

Editorial

## Geburtstagswünsche

Dirk Fox, Stefan Falk

Fünzig Jahre sind ein halbes Jahrhundert. Damit hat Artur Fischer mit seinem Baukastensystem fischertechnik noch zu Lebzeiten (Technik-)Geschichte geschrieben.

Denn wie beim Erscheinen 1965 ist fischertechnik, auch dank der zahlreichen Innovationen in den Folgejahren, bis heute ohne ebenbürtige Konkurrenz: Kein anderer Baukasten verbindet Statik, Mechanik, Elektromechanik, Elektronik, Optik und Informatik (Robotik, Mechatronik) ähnlich umfassend, vielfältig, stabil und langlebig.

Wer Bausteine aus den vergangenen 50 Jahren sein eigen nennt, erfreut sich nicht nur an der Unverwüstlichkeit der einzelnen Teile, sondern auch an unveränderter Kompatibilität: alles passt, hält und funktioniert, selbst 40 Jahre alte „Silberlinge“ verrichten klaglos ihren Dienst – ein wahres Wunder angesichts der Kurzlebigkeit heutiger Konsumelektronik.

In den vergangenen 50 Jahren hat fischertechnik einige Durststrecken überstehen müssen, und noch immer ist es mühsam, sich gegen einen Unternehmensgiganten wie Lego zu behaupten. Für einen wirklichen Durchbruch müsste fischertechnik zur Standardausstattung deutscher Schulen werden – so wie bereits heute in Taiwan, Brasilien, Mexiko und Teilen von China und den USA: Länder, die sich eine Ausbildung „wie die deutschen Ingenieure“ wünschen – nur dass viele junge (und angehende) deutsche Ingenieure fischertechnik höchstens noch dem Namen nach kennen.

Aber die Voraussetzungen sind günstig, dass sich das in den kommenden Jahren ändern wird. Eine erfolgreiche Modellpolitik gepaart mit einer Rückbesinnung auf deutsche Stärken und intelligentes Spielzeug bescherte fischertechnik im vergangenen Jahr die Auszeichnung als „Spielzeug des Jahres 2014“ – und könnte dabei helfen, den (Wieder-)Einzug in deutsche Kinderzimmer und Schulräume zu ebnen.

Ein Grund mehr, am Fanclub-Tag in Waldachtal (26.07.2015) diese Leistung mit dem fischertechnik-Team zu feiern – und das Land mit kleinen und größeren „fischertechnik-Events“ zu überziehen. Die große „fischertechnik Convention“ wird in diesem Jahr, wieder am letzten Samstag im September (26.09.2015), in Dreieich bei Frankfurt stattfinden – in noch größeren Räumlichkeiten als bisher. Gelegenheiten für neue Besucherrekorde gibt es also genug.

Für die nächsten 50 Jahre wünschen wir fischertechnik nicht einfach nur viel Erfolg, sondern bleibende Kompatibilität bei moderater Teilevielfalt, ein gutes Händchen bei Innovationen und eine treue Fangemeinde – die dem Marketing aus Waldachtal ein wenig unter die Arme greift.

Beste Grüße,  
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

Geburtstagswünsche .....	2
Mini-Modelle (Teil 7): Hovercraft.....	4
fischertechnik auf Holzschienen .....	6
Pistenbully .....	8
Consul, the Educated Monkey.....	19
Die Rechenmaschine.....	25
Die Ewigkeitsmaschine.....	41
Druckminderer .....	44
Wolf, Schaf und Kohlkopf .....	50
fischertechnik-Akkulader.....	58
Laser-Anwendungen (1): Bewegungsmessung .....	64
Neue ft-Teile selbst gemacht – 3D-Druck (2): Schleifringe.....	68
Neue ft-Teile selbst gemacht – 3D-Druck (3): Innenzahnkranz .....	73
Kinematik mit dem fischertechnik-Designer .....	84
fischertechnik mit dem Tablet steuern .....	88
Nummernblock am Robo TX Controller .....	91

## Termine

Was?	Wann?	Wo?
50 Jahre fischertechnik	26.07.2015	Waldachtal
ft-Convention 2015	26.09.2015	Dreieich
ft-Modellausstellung	22.11.2015	Münster

## Impressum

<http://www.ftcommunity.de/ftpedia>

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

**Autoren:** Gerhard Birkenstock (gggb), Jörg und Erik Busch (ft-familie), Stefan Falk (steffalk), Dirk Fox (Dirk Fox), Johann Fox, Andreas und Joachim Gail, Joachim Häberlein, Thomas Püttmann (geometer), Harald Steinhaus (Harald), Johannes Visser (Daisayah), Dirk Wölfel (DirkW).

**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

## Mini-Modelle (Teil 7): Hovercraft

Johann Fox

*Dieses Mal ist das hier vorgestellte Mini-Modell ein Fortbewegungsmittel der etwas anderen Art – ein Hovercraft.*

Obwohl das Mini-Modell nur aus 11 Bauteilen besteht ist doch eindeutig zu erkennen, dass es sich hierbei um ein Hovercraft handelt. Die Gesamtansicht sieht man in Abbildung 1.



Abb. 1: Gesamtansicht

Das Gerüst bilden zwei Bausteine 7,5. Sie werden durch ein Verbindungsstück 30 zusammengehalten.



Abb. 2: Das Gerüst

Auf die beiden Bausteine werden der Antrieb, der Spoiler vorne und das Cockpit, ein Winkelstein 15°, montiert (Abb. 2).



Abb. 3: Vorderteil mit Cockpit

In Abbildung 3 und 4 sind nochmal der vordere und der hintere Teil des Hovercraft einzeln zu sehen.



Abb. 4: Hinterteil mit Antrieb

Fertig zusammgebaut sieht das Mini-Hovercraft von der Seite (Abb. 5) und von schräg hinten schon ziemlich real aus.

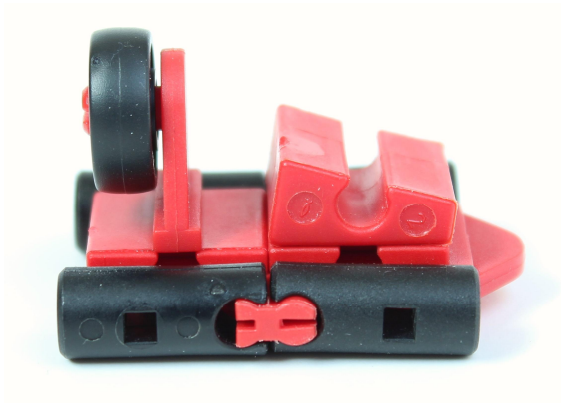


Abb. 5: Seitenansicht



Abb. 6: Rückansicht

Hier die für den Zusammenbau benötigten 11 Bauteile.

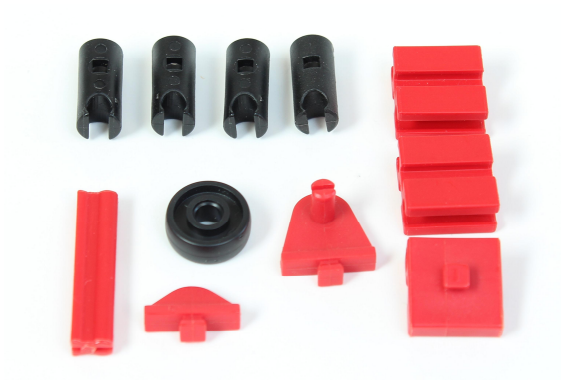


Abb. 7: Einzelteile

Und hier noch die Einzelteilliste:

Stück	ft-Nr.	Bezeichnung
1	31602	Kufe
1	36573	Rad 14
1	35668	Radhalter
1	31061	Verbindungsstück 30
1	31981	Winkelstein 15 Grad
2	37468	Baustein 7,5
4	36227	Rastadapter

### Bisher erschienen:

- [1] René Trapp: *Minimodelle (Teil 1): Gabelstapler*. [ft:pedia 4/2013](#), S. 4-5.
- [2] Johann Fox: *Minimodelle (Teil 2): Panzer*. [ft:pedia 2/2014](#), S. 18-19.
- [3] René Trapp: *Minimodelle (Teil 3): Scheinwerfer*. [ft:pedia 3/2014](#), S. 11.
- [4] Johann Fox: *Minimodelle (Teil 4): Hubschrauber*. [ft:pedia 3/2014](#), S. 12-13.
- [5] René Trapp: *Minimodelle (Teil 5): Traktor*. [ft:pedia 4/2014](#), S. 7.
- [6] Johann Fox: *Minimodelle (Teil 6): Bagger*. [ft:pedia 4/2014](#), S. 8-9.

Schienenfahrzeuge

## fischertechnik auf Holzschienen

Gerhard Birkenstock

*Man nehme: einen Mini-Motor, einen E-Magnet und vier Reibräder. Und im Handumdrehen wird daraus eine fischertechnik-Rangierlok für die Holzseisenbahn.*

Meine Kinder haben zu Weihnachten von mehreren unabhängigen Christkindern die gleichen Komponenten für eine Holzseisenbahn geschenkt bekommen.

Obwohl die Züge und Gleise von unterschiedlichen Herstellern stammen, passte es doch recht gut zusammen. Und da, wo es nicht passte, wurde nachgeholfen. So ist eine beachtliche Anlage entstanden. Dass auf diesem großen Gleis eine fischertechnik-Rangierlok fahren musste, war natürlich klar.



Abb. 1: Lokomotive mit Magnetcupplung

Für den Antrieb sorgt ein kleiner fischertechnik-Mini-Motor. Das kleine Getriebe bringt das Drehmoment auf die Starrachse. Die Anordnung der Antriebsachse zwischen Motor und Elektromagnet liefert ordentlich Gewicht für die Reibräder (Abb. 1). So ist das kleine Modell in der Lage, alle acht Waggons zu bewegen.

Der Antriebsmotor wird aus einem fischertechnik-Transformator mit Energie versorgt. Die Fahrtrichtung und Geschwindigkeit lassen sich damit gut regeln.

Für die ersten Fahrversuche wurde ein fischertechnik-Dauermagnet als Kupplung verwendet. Der hat sehr gut gehalten – jedoch war damit kein Rangeierbetrieb möglich, es musste immer Hand angelegt werden. Das machte keinen Spaß – für den realistischen Betrieb musste daher eine Fernbedienung für die Kupplung her.

Da fiel mir der Elektromagnet ein. Allerdings ‚klebte‘ der Magnet des angehängten Waggons auch nach dem Ausschalten des Stromes weiter am Magnetkern.

Die Lösung brachte die Polwendung des Elektromagneten. Damit wird sicher gehalten und abgekuppelt (abgestoßen).

Ein weiterer schöner Effekt ist, dass man die Waggons in jeder Richtung anhängen kann: Ganz gleich, ob der (magnetische) Nord- oder Südpol zur fischertechnik-Lokomotive zeigt, mittels Polwendung kann das ausgeglichen werden.

Die von der Fahrtrichtung unabhängige Versorgungsspannung kann man mittels Gleichrichterbaustein aus der Wechselstromseite des Transformators gewinnen (Abb. 2).

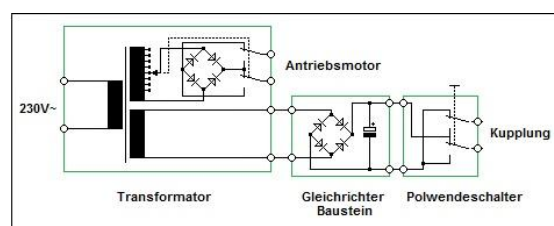


Abb. 2: Schaltplan

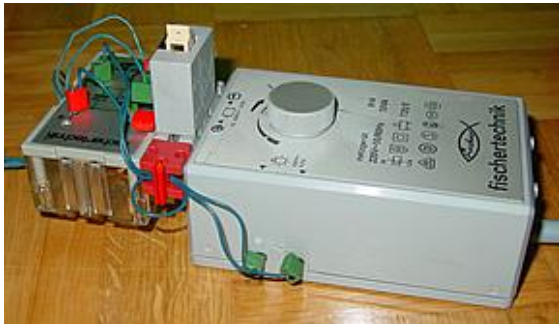


Abb. 3: Transformator, Polwendeschalter und Gleichrichterbaustein

Wenn jemand eine weitere Variante als Lokomotive für diese Holz Eisenbahn hat – kleiner, schöner, mehr Ausstattung, ... – würde ich gerne davon erfahren!

### Querverweis

- [1] Walter-Mario Graf: [fischertechnik-Eisenbahn \(Teil 1\)](#). ft:pedia 4/2012, S. 11-13.

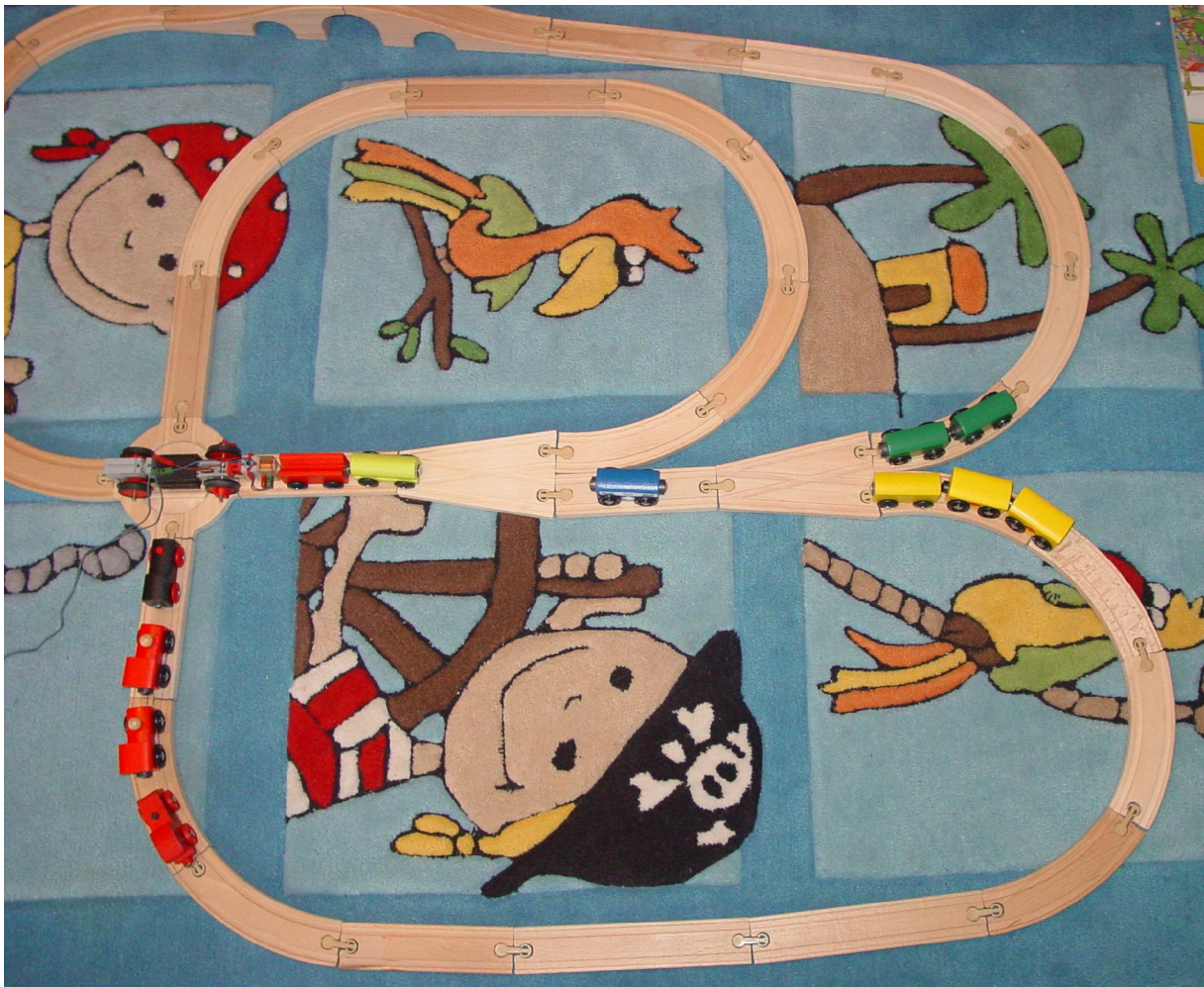


Abb. 4: fischertechnik-Rangierlock im Betriebseinsatz

Fahrzeugtechnik

## Pistenbully

Erik und Jörg Busch

*Wenn begeisterte fischertechnik-Fans zum Skifahren gehen, ist das nächste Bauprojekt schon beschlossen: Der Pistenbully. Die großen, aber interessanten Herausforderungen bestanden darin, die breiten Ketten, den Antrieb und die Winde mit fischertechnik zu bauen. Im Folgenden werden Historie und Technik und der Aufbau zweier ft-Pistenraupen beschrieben.*

Bauprojekte mit meinem Sohn Erik, mittlerweile acht Jahre alt, beginnen immer mit dem Sammeln von Informationen. Dabei ist der direkte Kontakt mit der Technik am eindrucksvollsten und durch nichts zu ersetzen. Als begeisterte Skifahrer haben wir deshalb in jedem Skigebiet die Pistenfahrzeuge genau angeschaut. Im Skigebiet Grasgehren, auf der Passhöhe des Riedbergpasses (höchster Pass Deutschlands), konnten wir dann den stärksten Pistenbully genau besichtigen (Abb. 1).



Abb. 1: Pistenbully 600 Polar in Grasgehren

Als Highlight durfte Erik sogar im Cockpit Platz nehmen (Abb. 2). Damit war klar: Der Pistenbully 600 Polar SCR ist unser Ziel, natürlich mit Winde.

Wichtige bautechnische Informationen haben wir aus den Prospekten der Kässbohrer Geländefahrzeug AG, vielen Internetseiten und YouTube-Filmen erhalten.



Abb. 2: Pistenbully 600 Polar mit Fahrer Erik

### Historie und Technik

Die Pistenpräparation Anfang des 20. Jahrhunderts war noch durch „Trampel“-Präparation mit Skiern sehr anstrengend. Einfache Maschinen waren selten und die Pistenpflege war auch damit sehr aufwändig (Abb. 3).

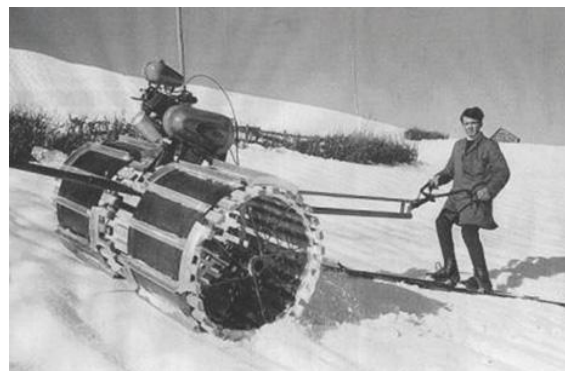


Abb. 3: Pistenpräparation ab ca. 1920 [1]

Die Idee des Pistenbullys hatte Karl Kässbohrer 1967 beim Skifahren [2]. 1969



wurde dann der erste Pistenbully PB32.120 (Abb. 4) auf dem „Ersten Internationalen Skipisten Kongress“ in Innsbruck vorgestellt. Die Bezeichnung 32 steht für die Fahrzeugbreite von 3,2 m, 120 bedeutet 120 PS. Das bereits damals verwendete Antriebskonzept mit hydrostatischem Antrieb wurde von der Konkurrenz für untauglich erklärt. Heute verwenden es alle Hersteller.



Abb. 4: Erster Pistenbully von 1969 [1]

Die Entstehung und die verschiedenen Typen werden im Buch „Typenkompass Pistenbully“ des früheren Chefkonstruktors Helmut Kanzler sehr detailliert vorgestellt [2]. Die anfangs verwendeten Benzinmotoren wurden bereits 1971 durch Dieselmotoren mit einem wesentlich geringeren Verbrauch ersetzt. Dies war erst nach einer umfassenden Optimierung des Dieselmotors (Kaltstartverhalten und Höhenanpassung) möglich.

Der Dieselmotor treibt für jede Seite eine hydraulische Pumpe an. Der Öldruck wird jeweils an einen hydrostatischen Antriebsmotor übergeben. Dieser treibt über ein Planetengetriebe das Turrasrad, das sternförmige Antriebskettenrad am Fahrzeugheck, an. Das Turrasrad greift in die Aluminiumkettenstege der Gummiketten. Die hydrostatischen Antriebsmotoren lassen sich kontinuierlich in beiden Richtungen regeln, sodass auch ein Drehen des Pistenbullys auf der Stelle möglich ist.

Eine weitere Hydraulikpumpe versorgt die Hydraulik des Frontschilds und der Heckfräse. Die Heckfräse zerkleinert den Schnee hinter dem Pistenbully und ein Glättbrett ebnet anschließend den Schnee.

Bereits 1972 setzten die Veranstalter der Winterspiele in Japan auf das Präparieren der Skipisten mit Pistenbullys.



Abb. 5: Pistenbully in der Antarktis [1]

Neben dem Einsatz auf den Skipisten wurde der Pistenbully ab 1985 auch als universelles Einsatzfahrzeug in der Antarktis verwendet (Abb. 5). Die Anforderungen sind hier extrem, der Einsatz muss bei  $-40\text{ °C}$  möglich sein, beim Parken kann die Temperatur bis zu  $-50\text{ °C}$  betragen. Für diese Bedingungen mussten Motor, Hydraulik und Antrieb wesentlich geändert werden (Zusatzheizungen, Tankbeheizung, verstärkter Anlasser, höhere Batteriekapazität, Kettenstege aus hochfestem Stahl).

1985 wurde auch der Pistenbully PB42.200DW mit eingebauter Winde vorgestellt (Abb. 6). Die Präparation „schwarzer Pisten“ war davor mit den Pistenbullys nur von oben nach unten, also bergabwärts möglich. Durch die Umwege zum Gipfel war dies sehr zeitaufwändig. Stationäre Winden erlaubten zwar eine Bergauffahrt, die Kommunikation und Abstimmung mit dem zusätzlichen Bedienpersonal an der Winde war jedoch nicht einfach.

Die Regelung der neuen Winde ermöglichte eine konstante Zugkraft am Windenseil und dadurch den einfachen Einsatz an Steilhängen. Zusätzlicher Vorteil: Die Schneeverdrängung bergwärts verlängert die Standzeit der Piste, was natürlich alle Skifahrer freut. Der Windenbetrieb verbessert auch beim Verfrachten großer Schneemengen auf der Ebene die Traktion.



Abb. 6: Pistenbully 200 mit Winde [1]

Die ersten Winden waren noch fest auf der Arbeitsplattform montiert, nur der Auslegerarm war drehbar. Der Pistenbully konnte sich schon damals frei um  $360^\circ$  unter dem Windenarm drehen. Dadurch ergab sich eine Seilverdrillung, die die Standzeit des Seils verkürzte.

Beim Folgemodell 1989 wurde die gesamte Winde drehbar auf der Arbeitsplattform angeordnet. Mit einem verlängerten und nach unten geführten Auslegerarm ergab sich ein tieferer Angriffspunkt. Das komplette Drehen des Pistenbullys um  $360^\circ$  unter der Winde war natürlich weiterhin möglich.

Von Anfang an wurde das Prinzip „Winde mit Treibtrommelsystem“ angewendet. Der Aufbau (Abb. 7) ist im Patent von Kässbohrer gut beschrieben [3].

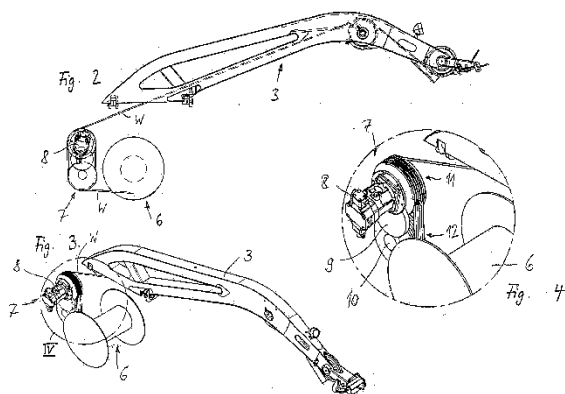


Abb. 7: Pistenraupe mit einer Seilwindenanordnung DE 102010061982 A1 [3]

Die Seiltrommel (6) dient nur als Seilspeicher. Das Seil wird dort unter konstanter Spannung aufgewickelt. Die Zugkraft wird über die beiden Spillköpfe (11) und (12) aufgebracht.

Der Spillantrieb ist von Schiffen bekannt, wo der Spillkopf das Einholen von Ankerketten oder Trossen ermöglicht, ohne diese dabei aufzuwickeln. Das Grundprinzip wurde auch schon in der ft:pedia 1/2011 beschrieben [4].

Im Gegensatz zu den Ankerwinden werden beim Pistenbully zwei Spillköpfe verwendet, über die das Stahlseil jeweils um  $180^\circ$  umgelenkt wird. Durch die mehrmalige Umwicklung der beiden Spillköpfe ergibt sich durch die große Reibkraft die hohe Zugkraft der Winde. Trotzdem wird wegen der großen Spillkopfdurchmesser das Seil geschont.

Die Kraftübertragung erfolgt vom hydrostatischen Motor (8) über die Zahnradgetriebe (9) und (10) auf beide Spillköpfe. In Abb. 8 sieht man den Aufbau der Winde des Pistenbullys 600. In der Mitte erkennt man die große Seiltrommel, links den Antrieb des Spillantriebs mit seinen zwei Spillköpfen.



Abb. 8: 4,5-t-Winde des Pistenbullys [5]

Der von uns nachgebaute Pistenbully PB 600 W Polar SCR wird seit 2013 gebaut (Abb. 9). Er ist der Pistenbully mit der höchsten Leistung (Abb. 10). Angetrieben wird er von einem 12,8 l-Sechszylinder-Dieselmotor MB OM 460 LA mit 375 kW (510 PS) und einem maximalen Drehmoment von 2200 Nm [6]. Die Höchstge-

schwindigkeit beträgt 23 km/h. Dieser Pistenbully hat ein zulässiges Gesamtgewicht von 13,5 t, eine Zuladung von 2,5 t und ein beachtliches Tankvolumen von 275 l.



Abb. 9: Pistenbully 600 Polar mit 4,5-t-Winde [1]

Die Winde des Pistenbullys 600 W Polar (Abb. 9) hat eine maximale Zugkraft von 4,5 t [6]. Die nutzbare Seillänge beträgt 1050 m, in einer Sonderversion sogar 1450 m. Beim Windenbetrieb ist eine maximale Fahrgeschwindigkeit von 17 km/h möglich.



Abb. 10: Pistenbully 600 Polar in Grasgehren

## Pistenbully von Erik

Die Anforderungen an Eriks Modell waren: realitätsnahes Aussehen, gute Beispielbarkeit mit möglichst vielen Funktionen, und natürlich von Erik zu bauen.

Die breiten Ketten des Pistenbullys sind eine der großen Herausforderungen mit fischertechnik. Die Lösung sieht man in Abb. 11 und Abb. 12.



Abb. 11: Pistenbully von Erik

Die Ketten sollten ungefähr maßstabsgetreu zum Original sein. Da das Vorbild versetzte Kettenstege hat, werden in diesem Modell sechs Ketten verwendet, bei denen die Rauhenbeläge versetzt angeordnet sind (Abb. 13).



Abb. 12: Pistenbully von Erik

Beim Drehen des Pistenbullys auf der Stelle ergibt sich je nach Bodenbeschaffenheit eine hohe Reibung. Je schwerer der Pistenbully wird, desto wichtiger ist die Reibungsminimierung.

Die Rauhenbeläge gibt es in einer weichen Gummimischung (für gute Traktion) und in einer harten Version (für leichtes Drehen). Als guten Kompromiss zwischen Traktion und perfektem Drehen hat sich die Verwendung von weichen Rauhenbelägen für jeweils eine Kette (zweite Kette von außen, genau unter den Rädern) und jeweils fünf Ketten mit harten Rauhenbelägen ergeben.

Der Bereich zwischen den Ketten ist, wie im Original, sehr schmal. Eine Lagerung der Zahnräder für die Ketten nur in diesem mittleren Bereich ergibt außen keine ausreichende Spannung der Ketten.

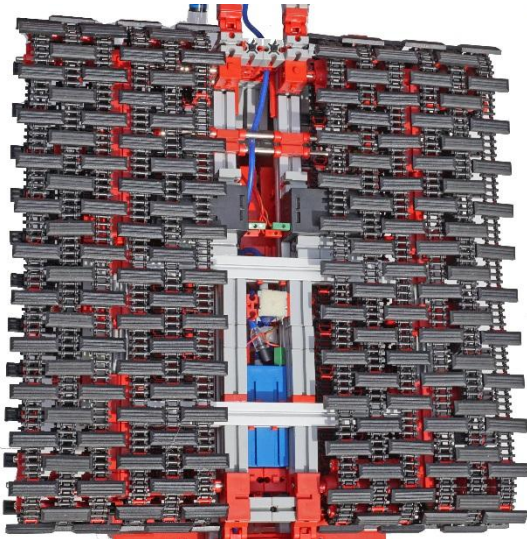


Abb. 13: Ketten des Pistenbulllys

Damit die Ketten auch im harten Spielbetrieb nicht herunterspringen und die Motorleistung der XM-Motoren über die Fernsteuerung ausreicht, wird jede Kettenseite genau in der Mitte der breiten Kette gelagert (Abb. 14). Dadurch ergeben sich kürzere freie Achslängen und die Kräfte sind in der Mitte besser ausgeglichen. Die Antriebszahnradblöcke aus jeweils drei Z30 ergeben stabile Antriebskörper.

Die Reifen 45 (31018) laufen auf der zweit-äußersten Kette. Diese sind minimal größer als der effektive Durchmesser der Z30. Durch die stabile Lagerung der Räder werden die Antriebszahnäder vorne und hinten entlastet, was das Drehen des Pistenbulllys auf der Stelle weiter verbessert.

Außerdem sind fast alle Lagerstellen mit Kugellagern ausgeführt, um auch hier die Reibung zu minimieren. Erik hat die von Papa konstruierten Ketten mit großem Eifer zusammengebaut.

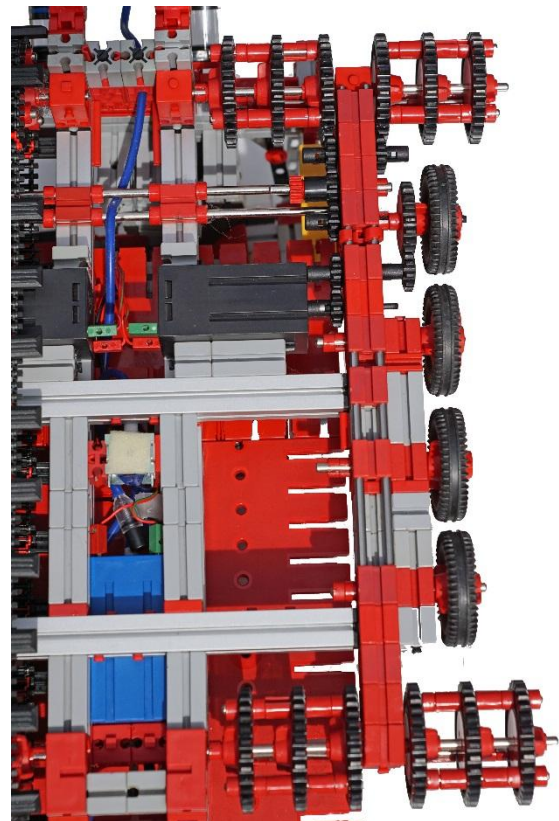


Abb. 14: Kettenaufhängung

Der Antrieb erfolgt über jeweils einen XM-Motor (Abb. 15). Nach einer Übersetzung ins Langsame von 2:1 und am Ende zum „Turtrasrad“ noch einer Übersetzung von 3:1 ergibt sich ausreichend Antriebsmoment. Der Antrieb erfolgt auf beide Zahnrad-Blöcke. Dadurch können sich diese auch nicht gegeneinander verdrehen.

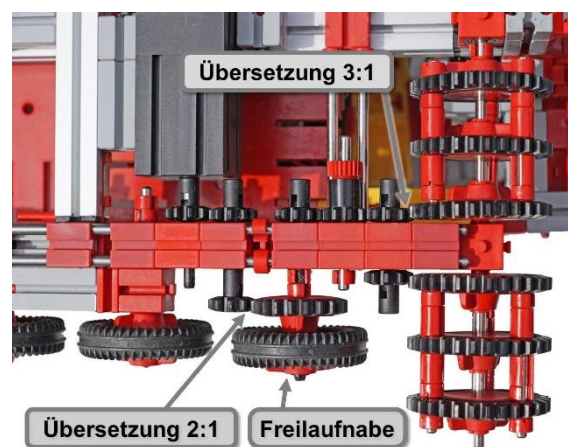


Abb. 15: Antrieb

Ganz wichtig ist noch die Freilaufnabe (68535) des letzten Rades. Die Achse dreht

mit dem Zahnrad Z20 dreimal so schnell wie der auf der Achse sitzende Reifen (Abb. 15). Durch die Freilaufnabe dreht der Reifen frei auf der Achse.

Dieser Pistenbully ist mit der fischertechnik-Fernsteuerung fahrbar. Die Winde hat einen eigenen Empfänger und eine eigene Stromversorgung. Als kleine Spielerei haben wir eine Kamera auf den Fahrersitz gesetzt. Das Bild wird auf einem kleinen Monitor an der Fernsteuerung gezeigt.

Für die Pneumatikzylinder des Frontschilds und des Glättbretts wird ein ft-Pneumatik-Kompressor mit Magnetventil verwendet. Über ein Rückschlagventil in der Zuleitung zu den Zylindern wird beim Abschalten über die parallel liegende Drossel ein sanftes Absenken des Frontschilds und des Glättbretts erreicht.

Die Fernsteuerung spricht nur ein Hubgetriebe mit zwei Endschaltern an. An einem Anschlag werden über einen weiteren Schalter der Kompressor und das Magnetventil aktiviert. Durch diese Anordnung können einerseits der Kompressor und das Magnetventil mit einem eigenen Akku betrieben werden und bleibt andererseits der Zustand der Pneumatik unbeeinflusst von kurzen Ausfällen der Fernsteuerung.

Winde, Aufbau, Frontschild und Glättbrett hat Erik fast alleine aufgebaut. Dabei haben ihm die maßstäblich auf ft-Maßstab verkleinerten Ansichten des Pistenbullys als Bauvorlage sehr geholfen. In der Regel kann man auch relativ junge Kinder mit kleinen Tricks zu großen, stolzen Baumeistern machen. Wir finden, das Ergebnis kann sich sehen lassen.

### Pistenbully von Jörg

Hier vorab zwei schöne Bilder von Jörgs Pistenbully beim Einsatz im Schnee (Abb. 16 und 17).



Abb. 16: Seitenansicht Pistenbully von Jörg



Abb. 17: Pistenbully von Jörg

Für die Steuerung des Pistenbullys wird ein kabelloser Nunchuk verwendet (Abb. 18).



Abb. 18: Katie mit Nunchuk-Fernsteuerung

Der Aufbau über I<sup>2</sup>C und das Steuerprogramm wurden entsprechend dem ft:pedia-Artikel in 2/2013 von Dirk Fox übernommen [7].

Da Erik von der Version seiner Ketten die Exklusivrechte beanspruchte, musste für das zweite Modell eine neue Lösung gesucht werden. Die sichere Fahrfunktion sollte aber genauso gegeben sein.

Die Kettenstege (Abb. 19) werden aus zwei Platten (15x60 und 15x90) zusammgebaut. Sechs BS7,5 und eine Achse 90 verbinden die Platten. Nur über Reibung hält diese Verbindung allerdings im Fahreinsatz nicht lange. Die Platten müssen formschlüssig verbunden werden. Natürlich wurde eine Möglichkeit mit fischertechnik-Teilen gesucht. Zieht man ein fischertechnik-Nylonseil durch die Nut zwischen den Platten und den 6 BS7,5, windet es an jedem Ende unter Spannung um den nächsten Zapfen der Platte und sichert es jeweils mit einem BS7,5, so erhält man eine sichere Verbindung.

Eine Federnocke hindert die BS7,5 an der Verbindung der beiden Platten noch an der Verdrehung. Zwei weitere Federnocken halten die vier Förderglieder der Ketten auf Abstand. In der Mitte bleibt die „Fahrspur“ für die Reifen 60 (37236).

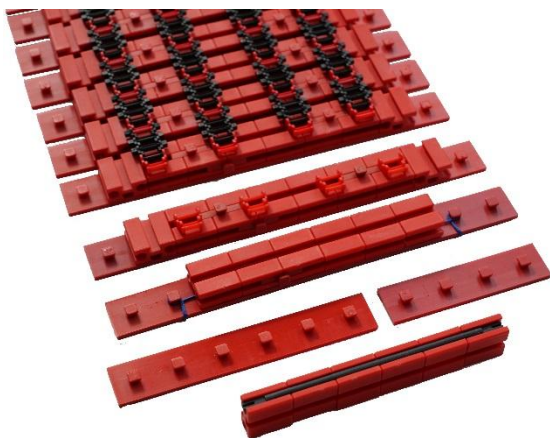


Abb. 19: Aufbau der Ketten

In Abb. 20 sieht man die Anordnung der Reifen und der Zahnräder zu der Kette.

Immer links und rechts von der Fahrspur der Reifen läuft ein Zahnrad auf der Kette. Zur Sicherheit ist innen noch ein weiteres Zahnrad angebracht. Damit laufen die Ketten auch im harten Spieleinsatz sehr sicher. Nach außen steht die Kette wie im Original frei.



Abb. 20: Kette und Räderanordnung

Vorne werden Zahnräder Z40, passend zu der Größe der Reifen 60, verwendet. Die Antriebszahnrad sind, wie im Original das Turrasrad, kleiner. Deshalb wurden dafür Zahnräder Z30 ausgewählt. Die Antriebsachse mit Z30 wurde so angeordnet, dass die Kettenlinie oben eben ist und unten leicht zum Turrasrad ansteigt (Abb. 16).

Der Antrieb erfolgt mit zwei XM-Motoren (Abb. 21). Wieder ist ein besonders reibungsreduzierter Aufbau wichtig, damit das schwere Gefährt ausreichend Kraft hat und problemlos auf der Stelle drehen kann. Für fast alle Lagerstellen wurden, wie bei Eriks Pistenbully, Kugellager verwendet. Die Kugellager 4x12x4 passen einseitig oder beidseitig in die Schneckenmutter (37925).

Erhältlich sind sie z. B. bei fischerfreundsman. Nicht alle Metallachsen passen in die Lager. Herzlichen Dank an Stefan Roth für seinen perfekten Service: Er hat die passenden Achsen extra für uns ausgesucht.

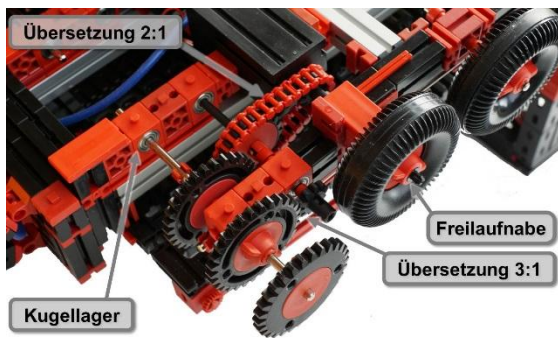


Abb. 21: Antrieb

Das Antriebsmoment wird über eine Kette 2:1 und dann über das Z10 auf das Z30 noch 3:1 ins Langsame übersetzt. Die Freilaufnabe im letzten Reifen ist wiederum sehr wichtig, da die Achse mit Motordrehzahl läuft.

## Aufbau der Winde

Die Winde regelt im Original die Zugspannung des Seils und passt die Seilgeschwindigkeit dadurch immer der Fahrsituation an. Der Nachbau sollte dies natürlich ebenfalls können. Die Winde hat eine eigene TX-Steuerung, einen eigenen Akku und erhält von der Pistenbully-Steuerung keine Signale. Der Pistenbully kann beliebig gesteuert werden. Die Winde reagiert auf die Seilspannung und regelt Seilspannung und Drehposition selbstständig.

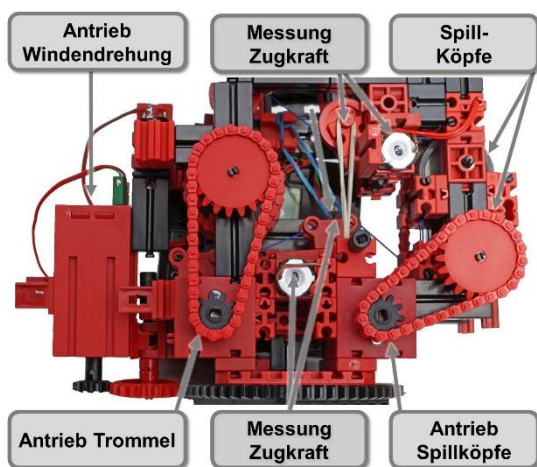


Abb. 22: Aufbau der Winde

Die Winde (Abb. 22) wird von drei Motoren angetrieben: Einer für die Drehung der

Winde, einer für die Seiltrommel und einer für die Spillköpfe. Für die Messung von Drehpositionen werden Potentiometer verwendet. Die kleinen Trimmer mit  $5k\Omega$  passen entweder direkt auf die Steckachsen oder können mit einem kleinen Fräser nachgearbeitet werden. Sie passen perfekt ins ft-Raster und lassen sich durch einen Baustein neben den Potis gegen Verdrehen sichern.

Der linke Motor unterstützt die Drehung der Winde und ist um die Achse des unten liegenden Zahnrades Z20 drehbar. Das oben liegende Potentiometer misst die Verdrehung und über die TX-Steuerung steuert der Motor nach. Zwischen den Adapterlaschen auf beiden Seiten werden Gummibänder als Drehmomentstütze verwendet (in Abb. 22 nicht dargestellt).

Die Seiltrommel (Abb. 23) wird mit einem Encoder-Motor angetrieben. Sie besteht aus vier Rädern 23 (36581), der Rand aus jeweils einem Reifen 32,5 (34995).

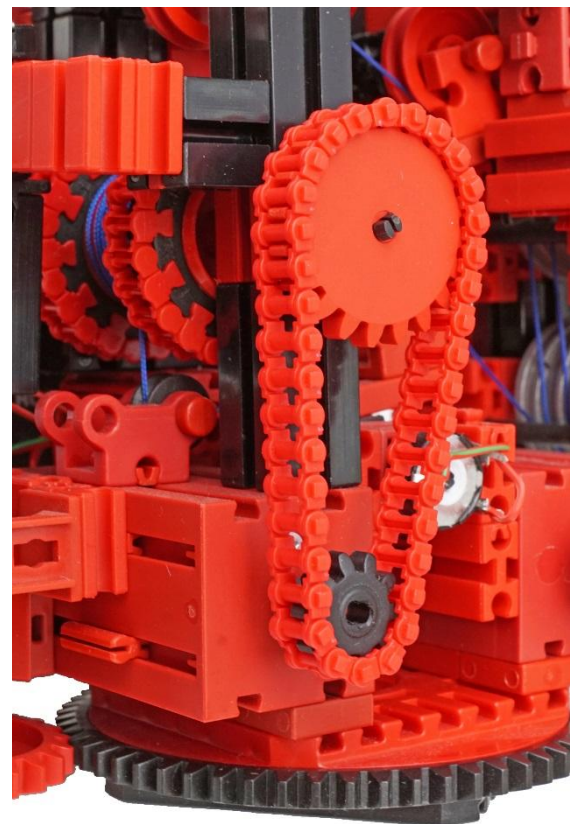
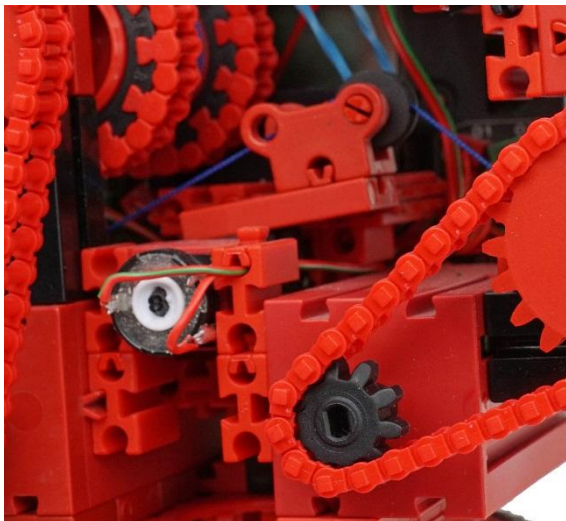


Abb. 23: Trommel der Winde

Damit der Rand noch etwas höher wird, sind abwechselnd Kettenglieder (ohne seitliche Rastnasen 36263) und Förderkettenglieder (37192) mit den Nasen nach innen montiert. Nach der Umlenkung geht das Nylonseil weiter zur Zugspannungsmessung.

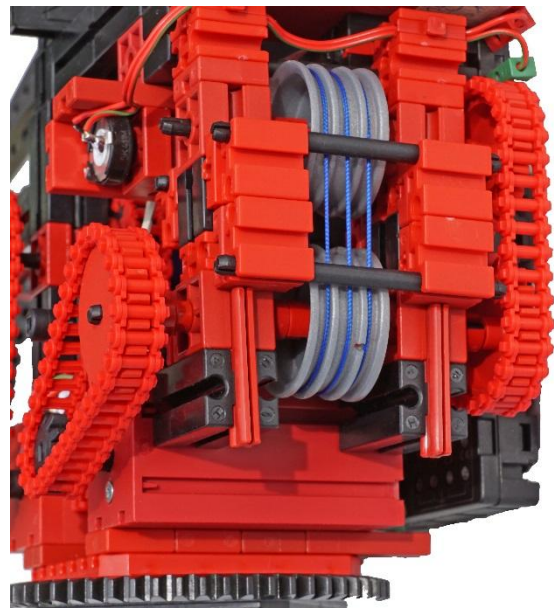
Entsprechend der Seilspannung wird der Antriebsmotor der Seiltrommel, sowohl in der Geschwindigkeit als auch in der Drehrichtung, gesteuert. Die Seilspannung wird über die Wippe (Abb. 24) mit dem Umlenkrädchen gemessen, das sich um die Achse mit dem Potentiometer drehen kann. Als Gegenkraft dient ein Gummiband (im Bild blau im Hintergrund).



*Abb. 24: Messung der Seilspannung für die Seiltrommel*

Anschließend läuft das Windenseil über die Spillköpfe (Abb. 25).

In dem Modell wird das Nylonseil 3-mal um die beiden Felgen 30 herumgeführt. An 6 Stellen sind Achsen so angebracht, dass sie leicht auf den beiden Felgen aufliegen. Ein Abspringen oder Verrutschen des Nylonseils von der Felge kann so sicher vermieden werden.



*Abb. 25: Spillköpfe*

Nach den Spillköpfen muss natürlich wieder die Seilspannung gemessen werden. Die Wippe ist in Abb. 26 (oben) bzw. Abb. 22 zu erkennen.



*Abb. 26: Seilführung mit Messung der Seilkraft*

Die Regelung der Spillköpfe und der Trommel erfolgen unabhängig voneinander. Regelungstechniker könnten sich hier richtig austoben.

Eine einfache Lösung ist in Abb. 27 dargestellt. Bei zu hoher Seilspannung wird die Geschwindigkeit des Motors beim Abwickeln stufenweise erhöht, beim Aufwickeln erniedrigt. Ist beim Aufwickeln trotz Reduzierung der Geschwindigkeit bis zum Stillstand die Seilspannung immer noch zu hoch, wechselt die Laufrichtung, d. h. es wird abgewickelt.



Da das gesamte System Reibung hat (insbesondere die Spillköpfe mit den sechs anliegenden Achsen), wird der Motor immer mit einem Offset angesteuert (Abb. 27 unten). Damit läuft der Wechsel der Laufrichtung auch schnell genug ab.

Mit dieser Steuerung läuft die Winde nach Optimierung der Parameter relativ gleichmäßig, sodass beim Fahren mit dem Pistenbully ein Durchhängen des Seils vermieden wird.

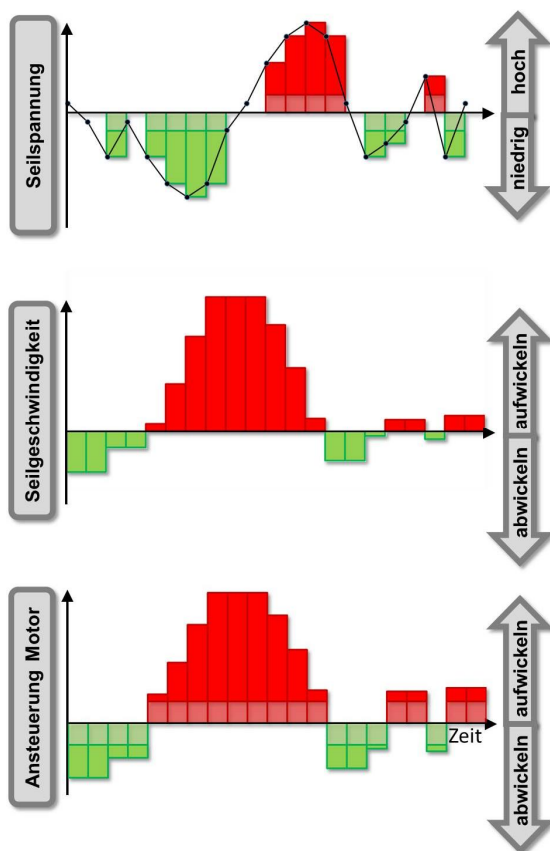


Abb. 27: Regelung der Spillköpfe bzw. der Seiltrommel

## Resümee

Auf der ft-Convention 2014 haben wir unsere Modelle ausgestellt.

Wichtig ist für uns nicht nur das Bauen mit fischertechnik. Das Ideensammeln, die Ausflüge zu den Pistenbullys, die Foto-Session und natürlich auch das Ausstellen gehören zu diesem schönen Hobby einfach dazu [8].

Abb. 28 zeigt meinen stolzen Sohn Erik, natürlich im Pistenbully-Outfit, beim Präsentieren auf der ft-Convention.



Abb. 28: Erik auf der ft-Convention 2014

Auch in diesem Winter waren wir beim Skifahren in Grasgehren. Einer der „echten“ Pistenbullys, ein PB 300 W Kandahar, arbeitete in der Nähe des Parkplatzes. In der Hoffnung auf gute Fotos hatten wir unsere Modelle am Morgen ins Auto gepackt. Wir wurden belohnt, wie man in Abb. 29 sehen kann. Herzlichen Dank an das Pistenbully-Team vom Skigebiet Grasgehren, die dieses Bild möglich gemacht haben!



Abb. 29: Pistenbullys in Grasgehren haben Verstärkung

## Quellen

- [1] [Firmenhistorie der Kässbohrer Geländefahrzeug AG](#)
- [2] Helmut Kanzler: *Typenkompass Pistenbully*. Motorbuchverlag, 2015

- [3] Stephan Mayer: [Pistenraupe mit einer Seilwindenanordnung](#). Patent DE 102010061982 A1
- [4] Thomas Püttmann: [Drehmomentverstärker](#). ft:pedia 1/2011, S. 9-15.
- [5] Bildersammlung [www.pistenraupe.de](http://www.pistenraupe.de)
- [6] Kässbohrer Geländefahrzeug AG: [Pistenbully 600 Polar SCR](#). Firmenprospekt.
- [7] Dirk Fox: [I2C mit dem TX – Teil 4: Nunchuk-Fernsteuerung](#). ft:pedia 2/2013, S. 41-49.
- [8] Bilderpool der ft:community: [fischertechnik-Convention 2014](#).



Abb. 30: Eriks Pistenbully – nochmal in groß...

Mechanisches Rechnen

## Consul, the Educated Monkey

Dirk Fox

Das 1x1 ist nicht erst für heutige Siebenjährige eine Herausforderung – schon vor 100 Jahren musste man „da durch“. Und schon damals haben findige Pädagogen und Tüftler darüber nachgedacht, wie man diesen Lernprozess ein wenig annehmlicher, anschaulicher und attraktiver gestalten kann. 1915 fand William H. Robertson eine faszinierende Lösung: Consul.

### Geschichte

„Consul, The Educated Monkey“ ist eine mechanische Rechenhilfe für Addition und Multiplikation zweier ganzer Zahlen aus  $\{1, \dots, 12\}$  aus dem Jahr 1915 (Abb. 1). Sie ist kinderleicht zu bedienen: Werden die Füße des Affen so eingestellt, dass sie auf die Summanden bzw. Faktoren zeigen, dann erscheint im Fenster zwischen den Händen des Affen das Rechenergebnis. Wer die Funktionsweise einmal „live“ ausprobieren möchte, dem sei die [Flash-Simulation](#) [1] auf tan-gram.de und Windows-Nutzern außerdem die [Implementierung von Reinhard Atzbach](#) [2] empfohlen.

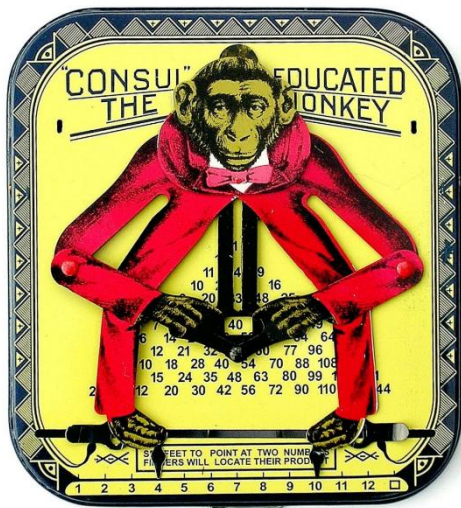


Abb. 1: Consul, the Educated Monkey (Educational Novelty Company, 1915)

„Consul, The Educated Monkey“ wurde im Jahr 1915 vom Amerikaner William H. Robertson aus Belmont, Ohio zum Patent angemeldet. Am 27.06.1916 wurde ihm das Patent auf den „Educated Monkey“ erteilt (Abb. 2); zweieinhalb Jahre später, am 26.11.1918, erhielt er ein zweites Patent auf die Mechanik (Abb. 3).

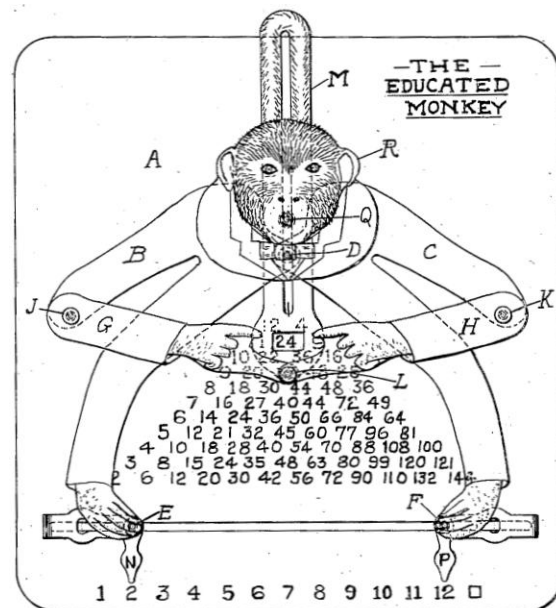


Abb. 2: Educated Monkey (US-Patent Nr. 1188490 vom 27.06.1916 [4])

Das von seiner Educational Novelty Company von 1915 bis 1922 verkaufte, aus Blech hergestellte ‚Rechenspielzeug‘ ist heute ein begehrtes Sammlerobjekt [5].

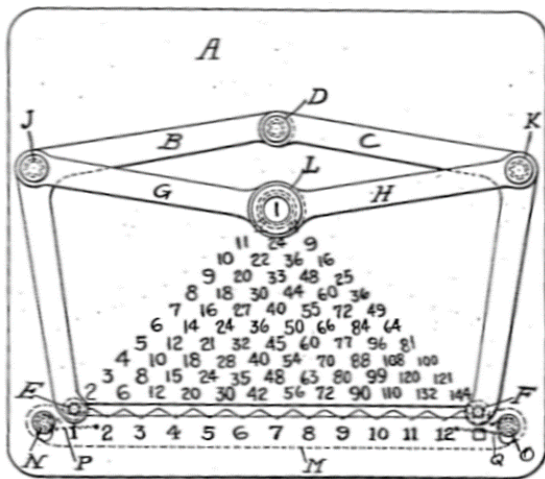


Abb. 3: *Mechanik des Educated Monkey* (US-Patent Nr. 1286112 vom 26.11.1918) [4]

Über den Hintergrund des Namens ‚Consul‘ gibt es lediglich Spekulationen. Eine sehr plausible führt ihn auf den Dokumentarfilm „Consul (the Great) Crosses the Atlantic“ des Filmpioniers [Charles Urban](#) (1867-1942) aus dem Jahr 1909 zurück, der den ersten Besuch eines in Europa berühmten dressierten Affen namens Consul in den USA zeigt.

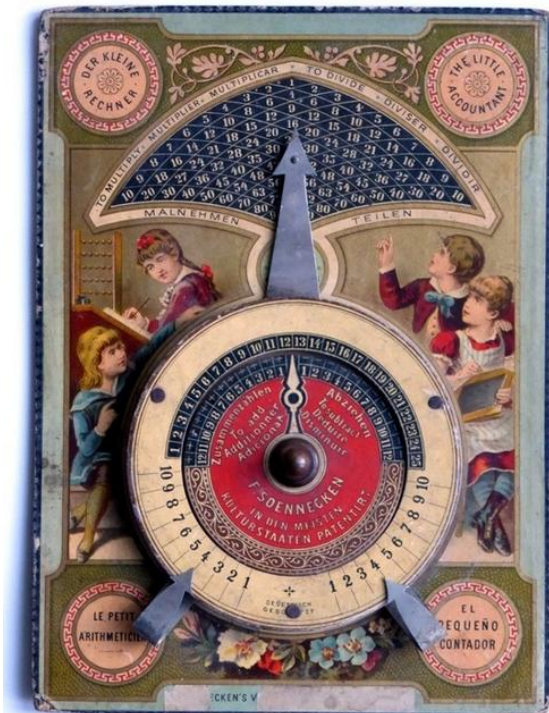


Abb. 4: Soenneckens „kleiner Rechner“ von 1889 (Quelle: [rechnen-ohne-strom.de](http://rechnen-ohne-strom.de) [5])

Tatsächlich hat der ‚Consul‘ deutsche Wurzeln [5]. Der Verlag Friedrich Soennecken aus Bonn hatte bereits seit 1889 den „kleinen Rechner“ im Angebot (Abb. 4), eine mechanische „Rechenmaschine“ mit sehr ähnlichem Funktionsprinzip, wie das Patent von Friedrich Soennecken aus dem Jahr 1889 zeigt (‚Rechenvorrichtung zum Vielfachen und Theilen‘ [6], Abb. 5).

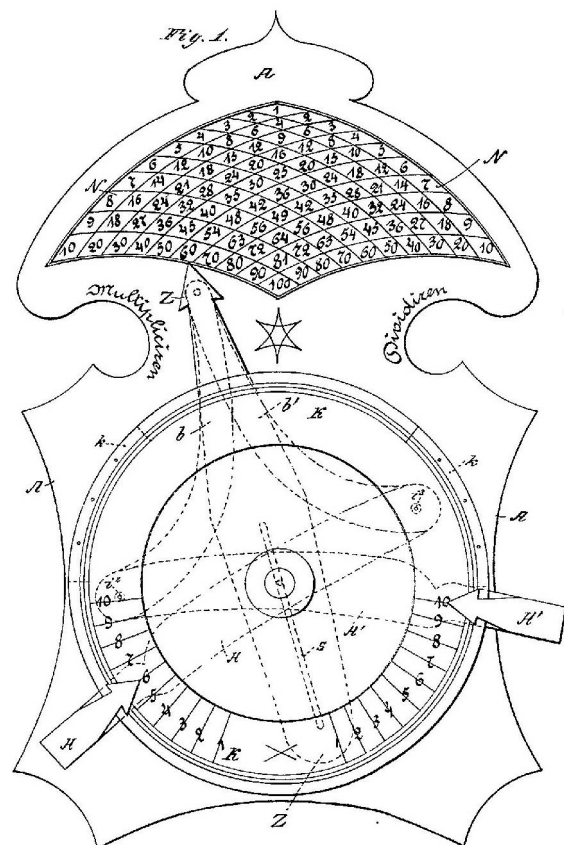


Abb. 5: Patent von Friedrich Soennecken (DRP 51445 vom 13.06.1889 [6])

### Der fischertechnik-Consul

Originalgetreue Nachbildungen des Consul kann man für 13-20 € erwerben. Für einen wahren fischertechniker ist das natürlich keine Option: ein solch feiner Mechanismus gehört mit fischertechnik realisiert – und das gesparte Geld in eine Erweiterung der Teilesammlung investiert.

Dafür sind aber zunächst ein paar kleine Hürden zu nehmen – denn hinter der Mechanik lauert, ihr ahnt es, Mathematik.

## Die Mechanik

Die Mechanik des Consul ist ein wenig trickreich. Wie man an Friedrich Soennecens Patentzeichnung und Modell erkennt, liegen die Zahlen einer Zweier-, Dreier-, Viererreihe etc. im Unterschied zum Consul nicht auf einer Geraden. Das macht die Multiplikations- bzw. Additionstabelle etwas unübersichtlich und mindert die Eignung des „kleinen Rechners“ als Lernhilfe – schließlich soll er das Kopfrechnen nicht ersetzen, sondern trainieren.

Wie aber muss man die Mechanik konstruieren, damit die Additions- und Multiplikationstabellen des Consul ein schön strukturiertes Dreieck bilden?

Die Bedingung ist klar: Hält man ein „Bein“ des Rechenaffen fest und bewegt das andere nach links oder rechts, muss die Bewegung der Hände auf einer Geraden liegen. Diese Bedingung lässt sich mathematisch ausdrücken, wenn wir den Rechenaffen als geometrisches Gebilde zeichnen [7, 8]. Abb. 6 zeigt die Geometrie des Mechanismus mit den Punkten  $D, E, F, J, K$  und  $L$  aus den Patentzeichnungen in Abb. 2 und 3:

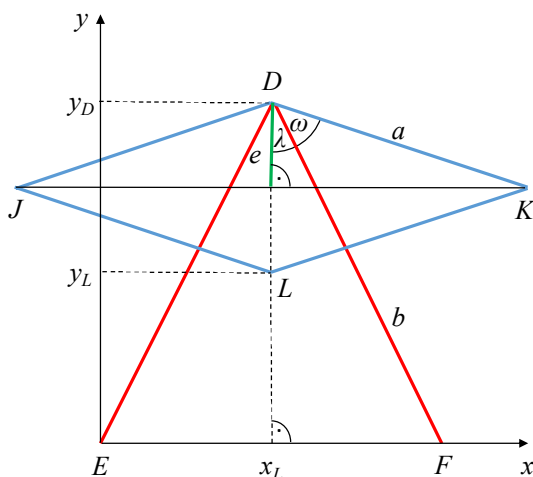


Abb. 6: Geometrische Konstruktion des Educated Monkey

Dabei wählen wir die „Arme“ des Rechenaffen so, dass Ober- und Unterarme gleich lang sind (blaue Linien, Länge  $a$ ), und verbinden die „Beine“ (rote Linien, Länge  $b$ ) in

einem festen Winkel  $\omega$  mit dem zugehörigen Oberarm. Wir halten nun den linken „Fuß“ (Punkt  $E$ ) fest und bewegen den rechten (Punkt  $F$ ) auf der  $x$ -Achse.

Dabei interessiert uns die Bewegungsgleichung des Punktes  $L = (x_L, y_L)$ :

$$y_L = f(x_L)$$

Wie aber erhalten wir die Funktionsgleichung  $f(x_L)$ ?

Da hilft wieder einmal ein wenig Trigonometrie. Alle erforderlichen Hilfsgrößen – den Winkel  $\lambda$  und die Höhe  $e$  (grüne Linie) – sind in Abb. 6 schon eingezeichnet. Wir erkennen leicht:

$$y_L = y_D - 2e$$

$e$  und  $y_D$  wiederum sind Katheten zweier rechtwinkliger Dreiecke, daher gilt  $e = a \cdot \cos(\omega + \lambda)$  und  $y_D = b \cdot \cos \lambda$ , also folgt:

$$y_L = b \cdot \cos \lambda - 2a \cdot \cos(\omega + \lambda)$$

Nach den Rechenregeln für den Cosinus eines Winkels (Additionstheorem) gilt:  $\cos(\omega + \lambda) = \cos \omega \cdot \cos \lambda - \sin \omega \cdot \sin \lambda$ , also:

$$y_L = b \cdot \cos \lambda - 2a \cdot (\cos \omega \cdot \cos \lambda - \sin \omega \cdot \sin \lambda)$$

Oder (etwas umgestellt):

$$y_L = (b - 2a \cdot \cos \omega) \cdot \cos \lambda + 2a \cdot \sin \omega \cdot \sin \lambda$$

Dabei sind  $a, b$  und  $\omega$  konstant, lediglich  $\lambda$  verändert sich, wenn der „Fuß“  $F$  verschoben wird. Wir versuchen nun,  $\lambda$  durch  $x_L$  „auszudrücken“. Im rechtwinkligen Dreieck mit den Ecken  $E, D$  und  $(x_L, 0)$  gilt:  $\cos \lambda = \sqrt{1 - (\sin \lambda)^2}$  und  $x_L = b \cdot \sin \lambda$ .

Damit können wir in unserer Funktionsgleichung  $\sin \lambda$  und  $\cos \lambda$  ersetzen und erhalten  $y_L$  als Funktion von  $x_L$ :

$$y_L = (b - 2a \cdot \cos \omega) \cdot \sqrt{1 - \frac{x_L^2}{b^2}} + 2a \cdot \sin \omega \cdot \frac{x_L}{b}$$

Damit  $y_L = f(x_L)$  eine lineare Funktion ist, muss der Wurzel-Term unabhängig von  $x_L$  gleich 0 sein. Jetzt können wir unsere Bedingung mathematisch exakt formulieren:

*Die „Hände“ des Rechenaffen bewegen sich genau dann auf einer Geraden, wenn gilt:*

$$b - 2a \cdot \cos \omega = 0$$

bzw.

$$b = 2a \cdot \cos \omega$$

Wir sehen: Damit die Bedingung erfüllt ist, müssen die Bein- und Armlängen unseres Rechenaffen in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen, das wiederum von der Größe des gewählten (festen) Winkels  $\omega$  abhängt.

### Die Modellkonstruktion

Damit die Beine unseres Rechenaffen auch echten Beinen ähneln, sollten sie – wie beim originalen Consul – ein leicht gebogenes Kniegelenk besitzen. Für die Wahl des richtigen Längenverhältnissen von Beinen zu (Ober-)Armen gehen wir aber zunächst einmal von geraden Beinen aus – die Länge eines abgeknickten Unterschenkels lässt sich später leicht experimentell bestimmen.

In dem fischertechnik-Modell des Consul in Abb. 7 habe ich als festen Winkel  $\omega = 30^\circ$  gewählt, als (Ober-) Armlänge  $a = 11$  cm. Daraus errechnet sich die Länge eines (geraden) Beins wie folgt:

$$b = 22 \text{ cm} \cdot \cos 30^\circ = 11 \cdot \sqrt{3} \cong 19,05 \text{ cm}$$

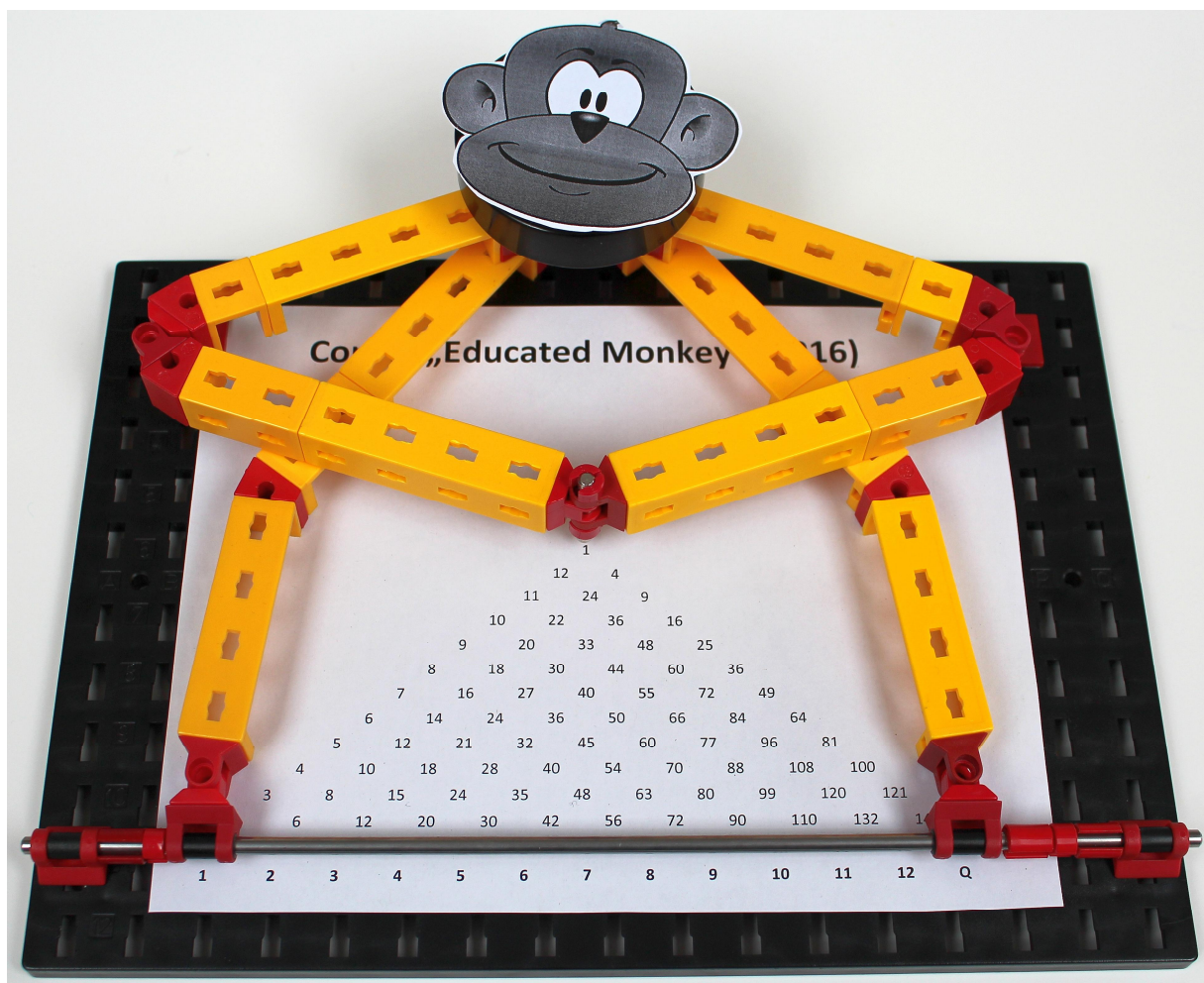


Abb. 7: Consul, The Educated Monkey aus fischertechnik

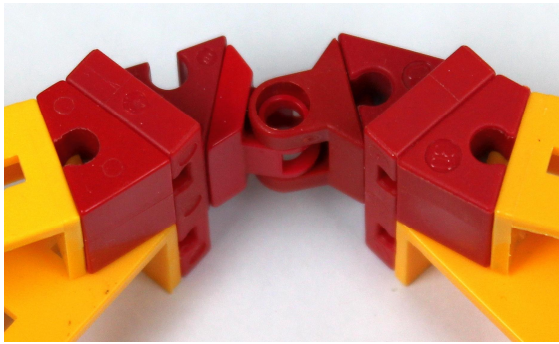


Abb. 8: „Kopfgelenk“

Die Konstruktion des in Abb. 7 verdeckten Kopfgelenks zeigt Abb. 8. Die Arme und Beine werden paarweise über eine Bauplatte 15x30x5 mit Nuten (38428) fest miteinander verbunden. Man erkennt gut die 30°-Winkelsteine, mit denen die Oberarme abgewinkelt werden. Beide Seiten werden über je einen Winkelstein 60° und eine Gelenkklaue verknüpft.

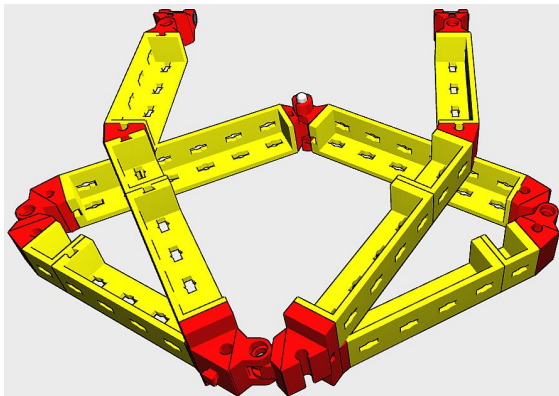


Abb. 9: Gesamtkonstruktion (von „hinten“)

Die 3D-Konstruktion in Abb. 9 zeigt die Mechanik des fischertechnik-Consul von hinten. Der gelbe Statik-Teil der Oberarme muss wegen der Kopfgelenk-Konstruktion eine Baulänge kürzer sein als der der Unterarme. Ober- und Unterarme sind über zwei Winkelsteine 30° und eine Gelenkklaue (als „Ellenbogen“) miteinander verbunden.

In Abb. 10 seht ihr die beiden Hände des Rechenaffen, die eine Metallstange 30 als „Zeigestift“ halten, und die Füße, die sich auf Gelenkwürfel-Klauen (31436) mit Lagerhülse (36819) auf einer Metallachse 260 (107436) verschieben lassen.

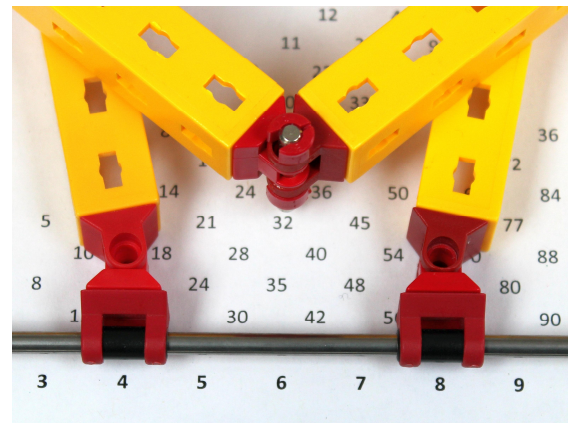


Abb. 10: „Füße“ und „Hände“

Fügt man im Bein nach 10,5 cm (sieben Bauhöhen) einen 30°-Winkelstein als Kniegelenk ein, muss man den Unterschenkel des Beins um 0,75 cm (= ½ Bauhöhe) verkürzen (Abb. 9).

Durch das Kopfgelenk wird eine Metallachse 60 mit Klemmbuchse 10 gesteckt, auf der der Kopf des Affen montiert wird. Dafür habe ich eine Schwingscheibe (39006) verwendet (Abb. 11) – alternativ tun es auch ein Rad 23 (36581), ein Walzenrad (35386) oder eine Drehscheibe 60 (31019).



Abb. 11: „Kopf“ (Unterseite)

Wer möchte, kann auf die Oberseite des Kopfes nun noch das Konterfei eines Affen kleben – wie z. B. das in Abb. 12 gezeigte, das unter Public Domain-Lizenz zum [kostenlosen Download](#) angeboten wird.

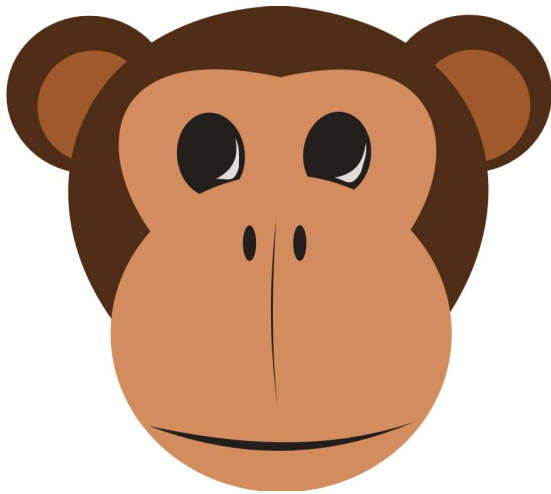


Abb. 12: Affenkopf (Public Domain)

### Das Multiplikationsschema

Jetzt fehlt noch das Multiplikationsschema im Hintergrund. Mit einem Textprogramm lässt es sich sehr einfach erstellen, indem man eine „1“ zentriert in die Mitte des Blattes schreibt und dann Zeile für Zeile die Zahlenwerte einträgt, jeweils voneinander durch einen Tabulator getrennt. In den Diagonalen von links oben nach rechts unten stehen dann (von links nach rechts) die 2er, 3er, 4er bis zur 12er Reihe – und in der ganz rechten alle Quadratzahlen von 1-144 (siehe Abb. 2, 3).

Anschließend markiert ihr das gesamte Zahlendreieck und wählt die Tabulatorlänge so, dass die unterste Zeile eine Breite von 16 cm hat. Schließlich stellt ihr die Zeilenabstände so ein, dass die Zahlenpyramide genau 7 cm hoch ist. Mit etwas Abstand (ca. 1 cm) wird darunter eine Zeile mit den Faktoren von 1-12, gefolgt von einem „Q“ für Quadrieren eingefügt.

Auf dieselbe Weise lässt sich ein Additionsschema erstellen – da auch die Addition kommutativ ist, funktioniert unser Consul genauso gut als Additionswerkzeug [8].

### Downloads

Die von mir verwendete [Multiplikations- und Additionstabelle](#) habe ich zum Download bereitgestellt.

Wer den fischertechnik-Designer verwendet, finden eine in Baugruppen strukturierte [3D-Bauanleitung](#) im Downloadbereich der ft-Community.

Natürlich lässt sich auch ein Consul mit anderen Proportionen konstruieren – experimentiert ruhig einmal mit dem Winkel  $\omega$  und der Oberarmlänge  $a$ .

Ich wünsche euch viel Vergnügen mit eurem fischertechnik-Consul!

### Quellen

- [1] Flash-Simulation (<http://www.tan-gram.de/consul.pl>)
- [2] Reinhard Atzbach: [Consul the Educated Monkey für Windows](#), 2001.
- [3] William H. Robertson: [Toy](#). US-Patent Nr. 1188490, 27.06.1916.
- [4] William H. Robertson: [Calculation Device](#). US-Patent Nr. 1286112, 26.11.1918.
- [5] Wilfried Denz: [Rechenaffen](#). Rechnen-ohne-Strom.de.
- [6] Friedrich Soennecken: [Rechenvorrichtung zum Vervielfachen und Theilen](#). Deutsches Reich Patent Nr. 51445, 13.06.1889.
- [7] Dörte Haftendorn: [Educated Monkey oder „Der rechnende Affe“](#). 19.09.2008.
- [8] Sidney J. Kolpas, Gary R. Massion: [Consul, the Educated Monkey](#). In: The Mathematics Teacher, Vol. 93, No. 4, April 2000, S. 276-279.



Mechanisches Rechnen

## Die Rechenmaschine

Thomas Püttmann

*Durch den allzu häufigen Gebrauch von Taschenrechnern verlernt man das Rechnen. Kaum jemand weiß, was in ihnen vor sich geht und wie das Angezeigte zu bewerten ist. Bei der hier vorgestellten Rechenmaschine ist das anders: Alle Rechenvorgänge sind sichtbar, greifbar, hörbar – man lernt spielend durch bloßes Experimentieren. Das Addierwerk unseres Modells ist die weltweit erste Umsetzung eines Konzepts von Tschebyscheff aus den 70er Jahren des 19. Jahrhunderts mit einem Konstruktionssystem.*

### Einleitung

Mit der hier vorgestellten Rechenmaschine (siehe Abbildungen 1 und 2) kann man auf faszinierende Weise addieren, subtrahieren, multiplizieren, dividieren und Wurzeln ziehen und dabei alle Rechenvorgänge direkt beobachten und kontrollieren. In der vorgestellten Variante arbeitet die Maschine mit dreistelligen Zahlen, deckt also den Bereich von 0 bis 999 ab, das Addierwerk kann aber grundsätzlich mit beliebig vielen Stellen aufgebaut werden und arbeitet dann genauso problemlos und zuverlässig wie mit drei Stellen. Möglich macht dies der besondere Mechanismus, der *kontinuierliche Zehnerüberträge* erzeugt.

Dem Wort *Zehnerübertrag* begegnet man heutzutage in der Regel zum ersten Mal in der Grundschule, wenn man das schriftliche Rechnen erlernt:

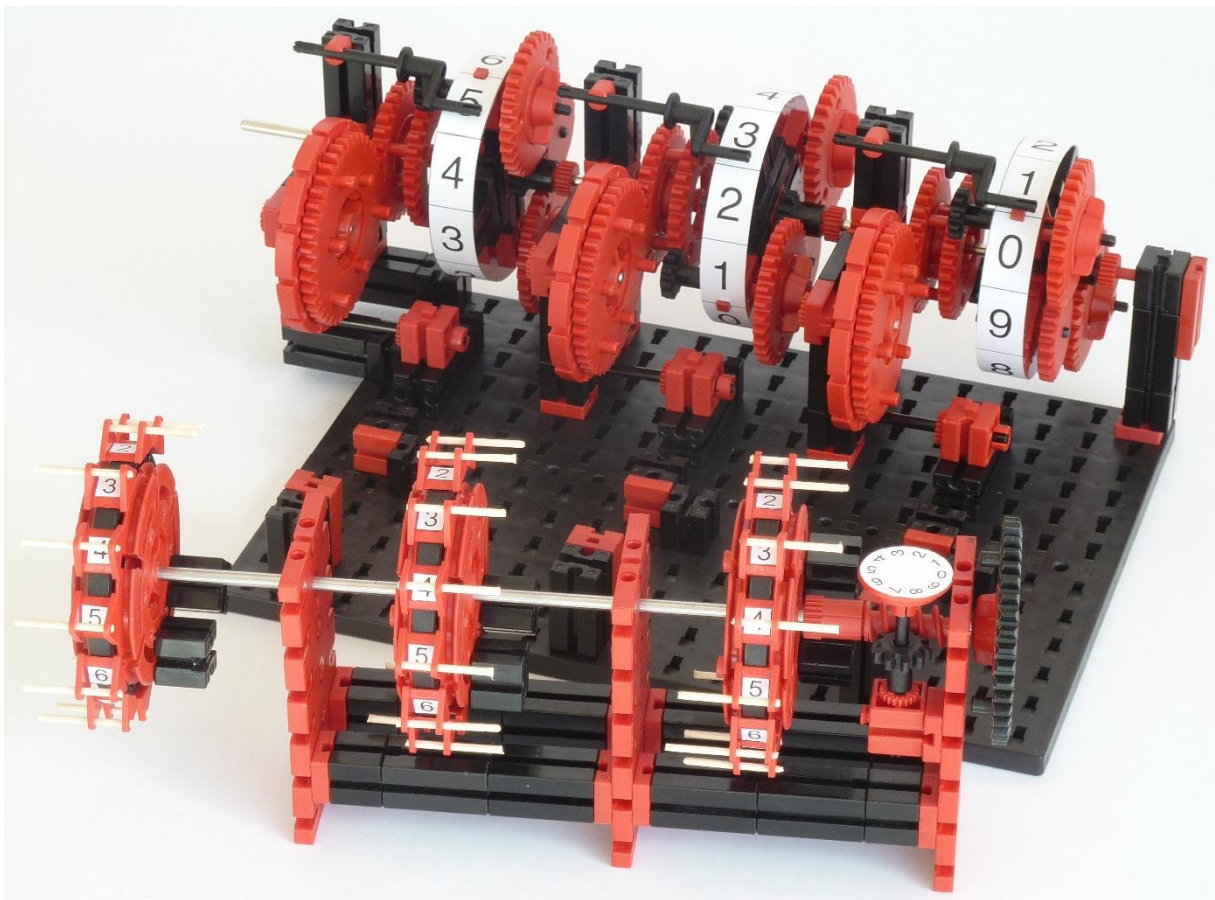
$$\begin{array}{r}
 237 \\
 + 184 \\
 \hline
 421
 \end{array}
 \leftarrow \text{Zehnerüberträge}$$

Die Buchführung der Zehnerüberträge ist das zentrale Problem bei der Durchführung der Grundrechenarten im Dezimalsystem und anderen Stellenwertsystemen.

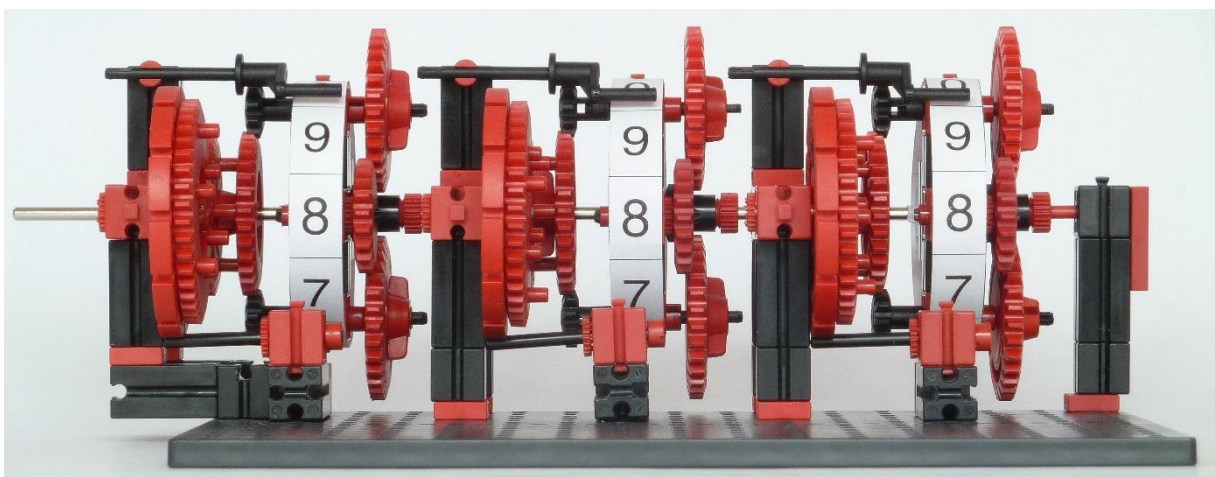
Die Geschichte der Rechenmaschinen ist daher besonders am Anfang zu einem großen Teil von der Entwicklung geeigneter Übertragsmechanismen bestimmt. Diese Geschichte wird im Folgenden soweit dargestellt, dass die zwei Grundkonzepte der hier vorgestellten Rechenmaschine eingeordnet werden können: das Addierwerk mit kontinuierlichen Zehnerüberträgen und das Eingaberegister mit setzbaren Stiften zur Multiplikation.

### Geschichte

Grundlage allen Rechnens ist das Zählen und die symbolische Darstellung der Zahlen. Anfänglich wurde das Zählen mit einfachen Hilfsmittel bewerkstelligt. Zum Beispiel wurde für jedes gezählte Objekt ein Stein in einen Beutel gelegt. Addieren ist dann nichts anderes als abgezähltes Hinzufügen von Steinen und Subtrahieren nichts anderes als abgezähltes Wegnehmen. Das Rechnen ist also bei dieser direkten Form der Zahldarstellung von größtmöglicher Einfachheit. Mit zunehmender Anzahl an Steinen verliert man aber die Übersicht und kann nur noch schlecht abschätzen, wie viele Steine im Beutel sind. Das Nachzählen dauert lange und ist fehleranfällig.



*Abb. 1: Die Rechenmaschine mit abnehmbarem und versetzbarem Eingaberegister*



*Abb. 2: Das Addierwerk mit kontinuierlichem Zehnerübertrag*

Um die Übersicht bei größeren Anzahlen nicht zu verlieren, wird gebündelt oder gruppiert, wie das jeder von der Führung von Strichlisten her kennt:



Der nächste Schritt ist der Austausch oder das Ersetzen von Bündeln gegen bzw. durch höherwertige Einheiten. Dies ist typisch für Additionssysteme wie das römische Zahlensystem. Fünf I werden durch den Buchstaben V ersetzt, zwei V durch ein X, fünf X durch ein L, zwei L durch ein C, fünf C durch ein D und zwei D durch ein M. So steht zum Beispiel LXVIII für die Zahl 69 im Dezimalsystem. (Subtraktive Schreibweisen wie IV statt IIII sind zum Rechnen unpraktisch und wurden erst populär, als man mit römischen Zahlen nicht mehr rechnete.)

### Der Abakus

Der römische Abakus in Abbildung 3 ist nichts anderes als ein Speicher für römische Zahlen. Die Einkerbungen zwischen den oberen und unteren Spalten geben an, welchen Wert die Spalten haben. So ist die mit I beschriftete dritte Spalte von rechts die Einer-/Fünfer-Spalte, die mit X markierte Spalte links daneben die Zehner-/Fünfziger-Spalte. Ein Knopf wird gezählt, wenn er zur Mitte geschoben ist. Das Funktionsmodell in Abbildung 4 speichert somit die Zahl DCCCXXXVII = 847.



Abb. 3: Replik eines römischen Abakus aus dem 2./3. Jhd. n. Chr. im Bonner Artihmeum



Abb. 4: Auf drei Stellen verkürztes Funktionsmodell eines römischen Abakus

Im römischen Abakus ist auch eine weitere Stufe in der Entwicklung der Zahldarstellungen geometrisch umgesetzt, nämlich das Dezimalsystem als Beispiel für ein Stellenwertsystem. Jedes Paar aus oberer und unterer Spalte bildet eine Stelle in der Dezimaldarstellung einer Zahl – nur enthalten die Spalten geometrische Muster statt der indisch-arabischen Ziffernsymbole 0 bis 9. In Abbildung 4 liefert das Spaltenpaar links die Ziffer 8, das Spaltenpaar in der Mitte die Ziffer 4 und das Spaltenpaar rechts die Ziffer 7 der Dezimaldarstellung der gespeicherten Zahl 847.

Auf dem römischen Abakus kann jede Zahl auf genau eine Weise gespeichert werden. Beim Rechnen hat der Benutzer selbst den Austausch gegen höhere oder niedrigere Einheiten unmittelbar vorzunehmen. Wenn zum Beispiel die Zahl XXIII zu der in Abb. 4 angezeigten Zahl DCCCXXXVII addiert werden soll, stellt man fest, dass keine zwei weiteren X-Knöpfe mehr zur Mitte gezogen werden können. Also benutzt man  $XX = L - XXX$  und zieht den L-Knopf zur Mitte und drei X-Knöpfe zum Rand. Vier I-Knöpfe können auch nicht mehr zur Mitte

gezogen werden. Daher benutzt man IIII = V - I und zieht einen I-Knopf zum Rand. Da der V-Knopf schon gesetzt ist, verwendet man weiter  $V = X - V$ , löscht also den V-Knopf und setzt einen weiteren X-Knopf. Jetzt ist das Ergebnis DCCCLXI im Abakus gespeichert.

Der römische Abakus war ein hervorragendes Rechenhilfsmittel, mit dem ein geübter Benutzer die Grundrechenarten schnell und sicher durchführen konnte. Das liegt daran, dass geometrische Muster vom menschlichen Gehirn schnell und effektiv gespeichert und verarbeitet werden können. Durch die Fünfer-Zwischenstufen entstehen überschaubare Einheiten und es müssen nur wenige, musterbasierte Regeln erlernt werden.

Wer einmal den Computerspielklassiker Tetris oder eine seiner Varianten gespielt hat, kennt die unglaubliche Geschwindigkeitssteigerung, die man nach ein paar Stunden Training erzielen kann. Die gleichen Geschwindigkeitssteigerungen erfahren Benutzer des japanischen Sorobans, einer modernen Abakusvariante, die zwar historisch nicht direkt vom römischen Abakus abstammt, aber die gleichen geometrischen Muster benutzt.

Im Internet finden sich viele Texte und Videos zum Thema Abakus. Faszinierend sind insbesondere Videos von Sorobanwettkämpfen oder Wettkämpfen von Kopfrechenkünstlern, die zum Beispiel acht fünfstellige Zahlen in einer halben Sekunde addieren und dabei die Abakusmuster im Kopf manipulieren.

Der Abakus ist ein Rechenhilfsmittel – ein Speicher, der auf die mentalen Qualitäten und Fingerfertigkeiten seines Benutzers maßgeschneidert ist. Als Grundlage für eine automatische Rechenmaschine eignet er sich nicht, nicht einmal als Grundlage für ein Zählwerk.



Abb. 5: Funktionsmodell eines Sorobans

In der Sprache der heutigen Technik formuliert liegt das daran, dass dem Abakus ein Impulseingang fehlt. Wie man um eins weiterzählt, ist stark davon abhängig, welche Zahl schon gespeichert ist. Ist zum Beispiel die Zahl III im Abakus gespeichert, muss nur der vierte Knopf zur Mitte gezogen werden. Ist dagegen XVIII gespeichert, muss festgestellt werden, dass kein weiterer I-Knopf vorhanden ist und daher vier I-Knöpfe zurückgesetzt werden müssen. Dann muss festgestellt werden, dass der V-Knopf schon gesetzt ist. Anschließend muss er zurückgesetzt und ein zweiter X-Knopf gesetzt werden. Diese aufeinanderfolgenden Fallunterscheidungen und die dadurch auszulösenden Aktionen sind mechanisch schwierig zu automatisieren. Es ist also nicht verwunderlich, dass wir kein antikes Zählwerk kennen, das auf dem Abakus aufbaut.

### **Uhren und Zählwerke**

Der Weg vom Abakus zur Rechenmaschine ist der Weg von Mustern auf Stangen zu mit Ziffern beschrifteten Rädern. Wesentlich für diese Entwicklung war sicherlich das Aufkommen mechanischer Uhren ab dem Ende des 13. Jahrhunderts. Ab etwa 1580 baute der Uhrmacher, Instrumentenbauer, Mathematiker und Astronom [Jost Bürgi](#)

(1552-1632) Uhren, deren Gangungenauigkeit etwa eine Minute pro Tag betrug. Das war eine enorme Verbesserung gegenüber den zuvor gebauten Uhren und ermöglichte die präzisere Datierung astronomischer Beobachtungen. Um die Zeit auch entsprechend genau ablesen zu können, versah Bürgi seine Uhren mit Minuten- und später auch mit Sekundenzeigern. Mechanische Uhren waren damit *Schwingungszählwerke* mit einem doppelten *kontinuierlichen Übertragsmechanismus* geworden.

Jeder kennt diese Art des Übertrags von unseren heutigen Analoguhren: In der Stunde zwischen 2 Uhr und 3 Uhr macht der Minutenzeiger eine volle Umdrehung, der Stundenzeiger verschiebt sich dabei gleichmäßig von der Ziffer 2 auf die Ziffer 3 und legt nur den zwölften Teil einer vollen Umdrehung zurück.

Verwendet man statt der Übersetzung von 12:1 die Übersetzung von 10:1, so hat man einen Mechanismus für den kontinuierlichen Übertrag zwischen zwei Stellen einer Dezimalzahl. In Abbildung 6 ist ein solches zweistelliges Zählwerk dargestellt, das die Zahl 38 anzeigt. Dreht man den blauen Zeiger weiter im Uhrzeigersinn auf die 0, so wird die Drehbewegung vom blauen Rad über das grüne Zwischenrad im Verhältnis 10:1 gleichsinnig auf das rote Rad und den roten Zeiger übertragen, der zum Schluss genau auf die Ziffer 4 zeigt.

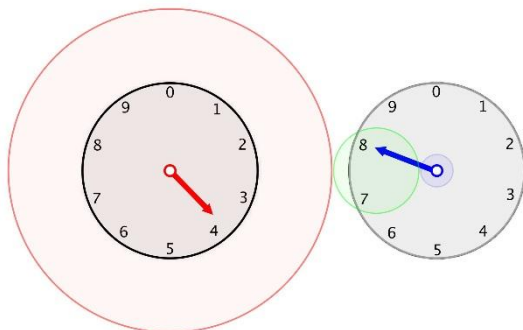


Abb. 6: Ein Dezimalzählwerk mit kontinuierlichem Übertrag zeigt die Zahl 38 an

Das Problem bei dieser einfachen Getriebeart ist, dass die linke Stelle nicht verstellt werden kann, ohne auf die rechte zurückzuwirken. Dezimalzahlen können somit nicht stellenweise addiert werden. Obwohl daher Bürgis neue Uhrwerke nicht unmittelbar zur Erfindung der Rechenmaschine führten, ist es sehr plausibel, dass sie trotzdem von entscheidender Bedeutung waren.

### Die Rechenuhr

Die erste Rechenmaschine erfand der Tübinger Astronom, Mathematiker, Geodät und Sprachwissenschaftler [Wilhelm Schickard](#) (1592-1635) im Jahre 1623. Seine Erfindung ist nur aus zwei Briefen an seinen Freund [Johannes Kepler](#) (1571-1630) und einer Anweisung an seinen Mechaniker [Johannes Pfister](#) bekannt. Kepler hatte von 1604 bis 1612 in Prag eng mit Jost Bürgi zusammengearbeitet. Schickard wusste also sicher von Bürgis Uhrwerken. Nicht grundlos wird er seine Maschine *Rechenuhr* genannt haben.

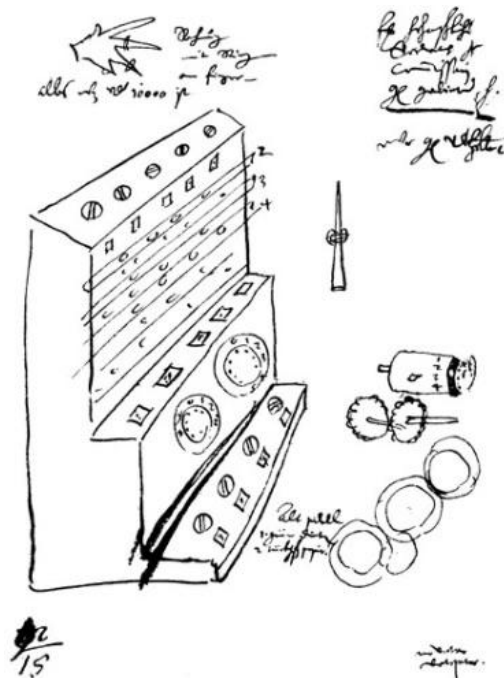


Abb. 7: Skizze von Wilhelm Schickard aus dem Jahr 1623 (Quelle: Wikipedia).

Schickards Maschine war zum Multiplizieren zweier mehrstelliger Zahlen entwickelt worden. Das Multiplizierwerk befand sich im oberen Teil. Der Multiplikand wurde über die Drehknöpfe ganz oben eingestellt. Jeder dieser Knöpfe drehte eine vertikale Walze mit den zehn Napierschen Rechenstäben. Mit den horizontalen Schiebern konnten dann Teilprodukte einer Stelle des Multiplikators mit dem Multiplikanden ermittelt und per Hand in das untere Addierwerk übertragen werden.

Schickards Addierwerk weist gegenüber dem Dezimalzählwerk in Abbildung 6 eine entscheidende Änderung auf: Die Überträge erfolgen nicht kontinuierlich, sondern ein Einzahn (Mitnehmer) schaltet beim Übergang von 9 auf 0 das nächst höherwertige Rad schlagartig um 1 weiter. Damit wird die stellenweise Addition von Dezimalzahlen durch abgezähltes stufenweises Weiterdrehen möglich (Abbildungen 8 und 9).

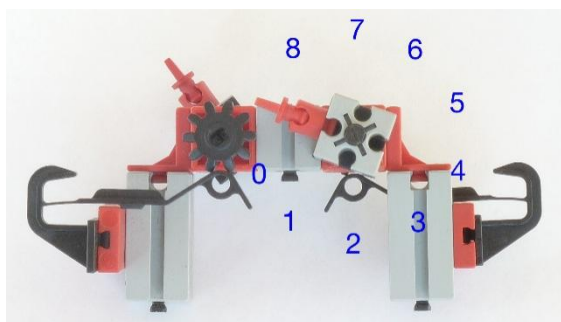


Abb. 8: Funktionsmodell zum Übertragsmechanismus der Schickardschen Rechenuhr

Dieser auf den ersten Blick einfach erscheinende Mitnahme-Mechanismus bringt in der Praxis erhebliche Probleme mit sich, die man am besten selbst erlebt, indem man das Modell aus Abbildung 8 nachbaut oder eine eigene Variante entwirft. Im Modell drehen sich die beiden Räder entgegengesetzt. Schickard verwendete anscheinend Zwischenzahnräder, um den gleichen Drehsinn zu erzielen, obwohl das die Entwicklung eines gut funktionierenden Prototypen unnötig erschwert haben dürfte.

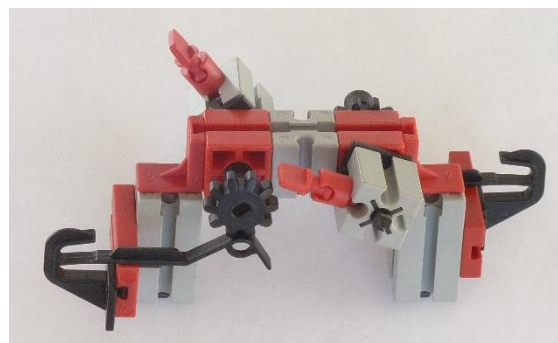


Abb. 9: Weitere Ansicht des Modells

Damit das Modell zuverlässig funktioniert, muss der Baustein 15 am rechten Rad auf der Platte der Rastachse mit Platte im Zehntelmillimeterbereich genau eingestellt werden, ansonsten kann entweder das linke Rad nicht unabhängig verstellt werden, oder es wird beim Übertrag gar nicht oder um zwei Positionen statt einer weitergeschaltet.

Bei sorgfältiger Einstellung der Federungen kann das Modell um eine weitere Stelle zu einem zuverlässig funktionierenden dreistelligen Addierwerk ergänzt werden.

Das Hauptproblem des Schickardschen Übertragsmechanismus ist, dass ein Übertrag über viele Stellen (zum Beispiel von 9999 auf 10000) das Vielfache des Drehmoments erfordert, das für das einfache Weiterschalten eines Rads erforderlich ist. Alle Dokumentationen von Nachbauten berichten übereinstimmend von der Schwierigkeit, einen zuverlässigen sechsstelligen Mechanismus zu konstruieren.

Inwieweit Schickards Maschinen selbst zuverlässig funktioniert haben, ist unklar. Schickard galt aber als ausgezeichneter Mechaniker (sein Vater war Schreiner); Kepler bezeichnete ihn als „beidhändigen Philosophen“.

### Ein zweiter Anfang

[Blaise Pascal](#) (1623-1662) war ein französischer Mathematiker, Physiker, Philosoph und Theologe und galt über lange Zeit als Erfinder der Rechenmaschine, bis Schickards Briefe an Kepler in der Mitte des letzten Jahrhunderts wiederentdeckt und

funktionsfähige Nachbauten konstruiert wurden. Nach eigenen Angaben baute Pascal mehr als fünfzig Prototypen, bevor er seine Rechenmaschine, die sogenannte *Pascaline*, im Jahr 1645 der Öffentlichkeit präsentierte. Da es keine Indizien dafür gibt, dass Pascal von Schickards Maschinen wusste, können beide als Erfinder der Rechenmaschine angesehen werden.



Abb. 10: Bedienfläche eines historischen Nachbaus der Pascaline aus dem 19. Jahrhundert im Bonner Arithmeum

Der Pascalsche Übertragsmechanismus ist in Abbildung 11 dargestellt. Der Übertrag findet vom rechten unteren Rad mit zehn Stiften auf das links benachbarte durch eine Schaltklinke statt. Schon wenn das rechte Rad die Position 4 hat, beginnt das zweistufige Anheben der Schaltklinke über zwei Stifte.

Die so verteilt zugeführte Energie wird beim Auslösen der Schaltklinke im Übergang von 9 auf 0 schlagartig freigesetzt, um das linke Rad eine Position weiter zu schalten. Sperrklinken sorgen für das Einrasten der gestifteten Räder in den zehn gewünschten Positionen.

Pascals und Schickards Übertragsmechanismen unterscheiden sich in vielen Hinsichten. Während bei Schickards Mechanismus durch Drehen der Räder in unterschiedliche Richtungen gleichermaßen addiert und subtrahiert werden konnte, lassen sich Pascals Räder wegen der verwendeten Klinken nur in eine Richtung drehen – es handelt sich mechanisch um eine reine Addiermaschine. Das Subtrahieren kann man durch Komplementrechnen erzielen.

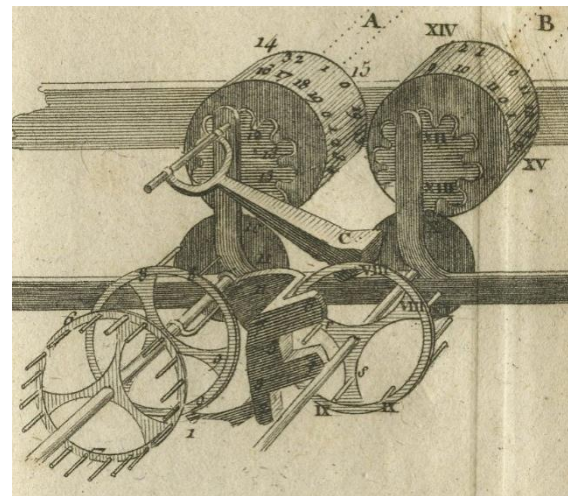


Abb. 11: Die Pascalsche Übertragsmechanik (Quelle: englischsprachige Wikipedia)

Ein Vorteil des Pascalschen Mechanismus‘ liegt in der Verwendung gespeicherter Energie. Die einzelnen Stellen sind beim Übertrag mechanisch vollkommen voneinander entkoppelt, so dass man theoretisch auf dieser Grundlage Rechenmaschinen mit beliebig vielen Stellen bauen kann.

Der Pascalsche Mechanismus ist nichtsdestotrotz sehr sensibel. Gewicht, Form und Auslenkung der Sperr- und Schaltklinken müssen sehr genau aufeinander abgestimmt sein, ansonsten funktioniert der Übertrag nicht oder es kommt zum mehrfachen Weiterschalten. Pascal hat mehrere Exemplare seiner Maschine gebaut und laufend Verbesserungen vorgenommen. Neun seiner Maschinen haben die Zeit bis heute überdauert. Leider gibt es widersprüchliche Angaben dazu, wie zuverlässig der Übertragsmechanismus bei diesen Maschinen funktioniert. Da beim Rücksetzen der Maschine vor jeder neuen Rechnung ein Übertrag über alle Stellen erfolgt, muss er zumindest relativ sicher funktioniert haben, ansonsten wären die Maschinen vollkommen unbrauchbar gewesen.

Auf YouTube findet man zwei erfolgreiche Pascaline-Nachbauten aus LEGO, aber keine der Schickardschen Rechenuhr.

## Leibniz

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) war einer der größten Universalgelehrten aller Zeiten und wurde von starken Träumen zur Verbesserung der Welt angetrieben. Seine bahnbrechenden Beiträge zur Mathematik, Philosophie, Religion und Technik sind zahlreich, sein Nachlass so umfangreich, dass er immer noch nicht aufgearbeitet ist, obwohl damit zu Beginn des 20. Jahrhunderts begonnen wurde. Nach eigener Aussage hatte er „nach dem Erwachen schon so viele Einfälle, dass der Tag nicht ausreichte, um sie niederzuschreiben.“ Einer dieser Einfälle ist im Folgenden von zentraler Bedeutung.

Leibniz hatte um 1670 in der Einleitung der bis dahin unveröffentlichten Pascalschen *Pensées* von dessen Rechenmaschine gelesen und sich die Maschine vom königlich französischen Bibliothekar Carcavius schriftlich beschreiben lassen. Als Antwort schrieb Leibniz, er wäge zu versprechen, eine Maschine vorstellen zu können, die präzise und schnell auch Multiplizieren und Dividieren könne.

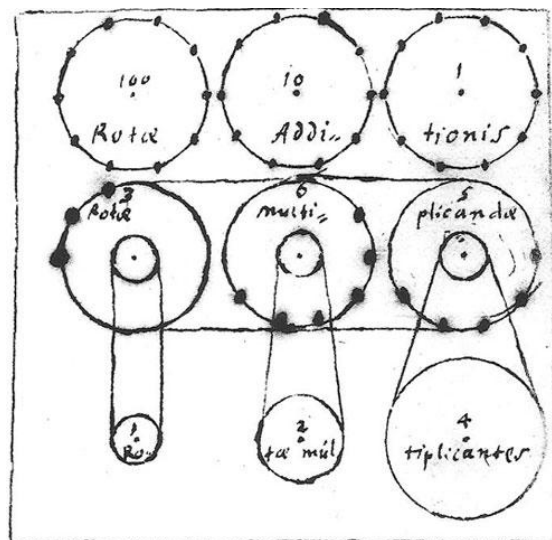


Abb. 12: Leibniz' erste Idee zur maschinellen Multiplikation (Quelle: history-computer.com)

Eine erste Form seiner Idee ist in der Originalskizze in Abbildung 12 wiedergegeben. Oben sind drei Räder eines Addierwerks skizziert. Die drei Räder in der Mitte sind durch eine Kette miteinander verbunden. An ihnen ist durch gesetzte Stifte der Multiplikand 365 eingestellt. Dieser Multiplikand wird durch eine Umdrehung des rechten unteren Rads viermal in das Addierwerk übertragen, danach werden die mittleren Räder um eine Stelle nach links versetzt und die 365 durch eine Umdrehung des mittleren unteren Rads zweimal in das Addierwerk übertragen. Abschließend werden die mittleren Räder noch einmal um eine Stelle nach links versetzt und die 365 durch eine Umdrehung des linken unteren Rads einmal in das Addierwerk übertragen. Insgesamt ist so durch drei Umdrehungen die Multiplikation  $124 \times 365$  ausgeführt worden.

In dieser einen Idee hat Leibniz zwei Prinzipien vorweggenommen, die sich in den Arithmetisch-Logischen-Einheiten (ALUs) aller heutigen Mikroprozessoren wiederfinden: *Register*, deren Inhalt unabhängig gesetzt und dann auf einmal in die Recheneinheit übertragen werden kann und *Shifts*, die zu den binären Grundoperationen gehören.

Obwohl die Idee genial ist, war sie zunächst so gar nicht ausführbar, da weder der Pascalsche Übertragsmechanismus noch der Schickardsche Übertragsmechanismus (der Leibniz wohl nicht bekannt war) die *gleichzeitige* Addition in mehreren Stellen erlauben.

Leibniz musste also einen eigenen Übertragsmechanismus erfinden. Das war das Hauptproblem bei der Entwicklung seiner Rechenmaschinen, die sich über viele Jahrzehnte hinzog. Seine Lösung dafür war zum Schluss ein komplexer, zweistufiger Mechanismus, der hier nicht wiedergegeben wird und der auf die Geschichte der Rechenmaschinen im Weiteren keinen nennenswerten Einfluss hatte.



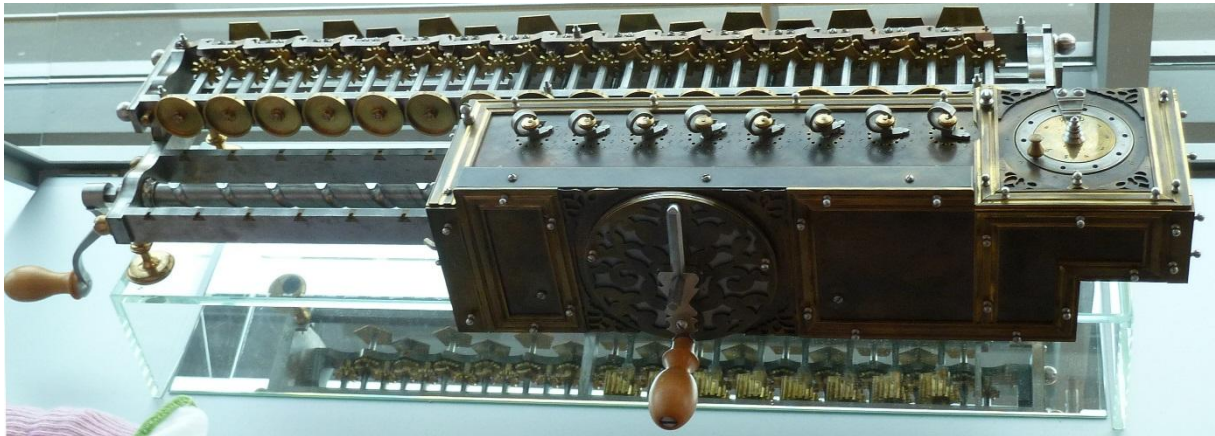


Abb. 13: Nachbau einer Leibnizschen Rechenmaschine im Bonner Artihmeum: Die linke Kurbel bewegt bei einer Umdrehung das Eingaberegister vorne rechts um eine Stelle nach rechts oder links. Durch eine Umdrehung der anderen Kurbel wird der Wert des Eingaberegisters zum Wert des Akkumulators addiert oder von ihm subtrahiert. Der Übertragsmechanismus ist oben hinten zu sehen.

Andere Erfindungen waren für Leibniz viel leichter umzusetzen und hatten eine nachhaltigere Wirkung: Für die mittleren Räder in Abbildung 12 mit den zu setzenden Stiften fand er gleich zwei Alternativen, die in der weiteren Geschichte der Rechenmaschinen fast ausschließlich verwendet wurden: Staffelwalze und Sprossenrad.

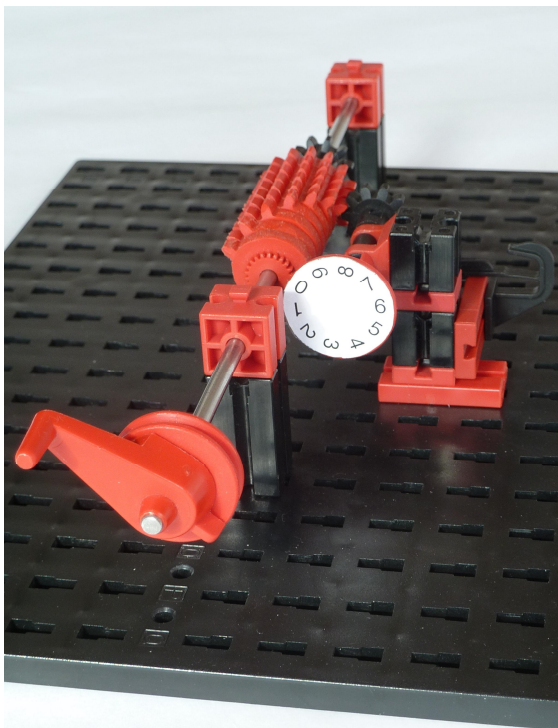


Abb. 14: fischertechnik-Funktionsmodell einer Staffelwalze

### Planetengeriebe

Nach Leibniz wurde das Übertragsproblem in verschiedenen Maschinen überzeugender gelöst, was unter anderem dem Fortschritt der Feinmechanik zu verdanken war. Die Lösungen blieben aber lange Zeit Ad-hoc-Lösungen, d. h. sie waren auf eine Maschine maßgeschneidert, trickreich und mussten meist mehrfach verbessert werden, bis sie zuverlässig mit der beabsichtigten Stellenzahl funktionierten.

Eine systematische Lösung des Übertragsproblems fand der russische Mathematiker [Pafnuti Lwowitsch Tschebyscheff](#) (1821-1894) in den 70er Jahren des 19. Jahrhunderts. Er kehrte von schlagartigen Überträgen zurück zu kontinuierlichen Überträgen, wie sie im Abschnitt über Uhren und Zählwerke vorgestellt wurden. Kontinuierliche Überträge haben den Vorteil, dass sie absolut zuverlässig funktionieren, egal wie viele Stellen die Maschine hat, und dass man gleichzeitig in allen Stellen addieren kann. Der einzige Nachteil, den sie haben, ist die schlechtere Ablesbarkeit der Anzeige, die schon in Abbildung 6 zu erkennen war. Dies ist weniger für den menschlichen Benutzer problematisch als für die maschinelle Weiterverarbeitung der Ergebnisse:

Ein Druckwerk an das Rechenwerk anzuschließen erfordert eine Digitalisierung.

Mit einfachen Stirnradgetrieben wie in Abbildung 6 kann nicht stellenweise addiert werden, da die Räder ohne weitere Freiheitsgrade direkt miteinander verkoppelt sind. Tschebyscheff verwendete Planetengetriebe, mit denen man zwei Antriebe auf einen Abtrieb gewichtet addieren kann.

Planetengetriebe waren seit der Antike immer wieder erfolgreich benutzt worden; das theoretische Verständnis und der gezielte Entwurf solcher Getriebe begannen aber erst mit dem Buch *Principles of Mechanisms* von [Robert Willis](#) (1800-1875) aus dem Jahr 1841.

Tschebyscheffs erste Rechenmaschine aus dem Jahr 1876 war eine reine Additions-/Subtraktionsmaschine. Sie ist ein Einzelstück geblieben, das jetzt im Museum der Geschichte St. Petersburg ausgestellt ist. Zwei Jahre später baute er eine verbesserte Version (Abbildung 15), zu der er im Jahr 1883 noch eine automatische Multiplikationseinheit ergänzte. Auch sie ist ein Einzelstück, das sich im Musée des Arts et Métiers in Paris befindet.

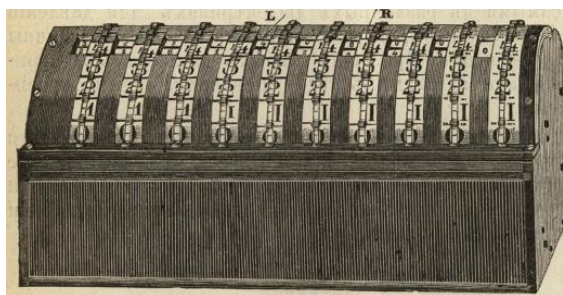


Abb. 15: Tschebyscheffs Rechenmaschine aus dem Jahr 1878 (Quelle: V.G. von Bool [2]).

Das Getriebe der Maschine aus dem Jahr 1878 ist auszugsweise für die unteren beiden Dezimalstellen in Abbildung 16 abgebildet. Die Räder  $n_1$  und  $n_2$  zeigen den Wert an, der momentan in dem Addierwerk gespeichert ist. Dazu sind auf ihrem Umfang dreimal hintereinander die Ziffern von 0 bis 9 aufgedruckt. Die Räder  $r_1$  und  $r_2$  ermöglichen die Eingabe des Werts, der addiert

werden soll. Dazu haben sie 27 Einkerbungen. Das Addieren der Zahl 23 zu einem im Addierwerk gespeicherten Wert geschieht, indem man das Rad  $r_1$  in Pfeilrichtung drei Einkerbungen weiterdreht und das Rad  $r_2$  zwei Einkerbungen.

Um die Funktion des Getriebes zu verstehen, benötigt man folgende Informationen: Alle Räder laufen frei auf der zentralen Achse  $X$ . Das Ergebnisrad  $n_1$  ist mit den Zahnrädern  $d$  und  $f$  starr verbunden. Die Anzahl der Zähne von  $f$ ,  $e$ ,  $g$  und  $h$  sind mit 12, 48, 24 bzw. 60 so gewählt, dass sich eine 10:1-Übersetzung von  $f$  auf  $h$  ergibt, wenn das Einstellrad  $r_2$  festgehalten wird. Damit hat Tschebyscheff einen kontinuierlichen Zehnerübertrag zwischen den Ergebnisrädern  $n_1$  und  $n_2$  hergestellt. Nach der Willis-Gleichung gilt nun

$$10 \cdot n_1 - n_2 - 9 \cdot r_2 = 0$$

Diese Gleichung wird weiter unten anschaulich erklärt. Jedenfalls ist eine Konsequenz der Gleichung, dass man mit den Einstellrädern  $r_1$  und  $r_2$  wie oben beschrieben stellenweise durch abgezähltes Weiterdrehen addieren kann.

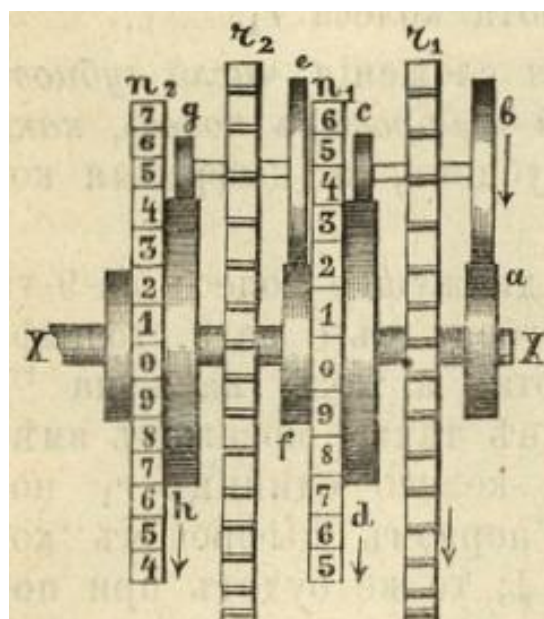


Abb. 16: Zwei Getriebestufen der Rechenmaschine (Quelle: V.G. von Bool [2])

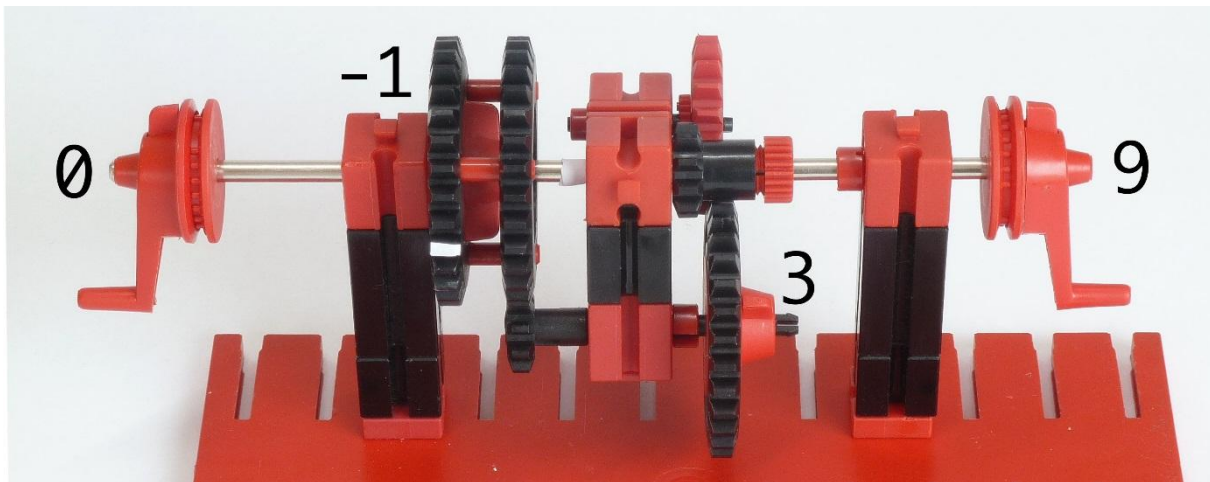


Abb. 17: Funktionsmodell zum kontinuierlichen Zehnerübertrag mit Planetengetrieben. Die zentrale Achse ist im mittleren Baustein 15 mit Bohrung geteilt. Der linke Teil ist mit dem Steg verbunden.

Die Getriebe der beiden Rechenmaschinen von Tschebyscheff lassen sich nicht exakt mit Fischertechnik nachbauen, da eine 10:1-Übersetzung mit den Fischertechnik-Zahnrädern nicht direkt erzielt werden kann.

Trotzdem lässt sich der kontinuierliche Zehnerübertrag zwischen den Ergebnisrädern  $n_1$  und  $n_2$  mit einem Planetengetriebe realisieren, indem man nicht die Ergebnisräder mit der Übersetzung 10:1 koppelt, sondern das Ergebnisrad  $n_1$  und das Einstellrad mit der Übersetzung -9:1. Warum und wie das funktioniert, wird durch das Funktionsmodell in Abbildung 17 anschaulich erklärt.

Zunächst wird die linke Kurbel festgehalten und damit auch der Steg, der dem Ergebnisrad  $n_2$  entspricht. Dreht man die rechte Kurbel neun Mal in eine Richtung, so dreht sich das Z30 am Steg wegen der 3:1 Übersetzung vom Z10 über das Z20 auf das Z30 dreimal in die gleiche Richtung. Die beiden verbundenen Z30, die dem Einstellrad  $r_2$  entsprechen, drehen sich dann einmal in die entgegengesetzte Richtung.

Die beiden Kurbeln und die verbundenen Z30 werden synchron eine volle Umdrehung weiter gedreht. Man erkennt daran, dass bei festgehaltenen Z30 die linke Kurbel genau eine volle Umdrehung macht, wenn die rechte zehn volle Umdrehungen

macht. Dies ist der kontinuierliche Übertragsmechanismus.

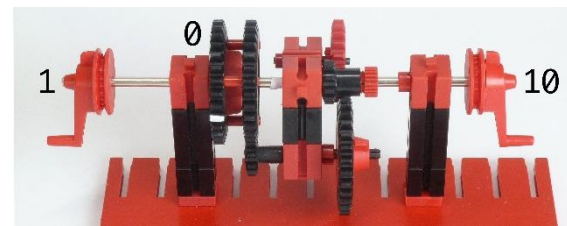


Abb. 18: Festgehaltenes Einstellrad

Wenn man die beiden Kurbeln und die verbundenen Z30 im Kopf synchron zehn volle Umdrehungen zurückdreht, erkennt man, dass bei festgehaltener rechter Kurbel die Übersetzung zwischen den Z30 und der linken Kurbel 10:9 ist. Könnte man die Z30 also gleichmäßig in neun Positionen rasten, könnte man den Steg in 1/10-Umdrehungsschritten schalten. Da das nicht möglich ist, wird in unserem Hauptmodell ein mit einem Innenzahnrad verbundenes Z40 vorgeschaltet. Das kann passend zur 3:4 Übersetzung in zwölf Positionen gerastet werden.



Abb. 19: Festgehaltener Eingang

## Das Modell

Das Hauptmodell ist in den Abbildungen 1 und 2 wiedergegeben und besteht aus dem einem Addierwerk mit kontinuierlichen Zehnerübertrag und einem abnehmbaren und versetzbaarem Eingaberegister, das gut zu Leibniz' ursprünglicher Idee in Abbildung 12 passt.

Der Nachbau der Rechenmaschine ist nicht schwierig. Die benötigten Teile sind in der [Einzelteilliste](#) [14] aufgeführt.

### Addierwerk

Im Zentrum jeder Getriebestufe sitzt ein Baustein 15 mit Bohrung, der durch einen eingeklemmten Papierstreifen fest mit einer Metallachse 90 verbunden ist. Wie dieser Verbund hergestellt wird, ist in Abbildung 20 dargestellt: Zunächst steckt man einen Klemmring auf eine Hilfsachse, so dass er einen Abstand von 7,5 mm zu einem Ende hat. Mit diesem Ende voran wird die Hilfsachse in den Baustein 15 mit Bohrung gesteckt. Von der anderen Seite wird ein aufgerolltes Papierquadrat mit 12 mm Kantenlänge in die Bohrung gesteckt. In dieses wird nun die Metallachse 90 gepresst, bis sie auf das Ende der Hilfsachse trifft. Die Hilfsachse kann anschließend entfernt werden.

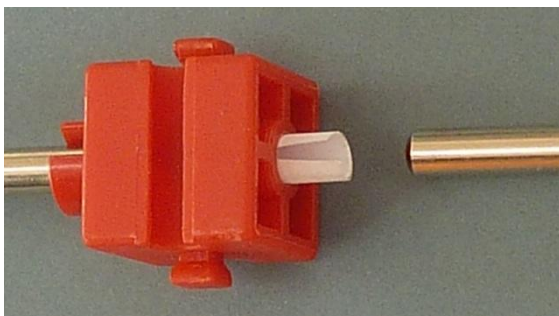


Abb. 20: Starres Verbinden eines Bausteins 15 mit Bohrung mit einer Metallachse 90 (rechts)

Der Steg wird gemäß der Abbildungen 21 und 22 zusammengebaut. Insbesondere werden zwei Zahnräder Z30 durch drei rote Seilklemmstifte fest miteinander verbunden. Der Abstand sollte so groß sein, wie ein Verbindungsstück 30 hoch ist. In eines

der beiden Z30 wird eine Freilaufnabe geschraubt. Die Nabe sollte nach innen zeigen. Ein Klemmring wird so weit auf die Metallachse 90 geschoben, dass das rechte Z30 mit den Rastzahnradern Z10 kämmt.

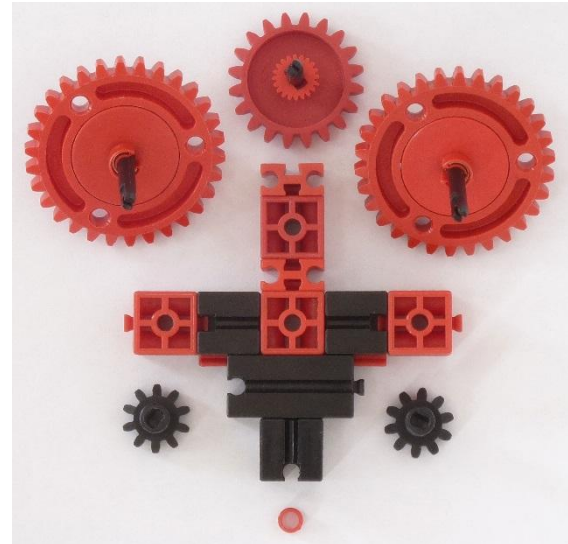


Abb. 21: Zusammenbau des Stegs. Die Metallachse 90 wurde der Übersicht halber entfernt

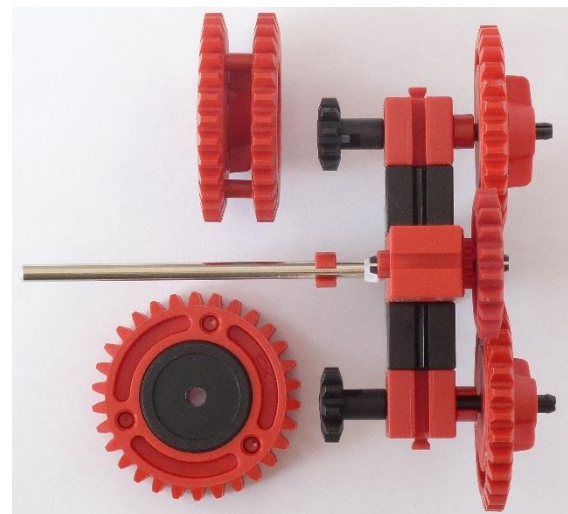


Abb. 22: Weiterer Zusammenbau

Als nächstes wird ein Ziffernstreifen aus der [Vorlage](#) [15] ausgeschnitten. Die kleinen Quadrate zwischen den Ziffern 0 und 1 bzw. 5 und 6 werden entfernt. Der Ziffernstreifen wird zu einem Ring um den Steg zusammengeklebt. Die Zapfen der beiden äußeren Bausteine 15 mit Bohrung werden dabei durch die quadratischen Löcher des Ziffernringes gesteckt.

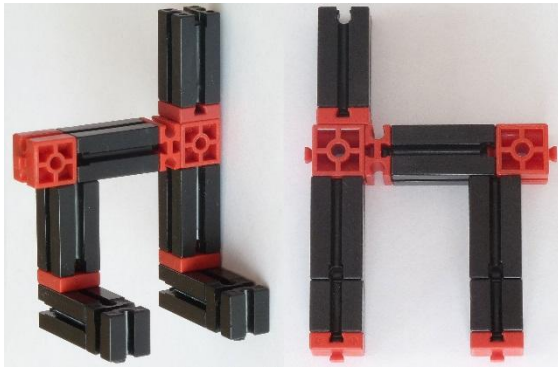


Abb. 23: Lagerblöcke

Anschließend werden die Lagerblöcke und die Einstellräder gemäß den Abbildungen 23 und 24 zusammengebaut.

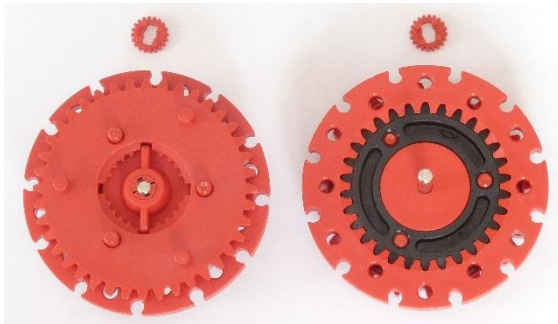


Abb. 24: Einstellrad

Das vollständige Getriebe für eine Dezimalstelle ist in Abbildung 25 dargestellt. Die Metallachse 90 ragt 7,5 mm aus dem verschraubten Zahnrad Z10 heraus.

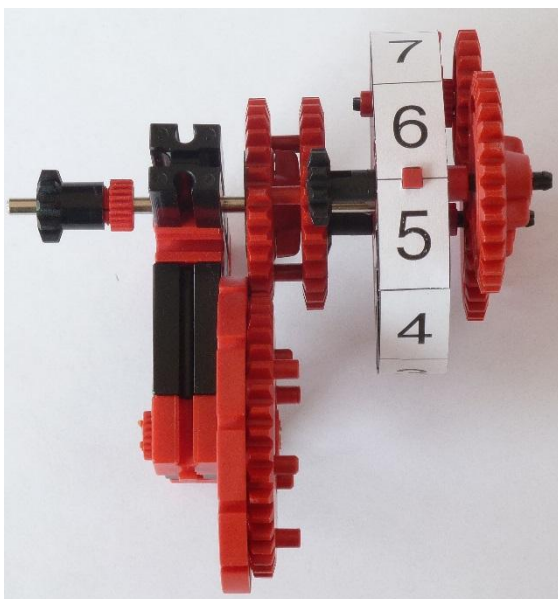


Abb. 25: Getriebe für eine Dezimalstelle

Die Getriebeeinheiten werden von links nach rechts zusammengebaut. Dabei orientiert man sich an Abbildung 2. Bei der abschließenden Lagerstange rechts ist zu beachten, dass die Ansenkung des Bausteins 15 mit Ansenkung außen liegt und die Bauplatte 30x15 mit einem Zapfen die eingesteckte Kunststoffachse 50 mit Vierkant sichert.

Als nächstes werden die Klinkenblöcke für die Einstellräder eingesteckt. Durch Verändern der Höhe des Bausteins 30 kann die Stärke der Rastung so eingestellt werden, dass sie deutlich spürbar und hörbar ist, das Einstellrad aber ohne allzu großen Kraftaufwand in beide Richtungen aus der Rastung gedreht werden kann. Die Kunststoffachse sollte sich hauptsächlich vertikal biegen und nicht in Laufrichtung des Rads.

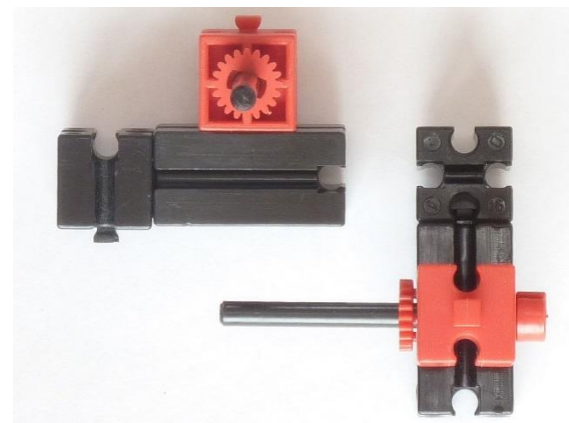


Abb. 26: Klinkenblock

Nun muss eine Nulleinstellung vorgenommen werden. Dazu geht man Stelle für Stelle von rechts nach links vor und dreht die verschraubten Zahnräder Z10, bis an der jeweiligen Stelle im eingerasteten Zustand die Stege vertikal sind und die Ziffer 0 zu sehen ist (Abbildung 27).

Beim Drehen des rechten Z10 springt der Vierkant in der Ansenkung, beim Drehen der anderen Z10 muss man den Steg der rechten benachbarten Stelle festhalten. Entweder dreht sich dann das Z10 auf der Metallachse 90 oder die geklemmte Metallachse 90 im Baustein 15 mit Bohrung.



Abb. 27: Nulleinstellung

Jetzt werden die Anzeigerahmen so angebracht und eingestellt, dass die Striche zwischen den Feldern der Ziffern 0 und 1 genau durch die Schlitze in den Griffen der Kurbeln zu sehen sind. Dazu müssen die Bausteine 30 gegebenenfalls leicht nach vorne verschoben werden.

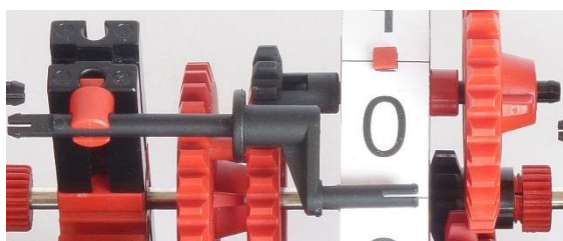


Abb. 28: Anbringen der Anzeigerahmen

Das Addierwerk ist nun fertig und kann bereits zum schnellen, akustisch kontrollierten Addieren und Subtrahieren dreistelliger Zahlen benutzt werden.

### **Eingaberegister**

Der Aufbau des Eingaberegisters ist aus Abbildung 2 ersichtlich. Es besteht aus drei größeren Rädern auf einer gemeinsamen Achse, an deren äußeren Rändern sich jeweils neun leicht setz- bzw. löschbare Mitnehmer befinden. Diese Mitnehmer sind 27 mm lange Zahnstochersegmente, die in den Löchern der Gelenkwürfelklauen 38446 geführt werden. Durch das Ablängen der Zahnstocher entstehen normalerweise schon leicht unregelmäßige Enden, die ein unbeabsichtigtes Herausfallen der Zahnstochersegmente verhindern. Ansonsten kann man die Enden leicht mit einer Zange pressen. Die Bausteine 15 an den Drehscheiben dienen als Gewichte. Sie sorgen dafür, dass eine Drehlage stabil ist, in der kein Mitnehmer ins Einstellrad des Addierwerks eingreift.

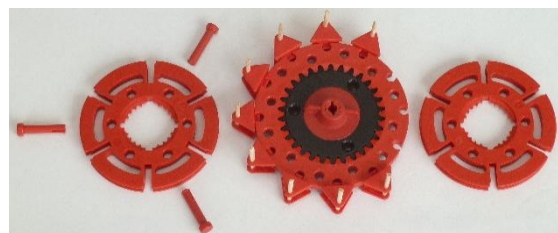


Abb. 29: Aufbau des Rads mit Mitnehmern

Die drei Räder sind so auf der Metallachse 260 zu positionieren, dass gesetzte Zahnstochersegmente das Einstellrad sicher mitnehmen und gelöschte Segmente mit etwas Abstand am Einstellrad vorbeidrehen. Um das zu überprüfen müssen zunächst die Anschläge für das Eingaberegister auf der Grundplatte angebracht werden.

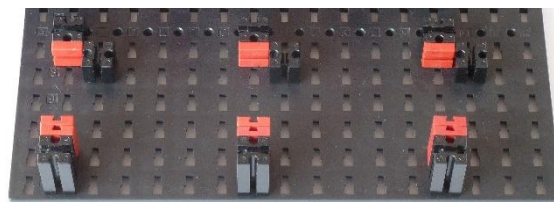


Abb. 30: Anschläge für das Eingaberegister

Die Räder mit den Mitnehmern sollten leicht gegeneinander verdreht sein, so dass der Hauptkrafteffort einer Mitnahme niemals an zwei Rädern gleichzeitig erfolgt.

Nun muss die Feineinstellung erfolgen. Die Anschläge für das Eingaberegister und die Bausteine 15 mit Bohrung auf den Klinkenblöcken müssen sorgfältig so verschoben werden, dass gesetzte Mitnehmer beim Vorwärts- und Rückwärtsdrehen des Zahnrads Z40 ruckfrei, aber sicher in die äußeren, halboffenen Bohrungen der Einstellräder eingreifen und diese um die gewünschten Stufen weiterdrehen. Diese Einstellung ist von größter Wichtigkeit für zuverlässiges Multiplizieren und Dividieren. Anschließend muss die Position der Anzeigerahmen gegebenenfalls etwas korrigiert werden.

### **Koppeln mehrerer Maschinen**

Um mit mehr als drei Stellen zu rechnen, können mehrere Rechenmaschinen verbunden werden. Dazu entfernt man bei einer Maschine die rechte Lagerstange und

schraubt bei der anderen ein zusätzliches Zahnrad Z10 auf die herausstehende Metallachse 90. Auf diese Art können beliebig viele Addierwerke miteinander verbunden werden.

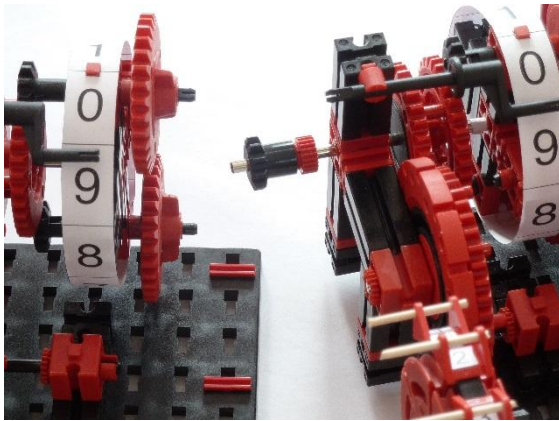


Abb. 31: Verbinden von Rechenmaschinen

Eine entsprechende Verbindung der Eingaberegister ist nicht sinnvoll, da zwischen den Grundplatten ein Längenausgleich stattfindet, der nicht exakt im Raster liegt und die Eingaberegister für die Multiplikation versetzt werden müssen. Außerdem steigt das für die Eingabe benötigte Drehmoment ab einer Zahl von drei Maschinen, da die Mitnahme an einigen Rädern dann fast gleichzeitig erfolgen muss. Werden mehrere Maschinen verkoppelt, so arbeitet man also mit separaten Eingaberegistern, die einzeln bedient und versetzt werden.

### Bedienung

Zum schnellen Zurücksetzen der Maschine und zum schnellen Addieren und Subtrahieren von Zahlen wird die Maschine normalerweise ohne Eingaberegister durch abgezähltes Vor- oder Zurückdrehen der Einstellräder bedient. Die Eingabe kann blind erfolgen, was bei der Addition langer Zahlenlisten von Vorteil ist.

Multiplikation und Division werden auf wiederholte Additionen bzw. Subtraktionen und Vergleiche zurückgeführt. Dazu ist das Eingaberegister natürlich sehr praktisch.

Soll zum Beispiel das Produkt  $24 \times 37$  berechnet werden, so wird das Addierwerk auf

0 zurückgesetzt und der Multiplikand 37 durch Setzen von drei Stiften am mittleren Rad und sieben Stiften am rechten Rad des Eingaberegisters eingestellt. Der Umdrehungszähler wird auf 4 gedreht. Anschließend wird viermal gegen den Uhrzeigersinn gekurbelt. Der Umdrehungszähler zeigt nun 0 an und in der Anzeige erscheint das Zwischenergebnis 148 der Multiplikation  $4 \times 37$ . Anschließend wird das Eingaberegister um eins nach rechts versetzt und zweimal gekurbelt. Es wird nun das Gesamtergebnis 888 angezeigt.

Zur Lösung der Divisionsaufgabe  $275:37$  wird der Dividend 275 direkt über die Einstellräder ins Addierwerk gegeben und der Divisor 37 in das Eingaberegister. Der Umdrehungszähler wird auf 0 gedreht. Durch Drehen des Z40 am Eingaberegister subtrahiert man nun den Divisor 37, solange er kleiner ist als der Wert im Addierwerk. In diesem Beispiel ist der Wert im Addierwerk nach sieben Subtraktionen 16, also ist das Ergebnis  $275:37 = 7$  Rest 16.

Die Bedienung der Maschine bei den Grundrechenarten ist ausführlich in einem [Video](#) [13] dargestellt. Zum Wurzelziehen kann der Toepler-Algorithmus [5] verwendet werden, der allein mit wiederholten Subtraktionen und Vergleichen auskommt.

### Literatur und Links

- [1] Aspray, W. (Hrsg.): [Computing before Computers](#). Iowa State University Press 1990. Kapitel 1 *Early Computing* enthält insbesondere eine sehr gute Liste mit Literatur zur Geschichte der Zahlen und des Abakus.
- [2] von Bool, Vladimir G.: *Tschebyscheffs Arithmometer* (Russisch). 1894, verfügbar unter [12]

- [3] Bölter, Detlev: [Wilhelm Schickards Rechenuhr](#). Enthält insbesondere Schickards Notizen an den Mechaniker und die relevanten Sätze aus den zwei Briefen an Johannes Kepler sowie eine ausführliche Diskussion der Probleme beim Schickardschen Übertragungsmechanismus.
- [4] Falk, Stefan: *Vom Zählen und Abzählen (I)*, [ft:pedia 1/2012](#). Stellt Zählwerke mit fischertechnik vor, deren Übertragungsmechanismus allerdings nicht das stellenweise Addieren erlaubt, weil die Einzähne zu kurz sind.
- [5] Gärtner, Manfred: [Analyse des Toepler-Algorithmus zum Berechnen von Quadratwurzeln mit mechanischen Vierspezies-Rechenmaschinen](#). Rechnerlexikon.de
- [6] Guyot, Alain: [La machine à calculer continue de Tchebychev et le reporteur différentiel](#). Enthält als Anhang Tschebyscheffs Mitteilung *Une machine arithmétique à mouvement continu* an die Association française pour l'avancement des sciences, 1882.
- [7] Karcher, H: *Konnten die Römer nicht rechnen?* Mitteilungen der Deutschen Mathematiker Vereinigung 3/2014.
- [8] King, Henry C.: *Geared to the Stars*, University of Toronto Press, Toronto 1978. Diesem Standardwerk habe ich die Informationen über Jost Bürgi entnommen.
- [9] Leibniz, Gottfried W.: *Machina arithmetica in qua non aditio tantum et subtractio sed et multiplicatio nullo, divisio vero paene nullo animi labore peragantur*. 1685, englische Übersetzung verfügbar unter [history-computer.com](#)
- [10] <http://www.rechnerlexikon.de>, bietet viele Informationen und weiterführende Links, allerdings etwas inhomogen.
- [11] Dalakov, Georgi, [History of Computers](#). Internetseiten mit sehr vielen Informationen zu Schickard, Pascal, Leibniz und Tschebyscheff und viel Originalmaterial.
- [12] [Tschebyscheffs Mechanismen](#). Diese Internetseiten bieten sehr nützliche Animationen der Mechanismen und viele Scans von Originalarbeiten.
- [13] [Video der Rechenmaschine](#), YouTube.com
- [14] [Einzelteilliste der Rechenmaschine](#), math-meets-machines.de
- [15] [Vorlage für die Ziffernbänder](#), math-meets-machines.de



Mechanisches Rechnen

## Die Ewigkeitsmaschine

Dirk Fox

Viele wichtige mathematische Zusammenhänge werden in der Schule nur in der Theorie vermittelt. Da sie sich damit der unmittelbaren Anschauung entziehen, wird ihre Bedeutung oft nicht verstanden. Einige dieser Zusammenhänge könnte man mit einem mechanischen fischertechnik-Modell sehr anschaulich darstellen – wie zum Beispiel exponentielles Wachstum.

### Hintergrund

Exponentielles Wachstum können sich Menschen nachweislich nur sehr schwer vorstellen [1]. Dabei war und ist das Verständnis exponentiellen Wachstums entscheidend für eine angemessene Reaktion auf sehr viele – nicht zuletzt (geo-) politische – Herausforderungen, wie beispielsweise die Entwicklung des Bevölkerungswachstums in Entwicklungsländern bei einer Verbesserung der medizinischen Versorgung oder die Ausbreitung von ansteckenden Krankheiten.

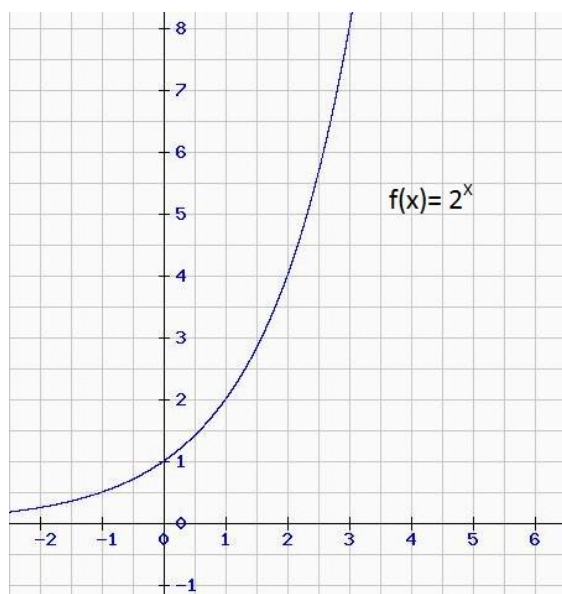


Abb. 1: Verlauf der Exponentialfunktion  $2^x$

Natürlich lernt man im Schulunterricht, wie eine Exponentialfunktion verläuft (Abb. 1). Aber kann man sich unter einer solchen

Grafik wirklich etwas Konkretes vorstellen?

Dabei haben wir es im täglichen Leben immer wieder mit Fragen zu tun, die man nur richtig beantworten kann, wenn man sich klarmacht, dass exponentielles Wachstum hinter dem Phänomen steckt – und dann genauer nachrechnet. Dazu zählt z. B. die Frage, wie viel Geld ein um 0,25 % geringerer Kreditzins beim Wohnungskauf über die Laufzeit spart oder welcher Kaufkraftverlust eintritt, wenn das Gehalt fünf Jahre lang nicht steigt.

Richtig – man lernt in der Schule auch, wie man das ausrechnet: Mit der Zinsformel, die das aktuelle Kapital  $K$  bei festem Zinssatz  $Z$  aus einem Anfangskapital  $K_A$  bestimmt:

$$K = K_A \cdot (1 + Z)^n$$

Dabei steht  $n$  für die Zahl der Sparjahre.

Wenn allerdings  $n$  und  $K_A$  sehr klein sind, ist die Wirkung des Zinseszinses nicht sichtbar. Anschaulicher wird das erst bei einem etwas „größeren“ Beispiel.

So verkauften die Indianer im Jahr 1627 die Insel Manhattan angeblich für 24 \$ an den Niederländer Pieter Minnewit [2].

Hätten sie den Betrag damals mit 4 % Zinsen über die seither vergangenen 388 Jahre angelegt und nicht angetastet, wäre daraus ein Vermögen geworden, nämlich:

$$K = 24 \cdot 1,04^{388} = 97.531.946 \$$$

Das könnte heute glatt für ein kleineres Grundstück reichen.

So anschaulich das Beispiel ist – zu Lebzeiten hätten die Indianer davon nichts gehabt.

Ein zweites Beispiel mit einem vielleicht noch überraschenderen Ergebnis: Angenommen, wir besäßen ein riesiges Stück 90g-Papier mit einer Materialstärke von 0,09 mm. Wie oft müssen wir dieses Papier falten, um den Abstand zwischen Erde und Mond (384.400 km) zu überbrücken?

Na, was schätzt ihr?

Und jetzt überprüft eure Schätzung bitte anhand der folgenden einfachen Rechnung:

$$0,09 \text{ mm} \cdot 2^n = 384.400 \text{ km}$$

$$2^n = \frac{384,4 \cdot 10^{11}}{9}$$

$$n = \frac{\log(42,71 \cdot 10^{11})}{\log 2}$$

Und? Wie oft müsst ihr falten?

Das Ergebnis wird euch (die Informatiker ausgenommen [3]) sicherlich überraschen. Es ist ein sehr schönes Beispiel dafür, wie schwer es dem menschlichen Gehirn fällt, exponentielles Wachstum nachzuvollziehen [1]. Aber auch für dieses Beispiel gilt: Es hat keinen Realitätsbezug. Wie sollte man denn beispielsweise die letzte Faltung vornehmen?

## Übersetzungen

Tatsächlich gibt es eine sehr viel anschaulichere Möglichkeit, um exponentielles Wachstum ganz real „sichtbar“ zu machen.

Die Idee geht zurück auf eine Skizze [Leonardo da Vincis](#) (1452-1519) aus dem lange verschollenen und erst 1953 wiederentdeckten Codex Madrid (Abb. 2). Sie zeigt, wie durch eine wiederholte Untersetzung das Drehmoment an einem Seilzug verstärkt wird.

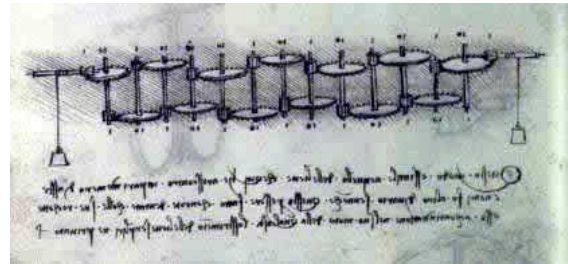


Abb. 2: Codex Madrid (Leonardo da Vinci)

Anfang des Jahrtausends installierte der US-amerikanische „Maschinen-Künstler“ [Arthur Ganson](#) (\*1955) [4] eine „Machine with Concrete“ (Abb. 3), die demselben Prinzip folgt. Er schaltete 12 Untersetzungen 1:50 hintereinander, montierte für das erste Zahnrad einen Antrieb mit 200 U/min – und verschraubte das letzte Zahnrad mit einem Granitblock.

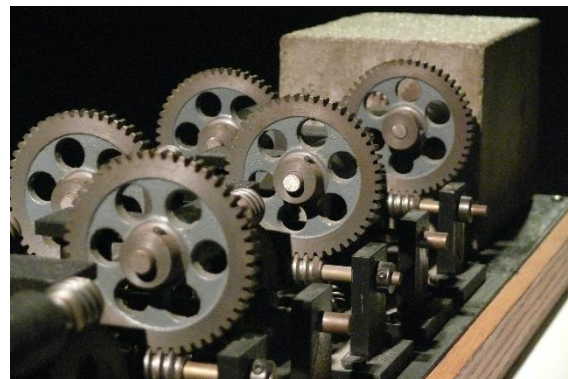


Abb. 3: Machine with Concrete von Arthur Ganson (Foto: Shervinafshar, [CC BY-SA 3.0](#))

Warum letzteres kein Problem darstellt, kann man leicht nachrechnen: Mit jeder Untersetzung reduziert sich die Geschwindigkeit  $G$  um den Faktor 50. Bei 12 Untersetzungen gilt also für das letzte Zahnrad:

$$G = 200 \cdot 50^{-12} \frac{\text{U}}{\text{min}}$$

Oder, anschaulicher dargestellt: Die Zeit  $T$ , die erforderlich ist, damit das letzte Zahnrad sich um einen Zahn weiterdreht (sich also das elfte Zahnrad einmal komplett gedreht hat), liegt etwa bei:

$$T = \frac{50^{11}}{200} \text{ min} = 46.449.890.601 \text{ Jahren.}$$

46,45 Milliarden Jahre – das dürfte der kleine Motor schwerlich überleben.

Eine solche Ewigkeitsmaschine lässt sich natürlich auch mit fischertechnik konstruieren. Martin Romann hat das getan – und am 28.10.2012 ein [Video seiner Maschine](#) auf YouTube publiziert (Abb. 4).

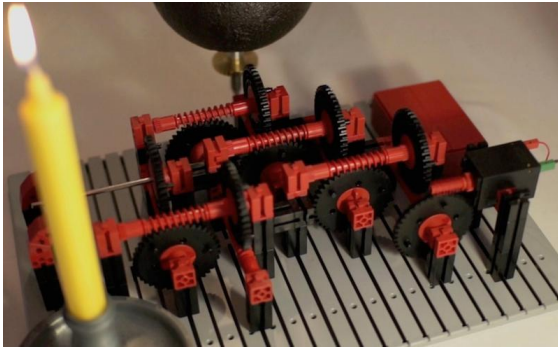


Abb. 4: Ewigkeitsmaschine (Martin Romann)

Dabei hat er die maximale mit einem fischertechnik-Getriebe realisierbare Untersetzung von 1:40 (Schnecke auf Z40) verwendet.

Eine Ewigkeitsmaschine mit zehn Z40 lässt sich sogar noch etwas kompakter auf einem Experimentierboard unterbringen (Abb. 5).

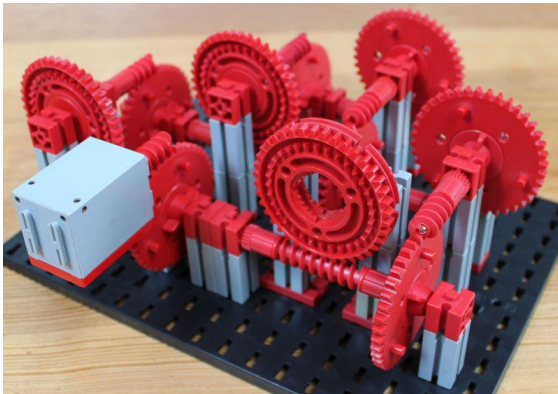


Abb. 5: Ewigkeitsmaschine auf einer Experimentierplatte

Montiert man das letzte Z40 fest und schließt vorne einen guten alten grauen fischertechnik-Motor an (8.000 U/min bei 9V Betriebsspannung), dann berechnet sich die Zeit  $T$ , die vergeht, bis das letzte (zehnte) Z40 um einen Zahn weitergedreht wurde, wie folgt:

$$T = \frac{40^9}{8000} \text{ min} = 62.343,98 \text{ Jahre}$$

Unwahrscheinlich, dass der graue Motor (mit bereits 40 Jahren „Berufserfahrung“) das noch erlebt.

Aber mit diesem Modell lässt sich exponentielles Wachstum „zum Anfassen“ konstruieren: ideal für eine anschauliche Mathematikstunde.

Eine fischertechnik-Designer-Datei des Modells gibt es [hier](#) zum Download.

## Quellen

- [1] Dietrich Dörner: *Die Logik des Misslingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen*. rororo, 1992.
- [2] Rulf Neigenfind: *Wie erklären Sie jemand, der Sie fragt, wie ein Computer funktioniert, wie ein Computer funktioniert?* IBM Deutschland, 1980.
- [3] Douglas Adams: *The Hitchhiker's Guide to the Galaxy*. Del Rey, 1978.
- [4] Arthur Ganson: [Machines](#).

Pneumatik

## Druckminderer

Stefan Falk

*Wer fischertechnik-Modelle mit viel Pneumatik laufen lassen will, braucht ordentlich viel Druckluft im Sinne von Volumen pro Zeit. Dazu gibt es im Handel vielerlei leistungsfähige Kompressoren. Allerdings liefern viele davon einen für fischertechnik-Pneumatik viel zu hohen Druck. Dieser Beitrag zeigt, wie man mit fischertechnik-Teilen den zu hohen Druck auf die erlaubten 0,3-0,5 bar reduzieren kann.*

### Das Problem

Ein großer Kompressor mit eingebauter Druckregelung ist natürlich ideal – aber auch entsprechend teuer. Der Autor besitzt einen Kompressor, der 15 L/min Durchsatz bei 3,5 bar Druck liefert. Der Durchsatz ist toll und genügte sogar für den Nachbau einer real existierenden Abfüllanlage, deren gesamte Ablaufsteuerung ausschließlich mit fischertechnik-Pneumatik wie Zylindern, den älteren Festo-Ventilen und Betätigern realisiert war [1]. Dieses Modell braucht sehr viel Druckluft – von den aktuellen blauen fischertechnik-Kompressoren benötigte man vier Stück im Dauerbetrieb, um das Modell zuverlässig am Laufen zu halten.

Da kommt der größere Kompressor natürlich gerade recht. Allerdings würden einem die meisten fischertechnik-Pneumatikteile einfach nur um die Ohren fliegen und augenblicklich zerplatzen, wenn man sie mit den 3,5 bar dieses Kompressors betreiben würde. Insbesondere bei den bedauerlicherweise so extrem raren Festo-Ventilen und Betätigern ist das natürlich unbedingt zu vermeiden.

### Gefahrenhinweis

Hohe Drücke können gefährlich sein. Man muss gut überlegen, was man tut und was man besser lässt, und wo überall Schwachstellen im Aufbau lauern. Bei einem ins Auge gefeuerten P-Stopfen z. B. hört der

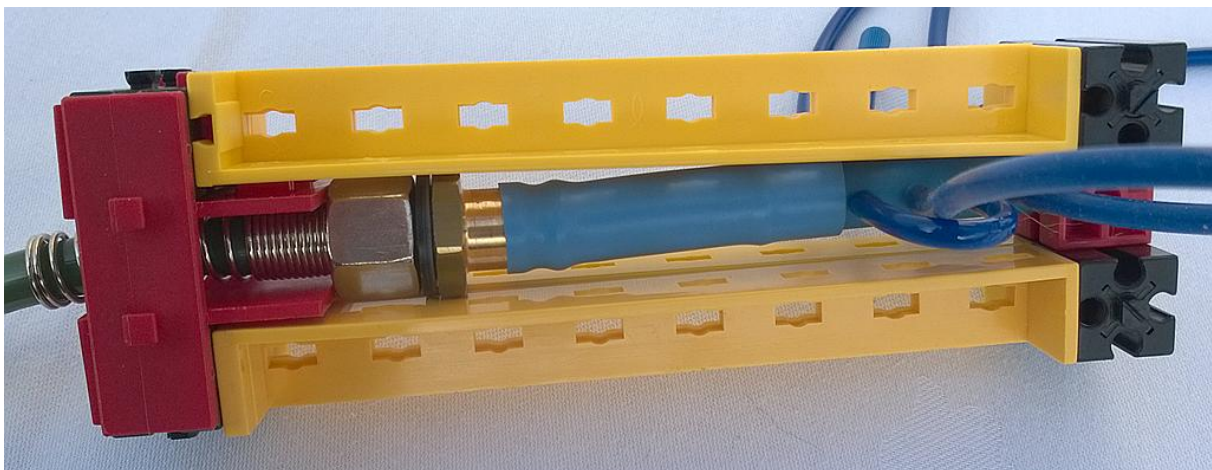


Abb. 1: Druckverteiler von der Seite

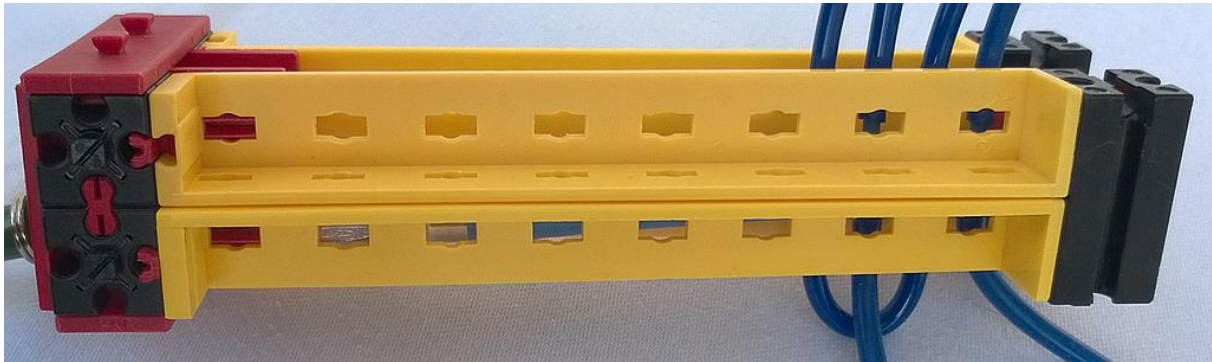


Abb. 2: Druckverteiler von oben

Spaß garantiert sofort auf. Also bitte: Umsicht und Vorsicht bei der Anwendung von Anregungen aus diesem Beitrag!

## Eine Lösung in drei Teilen

Es gelingt aber tatsächlich, mit purer ft-Pneumatik einen selbstregelnden Druckreduzierer zu bauen, bei dem kein empfindliches Teil einen zu hohen Druck aushalten muss. Der Reihe nach:

### Baugruppe 1: Druckverteiler

Dieser Beitrag stellt ein Beispiel, wie man größere Kompressoren sicher mit fischertechnik verwenden kann, ausführlich dar. Je nach vorhandenem Kompressor können bei euch andere Bauweisen des Druckverteilers notwendig werden, aber die grundsätzlichen Regeln und Anforderungen bleiben gleich.

Die Kapazität des Kompressors kann durchaus für mehrere Modelle gleichzeitig ausreichen (wie die Convention mehrfach gezeigt hat). Die in Abb. 1 und 2 gezeigte stabil gebaute Anordnung dient dazu, den mächtigen Luftstrom des Kompressors auf fischertechnik-Schlauchformat zu bringen.

Darin sind der von links kommende Original-Schlauch des Kompressors und ein mitgeliefertes Adapterstück zu sehen. Über dieses passt glücklicherweise ein [36079 Pneumatik-Schlauch 10x0,5x50](#) hinreichend stramm, dass der Übergang dicht bleibt. Rechts anschließend folgt ein [31646 Pneumatik-Verteiler](#) gerade so, wie wenn er

am alten großen [30864 Pneumatik Kleinkompressor](#) angeschlossen wäre. Ganz rechts endet das Ganze mit dem BS15 mit Bohrung, in dessen Nut der Zapfen des Pneumatik-Verteilers steckt.

Damit der Luftdruck die genannten Teile nicht auseinander drückt (und sie zu Geschossen werden lässt!), ist der umgebende Rahmen in alle denkbaren Richtungen gegen Auseinanderreißen schützend gebaut. Wichtige Punkte sind:

- Die Anordnung muss in jeder Richtung so stabil gebaut sein, dass sie mit den auftretenden Kräften zuverlässig dauerhaft umgehen kann.
- Jede Nut ist ein potenzielles Problem, weil Zapfen etc. darin in Nut-Richtung bei entsprechender Kraft problemlos herausgeschoben werden könnten.
- Jeder Zapfen, insbesondere von Statikteilen, ist ein potenzielles Problem, weil er bei entsprechender Kraft abreißen oder abscheren könnte.
- Man überlege sorgfältig und genau, wo Kräfte in welche Richtung wirken könnten, und bringe ggf. entsprechende Verstärkungen und Verriegelungen an.
- Wenn nicht alle Anschlüsse des Pneumatik-Verteilers benötigt werden, bitte die unbenutzten paarweise mit einem kurzen Stückchen Schlauch verschließen. **Keinesfalls dürfen ungesicherte P-**

**Stopfen verwendet werden – die könnten zu wirklich gefährlichen Geschossen werden, wenn sie durch den Druck abfliegen!** Dieser Punkt kann nicht genügend betont werden.

- Verwendet stramm sitzende Schläuche. Die erste Generation Schlauch von fischertechnik (die dünnwandige hellblaue) rutscht viel leichter von einem Anschluss ab als die nachfolgenden. Alle Schläuche, die hohen Druck führen, müssen fest aufgeschoben werden und zuverlässig sitzen.
- Das Tragen einer Schutzbrille sei dringend empfohlen, bis alles auf sichere Funktion geprüft und nochmal geprüft wurde.

Damit haben wir aber den großen Luftstrom und hohen Druck auf potenziell acht Anschlüsse verteilt.

### Baugruppe 2: Druckminderer

Wie können wir nun aus 3,5 bar nur mit fischertechnik-Teilen (die ja für höchstens 0,5 bar ausgelegt sind) 0,3-0,5 bar machen?

Stellen wir uns z. B. ein Festo-Ventil als normalen Schließer in üblicher Verschaltung vor:

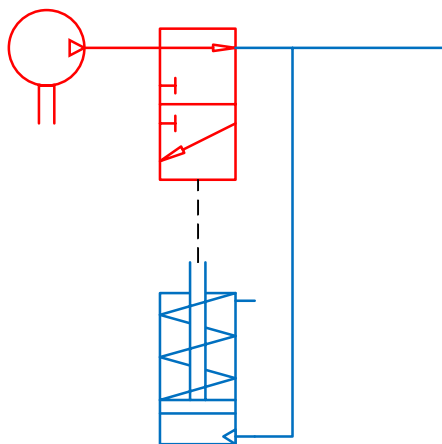


Abb. 3: Falsche Verwendung von Ventilen

Der naive Gedanke wäre hier, dass das Ventil den Niederdruckbereich (blau, rechts) entlüftet, wenn zu viel Druck ansteht. Das Problem ist aber: Das Ventil selbst steht unter dem vollen Hochdruck

(rot), insbesondere wenn es schließen soll. Ein fischertechnik-Festo-Ventil würde uns einfach, in kleine Teilchen zerfetzt, um die Ohren fliegen. So kann das keinesfalls funktionieren.

Durchaus funktioniert aber folgende im Dauerbetrieb praktisch und erfolgreich erprobte Schaltung:

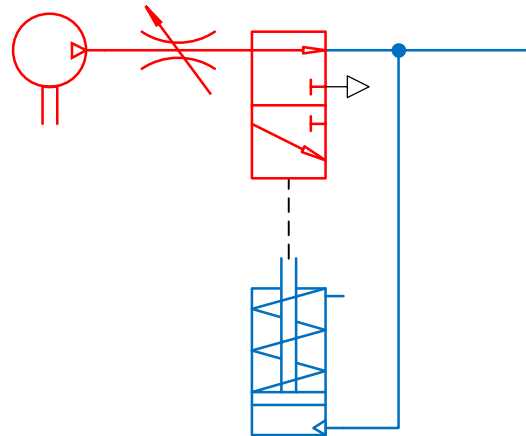


Abb. 4: Funktionierende Variante

Der Trick ist, dass wir das Ventil hier andersherum als üblich betreiben: Im Ruhezustand lassen wir wieder die Druckluft von links nach rechts durch. Wenn der Druck rechts aber zu hoch wird, sperren wir die überschüssige Druckluft des Kompressors nicht etwa ab (und erreichen damit nichts als die Zerstörung des Ventils wegen Überdruck), sondern wir lassen sie ins Freie strömen!

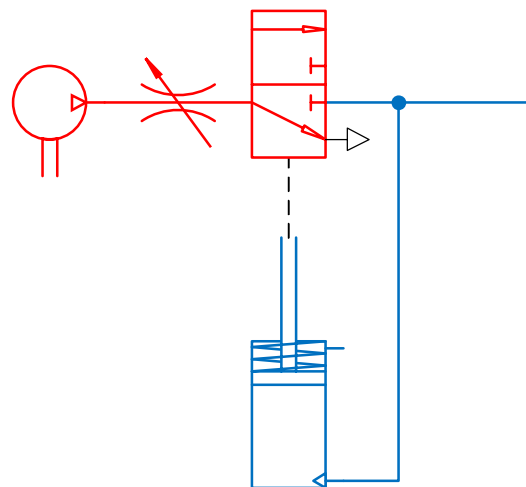


Abb. 5: Überschüssige Druckluft kann ins Freie entweichen

Das ist natürlich nicht besonders effizient, denn wir verschwenden ja Druckluft. Das Wichtige daran ist aber, dass wir unser Ventil vor Überdruck schützen, solange es nur genügend Durchlass bietet, sodass die anstehende Hochdruck-Luft hinreichend schnell ins Freie abströmen kann, ohne dass sie im Inneren des Ventils einen zerstörerisch hohen Druck aufbauen kann.

Außerdem haben wir eine Drossel im Hochdruckteil ergänzt. Die lässt sich, wie wir noch sehen werden, hochdruckfest mit fischertechnik-Teilen bauen, und sie erfüllt zweierlei Zwecke:

- a) Sie trägt dazu bei, das Ventil nicht mit wesentlich mehr Druckluft zu beaufschlagen, als am Ausgang vom Modell benötigt wird.
- b) Sie hilft, Druckluft zu sparen. Wenn nämlich viele Modelle am Druckverteiler hängen, wollen wir die Druckluft ja noch woanders nutzen können und nicht nur ungenutzt ins Freie verlieren.

Abb. 6 zeigt die Lösung, aufgebaut nur aus unveränderten fischertechnik-Teilen:

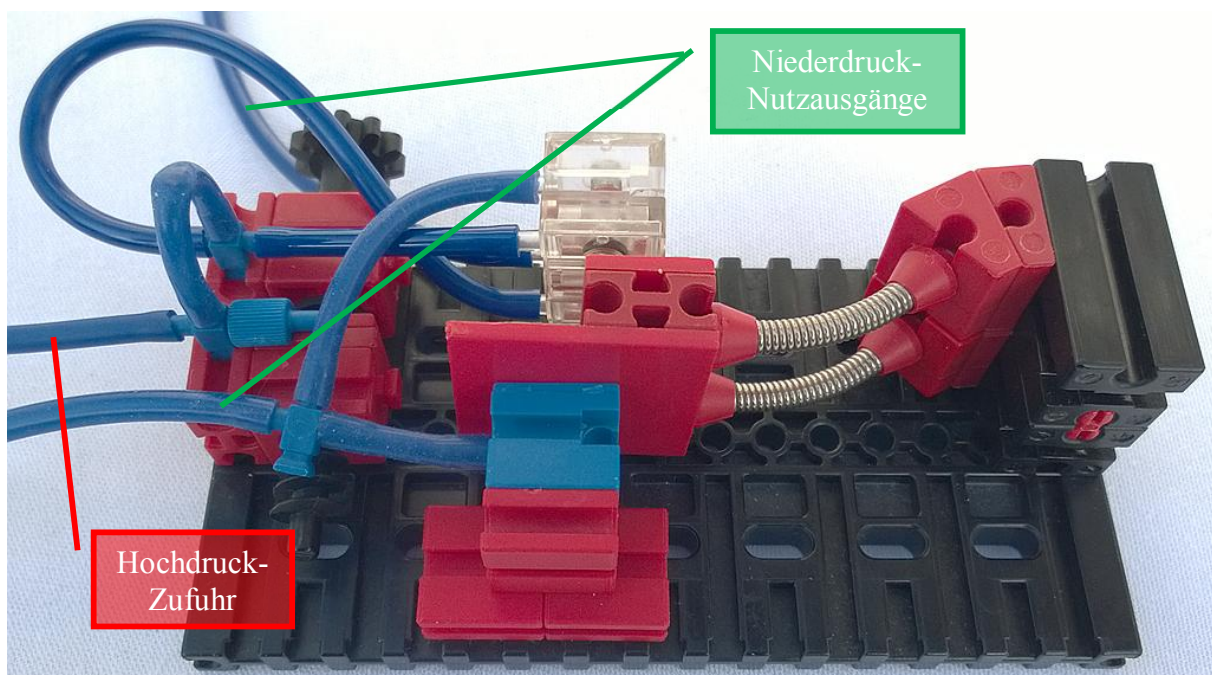


Abb. 6: Druckreduzierung mit purer fischertechnik

1. Die Hochdruck-Luft kommt von links über die Selbstbau-Drossel an. Die Drossel ist eine leichte Variation aus [2]. Die Besonderheit ist die Sicherung des P-Stopfens gegen Abspringen durch zu hohen Druck mittels eines Federnockens; siehe Abb. 7. Alternativ könnte die Druckluft vom Druckverteiler auch über zwei Schläuche am T-Stück ankommen, sodass gar kein P-Stopfen benötigt wird.

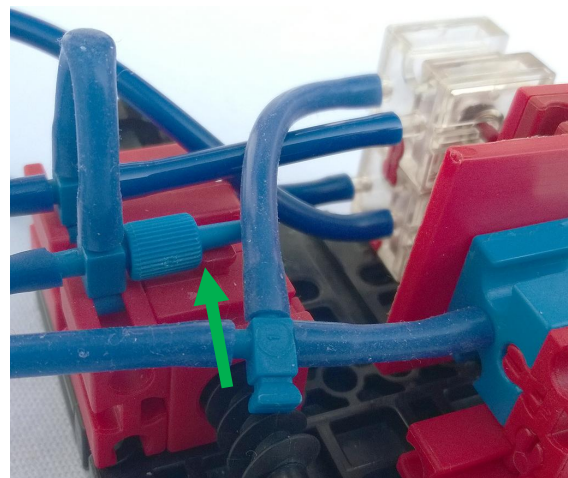


Abb. 7: Sicherung des P-Stopfens mittels zusätzlichem Federnocken

2. Die so vorgedrosselte Druckluft wird an den *Ausgang* (!) von roten Festo-Ventilen (Öffnern) angeschlossen. Das ist der wichtige Punkt: Das Ventil wird *entgegengesetzt zur normalen Verwendung* benutzt. Man schaue genau hin, wo welche Schläuche an den Ventilen angeschlossen sind. Die Druckluft kommt am „Ausgang“ herein, der bei Betätigung des Ventils ja mit der Abluft verbunden ist. Dadurch kann die Druckluft bei zu hohem Druck einfach durch das Ventil hindurch ins Freie strömen und zerstört das Ventil nicht.

In diesem Aufbau des Druckminderers sind sogar zwei Festo-Ventile parallel geschaltet. Das bietet einen höheren Durchsatz (in L/min), der für die oben genannte Abfüllanlage erforderlich war. Der Aufbau funktioniert aber grundsätzlich auch mit nur einem Ventil.

3. Am normalen „Eingang“ der Festo-Ventile mit rotem Stößel befindet sich jetzt der Niederdruck-Ausgang des Druckminderers. Im gezeigten Aufbau gibt es sogar zwei Nutzausgänge, die z. B. parallel zu einem ft-Drucklufttank geführt werden können.

4. Die Niederdruck-Luft wird auch zu einem [einfachwirkenden 36075 Pneumatik-Betätiger](#) geführt. Der kann – hier gegen die relativ starke Federkraft zweier 31307 Federfüße aus dem alten Elektromechanik-Programm von fischertechnik – die Stößel der Festo-Ventile betätigen. Auf diese Weise werden die Ventile bei zu hohem Ausgangsdruck in den Zustand geschaltet, der die ankommende Hochdruck-Luft einfach ins Freie strömen lässt.

Voilà! Wir haben – nur mit unveränderter fischertechnik – aus 3,5 bar Hochdruck ft-kompatiblen Niederdruck gemacht. Zweckmäßig ist es natürlich, den Druck am Ausgang mit einem Manometer zu überwachen, wie es sie im Handel gibt.

Die Bedienungsanleitung unseres Druckreduzier-Aufbaus ist dann wie folgt: Zunächst wird die Drossel ganz geschlossen und nur langsam so weit geöffnet, bis der gewünschte Druck am Ausgang ansteht. Sodann wird durch Verschieben des Betätigers und der Federn die Druckregelung so eingestellt, dass bei zu hohem Druck auf Abluft geschaltet wird. Erst dann darf die Eingangsdrossel weiter aufgedreht werden, um mehr Durchfluss (Volumen pro Zeit) zu erhalten. Der Ausgangsdruck wird dabei hinreichend konstant bleiben.

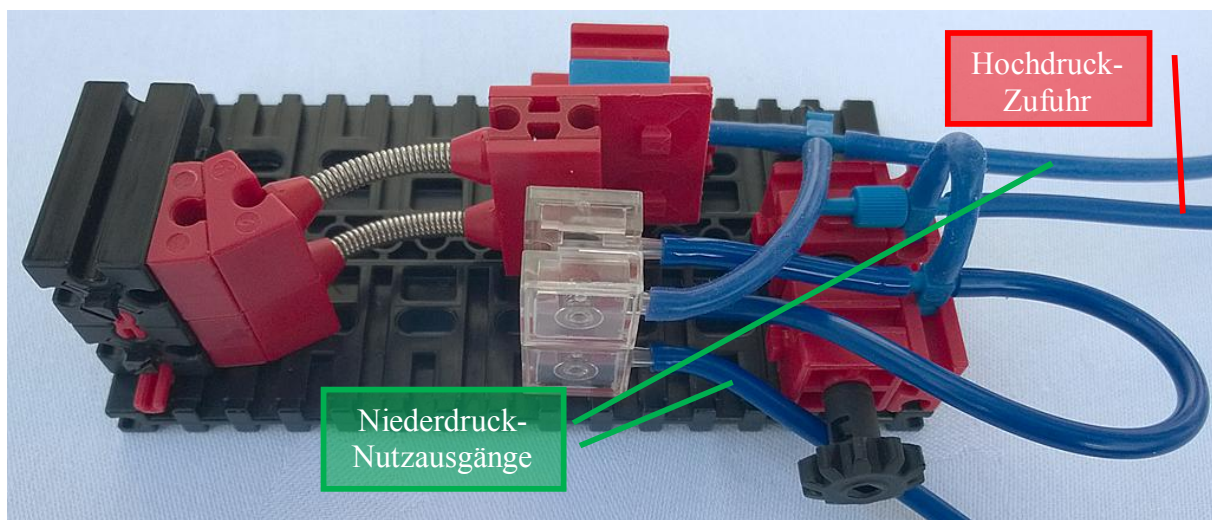


Abb. 8: Druckminderer von der Ventilseite aus gesehen



### Baugruppe 3: Gegen das „Flattern“

Beim Betrieb der Baugruppe kann ein unerwünschter Effekt auftreten: Der Druckminderer kann ins „Flattern“ geraten, will heißen, er schwingt in rasend schneller Folge zwischen den Zuständen „zu wenig Druck“ und „zu viel Druck“ hin und her. Das geht so schnell, dass man es als Brummen hören und als heftige Vibration spüren kann.

Insbesondere kann das auftreten, wenn die Druckluftzufuhr stark pulsiert. Das wiederum ist oft der Fall, wenn z. B. ein Kreiskolbenkompressor mit nur einem Zylinder eingesetzt wird, ohne dass ein großer Ausgleichsbehälter die Druckstöße dämpft. Pro Hub des Kompressors wird der Druckminderer dann mit besonders viel Druckluft beaufschlagt, und während der nächsten halben Umdrehung des Kompressors mit fast gar keinem Druck.

Das lässt sich mit großen Ausgleichsbehältern, wie sie große Kompressoren haben, vermeiden. Aber auch mit fischertechnik-Mitteln gibt es eine Lösung:



Abb. 9: Schutz gegen stoßweise ankommende Druckluft

Die Druckluft lässt man durch [36970 Pneumatik-Rückschlagventile](#) strömen. Abb. 9 zeigt eine Anordnung mit zwei Druckluftzugängen für hohen Durchsatz. Die Eingänge der Rückschlagventile werden mittels Pneumatik-T-Stück und P-Stopfen schlauchanschlussfähig gemacht. Hier kann die Druckluft ruhig stoßweise ankommen, denn während der Phasen ohne Druck sperren die Rückschlagventile einfach das Zurückströmen der im Lufttank gesammelten Druckluft. Auf der entfernten Seite des

Drucktanks steht dann Druckluft mit angenehm gleichmäßigem, kaum pulsierendem Druck zu Verfügung.

Man kann diese Anordnung auf der Niederdruckseite des Druckminderers sicher betreiben. Will man den Druckminderer selbst schon vor der pulsierenden, schlagenden Druckluft bewahren, könnte das auch im Hochdruckbereich funktionieren. Allerdings ist dann zu beachten:

1. **Der Flatterschutz muss hinter der Drossel eingebaut werden!** Der fischertechnik-Pneumatiktank ist ja auch nicht für hohe Drucke ausgelegt. Die Drossel darf nur so weit geöffnet werden, dass das zu betreibende Modell gerade genug Druckluft bekommt. So wird sichergestellt, dass der Tank und die Rückschlagventile nicht überlastet werden und zerplatzen.
2. **Die Zuläufe dürfen dann keine P-Stopfen verwenden, zumindest keine ungesicherten! Gefahr!** Besser geht man dann mit zwei Schläuchen parallel in die T-Stücke. Ansonsten besteht ernsthafte Verletzungsgefahr durch abfliegende P-Stopfen!
3. **Der Autor übernimmt keine Garantie oder Haftung jeglicher Art für die Rückschlagventile und Lufttanks, wenn sie unter Hochdruck verwendet werden.** Alle diesbezüglichen Experimente unternimmt ihr auf eigene Gefahr und also bitte nur wohlüberlegt und mit äußerster Vorsicht!

Sicherer ist es, den Flatterschutz erst im Niederdruckbereich zu verwenden.

### Quellen

- [1] Falk, Stefan: [Rein pneumatisch gesteuerte Abfüllanlage](#). ft-Community-Website, 2012.
- [2] Falk, Stefan: *Druckluftsteuerungen (Teil 3)*. [ft:pedia 3/2014](#), S. 25.

Elektromechanik

## Wolf, Schaf und Kohlkopf

Stefan Falk

Ein Bauer muss einen Wolf, ein Schaf und einen Kohlkopf mit seinem Floß sicher von einer Seite des Flusses auf die andere bringen. Er kann aber immer nur eines der drei auf dem Floß mitnehmen, und muss aufpassen, dass der allein zurückgelassene Wolf nicht das Schaf frisst und das Schaf nicht den Kohlkopf. Hätte der Bauer nur ein paar fischertechnik-Teile, könnte er seine Strategie erproben ...

Zum Glück verfügt die geneigte Leserschaft dieser Zeitschrift typischerweise über fischertechnik. Also wollen wir dem Bauern mit einem Modell helfen, mit dem er herausbekommen kann, was er in welcher Reihenfolge transportieren muss, damit alles klappt. Zwei Probleme gilt es für den Bauern zu vermeiden:

1. Wenn er den Wolf und das Schaf alleine an einem der beiden Ufer zurück lässt, ohne dass er dabei ist, frisst der Wolf das Schaf.

2. Wenn er das Schaf und den Kohlkopf an einem der beiden Ufer alleine zurücklässt, frisst das Schaf den Kohlkopf.

Etwas formaler lässt sich das in einer Tabelle beschreiben, die für alle denkbaren Uferseiten von Wolf, Schaf, Kohlkopf und Bauer auflistet, wann welches Problem auftritt. Jeder der vier kann sich am diesseitigen oder jenseitigen Ufer befinden, woraus sich die folgenden 16 Möglichkeiten ergeben:

Wolf	Schaf	Kohlkopf	Bauer	Wolf frisst Schaf	Schaf frisst Kohlkopf
diesseits	diesseits	diesseits	diesseits	nein	nein
diesseits	diesseits	diesseits	jenseits	ja!	ja!
diesseits	diesseits	jenseits	diesseits	nein	nein
diesseits	diesseits	jenseits	jenseits	ja!	nein
diesseits	jenseits	diesseits	diesseits	nein	nein
diesseits	jenseits	diesseits	jenseits	nein	nein
diesseits	jenseits	jenseits	diesseits	nein	ja!
diesseits	jenseits	jenseits	jenseits	nein	nein
jenseits	diesseits	diesseits	diesseits	nein	nein
jenseits	diesseits	diesseits	jenseits	nein	ja!
jenseits	diesseits	jenseits	diesseits	nein	nein
jenseits	diesseits	jenseits	jenseits	nein	nein
jenseits	jenseits	diesseits	diesseits	ja!	nein
jenseits	jenseits	diesseits	jenseits	nein	nein
jenseits	jenseits	jenseits	diesseits	ja!	ja!
jenseits	jenseits	jenseits	jenseits	nein	nein

Tabelle 1: Wann tritt welches Problem auf?

Wir stellen Folgendes fest:

1. Es gibt vier Kombinationen, bei denen der Wolf das Schaf frisst, weil sich Wolf und Schaf auf einer, der Bauer aber auf der anderen Seite des Ufers befinden.
2. Ebenso gibt es vier Kombinationen, bei denen das Schaf den Kohlkopf frisst, weil sich Schaf und Kohlkopf auf einer, der Bauer aber auf der anderen Seite befindet.
3. Bei zwei Kombinationen treten beide Probleme auf: Nämlich dann, wenn Wolf, Schaf und Kohlkopf alle drei auf einer Seite des Ufers sind, der Bauer aber auf der andern, und er somit wieder nicht aufpassen kann. Wer dann schneller ist im Fressen, wollen wir dahingestellt sein lassen, und einfach annehmen, das Schaf frisst den Kohlkopf und wird anschließend vom Wolf verspeist. Ein Problem hat der Bauer jedenfalls.

## Wann frisst der Wolf das Schaf?

Greifen wir uns aus *Tabelle 1* einmal nur diejenigen Kombinationen heraus, bei denen der Wolf das Schaf frisst. Das sind folgende:

Wolf	Schaf	Kohlkopf	Bauer
diesseits	diesseits	diesseits	jenseits
diesseits	diesseits	jenseits	jenseits
jenseits	jenseits	diesseits	diesseits
jenseits	jenseits	jenseits	diesseits

*Tabelle 2: Der Wolf frisst das Schaf*

Wenn wir genau hinschauen, können wir diese vier Kombinationen von Wolf, Schaf, Kohlkopf und Bauern auf nur zwei Kombinationen von Wolf, Schaf und Bauern reduzieren. Dafür, ob der Wolf das Schaf frisst, ist es nämlich völlig egal, an welchem Ufer sich der Kohlkopf befindet. Wir können also die ersten beiden und die letzten beiden Zeilen vereinfachend zu folgenden Kombinationen zusammenfassen:

Wolf	Schaf	Bauer
diesseits	diesseits	jenseits
jenseits	jenseits	diesseits

*Tabelle 3: Der Wolf frisst das Schaf - vereinfacht*

## Wann frisst das Schaf den Kohlkopf?

Genau dieselbe Überlegung können wir auch für die Kombinationen anstellen, in denen das Schaf sich über den Kohlkopf hermachen kann. Aus den vier Kombinationen aus *Tabelle 1*...

Wolf	Schaf	Kohlkopf	Bauer
diesseits	diesseits	diesseits	jenseits
diesseits	jenseits	jenseits	diesseits
jenseits	diesseits	diesseits	jenseits
jenseits	jenseits	jenseits	diesseits

*Tabelle 4: Das Schaf frisst den Kohlkopf*

... können wir wieder nur zwei machen, weil das Schaf den Kohlkopf vertilgen kann, wenn sich nur beide ohne Bauern auf derselben Uferseite befinden – egal, wo der Wolf gerade sitzt (wir vereinbarten ja, dass das auch dann der Fall ist, wenn alle drei auf derselben Seite sitzen):

Schaf	Kohlkopf	Bauer
diesseits	diesseits	jenseits
jenseits	jenseits	diesseits

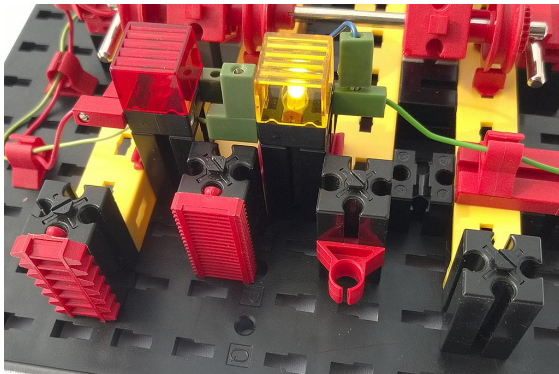
*Tabelle 4: Das Schaf frisst den Kohlkopf - vereinfacht*

Diesmal sind es die erste und dritte sowie die zweite und vierte Zeile, die wir zusammenfassen können. Überzeugt euch selbst: Egal, wo der Wolf sitzt, wird das Schaf den Kohl fressen.

## Ran an fischertechnik!

Nachdem wir das Problem durch ein wenig Überlegung soweit wie möglich vereinfacht haben können wir uns an die Umsetzung mit unseren Bauteilen machen. In unserem Modell werden die Uferseiten von Wolf, Schaf, Kohlkopf und Bauern durch vier lange

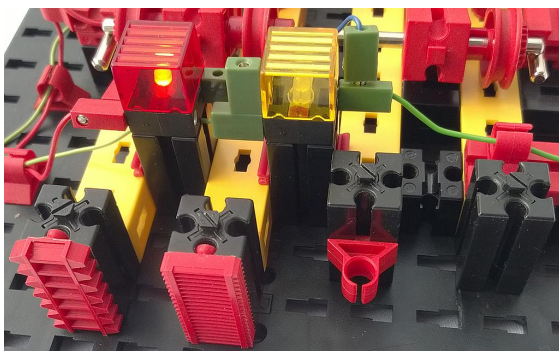
Stangen realisiert, die um 15 mm verschoben werden können. Ziehen wir sie zu uns, gilt das als „diesseitiges Ufer“; drücken wir sie nach hinten, soll das der Zustand „jenseitiges Ufer“ sein.



*Abb. 1: Die vier „Darsteller“ – das Schaf frisst gerade den Kohlkopf*

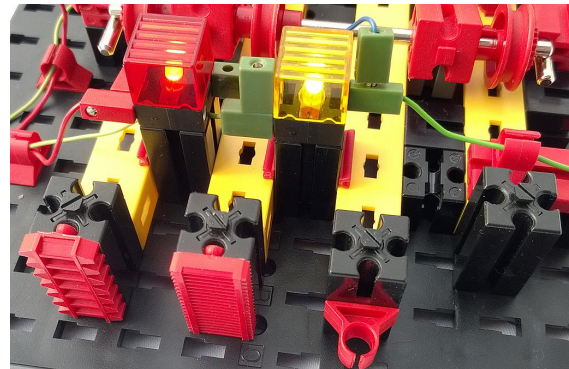
Die „Griffe“ zum Verschieben der Stangen repräsentieren die vier Objekte. In Abb. 1 sieht man von links nach rechts die grobe Zahnstange (den Wolf mit seinen Reißzähnen), die feine Zahnstange (das Schaf mit seinen feinen Zähnen), einen Reedkontakthalter (den Kohlkopf) und einen unbebauten Baustein 30 (den Bauern).

Man sieht den Wolf (ganz links) und den Bauern (ganz rechts) nach vorne gezogen – also am diesseitigen Ufer befindlich. Schaf und Kohlkopf befinden sich am jenseitigen Ufer (deren Stangen sind nach hinten geschoben). Das Schaf kann also, da der Bauer nicht aufpassen kann, genüsslich den Kohlkopf verspeisen. Das wird durch die leuchtende gelbe Kontrolllampe angezeigt.



*Abb. 2: Der Wolf frisst das Schaf, weil der Bauer sich am jenseitigen Ufer befindet*

Abb. 2 zeigt ein anderes Problem-Beispiel: Wolf und Schaf befinden sich am diesseitigen, der Bauer jedoch (mit dem Kohlkopf) am jenseitigen Ufer. Nichts hält also den Wolf davon ab, sich über das arme Schaf herzumachen – angezeigt durch die leuchtende rote Lampe.



*Abb. 3: Hier hat der Bauer gar nicht aufgepasst, und übrig bleibt nur der Wolf*

Ganz übel ist's schließlich in Abb. 3: Der Bauer ist ganz alleine am jenseitigen Ufer, und so frisst das Schaf den Kohlkopf, nur um anschließend selber vom Wolf gerissen zu werden. In diesem Zustand leuchten die rote und die gelbe Lampe gleichzeitig.

## Die Kodierung der Stellungen

Um die Stellungen und die ggf. auftretenden Probleme (Wolf frisst Schaf und/oder Schaf frisst Kohlkopf) darzustellen, verwendet unser Modell simple S-Riegel, die an „strategischen“ Stellen der verschiebbaren Stangen eingesetzt werden (Abb. 4).

Dahinter steckt folgender Gedanke: Wir haben zwei Kombinationen von Stellungen, bei denen das Schaf den Kohlkopf isst, und auch zwei, bei denen der Wolf sich am Schaf gütlich tut. Das ergibt zusammen vier abzutastende Stellungen, in denen eine der beiden Warnlampen aufleuchten muss. Unsere S-Riegel sind so platziert, dass eine Lampe immer dann aufzuleuchten hat, wenn in einer Reihe *kein* Riegel steht. Wir denken uns also vier Abtast-Einheiten quer zu den Statikträgern mit ihren Riegeln.

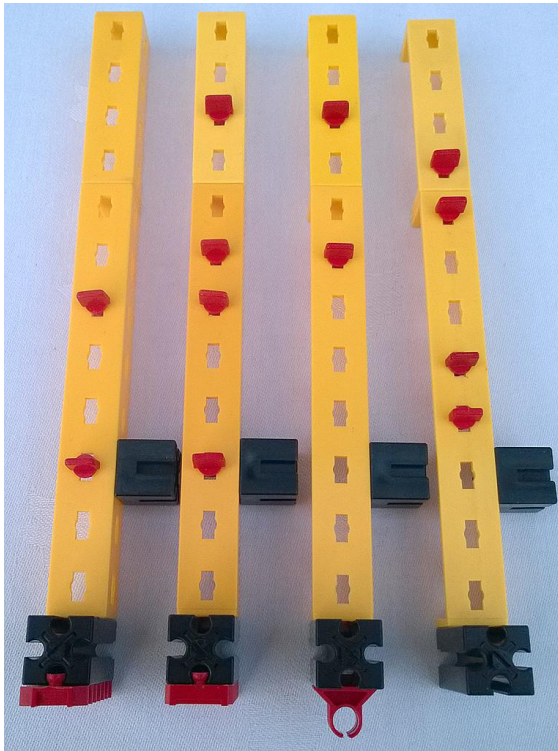


Abb. 4: Die verschiebbaren Stangen und ihre Bestückung mit S-Riegeln

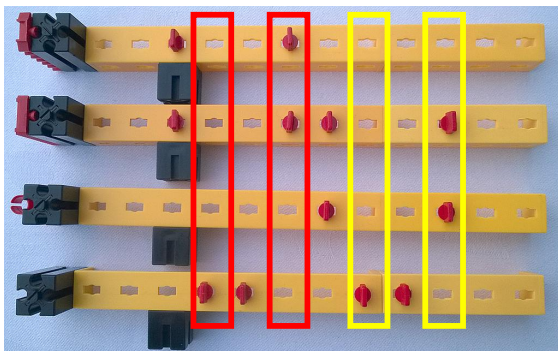


Abb. 5: Die vier abzutastenden Bereiche, stellvertretend für die vier Problem-Möglichkeiten

In Abb. 5 ist die Stellung mit allen Beteiligten am diesseitigen Ufer dargestellt (hier: alle Stangen nach links geschoben). Man sieht (von links nach rechts):

1. Wolf und Schaf haben keinen S-Riegel in Reihe 1; der Wolf könnte also das Schaf fressen. Das wird aber durch den auf demselben Ufer stehenden Bauern verhindert – der Riegel unten steht dafür.
2. Das Fressen des Schafs durch den Wolf am anderen Ufer tritt hier nicht auf: Die Riegel von Wolf und Schaf in Reihe 2

müssen das Aufleuchten der roten Kontrolllampe verhindern.

3. Der Kohlkopf wird aktuell auch nicht vom Schaf verspeist, denn das wird durch den Bauern (mit seinem S-Riegel in Reihe 3) verhindert.
4. Reihe 4 schließlich steht für das Verspeisen des Kohls durch das Schaf, wenn sich Schaf und Kohl am jenseitigen Ufer befinden. In der Abb. 5 ist das eben schlicht nicht der Fall.

Was passiert nun, wenn wir z. B. Schaf und Kohlkopf beide zum anderen Ufer bringen, den Bauern aber hier lassen? Abb. 6 zeigt diesen Zustand, in dem die beiden mittleren Stangen nach rechts geschoben sind:

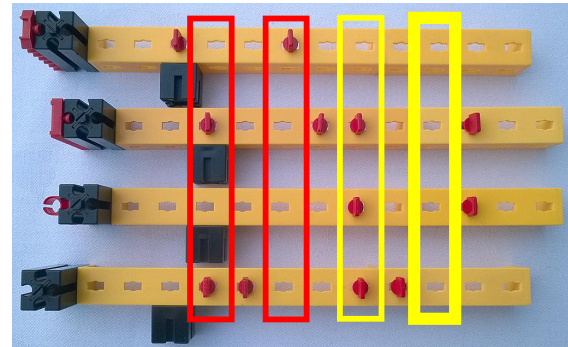


Abb. 6: Das Schaf frisst den Kohlkopf, weil in der vierten Reihe kein S-Riegel mehr steht

Wie man sieht, treten die ersten drei Probleme nicht auf – in den ersten drei Abtastreihen befindet sich jeweils mindestens ein S-Riegel. Aber Reihe 4 ist jetzt „blank“: Kein S-Riegel ist da, der verhindern soll, dass die gelbe Kontrollleuchte aufleuchtet.

Man sieht hier übrigens gut, dass es für dieses Problem „Schaf und Kohl befinden sich ohne Bauern am jenseitigen Ufer“ völlig egal ist, wo der Wolf gerade steht: In keiner der beiden Stellungen der in Abb. 6 oberen Stange wäre da ein S-Riegel, der das Problem verhindern könnte.

Die anderen vier problematischen Stellungen funktionieren mit dieser Bestückung der Statikträger mit Riegeln genauso. Es bleibt uns „nur“ noch, die Abtasteinheiten zu bauen.

## Wenn wir zu viele Taster im Bestand hätten...

... könnten wir ja einfach an jede Position, an der ein S-Riegel zu stehen kommt, einen Taster einbauen. Wir benötigen dann so viele Taster, wie es Riegel gibt. Die Taster einer Reihe würden wir alle als Öffner [1] verwenden und in Serie schalten [2], und je zwei Reihen parallel schalten, um die jeweilige Lampe zu steuern (das große Fressen kann ja jeweils an zwei Ufern stattfinden, solange sich nur der Bauer am anderen befindet). Die Schaltung könnte dann so aussehen:

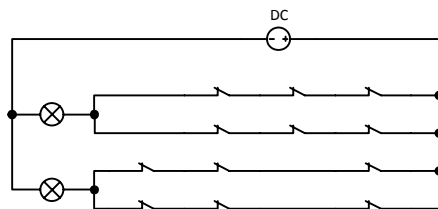


Abb. 7: Die vier abzutastenden Bereiche, stellvertretend für die vier Problem-Möglichkeiten

Na prima. Da brauchen wir ja nur 12 Taster... Wer von uns hat so viele?

## Eine Prise Mechanik dazu...

... und schon schmecken Schaf und Kohlkopf nochmal so gut. Endlich kommen wir zum richtigen fischertechnik-Modell: Wir verwenden überhaupt keine fertigen Taster, sondern einfach Metallachsen. Die leiten den Strom wunderbar und können wie ein Schalter wirken, wenn sie in Kontakt gebracht werden. Das fertige Modell sieht ihr in Abb. 8.

Rechts läuft längs der Statikträger eine gemeinsame Stromzufuhr-Achse; links gibt es zwei kürzere Achsen für die Stromabnahme. Je zwei querliegende Metallachsen können die Verbindung zwischen Stromzufuhr und -abnahme herstellen, wenn sie unten liegen. Die Querachsen unterbrechen aber den Kontakt, wenn sie durch die S-Riegel in den Statikträgern über die Seilrollen auf den Achsen angehoben werden.

Abb. 10 und 14 zeigen die rechte und linke Seite des Modells größer.

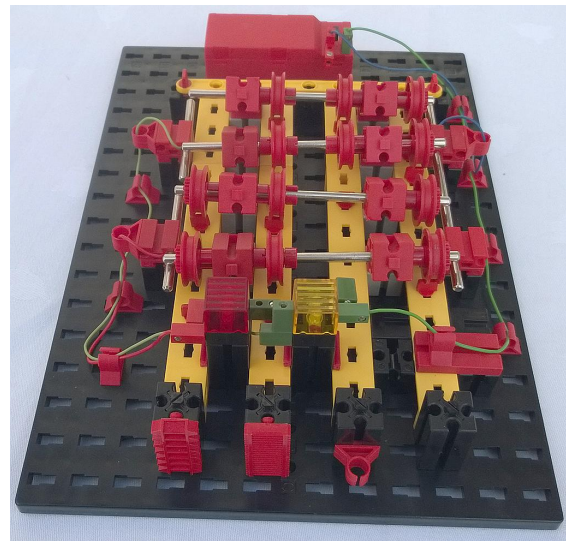


Abb. 8: Das fertige Modell

Die lange Stromversorgungs-Achse auf der rechten Modellseite steckt in zwei BS7,5, die auf einer Kombination von BS15 und BS5 angebracht sind:

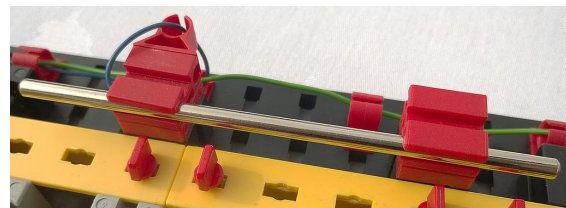


Abb. 9: Die lange Stromzufuhr-Achse rechts

Die Zuleitung wurde von ihrem Stecker befreit und zusammen mit der Achse so in den BS7,5 eingeschoben, dass a) der Kontakt zwischen Leitung und Achse hergestellt und b) die Achse durch die Klemmwirkung sogar gegen Herausrutschen gesichert ist. Wir benötigen also keine weiteren Klemmringe und kommen ohne den guten alten [Klemmkontakt 31338](#) aus.

Auf der linken Seite befinden sich zwei Stromabnahme-Achsen – je eine für die beiden Kontrolllampen (Abb. 11). Jede von ihnen trägt wieder eine Zuleitung ohne Stecker durch einfaches Einklemmen in den BS7,5. Die vordere Leitung (aus Sicht der Verschiebegriffe für Wolf, Schaf, Kohlkopf und Bauer) geht zur roten Kontrolllampe

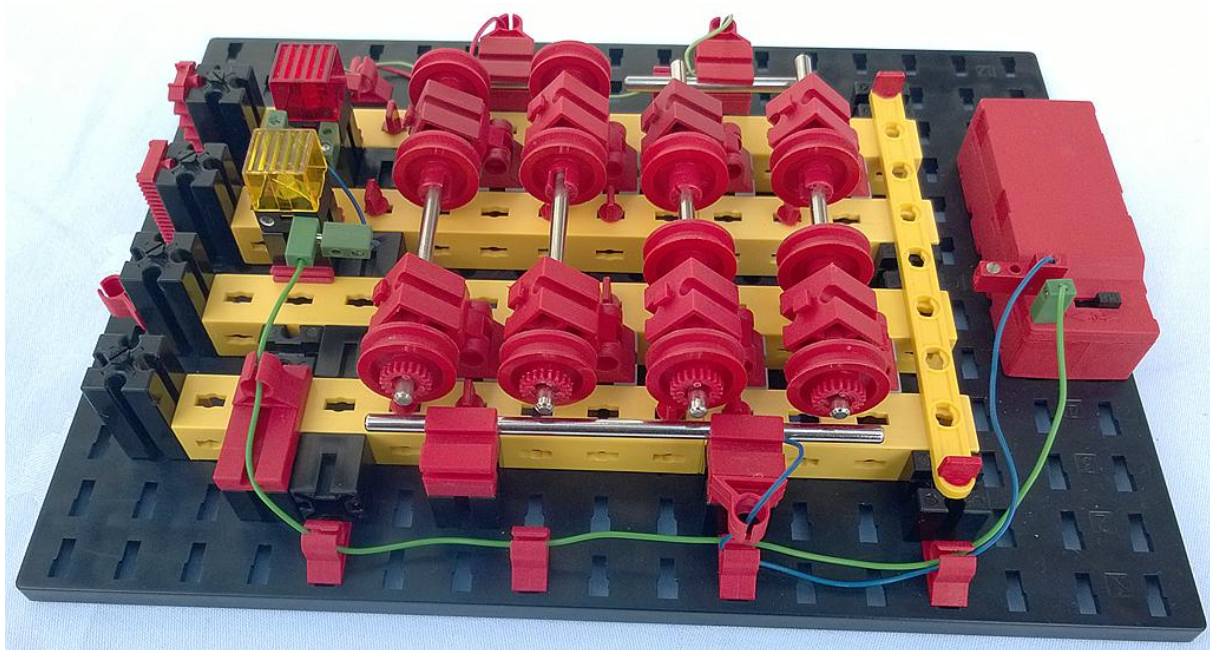


Abb. 10: Das Modell von rechts

(Wolf frisst Schaf), die hintere zur gelben (Schaf frisst Kohlkopf).

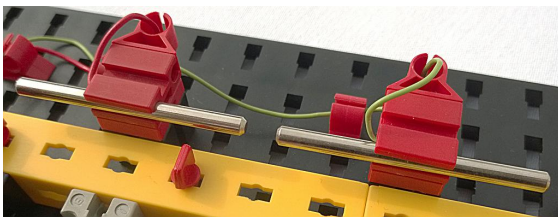


Abb. 11: Die beiden Stromabnehmer links

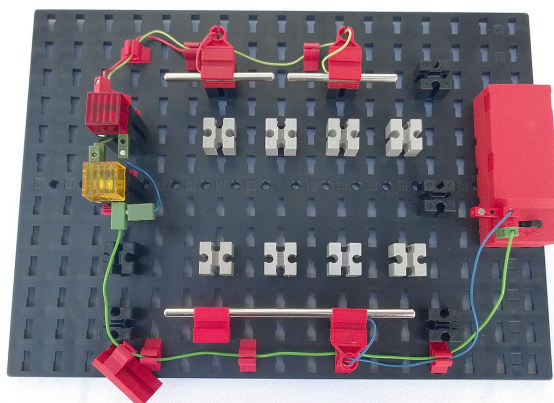


Abb. 12: Alles, was direkt mit der Bauplatte verbunden ist

## Zum Bau des Modells

Alles beginnt mit einigen BS15 auf einer Bauplatte 500 (Abb. 12).

Die Verkabelung nimmt ihr zweckmäßigerweise erst gegen Ende vor. Die beiden Lampen sitzen auf BS30, die außerdem Federnocken zum Halten der Statikträger besitzen:

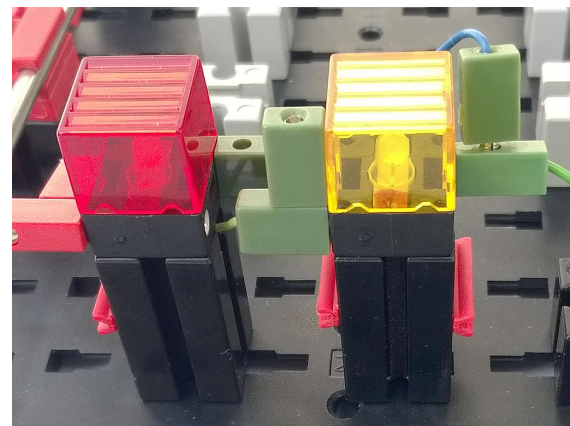


Abb. 13: Lampen und Federnocken gegen Herausheben der Statikträger

Bringt die Federnocken und Lampen auch erst an, nachdem die Statikträger eingesetzt sind. Das sieht dann so aus:

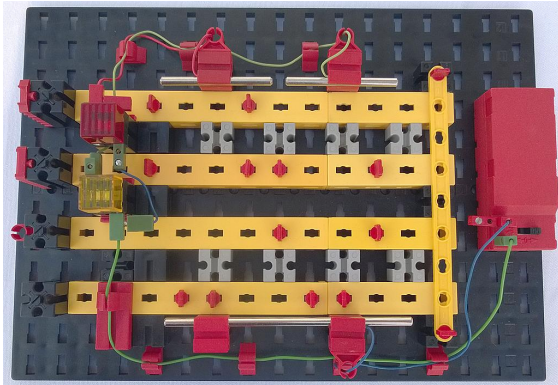


Abb. 15: Die Verschiebestangen sind eingesetzt

Am hinteren Ende (in Abb. 15 rechts) werden sie gegen Herausheben von einer quer drüber gespannten I-Strebe 120 gehindert, vorne durch die Federnocken bei den BS30 der Lampen sowie durch einen [35049 Baustein 5 15x30](#).

Jetzt wird auch die Bedeutung der [32850 S-Riegelsteine 15x15](#) klar: Sie verhindern, dass man die Stangen um mehr als 15 mm

nach vorne oder hinten schieben kann (hinten trägt auch der Batteriekasten dazu bei).

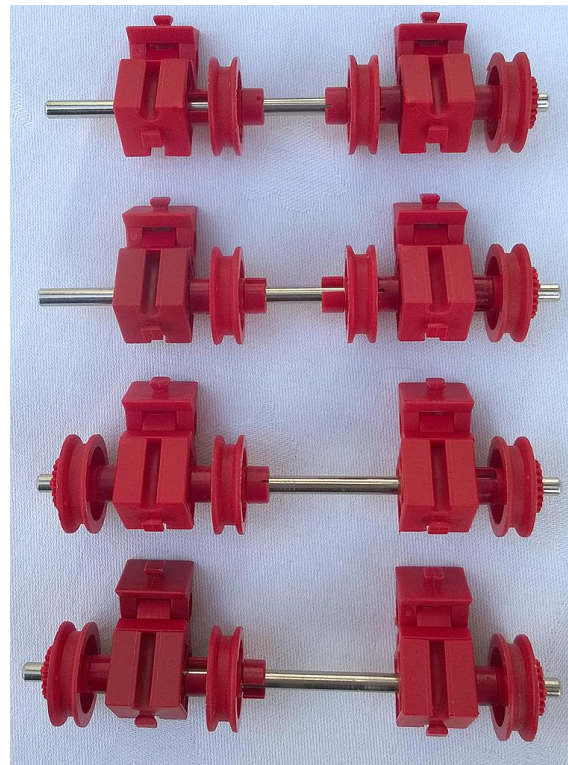


Abb. 16: Die Querachsen mit ihrer gelenkigen Aufhängung und den Rollen.

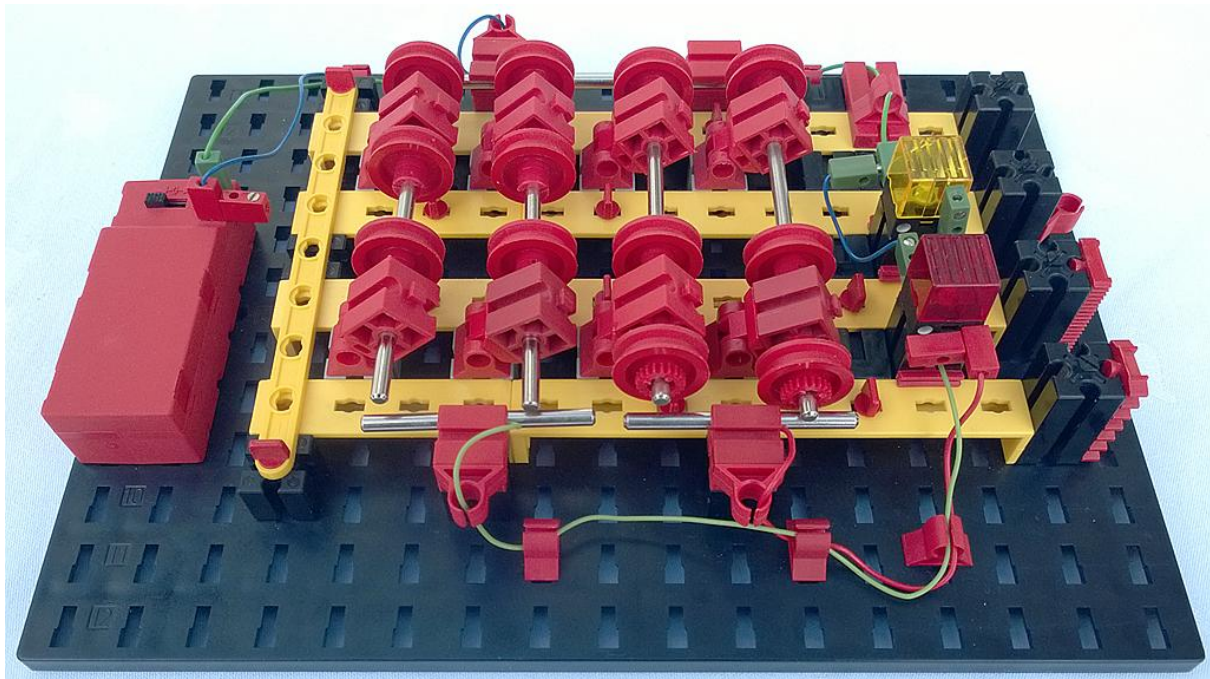


Abb. 14: Das Modell von links



Als nächstes bestückt die vier Querachsen mit Bausteinen 15 mit Bohrung und Gelenkstein, Seilrollen, Klemmrings (innen) und Riegelscheiben (außen). An den Enden können wir uns keine Klemmrings leisten, weil sonst die Achsen den Kontakt nicht mehr herstellen könnten. Verwendet stramm sitzende Riegelscheiben, damit sie nicht abrutschen können. Abb. 16 zeigt die Achsen in derselben Reihenfolge, wie sie im Modell stecken werden.

Schließlich setzt die Querachsen mit ihren Gelenken in die grauen BS15 (siehe Abb. 12 und 15). Die Mechanik ist damit fertig aufgebaut. Nach der Verkabelung können wir unser Modell ausprobieren.

### Jetzt wird's ernst!

Zunächst bringen wir alle vier Stangen nach ganz vorne. Wolf, Schaf, Kohlkopf und Bauer befinden sich also am diesseitigen Ufer, der Bauer passt auf alles auf, niemand frisst etwas – keine der beiden Lampen darf leuchten.

Prüft, was passiert, wenn nur der Bauer alleine auf seinem Floß ans andere Ufer fährt. Schiebt die rechte Stange nach hinten. Beide Warnlampen müssen nun leuchten: Das Schaf könnte den Kohlkopf vertilgen, und der Wolf das Schaf.

Der Bauer darf ja immer höchstens ein Objekt auf dem Floß mitnehmen. Er kann also entweder eine Leerfahrt machen (nichts mitnehmen; wir verschieben nur den Bauern), oder ein Objekt mitnehmen (wir schieben also am Griff des Bauern und an genau einem anderen). Die Regeln sagen, dass wir nicht etwas anderes als den Bauern alleine verschieben dürfen, und auch dass wir nicht etwa zusätzlich zum Bauern zwei oder alle drei anderen Objekte gleichzeitig bewegen dürfen – immer nur den Bauern und höchstens eines.

Probieren wir's: Schiebt einmal den Bauern und den Kohlkopf gleichzeitig (also in einer Floßfahrt) aufs andere Ufer. Sofort leuchtet

die rote Lampe und zeigt an, dass jetzt der Wolf das Schaf fressen würde. So geht's also nicht. Schieben wir Bauern und Wolf, verbleiben Schaf und Kohlkopf alleine am diesseitigen Ufer. Die gelbe Lampe zeigt sofort an, dass jetzt der Kohlkopf vom Schaf verspeist wird. Das war also auch nix.

Bleibt nur, im ersten Zug den Bauern und das Schaf überzusetzen. Am diesseitigen Ufer bleiben jetzt nur der Wolf und der Kohlkopf übrig – der Wolf macht sich aber so gar nichts aus Gemüse.

Damit wir nicht nur wieder in den alten Zustand zurückkehren, muss der Bauer als nächstes eine Leerfahrt machen. Er fährt also alleine zurück und lässt das Schaf am entfernten Ufer. Nun kann er entweder den Wolf oder den Kohlkopf als nächstes mit ans entfernte Ufer nehmen. Danach darf er aber nicht einfach alleine zurückfahren und das letzte Objekt nachholen – sofort würde drüben etwas gefressen. Er muss also das Schaf wieder mit zurück nehmen (das ist der wesentliche Trick!). Dann kann er das andere Objekt (Kohlkopf oder Wolf) übersetzen, sodass nun nur der Wolf und der Kohlkopf drüben sind – das ist ja ungefährlich. Endlich kann der Bauer alleine zurück, das Schaf holen, und hat die Aufgabe gelöst.

Probiert alles aus! Stört euch nicht daran, wenn eine Lampe beim Übersetzen kurz aufflackert, weil man nicht wirklich gleichzeitig schiebt. Wichtig ist, dass in keiner Endposition irgendeine Lampe leuchtet.

Dieses Spiel schreit natürlich geradezu danach, es von Verwandten und Freunden spielen zu lassen. Viel Vergnügen dabei! Wer schafft es auf Anhieb?

### Quellen

- [1] Falk, Stefan: *Motorsteuerungen (Teil 1)*. [ft:pedia 1/2011](#), S. 4.
- [2] Falk, Stefan: *Motorsteuerungen (Teil 3)*. [ft:pedia 3/2011](#), S. 8.

Elektronik

## fischertechnik-Akkulader

Gerhard Birkenstock

*In jedem beweglichen elektronischen Gerät stecken Batterien. Aus ökologischen Gründen sind es heute oft Akkus – und diese müssen wieder aufgeladen werden. An einem fischertechnik-Ladegerät für NiCd- und NiZn-Akkus werden hier die Hintergründe der Ladetechnik erläutert. Ganz nebenbei bauen wir selber einen Tri-State-Ausgang, der neben „an“ und „aus“ auch einen hochohmigen Zustand annehmen kann.*

### Wie funktioniert ein Ladegerät?

Stark vereinfacht lädt ein Akku-Ladegerät einen Akku einfach durch Stromzufuhr auf, bis eine bestimmte Spannung erreicht wird. Ein solches Ladegerät lässt sich mit fischertechnik herstellen. Professionelle Ladegeräte verfügen über raffiniertere Techniken und laden z. B. NiCd-Akkus nicht einfach bis zu einer bestimmten Spannung, sondern bis die Spannung des Akkus bei weiterer Stromzufuhr sinkt anstatt steigt. Das könnte man durch eine entsprechend erweiterte Programmierung ebenfalls nachbilden.

Was wird für die Aufladung eines Akkus gebraucht? Nicht viel:

- ein Netzteil,
- eine Leistungsendstufe,
- einen Analog-Digital-Wandler und
- eine Klemmvorrichtung für die Akkus.

Noch etwas Software, und der Akkulader kann in Betrieb gehen. Und das alles mit fischertechnik-Bauteilen. Gut, bis auf vier Komponenten. Aber dazu gleich mehr.

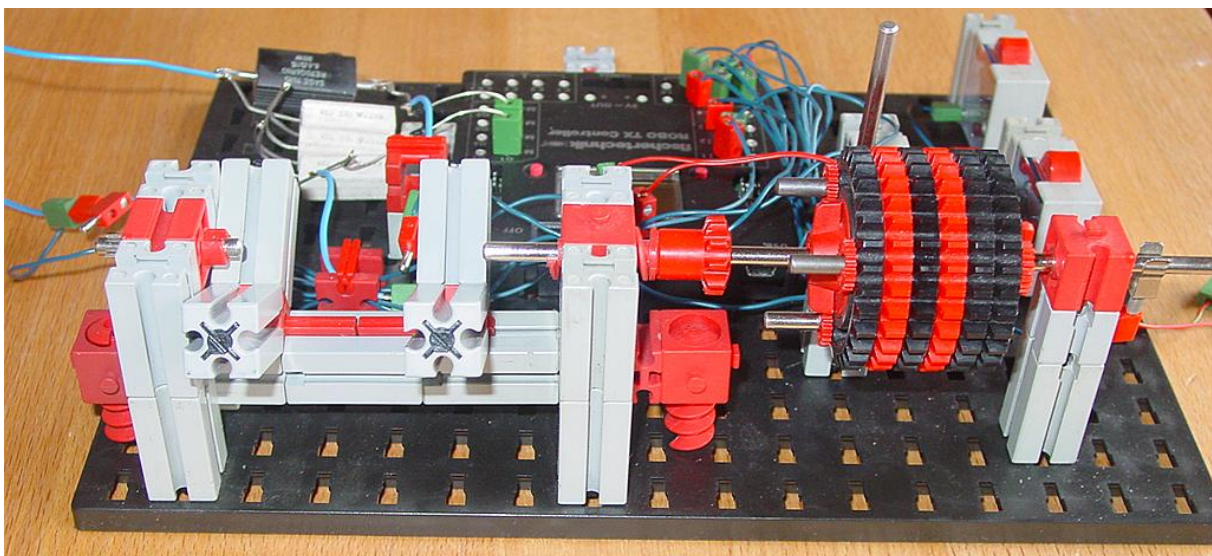


Abb. 1: „Ladeschale“ mit fischertechnik

Für die verschiedenen Akkutypen wird ein anpassbares fischertechnik-Ladegerät konstruiert, mit dem von Lady (N) über Mini (AAAA) bis Mono (D) alle Akku-Größen aufgeladen werden können.

Der zu ladende Akku wird im Modell in die Ladeschale (links vorne in Abb. 1) eingelegt, die über die Schnecken links und rechts davon in der Höhe justiert werden kann. Die Z30 rechts davon dienen zusammen mit der waagrecht liegenden Schnecke zum Anpressen der rechten Kontaktachse. Ein [Federgelenkbaustein](#) (siehe Abb. 9) verhindert, dass sich die Kontaktachse vorzeitig vom Akku löst.

### Programmabruf

Um die unterschiedlichen Ladeprogramme starten zu können, werden drei Taster am TX Controller angeschlossen.

Mit dem Taster  $S_1$  wird das Laden von NiCd-Akkus gestartet. Mit dem Taster  $S_2$  wird das Entladen und Aufladen für NiCd-Akkus gestartet. Drückt man zuerst den Taster  $S_3$  und gleichzeitig  $S_1$  oder  $S_2$  werden die gleichen Ladeprogramme für die NiZn-Akkus gestartet.

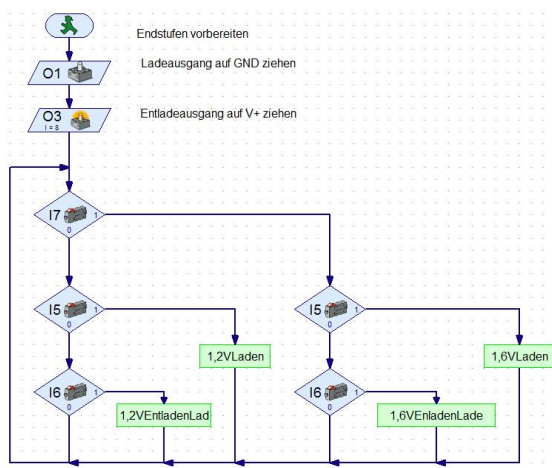


Abb. 2: Programmausschnitt: Tasten abfragen

### Elektronische Schaltung

Es folgt hier eine Übersicht der gesamten Beschaltung des TX Controllers (ROBO):

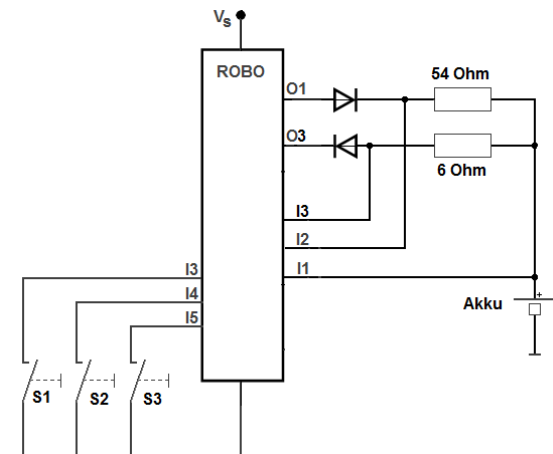


Abb. 3: Übersichtsplan

Die Spannung der Batterie wird mit dem Analog-Digitalwandler an Kanal  $I_1$  eingelesen. In RoboPro wird dazu ein Farb- oder Spurensensor-Element verwendet, weil man damit einen analogen Messwert für bis zu 10 V erhält. In Reihe zur Batterie wird ein Leistungswiderstand mit ca. 54  $\Omega$  geschaltet. Dieser Leistungswiderstand übernimmt gleichzeitig zwei Funktionen: Er arbeitet als Begrenzung und Messwandler des Ladestroms.

Der zweite A/D-Kanal  $I_2$  greift die Spannung auf der anderen Seite des Widerstandes ab. Damit ist man in der Lage den Strom mittels des Ohmschen Gesetzes zu berechnen:

$$I = \frac{U}{R}$$

Für die Spannung muss die Differenz der beiden Messstellen eingesetzt werden. Somit gilt:

$$U = U_2 - U_1$$

Für R wird der Lastwiderstand eingesetzt, in meinem Fall 54  $\Omega$ . Damit ergibt sich:

$$I = \frac{(U_1 - U_2)}{54}$$

Diese Gleichung wird fest in den Programmablauf eingesetzt und stetig mitlaufen gelassen. Die angezeigten Werte sind in mV und mA angegeben.

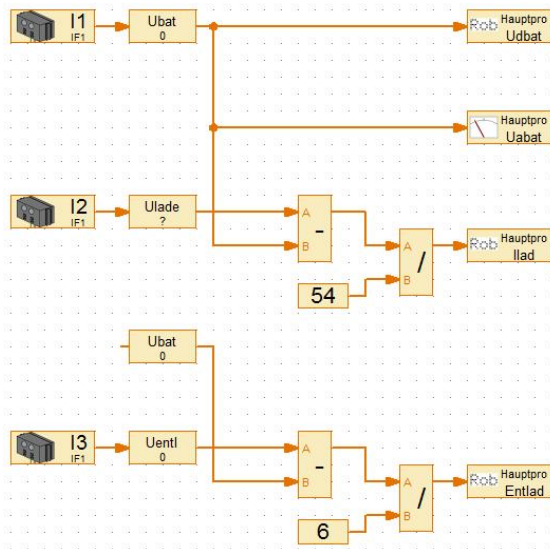


Abb. 4: Berechnung der Ströme

Soll der Akku mit einem höheren Strom geladen werden, so ist der Widerstand kleiner zu wählen. Jedoch Vorsicht! Drei Begrenzungen sind zu beachten.

- Der zu ladende Akku muss den Ladestrom aushalten. Akkus sind mit dem maximal zulässigen Ladestrom beschriftet; wird dieser überschritten, wird der Akku zu heiß und kann sogar platzen. Das hier vorgestellte Ladegerät bleibt mit ca. 150 mA Ladestrom auf der sicheren Seite.
- Der TX Controller darf nicht überlastet werden. Er ist in der Lage bis zu 1 A zu liefern. Das ist mehr als viele Akkus im Ladebetrieb aushalten können.
- Und der Lastwiderstand muss für die entstehende Verlustleistung ausgelegt sein. In meinem Falle fließen 150 mA. Dabei werden am Widerstand fast 2 W in Wärme umgesetzt.

Also Vorsicht beim Nachbauen: Akkus können auch Auslaufen, bersten oder furchtbar heiß werden!

Wird ein geregeltes Netzteil als Spannungsquelle genutzt, kann der Ladestrom sehr präzise eingestellt werden. Einfach die Versorgungsspannung zwischen 7 V und 12 V

regulieren und auf dem Display des TX Controllers den Ladestrom kontrollieren.

Für das Entladen wurde einen zweiter Stromzweig aufgebaut. Der Grund ist recht einfach: Der Ladestrom und der Entladestrom sollen etwa gleich sein. Beim Aufladen wird die Ladeenergie von der 12 V-Versorgungsspannung entnommen. Beim Entladen, wird jedoch der Ausgang des TX Controllers gegen Masse gelegt. Somit ist der Akku die treibende Spannung.

Und diese ist nur 1,4 V. Das Entladen würde über den gleichen Widerstand zehnmal länger dauern als das Aufladen. Daher sind die 6 Ω zum Entladen die richtige Wahl.

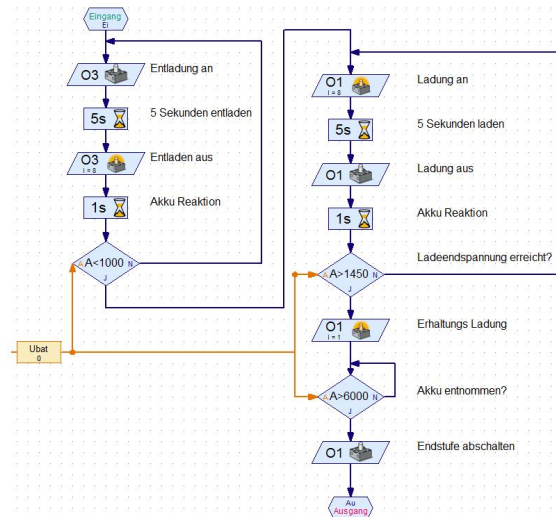


Abb. 5: Software für Entladen / Laden

### Tri-State-Ausgang

An dieser Stelle ist nun das Geheimnis mit den beiden Dioden zu erklären. Hierzu müssen wir uns ein Detail der Endstufe des TX Controllers ansehen. Die folgende Abb. 6 zeigt zwei Halbbrücken der Ausgänge und die Ladeschaltung mit den beiden Dioden.

Die Endstufen des TX-Controller-Bausteins sind so beschaltet, dass der gegen GND liegende Transistor stetig durchgeschaltet ist. Hierdurch vereinfacht sich die Steuerung für die Polwendung von Motoren. Man braucht nur einen der beiden Anschlüsse elektronisch anzusteuern, um den Motor zu

versorgen. Die andere Seite ist automatisch immer mit GND verbunden.

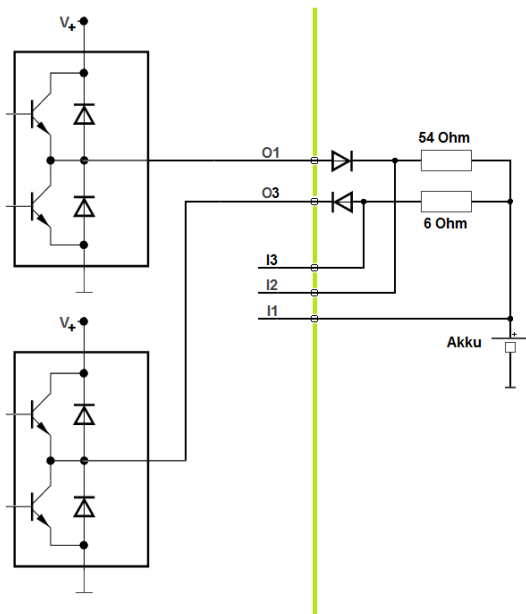


Abb. 6: Schaltung der Endstufentransistoren

Leider kennt dadurch die Endstufe nur zwei Zustände: Mit + verbunden oder mit -. Einen hochohmigen Zustand (weder nach Positiv noch nach Negativ durchgesteuert, auch Tri-State genannt) gibt es nicht. Wird die Batterie nur an einen Anschluss angeschlossen, käme sie nie zur Ruhe. Es ginge nur Aufladen oder Entladen. Ein Ruhezustand kann nicht eingenommen werden.

Nun kommen die beiden Dioden in die Schaltung. Wenn ich den oberen Ladezweig mit GND durchschalte, fließt kein Strom. Der Akku steht mit seiner Spannung gegen die Diode.

Gleichzeitig gebe ich dem unteren Zweig eine positive Spannung. Auch hier ist kein Stromfluss möglich. Die Versorgungsspannung steht gegen die Diode im unteren Zweig.

Es ist Ruhe eingekehrt. Da kein Strom in der Schaltung fließt, wird an allen drei Messstellen  $I_1$ ,  $I_2$  und  $I_3$  die gleiche Spannung angezeigt. Es ist die Akkuspannung.

Möchte man nun Laden oder Entladen, wird nur der Zustand einer der beiden Brücken verändert. Die entsprechende Diode gibt

dann den Weg zum Akku frei. Mit zwei Ausgängen und zwei Dioden erhält man also einen Tri-State-Ausgang.

Selbst wenn eine Fehlprogrammierung passiert und alle Endstufen in Durchlassrichtung geschaltet werden, wird an der Gesamtschaltung nichts zerstört. Der Strom fließt über den ersten Transistor, aus  $O_1$  heraus, über die erste Diode, über den 54  $\Omega$ -Widerstand, über den 6  $\Omega$ -Widerstand, über die zweite Diode, in  $O_3$  hinein und über den GND-Transistor gegen Masse.

### Berechnung der Widerstände

Jetzt können wir auch nachvollziehen, wie sich die Größen der Widerstände berechnen:

- 12 V beträgt die Betriebsspannung.
- 0,5 V fallen am „+“-Transistor ab.
- 0,7 V fallen an einer Diode in Durchlassrichtung ab.
- 1,4 V beträgt die Akkuspannung im Mittel.

Bei 0,15 A gewünschtem Ladestrom ergibt sich der Ladewiderstand damit zu

$$R_{Ladung} = \frac{12V - 0,5V - 0,7V - 1,4V}{0,15A}$$

Das ergibt ca. 65  $\Omega$ . Da ich einen solchen Widerstand nicht in der benötigten Leistungsklasse in meinem Bestand hatte, habe ich ihn durch drei in Serie geschaltete 18  $\Omega$ -Widerstände ersetzt, was also 54  $\Omega$  ergibt.

Analog ergibt sich die Berechnung des Entladewiderstands zu

$$R_{Entladung} = \frac{1,4V - 0,7V - 0,5V}{0,15A}$$

Das ergibt nur ca. 1,3  $\Omega$ , was ich auch nicht parat hatte. Deshalb habe ich tatsächlich einen etwas größeren Widerstand verwendet.

## Erhaltungsladung

In allen Programmen wurde die Erhaltungsladung ans Ende gestellt. Dies ist in Abb. 5 unten rechts zu sehen. Der Ausgang  $O_1$  ist mit der Intensität 1 beaufschlagt.

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, kann die Endstufe nur V+ oder GND liefern. Und das immer voll durchgeschaltet. So ist das auch hier. fischertechnik hat sich der Impulsbreitensteuerung bedient. Dies kann man sehr gut an den beiden folgenden Oszillogrammen sehen (Abb. 7, 8). Es wird die Akkuspannung gegen GND dargestellt.

Die beiden Oszillogramme sind mit unterschiedlichen Akkus gemacht worden. Alle anderen Einstellungen sind gleich geblieben. Die größeren Amplitudensprünge in

Abb. 8 sind durch einen älteren Akku bedingt. Der Innenwiderstand ist höher. Er nimmt die Ladung nicht mehr so gut auf. Dadurch entstehen die größeren Amplituden.

Auf den Abbildungen ist unten rechts die Arbeitsfrequenz zu sehen. Die Endstufen werden mit 210 Hz angesteuert; ein guter Wert, um die ft-Motoren auf langsamer Fahrt in der Drehzahl regeln zu können.

Übrigens wurden die Oszillogramme bei der Endstufeneinstellung vier gemacht. Dies hat sich aber als Erhaltungsladung nicht durchgesetzt. Wird während der Erhaltungsladung der Akku entnommen, wird das Fehlen des Akkus am Spannungsanstieg erkannt (Abb. 5) und die Software beginnt von neuem, die Taster für die Ladeart abzufragen.

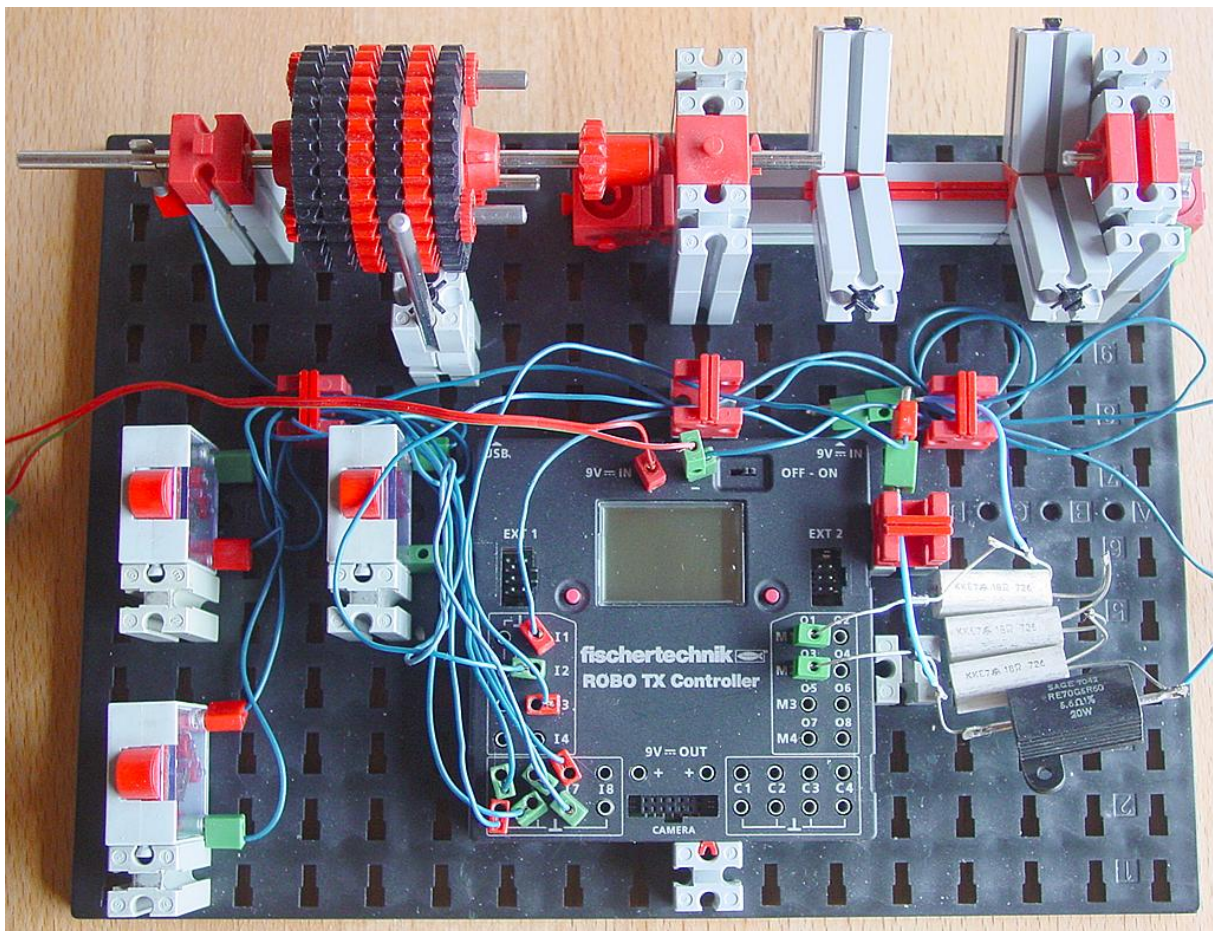


Abb. 9: Gesamter Aufbau

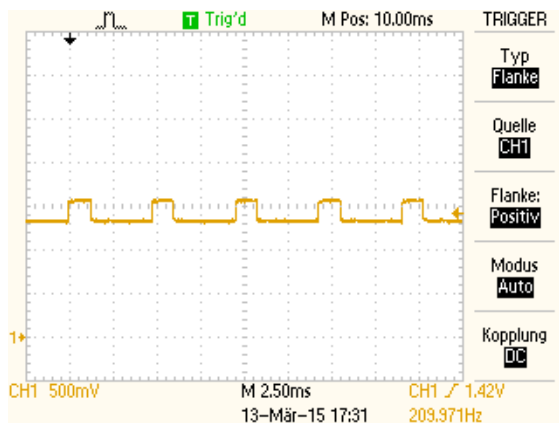


Abb. 7: Guter Akku

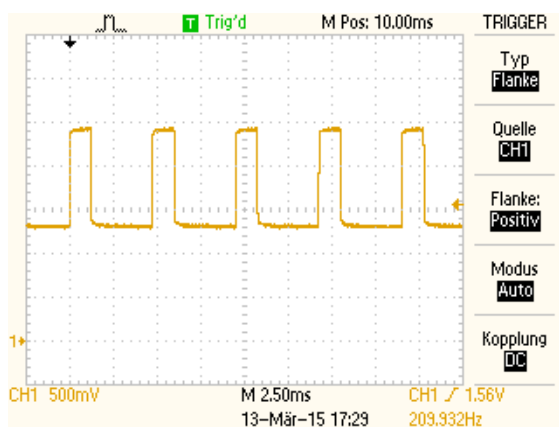


Abb. 8: Schlechter Akku

### Weitere Funktionen

Wird an einem der Eingänge noch ein DCF77-Modul [1, 2] angeschlossen, wird der Berechnung eine präzise Zeitinformation zugeführt. Daraus ließen sich die Lade- und die Entladekapazität (mAh) eines Akkus ermitteln. Der Wirkungsgrad des Akkus wäre damit bestimmt.

Da man aber auch die Spannung des Akkus zur Verfügung hat, wäre ein weiterer Schritt, den Energiehaushalt (mWh) eines Akkus zu messen. Die Software ist somit noch nicht ausgereizt.

### Referenzen

- [1] Dirk Fox, Dirk Ottensmeyer: [Bau einer ft-Funkuhr](#). ft:pedia 3/2012, S. 4-10.
- [2] Gerhard Birkenstock: [Uhrwerk mit Z80 und Z100](#). ft:pedia 4/2014, S. 20-24.
- [3] Stefan Brunner: [Die Ein- und Ausgänge des TX Controllers](#). ft:pedia 4/2012, S. 28-31.

Optik

## Laser-Anwendungen (1): Bewegungsmessung

Andreas und Joachim Gail

*In der ft:pedia 2/2014 wurde gezeigt, wie Laser ins fischertechnik-System integriert werden können. Im folgenden Beitrag zum Thema Bewegungsmessung werden zwei Anwendungen vorgestellt: ein optisches Impulsrad und eine Drehzahlmessung.*

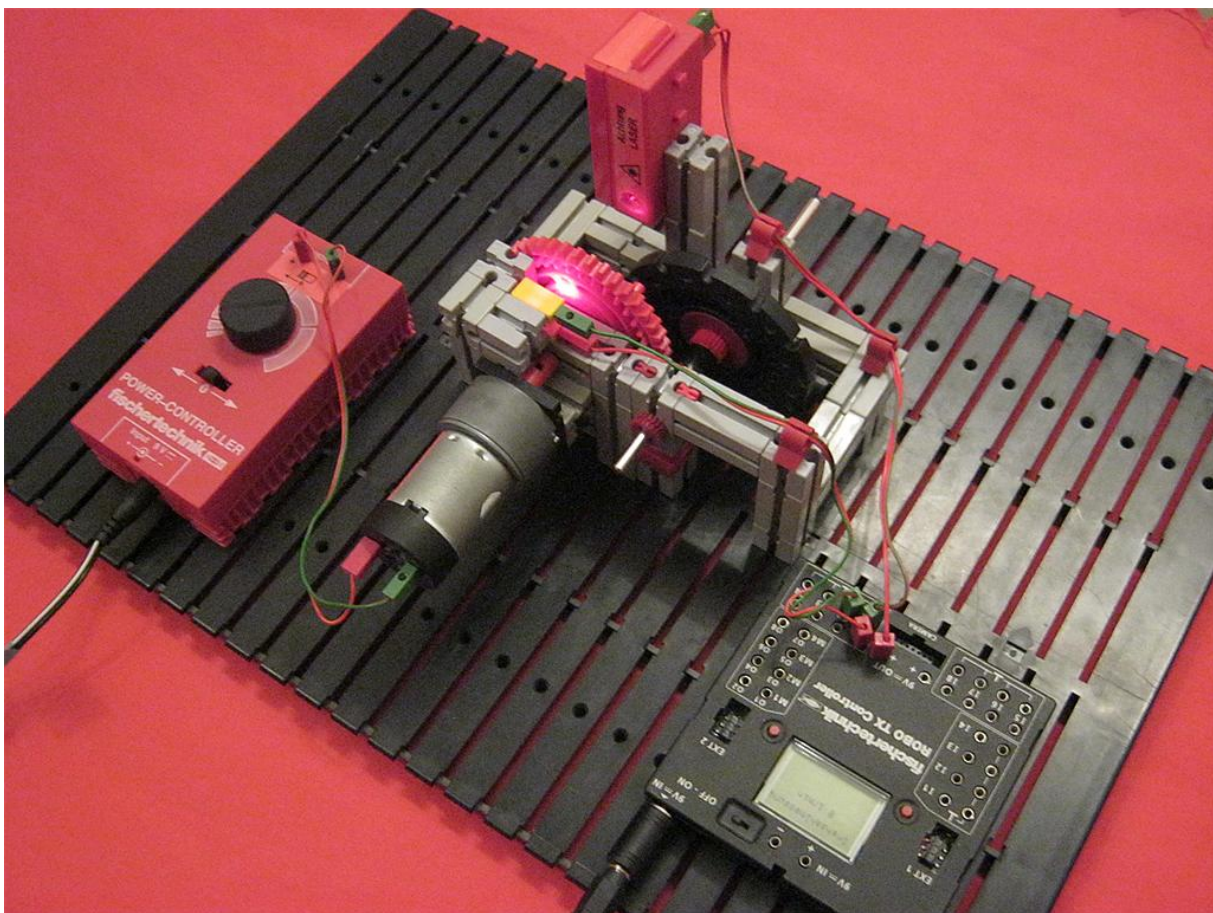


Abb. 1: Gesamtansicht

### Versuchsaufbau

In Abb. 1 und 2 wird der Aufbau gezeigt. Hierbei treibt ein fischertechnik Power-Motor (8:1) {1} ein Zahnrad (Z40) {2} direkt an. Dieses Zahnrad treibt auf einer weiteren Welle ein Ritzel (Z10) {3} an. Der Laserstrahl der Lasereinheit {4} kann prin-

zipiell durch eines der 3 Löcher des Zahnrades {2} hindurchleuchten und dann auf den Fototransistor {5} fallen. Ob der Laserstrahl wirklich auf den Fototransistor {5} fällt, ist abhängig von der tatsächlichen Positionierung des Zahnrades {2}. So beeinflusst die fortschreitende Drehung des Zahnrades {2}, ob der Laserstrahl auf den Fototransistor fällt oder nicht. Hieraus kann



dann abgeleitet werden, ob es zur Drehung gekommen ist, wie weit und wie schnell sich das Zahnrad gedreht hat. Der gezeigte Aufbau ist für den vollen Drehzahlbereich des Power-Motors geeignet (Nennzahl 725min<sup>-1</sup>), d. h. demnach 2.900 Umdrehungen pro Minute am Ritzel {3}. Alternativ zum Fototransistor {5} kann auch ein klassischer Fotowiderstand verwendet werden, dieser ist jedoch wesentlich langsamer.

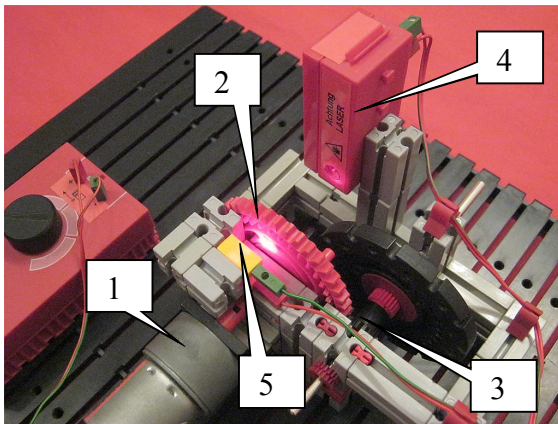


Abb. 2: Detailansicht Lichtschranke per Laser

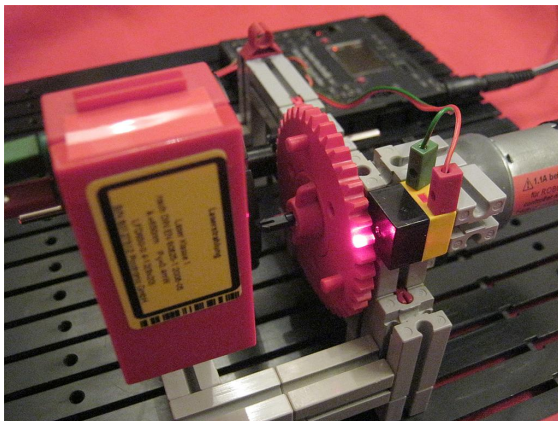


Abb. 3: Bewegungsmessung mit hoher Auflösung

### Optisches Impulsrad

Bei genauer Justage und unter Verwendung einer Störlichtkappe mit einer kleinen Bohrung ist es gemäß Abb. 3 ebenfalls möglich, die Zähne eines Zahnrades zur Bewegungsmessung einzusetzen. Dadurch sinkt zwar die maximal messbare Drehzahl, man erreicht jedoch eine entsprechend höhere Auflösung. Auf diese Weise könnte mit

dem oben gezeigten Power-Motor ein eigener Encoder-Motor aufgebaut werden.

Ein Kompromiss zwischen Auflösung und Betriebssicherheit zeigt die Variante gemäß Abb. 4.

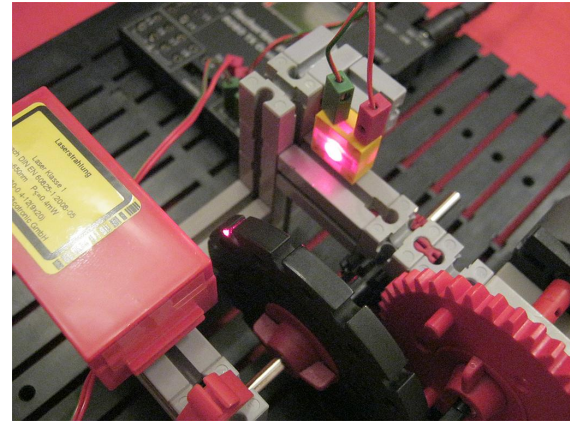


Abb. 4: Bewegungsmessung mit mittlerer Auflösung

Neben den hier gezeigten Beispielen sind natürlich auch alle Arten selbst gelochter Pappscheiben denkbar.

### Drehzahlmessung

Bei der Drehzahlmessung ist es nicht alleine entscheidend, wie weit sich ein Zahnrad oder eine Welle gedreht hat, sondern es kommt noch die Einheit Zeit hinzu. Bei der Drehzahlmessung wird letztendlich angegeben, wie viele Umdrehungen in einer Zeiteinheit stattgefunden haben. Da es sich im vorliegenden Fall um sehr schnelle Einzelereignisse handelt, soll die Messung mithilfe des Robo TX Controllers (RTXC) erfolgen. Hierbei wird der Messaufbau gemäß Abb. 2 verwendet. Letztendlich soll ermittelt werden, wie schnell sich dort das Ritzel {3} dreht. Gemessen wird jedoch am Zahnrad {2} wegen der geringeren Geschwindigkeit an dieser Stelle. Zur rechnerischen Korrektur sind folgende Punkte wichtig:

- a) Das angetriebene Zahnrad {2} hat 40 Zähne, das Ritzel {3} hat 10 Zähne. Demnach dreht sich das Ritzel {3} viermal so schnell.

b) Die Messung erfolgt im Zahnrad {2}, dieses hat 3 Bohrungen, folglich gibt es bei einer Umdrehung 3 Impulse.

### RoboPro-Software zur Drehzahlmessung

Die Programmierung wurde in zwei getrennt, aber gleichzeitig laufende Programmschleifen aufgeteilt.

#### Programmteil 1: Ereigniszählung

Unter Verwendung eines schnellen Zählengangs werden alle Lichtschrankenunterbrechungen gezählt und hierbei der Wert der Variablen *Zaehler* um 1 erhöht.

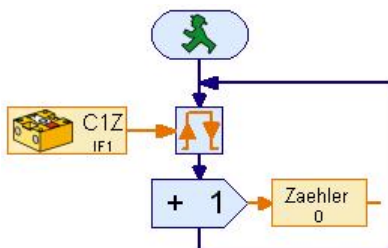


Abb. 5: Programmteil 1: Zählung von Ereignissen über schnellen Zählengang

#### Programmteil 2: Zeitintervallmessung

Die Angabe der Drehzahl ist die Häufigkeit der Umdrehungen einer Welle oder eines Zahnrades innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls. Im vorliegenden Beispiel wurde für die Anzeige des Endergebnisses die Zeiteinheit Minuten (min) verwendet. Die zugehörige zusammengesetzte Einheit für die Drehzahl lautet somit Umdrehungen pro Minute (1/min oder  $\text{min}^{-1}$ ).<sup>1</sup>

Im Programmteil 2 wird dieselbe Variable *Zaehler* verwendet wie im Programmteil 1. Zunächst wird diese auf 0 zurückgesetzt und 2 Sekunden lang gewartet. Während der Wartezeit wird im Programmteil 1 in Abhängigkeit von der Drehzahl weitergezählt. Schließlich wird die Variable *Zaehler* in Programmteil 2 ausgewertet. Bei der

Auswertung finden, unter Nutzung von 4 Faktoren, einige Berechnungen statt. Das Berechnungsergebnis wird dann gemäß Abb. 7 angezeigt. Eine Aktualisierung dieser Anzeige erfolgt alle 2 Sekunden. Die Faktoren haben folgende Bedeutung:

- a) Faktor 2: Die Messung, d. h. Zählung erfolgt 2 Sekunden lang, der Wert von *Zaehler* wird somit durch 2 geteilt, um die Anzahl der Umdrehungen in 1 Sekunde zu erhalten.
- b) Faktor 60: Umrechnung des Messergebnisses von der Umdrehungszahl pro 1 Sekunde auf 1 Minute.
- c) Faktor 4: siehe Kapitel *Drehzahlmessung* Punkt a)

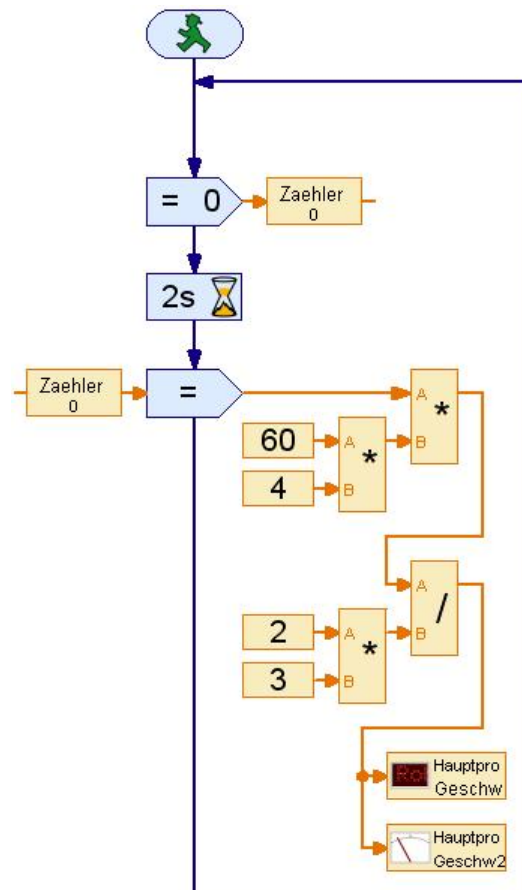


Abb. 6: Programmteil 2: Zeitmessung, Umrechnung und Weiterleitung des Ergebnisses auf 2 Anzeigeelemente

<sup>1</sup> Die älteren Einheiten U/min, UpM oder rpm sollten nicht mehr verwendet werden, weil eine

Anzahl von Umdrehungen eben nur eine Zahl und somit einheitenlos ist.

- d) Faktor 3: siehe Kapitel *Drehzahlmessung* Punkt b)

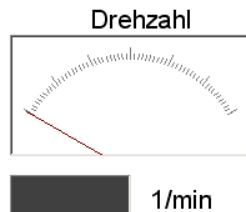


Abb. 7: Anzeigeelemente für das Messergebnis

## Warum Laser?

Als Lichtquelle eine Lampe zu verwenden, ist der klassische Ansatz und klappte auch schon millionenfach. Trotzdem hat der Laser Vorteile:

- a) Punktuelle relativ hohe Lichtintensität ist vorteilhaft, um auch kleine Bewegungsänderungen punktgenau zu erkennen, z. B. die Weiterbewegung eines einzelnen Zahns eines Zahnrades. Auch schnelle Bewegungen können erkannt werden. Letztendlich ist zur Erkennung eine bestimmte Lichtmenge mindestens notwendig, und die kann mittels Laser auf eine kleine Fläche gebracht werden.

- b) Laserlichtquelle und Sensor können sehr weit voneinander entfernt eingebaut werden. Das ist ein Vorteil, wenn am Messpunkt selbst nur wenig Platz zur Verfügung steht.

## Ausblick

Prinzipiell könnte es auch möglich sein, die Drehzahl per Laserstrahl an drehenden Teilen per Reflexion zu erfassen. Dazu könnte ein kleiner Streifen von Aluminiumklebeband auf ein Zahnrad oder eine Nabe aufgeklebt werden. Immer wenn der glänzende Klebestreifen im Bereich des Laserstrahls vorbeikommt, wird dieser zurückgeworfen und von einem Fotowiderstand erfasst.

## Quellen

- [1] Tacke, Andreas: *Spezialteile made by TST (Teil 10): Impulsrad*. [ft:pedia 4/2014](#), S. 10.
- [2] Gail, Andreas: *Einstieg in Experimente mit Lasern*. [ft:pedia 2/2014](#), S. 14.

Tipps &amp; Tricks

## Neue ft-Teile selbst gemacht – 3D-Druck (2): Schleifringe

Harald Steinhaus

*Das Fehlen von Schleifringen im aktuellen Angebot von fischertechnik wird immer wieder bemängelt. Die Schleifringe aus hobby 3 (und em-1/em-2) sind klobig und nur noch gebraucht erhältlich. Der Modellbau bietet wenig und Profi-Schleifringe sind teuer. Selbst mit dem Aufkommen der 3D-Drucker hat sich daran noch nicht viel geändert, denn Schleifringe müssen aus zweierlei Material zusammengesetzt werden, wovon eins elektrisch leitfähig sein muss. Immerhin können derzeitige 3D-Drucker den Kunststoff-Anteil an derlei Konstruktionen beisteuern, daher...*

... wird hier ein Schleifring vorgestellt, der

- sehr kompakt ist
- zum ft-Drehkranz passt
- mehrere Bahnen aufweist (4, 8, 12)
- ohne Lötkolben auskommt
- freien Innendurchgang hat
- trotzdem Taschengeld tauglich bleibt
- für letzteres aber etliches an Eigenarbeit mitbringt.

Der Innendurchgang hat Platz für eine „zweiadrige“ Druckluft-Drehdurchführung. Der Schleifring besteht aus einem Innenkörper mit vier Bahnen, einem zweiteiligen Außenkörper (linke und rechte Hälfte) und zwei Adapterstücken für den ft-Drehkranz. Der Innenkörper hat einen Kranz von „Zinnen“, mit denen er nach unten mit dem Adapter und nach oben mit einem weiteren Innenkörper verbunden wird. Durch Aufstecken mehrerer Grundkörper (1 Innen, 2 Außen) kann der Schleifring auf acht oder 12 Bahnen erweitert werden.

Bei 16 Bahnen wird die Konstruktion etwas fragil, aber mit etwas Klebstoff in den Innenkörpern ginge auch das.

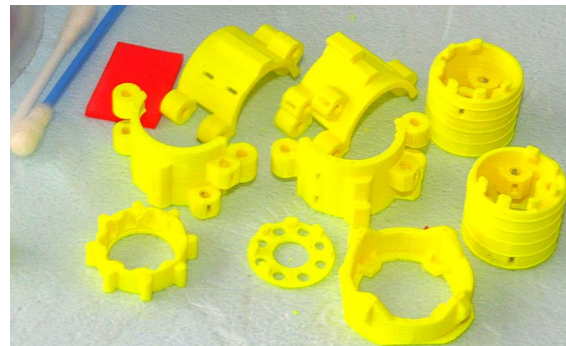


Abb. 1: Die Bestandteile für einen Achtfach-Schleifring

Aufstocken: in der zweiten „Etage“ (mit den Bahnen 5 bis 8) werden die Außenkörper genauso verbunden wie für die erste Etage, aber gegenüber der ersten Etage um 180° gedreht. Die Stecker der ersten Etage zeigen nach oben (vom Drehkranz weg), diejenigen der zweiten Etage nach unten. In den Innenkörpern zeigen alle Stecker nach unten, der Innenkörper in Etage 2 ist um 45° gegen den ersten gedreht.

Der Haken an der Sache macht den Rest dieses Artikels aus: Ein Element mit acht Bahnen braucht gut ein Wochenende an Arbeit, und dazu etwas mehr Geschick als bei Möbeln eines bestimmten Herstellers.

## Werkzeug/Material

- Alu-Blech

Ist aus einer Lebensmittel-/Kosmetik-Tube gewonnen am stabilsten, muss aber mühsam aufbereitet werden. Selbstklebendes Alu-Band (Baumarkt) hat den Nachteil der Klebeschicht, die das Einfädeln ziemlich erschwert. Als Notlösung tut es das Blech, mit dem bei besseren Weinen der Korken umgeben ist. Letzteres ist aber deutlich empfindlicher.

- Schleifpapier, um das Alu-Blech blank zu bekommen
- Schere/Messer und Lineal, um das Blech in Streifen zu schneiden
- Moosgummi, alternativ: weicher Silikon Schlauch (P-Schlauch ist zu hart).
- Pinzette, Nadel: Die Nadel dient zum Aufweiten der beiden Alu-Streifen, um einen ft-Stecker einstecken zu können.
- Plastikröhrchen 2,5 mm (aus Wattestäbchen zu gewinnen): Sie verbinden die Augen der Außenkörper zu Scharnieren und verbinden die Pakete, wenn man acht oder 12 Bahnen aufbaut.
- Bohrer 2,5 mm: Damit werden die Löcher in den Scharnieren auf Maß gebracht.
- Bohrfutter, entweder „losgelöst“ oder mit Bohrmaschine dran: Damit wird der 2,5 mm-Bohrer bei der Arbeit festgehalten. Die Maschine bitte nicht einschalten, sondern nur von Hand drehen.

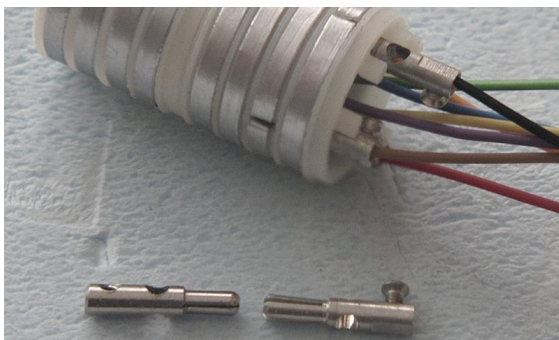


Abb. 2: Stecker alt und neu

- Alte, „ausgeleierte“ ft-Stecker: Neue Stecker sitzen sehr stramm und haben eine scharfe Kante, an der man die zarte Alu-Bahn leicht zerdrückt und verknittert, statt den Stecker hindurch zu fädeln.

## Arbeitsschritte

### Schritt 1: Blech für Schleifbahnen

Im gewöhnlichen Haushalt finden sich zwei Quellen: Weinflaschen und Tomatenmarktuben. Bessere Weine sind mit Kappen aus lackiertem Blech versehen. Obwohl es anders aussieht, ist dieses Blech auf der Innenseite lackiert und die Lackschicht muss entfernt werden.

Besser geeignet ist das Blech von Tomatenmarktuben. Die Tube sollte man nicht leer quetschen, sondern den Bodenfalz abschneiden und dann von unten her mit einem Löffel oder Gummischaber leeren, dann den Gewindestutzen am anderen Ende abtrennen. Man könnte die Tube auch komplett aufwickeln, stößt dann aber auf einen schleimigen Kleber, der einer Verwendung des herausgeförderten Tomatenmarks entgegensteht. Das Alu-Blech ist beidseitig ziemlich dick lackiert. Die Außenseite kann man blank bekommen, indem man die leere Tube auf eine stramm zusammengerollte Zeitung aufschiebt (Anzahl der Schichten ausprobieren), zum Schluss ein angespitztes Rundholz (Bleistift oder größeres) hinein steckt, damit sich ein strammes Paket ergibt, und dann mit Sandpapier den Lack herunter schleift.

Am einfachsten ist es, das Portemonnaie etwas mehr zu belasten und selbstklebendes Alu-Band im Baumarkt zu beschaffen. Das Band von Tesa hat die größte Schichtdicke unter den bisher gefundenen Produkten. Die Klebeschicht stört und wird entschärft, indem man sie gleich nach dem Abziehen von der Rolle reichlich mit Spülmittel einstreicht. Wenn das Band beim Abziehen Riffel bekommt, streicht man es auf einer Glasplatte (z. B. Ceranfeld) mit einem Stück Holz (Kochlöffel) wieder glatt.



Abb. 3: Alu-Bleche von Tuben und Weinflaschen. Links außen wurde ein Tubenfalz unbeachtet gelassen, da hat man nicht lange Freude dran.

Blech in Streifen von 2,5 mm Breite schneiden. Falten, Falze, und doppelt liegende Stellen des Blechs nicht verwenden.



Abb. 4: Die Alu-Streifen in Bearbeitung

### Schritt 2: Bahnen am Innenkörper

Einen Blechstreifen mit der blanken Seite nach außen um den Innenkörper schlingen und die Enden durch den Schlitz nach innen fädeln. Sie müssen auf der Innenseite frei heraus stehen. Nun mit einer Nadel durch das Loch hindurch die beiden Blechstreifen auseinander biegen und damit Platz für den ft-Stecker (mit Kabel, ohne Hülle) schaffen.

Wenn der Stecker sitzt, können die überstehenden Enden des Blechstreifens umgebogen werden. Alle Kabel sollten mindestens 12 cm lang sein, damit man den fertig montierten Schleifring zerlegen kann, ohne die Stecker wieder aufschrauben zu müssen.

Wenn die Stecker einmal drin sind, sollte man sie besser nicht wieder herausnehmen, insbesondere wenn man dünnes, empfindliches Blech verwendet. Und wenn schon,

dann ist es besser, von der Gegenseite aus zu schieben als am Kabel zu ziehen.

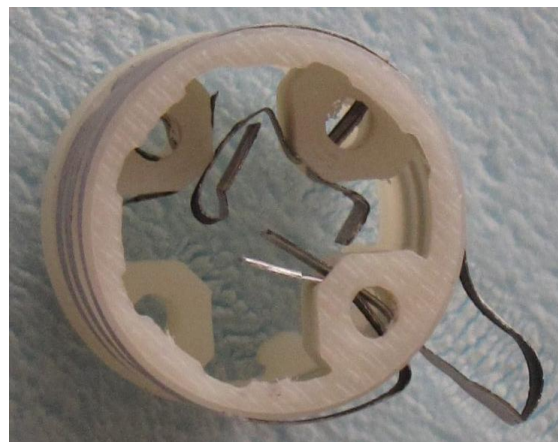


Abb. 5: Arbeitsschritte: einfädeln, Steckerloch aufweiten, dann umbiegen

### Schritt 3: Bahnen am Außenkörper

Die Außenhüllenhälften enthalten je eine Tasche für die „Andruckfeder“ – ein Element, das die beiden Blechstreifen der Außen- und der Innenseite zusammendrückt. Das kann durch Moosgummi (je ein Streifen von 2 x 2 x 9 mm) oder ein Stück Silikonschlauch geschehen. Jede Außenhälfte erhält zwei kurze Blechstreifen, entweder auf den Bahnen mit geraden oder den ungeraden Nummern.

Diese Streifen laufen nicht komplett um den Innenkörper herum, sondern immer nur vom Steckeranschluss über die Andruckfeder bis zu einem Schlitz im Außenkörper.

Am Steckeranschluss wird der Alustreifen nach außen und gleich wieder zurück nach innen gefädelt, dann mittels Nadel Platz für den Stecker geschaffen, dieser eingesteckt und dann die überstehende Schlaufe an der Außenseite platt angedrückt.

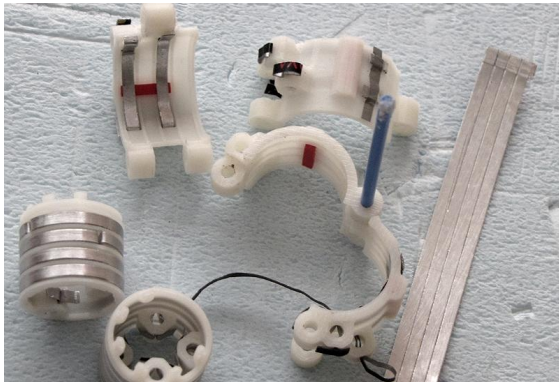


Abb. 6: Achtfach-Schleifring, Teileüberblick

#### Schritt 4: Endmontage

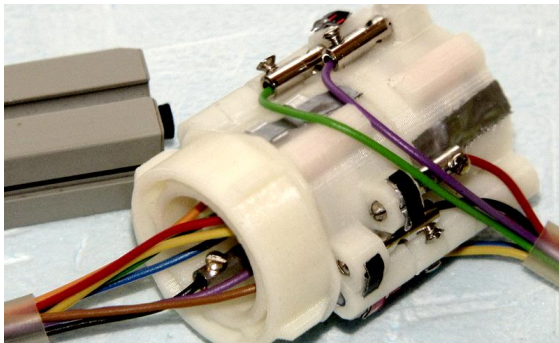


Abb. 7: Fertig zusammgebaut

Nach Montage der Leiterbahnen können die Außenhälften über den Innenkörper gelegt und mittels zweier Plastikröhrchen zusammengefügt werden. Der Adapter passt von der schwarzen Seite her kommend auf die Stege im roten Teil des ft-Drehkranzes. Der Schleifring sitzt lose auf dem Drehkranz auf und muss noch gegen Auseinander-Wackeln, die Außenkörper gegen Verdrehen gegenüber dem schwarzen Teil gesichert werden. Hierzu hat die eine Außenhälfte einen ft-Zapfen.

Oben drauf kommt noch ein Deckel, auf den z. B. eine Codescheibe zur Winkelmessung aufgeklebt werden kann.

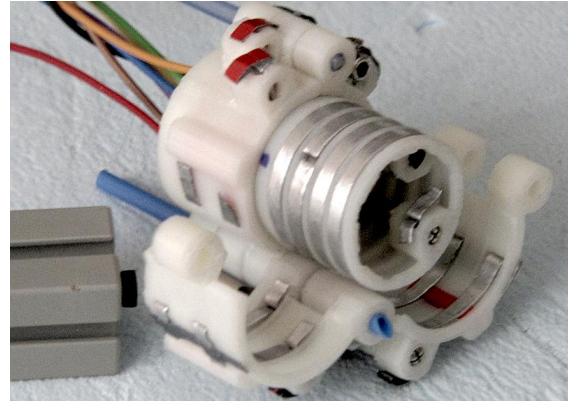
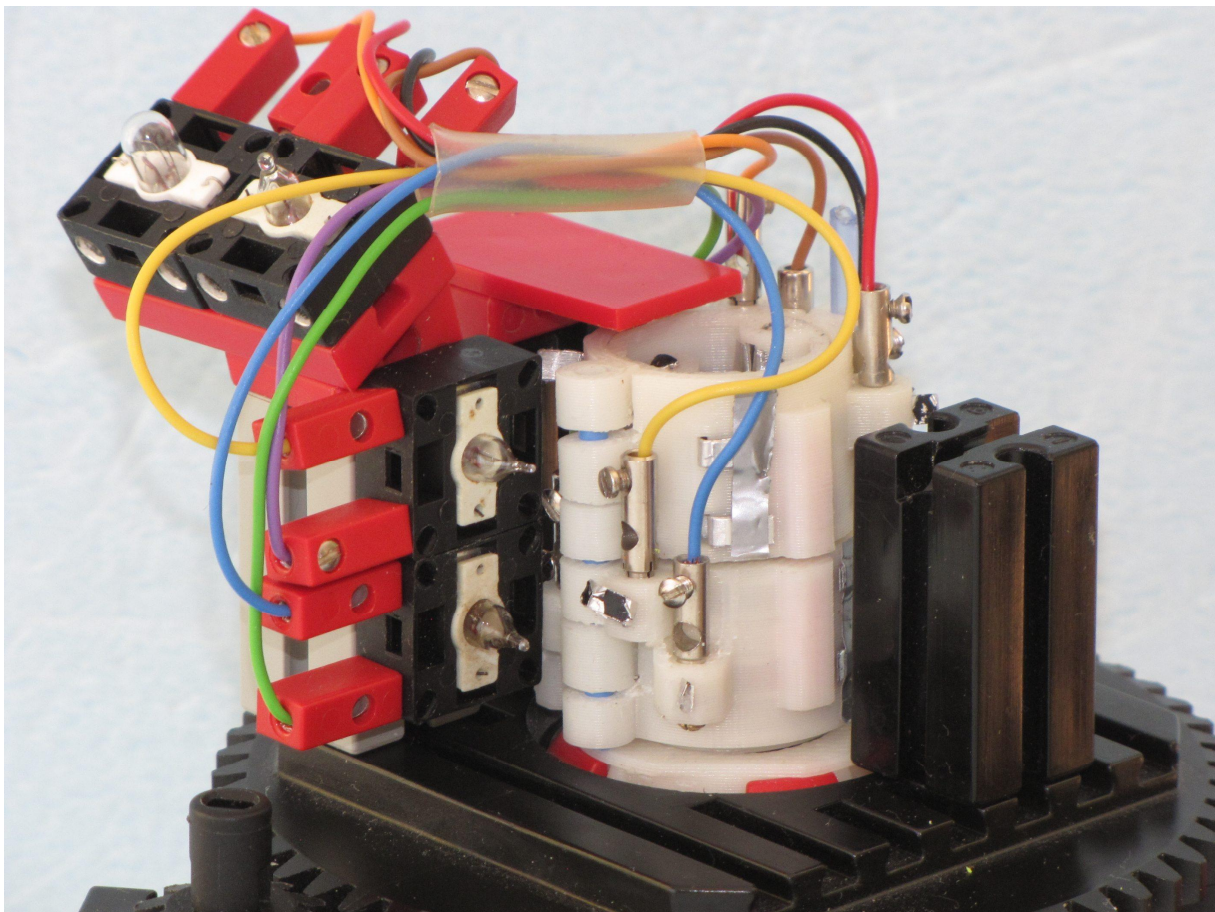


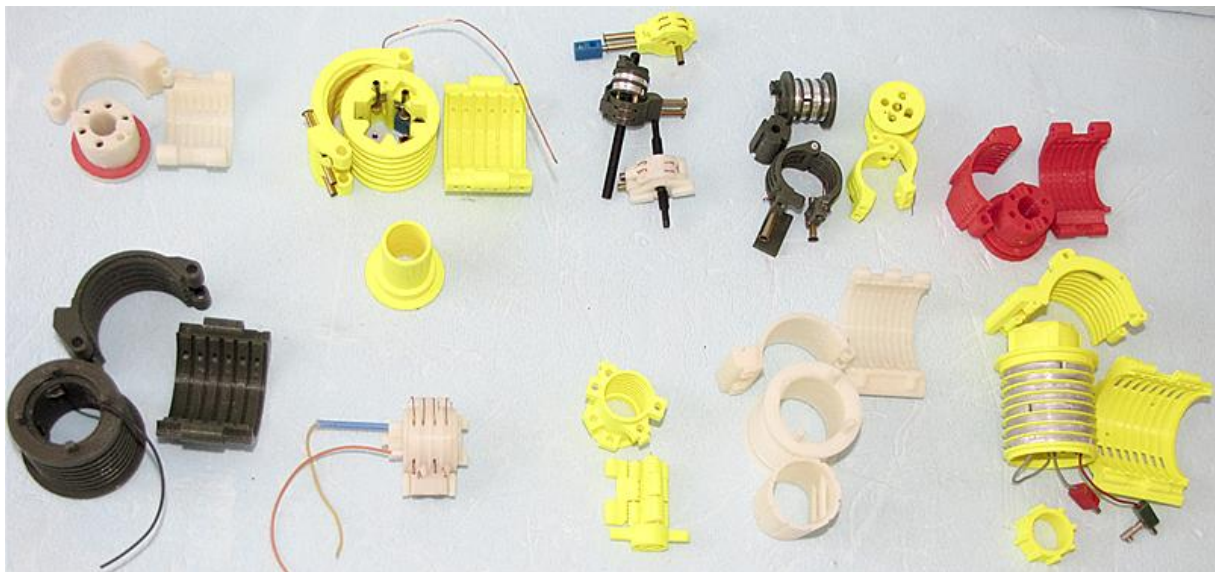
Abb. 8: Jetzt nur noch zuklappen und fertig

Die STL-Datei mit Drucker-Definitionen für einen Schleifring mit acht Bahnen kann auf der [ft:c heruntergeladen](#) werden. Der Schleifring mit vier Bahnen hat ca. 11 cm<sup>3</sup> an Material (davon 5,8 cm<sup>3</sup> Stützmaterial); derjenige mit acht Bahnen hat ca. 20 cm<sup>3</sup> Material (davon 10,7 cm<sup>3</sup> Stützmaterial). Bei fabberhouse ergibt das (ohne Versand und Entstützen) Preise von ca. 5,50 € und 10 €.

Der eine oder andere mag sich nun doch überlegen, ob der Sechs-Bahn-Schleifring ohne Innendurchgang für 17 € aus dem Modellbauhandel (auch bei [fischerfriendsman](#) erhältlich als ‚5138sr‘) nicht eher in Frage kommt. Andererseits: Wer diesen achter oder 12er Schleifring hinbekommt und mit dem LötKolben umgehen kann, für den ist der demnächst kommende achter Schleifring ein Kinderspiel.



*Abb. 9: Fertig montierter Achtfach-Schleifring im Modell*



*Abb. 10: Der Achtfach-Schleifring hat eine lange Ahnengalerie (alle zu aufwendig in der Herstellung)*



Tipps & Tricks

## Neue ft-Teile selbst gemacht – 3D-Druck (3): Innenzahnkranz

Johannes Visser

*Vermutlich hat sich jeder ambitionierte fischertechniker für die Lösung einer Problemstellung schon mal ein Spezialteil gewünscht, das im fischertechnik-Sortiment fehlt. Meistens findet man eine Lösung, wie man das Problem mit Standard-Teilen lösen kann, aber häufig ist die Lösung groß, sperrig und klobig. Ein elegantes Spezialteil wäre schöner. Kein Problem – selber konstruieren und mit einem 3D-Drucker ausdrucken.*

### Vorweg

Harald Steinhaus hat in der [ft:pedia 2/2013](#) bereits das Thema 3D-Druck vorgestellt [1]. Dieser Artikel soll daran anknüpfen und das faszinierende Thema weiter beleuchten.

Seit 2013 hat sich im Bereich 3D-Druckern eine Menge getan. 3D-Druck ist inzwischen bezahlbar geworden. Es gibt mittlerweile viele Dienstleister, die z. B. über einen Webshop anbieten, Teile auszudrucken. Man kann häufig zwischen vielen Arten des Drucks wählen, die alle Vor- und Nachteile haben. Dazu später mehr.

Der Hauptpunkt ist aber der Preis. Was bringt es, sich Teile auszudrucken, deren Preis die Kosten z. B. eines ganzen fischertechnik-Kastens überschreitet?

Im Rahmen der Recherche für diesen Artikel ergab sich eine erhebliche Preisspanne für das gleiche Teil über verschiedene Anbieter. Letztlich hat das Rennen das so genannte „FabLab“ (*fabrication laboratory*) an der RWTH Aachen gemacht, welches man als Privatperson zum Selbstkostenpreis in Anspruch nehmen kann. Aber auch hierzu später mehr.

Die Stabilität der ausgedruckten Teile ist übrigens kein Problem. Die Teile sind erstaunlich belastbar.

### Verfahren des 3D-Drucks

Es gibt inzwischen mehrere Verfahren, 3D-Objekte zu drucken. Hier eine kleine Auswahl:

- Laser-Sintern mit Kunststoff- oder Metallpulver
- Stereolithografie mit Flüssigharz
- Kunststoff-Extrusion
- Kombinationen mit anschließendem Ausguss mit Gips oder gar Silber

#### Laser-Sintern

Beim Sintern mit Pulver wird feines Kunststoff-Pulver oder Metall-Pulver in dünnen Schichten ausgebracht und mit einem Laser aufgeschmolzen, so dass sich die Körnchen verbinden. In weiteren Schritten werden neue Schichten aufgebracht und wieder aufgeschmolzen, dabei verbinden sich die Schichten auch mit darunter liegenden Schichten.

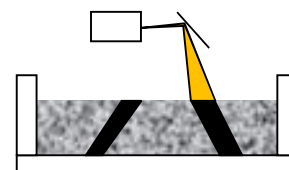


Abb. 1: Laser-Sintern

Ist das Objekt fertig belichtet, kann das übrige Pulver herausgeschüttet werden. Das Pulver dient während des Druckens als Stabilisierung für Teile, die noch keine Verbindung zu anderen Teilen haben und sonst herunterfallen oder umstürzen würden. Allerdings kann man keine geschlossenen Hohlräume erzeugen, da das Pulver aus diesen nicht herausgeschüttet werden kann.

Ein weiterer Nachteil von Kunststoff-Sintern ist, dass die Stabilität begrenzt ist. Nachträgliches Behandeln eines solchen Objekts mit Cyanacrylat (Sekundenkleber) kann die Stabilität erhöhen. Metallpulver-Sintern dagegen kann sehr stabil sein.

Die Schichtdicke hängt im Wesentlichen von der Korngröße des Pulvers ab.

### **Flüssigharz-Stereolithografie**

Bei der Flüssigharz-Stereolithografie ist das Verfahren ähnlich. Statt des Pulvers wird hier flüssiges Harz verwendet. Das Harz härtet unter Belichtung aus. Der Laser oder die Lichtquelle muss nicht von so hoher Leistung sein. Die Schichtdicke hängt von der Viskosität der Flüssigkeit und der Oberflächenspannung ab.

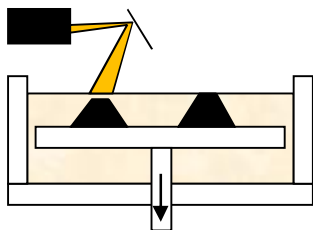


Abb. 2: Stereolithografie mit Flüssigharz

Nachteil auch hier: Hohlräume sind nicht möglich. Außerdem fehlt die stützende Wirkung der Flüssigkeit: Man muss beim Konstruieren Stützelemente vorsehen, die man später wegschneiden muss. Vorteil: Das Objekt ist stabiler als Kunststoff-Sintern.

### **Kunststoff-Extrusion**

Das in letzter Zeit populär werdende Verfahren des Kunststoff-Extrudierens lässt sich mit geringen Kosten realisieren. Auch

die Kosten für die Drucker sind relativ niedrig, so dass sich solche Drucker auch privat anschaffen lassen.

Das Verfahren kann man sich vorstellen wie eine Heißklebepistole: Ein Kunststofffaden wird erhitzt und als „Wurst“ auf einer Trägerplatte abgesetzt. Die Temperatur des Strangs wird so hoch gewählt, dass sich der Strang mit bereits liegenden Strängen verbinden kann (Abb. 3).

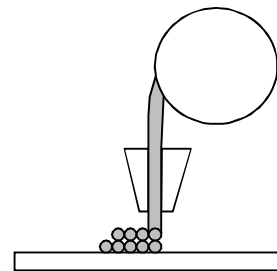


Abb. 3: Kunststoff-Extrusion

Die Auflösung der Objekte hängt von der Dicke des Kunststofffadens ab und kann bei 0,1 mm liegen.

Nachteil: Die Strukturen sind zwar in Richtung der ausgelegten Stränge sehr stabil, aber die Verbindung zwischen den Strängen ist geringer. Je nach Art des zu druckenden Objekts muss daher die Druckrichtung geeignet gewählt werden. Weiterer Nachteil: Je nach Auflösung und Größe der Objekte dauert der Druck mehrere Stunden.

Der Vorteil ist der niedrige Preis.

Auch hier fehlt die stützende Wirkung wie beim Laser-Sintern: Man kann nicht „in die Luft“ drucken. Doch hier gibt es Abhilfe.

### **Mehrfarbig und Hohlräume**

3D-Drucker nach dem Kunststoff-Extrusion-Verfahren können auch mehrfarbig drucken. Es gibt Drucker mit mehreren Köpfen, in die sich verschiedenfarbiges Ausgangsmaterial einspannen lässt.

Auf diese Weise lässt sich auch das Problem mit dem Überbrücken der Hohlräume beheben. Dazu benötigt man mindestens zwei Druckköpfe: Einer der Köpfe druckt das echte Material, der zweite ein Stützmaterial.

Mit dem Stützmaterial werden während des Drucks die Hohlräume ausgefüllt. Das Stützmaterial kann später mit Hilfe von Lauge aufgelöst und aus dem Objekt herausgeschwemmt werden.

Dieses Verfahren ist das zu bevorzugende Verfahren, da es günstig ist und komplexe Strukturen herstellen kann.

### **Materialverbrauch und Preis**

Bei der Kunststoff-Extrusion haben die Menge des Materials und die Form erheblichen Einfluss auf den Preis. Das Grundmaterial bringt einen Mengenpreis mit sich.

Außerdem erhöht sich die Dauer des Drucks mit der Größe der Objekte. Damit ist es günstig, Objekte zu konstruieren, die mit wenig Material auskommen. Diese besitzen auch den Vorteil geringeren Gewichts.

Den Preis des Drucks kann man sich bei den 3D-Dienstleistern häufig direkt online bei der Bestellung berechnen lassen, wenn man die Objekt-Daten hochgeladen hat.

Weiterhin bieten die Werkzeuge in den Web-Shops häufig den Dienst der Reparatur des STL-Files an. STL-Exporte von 3D-Programmen sind häufig fehlerbehaftet (Oberflächen nicht geschlossen etc.) [2].

### **Der Anlass**

Die Notwendigkeit für ein Spezialteil ist immer der Wunsch nach einem neuen Modell.



Abb. 4: Kettenkarussell ([www.Oktoberfest.ws](http://www.Oktoberfest.ws))

Der Autor war Sommer 2013 mit seinen Kindern im [Wunderland Kalkar](#). Eine der

Hauptattraktionen ist das Kettenkarussell im Kühlturm des ehemaligen Kernkraftwerks („[Schneller Brüter](#)“, gekühlt mit flüssigem Natrium – Nuklear-Material ist hier nie eingefüllt worden). Ähnliche Karussells findet man auf Volksfesten wie z. B. dem Oktoberfest (Abb. 4).

### **Konstruktion in fischertechnik**

Die Konstruktion bietet einige Herausforderungen. Der Gittermast ist relativ einfach aus Statik zu konstruieren. Dann braucht es aber einen Drehkranz, der die Gondeln um den Turm dreht, der am Turm hochfahren kann. Ganz originalgetreu ist das nicht: Bei den dargestellten Karussells dreht sich der ganze Turm. Das ist aber bei dem Gewicht in fischertechnik nicht ganz einfach.

#### **Drehkranz**

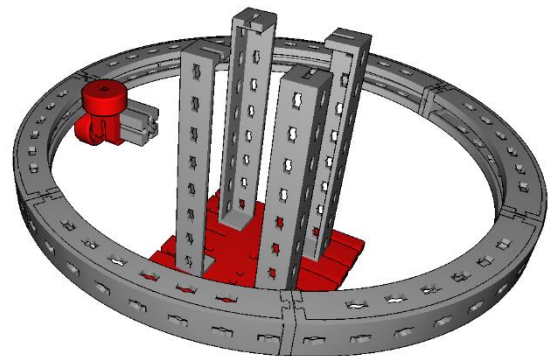


Abb. 5: Der Drehkranz

Für einen Drehkranz, der in der Mitte einen Turm aufnehmen muss, bietet sich der Kreis aus gebogenen Statik-Trägern an (Abb. 5). Hier stößt man aber auf zwei Probleme:

- wie soll man ihn lagern?
- wie kann man ihn antreiben?

Die Lösung mit Standard-Teilen könnte aussehen wie in Abb. 5 angedeutet: Mit den roten Rädern 36581 und den Radachsen 36586. Ein Rad stützt vertikal und eines führt den Ring horizontal. Von der Aufhängung benötigt man mindestens sechs Stück.

Der Antrieb gestaltet sich deutlich schwieriger, da es keine gebogene Zahnstange

gibt. Das Anbringen von Ketten als ‚Zahnstange‘ ist schwierig, da es nicht genug Stellen gibt, wo man die Kette befestigen kann.

### **Die gebogene Zahnstange (Innenzahnkranz)**

Dies war die Geburtsstunde (oder zumindest die Stunde der Planung) eines Spezialteils „gebogene Zahnstange“ (Abb. 6). Für die Zahnstange ergeben sich die ersten Fragestellungen bzgl. der Geometrie von fischertechnik-Zahnradern. Dazu sei auf den ft:pedia-Artikel von Thomas Püttmann [3] hingewiesen, der sich im Detail mit der Form der fischertechnik-Zahnradern und der Zähne beschäftigt. Aus dem Artikel wird übernommen:

- Modul = 1,48
- Teilung 4,64 mm

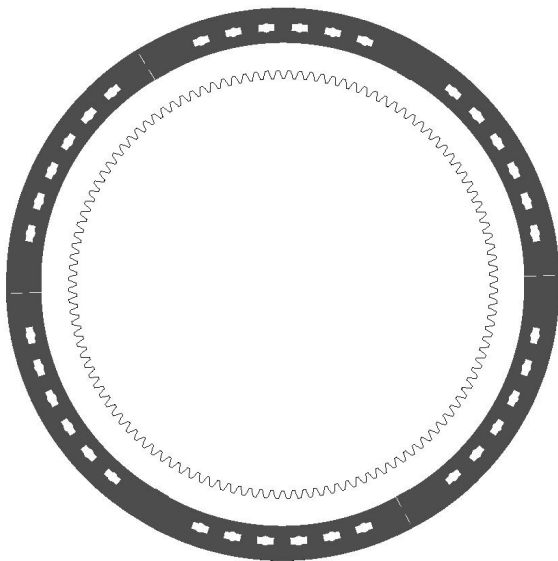


Abb. 6: Der „gebogene Zahnkranz“

### **3D-Konstruktion**

Zur Konstruktion benötigt man ein 3D-Konstruktionsprogramm, das STL-Dateien ausgeben kann (STL = *Surface Tessellation Language*). Dieses Format hat sich als Standard bei 3D-Druckern etabliert. Zu Details des STL-Formats oder zu frei verfügbaren 3D-Konstruktionsprogrammen sei auf einen früheren Artikel des Autors in der ft:pedia [2] hingewiesen.

Im Folgenden wird Turbocad V17 von IMSI verwendet. [Turbocad](#) ist in einer älteren als der aktuellen Version (z. B. V19) zu Preisen von ca. 180 € bei [Pearl](#) erhältlich und für den Preis ausgesprochen leistungsfähig. V17 erhält man sogar schon für 50 €.

Ein weiteres interessantes *Open-Source*-Programm ist [Salome Meca](#), welches primär für Unix/Linux entwickelt worden ist. Es gibt aber auch Windows-Versionen. Salome Meca ist etwas gewöhnungsbedürftig, da man die Erstellung von Bauteilen quasi wie *Source Code* programmieren muss.

Der Zusatz [Code-Aster](#) macht das Programm sogar [Finite Elemente](#) fähig – aber nur in der Linux-Fassung.

Turbocad hat den Vorteil, dass es STL-Dateien einlesen und auch ganze Modelle aus dem [fischertechnik Designer](#) von Michael Samek übernehmen kann.

Ein weiterer Vorteil: Es gibt ein fertiges Werkzeug zum Erzeugen von Stirnradprofilen. Das Werkzeug nimmt als Parameter die geplante Zähnezahl und das Modul (ggf. noch den Eingriffswinkel).

### **Wahl der Zähnezahl (Durchmesser des Zahnkranzes)**

Die Idee der gebogenen Zahnstange ist ein flaches Teil, das mit dem gebogenen 60° Winkelträger verschraubt werden kann.

Der ganze Kranz soll aus sechs Teilen zusammengesetzt werden können. Daher muss die geplante Zähnezahl des ganzen Kreises durch sechs teilbar sein.

Die in Abb. 7 dargestellten möglichen Zahnkränze haben 120, 126, 134, 142, 150, 156 Zähne. Aber nur die Kränze mit 120, 126 und 134 sind klein genug, dass sie in den Ring passen.

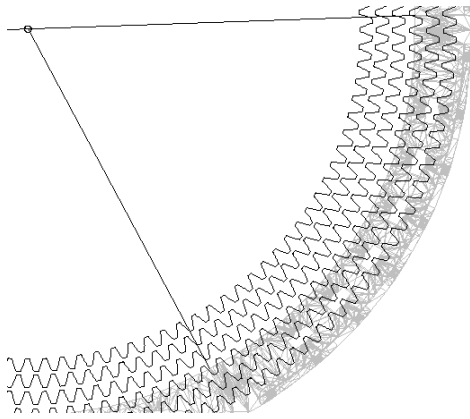


Abb. 7: Mögliche Zahnkranzvarianten

### Querschnittsfläche eines Zahnrades

Die Querschnittsfläche eines Zahnrades kann man am besten an dem Zahnrad mit 40 Zähnen erkennen (31022).

In diesem Zusammenhang erkennt man sehr schnell, dass die 3D Daten aus dem FT-Designer nur grob modelliert sind. Ganz deutlich sichtbar an dem Zahnrad. Die Zähne sind real *angespitzt*, auch fehlen die Zahnkonturen (Evolventen).

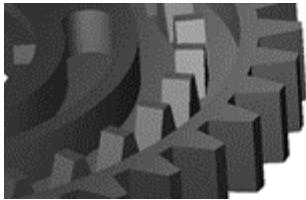


Abb. 8: Z40 im fischertechnik Designer



Abb. 9: Z40 mit Evolventen und Anspitzung

Die Vorgehensweise, Daten aus dem ft-Designer zu übernehmen und als *real* anzusehen, ist keine vernünftige Methode. Man ist gut beraten, den guten alten Messschieber herauszuholen. Auch die Abmessungen von den gebogenen Winkelträgern stimmen nicht mit der Realität überein.

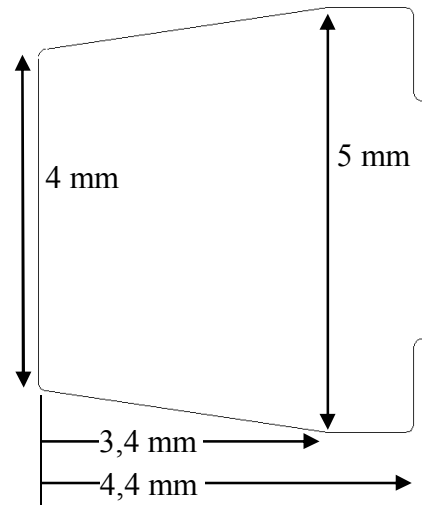
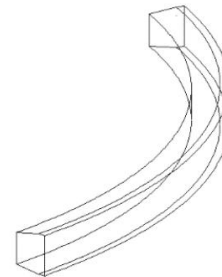


Abb. 10: Zahnmaße

Um einen rotationssymmetrischen Körper zu konstruieren erstellt man sinnvollerweise die Querschnittsfläche und erzeugt daraus einen Rotationskörper um einen gegebenen Mittelpunkt, in diesem Fall um  $60^\circ$  gedreht.

Abb. 11: Rotationskörper ( $60^\circ$ )

Das Zahnrad-Profil-Werkzeug erzeugt die Zähneform als 2D-Kurve, die man zu einem 3D-Objekt umformt und dann eine boolesche Subtraktion mit dem zuvor rotierten Körper macht. Alle Überschneidungen der beiden Körper werden weggeschnitten.

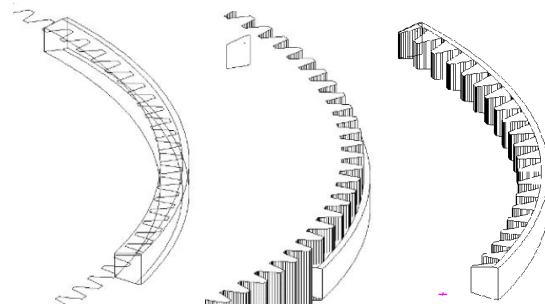


Abb. 12: Entwicklungsschritte des Zahnradprofils

### Befestigung am Ring

Um den Zahnkranz an dem Statik-Ring zu befestigen bietet sich eine Kontur wie die Statik-Streben an. Auch hier gilt: Nachmessen ist besser (Abb. 13).

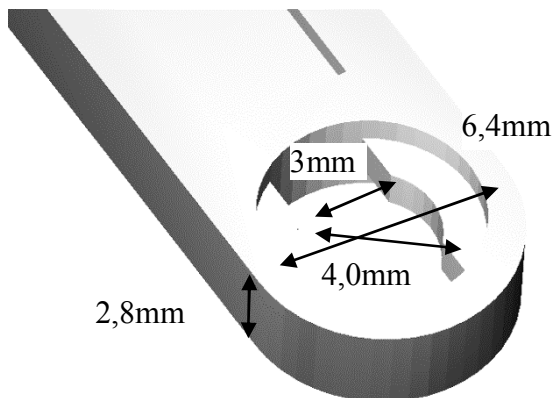


Abb. 13: Bemaßung von Senkung und S-Riegel-Loch in Statik-Strebe

Die Tiefe der Senkung ist 0,8 mm. Die Senkung befindet sich bei den *neuen* Streben (naja, seit den 80er Jahren) auf beiden Seiten. Damit bleibt in der Mitte 1,2 mm Material übrig.

Die einfachste Methode der Befestigung ist eine Platte der Dicke 2,8 mm, die außen am Zahnkranz angesetzt wird. In diesem Fall ist es ein Rechteck, das wieder in eine Rotationsform gedreht wird (Abb. 14).

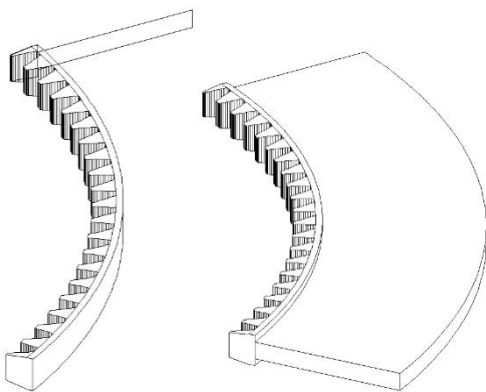


Abb. 14: 2,8 mm Platte zur Befestigung des Zahnkranzes am Statik-Ring

Jetzt müssen die Löcher für die S-Riegel gesetzt werden.

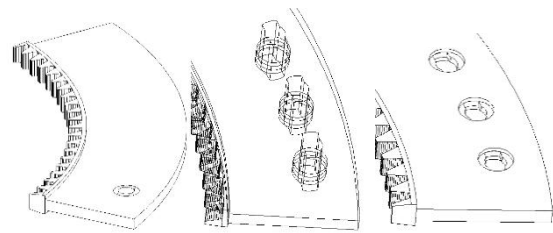


Abb. 15: Löcher für die S-Riegel

Man erzeugt die Grundform des Lochs als 2D-Objekt, extrudiert sie zu 3D-Objekten (gibt ihnen Höhe), kopiert sie entlang eines Kreisbogens alle 7,5° und subtrahiert sie vom Grundkörper (Abb. 15).

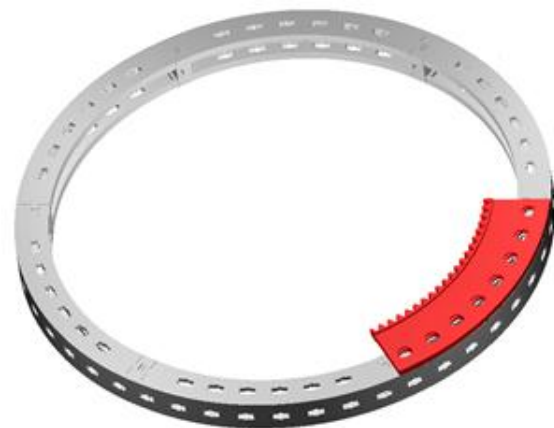


Abb. 16: Gebogene Zahnstange am Statik-Ring

Damit ist unser erstes Problem („wie antreiben?“) gelöst.

### Lagerung

Die Inspiration für die Lösung des zweiten Problems („wie lagern?“) kommt von der Laufschiene 36333.

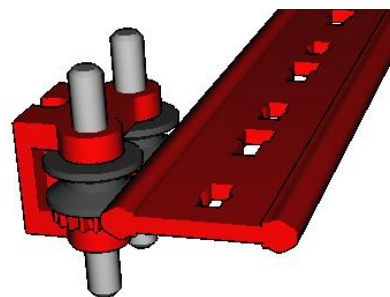


Abb. 17: Laufschiene mit Rollenlager

Versuchen wir nun, solche Laufschiene dem Zahnkranz hinzuzufügen.

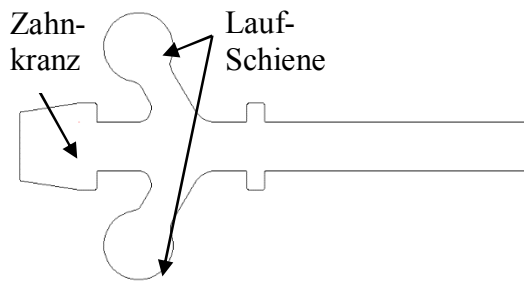


Abb. 18: Zahnkranz mit Laufschiene im Profil

Ebenso wie die gerade Laufschiene erhält die gebogene Schiene zwei Seiten, damit sie von beiden Seiten gefasst werden kann.

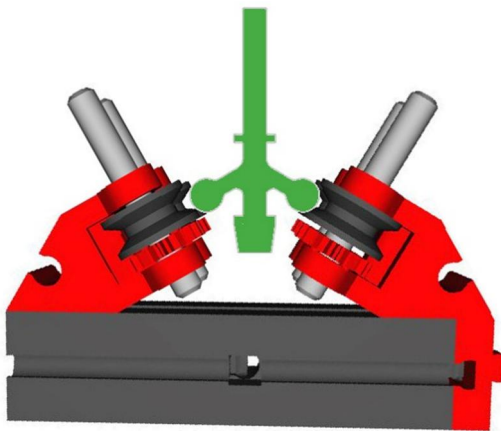


Abb. 19: Lagerung des Zahnkranzes

Jetzt wird auch klar, warum als Zahnkranz-Durchmesser 120 Zähne gewählt wurde, wodurch der Kranz relativ weit nach innen in den Ring ragt: Der Platz wird für die Laufschiene benötigt.

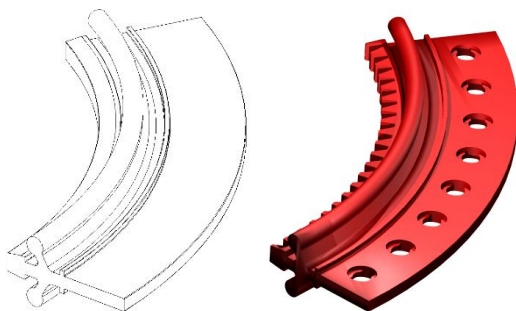


Abb. 20: 3D-Entwurf des Zahnkranzes mit Laufschiene

Jetzt noch die Zähne dran, die S-Riegel-Löcher einsetzen – und fertig ist unser Design. Zumindest fast...

Zur Kontrolle drucken wir das Objekt als 2D-Ansicht auf Papier, schneiden es aus und legen es über echte ft-Teile, um die Maßhaltigkeit zu prüfen. Über die sich daraus ergebenden notwendigen langwierigen Iterationsschritte decken wir hier elegant den Mantel des Schweigens.

### 3D-Druck und Eigenschaften

Mit diesem Entwurf wurden die ersten Versuche gemacht, Preise für 3D-Druck einzuholen. 3D-Druck-Service-Dienstleister gibt es inzwischen relativ viele. Hier ein paar, die bei der Suche schnell auftauchen. Insbesondere die diversen FabLabs an vielen Hochschul-Standorten haben sich als sehr interessant herausgestellt:

- [Trinckle](#)
- [Beta Prototypes](#) (= pcbPool)
- [3D-Activation](#)
- [Sodo 3D Druck](#)
- [Prontotype](#)
- [FabLabs](#)

Durch die Druckkosten kommt man wieder zurück zur Konstruktion: Das bislang konstruierte Teil ist zu massiv – und damit zu teuer.

### Weniger Masse

Im Bereich der S-Riegel-Löcher ist das Material massiver als nötig – sparen wir also etwas Material ein.

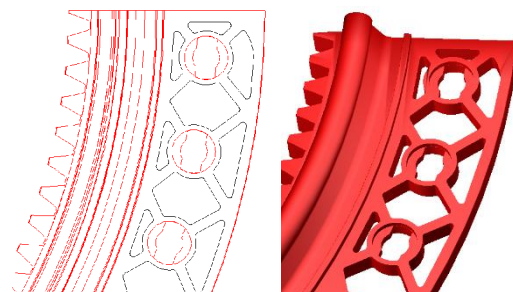


Abb. 21: Materialeinsparungen am Befestigungskranz

Auch im Bereich der Laufschiene ist das Teil noch zu massiv.

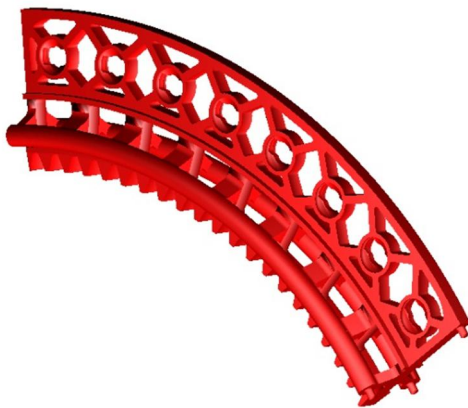


Abb. 22: Materialeinsparung an der Laufschiene

Zum Schluss fügen wir noch Zapfen und Löcher hinzu (Abb. 23), mit deren Hilfe die Laufschiene beim angrenzenden Teil einrasten, damit kein Versatz entsteht.



Abb. 23: Verbindungszapfen

Geschafft! Fertig zur Bestellung.

### Preisbeispiele

Die Produktion des hier dargestellten komplexen filigranen Teils wurde bei verschiedenen Herstellern angefragt. Die in Tabelle 1 angeführten Preise sind als Richtwert zu verstehen. Doch Vorsicht: Die Vergleichbarkeit ist nicht immer gegeben.

Anbieter	Angebot	Preis
Trinkle	Ein Stück + Versand und MwSt.	18 €
SoDo	Sechs Stück inkl. Versand und MwSt.	69 €
3D Activation	Sechs Stück netto ohne Versand	112 €

Anbieter	Angebot	Preis
Prontotype	Grundgebühr 23 € + sechs Stück inkl. MwSt.	114 €
Beta Prototypes	Sechs Stück brutto	97 €
FabLab Aachen	Stückpreis inkl. MwSt.	7 €

Tab. 1: Preisbeispiele

Das FabLab ist besonders attraktiv, da es zum Selbstkostenpreis drückt. Es versteht sich als Labor für „jedermann“. In Aachen wird das Labor vom Institut für Mensch-Maschine-Interaktion betrieben und wird an vier von fünf Tagen vom Institut oder den Studenten benutzt. Jeweils dienstags darf *jedermann* die Maschinen in Anspruch nehmen. Massenproduktionen sind natürlich nicht zulässig (das Drucken von sechs Teilen war schon grenzwertig).

Da das Drucken mehrere Stunden dauert, ist es nicht möglich, den Druck *live* zu verfolgen. Man kann das Teil in der Regel in der folgenden Woche abholen.

Weiterhin versteht sich das Labor als „Open-Source“, wonach die gedruckten Objekte öffentlich gemacht werden müssen (*Gnu Public License*). Als Veröffentlichungsplattform wird das *Universum der Dinge* ([Thingiverse](#)) vorgegeben. Der Zahnkranz hat dort die Artikelnummer [551619](#) und steht zum Download bereit.

### Andruck bei Trinkle

Da man kein Gefühl für die Belastbarkeit und die Auflösung durch Betrachten der Webshops gewinnen kann, wurde zu Testzwecken ein Teil bei Trinkle bestellt.

Das Ergebnis ist sehr gut, die Auflösung sehr fein. Selbst die kleinen Zapfen sind gut ausgeprägt und funktionieren auf Anhieb (Abb. 24). Erst bei sehr naher Betrachtung erkennt man die Dicke des Ausgangsmaterial-Strangs (Abb. 25). Das Objekt ist ausgesprochen stabil und fühlt sich an wie ein echtes fischertechnik-Teil.



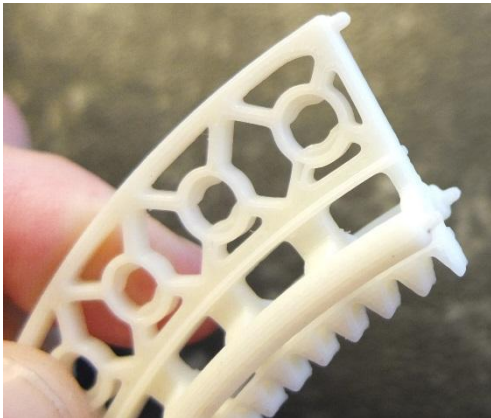


Abb. 24: Prototyp von Trinckle

Originale fischertechnik-Teile sind durch die Verwendung von Polyamid (PA = Nylon) allerdings noch deutlich zäher und robuster.

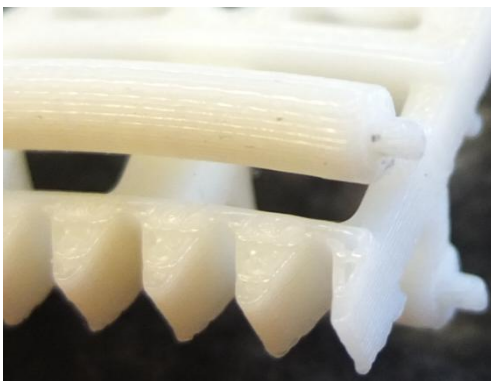


Abb. 25: Detailansicht (Zähne, Laufschiene)

### Teile aus dem FabLab Aachen

Die Teile aus dem FabLab Aachen sind etwas grober, da der Drucker die Auflösung nicht erreicht, die bei Trinckle möglich ist.



Abb. 26: Prototyp aus dem FabLab Aachen

Dennoch ist das Teil passgenau und auf Anhieb funktionsfähig. Auch die Zapfen sind gut ausgebildet. Lediglich in den Löchern auf der Gegenseite befindet sich etwas Grat, der aber einfach entfernt werden kann.

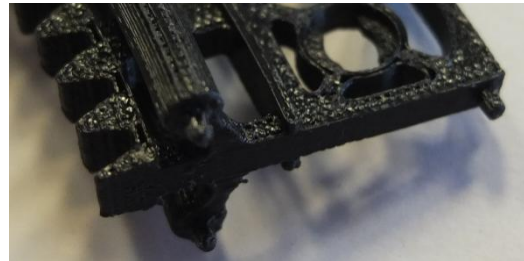


Abb. 27: Detailansicht (Zähne, Laufschiene)

Deutlicher ist hier die Granularität zu erkennen (Abb. 27). Die Auflösung ist mit 0,2 mm etwas grober. Das hat in diesem Fall keinerlei Einfluss auf die Funktionsfähigkeit. Die Wahlmöglichkeit bei der Farbe des Grundmaterials ist im Fablab Aachen eingeschränkt, daher sind die Teile schwarz. Der Preis ist mit 7 € pro Teil unschlagbar.

### Das Modell

Nun zum Praxis-Test am realen Modell.



Abb. 28: Gebogene Zahnstange am Statik-Ring

Der Einbau in den Ring funktioniert problemlos (Abb. 28).

Auf den folgenden Fotos erkennt man die ersten Segmente des Turms (mit Gegengewicht), den Fahrkorb, (eingehängt am Turm), das Antriebsritzel und die Lagerung der Laufschiene.

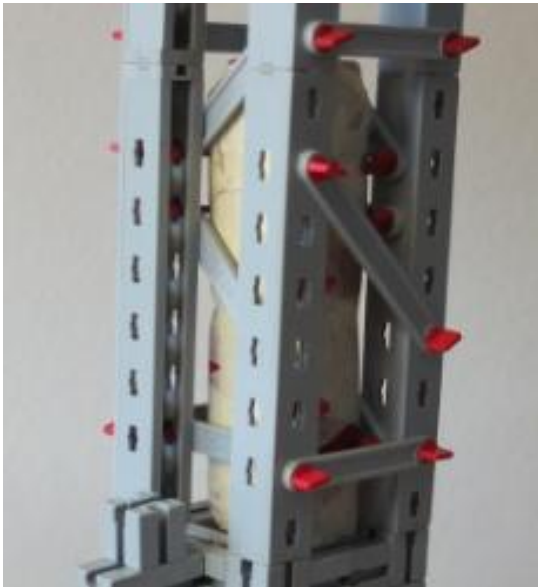


Abb. 29: Turmsegment mit Gegengewicht

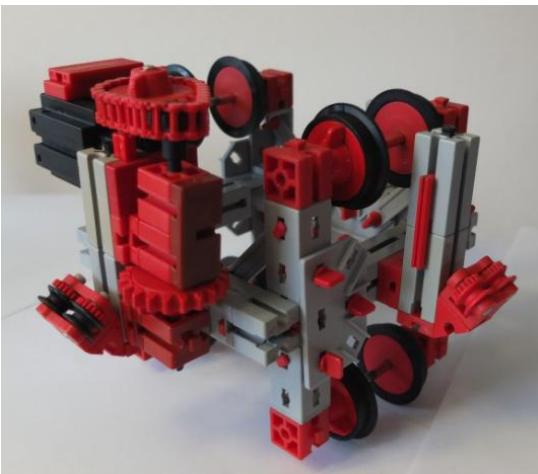


Abb. 30: Fahrkorb mit Antriebsritzel und Rollenböcken (Lagerung)

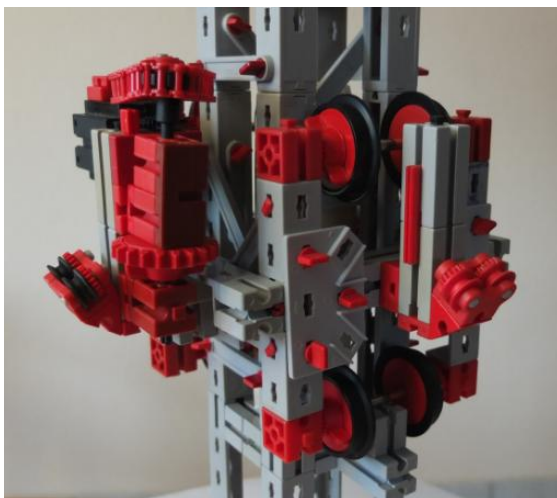


Abb. 31: Eingehängter Fahrkorb

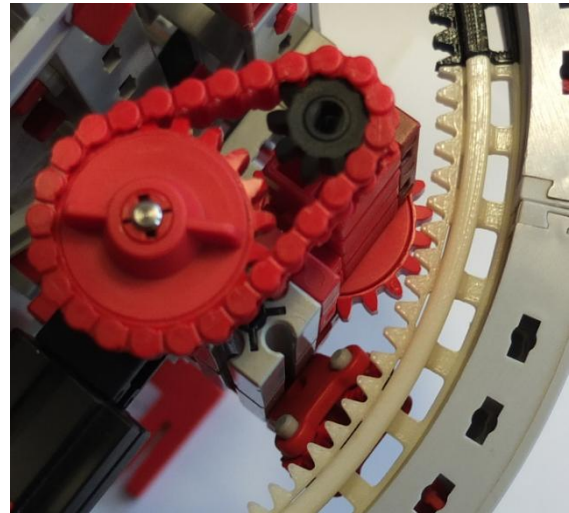


Abb. 32: Eingehängter Ring und Antriebsritzel, Antrieb mit Mini-Motor

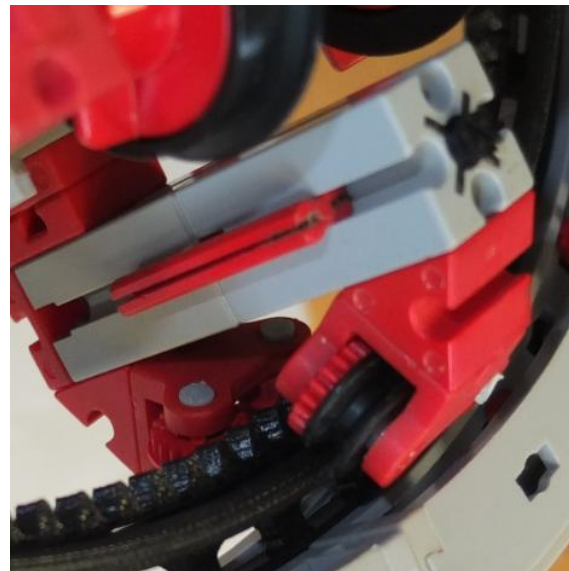


Abb. 33: Rollenböcke mit Führungsrädchen halten die Laufschiene

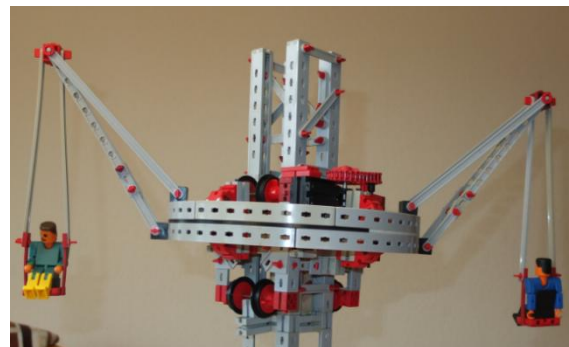


Abb. 34: Statik-Ring mit Gondeln



Abb. 35: Fertiges Karussell

## Fazit

Spezialteile als 3D-Druck sind bezahlbar geworden. Natürlich dürfte es noch etwas günstiger werden. Und man kann sich sogar einen 3D-Drucker nach Hause holen: den [CubePro](#) (zwei Druckköpfe) für 2.700 €, den [Makerbot Replicator x2](#) für 2.930 €.

Und für das vorgestellte Teil gibt es weitere interessante Anwendungsfälle – auf zum nächsten Modell:



*Onewheel des Italieners M. Goventosa*



© 2015 [Kerry McLean](#). Used with permission.

## Referenzen

- [1] Harald Steinhaus: [Neue ft-Teile selbst gemacht: 3D-Druck](#). ft:pedia 2/2013, S. 4-10.
- [2] Johannes Visser: [Erstellung von Bauteilen für den ft-Designer](#). ft:pedia 3/2013, S. 42-53.
- [3] Thomas Püttmann: [Zahnräder und Übersetzungen \(Teil 3\)](#). ft:pedia 1/2012, S. 13-21.

## 3D-Modellentwurf

## Kinematik mit dem fischertechnik-Designer

Joachim Häberlein

Dieser Beitrag zeigt, wie man mit den Kinematik-Funktionen im fischertechnik-Designer einen Pneumatik-Zylinder „zum Leben erwecken“ kann, sodass er tatsächlich aus- und einfährt.

Im fischertechnik-Designer soll ein Pneumatik-Zylinder, der im Designer aus vier Elementen besteht, mit dem Kinematik-Manager virtuell funktionsfähig konstruiert werden (Abb. 1).

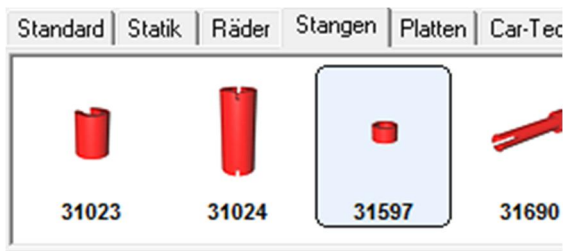


Abb. 2: Abstandsring im Designer

Um die Zylinderstange bewegen zu können, wird ein „Motor“ eingesetzt. Versuche, die

Zylinderstange selbst als Motor zu definieren, haben zu eigenartigem Verhalten geführt. Deshalb fiel die Entscheidung auf einen Abstandsring, den man gut im Anschlussstück verstecken kann (Abb. 2).

Dieser Abstandsring wird als *Motor 1* definiert (Abb. 3 und 5):

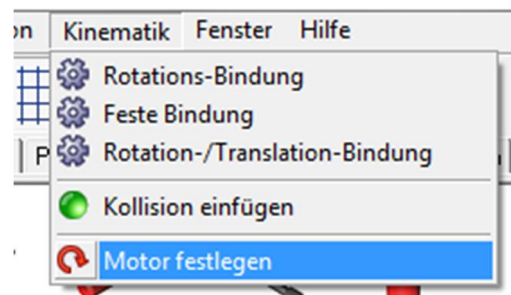


Abb. 3: Der Abstandsring wird zum Motor

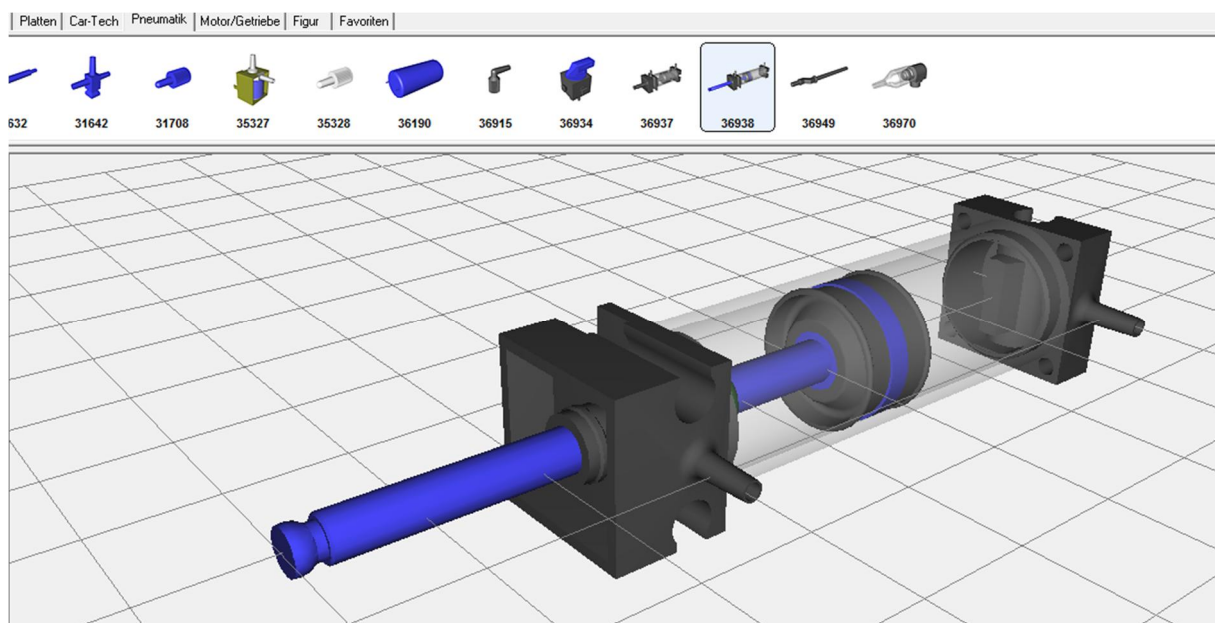


Abb. 1: Pneumatik-Zylinder im Designer

Um die „Rotation-/Translation-Bindung“ zu definieren, ist es einfacher, wenn man die beiden Teile mit dem Koordinaten-Manager aus dem Zylindergehäuse verschiebt (siehe Abb. 4).

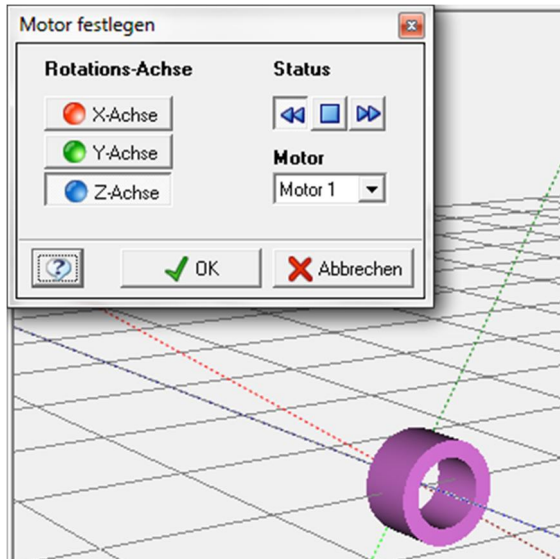


Abb. 5: Der Abstandsring wird zum Motor

Zur Definition der Bindung muss zuerst der Ring (*Motor 1*) ausgewählt werden, dann die Kolbenstange. Die beiden ausgewählten Teile werden nun als „Rotation-/Translation-Bindung“ eingerichtet. Hier werden die Richtung und der Vortrieb festgelegt. Diese Werte können jederzeit geändert werden:

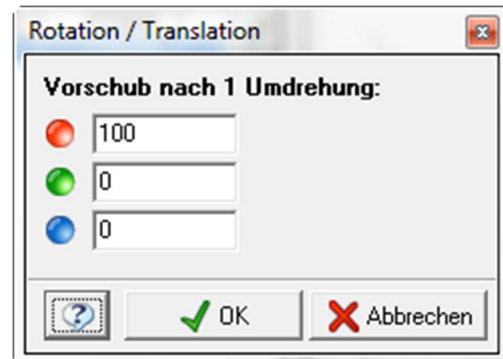


Abb. 6: Einstellung der Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit

Mittels einer „Festen Bindung“ kann jetzt noch die Kolbenstange mit der Kolbenfläche verbunden werden. Das zeigt Abb. 7.

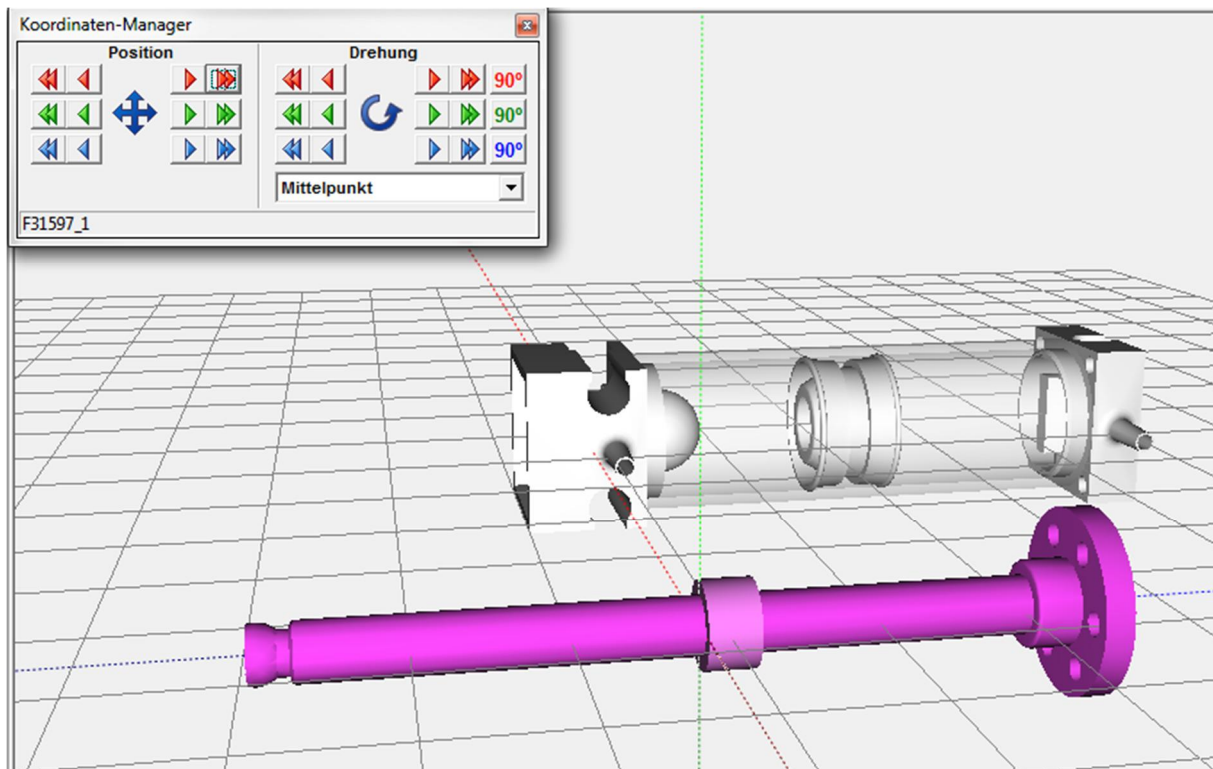


Abb. 4: Pneumatik-Zylinder im Designer

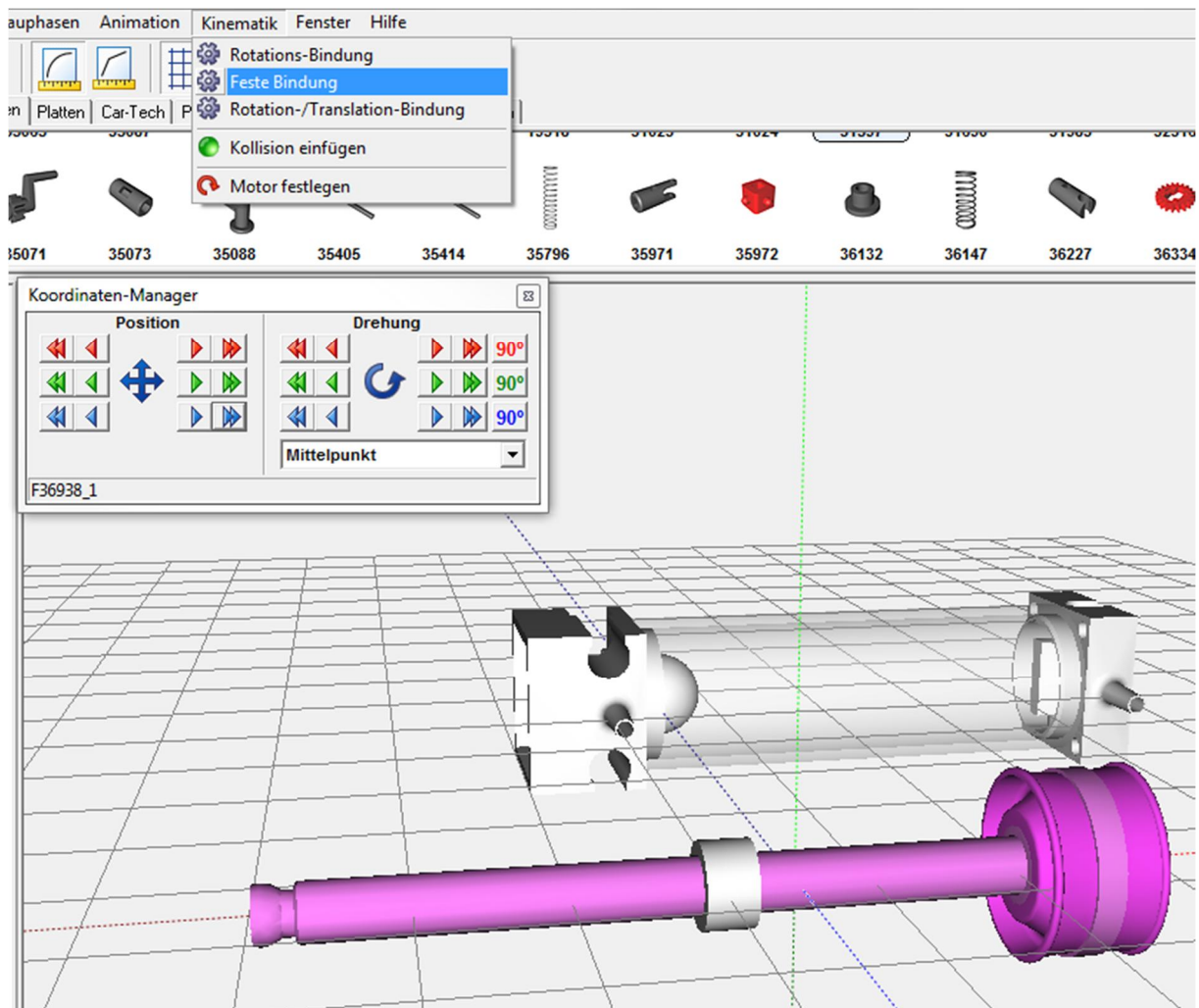


Abb. 7: Einstellung der festen Bindung zwischen Kolbenstange und Kolbenfläche

Jetzt kann die Funktionen über den Befehl *Kinematik Modul starten/beenden* getestet werden:

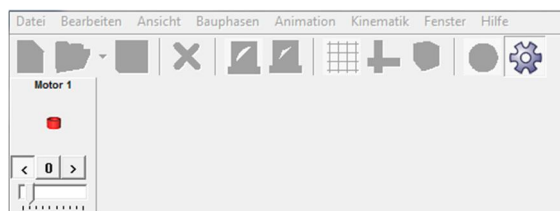


Abb. 8: Test der Funktionsweise

Die Zylinder-Innenteile können nun wieder über den Koordinaten-Manager ins Innere des Zylinders zurück verlegt werden. Damit der Kolben sich automatisch immer hin und her bewegt, kann man „Kollisionskugeln“ einsetzen. Das gewünschte Ergebnis lässt sich aber auch mit nur einer Kugel erzielen,

da eine für beide Endpunkte verwendet werden kann. Diese Kugel wird einfach auf der Kolbenstange platziert:

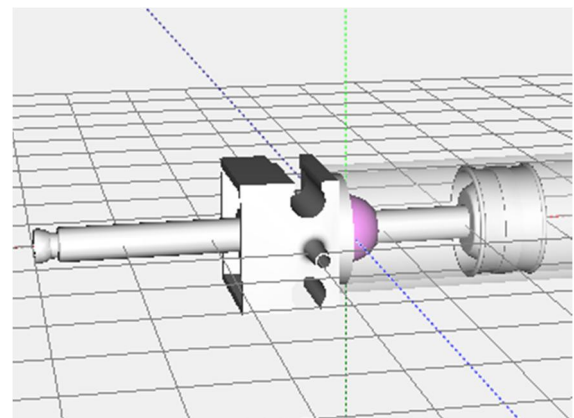


Abb. 9: Anbringen einer Kollisionskugel

Sodann sind beide Elemente – Kolbenstange und Kollisionskugel – zu selektieren. Dann bitte *Kinematik*, *Kollision einfügen* wählen (Abb. 11).

Mittels der *Abstand*-Angabe und der Position der Kollisionskugel definiert man die Umkehrpositionen (Abb. 10).

## Quellen

- [1] Samek, Michael: [fischertechnik Designer](#).
- [2] Häberlein, Joachim: [Zylinder mit Kinematik.ftm](#). Downloadbereich der ftCommunity, 2015

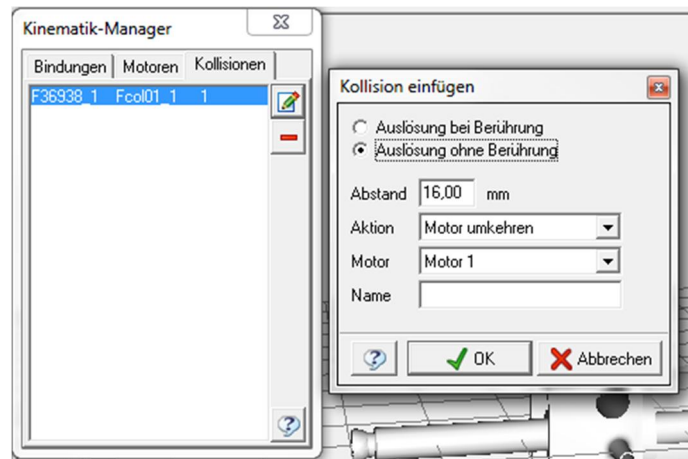


Abb. 10: Automatisches Umkehren

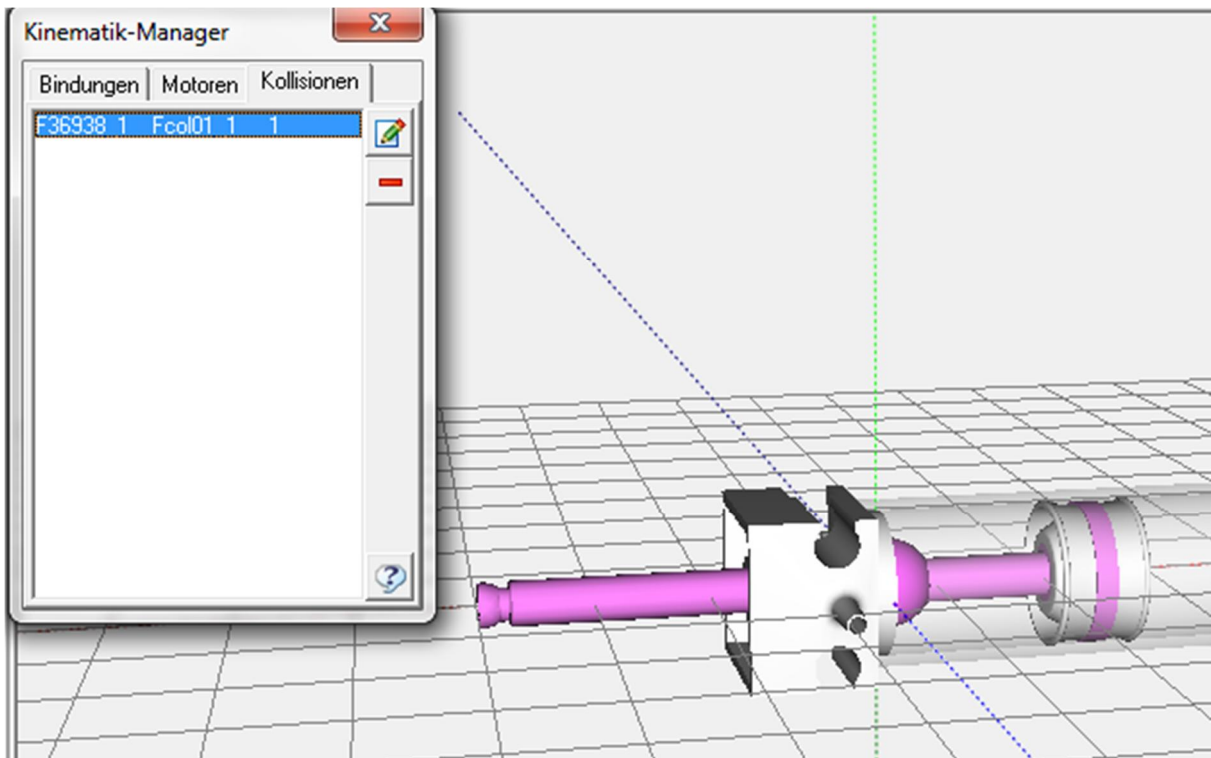


Abb. 11: Definieren der Kollision

Tipps &amp; Tricks

## fischertechnik mit dem Tablet steuern

Dirk Wölfel

*Die Idee, Endgeräte über Apps mit einem Smartphone oder Tablet zu steuern, ist nicht neu. Alles wird miteinander vernetzt und gesteuert: Bequem von der Couch, wie z. B. der Fernseher oder, sogar von außerhalb, die Raumüberwachung für unseren Nachwuchs. Dieser Trend hat auch im Modellbaubereich Einzug gehalten. Der Beitrag zeigt eine Möglichkeit auf, wie das mit einfachen Mitteln auch für fischertechnik-Modellen gelingt.*

### Hintergrund

Für die [Modelleisenbahn](#) gibt es bereits ausgereifte Anwendungen, um diese über ein Tablet zu steuern. Für die Freunde von fischertechnik hingegen gibt es derzeit nicht viel: Zwei Android-Apps für fischertechnik kann man bei Google downloaden: [RoboTXdroid](#) und [RoboTXkey](#). Beide Apps sind sehr einfach gehalten. Man kann nur wenig damit steuern; eine komfortable Steuerung, wie in der Oberfläche von Robo Pro schon lange verfügbar, ist mit diesen Apps leider nicht möglich.

Seit September 2014 wird zum Erscheinungstermin des Robo TXT Controllers ein Robo Pro-Update angekündigt, welches ein Ansteuern der Endgeräte verspricht. Zitat fischertechnik: „*Verbindung zu Smartphones/Tablet-PC über Bluetooth oder WLAN, Endgeräte können als Bedienfeld für den Controller verwendet werden. Programmierung über Robo Pro-Software.*“ Leider müssen wir wohl noch etwas auf dieses Update warten.

### Ein Tablet mit Windows 8.1

Doch es gibt eine leistungsfähige Alternative zu den Apps aus dem Google Store, die ich Euch hier vorstellen möchte: Man kann mit einem Windows 8.1-Tablet nicht nur den TXT Controller, sondern auch den TX Controller über die Robo Pro Oberfläche

steuern. Denn im Grunde ist ein Tablet ein Mini-PC mit Touchscreen (Abb. 1). Damit lassen sich eure Modelle komfortabel und drahtlos über W-LAN oder Bluetooth kontrollieren. Ein großer Vorteil hierbei ist die Möglichkeit, die Bedienoberfläche von Robo Pro zu nutzen.

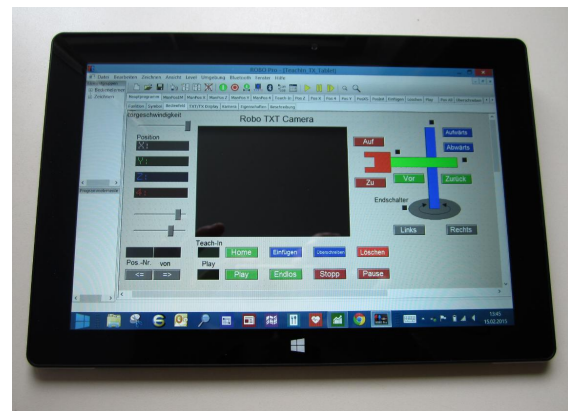


Abb. 1: Tablet 10,1“ mit Windows 8.1 und Robo Pro 4.1.1.

Anfängliche Bedenken, mit Windows 8.1 zu arbeiten, haben sich bei mir zerstreut. Mittlerweile gefällt mir das Betriebssystem sogar besser als Windows 7, da es mehr Möglichkeiten bietet.

### Die Anforderungen

Wichtig bei der Anschaffung des Tablet sind die Größe, der Speicher und die Anschlüsse. Hier eine Empfehlung für die Ausstattung:



### Technische Daten

- *Mindestgröße:* 10 Zoll (ca. 25,4 cm)
- *Arbeitsspeicher:* mind. 2 GB RAM
- *Speicher:* mind. 32 GB intern
- *Anschlüsse:* USB oder Mini-USB
- *Drahtlos:* W-LAN und Bluetooth

### Zubehör

- USB-Stick oder externes USB DVD-Laufwerk
- USB Kabel

### Optional

- Mini-SD-Karte für Speichererweiterung (mind. 16 GB)
- USB-Maus
- USB-Tastatur
- Flex-Case-Hülle zum Schutz des Tablet
- 3G-Modul für Sim-Karte

### Software

- Betriebssystem Windows 8.1 (nicht Windows RT)
- Robo Pro CD

Die Kosten für ein günstiges Tablet mit Windows 8.1 belaufen sich auf ca. 199 €. Ich habe mir das [Surftab Wintron 10,1"](#) von Trekstor gekauft, inklusive Office-365-Paket (für ein Jahr) und 1 GB Cloud-Speicher. Es ist kostengünstig und hat eine 10-Finger-Touch-Oberfläche (Abb. 2).

Es erfüllt die oben genannten Anforderungen für die Nutzung von Robo Pro. Was man jedoch nicht verschweigen sollte, ist, dass das Tablet stark spiegelt und man auch jeden Fingerabdruck darauf sieht. Dies gilt allerdings auch für andere Produkte.



Abb. 2: Surftab Wintron 10,1“

### Hinweis

Wichtig zu erwähnen ist, dass dieses Tablet auch mit Android läuft: Ein Parallelbetrieb ist möglich. Das heißt, wenn die Android-Software von fischertechnik herauskommt, braucht ihr kein neues Tablet zu kaufen. Das Betriebssystem Android ist kostenlos.

### Die Installation

Nachdem Windows 8.1 auf dem Tablet eingerichtet ist, könnt ihr mit der Robo Pro-Installation starten (Abb. 3). Ich empfehle euch dafür eine USB-Maus; damit gelingt die Installation etwas komfortabler. Außerdem braucht ihr entweder ein externes USB DVD-Laufwerk oder einen USB-Stick mit dem Robo Pro-Softwarepaket – für die Ansteuerung des Robo TXT Controllers mindestens die Version 4.1.1, für den Robo TX Controller genügt auch eine ältere Version (wie 3.2.6).

Ich habe mein Tablet um eine Mini SD Karte mit 32 GB erweitert und die Programme drauf installiert.



Abb. 3: Installation Robo Pro 4.1.1

## Verbinden mit dem Tablet

Nachdem ihr Robo Pro installiert habt, müsst ihr das W-LAN bzw. Bluetooth beim Tablet und im Robo TX/TXT Controller einschalten. Beim TXT könnt ihr über W-LAN sogar drahtlos ein Bild von der Kamera empfangen.

### Robo TXT

Den Robo TXT Controller starten. Dann auf Einstellungen – Netzwerk – W-LAN bzw. Bluetooth einschalten und den Schlüssel notieren.

### Robo TX

Den Robo TX als „Master“ konfigurieren. Dieser hat standardmäßig den Bluetooth Schlüssel „1234“.

Nun meldet ihr den Robo TXT/TX Controller mit dem jeweiligen Schlüssel beim Tablet an.

### Tablet

*W-LAN (nur TXT):*

Beim Tablet das W-LAN in den Windows-Einstellungen einschalten. Durch einen Klick auf das W-LAN Symbol unten rechts in der Taskleiste öffnen sich alle erreichbaren W-LAN-Verbindungen. Jetzt sollte der TXT in der Liste angezeigt werden. Doppelklick auf den Robo TXT, den W-LAN Schlüssel eingeben und verbinden.

### Bluetooth:

Beim Tablet Bluetooth in den Windows-Einstellungen einschalten. Suche den Robo TX/TXT Controller. Bluetooth-Schlüssel eingeben und verbinden.

### Robo Pro

Jetzt ruft ihr Robo Pro im Tablet auf. Dann in der Konfiguration von Robo Pro einstellen, mit welchem Protokoll (W-LAN, Bluetooth) ihr verbinden möchtet. Wenn alles geklappt hat, dann solltet ihr im Robo Pro-Interface-Test die Verbindung sehen (Abb. 4).

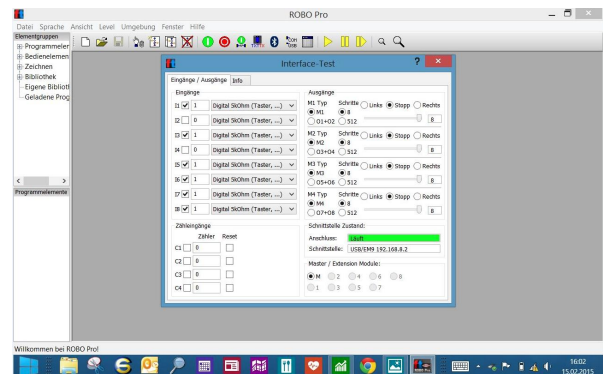


Abb. 4: RoboPro Interface-Test

Jetzt könnt ihr, wie beim PC, alles steuern. Der Unterschied ist, dass ihr über die Bedienelemente, wie Knöpfe oder Regler, eure Modelle komfortabel mit einem Touchscreen steuert.

Auf YouTube könnt ihr euch zwei Beispielvideos ansehen: [Robo TXT mit Tablet steuern](#) und [Robo TX mit Tablet steuern](#). Zum Testen habe ich euch ein Beispielprogramm ([RoboPro TX/TXT Tabletsteuerung](#)) zum Download hinterlegt.

Ich wünsche euch viel Spaß beim Steuern eurer Modelle mit dem Tablet.

Computing

## Nummernblock am Robo TX Controller

Andreas Gail

An vielen Stellen wird die Eingabe von Geheimnummern verlangt, um Zugang zu Systemen oder auch Gebäuden oder Gebäudeteilen zu erlangen. Nachfolgend wird gezeigt, wie einfach Standardkomponenten von Fremdanbietern in die Welt von Fischertechnik integriert werden können.

### Der Nummernblock

Der nachfolgend gezeigte Nummernblock ist ein Standardbauteil, welches bis heute mechanisch seit Jahrzehnten praktisch unverändert zur Verfügung stand (z. B. Conrad Elektronik 709840).



Abb.1: Nummernblock 3x4-Matrix  
Gesamtmaß 51 mm · 64 mm

Mit seiner erhabenen Tastenfeldgröße von 46 mm · 57,5 mm lässt sich der Nummernblock akzeptabel in das Fischertechnik-System integrieren. Wer es genauer eingepasst haben möchte, muss halt doch zur Feile greifen, was gemäß Abb. 2 nicht erfolgte.

Die einzelnen Tasten sind in einer Matrix von 3x4 angeordnet, d. h. es gibt 3 Spalten und 4 Zeilen, was zusammen 12 Tasten ergibt.



Abb. 2: Nummernblock mit  
mechanischer Systemintegration

### Elektrische Anschlüsse

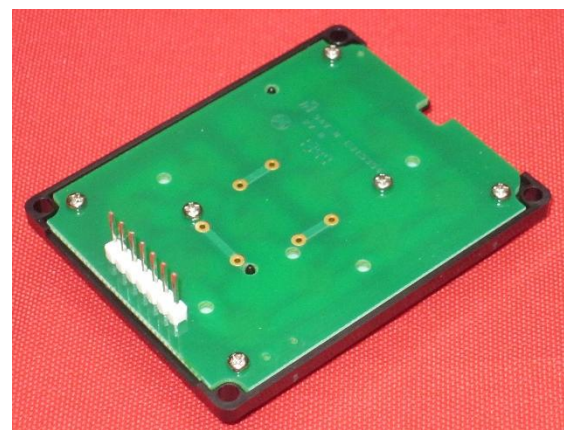


Abb. 3: Nummernblock von unten  
mit 7 Anschluss-Stiften

Betrachtet man den Nummernblock von unten, kann man sieben Anschluss-Stifte erkennen. Das erscheint etwas wenig, da es doch 12 Tasten gibt. Es kann also nicht für jede Taste einen eigenen Anschluss-Stift geben. Hier den Zusammenhang zu verstehen, ist für die spätere Programmierung wichtig. Nachfolgend wird das scheinbare Rätsel gelüftet.

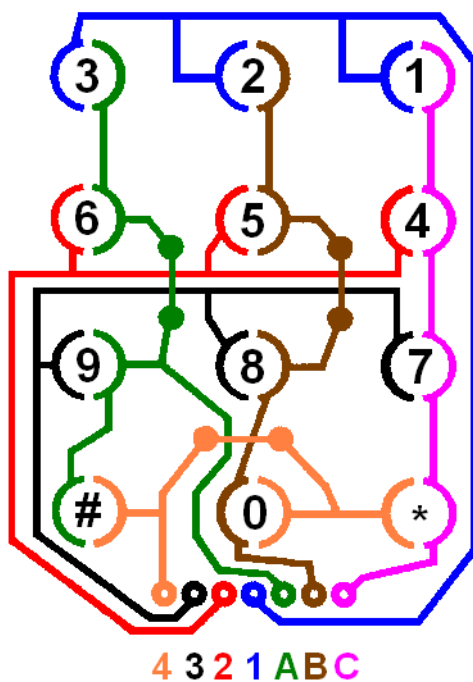


Abb. 4: Nummernblock von unten: Zusammenhang von Anschluss-Stiften und Tasten

Die Zahlen erscheinen in Abb. 4 spiegelverkehrt im Vergleich zu Abb. 1. In Abb. 4 wird die Ansicht von unten gezeigt. Die Tasten sind in den Spalten A, B und C angeordnet, sowie in den Zeilen 1, 2, 3 und 4. Wenn also z. B. die Taste "5" (Spalte B, Zeile 2, d. h. B2) gedrückt wird, werden so die Anschluss-Stifte B und 2 miteinander verbunden. Die obige Darstellung erklärt auch, warum auf dem Tastenfeld nicht beliebig viele Tasten gleichzeitig gedrückt werden dürfen, wenn eine eindeutige Auswertung der gedrückten Tasten erforderlich ist.

Bei uneingeschränkter Nutzung aller Tasten werden auf dem Robo TX Controller (RTXC) stets sieben Eingänge (I) bzw.

Ausgänge (O) benötigt. Man kann sich jedoch auch dazu entscheiden, auf einzelne oder mehrere Zeilen oder Spalten zu verzichten, um Anschlüsse auf dem RTXC zu sparen. Werden z. B. nur die Tasten „1“ bis „6“ benötigt, braucht man nur die Anschluss-Stifte 1, 2, A, B und C. Auf dem RTXC würde man in diesem Fall mit fünf Anschlüssen auskommen.

Unabhängig davon, wie viele Tasten des Nummernblocks verwendet werden sollen, werden stets Eingänge und Ausgänge auf dem RTXC benötigt. Dabei kann man sich dazu entscheiden, die Tastenreihen 1...4 mit den Eingängen (I<sub>1...4</sub>) des RTXC zu verbinden und die Tastenspalten A...C mit den Ausgängen (O<sub>1...3</sub>). Es geht jedoch auch umgekehrt, die Tastenreihen 1...4 mit den Ausgängen (O<sub>1...4</sub>) sowie die Tastenspalten A...C mit den Eingängen (I<sub>1...3</sub>) zu nutzen. Je nachdem wie man sich entschieden hat, hat man einen freien Eingang oder Ausgang mehr zur Verfügung. Weiterhin ist die getroffene Entscheidung in der Software des RTXC zu berücksichtigen.

Es gilt folgende Tabelle hinsichtlich der Anschluss-Stifte für das Drücken einzelner Tasten:

Taste	Anschluss-Stifte
1	C1
2	B1
3	A1
4	C2
5	B2
6	A2
7	C3
8	B3
9	A3
0	B4
#	A4
*	C4

Tab. 1: Zusammenhang von gedrückten Tasten und Verbindung der Anschluss-Stifte

## Kabelverbindungen

Natürlich kann man an die Anschluss-Stifte einfach Kabel anlöten. Im vorliegenden Fall wurden folgende Kabeladapter hergestellt:



Abb. 5: Verbindungskabel zwischen Nummernblock und fischertechnik Steckern

Für den Gesamtaufbau ergibt sich Folgendes:

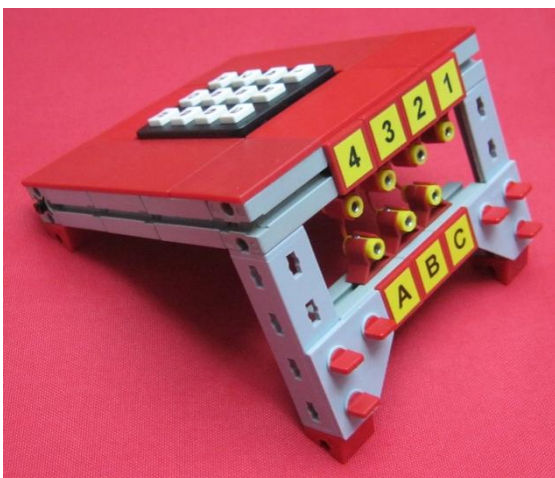
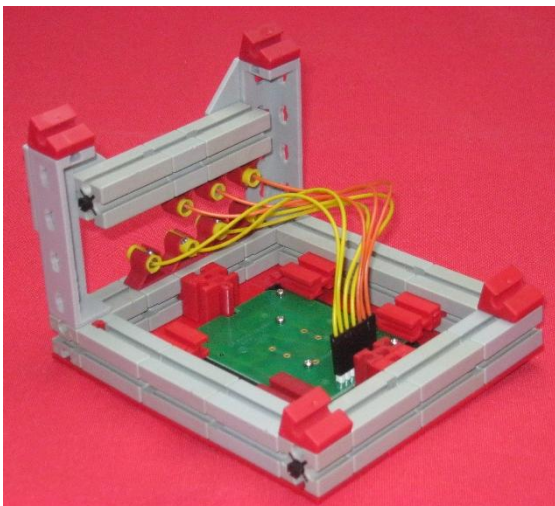


Abb. 6: Nummernblock mit Anschlüssen

Die Stecker für die Anschluss-Stifte gibt es z. B. bei Conrad Elektronik unter der Artikelnummer 1182193.

Vorsichtshalber sei erwähnt, dass der Nummernblock hinsichtlich der Schaltung von Strömen recht limitiert ist. 30 mA sollen gemäß Herstellerangaben nicht überschritten werden. Das ist bei der Nutzung mit dem RTX C kein Problem. Die direkte Ansteuerung von Glühlampen oder Motoren über den Nummernblock würde diesen vermutlich schnell zerstören.

## Programmierung

Vorab sei erwähnt, dass der Programmablauf in gewisser Weise zeitkritisch ist, um eine verlässliche Eingabe zu ermöglichen. Gut funktioniert das Programm im online-Modus, d. h. mit PC-Verbindung, wenn die Verbindung über USB-Kabel besteht. Bei einer Verbindung über Bluetooth kommt es offenbar zu Zeitproblemen aufgrund der Funkverbindung – mit einem ungenügenden Gesamtergebnis. Gut klappt es auch in offline-Modus, d. h. das Programm wird vom RTX C ausgeführt, gänzlich ohne PC.

Nachfolgend wird beschrieben, wie die Tasteneingaben erkannt werden. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die Funktionalitäten in verschiedene Unterprogramme (UP) aufgeteilt. Gezeigt wird die Variante unter Nutzung der Ausgänge  $O_{1...3}$  sowie den Eingängen  $I_{1...4}$ . Gemäß Abb. 4 und 5 werden die Ausgänge mit A, B und C verbunden und die Eingänge mit 1, 2, 3 und 4.

## Hauptprogramm

Das Hauptprogramm gemäß Abb. 7 besteht im Wesentlichen aus der einmaligen Definition der Variablen *DigitCount*, *TotalResult* und *DoEnter*. Es folgt die Hauptprogrammenschleife, die aus einigen Unterprogrammaufrufen besteht. Diese Unterprogramme werden beim Einlesen eines einzigen Tastendrucks alle durchlaufen. Bei

der Eingabe von Ziffern werden diese hintereinander geschrieben, und unter *TotalResult* gespeichert. Welche Stelle von *TotalResult* als nächste beschrieben werden soll wird unter *DigitCount* mitgezählt. Der Beginn einer neuen Eingabe kann durch die Taste „\*“ angezeigt werden. Dabei werden *TotalResult* = 10000 und *DigitCount* = 0 wieder auf die Starteinstellung zurückgesetzt. Die Taste „#“ ist die Bestätigung des Eingabeabschlusses (Enter).

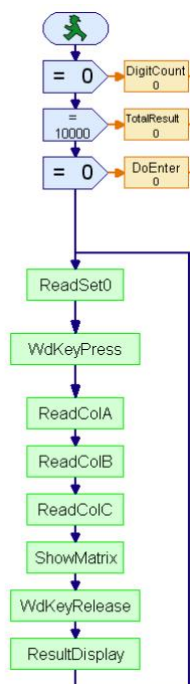


Abb. 7: Hauptprogramm zum Auslesen der Tasteneingaben über RTXC

**Unterprogramm ReadSet0**

Dies ist ein eher langweiliges Unterprogramm: Hier werden alle zwölf Variablen zum Einlesen der Tastenbetätigung auf null zurückgesetzt. Trotzdem ist das wichtig, um Lesefehler nach der Betätigung einer vorherigen Taste zu vermeiden.

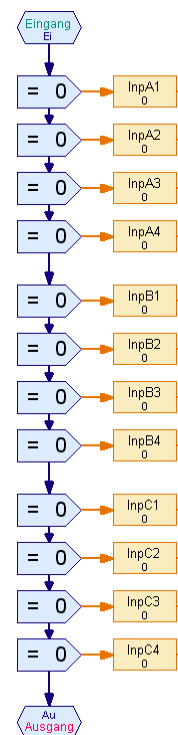


Abb. 8: Unterprogramm ReadSet0

**Unterprogramm WdKeyPress**

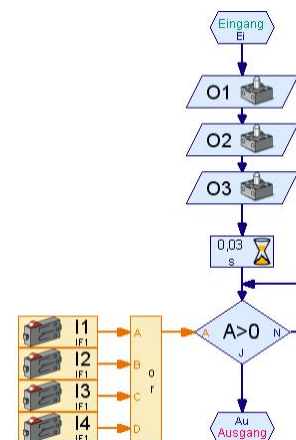


Abb. 9: Unterprogramm WdKeyPress

Dieses Unterprogramm gemäß Abb. 9 hat die Funktion eines Wachhunds (watchdog [1]). Das Programm wartet hier so lange, bis eine Taste gedrückt wurde. Damit das Auslesen überhaupt funktioniert, werden alle 3 verwendeten Ausgänge (Spalten A, B und C) auf Masse gelegt, d. h. mit 0 V beschaltet. So ist es möglich, an den Eingängen einen Tastendruck zu erkennen. Um keinen Fehler zu provozieren, muss 0,03 s = 30 ms

gewartet werden, bis der RTXC die Ausgänge auch wirklich geschaltet hat.

### Unterprogramm ReadColA

Nun werden die gedrückten Tasten der Spalte A ausgelesen und in den Variablen *InpA1*, *InpA2*, *InpA3* und *InpA4* gespeichert (siehe Abb. 10). Im Falle einer gedrückten Taste wird unter der zugehörigen Variable eine 1 gespeichert, andernfalls ein 0. Um nur die Spalte A auszulesen wird nur der Ausgang O<sub>1</sub> auf 0 V gesetzt. Auch hier wird wieder 30 ms gewartet, um einen Lesefehler zu vermeiden.

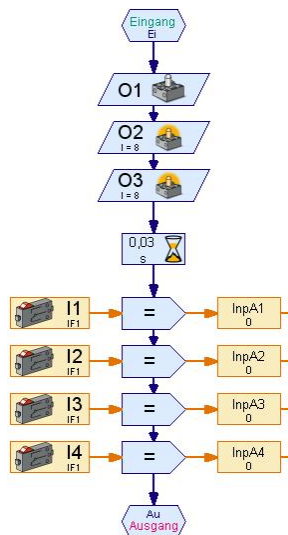


Abb. 10: Unterprogramm ReadColA

Es folgen die Unterprogramme *ReadColB* und *ReadColC* in analoger Weise. Dabei werden die Variablen *InpB1*, *InpB2*, *InpB3* und *InpB4* sowie *InpC1*, *InpC2*, *InpC3* und *InpC4* beschrieben. Zusammen hat man dann schließlich alle Spalten ausgewertet. Es mag manchem vielleicht umständlich vorkommen, 12 Variablen nur mit 1 oder 0 zu beschreiben. Es hat jedoch den Vorteil, die drei Spalten mit maximaler Geschwindigkeit hintereinander auszuwerten – innerhalb von 0,1 s. Das ist dann auch gleichzeitig die Mindestdauer, für die eine Taste gedrückt sein muss, um eindeutig ausgelesen zu werden. Schnelleres Tippen führt also zu Lesefehlern. Das wiederum muss man allerdings erstmal hinbekommen.

### Unterprogramm ShowMatrix

Dieses ist nur eine Funktion zur Anzeige aller Variablen die mit den Unterprogrammen *ReadColA*, *ReadColB* und *ReadColC* ausgelesen wurden.

### Unterprogramm WdKeyRelease

Dieses Unterprogramm ist fast identisch mit dem Unterprogramm *WdKeyPress*. Der einzige Unterschied ist, dass in der Entscheidungsraute J und N vertauscht sind. Hier wird also gewartet, bis die zuletzt gedrückte Taste wieder losgelassen wird.

### Unterprogramm ConvMatrix

Das Unterprogramm *ConvMatrix* ist Bestandteil eines weiteren Unterprogramms *ResultDisplay* welches nachfolgend beschrieben wird. Es dient dazu, aus den schnell ausgelesenen Variablen *InpA1*, *InpA2*, *InpA3*, *InpA4*, *InpB1*, *InpB2*, *InpB3*, *InpB4*, *InpC1*, *InpC2*, *InpC3* und *InpC4* das Ergebnis des Tastendrucks in einer einzigen Variablen zusammenzufassen.

Bei den Ziffern wird jeweils der Ziffernwert ausgegeben. Bei der Taste „\*“ wird der Wert 99 zurückgegeben und bei der Taste „#“ der Wert 98. Weiterhin ist sichtbar, dass die Einzelauswertungsergebnisse addiert werden. Sollten also zwei oder mehr Tasten gleichzeitig gedrückt worden sein, so liegt dieses Additionsergebnis nicht im Bereich 0...9 und beträgt auch sicher nicht 98 oder 99. Auf diese Weise können fehlerhafte Eingaben erkannt werden. Wie auf Fehler reagiert wird, ist im nachfolgenden Unterprogramm *ResultDisplay* ersichtlich.

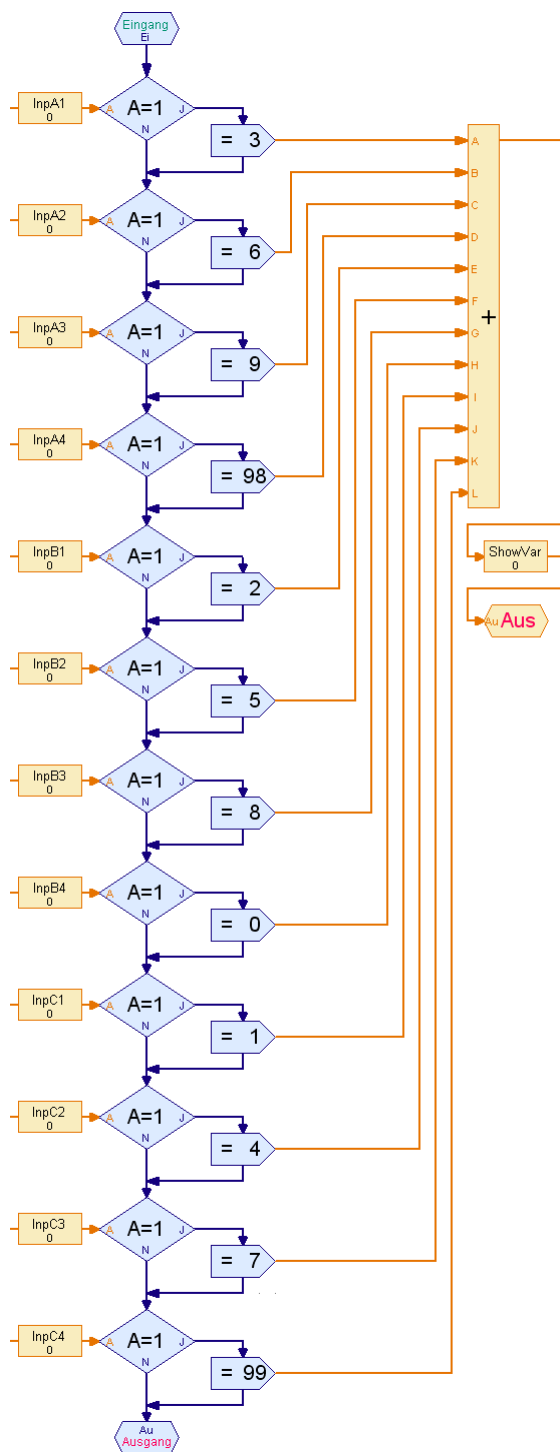


Abb. 11: Unterprogramm ConvMatrix

### Unterprogramm ResultDisplay

Dieses zunächst vielleicht kompliziert erscheinende Unterprogramm gemäß Abb. 12 ist ein schönes Beispiel, dass Mathematik durchaus helfen kann, Dinge einfacher zu machen. Es gelten folgende mathematische Zusammenhänge:

$$10^0 = 1$$

$$10^1 = 10$$

$$10^2 = 100$$

$$10^3 = 1000$$

Ausgehend vom ausgewerteten Ergebnis, welches unter *NextKey* gespeichert ist, und dem Zähler *DigitCount*, in dem mitgezählt wird, wie viele Ziffern einer Zahl inzwischen eingegeben wurden (vier Ziffern,  $DigitCount = 0...3$ ) kann nun der bislang unter *TotalResult* eingegebene Geheimcode schnell ergänzt werden. Beispielhaft ergibt sich folgende Rechnung bei einem angenommenen Zwischenstand:

$$TotalResult_{(alt)} = 10089$$

$$DigitCount = 2$$

$$NextKey = 5$$

$$NextKey \cdot 10^{DigitCount} = 500$$

$$TotalResult_{(neu)} = TotalResult_{(alt)} + 500$$

$$TotalResult_{(neu)} = 10089 + 500$$

$$TotalResult_{(neu)} = 10589$$

Diese Berechnung ist der Kern der Bildung des Eingabeergebnisses. Die Darstellung der Berechnung sieht komplizierter aus, weil die Zahlen von Ganzzahlen zu Gleitkommazahlen umgeformt werden müssen und später wieder zurück.

Diese Berechnung wird im Übrigen nur durchgeführt, wenn die letzte Tastenauswertung eine Ziffer im Bereich 0...9 ergeben hat. Außerdem wird noch die Auswertung der Werte 98 und 99 vorgenommen. Alle anderen Auswertungsergebnisse werden einfach übergangen. Im Falle des Auswertungsergebnisses 98 (Taste „#“) wird die Variable *DoEnter* = 1 gesetzt. Dieses kann an einer anderen Programmstelle ausgewertet, die parallel zum Hauptprogramm läuft. Hierbei könnte dann der eingegebene Code *TotalResult* mit einem geheimen Code verglichen werden.



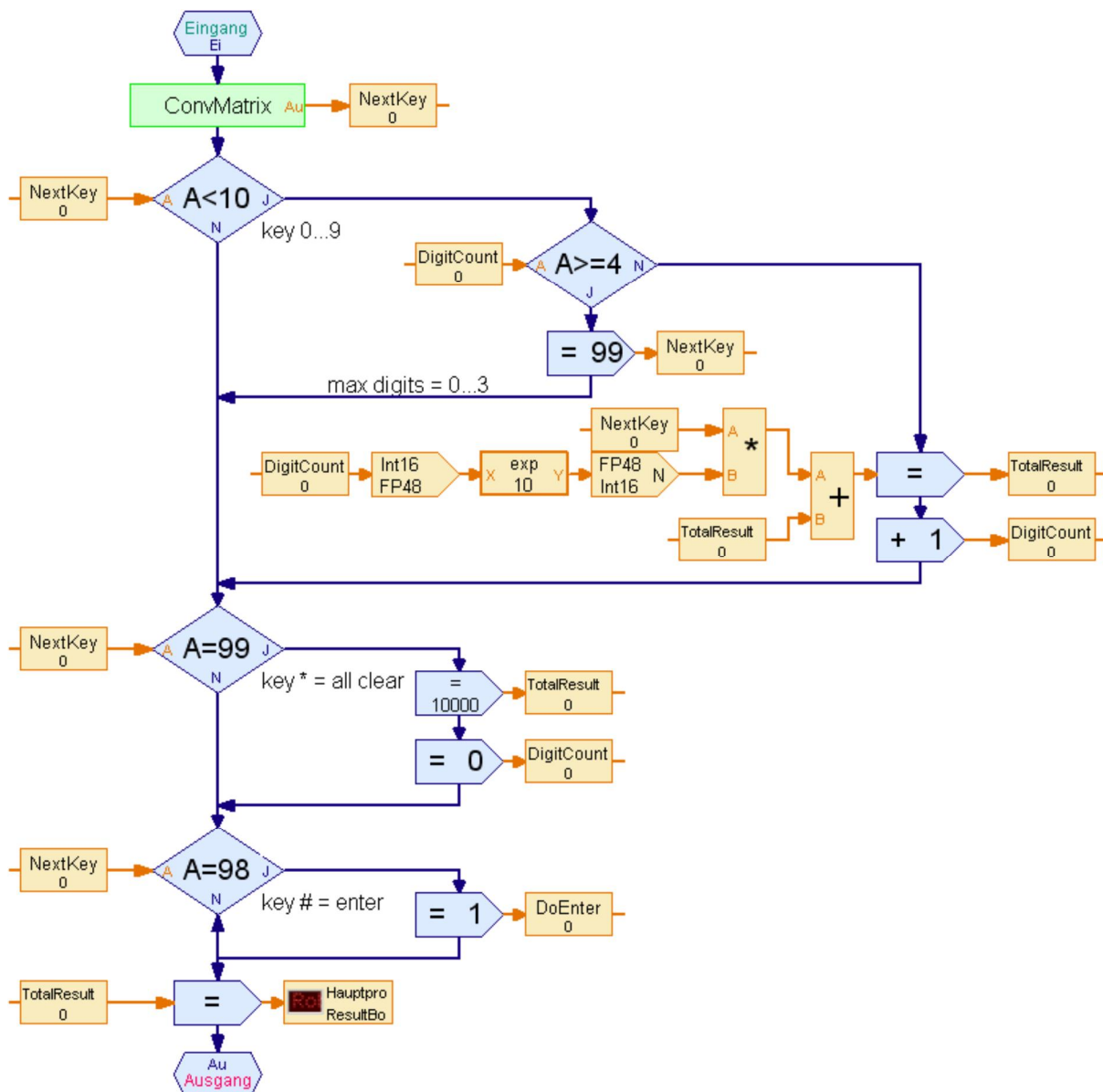


Abb. 12: Unterprogramm ResultDisplay

## Anwendungsbeispiel Zugangskontrolle

Hier nun ein Beispiel, wie der Nummernblock in eigene Modelle eingebaut werden kann. Nach folgender Eingabe öffnet sich das Tor, bleibt 15 Sekunden geöffnet und schließt sich wieder mit einem Warnton.

\* = Eingabe Beginn

1234 = gewählter „geheimer“ Zugangscod

# = Bestätigung der Eingabe

## Quellen

- [1] Wikipedia: [Watchdog](#).
- [2] Caseblo Cosijal: [fischertechnik Kontoautomat](#). YouTube, 2013
- [3] kinderundtechnik: [fischertechnik ROBO TX Controller + Keypad + LC Display I²C](#). YouTube, 2013.
- [4] Gail, Andreas: [fischertechnik Nummernblock Zugangskontrolle](#). YouTube, 2015.

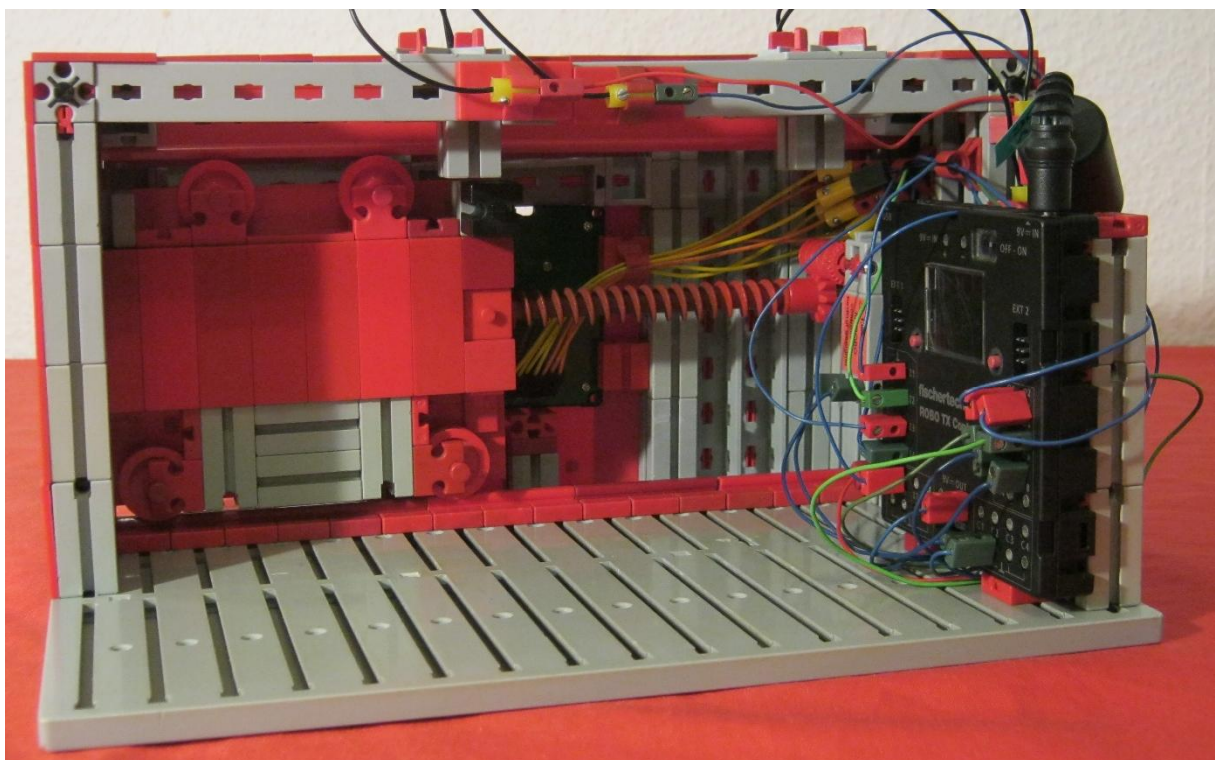
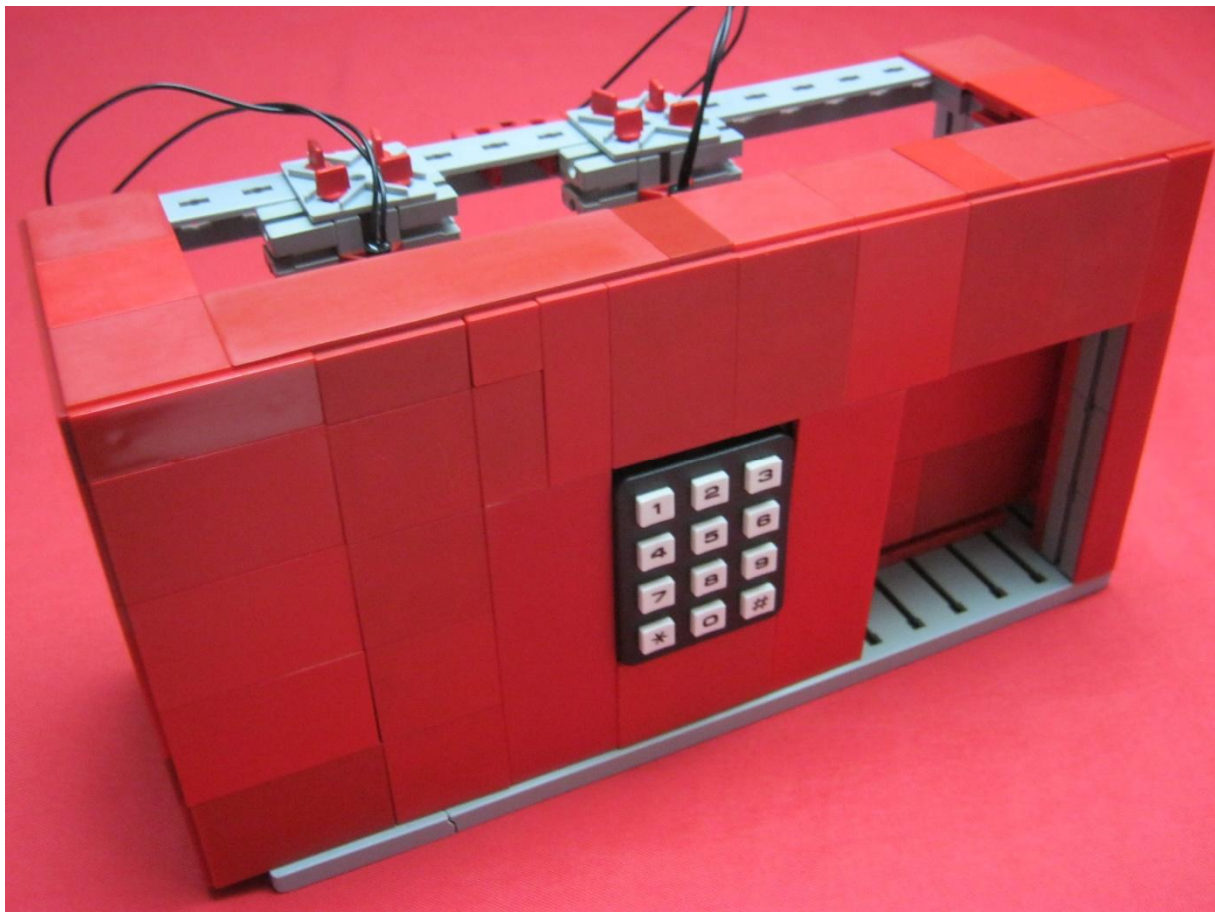


Abb. 13 und 14: Tür mit Codeeingabe und Ansicht von hinten mit Robo TX Controller