Material. Dies hat unter anderem den Vorteil, dass man die Anregungsleitung durch den Hohlleiter zurückführen und dadurch Störsignale effektiver abschirmen kann.

An der Stelle des Magneten überlagert sich kurzzeitig das zirkulare magnetische Feld  $B_d$  des Stromimpulses mit dem Feld  $B_m$  des Ringmagneten. Auf Grund des Wiedemann-Effektes entsteht an dieser Stelle eine lokal begrenzte kurzzeitige Verdrillung des Drahtes.

Dadurch werden mechanische Torsionswellen (rot) angeregt, die sich zu beiden Seiten entlang des Drahtes weg von dem Magneten mit einer Geschwindigkeit von etwa  $3000 \text{ m/s}$  ausbreiten.

An der einen Seite des Drahtes befindet sich ein Dämpfer (4), der die Torsionswelle abschwächen soll, um Reflexionen an der Klemmstelle zu unterdrücken. An der ande-

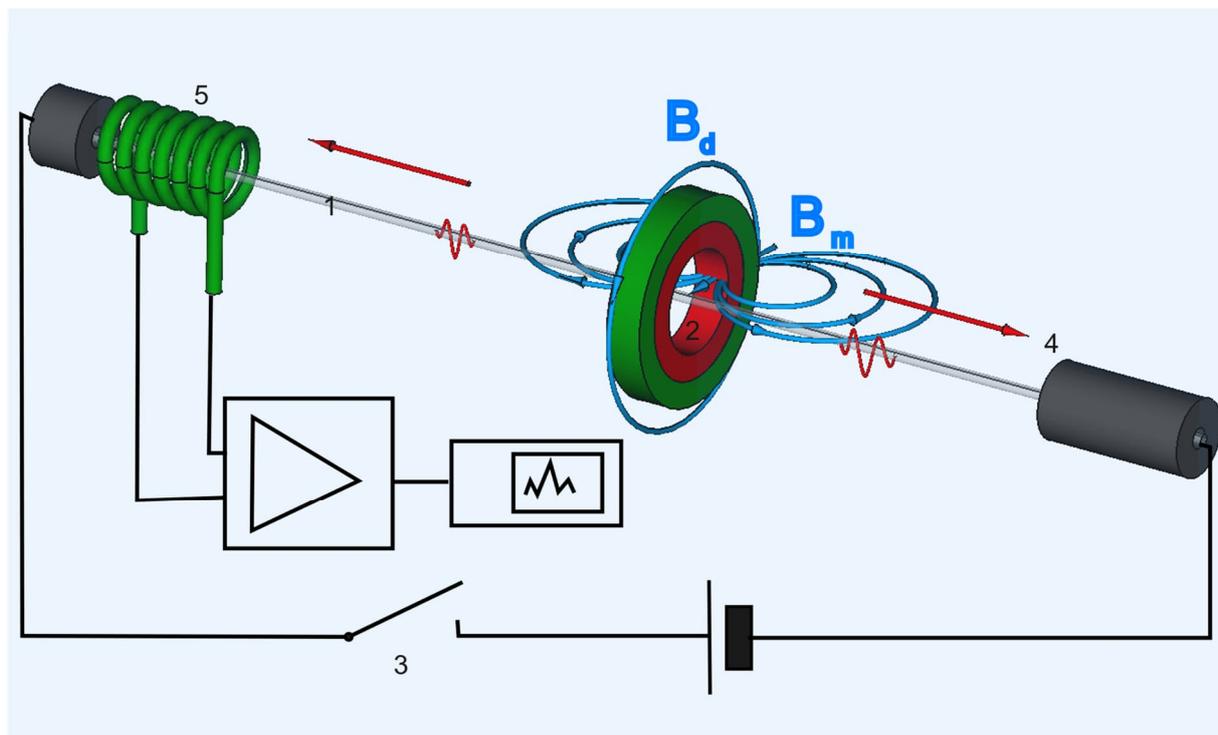


Abb. 2: Schaubild zur magnetostruktiven Wegmessung

ren Seite ist der Draht durch eine Pick-Up-Spule (5) geführt, die die Torsionswelle nachweisen soll.

Aufgrund des Magnetostruktions-Effekts kommt es zu einer Änderung der magnetischen Permeabilität und damit zu einer Änderung des magnetischen Flusses, der in der Pick-Up-Spule zu einem Spannungsimpuls führt, den man verstärken und nachweisen kann.

Aus dem zeitlichen Abstand zum Anregungspuls kann man mit Hilfe der Geschwindigkeit der Torsionswelle die Position des Magneten berechnen. Die Geschwindigkeit hängt etwas von der Umgebungstemperatur ab.

### Mechanischer Aufbau

Der gesamte Aufbau meines Experiments mit fischertechnik ist in Abb. 3 zu sehen. Die Bestandteile für den Wegaufnehmer sind die folgenden:

#### **Draht oder Röhrcchen aus magnetostruktivem Material**

Ich verwende, wie im Wikipedia-Artikel erwähnt, einen Nickeldraht mit 0,8 mm Durchmesser und einer Länge von 70 cm

mit einer Einspannlänge von 63 cm, was einen nutzbarem Messweg von ca. 40-50 cm ergibt.

#### **Klemm und eine Spannvorrichtung**

Ich habe dafür spezielle 3D-Druckteile entworfen. Der Draht wird an der Klemmstelle in einen von einem anderen Draht gewonnenen PVC-Isolationsmantel gesteckt und mit vier Inbusschrauben in die Kerbe der Klemmvorrichtung eingespannt.

Auf der anderen Seite wird er in das Loch des Spannwirbels gesteckt und damit etwas angespannt, wobei der Draht gar nicht kräftig gespannt sein muss.

#### **Dämpfer**

Bei mir kommt ein Weinkorken zum Einsatz, durch den der Draht gesteckt wird. Dies ist zwar keine optimale Lösung, aber besser als gar nichts.

#### **Pick-Up-Spule**

Ein fischertechnik-Elektromagnet ([31324](#)), aus dem man das eingeschraubte Eisenjoch entfernt und das Gehäuse des Magneten mit einer Nylonschraube und Mutter zusammenhält, hat sich als eine hervorragende

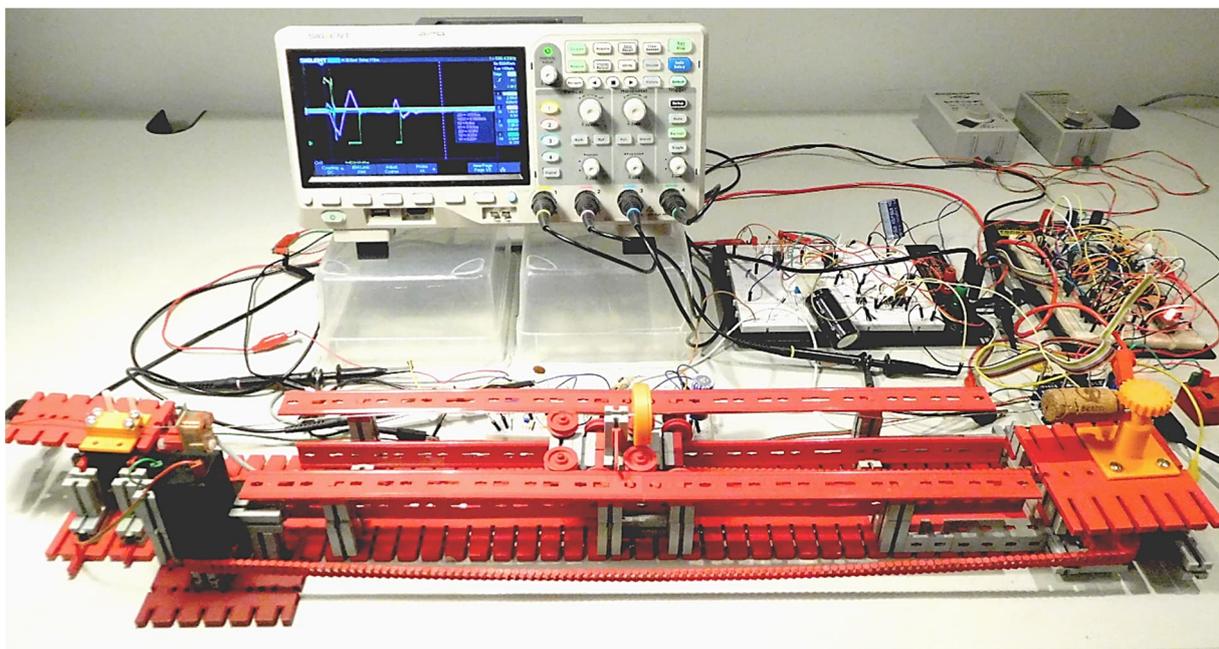


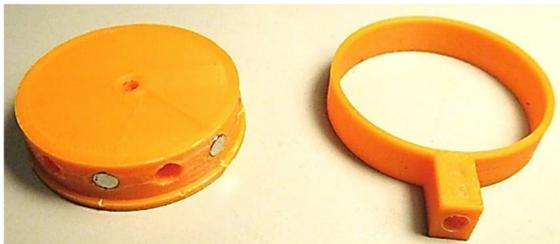
Abb. 3: Versuchsaufbau einer Linearachse aus fischertechnik mit magnetostruktiver Positionsmessung

Pick-Up-Spule erwiesen. Alternativ kann man sich auch eine Spule mit ca. 800 Windungen wickeln.

Manuelle Wicklungen sind meist „wilde Wicklungen“, die stärker auf den unerwünschten Anregungsimpuls ansprechen als sauber gewickelte Spulen. Die fischer-technik-Spule liefert sauberere Signale.

### **Magnet**

Am besten eignet sich ein Ringmagnet, bei dem ein Pol in der Innenseite und der andere auf der Außenseite liegt. Da Magneten in dieser Konfiguration schwer zu beschaffen sind, habe ich dafür ein 3D-Druck-Teil entwickelt, in das man radial bis zu 12 Nd-Zylindermagnete mit 4 mm Durchmesser einschieben kann (siehe Abb. 4).



*Abb. 4: Magnethalter aus 3D-Druck für radiale Anordnung von bis zu 12 Nd-Zylindermagneten und Haltering*

Ich habe später herausgefunden, dass auch ganz normale, einzelne (größere) Nd-Magnete funktionieren, die man am Draht entlangführt. Man muss nur darauf achten, dass der Draht nicht von dem Magneten angezogen wird und bei zu starker Annäherung am Draht anhaftet.

Bis zur Sättigung steigt das Torsionswellensignal mit der Stärke des Magneten. Allerdings kann ein zu starker Magnet zu permanenten Magnetisierungszonen im Draht führen, an denen Torsionswellen ausgelöst werden, die dann zu fehlerhaften Messergebnissen führen können.

Mit einem Permanentmagneten kann man dem Draht gewissermaßen magnetische „Dellen“ aufprägen. Ist der Magnet jedoch zu schwach, sind die Signale möglicher-

weise zu gering, um sauber detektiert zu werden. Als guter Kompromiss haben sich sechs Magnete erwiesen.

### **Anregungs-Schaltung (Exciter)**

Es wird eine Schaltung benötigt, die einen kurzen, sehr intensiven Stromimpuls erzeugen kann. Diese sogenannte Exciter-Schaltung wird von einem zweiten regelbaren Netzgerät (bis 20 V) gespeist und weiter unten vorgestellt.

### **Analogverstärker für die Verstärkung des Torsionswellensignals**

Die Schaltung wird weiter unten genauer beschrieben. Für den Analogverstärker verwende ich ein 10-V-Netzteil und verbinde die mit einem Operationsverstärker erzeugte virtuelle Masse mit der Masse des Arduinos. Eleganter wäre es, 5-V-Rail-to-Rail-Operationsverstärker einzusetzen, die nur eine Betriebsspannungsebene benötigen und direkt vom Arduino mit Strom versorgt werden können.

### **Timer zur Messung der Zeit zwischen Anregungsimpuls und Signal**

Bei einer Länge von 400 mm müsste man (bei 3000 m/s Wellengeschwindigkeit) eine Zeitspanne von 133  $\mu$ s messen können. Eine Wegauflösung von 0,2 mm würde eine zeitliche Auflösung von 66 ns erfordern.

Ein 16-MHz-Takt hat eine Periode von 62,5 ns und ist daher als Zeitbasis geeignet. Der Digitalzähler für die Zeitmessung muss dann bis 2000 zählen können. Eine geeignete Schaltung wird unten vorgestellt.

### **Microcontroller-Steuerung mit Arduino-UNO**

Um auch einen Motor ansteuern zu können, kommt ein Arduino Motor-Shield V3 zum Einsatz. Will man die Zeitmessung direkt mit dem Arduino mit dem Input Capture Feature des Timer 1 machen, kann man nur Motor A verwenden, da Motor B den ICP1 (Pin 8) für Break benötigt.

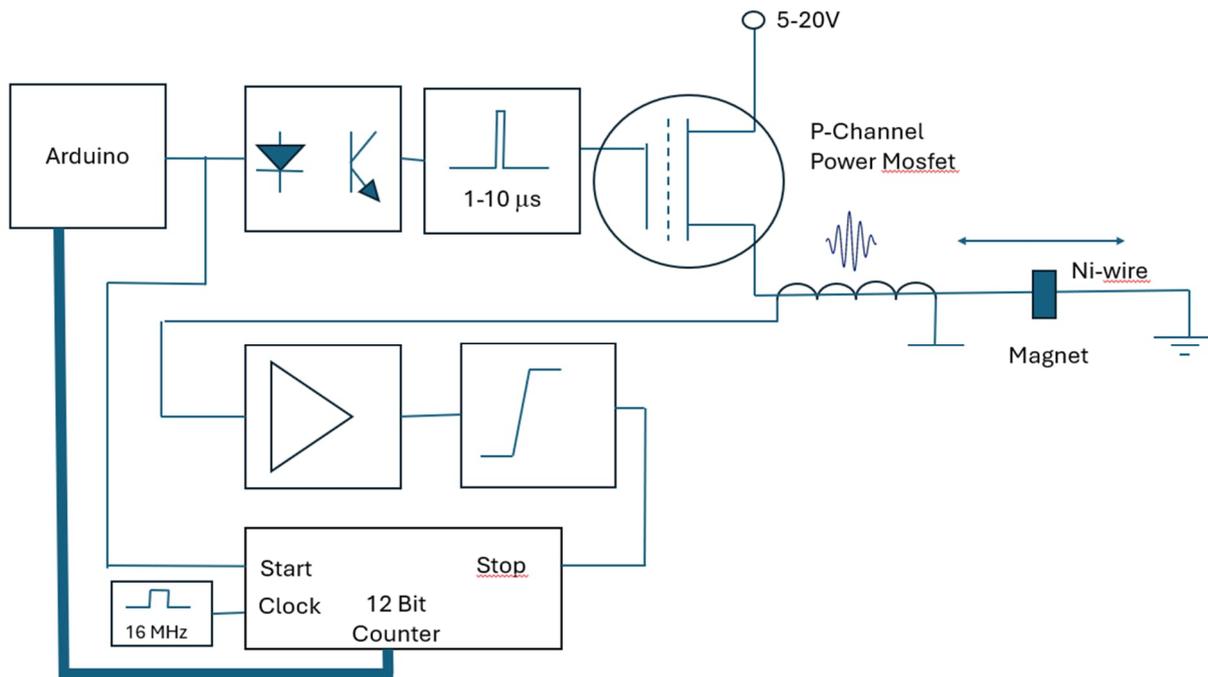


Abb. 5: Prinzipschaltbild

### Elektronischer Aufbau

Abb. 5 zeigt das Prinzip-Schaltbild des Experimentes. Es wird mit dem Arduino-UNO angesteuert, der die Pulse triggert, die Messung auswertet sowie später auch noch die PID-Regelung für die Motorposition übernimmt.

### Schaltung des Exciters

Der Arduino ist über einen Optokoppler an die Exciter-Schaltung angeschlossen, um

die Stromquellen von Arduino und der Mess-Elektronik zu trennen. Für die Erzeugung definiert kurzer Impulse verwende ich ein CMOS-Mono-Flop CD4098 [10], das mit den Anregungs-Spannungen von 5 V bis zu 20 V kompatibel ist.

Der Star in der Anregungs-Schaltung ist ein p-Kanal Power-Mosfet IFR 9540 [11] mit einem maximal zulässigen Impuls-Strom von 72 A, der den Stromimpuls auf den Draht schaltet.

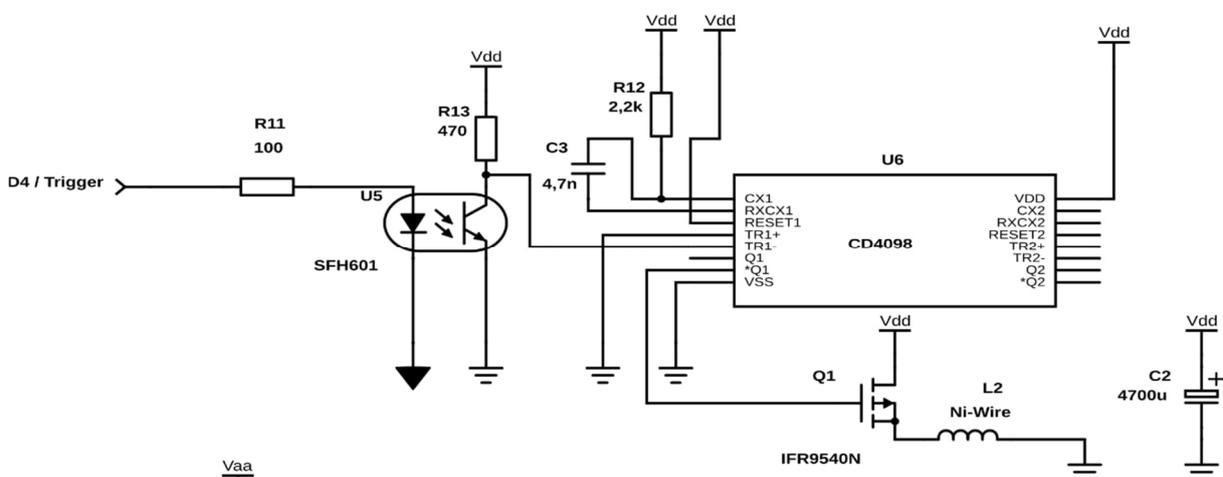


Abb. 6: Schaltbild des Exciters für die Impulsanregung

Dieser Impuls hat eine Dauer von etwa 5-10  $\mu\text{s}$ . Je höher der Strom und je länger der Impuls ist, desto größer ist das Signal. Allerdings treten bei zu hohen Werten weitere Wellenzüge und Störwellen auf. Und auch die kritische Anfangsregion kommt dann deutlicher zum Tragen, was den nutzbaren Wegmessbereich weiter verkleinert, weil dann saubere Messungen nur noch weiter von der Spule entfernt möglich sind.

Da der Stromimpuls nur sehr kurz andauert, wird die Stromquelle nur impulsartig belastet. Mit einem großen Kondensator (C2) kann man die Stromquelle unterstützen.

Es sei hier der Hinweis angebracht, dass manche Schaltnetzteile selbst hochfrequente Störsignale von einigen hundert mV abgeben. Diese können so stark sein, dass das Experiment nicht funktioniert. In diesem Fall kann ein eigentlich für die Primärseite gedachter Netz-Entstörfilter [12] gegen Gleichtaktstörungen in den Ausgangsleitungen (!) das Problem deutlich mindern.

Aber als fischertechniker hat man mit dem fischertechnik-Transformator ein geeignetes lineares Netzgerät ohne Störimpulse zur Hand.

### Schaltung von Verstärker und Komparator

Das Torsionswellen-Signal von der Spule wird mit einer Operationsverstärkerschaltung verstärkt und von einem Komparator (LM311) digitalisiert. Die dazu notwendige Schaltung ist nicht besonders speziell und in Abb. 7 zu sehen. Es werden zwei invertierende Verstärker eingesetzt. Der zweite Verstärker ist über einen Kondensator an die erste Verstärkerstufe angekoppelt. Die nominelle Gesamtverstärkung ist 470.

Der Kondensator C1 filtert die langsameren Untergrundsignale heraus, die vom Anregungssignal stammen.

### Schaltung für Zeitmessung mit TTL-Counter

Für die Messung der Zeit zwischen Anregungsimpuls und Torsionsimpuls habe ich

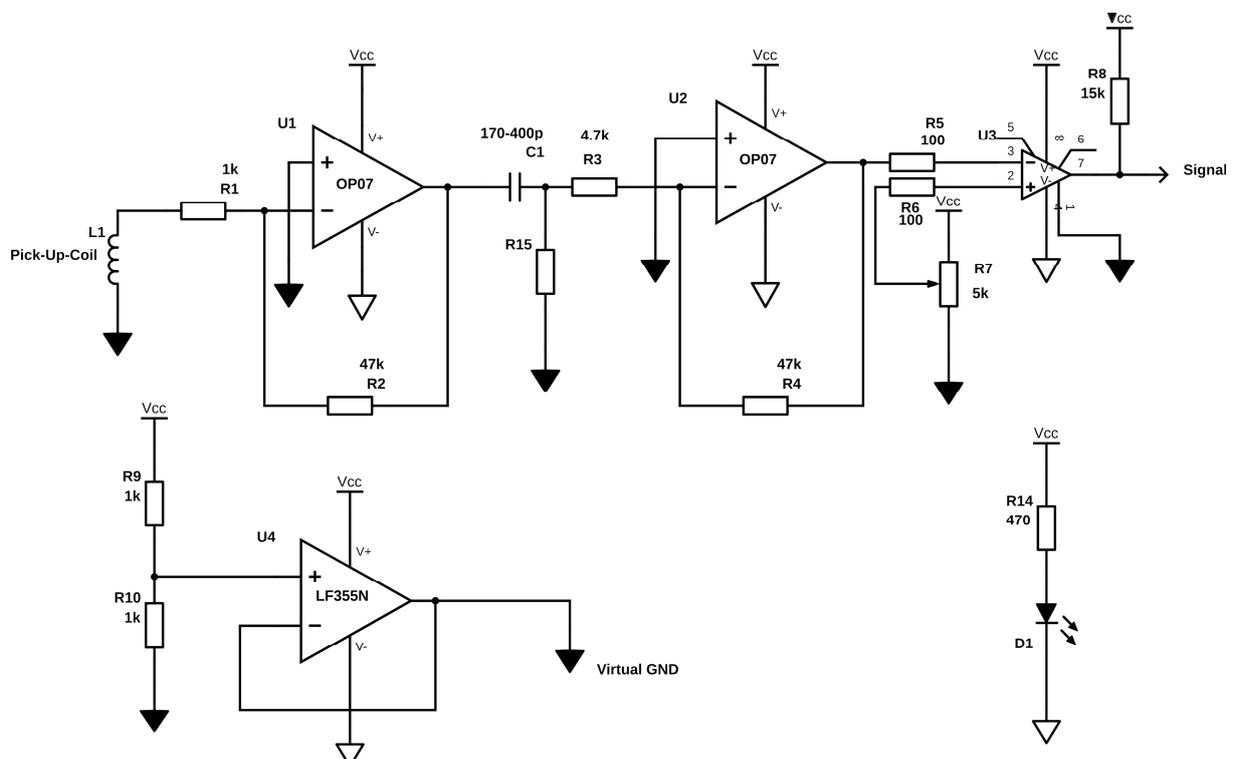


Abb. 7: Schaltung für zweistufigen Signalverstärker, Komparator und virtueller Masse

einen 12-Bit-Synchronzähler mit TTL-Bausteinen (74LS161) [13] gebaut, der von einem 16-MHz-Quarzoszillator getaktet wird. Die Schaltung ist in Abb. 8 abgebildet.

Die Zeitauflösung dieser Schaltung beträgt also  $1/16 \mu\text{s}$ . Eine Torzeitschaltung aus einem D-Flip-Flop (74LS74) und einem UND-Gatter (74LS08) schaltet die Zählimpulse auf den Zähler: Der Zähler wird mit der fallenden Flanke des Trigger-Impulses (D5 / START) zurückgesetzt. Die Zählung beginnt, wenn START auf High wechselt. Solange das START-Signal Low ist, wird die Zählung unterdrückt. Diese „Blindzeit“ wird so eingestellt, dass die zu Beginn auftretenden Fehlimpulse nicht gezählt werden.

Sobald die fallende Flanke des ersten Signalimpulses ankommt, wird der Zähler angehalten und über 4:1-Multiplexer des Arduino ausgelesen. Der Arduino selektiert die Nibbles (4-Bit-Werte) über die Leitungen D6 und D7 und liest sie über A2-A5 ein.

Die theoretische Wegauflösung beträgt  $0,18 \text{ mm}$ , wobei durch unscharfe Impulsflanken und Jitter etwa nur  $0,5 \text{ mm}$  erreicht werden.

**Zeitmessung mit Arduino**

Wer sich nicht mit TTL-Schaltungen herumschlagen will, kann das Signal auch direkt mit dem Arduino messen.

Zu beachten ist, dass die übliche Methode zur Zeitmessung mit Input Change Interrupt und der benötigten Funktion *micros()* zu einer ungenügenden Längenauflösung von nur  $12 \text{ mm}$  führt, weil die Zeitauflösung von *micros()* des Arduino UNO nur  $4 \mu\text{s}$  beträgt.

Die Zeitmessung mit der Input-Capture-Funktion des Timer 1 [14] funktioniert aber sehr gut und wird weiter unten ausführlich beschrieben. Allerdings kann diese Methode beim Arduino UNO nicht ohne weiteres für die Regelung von Motor B verwendet werden.

Die Vorteile der Arduino-Lösung sind, dass die Messzeit nicht limitiert ist und es prin-

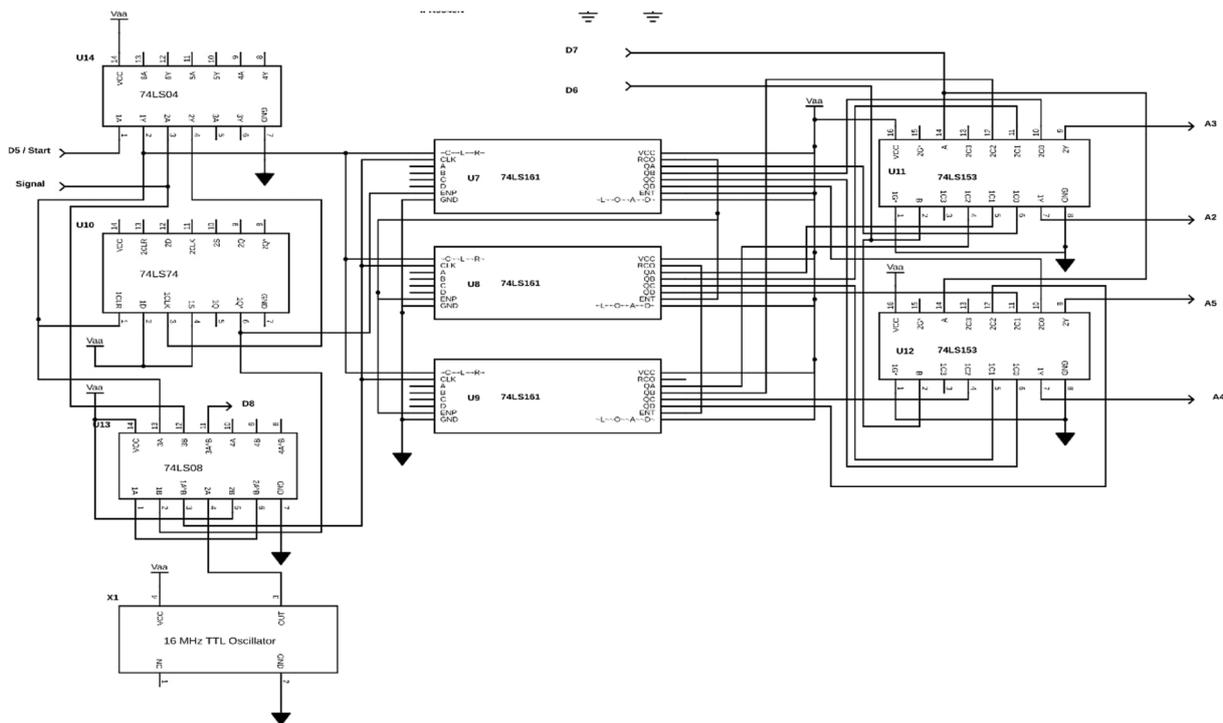


Abb. 8: 12-Bit TTL-Zähler für Impulszeitmessung

zipiell möglich ist, Impulse von mehreren Positionsmagneten auszuwerten.

### Linearachse aus fischertechnik

Die Linearachse besteht aus vier Schienen, auf denen ein Schlitten mit Laufrollen fährt (siehe Abb. 9). Damit konnte ich eine hinreichende Länge für mein Experiment realisieren. Längere Achsen sollten prinzipiell kein Problem sein. Allerdings müsste, wenn der TTL-Counter verwendet wird, dieser auf 16 Bit erweitert werden, was aber nur einen Zähler-IC 74LS161 [13] erfordern würde, dessen Zählerausgänge man auf die momentan noch unbenutzten C3-Datenleitungen der Multiplexer schalten müsste. Mit 16 Bit könnte man dann sogar Wege bis 12 m messen.

Auf dem Schlitten ist der Magnethalter mit einer (nicht magnetischen) M4-Nylon- oder Messingschraube fixiert. Unter dem Schlit-

ten verläuft die Antriebskette, die an beiden Enden jeweils über zwei Z30-Zahnräder umgelenkt wird, von dem eines mit einem XM-Motor angetrieben wird. Durch das Loch des Magnethalters läuft der Nickeldraht, welcher an beiden Enden eingespannt ist. Die Halterungen sind als 3D-Druckteile realisiert, und die Befestigungsplattformen aus fischertechnik sind so gestaltet, dass man den Draht in der Höhe und seitlich justieren kann. Die Justage sollte so erfolgen, dass der Draht das Plastikgehäuse des Magnethalters nicht berührt, da dies die Torsionswellen beeinträchtigen kann.

Auf der Empfängerseite ist die Spule so befestigt, dass sie zusätzlich auch noch in vertikaler und in Längs-Richtung des Drahtes justiert werden kann. Gute Ergebnisse erzielt man, wenn der Draht das Gehäuse der Spule nicht berührt. In Abb. 10 sind die Halterung und die Empfangsspule zu sehen.

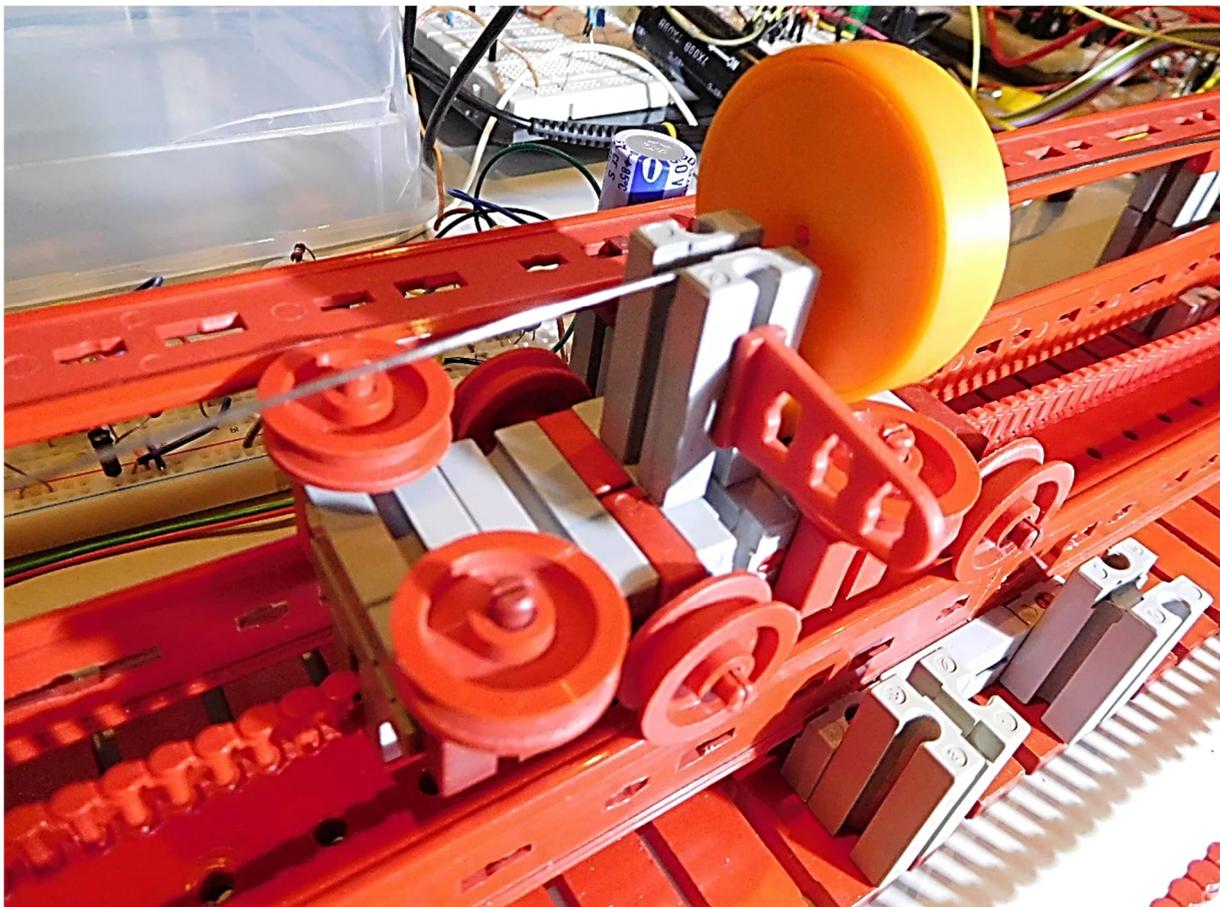


Abb. 9: Schlitten mit Positionsmagnet auf Linearachse; die vordere Schiene wurde entfernt

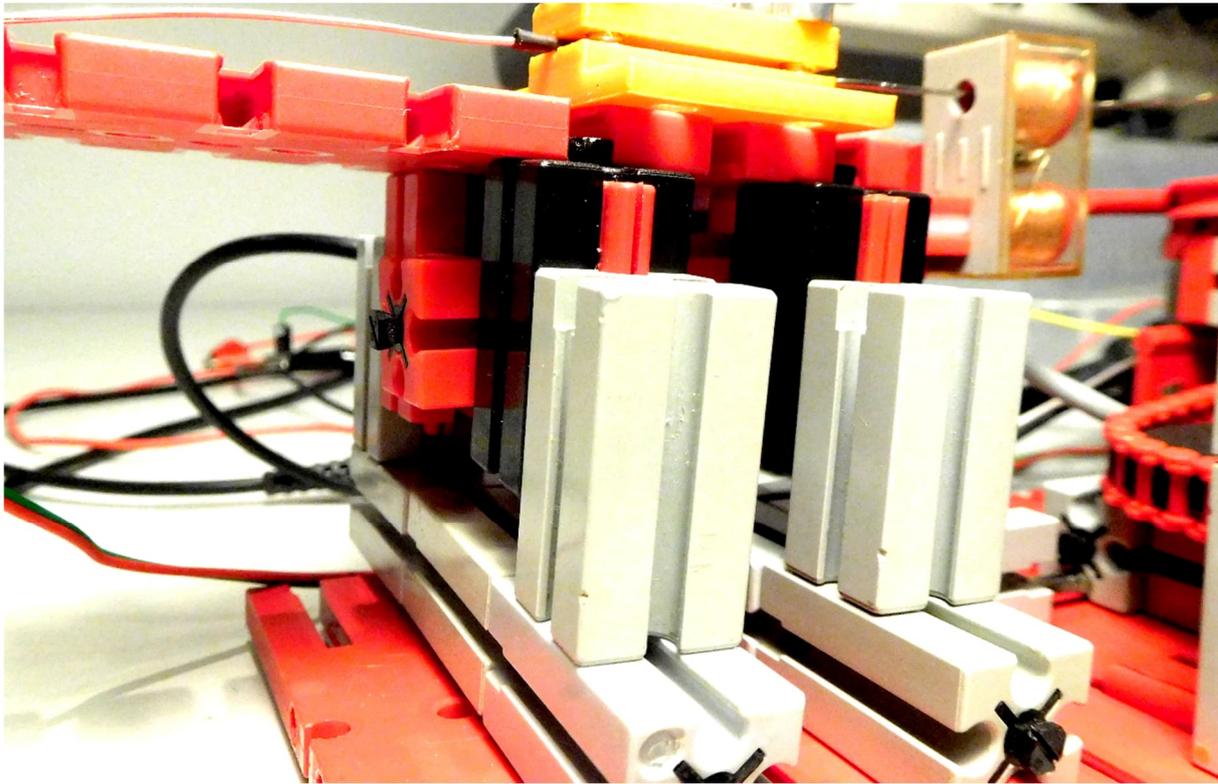


Abb. 10: Halterungsblock für Drahtklemme und Spulenhalter

## Das Torsionswellensignal

Abb. 11 zeigt die verschiedenen Signale des Experiments auf einem 4-Kanal-Oszilloskop.

- Gelb: Anregungs-Impuls vom Arduino. (Der echte Impuls ist viel kürzer und wird durch die Zeitkonstante des Monoflops vorgegeben.)
- Violett: Das von der Pick-Up-Spule empfangene und verstärkte Signal.
- Grün: Das digitalisierte verstärkte Signal nach dem Komparator.
- Blau: Das Zeittor, während dessen die 16 MHz-Impulse gezählt werden.

Zu Beginn erkennt man ein starkes Signal von der Anregung, das sehr stark von der Magnetisierung des Drahtes im Bereich der Spule abhängt. Tatsächlich kann man den Draht um-magnetisieren, sodass das Signal in die andere Richtung geht.

Dieses Signal gilt es zu minimieren, was man mit einer vorsichtigen Behandlung mit

einem Magneten erreichen kann. Als hilfreich hat sich eine Entmagnetisierung mit einem am AC-Ausgang des fischertechnik-Netzteil angeschlossenen fischertechnik-Elektromagnet herausgestellt.

Die permanente Magnetisierung richtig einzustellen bzw. zu neutralisieren ist eine knifflige Angelegenheit. Der Schlitten darf nicht zu nahe an die Spule herankommen, da der starke Magnet im Draht im Spulenbereich eine Magnetisierung hinterlässt, die dann das Anfangssignal verändert.

Tatsächlich ist es so, dass der Draht auch durch einen zu starken verschiebbaren Magneten permanent magnetisiert wird. Das Torsionswellensignal ist auch dann noch da, wenn der Magnet entfernt wird. Man hat es hier gewissermaßen mit einer Art magnetischem Drahtspeicher zu tun. Beim Verschieben des Schlittens zieht der Magnet die Magnetisierungszone mit sich.

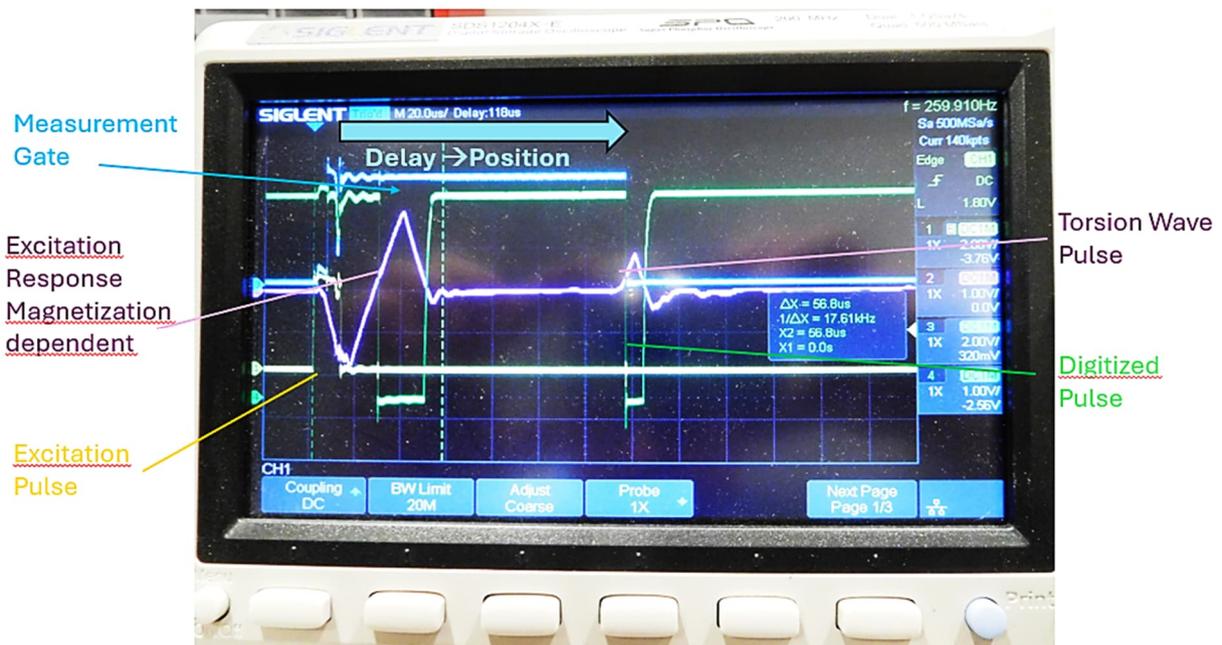


Abb. 11: Oszillogramm von Anregungsimpuls und Torsionswellen-Signal

Eine weitere messtechnische Maßnahme besteht darin, den problematischen Anfangsbereich einfach auszublenden. Dazu wird das digitalisierte Signal erst nach einer Wartezeit an den Zähler weitergeleitet, um Fehlimpulse während der Anfangsphase zu

ignorieren. Die Vorgehensweise wird später noch ausführlich beschrieben.

Weiter rechts im Bild ist das Signal des ersten echten Torsionswellen-Impulses zu sehen und in der grünen Spur sein digitalisiertes Pendant.

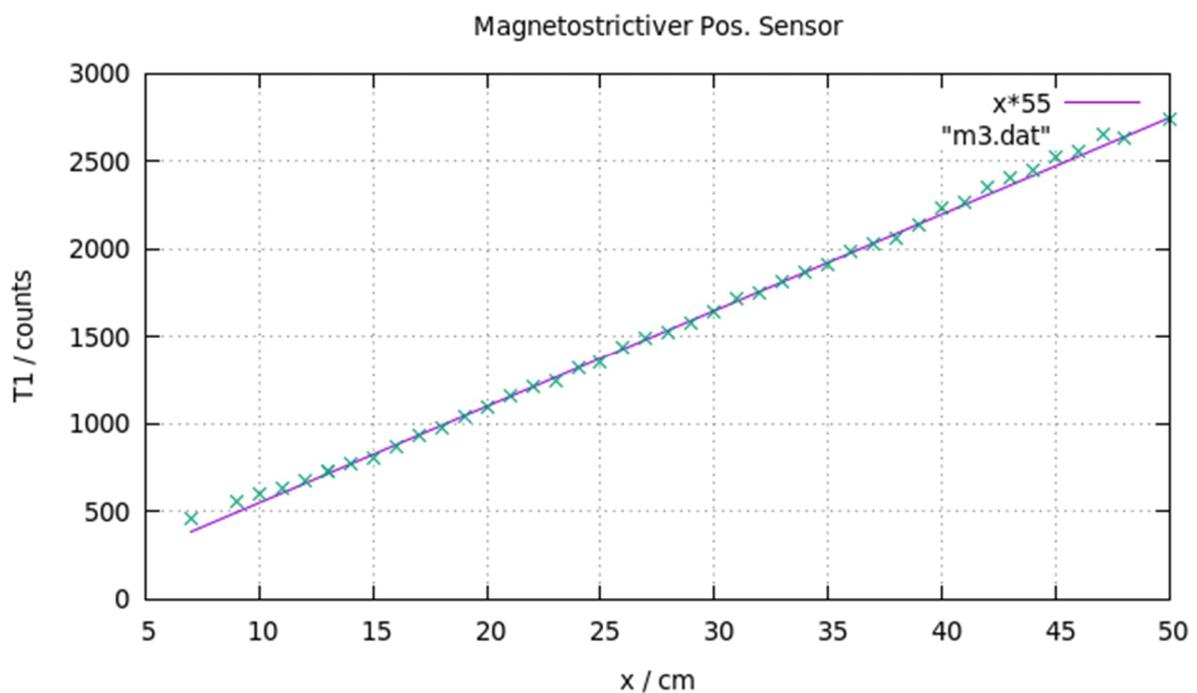


Abb. 12: Zählimpulse (Timer1-Messung) vs. Abstand Magnet-Spule

Define-Konstante	Deklaration	Beschreibung	Kommentar
MOTORSHIELD	#define MOTORSHIELD	Falls ein Motor gesteuert werden soll und ein Arduino Motor Shield V3 aufgesteckt ist	
MOTOR	#define MOTOR 0 #define MOTOR 1	Verwende Motor A Verwende Motor B	Nicht mit TIMER1MEAS
<b>Zeitmess-Methoden:</b>	<b>Alternative Deklaration:</b>		
IRQMEAS	#define IRQMEAS	Zeitmessung mit Input Change Interrupt und micros()	Zeitauflösung 4 $\mu$ s
TIMER1MEAS	#define TIMER1MEAS	Zeitmessung mit Input Capture mit Timer1 an D8 Das Signal an diesem Pin ist $\overline{D5}$ SIGNAL und muss über ein UND-Gatter realisiert werden	1/16 $\mu$ s
TTLCOUNTER	#define TTLCOUNTER	Zeitmessung mit TTL-Counter Nibble-Select: D6, D7 Nibble: A2-A5	1/16 $\mu$ s

Tab. 1: #define-Konfiguration im C-Programm

Aus der Verzögerung zwischen dem Start und dem Signalimpuls ergibt sich wie oben bereits erwähnt der Abstand des Magneten zur Spule. Abb. 12 zeigt die Abhängigkeit der mit Timer 1 gezählten Zählimpulse vom Abstand von der Spule. An den Randbereichen sieht man eine leichte Abweichung von der Linearität.

## Positionsregelung per Arduino-Programm

Das Arduino-Programm *pulser.ino* kann über C-Defines parametrisiert werden (Tab. 1).

Die Steuerung des Programms erfolgt über die Arduino-Konsole (Serial). Nach der Initialisierung werden kontinuierlich Counter-Wert und Varianz ausgegeben. Mit dem Kommando *s* kann der Motor ein- bzw. ausgeschaltet werden. Mit dem Kommando *m <value>* verfährt der Motor bis der Zählerwert *<value>* erreicht ist. Die Regelung erfolgt über eine PID-Regelung.

## Initialisierung des Timers

Um die Input-Capture-Funktion zu aktivieren muss diese in *setup()* konfiguriert werden:

Konfiguration von Timer 1:

```
TCCR1B = (1<<CS10); // Vorteiler
1x Systemtakt (F_CPU)
TCCR1B &= ~(1<<ICES1); // Trigger
auf fallende Flanke
```

Enablen und Löschen der Interrupts:

```
TIFR1 = (1<<ICF1); // lösche CAPT
Interrupt
TIMSK1 = (1<<ICIE1); // Freigabe
CAPT Interrupt
```

## Interrupt-Routine

In Abb. 13 ist der zeitliche Ablauf der Signale und des Programms dargestellt.

An D8 muss eine hardwaremäßige UND-Verknüpfung von SIGNAL und  $\overline{D5}$  angelegt werden. Fallende Flanken an diesem Eingang lösen den ICP-Interrupt aus.

Bei der ersten fallenden Flanke (Marke ① in Abb. 13) wird der Start-Timerwert  $T1$  aus ICR1 gelesen. Wenn der Interrupt zum zweiten Mal ausgelöst wird (Marke ② in Abb. 13), stammt die fallende Flanke vom ersten richtigen Signalimpuls. Dann wird die Zeit-Differenz aus dem ICR1-Wert und dem Start-Timerwert  $T1$  in eine globale Variable  $T$  geschrieben, welche vom Hauptprogramm ausgewertet wird.

### Hauptschleife (loop)

In der Hauptschleife werden zunächst die serielle Schnittstelle ausgelesen und anstehende Kommandos dekodiert (Marke ① in Abb. 13). Dann werden der Trigger-Puls an D4 und der längere Startimpuls auf D5 ausgegeben, dessen Dauer die Sperrzeit vorgibt, während der nicht gemessen werden soll.

Danach wird gewartet, bis  $count = 2$  ist, also der Signalimpuls von der Interrupt-Routine registriert wurde, worauf der Interrupt gesperrt wird, da nachfolgende Pulse igno-

riert werden sollen. 15 Werte werden gleitend gemittelt (Marke ③ in Abb. 13) und der Mittelwert und die Varianz ausgegeben (Marke ④ in Abb. 13). Der gemittelte Wert wird als Sollvorgabe für die Motor-Regelung gesetzt. Danach wird der PID-Regler mit der *Compute*-Funktion aktualisiert (Marke ⑤ in Abb. 13) und der errechnete Wert als Motor-PWM gesetzt (Marke ⑥ in Abb. 13).

Nach einer Wartezeit von 1 ms wird die loop-Funktion verlassen und das Spiel kann von Neuem beginnen. Die Ausgabe der Werte während der PID-Regelung ist in Abb. 14 dargestellt.

### Herausforderungen

Im Nachhinein möchte ich noch einmal einige der Herausforderungen zusammenstellen, denen ich begegnet bin, welche Auswirkungen sie haben und welche Maßnahmen ich ergriffen habe – zwei sogar mit fischertechnik-Teilen (Tab. 2).

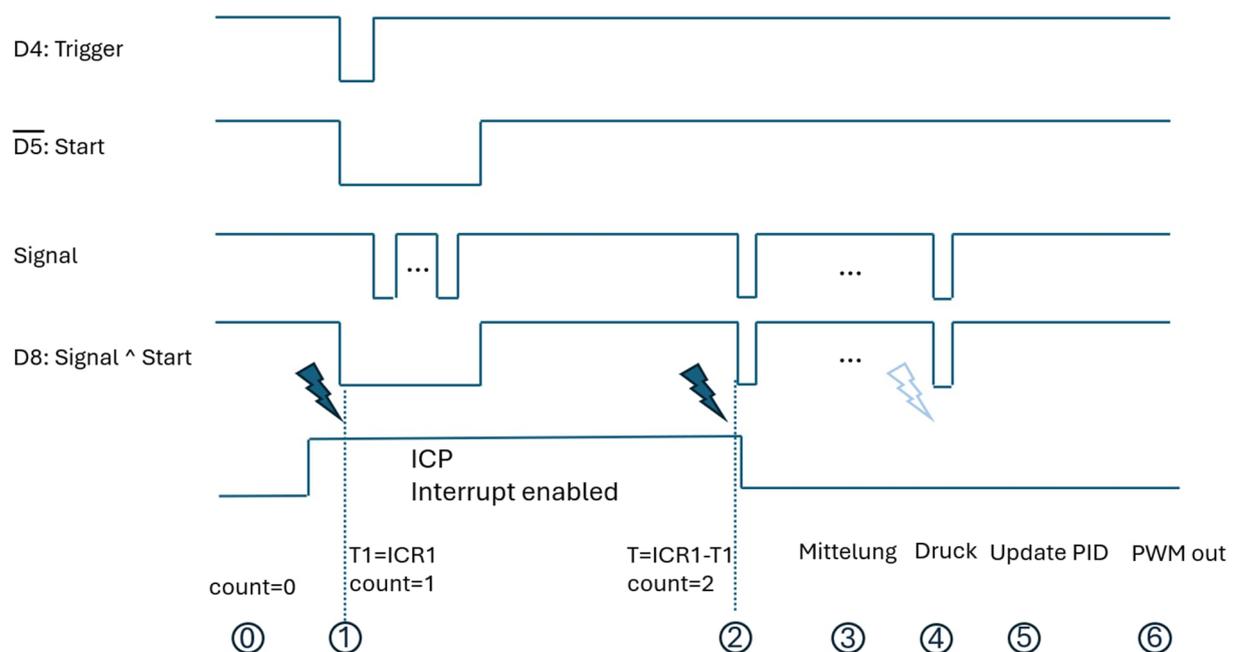


Abb. 13: Timing-Diagramm für die Signale und Ablauf des Arduino-Programms. Die Blitz-Symbole markieren Interrupts.



Abb. 14: PID-Regelung: Soll- und Ist-Position vs. Zeit; es wurden nacheinander mehrere Positionen angefahren.

Nr.	Problem	Auswirkung	Maßnahmen
1	Permanente Magnetisierung des Nickeldrahtes im Bereich der Spule	Hohes Untergrund-Signal am Anfang	Entmagnetisierung, Einhaltung eines Abstands von > 5 cm zwischen Magnet und Spule, Kondensator zwischen erster und zweiter Verstärkerstufe
2	Permanente Magnetisierung auf dem ganzen Nickeldraht	Störpulse von den magnetisierten Stellen	Entmagnetisierung durch Permanentmagnet oder mit AC betriebenen E-Magnet, ggf. Verwendung eines anderen Materials (nicht ausprobiert)
3	Störimpuls am Anfang	Kurz nach dem Anregungsimpuls sind Störpulse durch die Anregung und im Spulenbereich erzeugte Torsionswellen vorhanden, die nicht registriert werden sollen	Zeitliche Diskriminierung der Signalimpulse: Gültige Impulse erst nach einer Blind-Zeit

Nr.	Problem	Auswirkung	Maßnahmen
4	Netzteil-Störungen von Schaltnetzteilen	Starke Störungen, die eine Messung unmöglich machen können	Verwendung des fischer-technik Analog-Netzteils, Entstörfilter am Netzteil-ausgang, geeignete Leitungs-verlegung
5	Geeignete Pick-Up-Spule	zu wenig Windungen: Signal zu klein zu viel Windungen: Schwingungen bzw. längeres Anfangs-Signal	Verwendung der fischer-technik-Spule, Selbstwicklung einer Spule auf selbstgedrucktem Spulenkörper
6	Spannung des Drahtes	Draht von 0,8 mm ist sehr wellig und muss gespannt werden, Starke Zugspannung kann die Linearachse verbiegen	3D gedruckter Spannwirbel (tatsächlich ist die mechani-sche Spannung kaum rele-vant), Einsatz von Metallachsen auf den Grundplatten zur Stabilisierung der ft-Konstruktion
7	Zeitmessung mit Arduino und Motor-Ansteuerung	Zittrige PID-Regelung	Verwendung eines TTL-Counters
8	Erzeugung eines starken kurzen Anregungsimpulses	Zu lange Impulse erzeugen längere Wellenzüge, die schwerer auszu-werten sind Bei zu schwachen Impulsen sieht man kein Signal	Einsatz eines Power-Mosfets für High-Side-Switch, Großer Stützkondensator, Mono-Flop für kurze Impuls-dauer, Push-Pull-Treiber für bipola-ren Stromimpuls (nicht aus-probiert)
9	Elektronische Störung durch den Anregungs-impuls	Anregungsimpuls schlägt auf Mess-Signal durch	Entkopplung der Span-nungsebenen für Messung und Anregung, Verwendung eines Opto-kopplers, abgeschirmte Spulen-zuleitungen
10	Reflexionen an den Enden	Reflektierte Wellen führen zu Mehr-fachsignalen; Sprünge in der Posi-tionsmessung wegen mehrdeutiger Zeitmessung	Dämpfung an den Enden durch Korke PVC-Isolation oder Heiß-kleber An der Klemmstelle Umwickeln des Drahtes mit Stücken von Papiertaschen-tuch

Tab. 2: Herausforderungen und mögliche Gegenmaßnahmen

## Zusammenfassung und Ausblick

Das Experiment hat gezeigt, dass man einen mangetostriktiven Wegaufnehmer für fischertechnik-Modelle bauen kann. Die Messung ist absolut, für Modelle ausreichend genau und kompatibel mit Timings, die man mit einem Arduino-Microcontroller erreichen kann.

Ich habe gezeigt, wie man damit die Position eines Schlittens auf einer Linearachse regeln kann. Alle Dateien (FreeCAD-Dateien, STL-Dateien für den 3D-Druck und Arduino-Sketches) werden mit diesem Beitrag zum Download zur Verfügung gestellt- [20].

Um diese Messmethode noch leichter zugänglich zu machen könnte man für die verschiedenen Schaltungen Printplatinen für Silberlinge entwerfen.

Die Messmethode ist momentan wegen der einzuhaltenden Abstände (Spule-Magnet, Dämpfer) noch auf etwas größere fischertechnik-Modelle beschränkt. Ob eine Miniaturisierung für kleinere Linearachsen möglich ist, evtl. mit Materialien geringerer permanenter Magnetisierbarkeit, müsste noch untersucht werden.

Interessant wäre auch, die Zeitmessung mit einem schnelleren Microcontroller vorzunehmen. Da die fischertechnik-Controller schneller als der Arduino-UNO sind, sind sie vermutlich besser für eine Auswertung mit höherer Zeitauflösung geeignet.

Auf Basis der gezeigten Methode wären aber auch noch eine Reihe weiterer interessanter Versuche denkbar, beispielsweise die Übertragung der Torsionswellen auf nicht-magnetische Materialien, die Anregung von Torsionswellen mit Hilfe eines Elektromagneten, eine Aufspaltung der Wellen für Torsionswellen-Interferometrie oder ein optischer Nachweis der Wellen.

Man könnte die Wellen auch in einem Drahttring kreisen lassen und Torsions-

wellenimpulse darin speichern wie in [18] oder [19] – sozusagen ein kleiner „Torsionswellen-Speicherring“ für zu Hause.

Dieses spannende Thema bietet auf jeden Fall viele Ansatzpunkte für Weiterentwicklungen oder neue Experimente.

Wer mehr über die physikalische Modellierung der mangetostriktiven Effekte wissen möchte, dem sei [15] empfohlen. Eine sehr ausführliche Abhandlung zu Wegaufnehmern findet sich in [16].

## Quellen

- [1] Florian Bauer: *Parallel-Tripterion*. [ft:pedia 3/2024](#), S. 40–48.
- [2] Website der Fa. Temposonics: <https://www.temposonics.com/de>
- [3] Wikipedia: [Magnetostriktiver Wegaufnehmer](#).
- [4] induux international GmbH: [Magnetostriktive Wegaufnehmer](#).
- [5] Wikipedia: [Terfenol-D](#).
- [6] Wikipedia: [Galfenol](#).
- [7] *Magnetische Kuriositäten und ihre Anwendungen*. PDF-Datei auf [chsunier.ch](#).
- [8] Jacob Tellermann: *Linear distance measuring device using a moveable magnet interacting with a sonic waveguide*. [Patent US3898555A](#), 1973.
- [9] Gründungsgeschichte der Fa. Temposonics. Auf [temposonics.com](#).
- [10] Texas Instruments: *CD4098, CMOS, zweifacher monostabiler Multivibrator*. Datenblatt auf [ti.com](#).
- [11] Vishay Siliconix: *IFR9540 Power MOSFET*. Datenblatt auf [vishay.com](#), 2021.
- [12] Wikipedia: [Netzfilter](#).

- [13] Texas Instruments: 74LS161 *Synchronous 4-Bit Counters*. Datenblatt auf [ti.com](http://ti.com).
- [14] Khaled Magdy: [\*Arduino Input Capture Unit Interrupt Pin Tutorial & Examples\*](#).
- [15] Yannick Le Bras, Jean-Marc Greneche: [\*Magneto-Elastic Resonance: Principles, Modeling and Applications\*](#), November 2017.
- [16] David S. Nyce: *Linear Position Sensors: Theory and Application*. John Wiley & Sons, Hoboken (NJ) 2003.
- [17] Yongjie Zhang, Weiwen Liu, Haibo Zhang, Jinfeng Yang, Hui Zhao: [\*Design and Analysis of a Differential Waveguide Structure to Improve Magnetostrictive Linear Position Sensors\*](#), 2011.
- [18] technikum29 Computermuseum: [\*Historische Speichermedien\*](#), hier: *Laufzeitspeicher: Magnetostriktion*.
- [19] Computermuseum der Stuttgarter Informatik: [\*Iskra 111\*](#), hier: *Ultraschall-Laufzeitspeicher*.
- [20] Florian Bauer: [Dateien zu diesem Beitrag](#).

Elektronik

## Alternativen zum Silberling-Relais – Teil 2

Arnoud van Delden

*Im ersten Teil dieser Beitragsserie wurde ein Universalmodul mit kurzschlussfesten Leistungsausgängen beschrieben. Eine solche „Solid-State“-Lösung kann verschiedene fischertechnik-Relais-Bausteine zur Ansteuerung von Verbrauchern wie Lampen und Motoren ersetzen. Um aber die Stromrichtung und damit die Drehrichtung eines Motors zu steuern, reicht ein einzelner Halbleiter nicht aus. Zu diesem Zweck können wir mehrere Halbleiter in einer sogenannten Brückenschaltung [1] schalten. In diesem Beitrag werden zwei mögliche Eigenbau-Implementierungen dieser Schaltungsart vorgestellt, die mit den vorhandenen fischertechnik-Steuerungen und Elektronikmodulen verwendet werden können.*

Warum H-Brücken für die Ansteuerung von Motoren sinnvoll sind und wie sie mit etwas Kreativität sogar durch Adaption bestehender fischertechnik-Elektronikmodule hergestellt werden können, wurde bereits früher in der ft:pedia beschrieben [2, 3]. Ein kompletter H-Brücken-„Silberling“ wurde von fischertechnik allerdings nie herausgebracht. Die Steuerung der Drehrichtung von Motoren wird in Schaltplänen meist mit einem Relaismodul gelöst. Relais haben den großen Vorteil, dass die Schaltkontakte galvanisch von der Steuerelektronik getrennt sind. Sie sind jedoch geräuschvoll, verschleißanfällig und können nicht zur Drehzahlregelung von Motoren eingesetzt werden.

Eine doppelte H-Brücke in einem „Silberling“-kompatiblen Gehäuse wäre als Relaisersatz sehr nützlich. Vor allem, wenn daran eine externe Gleichspannung für höhere Motorleistungen angeschlossen und Motoren mit geringer Leistung direkt aus der Standard-Versorgungsspannung versorgt werden können, die über die Metallstreifen an den Seiten des Silberlings zugänglich ist. Schön wäre es auch, wenn neben der 9-Volt-Silberling-Spannung auch die 5-Volt-TTL-Spannung für die Steuersignale genutzt werden könnte. Dann könnte das

Modul nämlich nicht nur mit allen Elektronikmodulen und Controllern verwendet werden, sondern auch mit anderen gängigen Mikrocontroller-Boards, bei denen 5-Volt-(TTL)-Signalpegel üblich sind.

### Ein „Silberling“ mit dem DRV8833

Zur Steuerung der Motoren in Bezug auf die Drehrichtung habe ich das Modul TB6612FNG in meinem „Zauberling“ [4] (ein Modul mit demselben Formfaktor und denselben Spannungspegeln wie die traditionellen „Silberlinge“) eingesetzt. Diese kleine Modulplatine enthält zwei H-Brücken und kann daher bei Bedarf zwei Gleichstrommotoren gleichzeitig mit einem konstanten Strom von 1,2 A (3,2 A Spitze) antreiben. Die Motorspannung darf dabei bis zu 15 V betragen. Pro H-Brücke können zwei Eingangssignale (IN1 und IN2) verwendet werden, um den Motor in einem von vier Funktionsmodi zu steuern: Rechtslauf, Linkslauf, Bremse oder Auslauf. Unabhängig von der mit IN1 und IN2 eingestellten Drehrichtung kann der STBY-Pin zum Ein- und Ausschalten des Motors verwendet werden.

Eine Variante dieses Chips, dessen angebotene Motorspannung allerdings nur maximal 11 V betragen darf, ist der DRV8833. Es sind mehrere Versionen von Platinen mit diesem Chip erhältlich. Pin-kompatible Varianten dieser Boards mit dem DRV8833 [5] und dem TB6612-Chip [6] sind in Abb. 1 dargestellt.

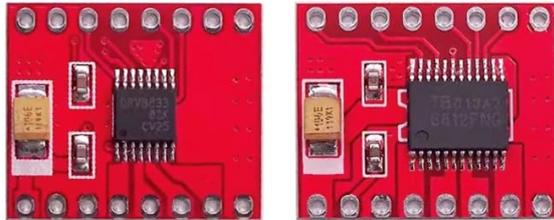


Abb. 1: Das Modul DRV8833 (links) ist pin-Pin-kompatibel zu dem umfangreicheren TB6612FNG-Modul (rechts)

Ein Motor ist eine sogenannte induktive Last. Sobald der angelegte Motorstrom abfällt, erzeugt er kurzzeitig eine entgegengesetzte Spannung. Zum Schutz der Halbleiter des Regelausgangs wird eine sogenannte Flyback-Diode benötigt. Da beide Module vier Leistungs-MOSFETS pro H-Brücke enthalten, deren (Substrat-)Dioden als Flyback-Dioden [7] fungieren können, ist ein solcher zusätzlicher Schutz bei Verwendung dieser H-Brücken-ICs nicht erforderlich.

Neben dem Unterschied in der maximalen Motorspannung gibt es einen weiteren zwischen den beiden Chips: Der TB6612FNG verfügt über einen eigenen PWM-Eingang für jede H-Brücke, der es den beiden Motorausgängen (A und B) ermöglicht, die Drehzahl separat über ein PWM-Eingangssignal zu steuern. Beim DRV8833 muss ein solches PWM-Signal an IN1 bzw. IN2 angelegt werden, während der andere Eingang auf LOW gehalten wird. Der Schaltplan des DRV8833-Moduls mit den Pegelumsetzern für 9-V-Eingangssignale ist in Abb. 3 dargestellt. Auf der Rückseite des Moduls befindet sich ein Anschluss für eine optionale externe Stromversorgung (Abb. 2). Es sind direkt zwei JST-Stecker vorgesehen, sodass diese

Stromversorgung auch mit kurzen Kabeln leicht durchgeschleift werden kann. Dabei sorgen die Schottky-Dioden D6 und D7 für eine automatische Auswahl zwischen den verfügbaren Versorgungsspannungen.

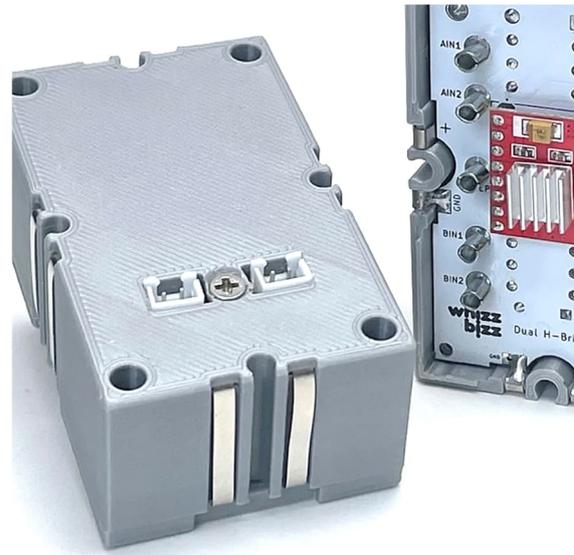


Abb. 2: Durchschleifmöglichkeit für die externe Motorspannung

Die Begrenzung auf eine maximale Motorspannung von 11 V ist bei normalen fischertechnik-Motoren kein Problem. Bei diesen Motoren bleibt auch der Strom meist (viel) kleiner als ein halbes Ampere. Beim Zauberling habe ich daher nie eine ernsthafte Wärmeentwicklung beobachtet. Trotzdem habe ich die Platine so gestaltet, dass ein kleiner Kühlkörper eingesetzt werden kann. Nach der Montage ragt dieser dann durch die Front.

Die besagten Platinen enthalten zwei komplette H-Brücken und sind nur 2×2 cm groß. Mit Hilfe von Leiterplattenstiften für die verschiedenen Ein- und Ausgänge wäre es ein Leichtes, zwei solcher Platinen in einem „Silberling“ unterzubringen. Um jedoch die Übersicht auf der begrenzten Frontfläche des Silberlings zu behalten, liegt es näher, das Homebrew-Modul mit nur einer H-Brücken-Platine auszustatten. Ich habe mich für die bereits beschriebenen PTN2-01-Löthülsen [8] entschieden, so dass auch

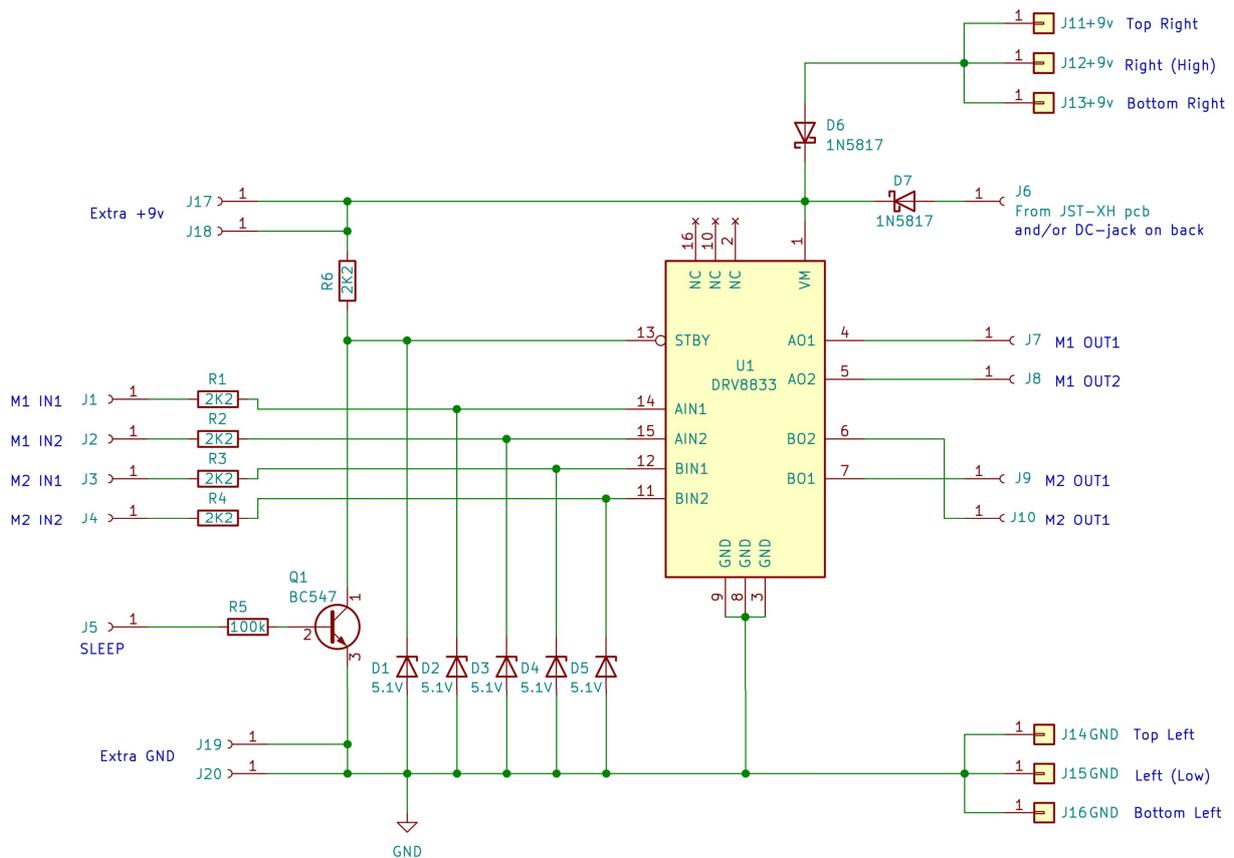


Abb. 3: Schaltplan des Moduls mit der DRV8833 H-Brücke

die traditionellen fischertechnik-Stecker verwendet werden können.



Abb. 4: Silberling-kompatibles Modul mit DRV8833

Das Dual-H-Bridge-Modul in Abb. 4 erfüllt die Erwartungen mehr als deutlich. Aufgrund der Schaltlogik der Steuereingänge

des verwendeten DRV8833-Chips ist es jedoch nicht möglich, beide Ausgänge einer H-Brücke gleichzeitig und unabhängig voneinander zu versorgen. Die H-Bridge-Funktion ist für den ungehemmten Motorauslauf deaktiviert, wenn beide Eingänge IN1 und IN2 auf LOW sind. Wenn IN1 und IN2 gleichzeitig auf HIGH gesetzt werden, werden beide Ausgänge und damit die Motorwicklung kurzgeschlossen, um den Motor zu bremsen. Diese Art der Bremsung, der „Schnellstopp“, ist bereits in den Büchern zu hobby 3 [9] und hobby 4 [10] beschrieben. Aufgrund dieser Bremsfunktion folgen die Ausgangspegel jedoch nicht rein allen Pegeln des jeweiligen Steuereingangs. Die beiden Ausgänge jeder H-Bridge können daher nicht völlig unabhängig voneinander für Verbraucher, die nur mit einer Stromrichtung angesteuert werden sollen, genutzt werden. Diese Funktionalität war jedoch mit dem im ersten

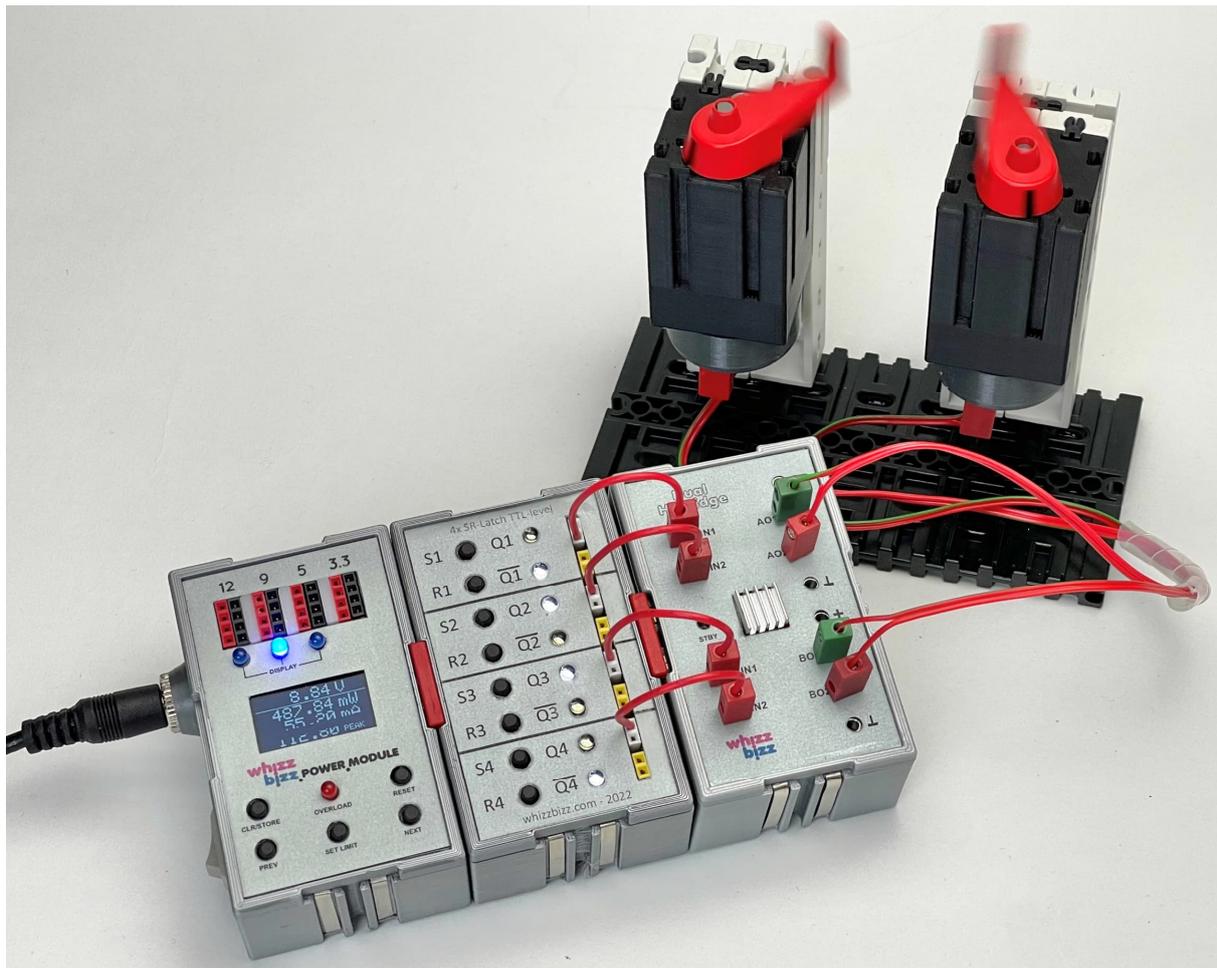


Abb. 5: Testaufbau mit zwei Motoren für das Modul DRV8833

Beitragsteil beschriebenen Treibermodul schon möglich.

### Ein „Silberling“ mit dem L298N

Der im vorigen Abschnitt beschriebene „Nachteil“ kann durch die Wahl eines anderen H-Brücken-ICs behoben werden. Ich beschloss, ein zweites Modul mit dem L298N zu bauen [11]. Dieser weit verbreitete H-Brücken-Chip wird seit Jahren für alle möglichen Anwendungen eingesetzt und verfügt nicht über die Bremslogik des DRV8833 und des TB6612 (siehe oben). Wenn also IN1 und IN2 beide HIGH sind, sind auch die entsprechenden Ausgänge OUT1 und OUT2 einfach HIGH. Dies wird normalerweise als „langsame Bremse“ bezeichnet. Auch hier stoppt der Motor recht schnell, aber nicht so abrupt wie bei einem

Kurzschluss der Motorwicklung, wie es beim DRV8833 möglich ist. Ein Vorteil ist jedoch, dass durch dieses Verhalten die vier Ausgänge des L298N-Chips auf Wunsch jeweils als unabhängige Treiberausgänge genutzt werden können; also nicht nur als zwei volle H-Brücken zur Ansteuerung von zwei Motoren, sondern auch als Kombination aus einer H-Brücke und zwei unabhängig genutzten Treiberausgängen oder sogar als vier unabhängige Ausgänge.

Außerdem hat der L298N den Vorteil, dass die maximal angebotene Motorspannung sehr viel höher sein kann (bis zu 48 Volt), was bedeutet, dass der Strom und die Wärmeentwicklung bei Verwendung eines stärkeren Motors niedriger bleiben. Trotzdem kann auf dem L298N ein viel größerer Kühlkörper montiert werden. Alles in allem

erhält man auf diese Weise eine etwas industriellere Lösung, die mit den bekannten fischertechnik-Motoren nicht die geringsten Schwierigkeiten hat und auch den Einsatz von industriellen 24-Volt-Motoren erlaubt.



Abb. 6: L298 auf Platine in einem Silberling-Gehäuse

Der praktische Aufbau dieses zweiten Moduls wurde ein wenig verändert. Dadurch sieht dieses Modul anders aus als die vorherigen. Die geschlossene Frontplatte mit Beschriftung und angelöteten Steckerbuchsen entfiel. Um die Verwendung der fischertechnik-Stecker zu erleichtern, habe ich mich für 2,5-mm-Löcher ent-

schieden und alle Ein- und Ausgänge mit Dupont-Stiftleisten dupliziert. Die beiden „Enable“-Eingänge können so einfach durch Setzen einer Steckbrücke auf HIGH gezogen werden, wenn ein separates Steuerungssignal zum Ein- und Ausschalten der Motoren nicht benötigt wird.

Außerdem habe ich einen JST-Stecker und separate Anschlüsse für die Motorspannung hinzugefügt. An die Oberseite des Gehäuses kam ein DC-Anschluss für einen externen DC-Adapter, so dass die Motorspannung bei Bedarf leicht extern bezogen werden kann.

Solange keine externe Motorspannung benötigt wird, kann die Motorspannung der Ausgänge über eine Steckbrücke auch direkt von der normalen Silberling-Stromversorgung aus den Metallleisten an der Seite des Moduls bezogen werden.

Diese Steckbrücke sollte entfernt werden, wenn eine externe Motorspannung genutzt wird. Für die 5-V-Versorgungsspannung des Chips selbst befindet sich ein kleiner Spannungsregler auf der Platine. Dieser begrenzt die optional angebotene externe Versorgungsspannung auf maximal 35 V. Für die bereits erwähnten 24-V-Motoren ist das mehr als ausreichend. Abb. 7 zeigt das Schaltbild.

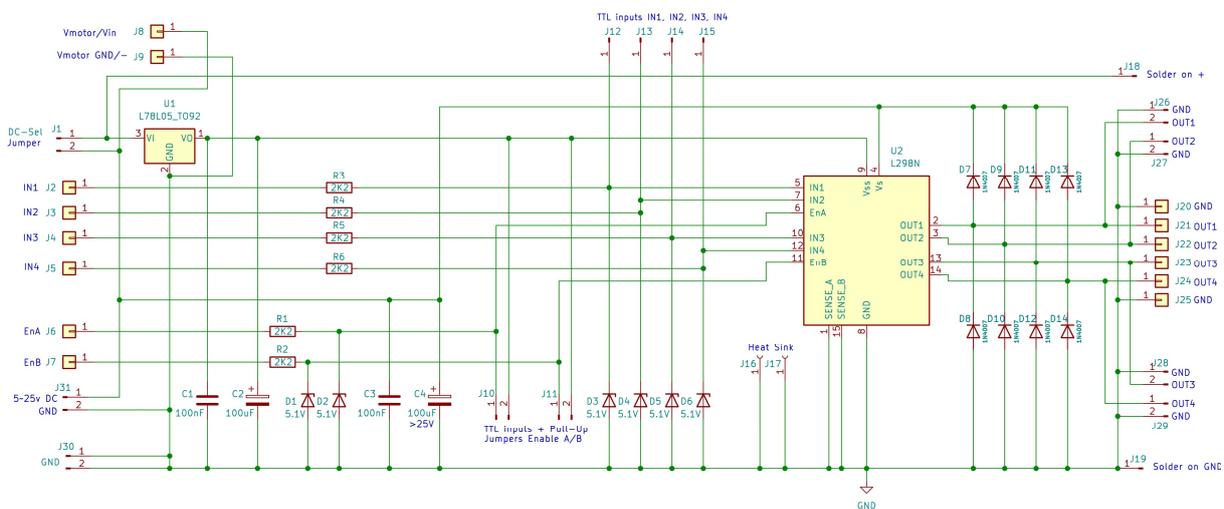


Abb. 7: Schaltplan mit der L298N H-Brücke

Trotz dieser großen optischen Unterschiede ist das Modul zu 100% kompatibel zu den verschiedenen (TXT-)Steuerungsvarianten von fischertechnik und den herkömmlichen Elektronikbausteinen. Mit einem einzigen Modul lassen sich also mehrere der bekannten Relaisbausteine ersetzen.

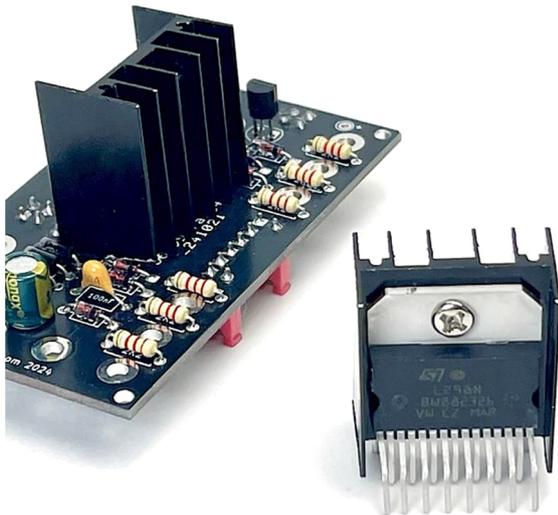


Abb. 8: Die doppelte H-Brücke L298N



Abb. 9: Die Rückseite des Moduls mit einer Öffnung für den Kühlkörper

## Eine praktische Anwendung

In einem der hobby-4-Bücher [12] habe ich ein nützliches Modell zum Testen der H-Bridge-Module gefunden. Der Aufbau dieses Modells ist in Abb. 10 dargestellt. Ein „Werkstück“ (Details in Abb. 12) wird auf einen Balken gelegt, der durch einen Mini-Motor in beide Richtungen bewegt werden kann. Danach wird es automatisch zwischen den beiden Fotowiderständen positioniert.

Der Abstand zwischen den beiden L-förmigen Lichtleitern beträgt genau 30 mm. Wenn das Werkstück nicht schon direkt rein mittig platziert ist, blockiert es zunächst einen der beiden lichtempfindlichen Widerstände. Diese Blockade kann durch Verschieben des Balkens in die richtige Richtung aufgehoben werden. Dabei „lesen“ die Grundbausteine die Lichtsensoren aus und steuern die Relaisbausteine, die bestimmen, ob und in welche Richtung sich der Träger zu bewegen beginnt. So gesteuert, bewegt der Mini-Motor M1 (rechts im Bild) den Balken mit dem Werkstück in Richtung des Mittelpunkts zwischen den Sensoren.

Sobald schließlich beide LDRs wieder leuchten, befindet sich das Werkstück (27,5 mm breit) genau in der Mitte und die Bewegung stoppt. Die Anfangsrichtung der Bewegung des Balkens hängt also davon ab, welcher Sensor zuerst blockiert wird, und der Motor muss sich in beide Richtungen drehen können. Eine schöne Aufgabe für eine H-Brücke.

Das Modell enthält einen zweiten Motor (den grauen „klassischen“ Motor links in Abb. 10), der eine Welle durch ein Loch im Werkstück treibt, sobald dieses genau in der Mitte zwischen den beiden Lichtleitern zum Stillstand gekommen ist. Eine Drehung dieses zweiten Motors M2, auf dem eine Nockenscheibe (31038) montiert ist, drückt dann den „Bohrer“ nach außen. Im Originalmodell dreht sich dieser „Bohrer“-Motor einfach, sobald die beiden lichtempfindlichen Widerstände (wieder) mit dem Licht

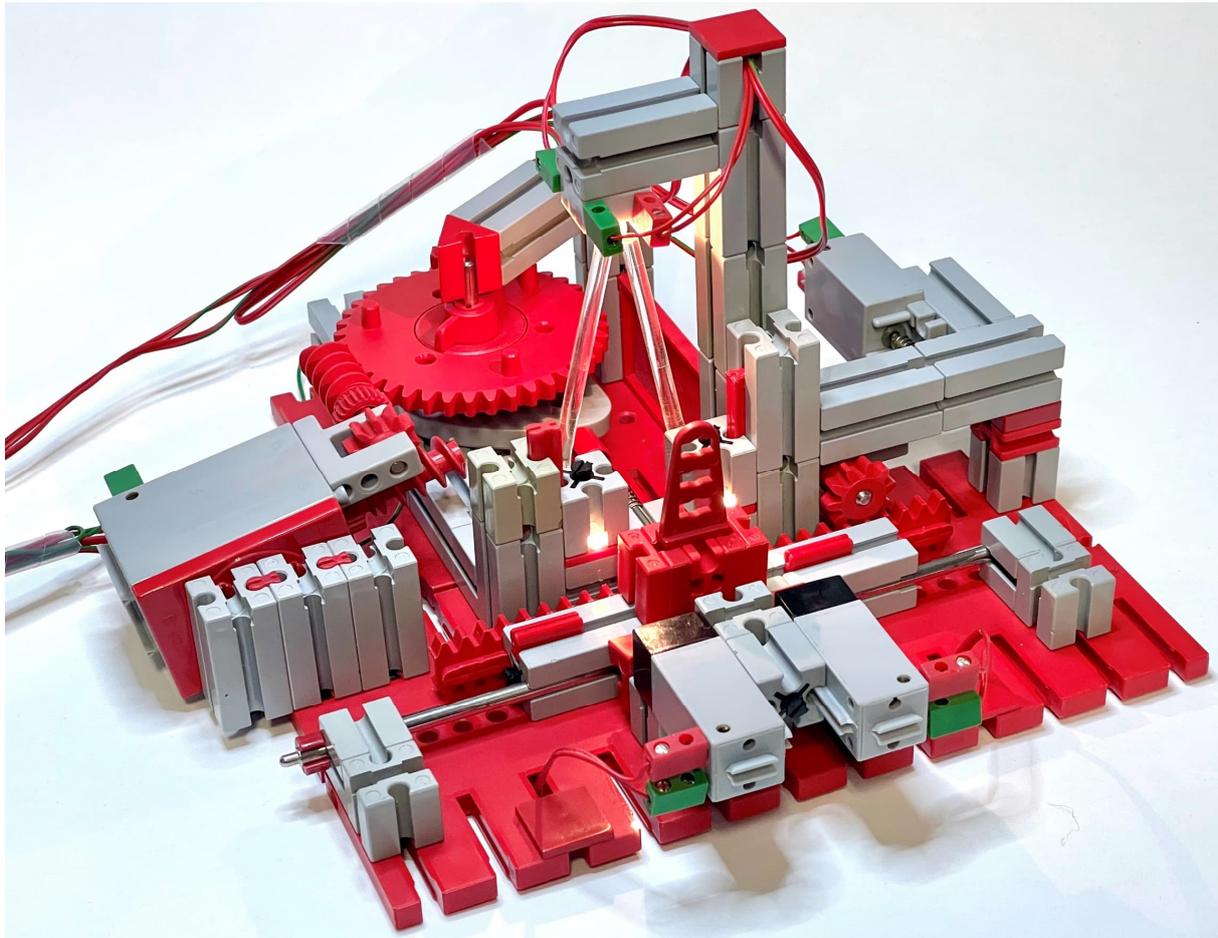


Abb. 10: Modell zur automatischen Positionierung eines Werkstücks

der Glühbirne bestrahlt werden. Im Originaltext wird es dem Konstrukteur als Herausforderung überlassen, die Anlage so zu perfektionieren, dass nur eine einzige Umdrehung (Arbeitshub) ausgeführt wird, nachdem das Werkstück in der Mitte vor dem Ausstoßer positioniert wurde.

Im Text wird dazu die Idee gegeben, die gesamte Steuerung und damit den Prozess zurückzusetzen. Ich habe es mit einem UND-Gatter und einem Flip-Flop-Baustein gelöst. Dann ist kein manueller Reset mehr nötig und der Motor M2 dreht sich jedes Mal nur eine Umdrehung, wenn das „Werkstück“ positioniert ist. Der Originalschaltplan mit den Relaisbausteinen ist in der Originalbeschreibung zu finden (Abb. 55.1 in der Originaldokumentation), der alternative Schaltplan mit der oben beschriebenen selbstgebaute H-Brücke „Silberling“ ist in

Abb. 14 dargestellt. Die „Enable“-Eingänge ENA und ENB sollten in diesem Schema immer aktiviert sein, weshalb diese mit Steckbrücken an „+“ angeschlossen sind.

Im Gegensatz dazu wurde die Steckbrücke Vm genau deshalb entfernt, damit ein externer Gleichstromadapter zur Stromversorgung der Motoren angeschlossen werden kann. Bis dieser angeschlossen ist, kann die Steuerung mit der optionalen LED-Anzeige getestet werden, die später besprochen wird.

Um eine Lichtunterbrechung zu erkennen werden die beiden Fotowiderstände FW1 und FW2 jeweils an einen eigenen Grundbaustein angeschlossen. Sobald kein Licht mehr auf einen Fotowiderstand fällt, ist der nicht invertierte Ausgang des entsprechenden Grundbausteins LOW oder „0“. Da die

„Silberlinge“ mit negativer Logik arbeiten, beträgt die Ausgangsspannung dann etwa 9 V. Da der H-Brückenbaustein mit positiver Logik arbeitet, können diese Signale direkt als HIGH- bzw. „1“-Signal für die Drehrichtungseingänge IN1 und IN2 verwendet werden. Der Motor M1 dreht sich dann in die entsprechende Richtung und positioniert das Werkstück schließlich in der Mitte zwischen den Fotowiderständen. An diesem Punkt werden beide Sensoren wieder mit Licht beleuchtet und Motor M1 stoppt. Da das Werkstück nun positioniert ist, gibt das AND/NAND-Modul einen Takt an das Flip-Flop. Dadurch wird der Motor M2 aktiviert. Nach einer vollen Umdrehung aktiviert dieser Motor einen Schalter, der das Flip-Flop zurücksetzt und den Motor wieder anhält.

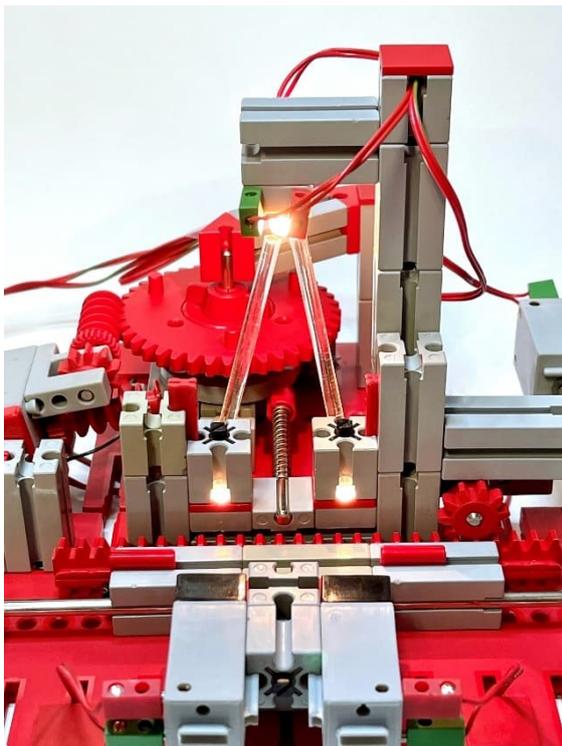


Abb. 11: Die beiden Lichtleiter mit den Fotowiderständen

Die Originalanleitung ist nicht sehr klar, was die Konstruktion des „Werkstücks“ betrifft. Es wird ein einfacher Baustein 30 vorgeschlagen, ohne Mittelbohrung. Das hat zur Folge, dass der nach außen stoßende „Bohrer“ das Werkstück nur vom Balken

stößt (oder das Modell klemmt, wenn dies nicht sofort gelingt). Außerdem beträgt die Gesamtbreite aufgrund der schwarzen Befestigungsnocken auf einer Seite des Bausteins mehr als 30 mm. Dadurch kann sich die Bewegungsrichtung immer wieder unruhig korrigieren, so dass das „Werkstück“ im schlimmsten Fall nie zum Stillstand kommt. Ich habe das Problem gelöst, indem ich ein etwas schmaleres „Werkstück“ (Abb. 12) angefertigt habe, das in der Mitte auch ein Loch hat, sodass es nach dem Positionieren von der nach außen stoßenden Achse „durchstoßen“ werden kann. In der Praxis erweist sich die Positionierung dieses Werkstücks als recht präzise.

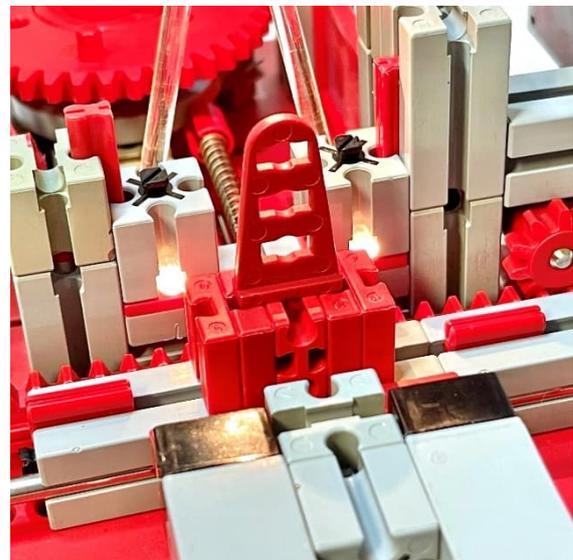
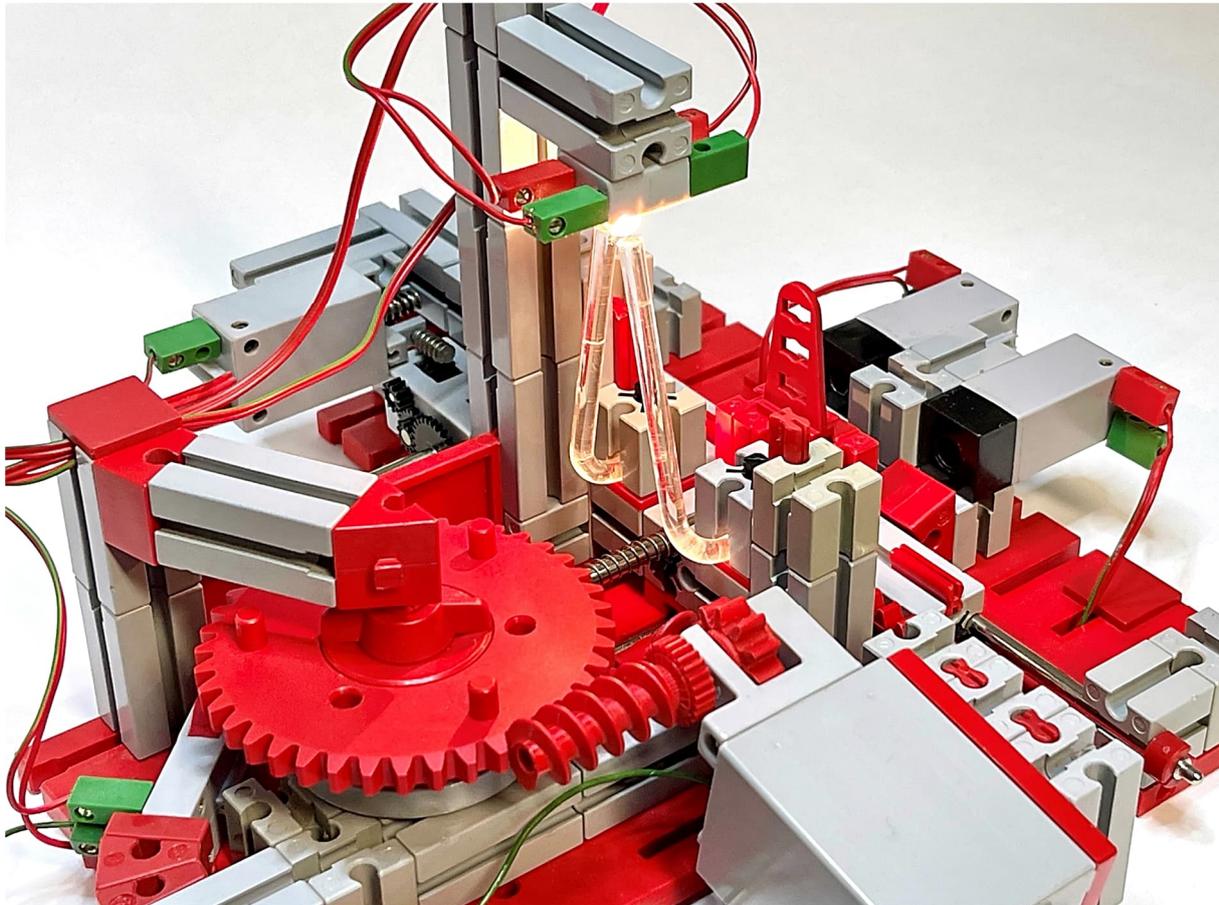


Abb. 12: Detail des „Werkstücks“ auf dem beweglichen Positionierbalken

Abb. 16 zeigt einen Ausschnitt des Moduls, bei dem der H-Brücken-„Silberling“ die beiden Relaisbausteine in der Originalschaltung ersetzt. Hier sieht man auch, wie die „Enable“-Eingänge mit einem kleinen Brückenstecker auf das benachbarte „+“ der Dupont-Schiene aktiviert werden. Das spart wiederum Verdrahtungs- und Steckerarbeiten. Auf der Ausgangsseite sind die Dupont-Verbindungsleisten ebenfalls sehr praktisch. Dort befindet sich eine einfache Anzeige mit vier LEDs. Dieses Extra ist natürlich nicht notwendig, aber sehr praktisch, um beim Einstellen der Steuerung die



*Abb. 13: Rückansicht mit dem Druckknopf unten links, der den „Ausstoßer“ nach seiner Drehung stoppt*

verschiedenen Motorausgänge im Auge zu behalten. Die Motoren brauchen dann beim Testen noch nicht angeschlossen zu werden.

## Fazit

Funktional haben beide H-Brücken-Module viele Gemeinsamkeiten. Das Modul mit dem DRV8833 orientiert sich optisch mehr an den traditionellen Silberlingen, das Modul mit dem L298N kann jedoch höhere Motorspannungen verarbeiten. Inzwischen hat die Praxis gezeigt, dass die Module ein hervorragender Ersatz für die bekannten fischertechnik-Relaisbausteine sind. Ein großer Vorteil ist, dass die Verdrahtung und die Steuerung der Drehrichtung bei Verwendung einer H-Brücke wesentlich einfacher ist. Durch die getrennten Eingänge für die beiden Drehrichtungen und eine klare Trennung zwischen Eingangs- und

Ausgangsseite des Moduls bleibt die Übersicht gewahrt; eine falsche Drehrichtung lässt sich schneller umkehren und die Gefahr von Kurzschlüssen aufgrund von Verdrahtungsfehlern ist deutlich geringer. In dem in Abb. 10 gezeigten Modell werden die separaten „Enable“-Eingänge zum Schalten des Motors noch nicht verwendet. In komplexeren Schaltschemata, bei denen Drehrichtung und Ein- und Ausschalten des Motors getrennte Funktionen sind, spart dies jedoch einen weiteren Relaisbaustein. Ein weiterer Vorteil ist, dass die vielen Anschlussmöglichkeiten den Anschluss einer externen Motorspannung sehr einfach machen.

Auf meiner Website habe ich eine Seite über die Experimente mit dem DRV8833 [13] und den L298N H-Brücken [14] erstellt. Das Anwendungsbeispiel ist sepa-

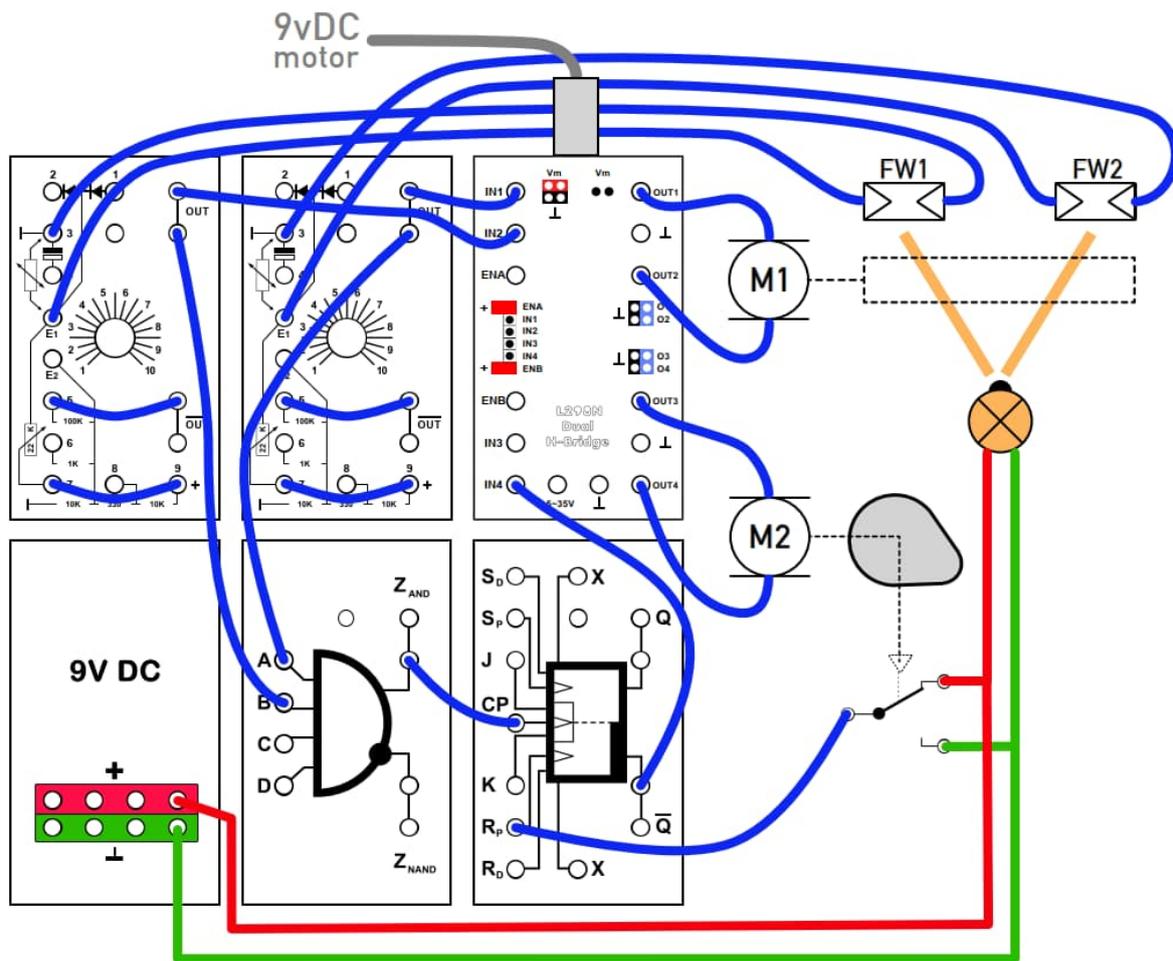
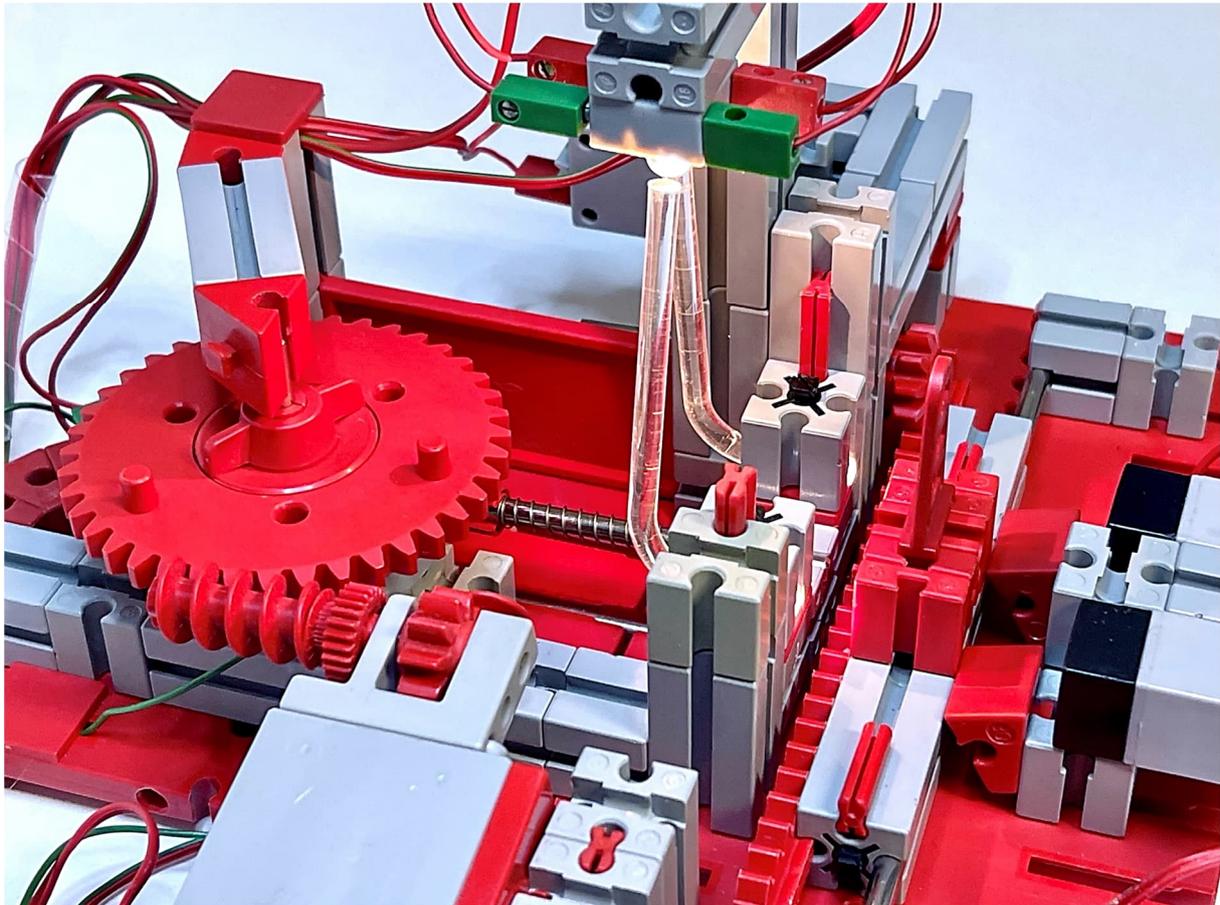


Abb. 14: Schaltplan mit zwei Grundbausteinen, einem AND/NAND-Gatter, Flin-Flon und donnelter H-Brücke

rat dokumentiert [15]. Der Selbstbau solcher Elektronikmodule ist vielleicht nicht jedermanns Sache, aber wenn ihr Interesse an komplett gebauten Modulen, Bauteilen, der losen Platine oder den Dateien für den 3D-Druck des Gehäuses haben, helfe ich gerne weiter.

## Quellen

- [1] Wikipedia: [Brückenschaltung](#).
- [2] Thomas Magin: *Die Kunst der H-Brücke: Let's Rock*. [ft:pedia 2/2022](#), S. 104–118.
- [3] Thomas Magin: *Die Kunst der H-Brücke: ... and roll!*. [ft:pedia 3/2022](#), S. 45–52.
- [4] Arnoud van Delden: *Der Zauberling (Teil 4): Die Weiterentwicklung*. [ft:pedia 1/2022](#), S. 71–79.
- [5] Texas Instruments: *DRV8833 Dual H-Bridge Motor Driver*. [Datenblatt](#).
- [6] Toshiba: *TB6612FNG Driver IC for Dual DC motor*. [Datenblatt](#).
- [7] Wikipedia (englisch): [Flyback diode](#) (Freilaufdiode).
- [8] Arnoud van Delden: *Alternative Verbindungslösungen für Stecker und Buchsen (Teil 2)*. [ft:pedia 3/2023](#), S. 54–62.
- [9] Fischer-Werke: *Schnellstop des Motors*. In *hobby 3, Band 1*, Fassung von [docs.fischertechnikclub.nl](#), S. 22.



*Abb. 15: Ansicht des Motors M2, der den „Ausstoßer“ nach der Positionierung des Werkstücks bewegt*

- [10] Fischer-Werke: *Exzenterpresse mit Lichtschrankenschutz*. In *hobby 4, Band 1* auf [ft-datenbank.de](http://ft-datenbank.de), S. 48.
- [11] STMicroelectronics: *L298 Dual full-bridge driver*. [Datenblatt](#).
- [12] Fischer-Werke: *Automatische Positionierung*. In *hobby 4, Band 3* auf [docs.fischertechnikclub.nl](http://docs.fischertechnikclub.nl), S. 54-57.
- [13] Arnoud van Delden: *The H-Bridge as a relay alternative*. Projektseite auf [whizzbiz.com](http://whizzbiz.com).
- [14] Arnoud van Delden: *A 'Silberling' with the L298N*. Projektseite auf [whizzbiz.com](http://whizzbiz.com).
- [15] Arnoud van Delden: *A practical application for the H-Bridge*. Projektseite auf [whizzbiz.com](http://whizzbiz.com).

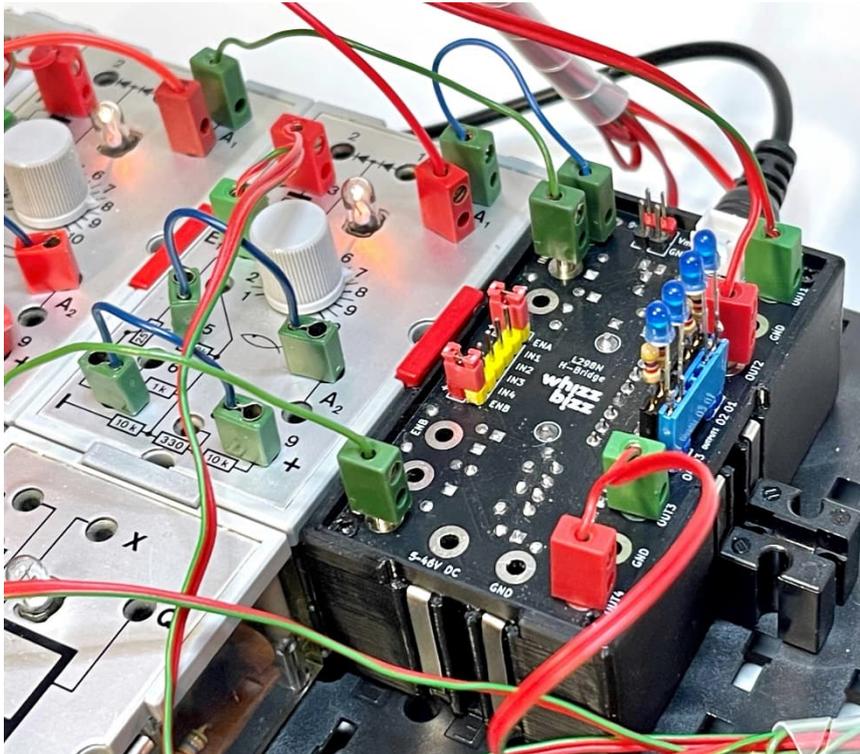


Abb. 16: Das H-Bridge-Modul steuert nun beide Motoren des Modells

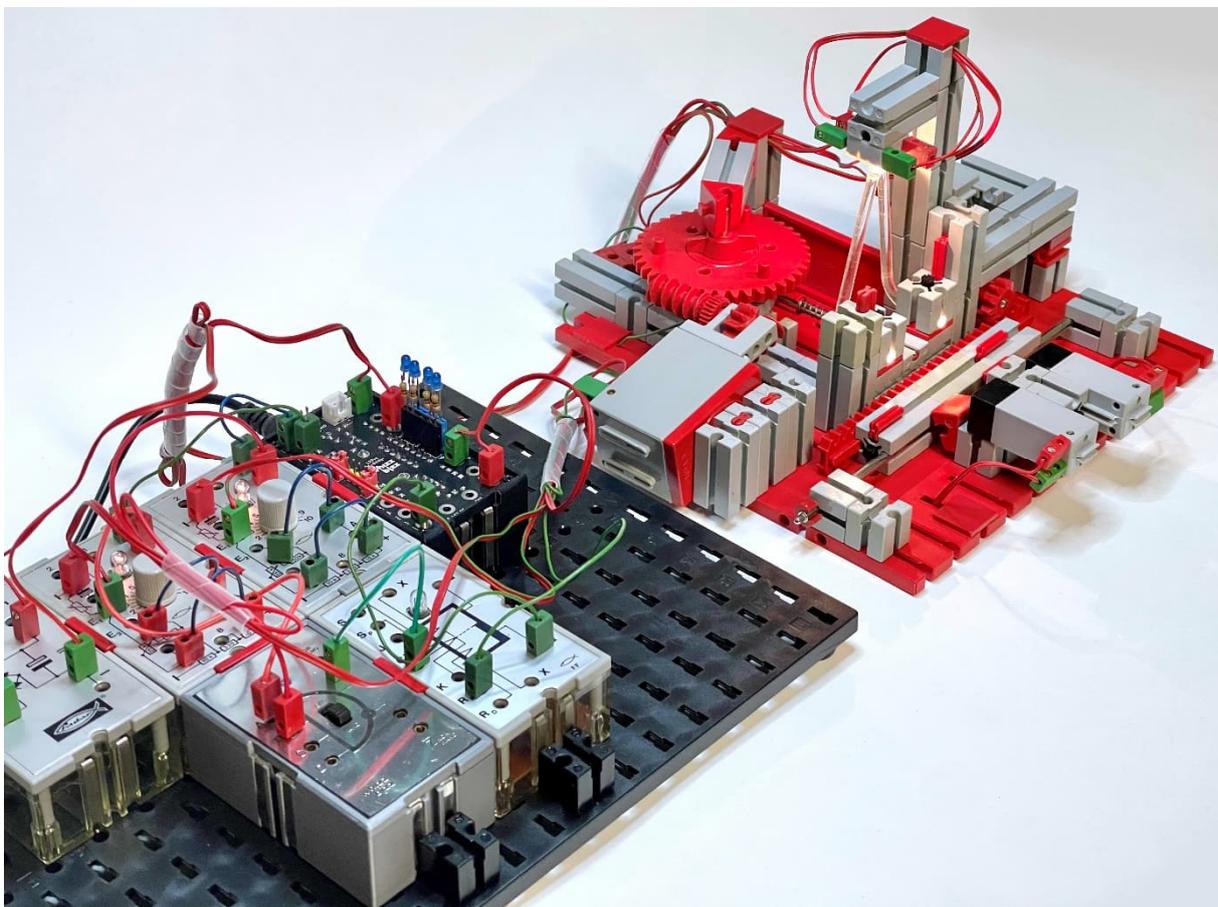


Abb. 17: Das Modell mit der mit Silberlingen gebauten Motorsteuerungselektronik

Buchvorstellung

## Steuern und Regeln für Heim und Industrie mit LOGO! 8

Florian Schäffer

*Mit fischertechnik lassen sich realistische Modelle von Industrieanlagen erstellen. Wie sieht es aber mit der Programmierung solcher Modelle aus? Es gibt den eher spielerischen Ansatz mit den Controllern von fischertechnik oder Ansätze, um Arduino und ähnliche Mikrocontroller mit einer Hochsprache wie C/C++ o. ä. zu benutzen. Von fischertechnik selbst gibt es Modelle für deutlich über zehntausend Euro, die dann mit einer SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) S7 von Siemens gesteuert werden – ganz sicher nichts für private Hobbyanwender oder junge Menschen.*

Die Nutzung einer SPS [1] ist ein charmanterer Ansatz: Im Gegensatz zu den anderen Steuerungen handelt es sich dabei um echte Industrietechnik. Wer den Umgang übt und Freude daran entwickelt, hat sich zusätzlich sinnvolle Grundlagen für einen möglichen Berufseinstieg oder das Studium angeeignet. Zudem eignet sich eine SPS ideal dafür, kleine Steuerungsaufgaben fürs eigene Heim oder den Betrieb zu entwickeln. Controller von fischertechnik oder Arduinos lassen sich nicht gesetzeskonform mit der Hauselektrik etc. verbinden oder in einem Schaltschrank installieren – im Gegensatz zur SPS für die Hutschienmontage.

Für den Einstieg muss es auch gar keine teure SPS sein, sondern die kleinen Varianten der Siemens Logo! 8 sind ideal. Es handelt sich dabei um vollwertige Steuerungen mit Mikrocontroller, Display, analogen und digitalen Ein- und Ausgängen (teilweise über Relais für 230 V) sowie Netzwerkfähigkeit. Die neue Version 8.4 unterstützt sogar MQTT [2, 3]. Das Starterkit mit Software und Netzteil kostet nicht mehr als der aktuelle TXT-Controller.



Abb. 1: Buchdeckel

Programmiert wird die Steuerung mit der grafischen Benutzeroberfläche Logo!Soft Comfort. In dieser können Funktionspläne mit grafischen Symbolen für Logikgatter zusammengestellt werden: Die ganze Programmierung von speicherprogrammierbaren Steuerungen basiert auch heute noch

auf Grundfunktionen wie Und, Oder, Flip-flop, Zählern, Zeitrelais usw. Diese werden mit Signalleitungen verbunden. So entstehen komplexe Schaltprogramme, die auch von Kindern leicht erstellt werden können, ohne dass eine neue Programmiersprache erlernt werden muss.

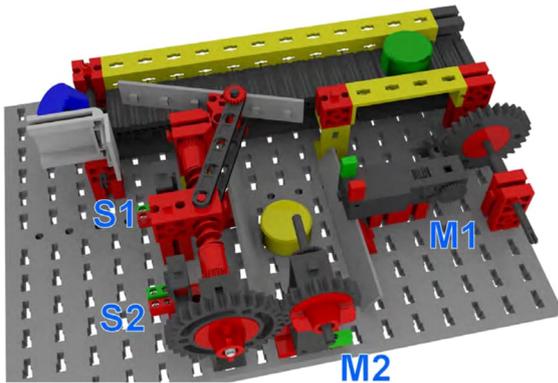


Abb. 2: Beispielmodell „Fließband mit zufälliger Probenentnahme“ aus dem Buch

Ist das Grundprinzip erst einmal verstanden kann die Steuerung fast jede Aufgabe übernehmen und sogar übers Internet kontrolliert oder beeinflusst werden. Allerdings wird bisher gerade der Einstieg nicht anfängerfreundlich gestaltet: Die Anleitung von Siemens ist keine große Hilfe und auch die Sekundärliteratur bietet oft keine Hilfe für die ersten Schritte und wendet sich primär an Techniker.

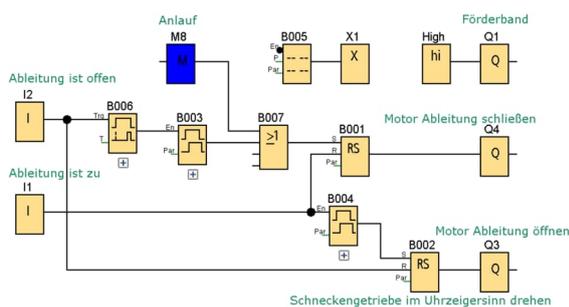


Abb. 3: SPS-Plan für das Fließband

Hier setzt das Buch „Steuern und Regeln für Heim und Industrie mit Logo! 8“ [5, 6] an: Anhand von einfachen bis hin zu komplexen fischertechnik-Modellen werden die Inbetriebnahme und die Erstellung von

Funktionsplänen gezeigt. Zu jeder Aufgabe gibt es ein Modell, das im durchgängig farbigen Buch abgebildet ist, einen Schaltplan und auch eine Darstellung der Verdrahtung in der Visualisierungsanwendung *Fritzing* [4]. Die Grafiken der Beispielmuster sind mit dem fischertechnik Designer erstellt und liegen als Dateien vor, so dass der Nachbau vereinfacht wird.

Das Buch verbindet die drei Themen Modellbau, Elektronik und Steuerung, und es macht Spaß, die Anlagen nachzubauen und dann zum Leben zu erwecken. Spielerisch und praxisnah wird so der Einsatz der SPS gelernt. Der Umgang mit 24 V (SPS) und 9 V (fischertechnik) ist absolut ungefährlich, stellt aber keine Einschränkung dar, denn es gibt auch SPS für 230 V, um reale Anlagen zu steuern, und der Umstieg ist nahtlos möglich. Mit zusätzlichen Modulen und Relais sind dann auch große Steuerungsaufgaben realisierbar. Die Verknüpfung von fischertechnik und professioneller speicherprogrammierbarer Steuerung ist es auf jeden Fall wert, weiter erkundet zu werden.

## Quellen

- [1] Wikipedia: [Speicherprogrammierbare Steuerung](#).
- [2] MQTT.org: [MQTT: The Standard for IoT Messaging](#).
- [3] Wikipedia: [MQTT](#).
- [4] Fritzing GmbH: [fritzing](#). Auf [fritzing.org](#).
- [5] Florian Schäffer: *Steuern und Regeln für Heim und Industrie mit LOGO! 8*. ISBN 9783754348796, 2022.
- [6] Florian Schäffer: *Steuern und Regeln für Heim und Industrie mit Logo! 8*. Leseprobe auf [blafusel.de](#).

Computing

# Open Roberta mit dem TXT 4.0

Axel Chobe

Seit kurzem gibt es auf der Webseite von fischertechnik einen Hinweis auf die grafische Programmierplattform „Open Roberta Lab“ [1]. Interessant ist dabei auch der Hinweis auf Künstliche Intelligenz und Neuronale Netze. In diesem Beitrag werden die Einbindung des TXT 4.0 vorgestellt und die ersten Schritte erläutert.

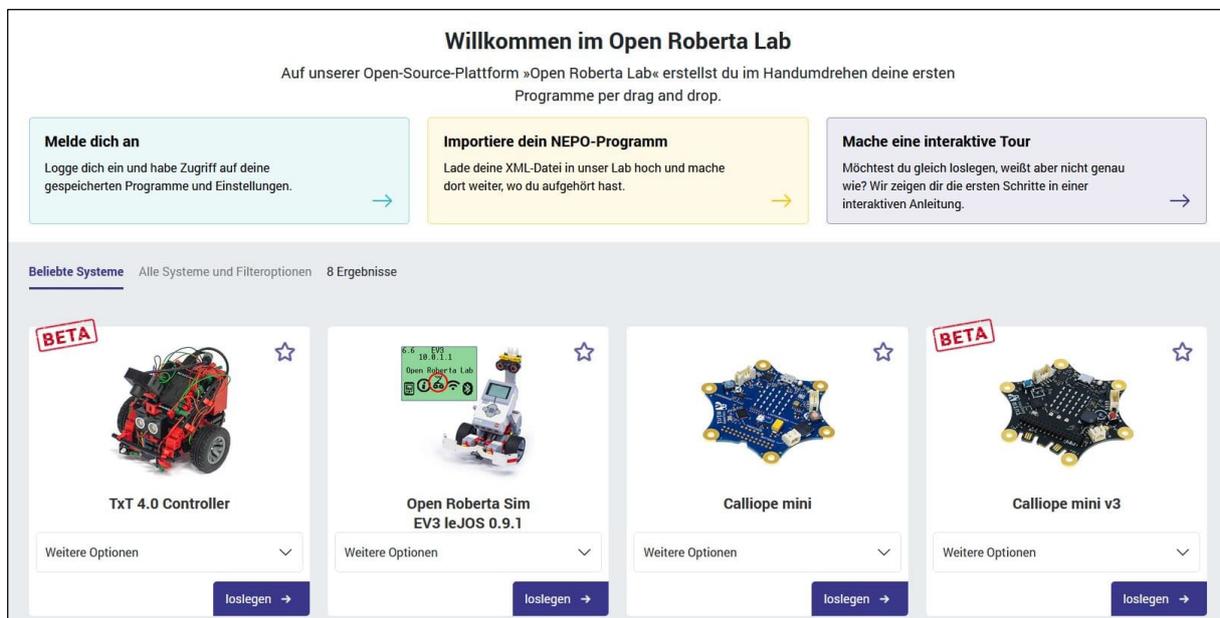


Abb. 1: Open Roberta Lab

## Einbindung des TXT 4.0

Die Programmieroberfläche „Open Roberta Lab“ wird im Browser unter der URL <https://lab.open-roberta.org/> gestartet (Abb. 1). Durch Klick auf „TxT 4.0 Controller“ wird das Programmierfenster geöffnet.

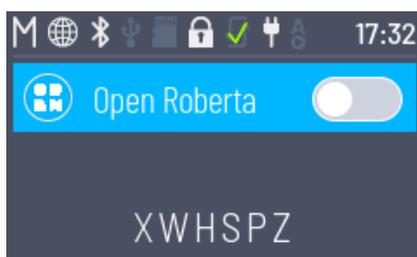


Abb. 2: Einstellung am TXT 4.0

Bevor eine Verbindung mit dem TXT 4.0 hergestellt werden kann, muss am TXT 4.0 unter Einstellungen „Open Roberta“ aktiviert werden (Abb. 2). Diese Option gibt es seit dem Release 3.17.

Außerdem sollte der sechsstellige Code notiert werden. Über den Menüpunkt „Roboter/Verbinden“ öffnet sich das Fenster, in dem der sechsstellige Code vom TXT 4.0 eingegeben werden muss (Abb. 3).

Wenn das funktioniert hat, kann unter „Roboter/Info“ der Name des eigenen Controllers ausgelesen werden (Abb. 4).



Abb. 3: Verbinden mit dem TXT 4.0



Abb. 5: Status bei Programmausführung

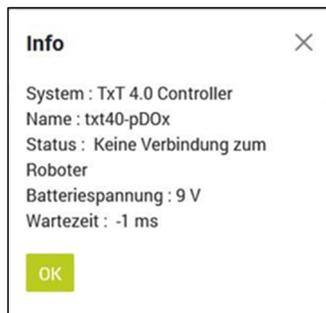


Abb. 4: Anzeige des verbundenen TXT 4.0

Sobald ein Programm übertragen wurde, erscheint der Status, dass das Programm ausgeführt wird (Abb. 5).

Wie auch bei ROBO Pro Coding muss zuerst festgelegt werden, welcher Controller angeschlossen ist. Nach dem Öffnen wird eine Standardbeschaltung angezeigt (Abb. 6). Am besten ist es, zunächst alle Elemente zu löschen und dann die aktuelle Beschaltung einzutragen. Dazu werden die vorhandenen Blöcke mit der rechten Maustaste markiert und im folgenden Menü „Blöcke löschen“ ausgewählt.

Anschließend können die eigenen Aktoren und Sensoren von der linken Seite hereingezogen und beschriftet werden.

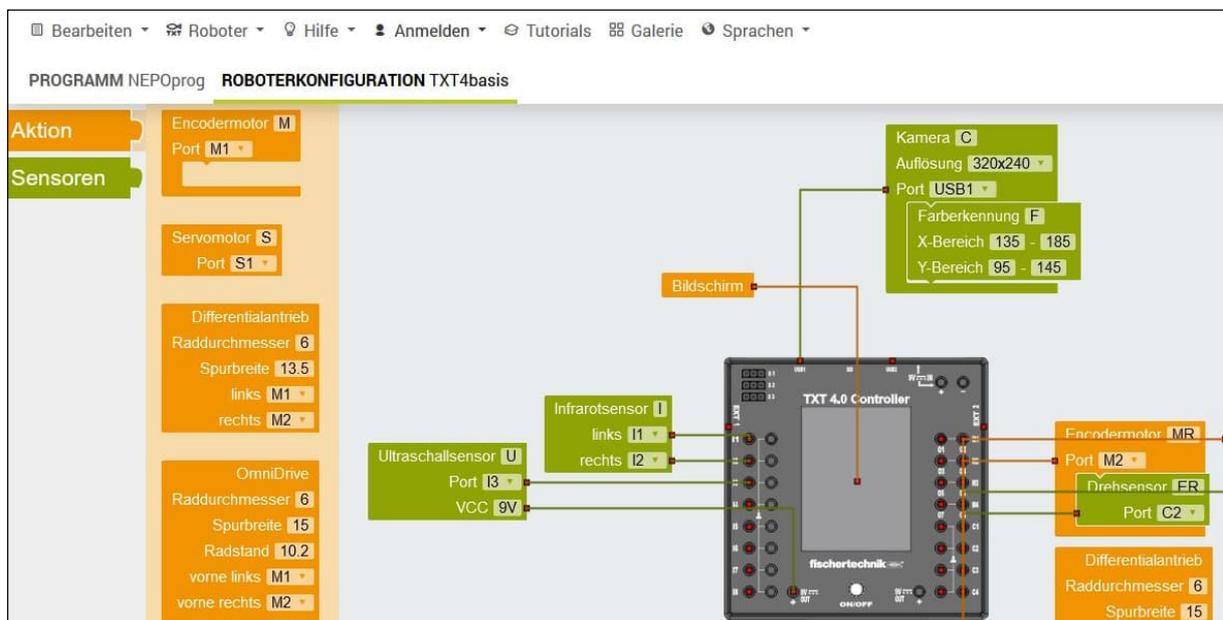


Abb. 6: Beschaltung des TXT 4.0

Im Beispiel in Abb. 7 wurden nur ein Taster (M) an Port I1 und eine LED (L01) an Port O1 angeschlossen. Zur besseren Übersicht ist es wichtig, die Bezeichnungen der Elemente eindeutig zu wählen.

Basierend auf der vorhandenen Hardware wurde nun ein einfaches Programm geschrieben (Abb. 8), das abhängig von der gedrückten Taste eine LED mehrmals blinken lässt.

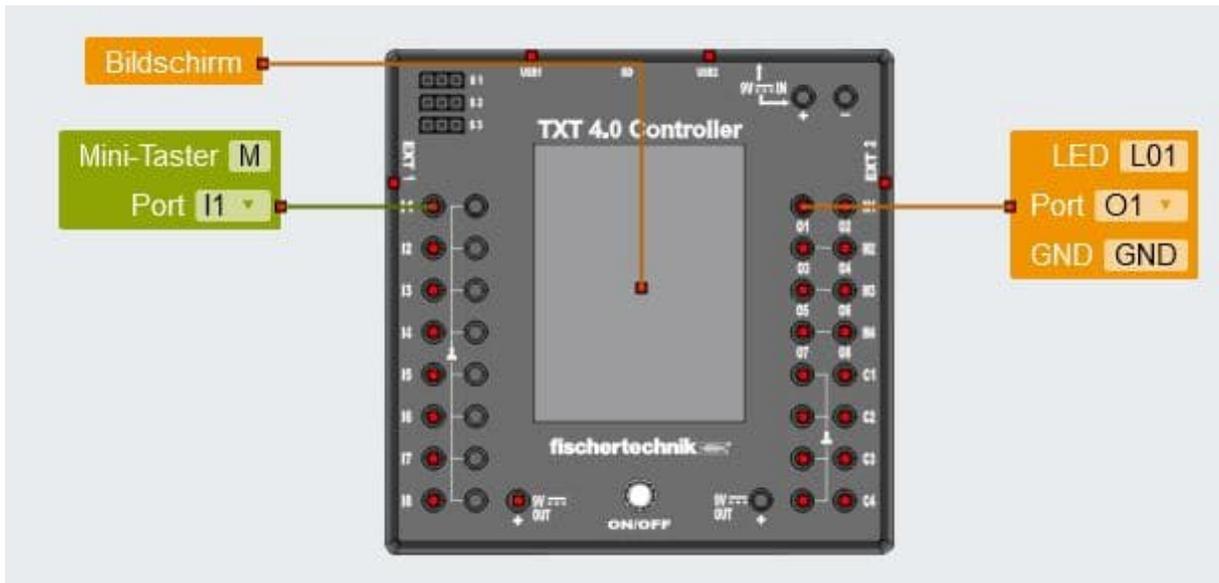


Abb. 7: Beispielkonfiguration

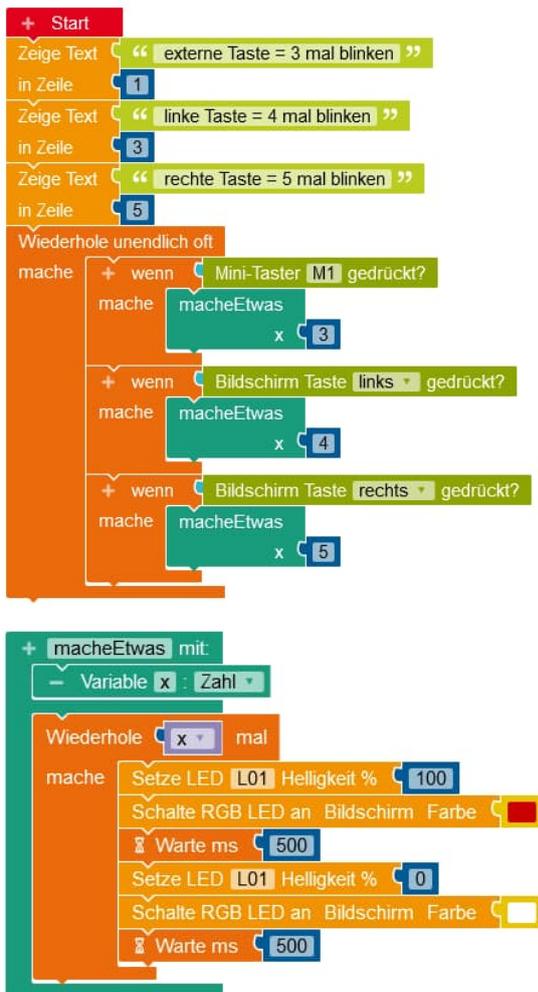


Abb. 8: Einfaches Beispielprogramm

Beim Setzen der Blöcke ist zu beachten, dass es zwei Level für den Abruf der Blöcke gibt: 1 für Beginner und 2 für Experten.

Zum Testen des Programms wird unten rechts der Startbutton gedrückt (Abb. 9).



Abb. 9: Steuerknöpfe

Auf dem Display des TXT 4.0 erscheint nun das in Abb. 10 gezeigte Bild. Die beiden Knöpfe unten werden im Programm verwendet; die Anzeige dazwischen ist für Kontrollzwecke programmierbar.

Zum Schluss kann das fertige Programm mit ‚Bearbeiten/exportiere Programm‘ als xml-Datei auf dem Rechner gesichert werden (Abb. 11).

Unter ‚Galerie‘ sind bereits vorgefertigte Beispiele für den TXT 4.0 hinterlegt (Abb. 12).



Abb. 10: Anzeige auf dem Display des TXT 4.0



Abb. 11: Speichern des Programms



Abb. 12: Fertige Programmbeispiele

## Fazit

Wie eingangs erwähnt gibt der Beitrag lediglich eine erste Einführung. Auch ohne TXT 4.0 kann über den Simulationsmodus viel Freude mit der Entwicklung eigener Programme haben.

## Quellen

- [1] fischertechnik: *Was ist Open Roberta?* [fischertechnik.de](https://www.fischertechnik.de)

Computing

## Drehbewegungssensoren

Stefan Fuss, Christian Bergschneider

*In der Philosophie wird gerne das Problem diskutiert, ob ein umfallender Baum im Wald Geräusche macht, auch wenn niemand da ist, um das Geräusch zu hören. Die moderne Physik wird gemäß Schrödingers Katze argumentieren, dass es ohne Messung unklar ist, ob der Baum umgefallen sei. Bis dahin ist der Baum in der Superposition – er steht und liegt gleichzeitig. Der fischertechniker kümmert sich nicht um Quanten: Fließt Strom, so bewegt sich das Modell. Wozu dann noch die Drehbewegung messen?*

Aber es gibt sie, die Anwendungen, bei denen es sinnvoll oder notwendig ist, die Drehbewegung einer Achse zu messen:

Ein realistisches Automodell soll mit einem Lenkrad (Abb. 1) gesteuert werden. Doch wie misst man die Lenkbewegung?



Abb. 1: Lenkrad zur Steuerung eines Autos

Will man auf schwere Schrittmotoren verzichten, muss man bei Greifarmrobotern wie dem „Computing Trainings-Roboter“ (Abb. 2) die Position der Achsen präzise bestimmen.



Abb. 2: Der fischertechnik-Computing-Trainings-Roboter [1] von 1985

Bei einer Seilbahn müssen die Rollenförderer in den Stationen auf die Seilgeschwindigkeit abgestimmt werden. Die Seilgeschwindigkeit lässt sich leicht über eine Rolle auf eine Drehbewegung umsetzen. Wie bestimmt man nun die Drehzahl der Rolle (Abb. 3)?



Abb. 3: Messrad zur Bestimmung der Seilgeschwindigkeit im Seilbahnprojekt

## Absolut- oder Inkremental-drehgeber?

Grundsätzlich unterscheidet man bei der Messung von Drehbewegungen zwischen Inkremental- und Absolutdrehgebern. In [2] werden Absolutdrehgeber sehr gut beschrieben, sodass im Folgenden nur Inkrementalgeber erläutert werden. Diese erzeugen aus der Drehbewegung Messimpulse. Zählt man die Impulse, so kann der Drehwinkel bestimmt werden. Über deren Frequenz lässt sich die Drehzahl der Achse ableiten.

### Ein erster Versuch – Impulsrad 4

Die einfachste Form eines Inkrementalgebers lässt sich mit dem Impulsrad und einem Taster (Abb. 4) bauen.

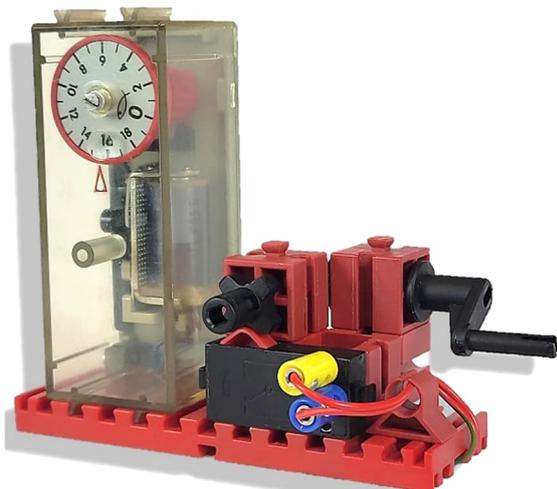


Abb. 4: Impulsrad und Taster

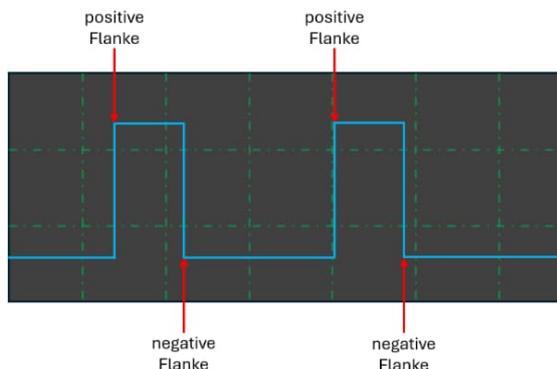


Abb. 5: Idealer Signalverlauf

Durch das Messen der Impulse (Abb. 5) kann nun auf die Bewegung zurückgeschlossen werden.

Das Modell erzeugt je Drehung vier Impulse. Am einfachsten ist es, die positiven Flanken zu zählen. Jeder Impuls bedeutet, dass die Achse um  $90^\circ$  gedreht wurde.

$$\text{Drehwinkel} = \text{Impulse} \cdot \frac{360^\circ}{\text{Impulse pro Umdrehung}}$$

Über die vergangene Zeit zwischen zwei Flankenwechseln  $\Delta t$  kann die Drehzahl der Achse bestimmt werden:

$$\text{Drehzahl} = \Delta t \cdot \text{Impulse pro Umdrehung}$$

Die Auflösung lässt sich mit einfachen Mitteln verdoppeln, indem man auch die negativen Flanken mitzählt. Das funktioniert aber nur, wenn bauartbedingt die beiden Signalphasen gleich lang sind. Beim Impulsrad sind die Signalphasen – wie bei den meisten Selbstbausensoren – unterschiedlich. Das reale Signal eines Tasters hat keine sauberen Flanken (Abb. 6), da jeder Taster beim Ein- und Ausschalten prellt.

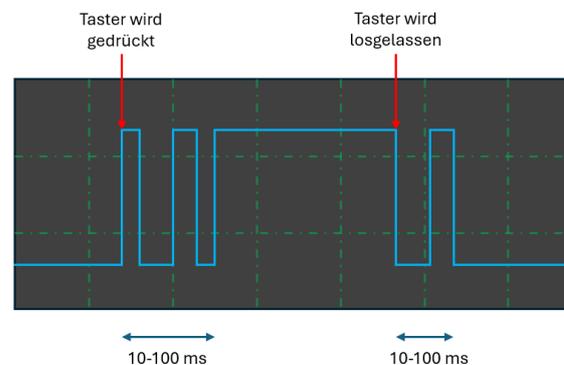


Abb. 6: Realer Signalverlauf eines Tasters

Mit dem Erkennen des ersten Flankenwechsels muss die Software nun für eine angemessene Zeit alle weiteren Flankenwechsel ignorieren. Prellt der Taster wie in der Abbildung bis zu 100 ms, so können nur noch 10 Impulse pro Sekunde gemessen

werden. Taster sind deshalb für Inkrementalgeber in der Regel ungeeignet.<sup>1</sup>

### Lichtschranke & Magnet

Mit einer Lichtschranke lässt sich das Problem des prellenden Tasters lösen. Baut man mit der Bauplatte 15×30 sechs Flügel an die Drehscheibe 60, so kann mit einem normalen Fototransistor<sup>2</sup> die Achsdrehung gemessen werden (Abb. 7).



Abb. 7: Lichtschranke an der Drehscheibe 60

Durch die sechs Flügel verbessert sich die Auflösung des Sensors auf 60°.

Auch Reedkontakte mit Neodymmagneten können als prellfreie Sensoren eingesetzt werden. Das Innenzahnrad Z30 hat 12 passende Aufnahmen für Neodymmagnete. Mit einem Reedkontakt kann nun die Bewegung gemessen werden (Abb. 8).



Abb. 8: Reedkontakt am Innenzahnrad

Die Auflösung verbessert sich um einen Faktor 2 auf 30°. Der Aufbau hat jedoch einige Herausforderungen: Durch das Aufstecken auf das Zahnrad Z30 kann sich das Innenzahnrad leicht verschieben. Das Ausrichten des Reedkontaktes ist Millimeterarbeit, da sich die Magnetfelder der Neodymmagnete überdecken.

### Die Sache mit der Drehrichtung

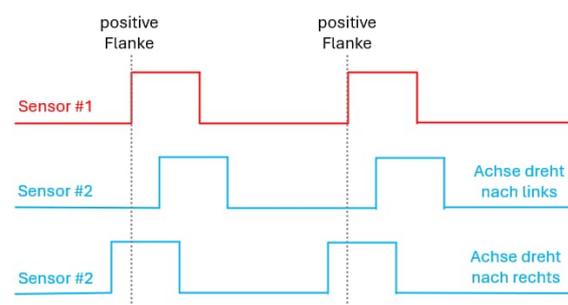


Abb. 9: Signalverlauf mit zwei Sensoren

Alle bisherigen Varianten können nur Drehzahl und Drehwinkel bestimmen. Die Drehrichtung lässt sich jedoch nicht bestimmen.

<sup>1</sup> Das Signal lässt sich auch technisch mit einem Kondensator glätten. Dies erleichtert aber nur das Auswerten des Signals. Die Einschränkung auf die max. Signalfrequenz bleibt gleich.

<sup>2</sup> Mit einer feineren Blende auf dem Fototransistor kann man auch direkt die Schlitze der Drehscheibe 60 verwenden.

Dafür wird ein zweiter Sensor (Abb. 9) benötigt. Sein Signal muss zu dem des ersten Sensors leicht versetzt sein.

Gemessen wird wiederum an der Signalflanke des ersten Sensors:

- Ist das Signal des zweiten Sensors 0, so dreht die Achse nach links. Der Impulszähler wird reduziert.
- Ist das Signal des zweiten Sensors 1, so dreht die Achse nach rechts. Der Impulszähler wird erhöht.

### **ftRotaryEncoder & ftKnob**

Beim Bau des Lenkrades für unser diesjähriges Convention-Modell sind wir bei der Suche nach einem geeigneten Rotary Encoder auf die sehr schöne Idee gestoßen, einen Schrittmotor als Messgeber zu verwenden.

Wird ein Schrittmotor gedreht, induziert er wie jeder Motor Strom in seinen Spulen. Bipolare Schrittmotoren erzeugen in den beiden Spulen zwei zueinander leicht versetzte Signale. Diese müssen nur mit etwas Elektronik verstärkt werden. Da zwei Signale vorhanden sind, kann die Drehrichtung bestimmt werden. Die genaue Funktionsweise der Schaltung ist in [4] beschrieben.

Der ftRotaryEncoder ist der Nachbau dieser Schaltung [6]. Er wird einfach auf den Kopf eines normalen, bipolaren NEMA-14-Schrittmotors<sup>3</sup> montiert (Abb. 10).

Die Kabel der Spulen werden an die Eingänge des ftRotaryEncoders angeschlossen. Da die Schaltung induktive Signale verstärkt, dürfen die Motoren nicht angetrieben werden. Ein aktiver ftPwrDrive würde sogar den ftRotaryEncoder zerstören. Die beiden digitalen Signale des ftRotaryEncoders werden an geeignete Zählereingänge des Controllers angeschlossen. Mit

den Nema-14-Motoren des ftPwrDrives wird eine Auflösung von 8° erreicht.

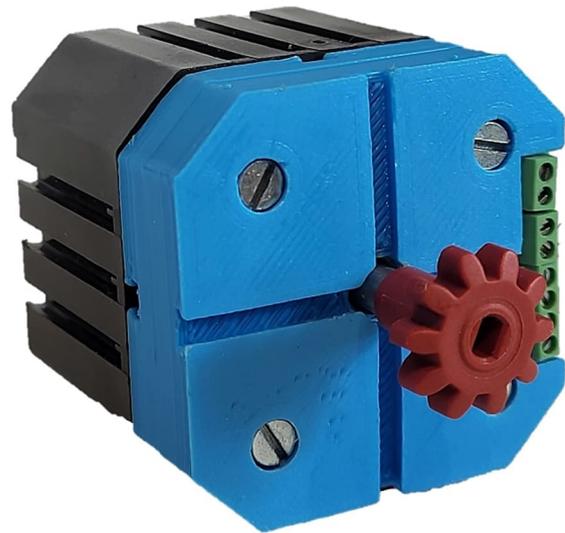


Abb. 10: ftRotaryEncoder auf einem NEMA-14-Motor montiert



Abb. 11: Der ftKnob ist ein fertiger Drehregler

Der ftKnob (Abb. 11) ist die fertige Kombination aus Encoderschaltung und einem 8°-Schrittmotor. Er kann als präziser Drehregler verwendet werden oder mit einem Adapter für 5-mm-Achsen beliebige Drehbewegungen aufnehmen.<sup>4</sup>

### **Walzenrad**

Das Walzenrad ([32367](#), Abb. 12) gibt es in drei Ausführungen: durchsichtig, mit rot/

<sup>3</sup> Der ftRotaryEncoder funktioniert grundsätzlich mit jedem bipolaren Schrittmotor. Sein Gehäuse ist auf die Verwendung mit NEMA-14-Motoren optimiert.

<sup>4</sup> ftRotaryEncoder und ftKnob gibt es wie immer fertig aufgebaut bei [www.gundermann.org](http://www.gundermann.org) im shop.

schwarzen und mit weiß/schwarzen Markierungen.



Abb. 12: Walzenrad in Bauform schwarz/weiß

Interessanterweise lassen sich alle drei Varianten mit einer Gabellichtschranke messen: Entweder mit der seltenen Originallichtschranke ([32357](#), Abb. 13) von fischertechnik oder mit einer handelsüblichen CNY37. Beide Varianten benötigen für die Verwendung mit den aktuellen Controllern etwas Zusatzbeschaltung. In [3] sind diese ausführlich beschrieben.



Abb. 13: Die seltene Originallichtschranke

Das Walzenrad hat 32 Markierungen und erreicht so eine Auflösung von  $11,25^\circ$ . Da die Markierungen symmetrisch sind, kann mit beiden Flanken gemessen und eine Auflösung von  $5,625^\circ$  erreicht werden.

### Encodermotor

In der Regel wird der Encodermotor (Abb. 14) als geschlossene Einheit verwen-

det, um einen Motor um einen bestimmten Drehwinkel zu bewegen. Man kann den Encoder jedoch auch ohne Motor verwenden. Wie beim ftRotaryEncoder wird der Motor dann nicht angeschlossen. Durch ein im Motor eingebautes Getriebe liefern die aktuellen Encodermotoren 63,3 Impulse je Umdrehung.



Abb. 14: Encodermotor

Somit kann eine Auflösung von ca.  $5,7^\circ$  bzw.  $2,8^\circ$  erreicht werden. Die Drehrichtung lässt sich jedoch nur unter Verwendung eines zweiten, teuren Encodermotors bestimmen.

### Programmierung

Die Implementierung von Rotary Encodern ist in ROBO Pro erstaunlich einfach. Wird nur ein Kanal benötigt, so kann das Zählerinputelement für alle Eingänge – sowohl bei den normalen als auch für die expliziten Zählereingänge – verwendet werden.

Die volle Implementierung eines Rotary Encoders ist nicht schwierig (Abb. 15). Die Messschleife wird als eigener Thread implementiert und der Drehwinkel kann über die globale Variable `ftRotaryEncoder` abgefragt werden.

Indem man der globalen Variable `ftRotaryEncoder` den Wert 0 zuweist, kann der Zähler zurückgesetzt werden.

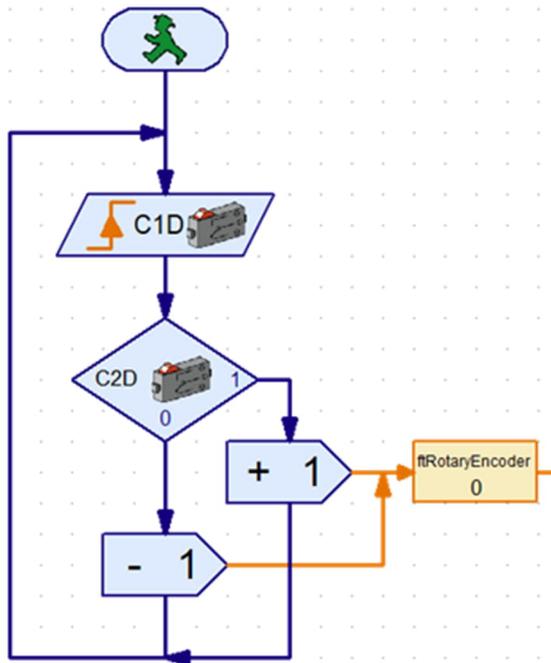


Abb. 15: ftRotaryEncoder am TX/TXT

Frequenz- bzw. Drehzahlmessung sind auch schnell realisiert (Abb. 16):

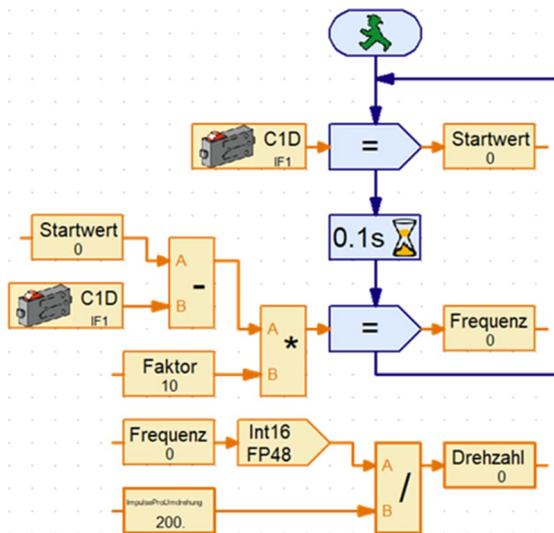


Abb. 16: Frequenz bzw. Drehzahl

Um den Messfehler zu minimieren, müssen während der Wartezeit mindestens zehn Impulse stattfinden. Deshalb müssen sowohl die Wartezeit als auch der „Faktor“ auf die erwartete Frequenz angepasst werden.

Beim ftDuino muss der Encoder an einen Zählereingang angeschlossen werden. Impulse können mit den drei Kommandos

```
void counter_set_mode(uint8_t ch,
    uint8_t mode)
uint16_t counter_get(uint8_t ch)
void counter_clear(uint8_t ch)
```

gezählt werden. Die Implementierung eines Zweikanalencoders ist nur mittels fortgeschrittener Interrupttechnik und Low-Level-Programmierung der Eingänge möglich.

Die ftSwarm-Familie stellt mit den Klassen

```
FtSwarmCounter
FtSwarmFrequencymeter
FtSwarmRotaryEncoder
```

Implementierungen für alle Varianten von Inkrementalgebern zur Verfügung.

Die Encodersignale können an jedem Eingang verarbeitet werden. Bei Zweikanalencodern müssen jedoch beide Kanäle am gleichen Controller angeschlossen werden.

Die Frequenzmessung ist für den Bereich von 0 Hz bis 1 kHz optimiert. Sie nutzt einen anderen Ansatz als das obige ROBO Pro-Programm und kann so problemlos auch niedrige Frequenzen messen.

## Quellen

- [1] fischertechnik: [Computing Trainings-Roboter](#), 1985.
- [2] Florian Bauer: *Single Track Gray Encoder mit fischertechnik*. [ft:pedia 1/2022](#), S. 103–111.
- [3] Matthias Dettmer: *Revival: Relais und Gabellichtschranke an TXT und ftDuino*. [ft:pedia 3/2021](#), S. 70–74.
- [4] Julien Thomas: *Schrittmotor als robuster Drehgeber*. Auf [jtxp.org](#), 2005.
- [5] Christian Bergschneider, Stefan Fuss: [FtSwarmRotaryEncoder](#).

Computing

## Der ft-RPI-sa – ein moderner BASIC-Controller für fischertechnik (1)

Robert Lippmann

*Die Welt ist bunt und vielfältig – auch die Welt der fischertechnik-Controller. Sie wurde nun durch eine in BASIC programmierbare Variante bereichert. In diesem ersten Teil der Beitragsreihe gebe ich einen Überblick über den Aufbau und die Funktionen des Controllers.*

### Hintergrund

Bei der Beschäftigung mit fischertechnik Computing vermisste ich schon lange die Einfachheit, die vor Jahrzehnten die 8-bit-Homecomputer boten – schnell und einfach ein Programm zu schreiben, um Probleme zu lösen. Der TXT und erst recht der neue TXT 4.0 bieten zwar viele Möglichkeiten und besitzen eine enorme Rechengeschwindigkeit, aber die Programmierung des TXT empfand ich immer als umständlich. Daher machte ich mich vor einer Weile an die Konzeption und Entwicklung eines eigenen fischertechnik-Controllers.

### Der ft-RPI-sa Controller

Bei der Entwicklung habe ich mir öfter den Kopf zerbrochen, welchen Namen der Controller bekommen soll. Am Ende wurde es ein Akronym: Der fischertechnik- **R**aspberry **P**I-stand-alone Controller. Nicht der schönste oder klangvollste Name, aber er sagt alles: Entwickelt für fischertechnik, benutzbar mit dem Raspberry Pi oder auch alleinstehend (stand-alone).

### Die Hardware

Ein neuer Controller sollte von der Konnektivität mindestens das Gleiche bieten wie aktuelle Geräte. Natürlich orientierte ich mich dabei nicht nur an den

fischertechnik-Controllern, sondern ebenso am ftDuino [1] und dem TX-Pi-HAT [2].

Es sollten also mindestens 8 Eingänge vorhanden sein, digital und analog, sowie die obligatorischen 4 Zähler-Eingänge. An Ausgängen sollten es mindestens 8 sein, die sowohl kombiniert als auch unabhängig steuerbar sind. In der heutigen Zeit muss ein derartiger Controller sich natürlich nach außen hin öffnen, was eine I2C-Schnittstelle voraussetzt.

Das war das Mindeste, was mein Controller bieten sollte. Aber wer gibt sich schon mit dem Minimum zufrieden? Also packte ich noch eine SPI-, CAN- und UART-Schnittstelle sowie eine Echtzeituhr (RTC) dazu.

Alle reden vom Raspberry Pi und seinen Vorzügen als kleiner, handlicher Alleskönner – also nahm ich die Möglichkeit mit, den Controller als PI-HAT zu betreiben. Und wenn ich schon dabei bin, dann soll auch gleich eine passende Stromversorgung für den Pi dazu.

Damit war die Hardware in groben Zügen definiert und ich konnte mit der Entwicklung beginnen.

KiCad war das Programm meiner Wahl für die Entwicklung des Schaltplans sowie der Platine. Der erste Versuch (Abb. 1) endete allerdings in einer zweiseitigen Leiterplatte, die noch verschiedene Probleme offenlegte.

Das Aufwecken und Einschalten des Raspberry Pi hatte gravierende Fehler, aber die waren lösbar.



Abb. 1: Erste Version

Das Format der Leiterplatte war noch nicht an den Raspberry Pi angepasst und daher ca. 45% größer als der Pi selbst. Aber es war ein Ergebnis, mit dem die ersten Steuerungsaufgaben funktionierten. Die zweite Version hatte dann schon Pi-Format, vier Lagen und konnte bündig auf den Pi aufgesteckt werden (Abb. 2, 3).

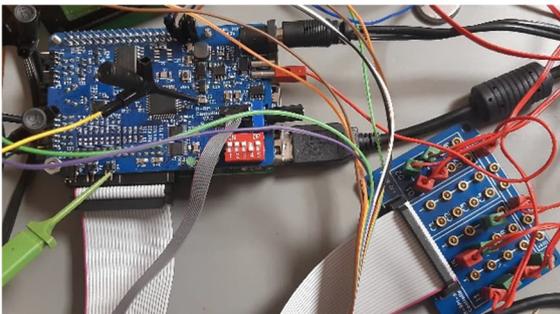


Abb. 2: Zweite Version (mit I/O-Board)

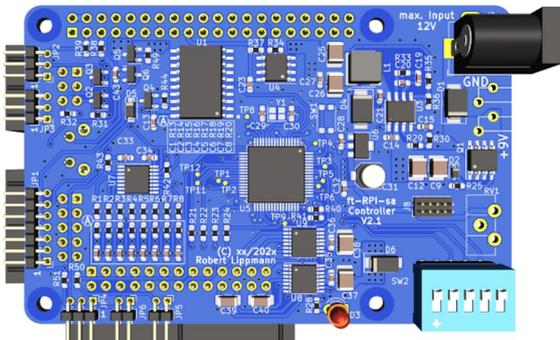


Abb. 3: ft-RPI-sa Mainboard

Die Anordnung der Steckverbindungen für I2C und UART sind dem ft-HAT nachem-

pfunden (schönen Gruß an Till Harbaum), allerdings, genau wie der Einschaltknopf für den Pi, auf die Unterseite der Leiterplatte gewandert.

Auch das Konzept eines I/O-Boards, das hier aber mittels eines 26-poligen Flachbandkabels an das Controller-Mainboard gesteckt wird, habe ich vom ft-HAT übernommen (Abb. 4). Das I/O-Board bietet alle gewünschten Ein- und Ausgänge. Es stellt auch eine „Verteilerleiste“ für eigene Signale bereit. Ich verwende diese meistens für +9 V. Die Montagelöcher sind im fischer-technik-Raster von 15 mm ausgeführt, was die Montage am Modell vereinfacht.

Zurück zum Controller: Nachdem ziemlich viele Komponenten auf die Leiterplatte montiert werden müssen und das Format an den Raspberry Pi angepasst wurde, half der Wechsel von einer zweilagigen zur vierlagigen Leiterplatte, um die Bauelemente kompakter zu platzieren.

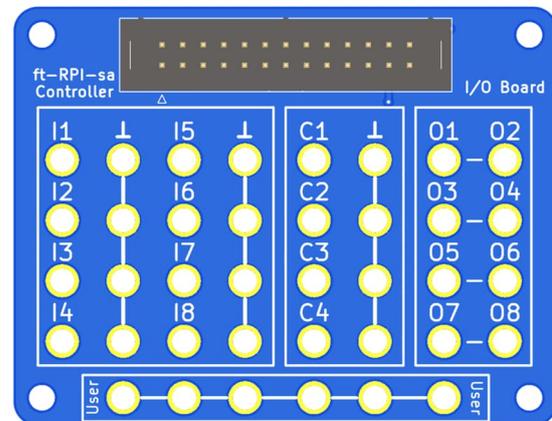


Abb. 4: Das I/O Board

Die Standardgröße der passiven Bauelemente, wie Widerstände oder Kondensatoren, ist 0603, was einer Größe von 1,6 mm × 0,8 mm entspricht. Das ist schon ziemlich klein, hilft aber bei der Platzeinsparung.

### Die Software

Die Homecomputer der 80er Jahre hatten mit ihren integrierten BASIC Interpretern immer schnell zu einer Problemlösung geführt. Bei komplexen Problemlösungen ent-

stand allerdings leicht der gefürchtete „Spaghetticode“: erinnert sich noch jemand an das Durcheinander von GOTO oder GOSUB mit einer Zeilennummer dahinter?

Manche werden jetzt vielleicht sagen: BASIC? Nicht zeitgemäß, zu langsam, unübersichtlich. Andere werden womöglich fragen: BASIC? Was ist denn das?

BASIC ist in der Tat etwas älter. Genauer gesagt existiert es schon seit 1964 und wurde als bildungsorientierte Programmiersprache entwickelt [3]. Es ist, wie schon erwähnt, eine Interpretersprache, d. h. der Code wird zur Laufzeit analysiert und ausgeführt, was den Ablauf zwangsläufig verlangsamt. Allerdings hat BASIC den Vorteil, dass es extrem leicht zu erlernen ist, Erfolge sich schnell einstellen und Klartext-Meldungen ausgegeben werden, wo sich ein Fehler befindet; daher sind Fehler auch schnell zu korrigieren – anders als bei Systemen, die einen separaten PC benötigen, auf dem das Programm kompiliert und von dem es danach auf die Zielplattform übertragen wird.

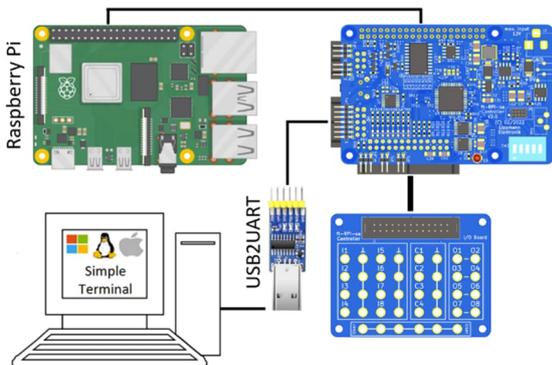


Abb. 5: Entweder RPI oder PC nötig

Da ich eher ein Hard- als ein Software-Entwickler bin, beschloss ich, einen quell-offenen BASIC Interpreter zu suchen. Meine Wahl fiel auf das mittlerweile vielleicht bekannte MMBASIC [4]. Es wurde von Geoff Graham entwickelt; der C-Code ist auf Anfrage erhältlich. Geoff gestattete mir freundlicherweise, den modifizierten, an den ft-RPI-sa angepassten C-Code publik zu machen. Es lebe Open Source!

MMBASIC ist ein an Microsofts GW-Basic angelehnter BASIC-Dialekt, der keine Zeilennummern verwendet und somit die Entstehung von Spaghetticode verhindert.

Die Anpassung des MMBASIC-C-Codes an die von mir verwendete MCU benötigte etwas Zeit, und noch etwas Zeit bedurfte es für die Implementierung der Hardware spezifischen ft-RPI-sa BASIC-Instruktionen und -Funktionen.

MMBASIC bietet einen eingebauten Editor. Damit wird der ft-RPI-sa eher ein eigenständiger Computer als ein „simpler“ Controller. Das Einzige, was zur Bedienung benötigt wird, ist ein PC oder ein Raspberry Pi, der über den UART an den ft-RPI-sa angeschlossen wird (Abb. 5). Ein einfaches Terminalprogramm wie Putty, Tera Term auf Windows oder minicom auf Linux reicht dazu aus, und schon hat man Zugriff auf einen vollwertigen BASIC-Computer mit fischertechnik-Steuerungsmöglichkeit (Abb. 6).

Allerdings, und das muss ich zugeben, werden derzeit nicht alle Hardware-Komponenten von MMBASIC unterstützt, da sich das Projekt noch in Entwicklung befindet. Nicht unterstützt werden derzeit die CAN-Schnittstelle und das Serial Peripheral Interface (SPI). Letzteres ist hauptsächlich für die Kommunikation mit dem Raspberry Pi vorgesehen.

```

ft-RPI-sa Controller MMBasic Ver 5.05.05
Copyright 2011-2021 Geoff Graham
S32K144 Adaption (C) 2022 Robert Lippmann
Firmware version: Nov 30 2023/19:47:59
->
  
```

Das Screenshot zeigt ein Terminalfenster mit dem MMBASIC-Startbildschirm. Die Ausgabe enthält die Versionen und Copyright-Informationen des Controllers.

Abb. 6: Eingabeprompt

## Verwendete Komponenten

Als zentrales „Gehirn“ des ft-RPI-sa dient ein Mikrocontroller (MCU, Abb. 7) des Typs S32K144 der Firma NXP, da ich mit diesen Controller-Familien vertraut war.

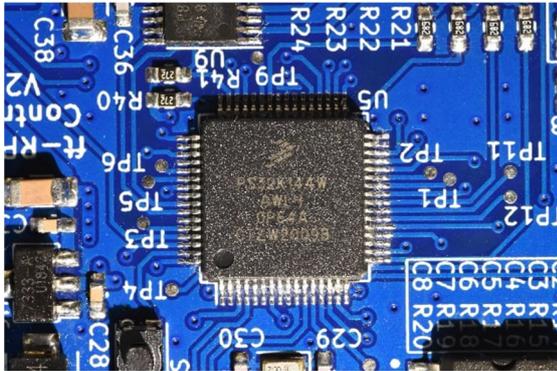


Abb. 7: 32 bit MCU im 64-pin-Gehäuse  
(noch mit Freescale Logo)

Diese MCU besitzt einen 32 bit ARM Core (CPU) des Typs M4F, also einen Cortex-M4 mit FPU (Gleitkommaeinheit – ein Mathe-Coprozessor) und einer maximalen Taktfrequenz von 112 MHz. Der Arbeitsspeicher (RAM) für BASIC-Variablen beträgt 60 kByte und der Programmspeicher für das MMBASIC 512 kByte.

Zusätzlich besitzt die MCU 64 kByte permanenten Datenspeicher (Dataflash), der in diesem Projekt als Speicher für die BASIC-Programme selbst dient. Der Clou an der S32K1 Familie besteht darin, dass auf dem gleichen Board auch ein S32K142 oder S32K146 (Tab. 1) platziert werden kann. Dazu muss das Board nicht einmal verändert werden. Der Unterschied der MCU-Typen, der hier relevant ist, ist die Größe von Arbeits- und Programmspeicher (RAM/ROM).

MCU Typ	Flash	RAM
<b>S32K142</b>	256 kByte	32 kByte
<b>S32K144</b>	512 kByte	64 kByte
<b>S32K146</b>	1024 kByte	128 kByte

Tab 1: Verwendbare MCU-Typen

Neben der CPU beinhaltet der Mikrocontroller viele weitere Peripheriemodule wie

UART, I2C, SPI, CAN, ADC, Timer etc. Darüber hinaus befindet sich auf dem Board eine Echtzeituhr des Typs PCF2127 (Abb. 8), auch von NXP, mit integriertem Quarz sowie einem batteriegestützten RAM-Speicher, der die Daten im ausgeschalteten Zustand über einen längeren Zeitraum halten kann. Die dafür benötigte Batterie des Typs CR2032 ist auf der Unterseite des Boards fixiert.

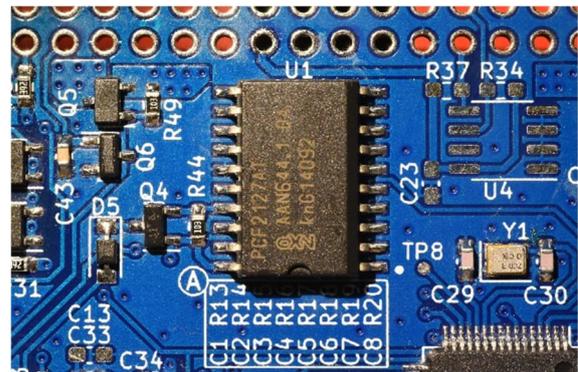


Abb. 8: RTC

Unsere fischertechnik-Aktoren werden von zwei H-Brücken des Typs DRV8847 von Texas Instruments (Abb. 9) angesteuert. Diese liefern einen Strom bis zu 1 A, der hier zur Reduzierung der Abwärme allerdings auf ~700 mA limitiert ist.

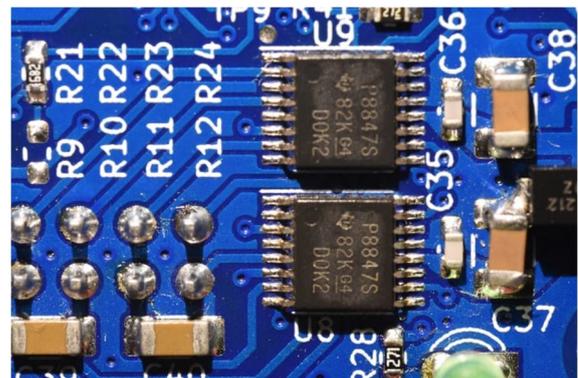


Abb. 9: H-Brücken Ausgangstreiber

Jeder der beiden DRV8847 beinhaltet zwei vollwertige H-Brücken, die sich alternativ als vier unabhängige Halb-Brücken verwenden lassen. Somit ist jeder der acht Ausgänge individuell steuerbar und das beinhaltet nicht nur „An“ oder „Aus“, sondern auch eine Ansteuerung mittels

PWM von 0-100% in 1% Schritten, die von der MCU übernommen wird.

Um eine effiziente Stromversorgung für die Komponenten und den Raspberry Pi bereitzustellen befindet sich auf dem Mainboard ein Schaltwandler des Typs TPS54332 (Buck-Converter), ebenfalls von Texas Instruments, der bis zu 3.5 A liefern kann (Abb. 10).

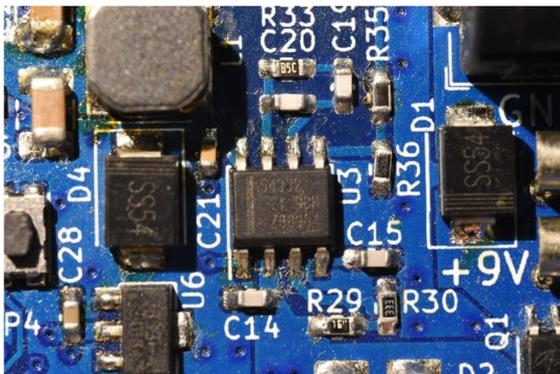


Abb. 10: 3.5 A Spannungswandler

Als maximale Eingangsspannung am Mainboard sind 12 V vorgesehen, die hauptsächlich durch die H-Brücken-Treiber vorgegeben wird. Um aber unsere geliebten fischertechnik-Teile nicht zu sehr zu stressen ist ein 9V/3A-Stecker- oder Tischnetzteil mit 5.5 mm/2.1 mm Hohlstecker bestens geeignet. Die Stromversorgung kann auch über fischertechnik-kompatible 2.6 mm Buchsen erfolgen. Beide Anschlussvarianten sind gegen Verpolung geschützt.

### **Anschluss an die Außenwelt**

Die Eingänge I1 bis I8 sind alle identisch aufgebaut und jeder der Eingänge verfügt über einen konfigurierbaren 2.7 k $\Omega$  Pull-Widerstand, der wahlweise nach +5V (Pull-Up), nach GND (Pull-Down) oder ganz abgeschaltet werden kann (Hi-Z). Mit einem eingeschalteten Pull-Widerstand kann ein Eingang, auch wenn er von extern nicht beschaltet ist, auf einen definierten Wert gebracht werden. Das ist z. B. nötig, wenn ein Taster im gedrückten Zustand +9 V liefert, aber im nicht gedrückten Zustand den Eingang nicht beschaltet. Ein

Pull-Down setzt den Eingang auf 0 V solange der Taster nicht gedrückt wird.

Die Zählereingänge C1 bis C4 besitzen keine konfigurierbare Pull-Möglichkeit und werden von der MCU auf zwei verschiedene Arten realisiert. Zum einen wird jeder der Zählereingänge jede Millisekunde abgefragt. Hat eine stabile Zustandsänderung von 9 V auf 0 V stattgefunden, wird der Zähler um 1 erhöht. Somit lassen sich Zustandsänderungen bis zu 125 mal in der Sekunde erfassen, da für die stabile Zustandsänderung  $2 \times 4$  Durchläufe bzw. 8 ms benötigt werden. Diese Methode ist geeignet, mechanische Schalter abzufragen, da diese bei der Betätigung mehrere Impulse liefern – das sogenannte Prellen (Abb. 11) [5].

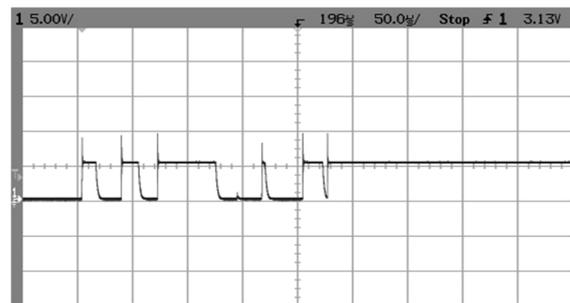


Abb. 11: Prellen (Quelle: Wikipedia)

Zum anderen verfügt die MCU über die Möglichkeit, eine Zustandsänderung ohne Zutun der CPU automatisch zu erfassen.

Dies erlaubt es, mehr als 100.000 Zustandsänderungen pro Sekunde zu verarbeiten. Diese Version der Zähler ist für prellfreie Quellen (z. B. einen Encoder-Motor) gedacht. Die Zählereingänge können außerdem für bestimmte Sensoren, z. B. einem Ultraschallabstandssensor des Typs HC-SR04, als Trigger, also als Startsignal verwendet werden. So sind die Cx- Anschlüsse auch bidirektional nutzbar.

Um die Kompatibilität zu anderen Controllern aufrecht zu erhalten, damit bestehende Komponenten weiterhin nutzbar sind, befinden sich zwei bekannte Steckverbinder auf der Mainboardseite (Abb. 12). Der TXT Controller brachte damals die 10-polige,

3.3 V-Variante mit und besitzt ebenfalls einen CAN-Controller, der bis heute allerdings nicht unterstützt wird. Ob die Pinbelegung beim CAN-Bus dem TXT entspricht, entzieht sich meiner Kenntnis (falls es jemand weiß, bin ich für einen Hinweis dankbar).

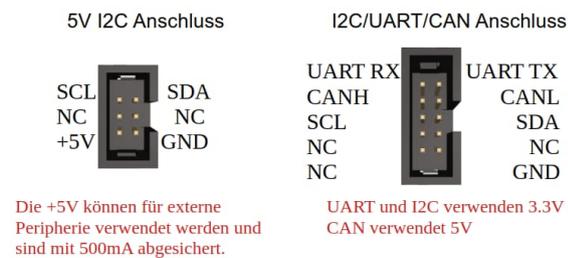


Abb. 12: Peripherieanschlüsse

## Ausblick

Auf Youtube habe ich ein [Demovideo des Controllers](#) veröffentlicht – die Steuerung eines pneumatischen Sortierers und eines Hochregallagers.

Verbesserungsvorschläge sind gerne gesehen und willkommen. Ihr erreicht mich per E-Mail unter [ft.mcu.prj@gmail.com](mailto:ft.mcu.prj@gmail.com) oder als „klopfer“ im ftc Forum.

Bevor ich zum Ende des ersten Beitragsteils komme, möchte ich es mir nicht nehmen lassen, mit einem kleinen Demo-Programm zu zeigen, wie die Steuerung eines fischer-technik-Modells auf dem ft-RPI-sa aussehen kann.

Der folgende Code ist die Realisierung eines temperaturgesteuerten Ventilators. Warum der Code so aussieht, erkläre ich dann u. a. im zweiten Beitragsteil, in dem ich die Programmierung sowie die speziellen ft-RPI-sa Befehle erkläre.

```
Option default integer
EPull 2,2
Output conf 1,3
Const Udiv!=3.3/4096
Const Slope!=(18-40)/(2051-799)
Do
  MyInput=E_Ana(2)
  Intc!=(5-MyInput*Udiv!)/2700

MyTemp!=40+Slope!*(MyInput*Udiv!/Intc!-799)
  If MyTemp!>25 Then
    Output set 1,ON
  Else
    Output set 1,OFF
  EndIf
Loop
```

*Listing 1: Temperaturgesteuerter Ventilator*

## Quellen

- [1] Till Harbaum: *ftDuino – Open-Source trifft Konstruktions-Baukasten*. [ft:pedia 1/2018](#), S. 85–91.
- [2] Till Harbaum: [TX-Pi-HAT](#).
- [3] [BASIC](#). Wikipedia.de
- [4] Geoff Graham: [Basic Interpreter for the Raspberry Pi Pico](#).
- [5] [Prellen](#). Wikipedia.de